

Funktionaalisten materiaalien mahdollisuudet lujitemuovisessa toimirakenteessa

Funktionaalisten materiaalien mahdollisuudet lujitemuovisessa toimirakenteessa

Merja Sippola, Kim Calonius, Jukka-Pekka Karjalainen,
Juha Kortelainen, Mikko Lehtonen, Antti Timperi & Ismo Vessonen
VTT Tuotteet ja tuotanto

Timo Brander & Patrik Söderström
Teknillinen korkeakoulu

Lauri Kantola
Oulun Yliopisto

ISBN 951-38-6476-6 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6477-4 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

Copyright © VTT 2004

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Tuotteet ja tuotanto, Otakaari 7 B, PL 1705, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7139

VTT Industriella System, Otakaari 7 B, PB 1705, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7139

VTT Industrial Systems, Otakaari 7 B, P.O.Box 1705, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 7139

Toimitus Leena Ukoski

Viimeistely Marja-Liisa Wahlström ja Tarja Haapalainen

Otamedia Oy, Espoo 2004

Sippola, Merja; Brander, Timo; Calonius, Kim; Kantola, Lauri; Karjalainen, Jukka-Pekka; Kortelainen, Juha; Lehtonen, Mikko; Söderström, Patrik; Timperi, Antti & Vessonen, Ismo. Funktionaalisten materiaalien mahdollisuudet lujitemuovisissa toimirakenteissa [Potentiality of functional materials in smart structures made of fiber reinforced plastics]. Espoo 2004. VTT Tiedotteita – Research Notes 2250. 216 s.

Avainsanat smart materials, smart structures, adaptive structures, composite structures, fiber reinforcement, polymers, shape memory alloys, piezoelectric materials, magnetorheological materials, sensors

Tiivistelmä

Julkaisussa käsitellään funktionaalisten materiaalien ominaisuuksia, kykyjä, rajoituksia ja käyttötapoja toimirakenteissa, toimirakenteen luomiseen tarvittavia tekniikoita ja menetelmiä sekä toimirakennetekniikoiden tulevaisuutta ja kehitystarpeita. Julkaisun fokus on lujitemuovisissa toimirakenteissa.

Toimirakenne, tai älykäs tai adaptiivinen rakenne, kykenee havainnoimaan ympäristöään, omaa kuntoaan ja kuormituksiaan sekä reagoimaan niihin aktiivisesti. Rakenne voi reagoida muuttamalla mekaanisia ominaisuuksiaan (muotoa, jäykkyyttä, vaimennuskykyä, jne.) ja/tai aktiivisilla voimavaikutuksilla. Toimirakenteen mahdollisia etuja perinteiseen rakenteeseen verrattuna ovat mm. toiminnallisuuden paraneminen, eliniän huomattavakin kasvu, korjauskustannusten pieneneminen ja rakenteen keveneminen.

Funktionaalisilla materiaaleilla, kuten muistimetalleilla sekä pietsosähköisillä ja magnetoreologisilla materiaaleilla, on merkittävä potentiaali toimirakenteissa sekä anturi- että toimilaitesovelluksissa. Toimirakenteen luominen on varsin haastava monitekninen tehtävä, jossa tarvitaan monen insinöörialan osaamista, kuten materiaalitiedettä, rakenteiden mekaniikkaa, mallitusta, säätötekniikkaa, jne. Teknologioiden integrointiin liittyvä osaaminen ja tätä tukeva mallinnus ja simulointi ovat erityisen tärkeitä tekijöitä, kun tavoitellaan luotettavia ja optimoituja moniteknisiä rakennekonstruktioita.

Luku 1 esittelee funktionaalisia materiaaleja ja niiden ominaisuuksia. Luku 2 esittelee eri tapoja, joilla rakenne voi sopeutua muuttuviin olosuhteisiin funktionaalisten materiaalien avulla. Käsiteltäviä aloja ovat mm. talon- ja sillanrakennus, koneet ja laitteet sekä kulkuvälineet, joihin paneudutaan lukuisten kirjallisuudesta poimittujen esimerkkien avulla. Luvussa 3 esitellään yleisellä tasolla älykkäiden rakenteiden eri tekniikoiden kehitystrendejä ja -tarpeita sekä kuvataan toimirakenteita osana teknisten laitteiden älykkyyttä hyödyntävää kokonaisjärjestelmää. Luvussa 4 esitetään työkaluja toimirakenteiden mallinnukseen ja simulointiin. Luvussa 5 kuvataan toimirakenteen ohjauksen perusperiaatteet.

Sippola, Merja; Brander, Timo; Calonijs, Kim; Kantola, Lauri; Karjalainen, Jukka-Pekka; Kortelainen, Juha; Lehtonen, Mikko; Söderström, Patrik; Timperi, Antti & Vessonen, Ismo. Funktionaalisten materiaalien mahdollisuudet lujitemuovisessa toimirakenteessa [Potentiality of functional materials in smart structures made of fiber reinforced plastics]. Espoo 2004. VTT Tiedotteita – Research Notes 2250. 216 p.

Keywords smart materials, smart structures, adaptive structures, composite structures, fiber reinforcement, polymers, shape memory alloys, piezoelectric materials, magnetorheological materials, sensors

Abstract

This publication presents properties, benefits and limitations of smart materials and potential ways of using them in adaptive structures. It also sheds light on the techniques and methods for creating adaptive structures and the future and development needs of adaptive structures. The focus is in adaptive fiber reinforced polymer composite structures.

Smart, or adaptive, structure can monitor its environment and its own condition and loads, and adapt to changes in these. The adaptation may involve large changes of the mechanical properties (shape, stiffness, damping etc.) of the structure and/or exertation of active forces. This provides possibilities for creating structures with increased performance, considerably longer life time, smaller maintenance costs and/or mass savings.

Smart materials, like shape memory alloys and piezoelectric and magnetorheological materials, have great potential in sensor and actuator usage in adaptive structures. Design and implementation of an adaptive structure is a challenging multitechnical task that requires know-how from several fields of engineering, like materials engineering, structural mechanics, simulation, control engineering etc. System integration know-how along with supporting modelling and simulation are especially important abilities in order to achieve reliable and optimized system designs.

Chapter 1 illustrates the properties of various smart materials. Chapter 2 shows the many ways a structure can adapt its mechanical properties using smart materials. Structures from civil engineering to mechanical engineering and vehicle engineering are discussed with examples from literature. In Chapter 3 general development trends and needs of various smart structures related technologies are presented and some light is also shed on the role of adaptive structures as a part of larger intelligent and communicating systems. Chapter 4 presents tools for modelling and simulation of adaptive structures. Chapter 5 presents the basics of control of adaptive structures.

Alkusanat

Tämä julkaisu on tehty Tekesin MASINA-ohjelmaan kuuluvassa Toimirakenteet-projektissa.

Tekijät osoittavat lämpimät kiitokset kaikille raportin syntymistä edistäneille henkilöille.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	10
2. Materiaalit ja tekniikat älykkäissä kuitukomposiittirakenteissa.....	11
2.1 Komposiitit.....	13
2.1.1 Materiaalit.....	13
2.1.1.1 Perinteiset materiaalit kuitukomposiiteissa.....	14
2.1.1.2 Uudet materiaalit.....	15
2.1.2 Komposiittien räätälöinti.....	15
2.2 Aktuaattorit.....	16
2.2.1 Materiaalit.....	16
2.2.1.1 Pietsokeraamit.....	19
2.2.1.2 Pietsopolymeerit.....	21
2.2.1.3 Pietsokuidut.....	21
2.2.1.4 Elektrostriktiiviset materiaalit.....	22
2.2.1.5 Muistimetallit.....	23
2.2.1.6 Magnetostriktiiviset materiaalit.....	24
2.2.1.7 Elektro- ja magnetoreologiset materiaalit.....	25
2.2.2 Rakennratkaisut.....	25
2.2.2.1 Pietsokeraamit.....	26
2.2.2.2 Pietsopolymeerit.....	33
2.2.2.3 Elektrostriktiiviset materiaalit.....	34
2.2.2.4 Muistimetallit.....	34
2.2.2.5 Magnetostriktiiviset materiaalit.....	34
2.2.2.6 Elektro- ja magnetoreologiset elastomeerit.....	34
2.2.3 Saavutettavat liikealueet.....	35
2.2.4 Saavutettavat jännitykset.....	36
2.2.5 Aktuaattorin nopeus.....	37
2.2.6 Aktuaattoreiden integrointi.....	37
2.3 Anturit.....	39
2.3.1 Materiaalit ja rakennratkaisut.....	39
2.3.1.1 Pietsosähköiset materiaalit.....	39
2.3.1.2 Kuituoptiikka.....	41
2.3.1.3 Hiilikuitu.....	42
2.3.2 Antureiden kiinnittäminen rakenteeseen.....	42
2.3.3 Mittasuureet.....	43
2.3.3.1 Asema.....	43

2.3.3.2	Venymä	44
2.3.3.3	Kiihtyvyys	44
2.3.3.4	Lämpötila	44
2.3.3.5	Itsediagnostiikka	44
2.3.4	Mittaustarkkuus	45
2.3.5	Häiriöt	45
2.3.6	Perinteiset anturit	45
2.4	Älyrakenteen toiminnan mallinnus ja seuranta	46
2.4.1	Vaste	47
2.4.1.1	Vaste ulkoiseen herätteeseen	47
2.4.1.2	Vaste sisäiseen herätteeseen	47
2.4.2	Eheys	47
2.4.2.1	Eheyden havaittavuus	48
2.5	Itsekorjaavat rakenteet	48
2.6	Käyttörajoitukset	49
2.6.1	Liike- ja voima-alueet	49
2.6.2	Lämpötilat	49
2.6.3	Vaurioherkkyys	50
2.6.4	Korjattavuus	51
2.6.5	Pitkäkestoisuusominaisuudet	51
2.6.6	Hinta	52
2.6.7	Valmistustekniikat	52
2.6.8	Ympäröivät kentät	53
3.	Funktionaalisten materiaalien soveltamistapoja ja käyttöesimerkkejä toimirakenteissa	54
3.1	Sovellusalueet	56
3.1.1	Ympäristön havainnointi	56
3.1.2	Oman liikkeen havainnointi	57
3.1.3	Muodon muuttaminen tai muodonmuutoksen estäminen	58
3.1.4	Aktiivinen värähtelynvaimennus vastaliikettä tuottamalla	62
3.1.5	Jäykkyiden muuttaminen	64
3.1.6	Vaimennuksen muuttaminen	66
3.1.7	Värähtelyn eristäminen	70
3.1.8	Meluntorjunta	72
3.1.9	Kunnonvalvonta	74
3.1.10	Liitokset	76
3.1.11	Venttiilit	78
3.1.12	Anturien käyttövoiman ottaminen rakenteen muodonmuutoksista (<i>power harvesting</i>)	78
3.1.13	Vaurion itsekorjaus (<i>self healing</i>)	78
3.2	Käyttökohteet	79

3.2.1	Kuljetusvälinetekniikka.....	79
3.2.1.1	Lentokoneet ja helikopterit	80
3.2.1.2	Laivat ja veneet	90
3.2.1.3	Maakulkuneuvot.....	91
3.2.2	Rakennustekniikka	96
3.2.2.1	Sillat	96
3.2.2.2	Talonrakennus	98
3.2.2.3	Mastot ja tornit.....	99
3.2.2.4	Tuulivoimalat	100
3.2.2.5	Offshore-rakenteet	103
3.3	Koneenrakennus	103
3.4	Avaruustekniikka.....	104
3.5	Prosessitekniikka	107
3.6	Urheiluvälinetekniikka	107
3.7	Robottiikka	108
3.8	Lääketieteen sovellukset.....	110
3.9	Yhteenvedoa funktionaalisten materiaalien soveltamistavoista toimirakenteissa ..	110
4.	Toimirakenteiden teknologiat ja niiden kehitystrendit	113
4.1	Toimirakenne – älykäs kone.....	113
4.2	Anturit ja mittaustiedon käsittely	115
4.3	Toimilaitteet ja rakennekonseptit	117
4.4	Päätely-, säätö- ja ohjausjärjestelmät	118
4.5	Kommunikaatio	120
4.6	Mallinnus, simulointi, testaus ja järjestelmätason yhteensovittaminen	121
5.	Pietsosähköisten materiaalien FEM-mallinnus ABAQUS-ohjelmalla	124
5.1	Yleistä.....	125
5.2	Konstitutiivinen malli	125
5.3	Kinematiikka	127
5.4	Systeemyhtälöt	128
5.5	Pietsosähköinen analyysi.....	129
5.5.1	Ratkaisuproseduurit.....	129
5.5.2	Alkutila ja -ehdot.....	130
5.5.3	Reunaehdot.....	130
5.5.4	Kuormat.....	130
5.5.5	Ennaltamäärätyt kenttämuuttujien arvot	130
5.5.6	Materiaaliominaisuudet.....	131
5.5.7	Elementit	131
5.5.8	Tulostiedot.....	132
5.5.9	Pietsosähköisen analyysin sapluuna.....	132
5.6	Esimerkkianalyysi	133

5.7 Aktiivisen säädön toteuttaminen ABAQUS-ohjelmistossa	135
6. Joustavien mekaanisten järjestelmien säädön simulointi.....	136
6.1 Johdanto.....	136
6.2 Mekanismin mallintaminen.....	138
6.2.1 MSC.ADAMS-ohjelmisto.....	138
6.2.2 Mekanismin mallin luominen	139
6.2.3 Joustavan rakenteen mallintaminen	140
6.2.4 Säädön mallintaminen.....	141
6.2.5 Simulointi.....	141
6.2.6 Esimerkki: telakoelaitteen värähtelynvaimentimen säädön simulointi.....	142
7. Funktionaalisten materiaalien ja lujitemuovisten toimirakenteiden säätötekniikoista.....	147
7.1 Johdanto.....	148
7.2 Yleistä toimilaitteiden ohjauksesta.....	149
7.2.1 Ohjauksen ja säädön erot	150
7.2.2 Takaisinkytketty säätö.....	151
7.2.3 Eteenpäinkytketty säätö	154
7.2.4 Kehittyneet menetelmät	155
7.2.5 Sumea säätö.....	157
7.3 Funktionaalisten materiaalien ohjausjärjestelmät.....	159
7.3.1 Ohjausjärjestelmän osat	159
7.3.1.1 Anturit	160
7.3.1.2 Toimilaitteet.....	163
7.3.1.3 Vahvistimet	166
7.3.1.4 Mittauskortit.....	168
7.3.1.5 Signaalinkäsittelystä.....	171
7.3.2 Pietsomateriaalien ohjaustavoista	173
7.3.3 Säätöjärjestelmän dynamiikka	176
7.4 Muodohallinta	179
7.4.1 Muodohallinnan anturit.....	180
7.4.2 Muodohallinnan toimilaitteet	181
7.4.3 Muodohallinnan menetelmistä.....	182
7.4.4 Kuvaus tarkkuustarttuja-sovelluksen ohjausjärjestelmästä	183
7.5 Rakenteiden värähtelyn hallinta	186
7.5.1 Värähtelynhallinnan anturit.....	187
7.5.2 Värähtelynhallinnan toimilaitteet.....	188
7.5.3 Värähtelynhallinnan menetelmistä	189
7.6 Yhteenvetoa ja ajatuksia toimirakenteiden ohjauksesta.....	190
8. Johtopäätökset.....	191
Lähteet	192

1. Johdanto

Älykkyys, tai adaptiivisuus, on voimakkaasti tulossa monenlaisiin rakenteisiin niin talon- ja sillanrakennuksessa kuin koneissa ja kuljetusvälineissäkin. Toimirakenne, tai adaptiivinen rakenne, kykenee tarkkailemaan ympäristöään, omaa kuntoaan ja kuormituksiaan sekä sopeutumaan niihin muuttamalla mekaanisia ominaisuuksiaan (muotoaan, jäykkyyttään, vaimennuskykyään, jne.) ja/tai tuottamalla aktiivisia voimavaikutuksia. Näin rakenne voi täyttää tehtävänsä paremmin, sen elinikä voi kasvaa huomattavasti, korjauskustannuksissa voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä tai rakenne voidaan tehdä perinteistä rakennetta kevyemmäksi.

Erityisen lupaavia materiaaleja älykkäiden rakenteiden kannalta ovat erilaiset funktionaaliset materiaalit. Yhdistämällä niitä lujitemuovikomposiitteihin, jotka jo sinänsä antavat suunnittelijalle enemmän mahdollisuuksia rakenteen toiminnalliseen räätälöintiin kuin perinteiset isotrooppiset materiaalit, voidaan luoda aivan uudentyyppisiä rakenteita ja tuotteita.

VTT:n teemassa Älykkäät Tuotteet ja Järjestelmät sekä VTT:n, TKK:n ja Oulun yliopiston yhteisessä MASINA-teknologiaohjelmaan kuuluvassa projektissa Toimirakenteet paneudutaan mm. adaptiivisen lujitemuovisen toimirakenteen toteutukseen ja testaamiseen. Tarvittava teknologia on suurelta osin jo olemassa, mutta kaupallisia sovelluksia on vielä suhteellisen vähän.

Tämä julkaisu esittelee eri funktionaalisten materiaalien ominaisuuksia, kykyjä, rajoituksia ja käyttötapoja toimirakenteissa. Vaikka julkaisun fokus on lujitemuovisessa toimirakenteessa, julkaisussa esitellään toimirakennetekniikoita laajemminkin ja pyritään luotaamaan alan kehitystrendejä ja visioimaan toimirakenteiden tulevaisuutta. Julkaisu pyrkii valottamaan toimirakenteen luomisen moniteknistä perusluonnetta ja siksi se sisältää materiaalien ja rakenteiden ohella myös osiot toimirakenteen mallituksesta ja säädöstä.

Julkaisu pyrkii toimimaan yhtenä siltana toimirakenteiden tutkimuksen ja suomalaisen yritysmaailman välillä ja antamaan yritysmaailman edustajille ideoita uusien tuotteiden kehittämiseen lujitemuovirakenteeseen sulautetun rakenneälyn pohjalta. Tämän lisäksi julkaisu voi toimia myös perusoppimateriaalina toimirakennetekniikoista; erityisesti materiaalien, mallituksen ja säädön osalta.

2. Materiaalit ja tekniikat älykkäissä kuitukomposiittirakenteissa

Patrik Söderström

Terminologia

SMA	Shape Memory Alloy, muistimetalli
m ³	m ³ , kuutiometri
ϵ	Strain, venymä
σ	Stress, jännitys
η	Efficiency, hyötysuhde
f _{max}	Frequency, taajuus
ρ	Density, tiheys
PZT	lyijy-zirkoni-titaani, pietsosähköinen materiaali
PVDF	polyvinyylideenifluoridi, pietsosähköinen materiaali
Blocked Force	ulkoinen voima, jolla aktuaattorin siirtymä estyy
Free displacement	aktuaattorin siirtymä ilman ulkoista kuormitusta
DPA	Direct piezoelectric actuator, suora pietsoaktuaattori
APA	Amplified piezoelectric actuator, vahvistettu pietsoaktuaattori
UPA	Ultrasonic piezoelectric actuator, ultraäänipietsoaktuaattori
LPM	Linear piezoactive motor, lineaaripietsomoottori
NiTi	nikkeli-titaani-seos, muistimetallimateriaali
NiTiNOL	NiTi-metalliseos, joka on kehitetty Yhdysvaltain laivaston tutkimuskeskuksessa
Terfenol-D	eräs kaupallisesti tunnettu magnetostriktiivinen materiaali
THUNDER	Thin Unimorph Driver
LIPCA	Lightweight Piezo-Composite Curved Actuator
RAINBOW	Reduced and Internally Biased Oxide Wafer
PPA	Parallel Prestressed Actuator
CNES	Ranskan avaruushallinto
t	paksuus
d ₃₁ ,d ₃₃	pietsosähköisen materiaalin venymäkerroin

g_{31}, g_{33}	pietsosähköisen materiaalin jännitekerroin
k_{31}	pietsosähköisen materiaalin sähkömekaaninen kerroin
C	kapasitanssi
Y	kimmomoduuli
V_0	äänen nopeus
p	pyroelektrinen kerroin
ϵ	permittiivisyys
ρ_m	massatiheys
ρ_e	tilavuusvastus
$\tan \delta_e$	hukkatangentti
FEM	Finite Element Method
3D	kolmiulotteinen
NiTiCu	nikkeli-titaani-kupari, muistimetallimateriaali
NiTi R	R-faasin NiTi, muistimetallimateriaali
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer, hiilikuitulaminaatti
TiNi	titaani-nikkeli, muistimetallimateriaali

2.1 Komposiitit

Lentokoneteollisuudessa on jo jonkin aikaa käytetty kuitukomposiittisia rakenteita painonsäästön ja helposti räätälöitävien laminaatin materiaaliominaisuuksien takia. Viime aikoina myös muut, perinteisempää koneenrakennusta edustavat alat ovat heränneet kuitukomposiittien käyttöön. Kasvanut tarjonta markkinoilla on johtanut siihen, että kuitukomposiittisten rakenteiden hinnat ovat laskeneet. Tämä on edelleen edesauttanut kuitukomposiittien yleistymistä.

Kuitukomposiittirakenteiden eheyttä on vaikeaa tutkia useimmilla rikkomattomilla tarkastusmenetelmillä, koska kuitumateriaalit ja matriisiaineet muodostavat yhdessä erittäin epähomogeenisen yhdistelmän. Tällöin on laminaattirakenteisen materiaalin eri kerroksissa tapahtuneista säröilyistä tai muista vaurioitumisista haluttu tieto vaikea saada.

Kuitukomposiittirakenteiden vahvuutena, niiden keveyden lisäksi, on erilaisten kappaleiden integroimisen suhteellinen helppous rakenteeseen. Matriisiaine muovautuu kuitujen ja niiden ympärille tai väliin lisättyjen osien mukaan saumattomasti ja saa siten aikaan vähemmässä määrin epäjatkuvan rakenteen kuin olisi mahdollista valmistaa useilla muilla valmistusmenetelmillä.

2.1.1 Materiaalit

Kuitukomposiitit koostuvat kuiduista ja kuituja yhteen sitovasta matriisiaineesta. Kuitukomposiiteista tehtyjen rakenteiden etu on niiden suuri lujuus, vaikka ne lähes kaikissa tapauksissa jäykkyydessä metalleille häviävätkin. Kuituja käytetään rakenteellisesti tärkeissä osissa yleensä rakenteen läpi jatkuvina. Vaihtoehtona olisi käyttää katkottuja kuituja, joilla saavutetaan myös parannuksia matriisiaineen materiaaliominaisuuksiin.

Komposiitin matriisiaine muovataan rakenteeseen yleensä sen valmistuksen yhteydessä. Tämä valmistustekniikka johtaa siihen, että matriisiaineeseen on mahdollista saada upotettua kuitujen lisäksi muitakin rakenneosia, kuten ohuita lankoja tai pieniä levymäisiä kappaleita.

Kuitukomposiittisten osien ominaisuuksien edelleen parantamiseksi käytetään usein kerroslevyjä, joissa kahden kuitukomposiittisen laminaattipintalevyn väliin yhdistetään ydinaine. Ydinaineen paksuudella on huomattava vaikutus osan ominaisuuksiin.

2.1.1.1 Perinteiset materiaalit kuitukomposiiteissa

Kuitukomposiittiset rakenteet mielletään perinteisesti kuituvahvistetuiksi muoviosiksi. Kuitukomposiittirakenteiden kuitumateriaalit ovat perinteisesti lasi-, hiili- ja aramidikuituja ja matriisiaineina käytetään yleensä epoksia tai polyesteriä.

Lasikuitu

Lasikuidut ovat muuttuvageometrisen rakenteen kuitumateriaalina houkutteleva vaihtoehto, sillä niiden kimmokertoimen arvot ovat muita tavallisia kuitutyyppejä pienemmät. Pienemmät kimmokertoimen arvot sallisivat pienemmällä voimilla toimivien aktuaattoreiden käyttämisen rakenteissa. Lasikuitujen etuna on myös niiden hinta, sillä ne ovat halvimpia perinteisistä kuitumateriaaleista.

Lasikuidut tarvitsevat pienen kimmokertoimensa takia kuitenkin suuria venymiä aktuaattoreilta, jos laminaattien ortotrooppisia ominaisuuksia on tarkoitus käyttää poikittaisen liikkeen synnyttämiseen.

Hiilikuitu

Hiilikuitu on suuren ominaisjäykkyytensä takia haluttu rakenneaine niissä tapauksissa, joissa paino on rajoittava tekijä. Hiilikuiduilla on tavallisesti korkea kimmomoduulin arvo ja suuri lujuus.

Joissakin rakenteissa käytetään sekä lasikuitu- että hiilikuitulujitteita, myös molempia voidaan käyttää samassa rakenteessa. Tapauksessa, jossa kahta eri kuitutyyppiä käytetään samassa rakenteessa, on aina muistettava ottaa huomioon eri kuitujen toisistaan eroavat lämpölaajenemiskertoimet. Lämpölaajeneminen saattaa aiheuttaa rakenteeseen huomattavia sisäisiä jännityksiä.

Aramidikuitu

Aramidikuitu sijoittuu materiaaliominaisuuksiltaan lasin ja hiilen välimaastoon. Aramidikuitujen suurin etu on niiden erittäin suuri vetomurtolujuus. Aramidikuidun suurimmat haittapuolet ovat alhainen puristuslujuus ja huonohko tartunta matriisimuoviin.

Epoksi

Epoksi on lentokone- ja avaruusteollisuuden kuitukomposiittisissa rakenteissa eniten käytetty aine. Se on kertamuovi ja sen valmistusprosessi vaatii kovettamisen. Kovetus tapahtuu yleensä korotetussa lämpötilassa. Tämä on otettava huomioon valmistuksessa, sillä lämpötila on lähes poikkeuksetta voimakkaasti vaikuttava tekijä älykkäissä rakenteissa käytettäviin aktuaattori- ja anturimateriaaleihin.

Polyesteri

Polyesteri on yleisin muovikomposiittisten rakenteiden matriisiaine. Sen sovellusalueita ovat vene- ja vapaa-ajanteollisuus. Polyesteriä ei juurikaan käytetä lentokone- tai avaruusteollisuudessa. Tuulivoimalan lavoissa käytetään sekä polyestereitä että epokseja.

2.1.1.2 Uudet materiaalit

Älyrakenteissa on usein eduksi, jos aktuaattorit ja anturit voidaan integroida osaksi muovikomposiittirakennetta. Tällöin perinteiset kuitu- ja matriisiaineet saavat rinnalleen uusia materiaaleja.

Matriisi- ja ydinaineet

Uutena matriisi- ja ydinaineena voidaan pitää magnetoreologisia elastomeerejä sekä magnetostriktiivisiä materiaaleja. Lisäksi pietsosähköiset levyt ja kalvot on helppo integroida rakenteeseen omina kerroksinaan ja ne saadaan jossain tapauksissa toimimaan myös ydinaineina.

Kuituaineet

Uusina kuitumateriaaleina voidaan pitää muistimetalleista vedettyjä kuituja, magnetostriktiivisiä kuituja ja pietsosähköisiä kuituja.

2.1.2 Komposiittien räätälöinti

Kaikkea älymateriaalien liikettä ei ole tarpeen saada aikaan pelkillä aktuaattoreilla. Kuitukomposiittisten materiaalien ortotrooppisen käyttäytymisen takia laminaattirakenteen kuitusuuntien ja kuitumateriaalien yhteensovittaminen tuo suunnitteluun mahdollisuu-

den saada rakenteeseen passiivista älyä. Passiivisesta älystä hyvänä esimerkkinä on roottorinlapa, joka on laminoitu epäsymmetriseksi siten, että keskipakokiihtyvyyden aiheuttamassa jännitystilassa se kiertyy. Tällöin kohtauskulma saadaan riippumaan pyörimisnopeudesta ilman ulkoisia aktuaattoreita. Tällaista suunnittelua on tutkittu helikopteriroottoreissa ja sen mahdollisuuksia ollaan tutkimassa myös tuulivoimaloiden suunnittelussa.

Suunnitteluun vaikuttaa myös laminaattirakenteen kerroksellinen rakenne. Se antaa mahdollisuuden asettaa ainakin kuitu- ja levymäiset aktuaattorit haluttuun kerrokseen useampikerroksisen laminaatin tapauksessa ja siten saada aikaan epäsymmetrisiä jännitystiloja. Tällaisella järjestelyllä voidaan saada lineaarisella liikkeellä aikaan poikisuuntaisia voimia ja siirtymiä.

2.2 Aktuaattorit

Älykkäitä rakenteita yhdistää se, että ne tuottavat jonkin ennalta määrätyn vasteen ulkoiseen tai sisäiseen herätteeseen. Tähän päästään aktiivisella oman tilan tarkkailulla ja aktiivista säätöä suorittavien aktuaattoreiden avulla. Tällaisella järjestelyllä saadaan ulkoa tulevat herätteet muokattua halutunlaiseksi vasteeksi rakenteessa. Tämän lisäksi on tietysti mahdollista tuottaa aktuaattoreilla sisäisiä herätteitä ja siten toivottua muodonmuutosta kappaleeseen. Lisäksi rakenteen on omattava päättely- ja kommunikointikykyä, jotta voitaisiin puhua älyrakenteesta. Aktuaattoreiden avulla rakenne pyrkii jokaisessa tilanteessa toimimaan parhaalla mahdollisella tavalla mukaan lukien vaurio-tilanteet.

Kuitukomposiittisia rakenteita suunniteltaessa pyritään usein massansäästöön. Tämän takia on tarkoitus löytää anturi- ja aktuaattorimateriaaleja, jotka olisivat itsessään toimilaitteita ja tarvitsisivat ympärilleen mahdollisimman vähän rakenteeseen kuulumatonta tukea. Näiden rakenneosien tulisi ainakin olla mahdollisimman pieniä, kuitu- tai levymäisiä ja keveitä. Tällöin aktiivisten rakenneosien integroiminen rakenteeseen tuottaisi mahdollisimman vähän ongelmia, koska aktuaattorin ja matriisin rajapintaan ei syntyisi suuria epäjatkuvuuksia.

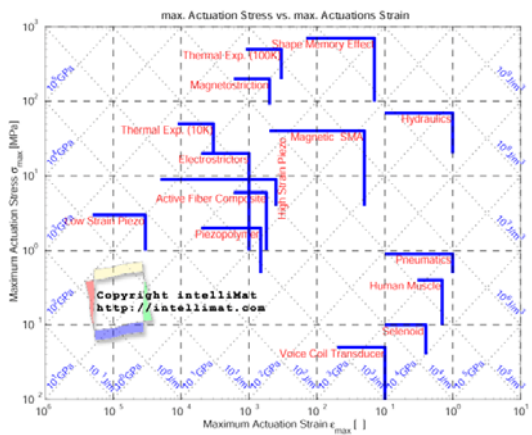
2.2.1 Materiaalit

Jokaisen rakennetapauksen kohdalla on määritettävä, millaisia voimia, nopeuksia, siirtymiä ja muita vaadittuja parametrisarvoja rakenne tarvitsee oman toimintansa toteuttamiseksi. Älyrakenteissa käytetyillä materiaaleilla on omat rajoituksensa, ja siksi oikean ja sopivan materiaalin valitseminen rakenteen osaksi on tärkeää.

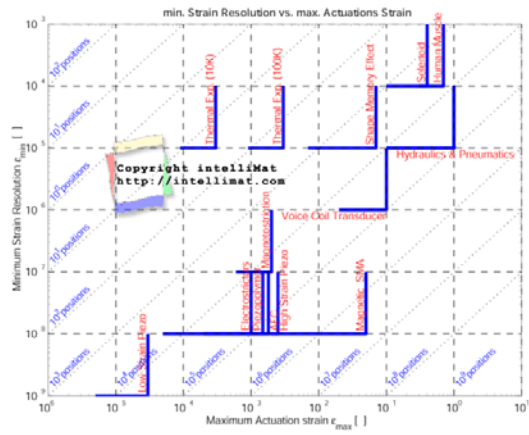
Kuvissa 1a–e esitellään yleisimmille aktuaattorimateriaaleille ominaisia materiaaliarvoja. Niiden perusteella on mahdollista kategorioida älymateriaalit kriittisimpien parametrien suhteen. Materiaaliarvot on kerätty kuvista 1a–e taulukkoon 1.

Taulukko 1. Aktuaattorimateriaaleille ominaisia materiaaliarvoja [1].

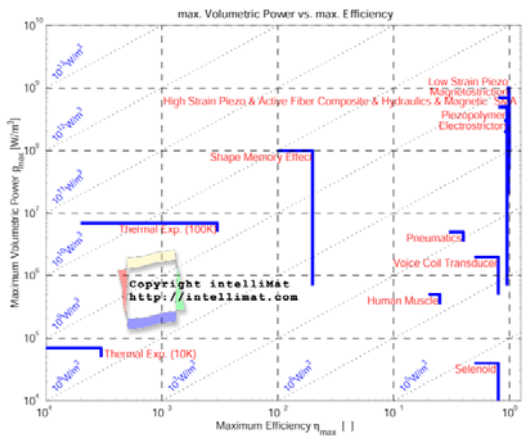
	shape memory	magnetic SMA	magnetostriction	electrostrictors
max actuation stress [MPa]	$1 \cdot 10^2 - 7 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^0 - 7 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^0 - 2 \cdot 10^1$
max actuation strain	$7 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-3}$
max spec. actuation stress [MPa/(kg/m ³)]	$1,5 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-4} - 6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-3}$
min strain resolution	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-7}$
max efficiency	$1 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-1} - 9 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-1} - 9 \cdot 10^{-1}$	$9 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^0$
max driving frequency [Hz]	$0 - 9 \cdot 10^0$	$3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^5$
max stress strain product [J/m ³]	$7 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^1 - 2 \cdot 10^3$
	active fiber composite	high strain piezo	low strain piezo	piezo-polymer
max actuation stress [MPa]	$1 \cdot 10^0 - 7 \cdot 10^0$	$4 \cdot 10^0 - 9 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^0 - 3 \cdot 10^0$	$5 \cdot 10^{-1} - 2 \cdot 10^0$
max actuation strain	$7 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-5} - 2,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-6} - 2,5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4} - 1,5 \cdot 10^{-3}$
max spec. actuation stress [MPa/(kg/m ³)]	$2 \cdot 10^{-4} - 1,5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$
min strain resolution	$1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-7}$
max efficiency	$8 \cdot 10^{-1} - 9 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-1} - 9 \cdot 10^{-1}$	$9 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^0$	$9 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^0$
max driving frequency [Hz]	$6 \cdot 10^1 - 3 \cdot 10^2$	$7 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^7$
max stress strain product [J/m ³]	$7 \cdot 10^1 - 1 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^1 - 2 \cdot 10^3$	$0 - 1 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^1 - 3 \cdot 10^2$



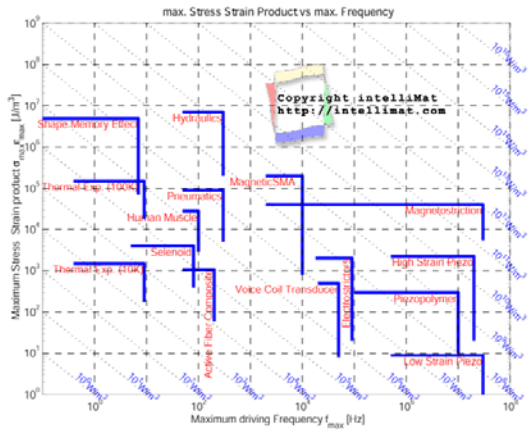
Kuva 1a



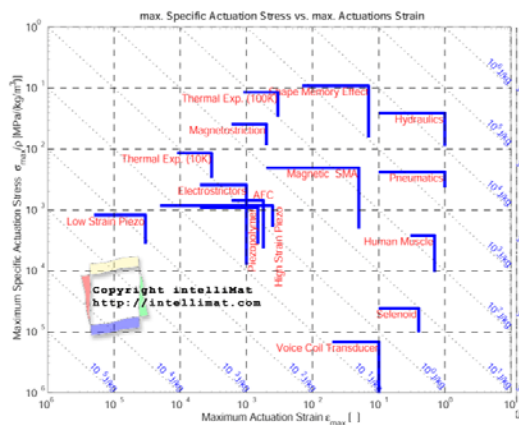
Kuva 1b



Kuva 1c



Kuva 1d



Kuva 1e

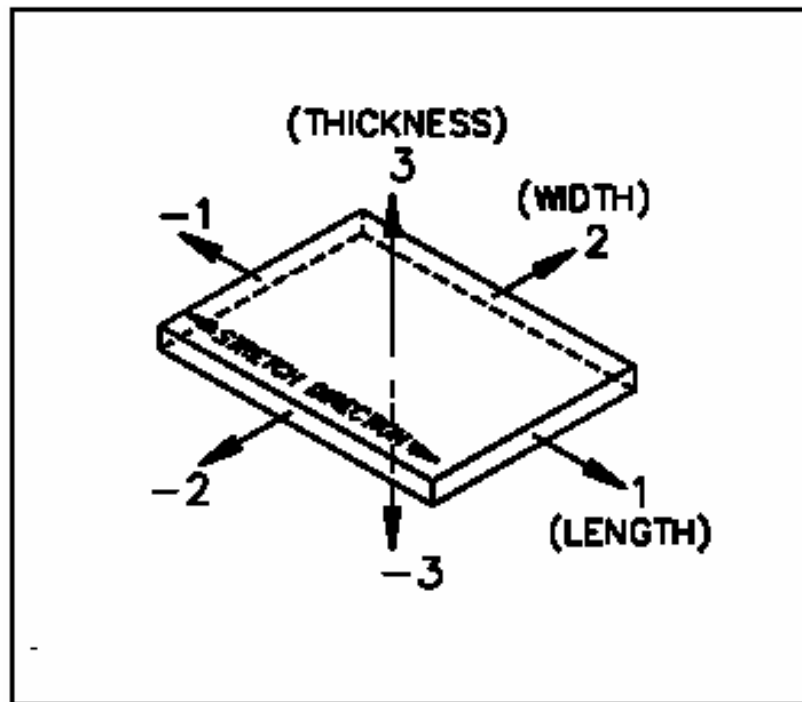
Kuva 1a–e. Aktuaattorimateriaaleille ominaisia materiaaliarvoalueita. Kuvassa 1a jännitys ja siirtymä, 1b siirtymätarkkuus ja siirtymä, 1c ominaisteho ja hyötysuhde, 1d jännitys-siirtymätulo ja käyttötaajuus ja kuvassa 1e ominaisjännitys ja siirtymä [1].

2.2.1.1 Pietsokeraamit

Eräillä keraameilla on huomattu olevan pietsosähköisiä ominaisuuksia. Tunnetuin ja yleisin käytössä olevista pietsosähköisistä keraameista on PZT (lyijy-zirkonium-titaani). Pietsosähköisellä ilmiöllä tarkoitetaan tapahtumaa, jossa pietsosähköisen materiaalin pintojen välille syntyy jännite, kun siihen kohdistetaan voima. Ilmiö toimii myös toiseen suuntaan, eli materiaali muuttuu muotoaan, kun sen pinnoille johdetaan sähkövirta. Pietsomateriaalit ovat ortotrooppisia ja niiden akselit numeroidaan kuvan 2 mukaisesti. Pietsosähköisten aineiden materiaaliarvoissa on alaindeksillä kerrottu polarisaation ja liikkeen suunnat siten, että kaksinumeroinen indeksin ensimmäinen luku kertoo polarisoinnin suunnan ja toinen luku kertoo liikkeen suunnan.

Pietsokeraamit jaetaan kahteen ryhmään, joita kutsutaan pehmeiksi ja koviksi pietsokeraameiksi. Kovilla pietsokeraameilla on pehmeitä suurempi jännitevakio ja pehmeillä taas kovia suurempi muodonmuutosvakio. Näiden ryhmien välimaastoonkin on kehitelty pietsokeraamisia materiaaleja. Nykyisin useassa kohteessa on seostamalla räätälöityjä pietsomateriaaleja, joilla saadaan tarkalleen halutut ominaisuudet aktuaattoreille. Aktuaattori-käyttöön soveltuvat parhaiten pehmeät pietsokeraamit, joilla on mahdollisimman suuri muodonmuutosvakio.

Pietsosähköisiä ominaisuuksia on todettu myös muilla kidemäisillä aineilla pietsokeraamien ohella.

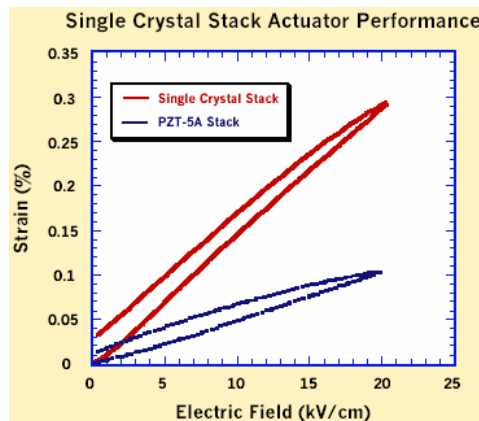


Kuva 2. Akselien numerointi pietsossa [2].

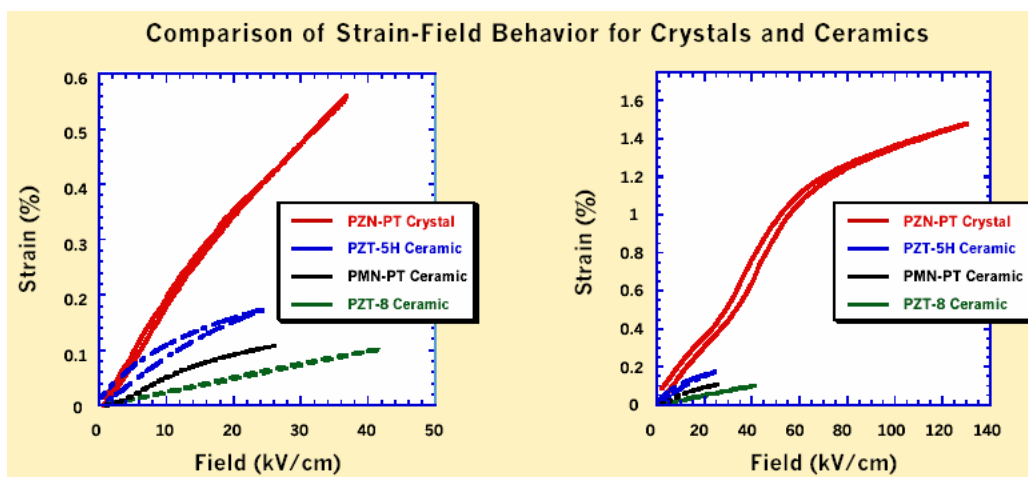
Erilliskiteiset pietsokeraamit

Pietsokeraamien valmistuksen tutkimusta ja jatkokehitystä on tehty voimakkaasti, koska keraamien ominaisuuksia on täytynyt kehittää erikoisiinkin tarkoituksiin. Kehityksen tuloksena on saatu kasvatettua erilliskidepietsoja, ja näillä erikoisilla kiteillä on huomattu olevan perinteisiä pietsokiteitä parempi muodonmuutosvakio eli ne reagoivat sähkökenttään paremmin. Sen takia ne soveltuvatkin hyvin aktuaattorisovelluksiin. Tätä havainnollistetaan kuvassa 3, jossa vertaillaan erään valmistajan erilliskiteistä ja perinteistä pietsokiteistä pinottujen aktuaattoreiden vasteita.

Erilliskiteiset pietsokeraamit kestävät myös suurempia jännitekentän arvoja kuin perinteiset pietsokeraamit. Kyseinen ilmiö on havaittavissa kuvasta 4, jossa vertaillaan erään pietsokidevalmistajan perinteisten ja erilliskiteisten pietsojen kestävyyttä sähkökentän voimakkuuksiin.



Kuva 3. Erilliskiteisen ja perinteisen pietsoaktuaattorin vertailua [3].



Kuva 4. Herätteen aiheuttaman vasteen vertailua perinteisessä ja erilliskiteisessä pietso-
keraamissa [3].

Hienorakeiset pietsokeraamit

Uusien valmistustekniikoiden avulla on saatu kehitettyä tavallisia huomattavasti hienorakeisempia pietsokeraameja, joilla on saavutettavissa suurempia jäykkyyksiä kuin perinteisillä keraameilla. Valmistajat lupaavat hienorakeisille pietsokeraameille 30 % suurempaa lujuutta sekä huomattavasti parempaa jännitekestävyyttä [3]. Hienorakeisten keraamien raekoko on kertaluokkaa pienempi kuin perinteisillä pietsokeraameilla.

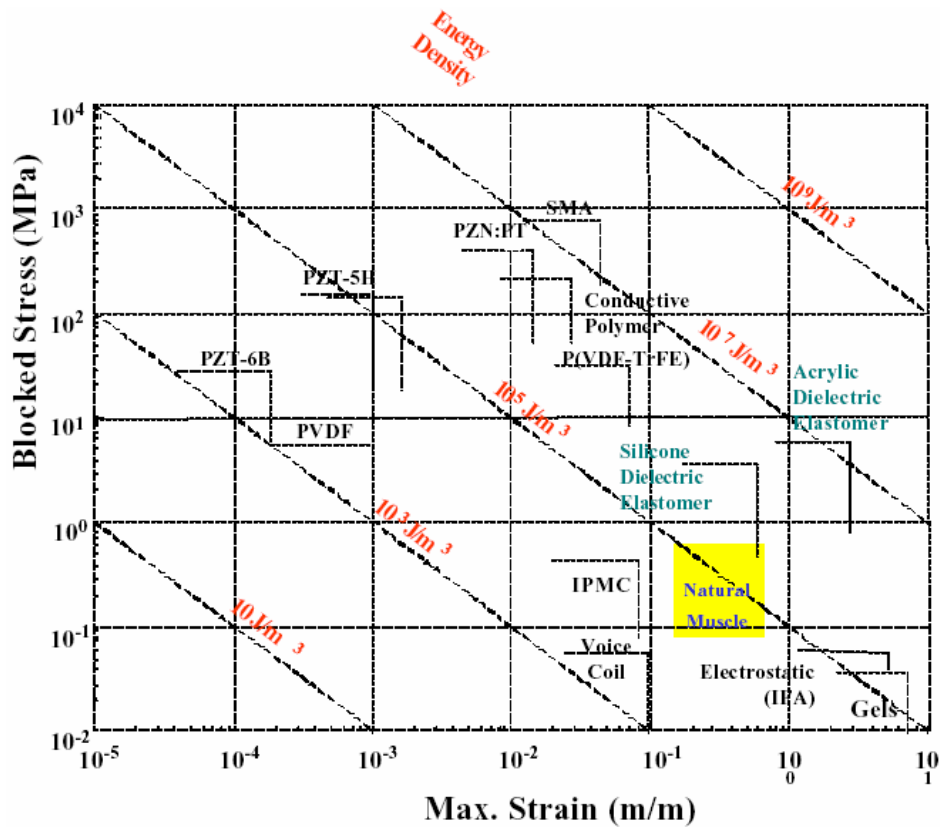
2.2.1.2 Pietsopolymeerit

Erittäin voimakkaita pietsosähköisiä ominaisuuksia on huomattu polyvinyylideeni-fluoridilla (PVDF) ja muilla sen sukuisilla polymeereillä. PVDF toimii pietsosähköisesti parhaiten taipuisana ohuena levynä. Parhaimmillaan PVDF-kalvolla on saavutettavissa kertaluokkaa perinteisiä pietsokeraameja suuremmat vasteet. Taipuisuus mahdollistaa kalvon sijoittamisen erilaisille pinnanmuodoille. Tämä on etu verrattuna jäykkiin ja hauraisiin pietsolevyihin.

Muita pietsosähköisesti toimivia, huomattavan suuriin siirtymiin pystyviä elastomeerejä on kehitetty SRI:n tutkimuksissa [4]. Kuvassa 5 vertaillaan älyrakenteissa käytettäviä aktiivisia materiaaleja. Kuvasta on huomattavissa, että dielektrisillä elastomeereillä päästään useita kertaluokkia perinteisiä pietsokeraameja suurempiin siirtymien arvoihin mutta jännityksissä elastomeerit eivät pärjää keraameille.

2.2.1.3 Pietsokuidut

Kovan jatkokehitystutkimuksen tuloksena on saatu kehitettyä myös pietsosähköisiä kuituja. Kehitystyötä on tehty Saksassa Fraunhofer Allianssin alaisuudessa. Pietsokuitujen suurin etu komposiittirakenteessa on se, että ne saadaan haluttaessa jatkumaan koko rakenteen läpi ja siten aiheuttamaan mahdollisimman vähän epäjatkuvuutta rakenteeseen. Pietsokuituja valmistetaan 5A- ja 5H-pietsokeraameista, mutta valmistustekniikasta ja pienistä ulkomitoista johtuen kuidut pystyvät saavuttamaan vain 65–75 % keraamien materiaaliominaisuuksista. Kuituja ei ole mahdollista valmistaa mielivaltaisen pitkänä nykytekniikalla, vaan niiden pituus on suurimmillaan 200 mm. Kaupallisesti myytäviä kuituja on 105–800 µm paksuisina.



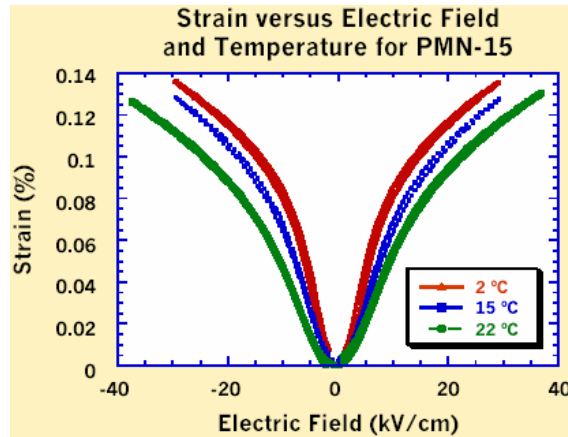
Source: DARPA and SRI International

Kuva 5. Pietsosähköisten elastomeerien ja pietsokeraamien vertailua [4].

2.2.1.4 Elektrostriktiiviset materiaalit

Elektrostriktiiviset materiaalit laajenevat, kun niiden yli johdetaan sähkövirta. Niiden kideäisen rakenteen alkeisvaraukset suuntautuvat sähkökentän mukaan ja siten saavat kiteet venymään. Kaikki pietsosähköiset materiaalit ovat myös elektrostriktiivisiä, mutta ne erottaa siitä, että pietsosähköiset materiaalit laajenevat tai kutistuvat sähkökentän suunnan mukaan mutta elektrostriktiiviset materiaalit voivat vain laajentua. Elektrostriktiivisillä materiaaleilla on pienempi hystereesi kuin perinteisillä pietsokeraameilla, mutta ne ovat voimakkaasti lämpötilariippuvaisia ja edulliset ominaisuudet esiintyvät vain rajatulla lämpötilavälillä. Kuvassa 6 esitetään erään valmistajan elektrostriktiivisen materiaalin käyttäytymistä. Lämpötilalla on selvä merkitys materiaalin liikkeisiin hyvin pienelläkin lämpötila-alueella.

Elektrostriktiiviset materiaalit toimivat pääpiirteiltään samoin kuin pietsokeraamit. Siksi niitä voidaan käyttää pietsokeraamien tilalla useissa kohteissa.



Kuva 6. Elektrostriktiivisen aineen tavallisia materiaaliarvoja [3].

2.2.1.5 Muistimetallit

Muistimetallit ovat metalliseoksia, jotka lämpötilan mukana muuttavat hilarakennetta austeniittisen ja martensiittisen välillä. Joskus muutoksessa esiintyy erittäin suuriakin poikkeamia ja voimia. Transformaatiolämpötilaa voidaan muuttaa kuormituksella niin paljon, että metalli saattaa muuttaa hilarakennettaan pelkän kuormituksen vaikutuksesta. Hilarakenteen muutoksessa on aina jonkin verran hystereesiä, joka on otettava tarkasti huomioon suunniteltaessa älykkään rakenteen muistimetalleista valmistettuja aktuaattoreita. Hystereesiä voidaan myös hyödyntää rakenteen värähtelyjen vaimennuksessa, koska hystereesissä dissipoituu energiaa.

Yleisimmin käytössä olevat muistimetallit ovat nikkeli-titaaniyhdisteitä. Ne reagoivat hyvin lämmönvaihteluihin ja niiden mekaaniset ominaisuudet ovat muistimetalliyhdisteiden parhaimmista. Viime aikoina on alkanut markkinoille ilmestyä myös nikkeli-titaanikupariseoksia, joilla on ennestään saatu parannettua NiTi-yhdisteiden ominaisuuksia.

Kaupallisesti levinnein muistimetalli on NiTiNOL, joka on Yhdysvaltojen laivaston kehitystyön tulos. NiTiNOL-muistimetallin tavallisia materiaaliarvoja on taulukossa 2. Taulukossa esitetyistä materiaaliarvoista on huomattavissa, että muistimetallin langan paksuudella on huomattava vaikutus ominaisuuksiin.

Taulukko 2. NiTiNOL-muistimetallin tavallisia materiaaliarvoja [5].

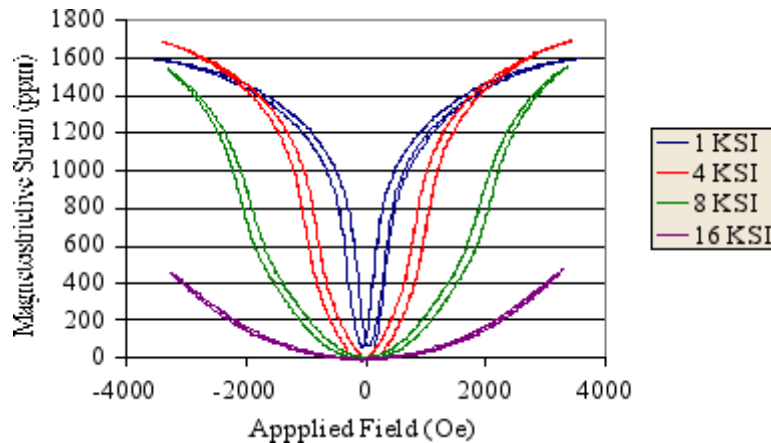
Property	Wire Diameter	250 μm	350 μm
Physical	Minimum bend radius [mm]	12.50	18.8
	Cross-Sectional Area [mm^2]	0.049	0.110
Electrical	Recommended Current [mA]	1.000	2.750
	Recommended Power [W/m]	20.0	8.00
Strength	Max. Force @ 600 MPa [N]	28.7	61.9
	Rec. Force @ 190 MPa [N]	9.11	16.9
Speed	Max. Contraction Speed [sec]	0.2	0.5
	Relaxation Speed (Ambient Air) [sec]	5.5	10.0
Thermal & Material	Heat Capacity [cal/g°C]	0.077	
	Density	6.45	
	Maximum Deformation Ratio [%]	8	
	Recommended Deformation [%]	3–5	
	Resistivity [$\mu\Omega\text{cm}$]	<i>Low Temp</i> 76	<i>High Temp</i> 82
	Young's Modulus [GPa]	28	75
	Thermal Conductivity [W/cm°C]	0.08	0.18

2.2.1.6 Magnetrostriktiiviset materiaalit

Magnetrostriktiiviset materiaalit muuttavat muotoaan magneettikentässä, kun kiteiden magneettiset alueet suuntautuvat kentän mukaan. Kuvassa 7 on havainnollistettu magnetrostriktiivisen materiaalin käyttäytymistä. Magnetrostriktiiviset materiaalit voivat joko venyä suunnatusti tai muuttaa tilavuuttaan. Kaikilla ferromagneettisilla materiaaleilla on jonkin verran magnetrostriktiivisiä ominaisuuksia. Magnetrostriktiivisten materiaalien venymät ovat kertaluokkaa suurempia kuin perinteisten pietsokeraamien. Kuvassa 8 esitetään kaupallisesti tunnetuimman magnetrostriktiivisen Terfenol-D-materiaalin siirtymien riippuvuutta ulkoiseen kuormaan.



Kuva 7. Magnetrostriktiivisen materiaalin käyttäytyminen [6].



Kuva 8. Magnetrostriktiivisen materiaalin siirtymien riippuvuus ulkoisesta kuormasta [6].

2.2.1.7 Elektro- ja magnetoreologiset materiaalit

Elektro- ja magnetoreologiset materiaalit ovat ominaisuuksiaan ympäröivien sähkö- tai magneettikenttien mukaan muuttavia valmisteita. Niissä on pieniä hiukkasia upotettuna nesteeseen. Nämä hiukkaset reagoivat joko sähkö- tai magneettikenttiin ja muuttavat nesteen viskositeettia ja vaimennuskykyä.

Elektro- ja magnetoreologiset materiaalit olivat kehityksensä alussa erittäin rajoitetulla ja liian matalalla lämpötila-alueella toimivia aineita. Tästä syystä niiden käyttöönotto koneenrakennukseen on ollut hidasta. Kehityksen myötä elektro- ja magnetoreologisten materiaalien käyttöympäristön lämmönsietoa on saatu parannettua. Ne ovatkin yleistyneet käytössä jonkin verran, ja nykyään niitä voi löytää liikennevälineiden iskunvaimentimissa.

Elektro- ja magnetoreologisia aineita on kuitenkin erittäin hankala käyttää integraalisina rakenneosina kuitukomposiiteissa nestemäisen käyttäytymisensä takia. Niitä on kuitenkin tutkittu myös elastomeereinä, jossa muodossa ne saattaisivat olla huomattavasti paremmin kuitukomposiittisten kerroslevyjen valmistukseen sopivia. Soveltuvuudeltaan ne olisivat parhaimmillaan leikkauslujuudeltaan muuttuvina ydinaineina.

2.2.2 Rakennerratkaisut

Rakennerratkaisuja mietittäessä on lähdettävä kyseiseen tapaukseen käytettävän aktiivisen materiaalin ominaisuuksista ja siitä, miten parhaiten saataisiin tarvittavat voimat ja liikkeet toteutettua. Aktuaattoreiden rakennerratkaisut voivat perustua aktiivisen aineen liittämiseen suoraan matriisiaineeseen, tai aktuaattori voi olla oma kokonaisuutensa, joka yritetään liittää mahdollisimman saumattomasti rakenteeseen.

Suorassa liitoksessa voi olla ongelmallista suunnitella toimivia ratkaisuja johtimille, joilla saataisiin halutut ohjaussignaalit aktuaattoreille. Usein aktuaattoreita myydään valmiina komponentteina, joihin on valmiiksi asennettu johtimet, jotka voidaan liittää suoraan kiinni ohjauskaapeleihin.

2.2.2.1 Pietsokeraamit

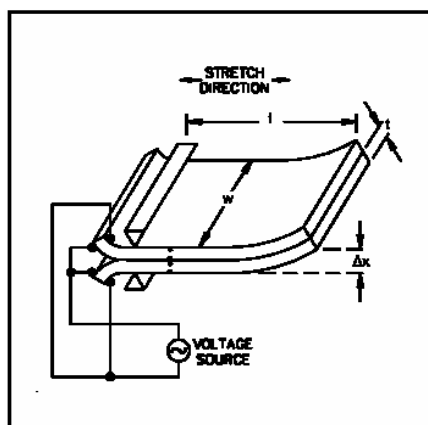
Pietsokeraamien ongelmana ovat niiden pienet liikkeet. Pieniä liikkeitä on pyritty erilaisin ratkaisuin suurentamaan. Tällä hetkellä mielenkiintoisimmilta ratkaisuilta näyttävät kaareutuvat aktuaattorirakenteet, joista hyvinä esimerkkeinä ovat THUNDER- ja LIPCA-aktuaattorit. Pietsokeraamien liikkeentuottoa on pyritty kasvattamaan myös pinoamalla useita aktuaattoreita päällekkäin. Tällöin puhutaan pino- eli stack-aktuaattoreista.

Toinen ongelma pietsokeraamien valmistuksessa ja aktuaattorikäytössä on niiden hauraus. Se tuo mukanaan kokorajoituksia yksittäisille pietsokeraamisille elementeille ja sitä myöten myös kaikille pietsokeraameihin perustuville aktuaattoriratkaisuille. Rajoitusta voi yrittää kiertää muodostamalla yksittäisistä elementeistä suurempia ryhmiä, joita käytetään yhdessä yksittäisen elementin tapaan.

Tutkimuksissa on tarkasteltu myös pietsokeraameista kehiteltyjä kuituja [7, 8]. Niissä on päästy erittäin hyviin tuloksiin myös katkotuilla pietsokuiduilla, joiden pituusuhde on ollut 50. Ne helpottaisivat pietsokuitujen käyttöä, koska niiden ei tarvitsisi olla koko rakenteen mittaisia vaan riittäisi asentaa tarpeeksi kuituja sopivasti laminaattikerrosten väliin.

Kaksikerrosaktuaattorit

Kaksikerrosaktuaattori on kahdesta kerroksesta koostuva pietsosähköinen levy, jonka kerrokset ovat eri suuntaan polarisoidut. Tällä ratkaisulla saadaan aktuaattorin vapaan pään liikkeitä suurennettua. Kaksikerrosaktuaattorin toimintaperiaatetta selvennetään kuvassa 9. Kaksikerrosaktuaattorin liikettä on mahdollista suurentaa passiivisilla komponenteilla. Taulukkoon 3 on koottu erään valmistajan tarjoamien kaupallisten kaksikerrosaktuaattoreiden tyypillisiä toiminta-arvoja. Kaksikerrosaktuaattoreiden ongelmana on voimien jääminen pieniksi liikkeen suunnassa.



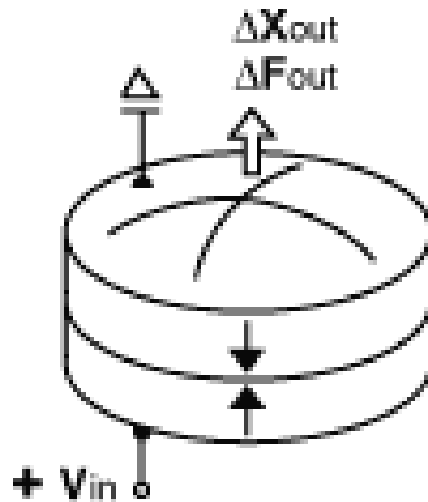
Kuva 9. Kaksikerrosaktuaattorin toimintaperiaate [2].

Taulukko 3. Kaksikerrosaktuaattorin toiminta-arvoja [9].

Part Number (Composite Reinforced)	Weight (Grams)	Stiffness (N/m)	Capacitance (nF) (Series Operation)	Rated Voltage (Vp) (Series Operation)	Resonant Frequency (Hz)	Free Deflection (μm)	Blocke Force (N)
.015" (.38mm) Thick							
T215-H4CL-103X	.22	1.3×10^2	9.3	± 80	280	± 360	.045
T215-H4CL-203X	.45	2.5×10^2	18	± 80	280	± 360	.09
T215-H4CL-303X	.90	5.0×10^2	37	± 80	280	± 360	.18
T215-H4CL-503X	4.5	1.6×10^2	185	± 80	70	$\pm 1,440$	± 23
.019" (.48mm) Thick							
T219-H4CL-103X	.32	2.6×10^2	6.5	± 120	350	± 305	$\pm .08$
T219-H4CL-203X	.64	5.2×10^2	13	± 120	350	± 305	$\pm .16$
T219-H4CL-303X	1.27	1.0×10^3	26	± 120	350	± 305	$\pm .31$
T219-H4CL-503X	6.4	3.2×10^2	130	± 120	88	$\pm 1,220$	$\pm .39$
.023" (.58mm) Thick							
T223-H4CL-103X	.34	4.1×10^2	6.5	± 120	440	± 270	$\pm .11$
T223-H4CL-203X	.68	8.1×10^2	13	± 120	440	± 270	$\pm .22$
T223-H4CL-303X	1.35	1.6×10^3	26	± 120	440	± 270	$\pm .44$
T223-H4CL-503X	6.8	5.1×10^2	130	± 120	110	$\pm 1,080$	$\pm .55$
.034" (.86mm) Thick							
T234-H4CL-103X	.48	1.1×10^3	4.5	± 170	600	± 165	$\pm .18$
T234-H4CL-203X	.97	2.2×10^3	9	± 170	600	± 165	$\pm .36$
T234-H4CL-303X	1.93	4.3×10^3	18	± 170	600	± 165	$\pm .71$
T234-H4CL-503X	9.7	1.3×10^3	18	± 170	150	± 660	$\pm .89$

Bending disc -aktuaattorit

Kaksikerrosaktuaattoreiden siirtymien kasvattamiseksi on kehitetty myös bending disc -aktuaattori. Se toimii kuten bimorph-aktuaattori, mutta sillä tapahtuu kahden suuntaista taipumista. Siten saadaan vasteita ja voimia kasvatettua tavallisesta levymäisestä yhden suunnan taipumisesta. Bending disc -aktuaattorin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 10 ja taulukkoon 4 on kerätty erään valmistajan bending disc -aktuaattoreiden arvoja.



Kuva 10. Bending disc -pietsoaktuaattori [9].

Taulukko 4. Kaupallisten bending disc -aktuaattoreiden toiminta-arvoja. [9].

Part Number (No Reinforcement) X-poled for series operation (2 wire)	Weight (grams)	Stiffness (N/m)	Capacitance (nF) Series Operation	Rated Voltage (Vp) Series Operation	Resonant Frequency (Hz)	Free Deflection (μm)	Blocked Force (N)
T216-A4NO-173X	.10	1.3×10^2	1.1	± 180	29,300	± 4.7	± 2.4
T216-A4NO-273X	.40	2.5×10^2	4.3	± 180	7,300	± 19.1	± 2.4
T216-A4NO-373X	2.5	5.0×10^2	27	± 180	1,170	± 119	± 2.4
T216-A4NO-573X	9.8	1.6×10^2	107	± 180	290	± 476	± 2.4

RAINBOW-aktuaattorit

RAINBOW (Reduced and Internally Biased Oxide Wafer) -aktuaattoreilla tarkoitetaan sellaisia pietsoaktuaattoreita, joista on toiselta pinnalta kemiallisesti tai jollain muulla tavalla vähennetty happea. Tällä järjestelyllä saadaan aikaan toiselta pinnalta voimakkaasti metallinen pietsolevy, jonka hapenpoistokäsittely on tehty korotetussa lämpötilassa. Kun lämpötilan annetaan laskea, saadaan keskeltä kaareutuva aktuaattori. Sähkökentän vaikutuksesta tällainen aktuaattori taipuu ja aiheuttaa siten vahvistettuja liikkeitä pietsolevylle. Tämäntyyppisille aktuaattoreille on aina määritettävä kääntymiskuorma, joka aiheuttaa kaaren keskikohdan kääntymisen väärälle puolelle. Taulukossa 5 esitetään RAINBOW-aktuaattoreiden suurimpia siirtymiä erilaisten ulkoisten kuormien alaisena.

Taulukko 5. Kaupallisten RAINBOW-aktuaattoreiden siirtymiä eri kuormitusten alaisena [10].

RAINBOW composition	D_{0g} , μm	D_{500g} , μm	ΔD_{0-500g} , percent
PZT-5H ^a	83	66	-20
PZT-5A ^a	88	86	-2
PLZT 7/65/35 ^b	55	36	-34
PLZT 9/65/35 ^c	116	117	+1

^aPeak-to-peak displacements at ± 6.5 kV/cm and 1 Hz.

^bPeak-to-peak displacements at ± 5 kV/cm and 1 Hz.

^cPeak-to-peak displacements at 10 kV/cm (unipolar) and 1 Hz.

Kaareutuvat aktuaattorit

Kaupalliselle asteelle asti RAINBOW-tyyppisesti toimivista aktuaattoreista on päässyt THUNDER (Thin Unimorph Driver) -aktuaattori. Siinä kahden eri lämpölaajenemisen omaavan metallilevyn väliin on liimattu kerros pietsomateriaalia korotetussa lämpötilassa. Tällöin lämpötilan laskiessa saadaan aikaan kaareutunut aktuaattori. Kaareutuvien aktuaattoreiden voimat ja siirtymät ilmoitetaan kaaren keskikohtaan tuetun liikkeen suhteen. Taulukossa 6 on valmistajan ilmoittamia arvoja kaupallisille THUNDER-aktuaattoreille.

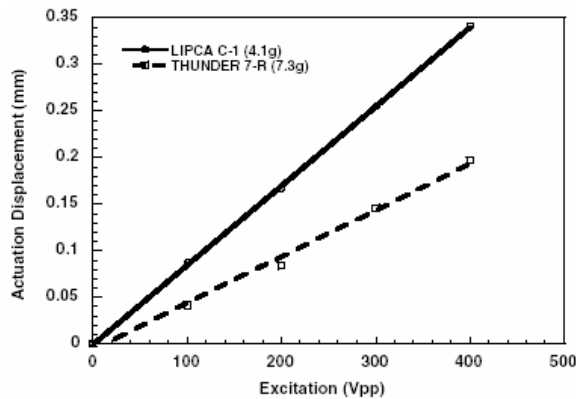
Taulukko 6. Kaupallisten THUNDER-aktuaattoreiden toiminta-arvoja [11].

THUNDER[®] SPECIFICATIONS

Model	Weight (gms)	Dimensions L x W x H (inches)	Ceramic Thickness (inches)	Dome/Arch Height ¹		Capacitance (nF)	Max Applied Volts ² (Vpp)	Resonant Frequency ³		Typical Cantilevered Displacement ⁴		Block Force ⁵	
				(mm)	(in)			(c)	(ss)	(mm)	(in)	(N)	(lbf)
TH 5-C	2.6	1.25 diam. x 0.019	0.007	1.29	0.051	39	424	NAp	532	NAp	NAp	133	30
TH 6-R	16.3	3.00 x 2.00 x 0.031	0.015	4.24	0.167	77	905	60	NA	3.12	0.123	>133	>30
TH 7-R	18.0	3.80 x 2.80 x 0.023	0.010	9.57	0.377	166	595	31	106	7.62	0.300	133	30
TH 8-R	2.1	2.50 x 0.50 x 0.019	0.008	3.83	0.151	30	480	65	177	1.98	0.078	67	15
TH 9-R	1.0	0.88 x 0.38 x 0.021	0.008	0.61	0.024	7	480	3479	NA	0.12	0.005	31	7
TH 10-R	1.0	1.00 x 0.50 x 0.022	0.008	0.64	0.025	10	480	2854	NA	0.20	0.008	36	8
TH 11-R ⁶	0.9	3.00 x 0.10 x 0.029	0.015	NA	NA	4	905	NA	NA	1.98	0.078	NA	NA
TH 12-R ⁶	19.5	3.80 x 2.80 x 0.022	0.010	5.49	0.216	139	600	NA	NA	NA	NA	NA	NA

THUNDER-tutkimuksen jatkokehittelyä on tehty korvaamalla metallikerrokset kuitulujitetuilla muovikomposiittisilla levyillä. Hyviin tuloksiin on päästy valitsemalla aktuaattorin pinnoille lasi- ja hiilikuitumateriaalit, joilla on luonnostaan hyvin erilaiset lämpölaajenemiskertoimen arvot. Muovikomposiitit on valmistettu prepreg-valmisteista, jotka on kovetettu suoraan pietsolevyn pinnalle. Tällä menetelmällä on saatu poistettua turha

kerros liimaa pietso- ja pintalevyjen välistä. Nämä kuitukomposiitteihin perustuvat aktuaattorit ovat nimeltään LIPCA (Lightweight Piezo-Composite Curved Actuator)-aktuaattoreita. Kuvassa 11 on THUNDER- ja LIPCA-tyyppisten ratkaisujen vasteen suuruuden vertailua.



Kuva 11. LIPCA- ja THUNDER-aktuaattoreiden siirtymien vertailua [12].

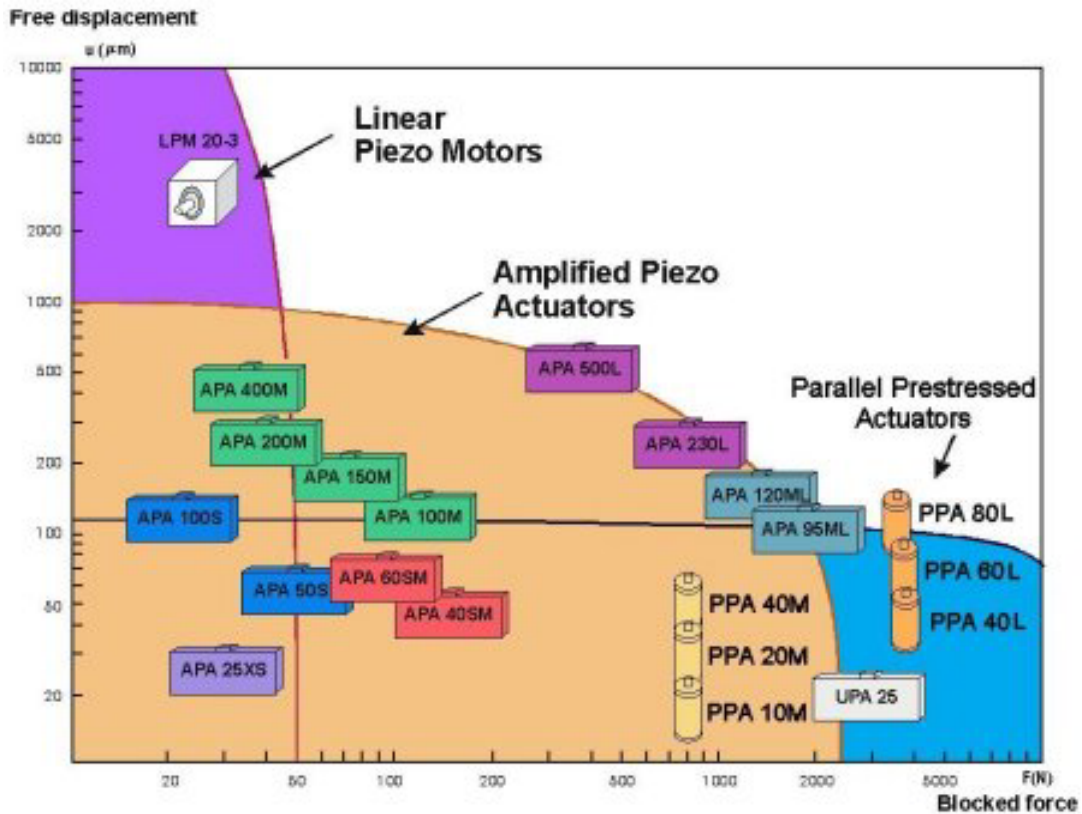
APA- ja PPA-aktuaattorit

CNES on ollut voimakkaana osallisena tutkimuksessa, jossa on pyritty kehittämään pieni-kokoisia pietsoaktuaattoreita, joilla olisi suuret voimat ja vahvistetut liikealueet. Tutkimuksissa onkin löydetty erilaisia mekaanisia ratkaisuja, joilla päästään haluttuihin toiminta-alueisiin.

Vahvistettuja aktuaattoreita on kahden tyyppisiä: APA (Amplified Piezo Actuator) ja PPA (Parallel Prestressed Actuator). APA-aktuaattorissa toimintaperiaate on sama kuin useassa auton tunkissa, jossa suorakulmaisen särmiön liikettä muutellaan lävistäjällä sijaitsevan pietsoaktuaattorin avulla. PPA-aktuaattorissa toiminta perustuu rinnakkain toimiviin pietsoelementteihin. Rinnakkain asetetuilla pietsoelementeillä voi olla yhteiset ohjaavat elektrodit, joten niiden toiminnan yhtäaikaisuus on helposti toteutettavissa.

Kuvassa 12 on esitelty APA- ja PPA-aktuaattoreiden mahdollisia käyttöalueita. Tarvittavaan sovelluskohteeseen voi siis valita sopivan kompromissin tarvittavan liikkeen ja saavutettavan voiman välillä.

APA- ja PPA-ratkaisuissa on ongelmana niiden ympärille tarvittava ylimääräinen tukirakenne. Kummatkin aktuaattorityypit tarvitsevat metallisen kehikon, joka rakennetaan pietsoelementin ympärille. Vaikka kaikki kuvassa 12 esitetyt aktuaattorit ovatkin tilitikkuausia pienempiä, saattaa niiden integroiminen kuitukomposiittiseen rakenteeseen olla silti hankalaa.

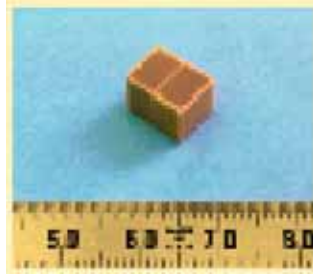


Kuva 12. APA- ja PPA-pietsoaktuattoreiden voima- ja venymäalueita [13].

Pinoaktuattorit

Pietsokeraameista on kehitelty pinottuja aktuattoreita, joiden idea on usean pienen piezoelementin asettaminen pinoon. Joka väliin asennetaan joko omat elektrodit, joiden avulla jokaista pinon osaa ajetaan itsenäisenä yksikkönä, tai yhteiset elektrodit pinon ylä- ja alapinnalle. Aktuattoreita, joiden joka välissä on omat elektrodit, kutsutaan cofired-tyyppisiksi, koska niiden toiminta perustuu kaikkien kerrosten yhtäaikaiseen herätteen.

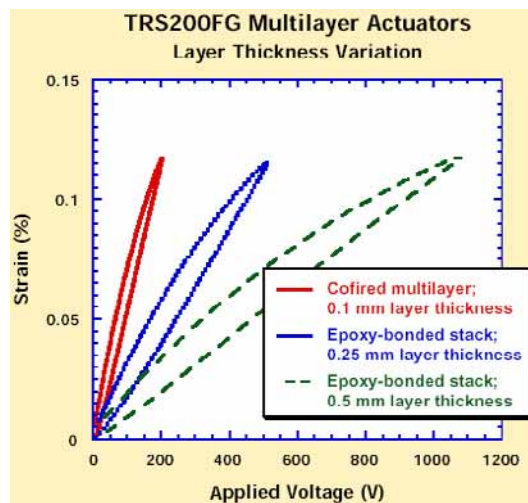
Pinoaktuattoreiden ongelmana on se, että ne on suojattava hyvin sivuilta, mikä osaltaan kasvattaa aktuattorin kokoa. Kuitukomposiittisia laminaattirakenteita tehtäessä on kuitenkin usein mahdollista hoitaa aktuattorin suojaus laminaatin matriisiaineella. Kuvassa 13 on eräs malli kaksikerroksisesta cofired-tyyppisestä aktuattorista, jota ei ole vielä suojattu.



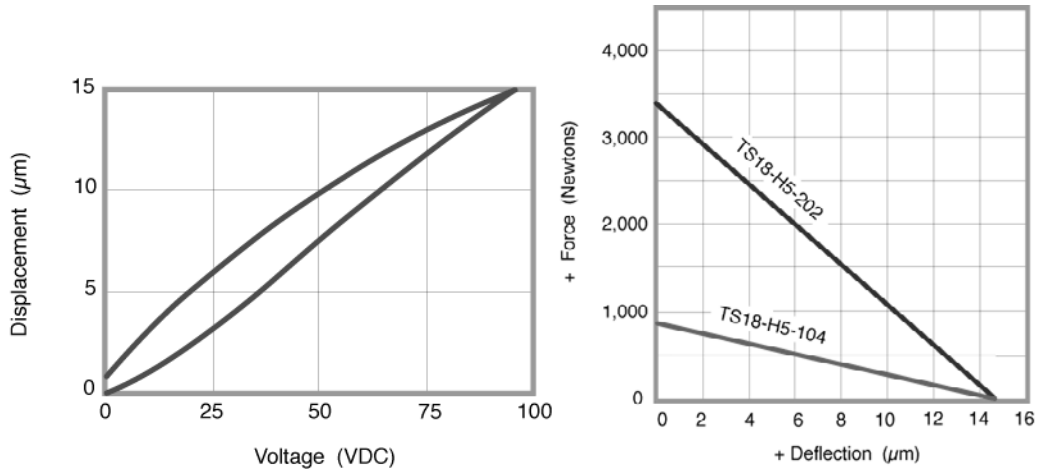
Kuva 13. Kaksikerroksinen, yhdenaikaisen herätteen pinottu aktuaattori [3].

Pinotuissa cofired-tyypin aktuaattoreissa on tärkeä pitää huoli siitä, että kaikkien kerroksien yhtäaikainen aktivoiminen on tarkkaa. Ohjauselektronikalta ja sen suunnittelulta vaaditaan paljon, jotta kerrosten yhtäaikaisuus saadaan tarvittavalla varmuudella toteutettua. Yhteisillä elektrodeilla toteutettujen pinottujen pietsoaktuaattoreiden ongelma ovat erittäin suuret jännitteet pinon yli, mutta niillä ei yhtäaikaisuuden toteuttamisessa ole ongelmaa.

Kuva 14 esittää jännitteen aikaansaamaa liikettä erään valmistajan eri pinoaktuaattoreiden tapauksessa, ja kuvassa 15 on tyypillisiä arvoja erään valmistajan cofired-tyyppisille aktuaattoreille.



Kuva 14. Yhdenaikaisella herätteellä pinoamisessa saavutettava etu siirtymän suhteen erään valmistajan ilmoittamana [3].

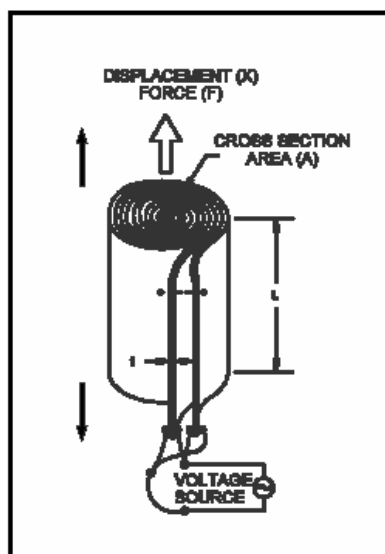


Kuva 15. Valmistajan ilmoittamia cofired-pinoaktuattoreiden tavallisia toiminta-arvoja [9].

2.2.2.2 Pietsopolymeerit

Pietsopolymeerit toimivat parhaiten levymäisinä isoina kalvoina. Polymeerien vasteet tippuvat nopeasti kalvon paksuuden mukana. Tämä johtaa siihen, että on edullista tehdä ohuita kalvoja, jotka puolestaan eivät ole ihanteellisia kerroslevyjen ydinaineina.

Pietsosähköisesti käyttäytyvästä ohuesta polymeerikalvosta saatavat voimat ovat suhteellisen pieniä. Niiden kasvattamiseksi on kehitetty kalvon rullaaminen. Kuvassa 16 on esitetty scrolled-tyyppisen aktuaattorin toiminnan periaate. Tällaisen erikoisratkaisun käyttäminen kuitukomposiittisessa rakenteessa ei kuitenkaan ole perusteltua, sillä korvaavia vaihtoehtoja on runsaasti.



Kuva 16. Scrolled-tyyppisen pietsoaktuattorin toimintaperiaate [2].

2.2.2.3 Elektrostriktiiviset materiaalit

Elektrostriktiiviset materiaalit toimivat periaatteessa kuten pietsokeraamit, joten lähes kaikki pietsosähköisten aktuaattorien rakenneratkaisut soveltuvat myös elektrostriktiivisille materiaaleille.

2.2.2.4 Muistimetallit

Muistimetalleilla ei ole ollut tarpeen keksiä uusia rakenneratkaisuja, koska ne pärjäävät lähes jokaisella toiminnan alueella, paitsi nopeudessa, muille älyrakenteisiin soveltuville aktuaattoreille. Muistimetallien toimintanopeutta on yritetty parantaa, mutta sen parantuminen on suurelta osin materiaalipuolen kehittymistä.

Tutkimuksissa on rakenteiden herätetaajuuden kasvattamiseksi yritetty keksiä joitain keinoja. Hyviä tuloksia on saatu aikaan tutkimuksessa, jossa useita NiTiNOL-lankoja oli upotettu lasikuitulujitettuun epoksimatriisiin ja lankojen herätteet ajettiin tietyssä järjestyksessä [14]. Tällä järjestyksellisellä lankojen lämmityksellä ja viilennyksellä saatiin herätettyä korkeampia taajuuksia kuin yhtä aikaa toimivilla langoilla olisi mahdollista. Myös aktiivisella jäähdytyksellä on saatu parannettua muistimetallien vasteaikoja [15].

Muistimetalleilla on ongelmana se, että ne aktivoituvat lämmön vaikutuksesta. Lämmönsäätely rakenteessa voi olla huonosti hallittavissa, jolloin muistimetalliset aktuaattorit saattavat aktivoitua myös silloin, kun se ei ole toivottua. Muistimetalliaktuaattoreille saatetaan tarvita ylimääräisiä ympäröiviä rakenteita lämmönsäätelyn hallintaan.

2.2.2.5 Magnetrostriktiiviset materiaalit

Magnetrostriktiiviset materiaalit toimivat kuten pietsosähköiset materiaalit. Niihin voidaan soveltaa suurinta osaa pietsomateriaaleille kehitellyistä aktuaattorikonstruktioista.

2.2.2.6 Elektro- ja magnetoreologiset elastomeerit

Elektro- ja magnetoreologiset elastomeerit toimivat hyvin ilman mitään ylimäärästä rakenneratkaisua ympärillään. Elastomeerien integrointi rakenteeseen omina kerroksinaan antaa tarpeeksi tukea. Niiden toiminta perustuukin kerroksen materiaaliominaisuuksien muuttamiseen, ja tällöin erillisen rakenteen lisääminen sen ympärille olisi turhaa.

Magnetoreologinen elastomeeri tarvitsee toiminta-herätteeksi magneettikentän. Yleisin tapa tuottaa hallittuja magneettikenttiä on kela, joka on paljon tilaa vaativa rakenne aktuaattorin ympärillä. Periaatteessa mikä tahansa muuttuva virta aiheuttaa ympärilleen magneettikentän, mutta kela on tehokkain tapa saada aikaan voimakas ja oikein suunnattu magneettikenttä.

2.2.3 Saavutettavat liikealueet

Eräs merkittävä rajoitus älykkäissä kuitukomposiittirakenteissa on useimpien aktuaattoreiden liikealueen pienuus. Taulukkoon 7 on koottu keskimääräisiä venymäarvoja älyrakenteissa käytettäville materiaaleille.

Pietsokeraamisten aktuaattoreiden liikealuetta on yritetty kasvattaa monin eri keinoin. Erittäin mielenkiintoisia tutkimuskohteita ovat esijännityksestä kaareutetut aktuaattorit sekä pinoaktuaattorit. Näiden lisäksi on pietsokeraamien yhteydessä tutkittu erilaisia liikkeen vahvistuskeinoja, jotka pääosin perustuvat mekaanisen välityssuhteen muuttamiseen. Siirtymää suurennettaessa kuitenkin voima vastaavasti pienenee, mikä voi muodostua ongelmaksi monissa sovelluksissa.

Pietsopolymeerit toimivat kertaluokkaa suuremmalla liikkeellä kuin perinteiset pietsokeraamit. Liikealueet jäävät silti samalle tasolle kuin pehmeillä pietsokeraameilla ja saattavat siksi aiheuttaa rajoituksia polymeerien käytettävyyteen. Elektrostriktiiviset materiaalit toimivat samalla liikealueella pietsopolymeerien kanssa.

Muistimetalleilla liikealueet ovat useimpiin sovelluksiin riittäviä, mutta toisaalta suuret liikkeet saattavat olla myös ongelmallisia komposiittirakenteen eheyden kannalta. Integroitaessa muistimetalliaktuaattoreita laminaatin sisään saatetaan aktuaattoreille joutua tekemään vaativia pintakäsittelyitä tartunnan varmistamiseksi. Lisäksi matriisi saattaa säröytyä aktuaattorin lähellä.

Magnetostriktiiviset materiaalit pystyvät samansuuruisiin siirtymiin kuin elektrostriktiiviset materiaalitkin. Tämä siis voi aiheuttaa rajoituksia kuten muillakin pienen liikealueen aktuaattorimateriaaleilla.

Elektro- ja magnetoreologisia elastomeerejä ei ole suunniteltu käytettäväksi liikkeen tuottamiseen, vaan niiden pääasiallinen tarkoitus on muuttaa jäykkyyttään ja vaimenustaan muuttamatta kokoaan.

Taulukko 7. Älymateriaaleja keskimääräisten venymien mukaan lajiteltuna [1].

	actuation strain
shape memory effect	5,4E-02
magnetic SMA	2,6E-02
electrostrictors	1,6E-03
magnetostriction	1,3E-03
high strain piezo	1,3E-03
piezopolymer	8,5E-04
low strain piezo	1,4E-05

2.2.4 Saavutettavat jännitykset

Pietsokeraaminen elementti tuottaa suuria jännityksiä. Jännitystä saadaan usein enemmän kuin tarpeeksi, ja ylimäärää käytetäänkin usein siirtymän kasvattamiseen. Taulukoon 8 on kerätty eri älyrakenteissa käytettävien materiaalien tuottamia keskimääräisiä jännitysarvoja. Pietsopolymeerit tuottavat pienempiä jännityksiä kuin pietsokeraamit. Ne ovat kuitenkin useimmissa tilanteissa riittäviä. Elektrostriktiiviset materiaalit tuottavat pietsojen kanssa samansuuruisia jännityksiä.

Muistimetallit tuottavat suurimpia voimia kuitukomposiittisissa rakenteissa käytetyistä aktuaattorimateriaaleista. Tämä johtaa siihen, että muistimetallisten aktuaattoreiden koko voidaan pitää pienenä. Magnetostriktiiviset materiaalit pääsevät lähes samoihin voimiin kuin muistimetallit.

Elektro- ja magnetoreologiset elastomeerit eivät tuota suuria jännityksiä, eikä niitä käytetä liikettä tuottavina aktuaattoreina vaan vaimentimina.

Taulukko 8. Älymateriaaleja keskimääräisten jännitysten mukaan lajiteltuna [1].

	actuation stress [MPa]
shape memory effect	4,0E+02
magnetostriction	1,5E+02
magnetic SMA	3,7E+01
electrostrictors	1,1E+01
high strain piezo	6,5E+00
low strain piezo	2,0E+00
piezopolymer	1,3E+00

2.2.5 Aktuaattorin nopeus

Nopeus on erittäin tärkeä ominaisuus aktuaattoreissa, varsinkin jos niitä käytetään värähtelynvaimennukseen. Älykkäitä kuitukomposiitteja yritetään saada servojen ja tulevaisuudessa jopa mahdollisesti pneumaattisten aktuaattoreiden korvaajiksi, joten nopeudessa pitäisi päästä ainakin servojen tarjoamaan muutosnopeusluokkaan. Moniin muodonhallintasovelluksiin riittävät varsin hitaat liikkeet. Myös matalataajuisia värähtelysovelluskohteita on löydettävissä. Taulukossa 9 esitetään eri aktuaattorimateriaaleilla saavutettavia aktuoitintaajuuksia.

Pietsosähköiset materiaalit ovat nopeita. Niiden herätetaajuudet ovat niin suuria, että pietsokeraameilla on mahdollista tuottaa ultraääntä. Elektrostriktiiviset materiaalit toimivat nopeimmillaan kertaluokkaa matalammilla taajuuksilla kuin pietsokeraamit. Magnetrostriktiiviset materiaalit toimivat pietsokeraamien tavoin hyvin suurilla herätetaajuuksilla.

Elektro- ja magnetoreologiset elastomeerit toimivat suhteellisen nopeasti. Niiden jäykkyyden ja vaimennuksen muutokset tapahtuvat millisekunneissa.

Muistimetallit ovat hitaita mutta silti tarpeeksi nopeita useisiin sovelluskohteisiin. Muistimetallien hyvänä ominaisuutena voi pitää mahdollisuutta toteuttaa hyvin matalia taajuuksia herätteessä ja mahdollisuutta ylläpitää herätettyä liikettä.

Taulukko 9. Älymateriaaleja keskimääräisten nopeuksien mukaan lajiteltuna [1].

	driving frequency [Hz]
low strain piezo	2,5E+07
magnetostriction	2,5E+07
high strain piezo	1,5E+07
piezopolymer	5,1E+06
electrostrictors	6,5E+04
magnetic SMA	1,7E+04
shape memory effect	4,5E+00

2.2.6 Aktuaattoreiden integrointi

Kuitukomposiittisissa rakenteissa on eduksi, jos aktuaattorit ovat integraalirakenteisia eli matriisiaineeseen rakenteen valmistuksen kovetusvaiheessa kiinnitettyjä kuitu- tai tasomaisia osia. Tällöin päästään eroon turhista ylimääräisistä rajapinnoista, jotka ovat usein vaurioiden alkamiskohtia. Integraalinen rakenne vähentää myös mallinnustyötä, koska tällöin ei tarvitse mallintaa useaa erilaista rajapintaa vaan riittää tutkia rakenteesen syntyvät tyypilliset rajapinnat aktuaattorin ja matriisiaineen välillä.

Jos sen sijaan joudutaan kiinnittämään erillisiä koteloituja toimilaitteita rakenteen pinnoille, saatetaan menettää koko älykkään kuitukomposiittisen rakenteen painonsäästö. Lisäksi tilanteessa, jossa pinnalta rakenteeseen johdettavat voimat ovat suuria, voidaan rakennetta joutua vahvistamaan aktuaattoreiden kohdilta, mikä lisää painoa ja kustannuksia.

Muistimetallien laminoiminen epoksimatriisiin on todettu toimivaksi ratkaisuksi. Prepregkalvojen väliin laminoituja lankoja tutkittaessa on todettu, että niiden liitos matriisiaineen kanssa on hyvä eikä ympäristössä ole havaittavissa huokosia. Kuitenkin on otettava huomioon, että lankojen on edullista olla suunnattu mahdollisimman samaan suuntaan kuitujen kanssa. Lankojen määrällä on myös yhteys huokosten määrään siten, että tiheämmässä lankaverkossa tulee useammin haitallisia huokosia lankojen väliin. Laminaattiin voi sijoittaa muistimetallilankojen sijasta myös muistimetallikalvoa.

Muistimetallien integroiminen rakenteeseen asettaa haasteita lankojen jäähtymiselle. Muistimetallien syklinopeuden määrittää lämpiäminen ja jäähtyminen yhdessä ja rakenteen sisällä sijaitsevat langat on usein paljon haasteellisempaa saada jäähtymään kuin pinnalle liitetyt.

Pietsokeraameja on integroitu älyrakenteisiin usealla tavalla. Näistä yleisimmin käytössä ovat yksittäisten pietsolevyjen ja kalvojen laminoiminen rakenteeseen sisään sekä niiden liimaaminen valmiin rakenteen ulkopinnalle.

Sähköisissä materiaaleissa on aina muistettava ottaa huomioon johdotus, jolla virtalähde saadaan kiinni aktuaattoriin. Myös induktion käyttöä laminaattirakenteeseen integroitujen sähkökenttään reagoivien funktionaalisten materiaalien aktuoinnissa on tutkittu. Tällöin voidaan tehdä sähköinen liitos ilman fyysistä kontaktia, joka osaltaan parantaa rakenteen ominaisuuksia, koska näin vältetään lisäämstä epäjatkuvuuskohtia rakenteeseen.

Rakenteen pinnoille kiinnitettyjen aktuaattoreiden kanssa tulee usein ongelmia värähtelyominaisuuksien kanssa. Näistä ongelmista päästään yleensä eroon siirtämällä aktuaattori rakenteen sisään integroiduksi osaksi. Rakenteen sisällä aktuaattorit ovat myös paremmin suojassa ympäristön haitallisilta vaikutuksilta.

2.3 Anturit

Älykkäissä kuitukomposiittirakenteissa tarvitaan antureita rakenteen oman tilan ja ympäristön havainnointiin. Rakenteet ovat usein hyvinkin epälineaarisia eikä niistä voida mitata kaikkia tarvittavia suureita suoraan. Tällöin puuttuvia suureita joudutaan laskemaan muiden suureiden pohjalta, mikä vaatii usein paljon laskentatehoa isossa rakenteessa.

Laskentatehon tarpeen kasvaessa joudutaan miettimään laskennan hajauttamista useille pienemmille yksiköille, jotka mahdollisesti olisivat itsenäisiä jokaisessa anturissa erikseen. Kaikkien eri antureiden tiedon hallinta on haasteellinen, ja tutkimuksissa onkin vertailtu erilaisia hierarkioita antureilta saatavan tiedon hallintaan [16].

2.3.1 Materiaalit ja rakenneratkaisut

Älyrakenteissa voidaan käyttää anturimateriaaleina samoja materiaaleja kuin aktuaattoreinakin, varsinkin pietsosähköiseen toimintaan perustuvia.

2.3.1.1 Pietsosähköiset materiaalit

Pietsokeraameista antureiksi soveltuvat parhaiten ne, joilla on suuri jännitevakio. Tällöin pienestäkin muodonmuutoksesta saadaan suuri jännite, joka on häiriösietokyvyn ja signaalivahvistuksen kannalta edullista.

PVDF

PVDF- eli polyvinyylideenifluoridikalvot kuuluvat pietsosähköisiin materiaaleihin, joilla on suuri jännitevakio. Muodonmuutoksen niissä aikaansaama jännite on jopa kerta- luokkaa suurempi kuin perinteisillä pietsokeraameilla. Voimakkaan jännitteenmuodostuksen takia PVDF-kalvot toimivat hyvin anturisovelluksissa.

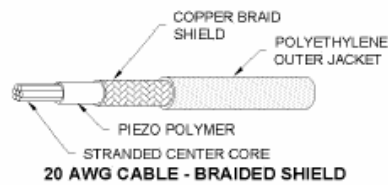
PVDF-materiaalista voidaan valmistaa hyvin erikokoisia kalvoja. Valmistettuja kalvoja voidaan leikata sovelluskohteessa tarvittaviin muotoihin. Tämä mahdollistaa anturin muotoilun halutun ominaismuodon havaitsemiseen levykentän värähtelyssä. Levykenttien värähtelyominaismuodoilla on yksilöllisiä aallonhuippuja, ja siksi on mahdollista muotoilla anturi siten, ettei se havaitse kuin yhden ominaismuodon.

Taulukko 10. PVDF ja sen rinnakkaispolymeerien materiaaliarvoja [2].

Symbol	Parameter	PVDF	Copolymer	Units
t	Thickness	9, 28, 52, 110	<1 to 1200	μm (micron, 10^{-6})
d_{31}	Piezo Strain Constant	23	11	$10^{-12} \frac{\text{m/m}}{\text{V/m}}$ or $\frac{\text{C/m}^2}{\text{N/m}^2}$
d_{33}		-33	-38	
g_{31}	Piezo Stress constant	216	162	$10^{-3} \frac{\text{V/m}}{\text{N/m}^2}$ or $\frac{\text{m/m}}{\text{C/m}^2}$
g_{33}		-330	-542	
k_{31}	Electromechanical Coupling Factor	12%	20%	
k_t		14%	25-29%	
C	Capacitance	380 for 28 μm	68 for 100 μm	pF/cm ² @ 1KHz
Y	Young's Modulus	2-4	3-5	10^9 N/m^2
V_0	Speed of Sound	stretch:	1.5	2.3
		thickness:	2.2	2.4
				10^3 m/s
p	Pyroelectric Coefficient	30	40	$10^{-6} \text{ C/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$
ϵ	Permittivity	106-113	65-75	10^{-12} F/m
ϵ/ϵ_0	Relative Permittivity	12-13	7-8	
ρ_m	Mass Density	1.78	1.82	10^3 kg/m
ρ_e	Volume Resistivity	$>10^{13}$	$>10^{14}$	Ohm meters
R_{\square}	Surface Metallization Resistivity	<3.0	<3.0	Ohms/square for NiAl
R_{\square}		0.1	0.1	Ohms/square for Ag Ink
$\tan \delta_e$	Loss Tangent	0.02	0.015	@ 1KHz
	Yield Strength	45-55	20-30	10^6 N/m^2 (stretch axis)
	Temperature Range	-40 to 80...100	-40 to 115...145	$^\circ\text{C}$
	Water Absorption	<0.02	<0.02	% H ₂ O
	Maximum Operating Voltage	750 (30)	750 (30)	V/mil(V/ μm), DC, @ 25 $^\circ\text{C}$
	Breakdown Voltage	2000 (80)	2000 (80)	V/mil(V/ μm), DC, @ 25 $^\circ\text{C}$

Pietsokaapelit

Viime aikoina kehitellyt pietsokaapelit on huomattu toimivaksi ratkaisuksi liikenteenvalvonnassa [2]. Pietsokaapeli on rakenteeltaan perinteisen koaksiaalikaapelin tapainen, mutta siinä on eristekerros korvattu PVDF-kalvolla. Pietsokaapeleiden kuitumainen muoto helpottaa niiden käyttöä kuitukomposiittisissa rakenteissa. Taulukossa 11 esitetään erään valmistajan pietsokaapelin materiaaliarvoja.



Kuva 17. Pietsokaapelin rakenne [2].

Taulukko 11. Pietsokaapelien materiaaliarvoja [2].

Parameter	Units	Value
Capacitance @ 1KHz	pF/m	600
Tensile Strength	MPa	60
Young's Modulus	GPa	2.3
Density	kg/m ³	1890
Acoustic Impedance	MRayl	4.0
Relative Permittivity @1KHz		9
tan δ_e @1KHz		0.017
Hydrostatic Piezo Coefficient	pC/N	15
Longitudinal Piezo Coefficient	Vm/N	250 x 10 ⁻³
Hydrostatic Piezo Coefficient	Vm/N	150 x 10 ⁻³
Electromechanical Coupling	%	20
Energy Output	mJ/Strain (%)	10
Voltage Output	kV/Strain (%)	5

2.3.1.2 Kuituoptiikka

Kuituoptiikka näytti vielä kymmenen vuotta sitten parhaalta ehdokkaalta älykkäiden rakenteiden anturiratkaisuksi, mutta tällä hetkellä tutkimus kuituoptisten ratkaisujen parissa on vähenemässä. Nyt näyttää siltä, ettei tekniikoita pystytä kehittämään enää eteenpäin. On kuitenkin selvää, että useassa sovelluskohteessa voitaisiin menestyksekkäästi käyttää valokuituantureita.

Valokuitujen suurin etu on erittäin korkea herkkyys paineelle ja lämpötilalle. Kuituoptisten ratkaisujen suurimmat ongelmat liittyvät valonlähteeseen ja anturiin sekä niiden liittämiseen muuhun rakenteeseen. Valokuitujen toiminta perustuu lähes poikkeuksetta lähtevän ja perille tulevan valon vaihe-eroihin tai valon voimakkuuden mittaamiseen. Tällöin pienetkin värähtelyt anturin tai valonlähteen välissä saattavat aiheuttaa suuria virheitä mittauksiin.

Bragg- ja Fabry–Perot-anturit

Interferometriset anturit ovat kuituoptiikan eräs ratkaisu kuitukomposiittisiin rakenteisiin. Niiden toiminta perustuu lähtevän ja vastaanotetun valopulssin vaihe-erojen mittaamiseen. Tunnetuimmat interferometriset anturityypit ovat Bragg ja Fabry–Perot.

Bragg-tyyppinen kuituoptinen anturi mittaa Bragg-heijastusta periodisesti vaihtelevan taitekertoimen omaavasta valokuidun ytimeistä. Tutkimuksissa on todettu Bragg-tyyppisellä anturilla hyvät pitkäkestoisuusominaisuudet oikeissa rakenteissa [17]. Fabry–Perot-tyyppinen anturi mittaa kuidun päässä olevan resonaattorientelon moodien muutoksia. Kummankin anturityypin etuna on mahdollisuus toteuttaa ne yhdellä kuidulla, eli mittasignaalin lähetys ja vastaanotto voidaan tehdä samasta päästä kuidussa. Tällöin rakenteeseen syntyy vain yksi pinta, jossa anturien instrumentointi aiheuttaa epäjatkuvuutta.

2.3.1.3 Hiilikuitu

Hiilikuitua on perinteisesti pidetty vain passiivisena rakenneaineena sekä tavallisissa että älykkäissäkin kuitukomposiittirakenteissa. Maailmalla on kuitenkin tehty jonkin verran tutkimusta hiilikuitujen käyttämisestä sensorimateriaalina älykkäisiin kuitukomposiitteihin. Tutkimuksissa on keskitytty hiilikuidun resistiivisyyden muutoksiin jännityksen funktiona [18]. Tuloksista on päätelty, että hiilikuitu soveltuisi varsin hyvin anturimateriaaliksi. Heti alussa on kuitenkin huomioitava antureiksi käytettävien hiilikuitujen päiden erottaminen valmistettavan kappaleen pintojen ulkopuolelle, jotta saadaan ne yhdistettyä mittalaitteistoon. Hiilikuidun resistiivisyys on pieni ja tarkkaa mittalaitteistoa vaativa suure. Sen muutokset ovat varsin pieniä, joten resistiivisyysmittaukset ovat häiriöalttiita ja niiden tulkinta on haasteellista.

2.3.2 Antureiden kiinnittäminen rakenteeseen

Antureiden sijoittelu rakenteeseen tulee suunnitella tarkkaan, jotta mahdollisimman vähällä määrällä antureita saataisiin kaikki tarvittava tieto rakenteesta. Värähtelynvaimennussovellus on tässä suhteessa erittäin haastava, sillä koneenrakennuksessa käytettävien kappaleiden ominaisvärähtelyjen eri moodien löytäminen ja antureiden asettelu siten, että ne pystyvät kunkin moodin erottelemaan, voi olla vaikeaa.

Valokuitujen kiinnittäminen laminoimalla ne integraaliseksi osaksi rakennetta onnistuu, kunhan kuitujen pinta käsitellään sopivasti. Niillä saavutetaan täydellinen kiinnittyminen, ja koska valokuidut ovat suhteellisen ohuita, ne häiritsevät ympäröivää matriisia

vähän. Kuten kaikkien kuitumaisten älyrakenneosien yhteydessä, suuntaamalla valokuidut rakenteellisten kuitujen kanssa samaan suuntaan vähennetään huokosten syntymistä laminoinnissa. Mittausinformaation kannalta on kuitenkin usein tarpeen sijoittaa valokuidut kohtisuoraan rakenteellisia kuituja vastaan. Valokuituja laminoitaessa on aina muistettava, että niiden tulee olla rakenteen reunoilla tarpeeksi ulkona, jotta kiinnittäminen valolähteeseen ja mahdolliseen valoanturiin on mahdollista.

Pietsokeraamiset anturit kiinnitetään rakenteeseen usein liimaamalla pinnalle. Joissain tapauksissa ne voidaan liittää rakenteen sisään levymaisessä muodossa. Pietsosähköiset polymeerikalvot joko laminoidaan rakenteen kuitukerrosten väliin tai liimataan valmiin rakenteen pinnalle jälkikäteen. Rakenteen toiminnan kannalta olisi parempi saada anturit integroitua sisään, mutta valmistustekniikat ja korjattavuus asettavat usein toiseen suuntaan ohjaavia reunaehtoja.

2.3.3 Mittasuureet

Älykkään rakenteen määritelmään kuuluu rakenteen oman tilan havainnointi. Rakenteen oman tilan havainnointiin tarvitaan yleensä rakenteen sisään integroituja tai sen pinnalle kiinnitettyjä antureita. Joskus voidaan käyttää myös ulkoisia antureita, jotka eivät ole kosketuksissa rakenteeseen mutta pystyvät havainnoimaan sen tilaa. Rakenteen koko tilaa ei kuitenkaan ole mahdollista mitata, vaan on tukeuduttava matemaattiseen mallinukseen ja arvioitava rakenteen tilaa anturien antaman, usein hyvin rajallisen informaation perusteella. Rakenteen mekaaninen käyttäytyminen on tunnettava, jotta voitaisiin valita rakenteeseen parhaiten soveltuvat anturityypit ja sijoittaa ne optimaalisesti.

2.3.3.1 Asema

Asema on mahdollisesti vaikeimmin mitattava suure kuitukomposiittisen älyrakenteen muodon- ja värähtelyhallinnassa mutta samalla yksi tärkeimmistä mitattavista suureista. Sen mittaamisen vaikeus johtuu siitä, että yleisesti se voidaan mitata vain ulkopuolisesta lähteestä, joka ei siis voi olla osa rakennetta. Aseman mittaamista hankaloittaa myös se, että aktiivisesti muotoaan muuttavassa rakenteessa muutokset saattavat olla hitaita ja niitä halutaan ylläpitää staattisina. Aktiivisen muodonhallinnan perustana on kuitenkin tieto siitä, missä asemassa kukin rakenteen osista milläkin ajan hetkellä on.

Toinen mahdollisuus mitata asemaa on jatkuvasti laskea paikkaa integroimalla muista mittasuureista. Tässä on ongelmana suuri laskentatehon tarve ja alkuarvona tarvittavan referenssitason määrittäminen.

2.3.3.2 Venymä

Venymää mitataan useimmiten venymäliuskoilla, ja paikallinen venymä on helppo mitata sekä perinteisillä metallisilla venymäantureilla että uusilla funktionaalisiin materiaaleihin perustuvilla mittaustekniikoilla. Rakenteen pinnasta tai sisältä saatavasta mittaustiedosta on mahdollista laskea myös rakenteen sisäisiä nopeuksia ja siirtymiä. Tällöin laskenta-
tehon tarve kasvaa nopeasti rakenteen koon ja epälineaaristen pinnanmuotojen mukana.

Venymäantureiden määrän optimointi rakenteen tilan määrittämisen tarpeisiin onkin tärkeää suunnitteluvaiheessa, koska rakenteen paino muuttuu jokaisen ylimääräisen venymäanturin mukana.

2.3.3.3 Kiihtyvyys

Kiihtyvyyden mittaaminen onnistuu melko vaivattomasti useillakin kiihtyvyydsanturi-
tyypeillä. Piettosähköisillä materiaaleilla on helppo mitata määritetyn massan aiheutta-
mia inertiaivoimia. Ne ovat pienellä laskentateholla muutettavissa helposti kiihtyvyyden
arvoiksi. Ongelmia saattaa tulla erityisen hitaista liikkeistä, joiden kiihtyvyydet katoavat
mittauskohinaan. Piettosähköisiä antureita käytetään usein niiden pienen massan vuoksi,
koska isojen paikallisten massojen lisääminen suhteellisen kevyeen rakenteeseen aiheut-
taisi häiriötä sen värähtelykäyttäytymiseen.

2.3.3.4 Lämpötila

Lämpötilan mittaus onnistuu vaivattomasti, koska suurin osa piettosähköisistä materiaa-
leista on pyrosähköisiä. Lämpötilan mittaaminen onkin pietsojen pyrosähköisyyden ta-
kia tärkeää suorittaa jollain sellaisella anturilla, joka ei osallistu muiden suureiden mit-
taamiseen. Useassa kohteessa on mahdollista käyttää myös perinteisiä lämpötila-
antureita.

2.3.3.5 Itsediagnostiikka

Mitä monimutkaisemmasta älyrakenteesta on kyse ja mitä useampia antureita ja aktuaat-
toreita rakenteessa on, sitä tärkeämmäksi osaksi rakenteen tilan havainnointia tulee itse-
diagnostiikka. Silloin rakenne itsenäisesti päättelee useiden eri anturien antaman tiedon
perusteella, onko jokainen funktionaalinen osa sekä niitä ympäröivä rakenne toiminta-
kuntoinen ja ehjä. Rakenteen tietoisuus omasta toiminnastaan ja eheydestään tuo kui-
tenkin mukanaan uusia ongelmia, koska järjestelmien kokonaismäärä kasvaa ja oman

tilan mittaamisen tarkkuus on kalibroitava sopivin väliajoin. Itsediagnostiikka rakentuu yleensä siten, että rakenne käy läpi jonkin testisarjan, jossa on huomioitu kaikki rakenteen ja sen funktionaalisten osien vaurioitumistyytit.

2.3.4 Mittaustarkkuus

Rakenteisiin yhdistettävissä anturiratkaisuissa mittaustarkkuus on valittava siten, ettei kohina aiheuta virheitä mittaukseen. Kaikilla anturimateriaaleilla, joita on käytetty älykäissä rakenteissa, päästään erittäin suuriin tarkkuuksiin venymän mittauksessa.

Rakenteissa usein halutaan mitata värähtelytaajuuksia. Kuituoptiikalla ja pietsosähköisillä antureilla päästään useaan kilo- ja jossain tapauksissa megahertsiin, mutta ongelmia ilmeneekin alarajalla. Mittaustarkkuus on alhaisilla värähtelynopeuksilla erittäin huono, ainakin kiihtyvyyssantureilla ja kuituoptisilla antureilla. Venymäliuska-anturilla on helpompi havaita hitaita taajuuksia venymänä, joista saa laskennallisesti selvitettyä värähtelytaajuudet.

2.3.5 Häiriöt

Lämpötilavaihtelut huonontavat mittaustarkkuutta, jos niitä ei osata kompensoida. Siksi antureissa on yleensä sisäänrakennettuna lämpötilankompensointi. Lämpötilanvaihteluiden aiheuttama häiriö mittaustuloksiin on usein luonteeltaan mittausalueen hidasta siirtymistä ja harvoin nopeaa häiriökohinaa. Lämpötilan vaihtelut aiheuttavat vähemmän häiriöitä, jos anturit sijoitetaan rakenteen sisäosiin, jolloin ympäristössä tapahtuvat nopeat tai hetkittäiset lämpötilanvaihtelut eivät vaikuta kovin voimakkaasti sisäosiin tai ne ainakin on helpompi kompensoida.

Anturikäyttöön tarkoitetuilla pietsosähköisillä materiaaleilla on suuri erottelukyky venymien suhteen ja niiden aikaansaamat jännitteet anturin yli ovat huomattavia. Tästä johtuen signaalihäiriöt johtimista tai muista sähköisistä häiriöistä jäävät suhteessa signaalitasoon vähäisiksi.

2.3.6 Perinteiset anturit

Perinteisistä antureista venymäliuskat soveltuvat kuitukomposiittirakenteisiin. Venymäliuska tarvitsee kuitenkin ulkoisen virtalähteen toimiakseen anturina, kun taas PVDF-kalvolla toteutettu venymäanturi ei sellaista tarvitse.

Perinteisiksi antureiksi voisi tässä tapauksessa mieltää myös pietsosähköiset kiihtyvyyssanturit, joita voi ostaa hyllytavaranä. Niiden liimaaminen rakenteen pinnalle on varsin käyttökelpoinen tapa toteuttaa kiihtyvyyssmittauksia. Tällä ratkaisulla ei kuitenkaan päästä kovin hyvin integraaliseen kokonaisratkaisuun kuitukomposiittisen rakenteen kannalta, joten lankamaisten anturien integroiminen rakenteen sisään olisi parempi ratkaisu.

2.4 Älyrakenteen toiminnan mallinnus ja seuranta

Kuitukomposiittisessa älyrakenteessa on yleensä rakenteellisten kuitujen ja matriisimateriaalien lisäksi rakenteeseen liitetty funktionaalisia materiaaleja, joiden toiminta on usein hyvinkin epälineaarista. Koska kuitukomposiittinen laminaattirakenne jo itsessään on epälineaaraisesti käyttäytyvä, on sen mekaanista käyttäytymistä riittävän hyvin kuvaavien matemaattisten mallien kehittäminen vaatinut valtavan määrän työtunteja. Tämä ominaisuus korostuu vielä oikeissa rakenneratkaisuissa, joiden muoto ei ole matemaattisen kauneuden vaan rakenteessa vallitsevien reunaehtojen määräämää. Toimivan matemaattisen mallin toteuttaminen on erityisen vaikeaa oikeissa älykkäissä rakenneratkaisuissa, kun muodoltaan epälineaariseen rakenteeseen vielä lisätään epälineaaraisesti käyttäytyviä osia.

Muistimetallien ominaisuuksia on yritetty mallintaa matemaattisesti ja siinä on onnistuttu joidenkin muistimetalliyhdisteiden osalta. Niiden epälineaarinen käyttäytyminen lämpötilan mukaan on saatu mallinnettua riittävällä tarkkuudella. Mallinnuksessa on otettava huomioon, että tällä hetkellä vielä jokaisen muistimetallin kohdalla on tehtävä kokeisiin perustuva varmennus mallista, sillä muistimetallien koostumuksessa pienetkin epäpuhtaudet tai eri materiaalien atomiosuuksien muutokset saattavat tuoda suuria muutoksia malliin. Muistimetallimallit ovat tällä hetkellä vielä suurelta osin pelkkiä matemaattisia malleja paperilla eikä niitä juurikaan ole yhdistetty kaupallisiin FEM-mallinnusohjelmistoihin. Joitain lisäosia ohjelmistolle on kehitelty, mutta näiden erillisten pakettien ostaminen voi olla erittäin vaikeaa.

Pietsosähköisten materiaalien mallintamisessa on päästy hyviin tuloksiin, ja niiden käyttäytyminen on saatu toimiviksi malleiksi, jotka muutamalla parametriarvolla saadaan sovitettua lähes kaikille pietsomateriaaleille. Pietsosähköisten materiaalien ja kuitukomposiittisten rakenteiden matemaattisten mallien yhteensovittamista on tutkittu, ja siinä on päästy toivottuihin tuloksiin. Tutkimustiedon perusteella ainakin kaikissa perustapauksissa saadaan kuitukomposiittisen rakenteen ja pietsosähköisen materiaalin yhteen liittäminen ja myös aktuaattorivaikutus mallinnettua tarvittavalla tarkkuudella. Funktionaalisten materiaalien mallinnus on usein kytketty laskentatehtävä, joka saattaa lisätä 3D-mallin laskenta-aikaa huomattavasti.

Tällä hetkellä älymateriaalien kehityksessä ollaan tasolla, jossa mallien teko on mahdollista, mutta ne on lähes poikkeuksetta varmennettava kokeilla.

2.4.1 Vaste

Rakenteen mallinnettavuus ja käyttäytymisen ennakoitavuus on välttämätöntä älykkäiden kuitukomposiittisten rakenteiden käytettävyyden kannalta. On erittäin hidasta, vaikeaa ja kallista nykyään ottaa käyttöön uusia rakenneratkaisuja, jos niiden suunnittelua ei voida alkuvaiheessa tehdä tietokoneella elementtimenetelmiin perustuvilla työkaluilla. Vieläkin hankalammaksi asian tekee materiaalikokeiden suuri määrä jokaiselle valmistettavalle erälle erikseen. Tästä johtuen tulisi löytää mahdollisimman kuvaavat matemaattiset kaavat joskus hyvinkin epälineaarisesti toimiville aktuaattoreille ja antureille.

2.4.1.1 Vaste ulkoiseen herätteeseen

Ulkoiset herätteet ovat ehkä suurin ongelma älykkään rakenteen suunnittelussa, sillä on mahdollista ennakoida jollain tarkkuudella suurin osa rakenteeseen sen eliniän aikana tulevista herätteistä, mutta on lähes mahdotonta ennakoida täydellä varmuudella kaikkia herätteitä. Älyrakenteeseen tarvitaan myös ulkoisia herätteitä mittaavia antureita. Joskus on kuitenkin vaikea ennakoida kaikkia mahdollisesti tulevia herätteitä siten, että osattaisiin mitoittaa ja sijoittaa anturit oikein.

2.4.1.2 Vaste sisäiseen herätteeseen

Älykkään rakenteen vaste sisäisen aktuaattorin herätteeseen on nykyään riittävällä tarkkuudella mallinnettavissa useille aktiivisille ja niitä ympäröiville passiivisille materiaaliyhdistelmille. Sisäisen herätteen etuna on sen todennettavuus laboratorioympäristössä. Tämä siis tarkoittaa sitä, että on mahdollista mitata kokeilla rakenteen käyttäytymistä kaikilla mahdollisilla aktuaattoriherätteillä.

2.4.2 Eheys

Integraalisissa aktiivirakenteissa, kuten myös perinteisissä rakenteissa, on aina tärkeää seurata rakenteen eheyttä. Kuitukomposiittisen rakenteen eheyden seuraaminen on hankalaa perinteisillä aineilla rikkomattomilla tarkastusmenetelmillä. Funktionaaliset materiaalit tarjoavat joitakin uusia mahdollisuuksia eheyden seuraamiseen, mutta tehtävä on niilläkin haastava.

2.4.2.1 Eheyden havaittavuus

Älyrakenteen eheyden havainnointiin on tutkittu monia erilaisia menetelmiä. On havaittu, että sopivilla antureilla voidaan havainnoida rakenteen eheyttä myös muualla kuin antureiden välittömässä läheisyydessä.

On tärkeää, että anturi pystyy luotettavasti kertomaan tarkkaa informaatiota oman lähiympäristönsä ja rajapintojensa tilasta, koska anturien antaman tiedon perusteella tehdään säättäviä toimenpiteitä. Jos rakenne on vaurioitunut anturin läheltä tai anturi ei ole kunnolla kiinni ympäröivässä matriisiaineessa, anturi antaa helposti väärän kuvan koko rakenteen tilasta.

Optisen kuidun antamasta informaatiosta pystytään selvittämään se, kuinka hyvin matriisiaine on kiinnittynyt kuidun pintaan. Ne toimivat rakenteessa myös muissa anturitehtävissä, ja niiden antamalla informaatiolla pystytään paikantamaan vaurioitunut kohta. Erittäin laajan informaatioantinsa takia optisten kuitujen käyttö on tehokasta. Useaan ympäristön muuttuun reagoiminen ei ole aina toivottua, ja voi olla haastavaa saada selkeää mittaustieto vain halutusta suureesta ilman muiden muuttujien häiriötä.

Hiilikuitujen resistanssia mitatessa voidaan havaita alkavat säröt, mutta hiilikuitujen antamasta informaatiosta ei ole yleensä mahdollista selvittää vaurioaluetta.

Ultraäänialueella toimivia pietsokiteita on käytetty tutkimuksissa äänilähteinä ja vastaanottimina tutkittaessa rakenteen eheyttä [19]. Järjestelyllä on päästy hyviin tuloksiin, ja kuvan muodostaminen koko rakenteen eheydestä rakenteessa itsessään olevien anturien ja aktuaattoreiden avulla on todettu mahdolliseksi.

2.5 Itsekorjaavat rakenteet

Itsekorjaavat rakenteet ovat olleet kiinnostuksen kohteena, alkuun rakennetekniikan puolella betonirakenteita korjaavina tekniikoina [20], ja myöhemmin niitä on tutkittu jonkin verran myös laminaattirakenteiden yhteydessä [21]. Itsekorjaavia rakenteita on toistaiseksi toteutettu yleensä siten, että matriisiin on upotettu onttoja kuituja tai kapsleita, jotka murtuessaan vapauttavat ainetta, joka kovettuessaan korjaa vaurioitunutta matriisia.

Itsekorjaavana rakenteena voisi nähdä myös sellaisen järjestelmän, jossa anturit tutkivat rakenteen eheyttä ja muuttavat rakenteen jäykkyyttä tietyiltä alueilta sen mukaan, missä vahingoittumista tapahtuu, ja saavat siten rakenteen käyttäytymään kuten ehjä rakenne. Toisaalta myös passiivinen rakenteen jäykistäminen vaurioalueella voi olla soveltuva

ratkaisu joihinkin kohteisiin. Tutkimuksissa on päästy tyydyttäviin tuloksiin passiivisessa rakenteen ominaisuuksien muuttamisessa vaurioituneella alueella muistimetallien avulla [22]. Tällöin käytetään hyväksi muistimetallien superelastiselle käyttäytymiselle ominaista hystereesiä energian dissipointiin vaurioituneelta alueelta.

2.6 Käyttörajoitukset

Kohderakenteen ominaisuudet, käyttötarkoitus ja ympäristö asettavat monia rajoituksia rakenteeseen integroitaville funktionaalisille materiaaleille. Tämä voi estää optimaalisten anturien ja aktuaattorien valintaa. Valintaa vaikeuttavat lisäksi materiaalien hyvinkin erilaiset lämpölaajenemiskertoimet.

2.6.1 Liike- ja voima-alueet

Puhtailla veto- ja puristuskuormilla aktuaattoreiden voimat tai varsinkaan siirtymät eivät riitä matriisi- tai kuitumateriaalin hajottamiseen. Liikealueessa rajoituksia käyttöön tulee mahdollisesti kuitulaminaattien taivutuskestävyydestä, sillä sopivasti valitun ja epäsymmetrisesti asetetun aktuaattorin toiminta saattaa saada aikaan huomattavia siirtymiä sivuttaissuunnassa.

Muistimetallilangan aktuoitivenymä on suurimmillaan 8 %, joka on suurempi kuin yleisien matriisimuovien murtovenymät. Muistimetallit menettävät aktuoitokykynsä suhteellisen nopeasti, jos käytetään niiden suurimpia venymiä. Jos valmistetaan yli 100 000 sykliä kestävä rakenne, niin muistimetallien venymät on mitoitettava alle 2–3 %:iin. Isojen siirtymien rakenteeseen matriisimuoviksi on mahdollista valita materiaali, joka kestää jopa 3–4 %:n venymän. Rakenteellisilla kuiduilla on tyypillisesti 0,5–4,5 %:n murtovenymä. Laminaattirakenteet on siten mahdollista suunnitella siten, ettei aktuointi aiheuta eheyden menettämistä.

Muistimetalleja käytettäessä on edullisempaa käyttää useita ohuita kuin yhtä paksua lankaa. Ohuessa langassa resistiivisyys ja jäähtymisnopeus, jotka kummatkin riippuvat langan halkaisijasta, ovat aktuaattorikäyttöön paremmin sopivia.

2.6.2 Lämpötilat

Käyttöympäristön lämpötilalle asettaa rajoituksia kuitukomposiittien matriisiaineen lämmönkestävyys. Kuidut eivät niinkään rajoita lämpötilaympäristöä, koska niitä ympäröivä matriisiaine on yleensä herkempi korkeille lämpötiloille.

Magnetostriktiiviset materiaalit kestävät hyvin lämpöä.

Pietsosähköisillä aineilla lämpötila on otettava huomioon aktuaattoreiden ja antureiden signaalien prosessoinnissa, sillä pietsosähköiset materiaalit ovat usein myös pyrosähköisiä. Pyrosähköisyyden takia aktuaattorit toimivat lämpötilan mukana, ja antureilta tulee virheellistä informaatiota, jollei ilmiötä osata kompensoida. Pietsosähköisillä materiaaleilla on maksimikäyttölämpötila, jonka yläpuolella materiaali menettää pietsosähköiset ominaisuutensa. Pietsosähköisten materiaalien suurimmat käyttölämpötilat ovat huomattavasti korkeammat kuin kuitukomposiittien matriisiaineilla, joten pietsosähköiset materiaalit eivät rajoita käyttölämpötila-aluetta enempää kuin matriisiaineet.

Muistimetallit ovat lämpöaktivoituja, ja niiden transitiolämpötila on usein korkeampi kuin ympäröivän matriisin käyttöalue. Tämä ominaisuus asettaa helposti rajoituksia muodonmuutoksen ylläpitämiselle, jotta metallia ympäröivä matriisi ei vahingoitu lämmön vaikutuksesta. Muistimetalleja on kehitetty myös matalammille transformaatiolämpötiloille, mutta silloin ympäristön lämpötilan säätelyä tulee hallita. Muuten on mahdollista, että muistimetalli aktivoituu myös silloin, kun sen ei ole tarkoitus.

Elektrostriktiiviset aineet ovat voimakkaasti lämpötilariippuvaisia eli ne toimivat hyvin rajoitetulla, noin 30 °C:n, lämpötilavälillä, jota voidaan kuitenkin muokata jonkin verran käyttökohteen mukaan. Lämpötilaväliä ei kuitenkaan voi muokata mielivaltaisesti, vaan sen on oltava elektrostriktiivisten materiaalien käyttöalueen sisällä.

2.6.3 Vaurioherkkyys

Kuitukomposiittisten älyrakenteiden vaurioherkkyys saadaan parhaassa tapauksessa samalle tasolle pelkän kuitukomposiittisen laminaatin kanssa, mutta usein antureiden ja varsinkin aktuaattoreiden lisääminen rakenteeseen lisää vaurioherkkyttä.

Selkeä ongelma tulee rakenteiden sisään liitettyjen aktuaattoreiden vaurioitumisen kautta, sillä aktuaattorit saattavat vaurioitua usealla eri tavalla ja tällöin niiden antama informaatio voi olla virheellistä tai ne saattavat lakata toimimasta kokonaan. Tällainen vaurioituminen tuo mukanaan aina tarpeen valmistaa rakenteeseen sisäistä kerroksellisuutta, jossa jokaisen aktiivisen rakenneosan toiminta on jotenkin tarkkailtavissa muiden rakenneosien avulla. Tutkimuksissa on saatu kartoitettua pietsokeraameista valmistettujen aktuaattoreiden vaurioitumista kuitukomposiittisissa rakenteissa [19].

Pietsokeraamit ovat suhteellisen hauraita vedossa ja taivutuksessa, mutta niiden integroiminen komposiitin sisään vähentää niiden vaurioitumisriskiä huomattavasti.

2.6.4 Korjattavuus

Älyrakenteissa käytetään aktiivisesti muotoaan muuttavia aktuaattoreita, joiden mukana seuraa ongelma aktuaattoriliitosten kestävydestä. Aktuaattoreiden ja antureiden integroiminen laminaattirakenteen sisään tekee vaurioituneen aktuaattorin tai anturin korjaamisen yleensä mahdottomaksi. Ongelmaa voidaan osittain kiertää suunnittelemalla rakenne jo alun perin sisältämään enemmän aktuaattoreita ja antureita kuin olisi ehjän älyrakenteen toiminnan kannalta tarpeellista. Muuten ainoa tapa vaurioituneessa on vaihtaa koko vioittunut rakenne, anturit ja aktuaattorit mukaan lukien. Joissain tapauksissa on vaurioituneesta rakenteesta mahdollista erottaa joitain aktuaattori- tai anturirakenneosia ympäröivästä matriisista ja siten käyttää ne uudelleen hyödyksi korvaavaa rakennetta valmistettaessa.

Rakenne voidaan yrittää suunnitella sellaiseksi, että sen osia voidaan vaihtaa tuhoamatta rakenteen jatkuvuutta, mutta tämä on usein erittäin haasteellinen ja monesti mahdotonkin tehtävä. Rakennneosien vaihtaminen usein edellyttää myös ylimääräisten liitosrajapintojen suunnittelemista rakenteeseen, mikä osaltaan monimutkaistaa rakennetta ja lisää sen massaa ja vaurioherkkyyttä.

2.6.5 Pitkäkestoisuusominaisuudet

Älymateriaalien kaikkien rakenneaineiden pitkäkestoisuusominaisuuksia on tutkittu vähintäänkin yksinään; joissain tapauksissa niitä on tutkittu myös alkeellisissa rakennesovelluksissa.

Pietsokeraamien pitkäkestoisuudelle ei ole pystytty määrittämään tarkkaa rajaa, sillä useat kokeet ovat olleet jo useita vuosia jatkuvassa testauksessa eikä materiaalin ominaisuuksien heikentymistä ole pystytty toteamaan. On selvää, etteivät pelkän pietso-keramin pitkäkestoisuusominaisuudet riitä vaan liitoksen ympäröivään rakenteeseen tulisi olla sellainen, että ympäröivällä rakenteellakin olisi hyvät ominaisuudet pitkäkestoisuuteen. Pietsoaktuaattoreiden pitkäkestoisuutta lyhentää usein myös johdotus, joka väsyttävässä kuormituksessa irtoaa helposti tai saattaa katketa.

Muistimetalleilla on havaittavissa varsin nopeaa vaurioitumista, jos niitä ajetaan liian suurilla virranvoimakkuuksilla tai lämmitetään liian korkeisiin lämpötiloihin. Tavallisilla NiTi-langoilla on hyvien pitkäkestoisuusominaisuuksien aikaansaaminen havaittu hankalaksi, mutta NiTiCu- ja NiTi R-langoilla on päästy jo huomattavan lupaaviin tuloksiin [23]. Tutkimuksissa on saatu tuloksia myös huonosti esikäsiteltyjen lankojen ja epoksi-matriisiin rajakerroksen ongelmista, joista huomattavin on lankojen irtoaminen matriisista, jonka jälkeen ne toimivat matriisiaineesta irrallaan reunatuentojen varassa [24]. Tällöin

kaikki voimat siirtyvät reunasta laminaattirakenteeseen, integraalisen rakenteen edut menetetään ja rakenteen käyttäytyminen muuttuu huomattavasti.

2.6.6 Hinta

Älyrakenteissa käytetyt materiaalit ovat useimmiten tiettyä erikoissovellusta varten kehitettyjä. Käytetystä suuresta tutkimuspanoksesta johtuen älyrakennemateriaalien hinnat ovat poikkeuksetta huomattavasti suurempia kuin massatuotantona toimitettavien vastaavien materiaalien. Kuitenkin jonkinlaista suuntaa saa vertailemalla massatuotannon hintoja, joita on listattu taulukossa 12.

Taulukko 12. Älyrakenteissa käytettyjen materiaalien hintoja.

hiilikuitu prepreg	40 € / m ²		
pietsokiteet	2 € / kpl		
layred pietsot	80 € / kpl	}	nopeaa hinnan alenemista isoissa erissä ostettuna
pietsolevyt	100 € / kpl		
stacked pietsot	400 € / kpl		
muistimetalli	1 € / m		
valokuitu	1 c / m		

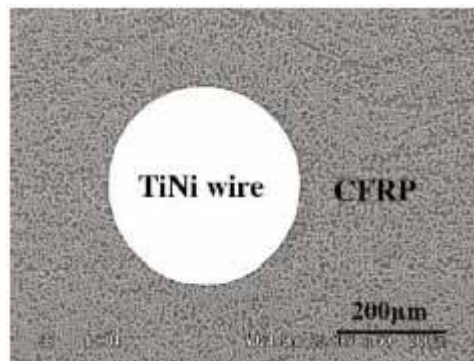
2.6.7 Valmistustekniikat

Kuitukomposiittisten älyrakenteiden valmistuksessa suurimmat ongelmat tulevat matriisiaineen kovetusvaiheesta. Kertamuovien valmistustapa on kovettaa ne korotetussa lämpötilassa, joka on matriisiaineesta riippuen 120–180 °C. Valmistuksessa käytetään usein myös korotettua painetta, jotta valmistettava kappale saataisiin tasalaatuiseksi paksuudeltaan ja pinnankarheudeltaan. Aktuaattoreiden ja antureiden ominaisuudet joudutaan valitsemaan liian suurella lämpötila-alueella toimiviksi lopullista rakennetta ajatellen. Tutkimuksissa on todettu valmistuksen aikana korotetun paineen aiheuttaneen vaurioitumista hauraissa pietsokeraamisissa aktuaattoreissa [19].

Älylaminaateissa käytettyjen muistimetalliaktuaattoreiden transformaatiolämpötila on varsin alhainen, koska matriisiaineen vaurioituminen ja muita korkeasta aktuointilämpötilasta aiheutuvia ongelmia halutaan välttää. Tästä on etua aktuaattorin toimintaa ajatellen, mutta valmistusteknisesti asia on hankala. Muistimetallien laminoiminen kuituluji-tettujen kerrosten väliin onnistuu vain jännityksen alaisuudessa, sillä jännityksellä voidaan saada muutettua transformaatiolämpötilaa. Tavallisesti tämä on vaatinut erikoisvalmisteen jigin käyttöä ja sitä kautta rajannut valmistettavien laminaattien muodon tasomaiseksi. Tutkimuksissa on kuitenkin löydetty toinenkin tapa muuttaa muistimetallien transformaatiolämpötilaa tilapäisesti laminointiprosessia varten. Muistimetallilankojen transformaatiolämpötila nousee, jos niitä muokataan kylmävedolla martensiit-

tisessa olotilassaan [25]. Tällä menetelmällä päästään vapaasti kuitukomposiittien määrään rakenteeseen ilman muistimetallien suorusrajoituksia.

Lankamaisilla aktuaattoreilla ja antureilla, joiden halkaisija on kertaluokkaa kuitukomposiitin rakennekuituja suurempi, saattaa olla vaikeuksia lankojen suunnattavuudessa. Kokoeroa on havainnollistettu kuvassa 18. Tutkimuksissa on huomattu lankojen suunnan vaikuttavan voimakkaasti laminaatin huokoisuuden määrään [26]. Tämä rajoittaa osaltaan kuitukomposiittisen rakenteen toiminnan vapaata suunnittelua. Suunnittelu on useampikerroksisissa laminaateissa kuitenkin tarpeeksi vapaata, että kaikki kuitukomposiitin ortotrooppiset ominaisuudet saadaan käytettyä hyödyksi.



Kuva 18. TiNi-muistimetallilanka hiilikuitulaminaatissa.

2.6.8 Ympäröivät kentät

Lämpötilan vaihtelut ympäristössä vaikuttavat voimakkaasti älyrakenteissa käytettäviin materiaaleihin. Lisäksi kuitukomposiittisen aktuaattoreita ja antureita sisältävän systeemin kaikki eri materiaalikomponentit omaavat yleensä merkittävästi toisistaan eroavat lämpölaajenemisominaisuudet. Tällöin rakenteeseen syntyy lämpötilanmuutoksissa suuria sisäisiä jännityksiä. Tämä voi johtaa vaurioitumiseen, joka on vaikeata huomata. Ympäristön lämpötilan tiedostaminen ja hallitseminen on siis erittäin tärkeää.

Magneettikentät aiheuttavat huomattavasti vähemmän ongelmia kuin lämpötilanmuutokset, koska vain harvat aktuaattori- ja anturimateriaalit reagoivat niihin. Pietso-keramit eivät aiheuta toimiessaan magneettikenttiä eivätkä reagoi niihin. Myöskään tavanomaiset muistimetallit eivät reagoi magneettikenttiin. On kuitenkin aina muistettava, että muuttuva magneettikenttä aiheuttaa virran johtimeen, mutta voimakkaat muuttuvat magneettikentät ovat kuitenkin erittäin harvinaisia.

Magnetostriktiiviset materiaalit eivät reagoi sähkökenttiin. Tästä ominaisuudesta on etua, jos magnetostriktiivisiä ja sähköohjattuja materiaaleja halutaan käyttää rinnakkain samassa rakenteessa. Tällaisella järjestelyllä voidaan ajatella toteutettavan järjestelmien varmennusta sekä myös ympäristön aiheuttamien virheiden havainnointia.

3. Funktionaalisten materiaalien soveltamistapoja ja käyttöesimerkkejä toimirakenteissa

Merja Sippola & Jukka-Pekka Karjalainen

Symboli- ja lyhenneluettelo

MEMS	MicroElectroMechanical System
FBG	Fiber Bragg Grating
NGST	Next Generation Space Telescope
MR	MagnetoRheologic
CLD	Constrained Layer Damping
PCLD	Passive Constrained Layer Damping
ACLD	Active Constrained Layer Damping
VEM	Visco Elastic Material
CNC	Computer Numerical Control
APDC	Active Piezoelectric Damping Composite
EMFI	ElectroMechanical Film
ILSS	InterLaminar Shear Strength
SMA	Shape Memory Alloy
SBJ	Sliding Bolted Joint
CIMSS	Center for Intelligent Material Systems and Structures
RTM	Resin Transfer Molding
BOTDR	Brillouin Optical Time Domain Reflectometry
AE	Acoustic Emission
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
PZT	LeadZirconateTitanate
Ma	Machin luku
AFC	Active Fiber Composite
MIT	Massachusetts Institute of Technology
ISA	International Society for Measurement and Control

IBC	Individual Blade Control
SPA	Systems Planning and Analysis Inc
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
FRP	Fiber Reinforced Polymer
ER	ElectroRheologic
PVC	PolyVinylChloride
NREL	National Renewable Energy Laboratory
EAP	ElectroActive Polymer
ACX	Active Control eXperts
NiTiNOL	NickelTitanium NavalOrdnanceLaboratory
ξ	vaimennussuhde
ω	taajuus
ω_0	ominaistaajuus
$H(\omega)$	dynaaminen vahvistus
V_a	aktuaattorin jännite
Z	impedanssi
M	massa
K	jousivakio
c	vaimennusvakio
F	voima

3.1 Sovellusalueet

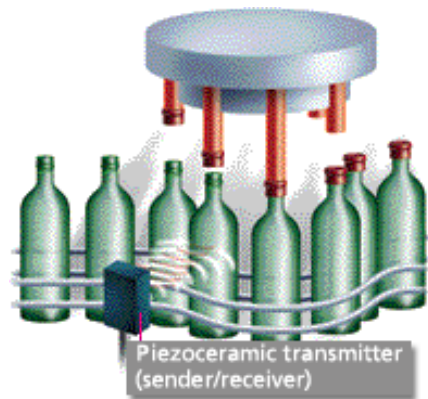
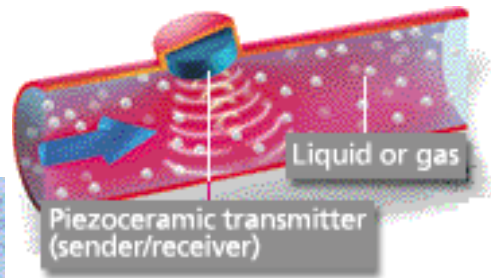
Funktionaalisilla materiaaleilla on suuri määrä mahdollisia soveltamistapoja, joilla voitaisiin ratkaista nykyisten rakenteiden ongelmia ja jopa luoda täysin uudentyyppisiä rakenteita ja laitteita. Tämä edellyttää kuitenkin, että tunnetaan hyvin sekä käytettävien funktionaalisten materiaalien että kohderakenteiden mekaaninen käyttäytyminen.

Tässä kohdassa esitellään tyypillisimmät soveltamistavat ja muutamia käyttöesimerkkejä. Kohdassa 3.2 esitetään lisää käyttöesimerkkejä.

3.1.1 Ympäristön havainnointi

Funktionaaliset materiaalit tarjoavat monia tekniikoita ympäristön havainnointiin. Pietsosähköisiä ja magnetostriktiivisiä aktuaattoreita voidaan käyttää tuottamaan ääniaaltoja erilaisilla taajuuksilla (esim. ultraääntä) ja siten soveltaa kaikuluotauksessa [27, 28]. Kuituoptisilla sensoreilla voidaan havaita mm. painetta, kemiallista konsentraatiota ja lämpötilaa [29]. Vedenkorkeuden vaihteluja voidaan mitata kaikuluotauksella tai painesensoreilla [30]. Nesteen virtausnopeutta voidaan mitata pietsosähköisten ultraääni-kaikuluotainten avulla. Kuvassa 19 on muutamia ympäristönhavainnointisovellutuksia pietsosähköisille sensoreille.

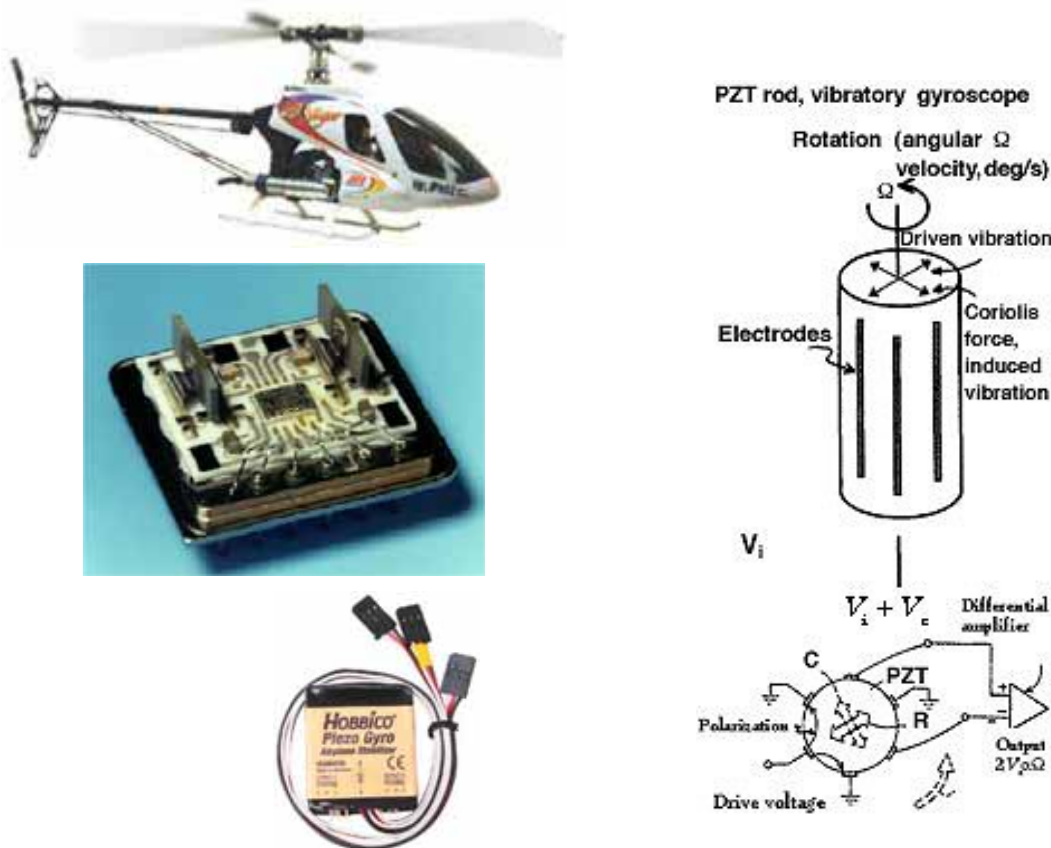
Mikroelektromekaanisia systeemejä (MEMS) voidaan käyttää lämpötilan, paineen sekä virtauksen aiheuttaman leikkausjännityksen mittaamiseen esim. siiven pinnalla [31, 32]. Eräät funktionaaliset materiaalit vaihtavat väriä lämpötilan funktiona, joten niillä voidaan havainnollistaa kuumat pinnat ja siten parantaa henkilöturvallisuutta [33].



Kuva 19. Erilaisia ympäristönhavainnointisovellutuksia pietsosähköisille sensoreille [34].

3.1.2 Oman liikkeen havainnointi

Funktionaalista materiaaleista erityisesti pietsosähköisiä materiaaleja on paljon sovellettu rakenteen tai koneen oman liikkeen havainnointiin. Esimerkkejä tästä ovat maapallon pyörimisliikkeen aiheuttamaa Coriolis-voimaa hyväksikäyttävät pietsosähköiset gyroskoopit, joilla havainnoidaan helikopterin tai lentokoneen nopeutta ja suuntaa [27, 35] ja pietsosähköiset kiihtyvyyssanturit [27, 34] (kuva 20). Rakennuksen kiihtyvyyksiä on mitattu FBG-kuituoptisilla sensoreilla [36] ja myös kuituoptisia gyroskooppeja on toteutettu [37]. Kiihtyvyyssantureita on toteutettu myös MEMSeinä. Robotiikassa sovelletaan paljon pietsosähköisiä kiihtyvyyssantureita ja gyroskooppeja.



Kuva 20. Pietsokiihtyvyyssantureita ja -gyroskooppeja käytetään oman liikkeen havainnointiin [38–41].

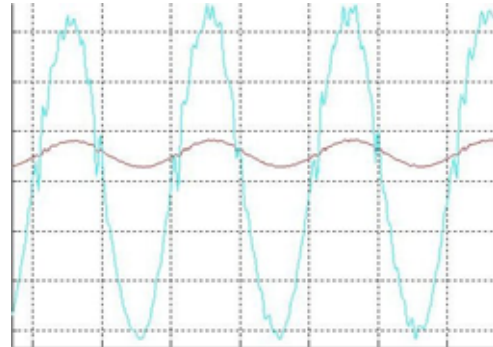
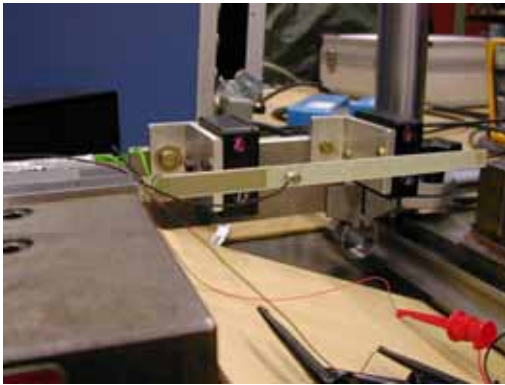
3.1.3 Muodon muuttaminen tai muodonmuutoksen estäminen

Hyvin suoraviivainen sovelluskohde funktionaalisista materiaaleista tehdyille aktuaattoreille ja sensoreille on rakenteen muodonhallinta. Muodonhallinnassa määritellään rakenteen tietyille kohdille (asemapisteille) haluttu asema, joka voi olla annettu tiedostossa käyränä tai käyrinä ajan funktiona tai voidaan antaa esim. tietokoneen näppäimistöltä. Sensorit on sijoitettu rakenteeseen siten, että niillä voidaan suoraan tai välillisesti havaita rakenteen asema asemapisteissä, ja aktuaattorit siten, että niillä voidaan muuttaa rakenteen asema asemapisteissä halutuksi. Sensorien antaman signaalin pohjalta ohjauslogiikka ohjaa toimilaitteita muuttamaan rakenteen asemaa siten, että ero halutun aseman ja todellisen aseman välillä minimoituu.

Yksinkertainen esimerkki on ulokepalkin vapaan pään aseman säätäminen noudattamaan vaikkapa sinimuotoista rataa. Tämä voidaan toteuttaa yhdellä sensorilla ja yhdellä aktuaattorilla. Tässä aktuaattori sijoitetaan palkin tyveen. Sensori voi olla sijoitettu palkin vapaaseen päähän eli säädettävän asemapisteen kohdalle tai palkin tyveen eli aktuaattorin

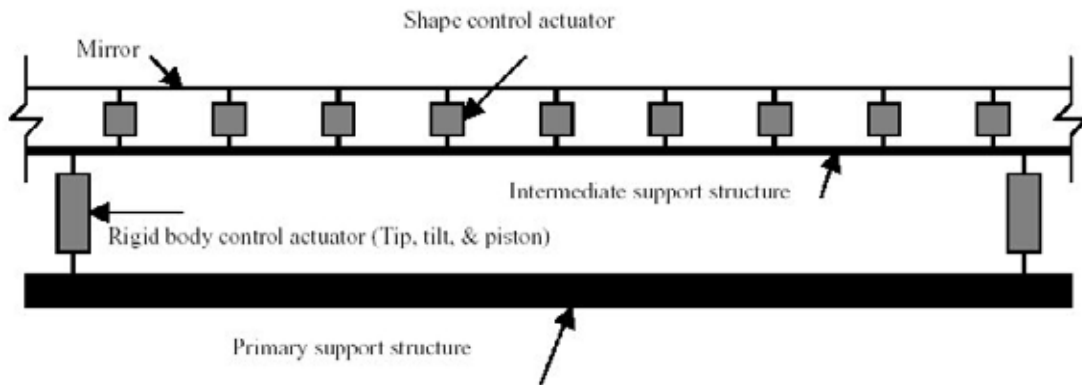
kohdalle. Jälkimmäinen tapa edellyttää sitä, että rakenteesta on olemassa malli, joka kertoo yhteyden säädettävän asemapisteen (palkin vapaan pään) aseman ja sensorin mittaaman arvon (venymä tai asema aktuaattorin kohdalla) välillä. Monimutkaisesta rakenteesta tällaista ei välttämättä ole, jolloin on pyrittävä sijoittamaan sensorit säädettävien asemapisteiden kohdalle. Toimilaitteen optimaalinen sijoitus edellyttää rakenteen muodonmuutoskäyttäytymisen tuntemista.

Tekniikkaa on tutkittu myös VTT:ssä [42]. Yksinkertaiseen lasikuitu-epoksilaminaattulokepalkkiin sijoitettiin venymäliuska ja kiihtyvyyssanturi mittaamaan palkin liikettä (kuva 21). Liikettä mitattiin myös etäisyysmittauslasereiden avulla. Palkin liikettä säädettiin yhdellä pietsoaktuaattorilla. Muodohallinta onnistui hyvin. Kokeissa käytettiin halpaa laminoitua pietsoaktuaattoria, jonka voiman- ja liikkeentuotto eivät riitä isojen rakenteiden muodohallintaan.



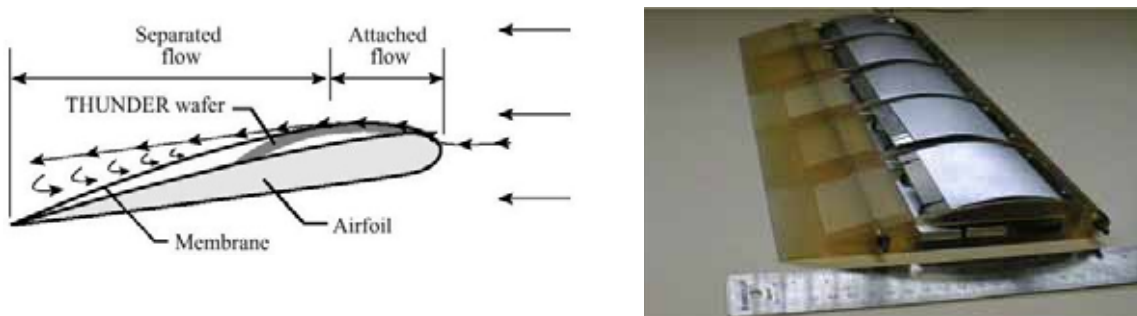
Kuva 21. Pietso sähköisen aktuaattorin ja laseroptisen sensorin käyttö muodohallinnassa [42].

Muodohallinnalla pyritään yleensä muuttamaan tai säilyttämään rakenteen toiminnallisia ominaisuuksia. Esimerkkeinä mainittakoon antennin suuntauksen tai peilin muodon säilyttäminen voimakkaasti vaihtelevissa ympäristöolosuhteissa avaruussovelluksissa [43, 44] (kuva 22), lentokoneen siipiprofilin muodon muuttaminen virtausominaisuuksien muuttamiseksi tavoitteena ohjattavuuden parantuminen tai värähtelyn ja melun syntymisen vähentyminen [45–47], helikopterin roottorinlavan muodon muuttaminen virtausominaisuuksien muuttamiseksi ja sitä kautta melun syntymisen vähentämiseksi [48] tai putken muodon muuttaminen virtausominaisuuksien muuttamiseksi.



Kuva 22. NGST-avaruusteleskoopin peilin muodonhallinta magnetrostriktiivisillä aktuaattoreilla [44].

Jäykän rakenteen muodonhallinnassa aktuaattorien voima ja muodonmuutoskyky kuluvat helposti rakenteen oman jäykkyyden voittamiseen. Siksi on edullisempaa muuttaa vain rakenteen pinnan muotoa. Kentuckyn yliopiston tutkimuksessa, jossa haluttiin siirtää virtauksen irtoamispistettä siiven päällä, kiinnitettiin siipiprofiilin päälle Thunder-aktuaattoreita ja näiden päälle joustava kalvomainen kerros, jonka muotoa aktuaattorit jaksivat muuttaa [46] (kuva 23). Erittäin lupaavana pidetään virtauksen muuttamista suurella joukolla rakenteen pinnalla olevia MEMS-aktuaattoreita, jotka ovat hyvin pieniä ja keveitä [49–51].



Kuva 23. Siipiprofiilin muodon muuttaminen virtausominaisuuksien muuttamiseksi [46].

Robotiikassa muodon- ja liikkeenhallinta näyttelevät merkittävää osaa. Esimerkkeinä mainittakoon käärmemäinen robotti, jolla tutkitaan sortuneita rakennuksia [52] (kuva 24), sekä uivaa kalaa matkiva robotti [53].



Kuva 24. Robottikäärme sortuneiden rakennusten tutkimiseen [52].

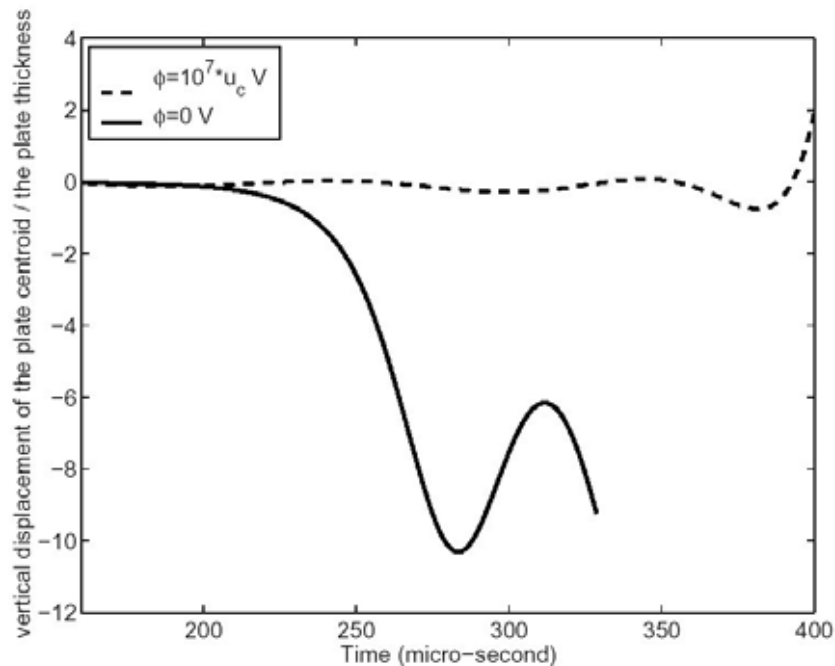
Muodonhallintaa voisi käyttää myös ajoneuvon tai aluksen törmäyskestävyyden (kuva 25) parantamiseen ja törmäysenergian ohjaamiseen vähiten vaaralliseen suuntaan, koska törmäys on dynaaminen tapahtuma. Esimerkiksi paneeli voidaan kaareuttaa ennen iskuja, ja iskun aikana paneelin kaarevuutta muuttamalla voidaan pehmentää iskuja jakamalla iskuenergiaa pidemmälle ajalle. Iskun aikana rakenneosien muotoa muuttamalla voidaan ohjata iskuenergiaa ohi ihmisen tai arvokkaan laitteen. Muodonmuutoksen ohjaamiseen kannattaa yhdistää jäykkyydenhallinta ja aktiivinen muodonmuutoksen estäminen.



Kuva 25. Auton törmäysturvallisuus on otollinen kohde muodon- ja jäykkyydenhallinnalle [54].

Toimilaitteilla voidaan myös estää hoikan rakenneosan stabiiliuden menetys: pilarin nurjahtaminen, palkin kiepahtaminen [55] tai laatan lommahtaminen [56]. Kuvassa 26 esitetään lähteessä [57] kuvattu hiilikuitulaatan lommahtamisen estäminen pietsoaktuaattoreilla. Yhtenäinen viiva kuvaa laatan keskipisteen siirtymää, kun pietsoaktuaattoreilla. Katkoviiva kuvaa laatan keskipisteen siirtymää, kun pietsoaktuaattoreiden voima riittää tässä soveltamistavassa vain pienehköjen rakenteiden muodonmuutoksen estämiseen. Muistimetalliaktuaattoreilla tai magnetostriktiivisillä aktuaattoreilla päästäneen nopeimmin käytännön sovellutuksiin suuremmissa rakenteissa. Tätä tekniikkaa voisi soveltaa esimerkiksi maanjäristys- tai tulipalotilanteissa tai ajoneuvon törmäessä

rakennukseen. Jäykistämällä juuri kyseisen kuormituksen kannalta kriittisiä pilareita tai palkkeja voitaisiin ehkä turvata ihmisten poistuminen rakennuksesta. Hoikkien rakennosien muodonmuutoksen estämiselle aktiivisesti on paljon potentiaalisia sovelluskohteita myös ajoneuvo- ja lentokonetekniikassa. Lääketieteen sovelluksissa instrumentit ovat usein hoikkia ja niiden muodonhallintaan liittyy merkittävänä osana nurjahduksen aktiivinen estäminen [58].



Kuva 26. Hiilikuitu-epoksilaatan lommahtamisen estäminen pietsoaktuaattoreilla [57].

3.1.4 Aktiivinen värähtelynvaimennus vastaliikettä tuottamalla

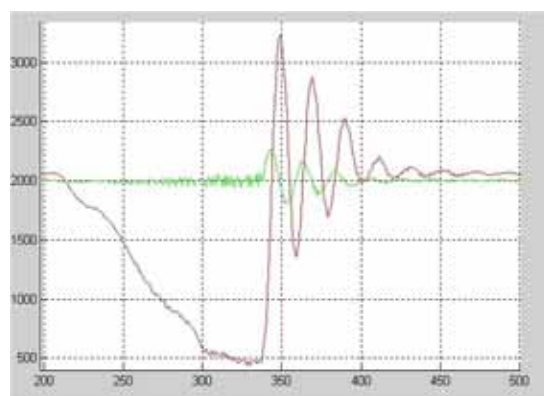
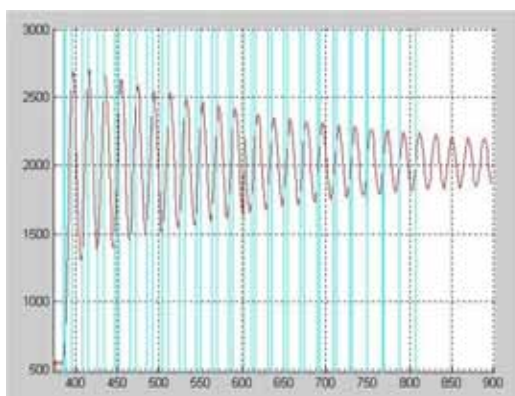
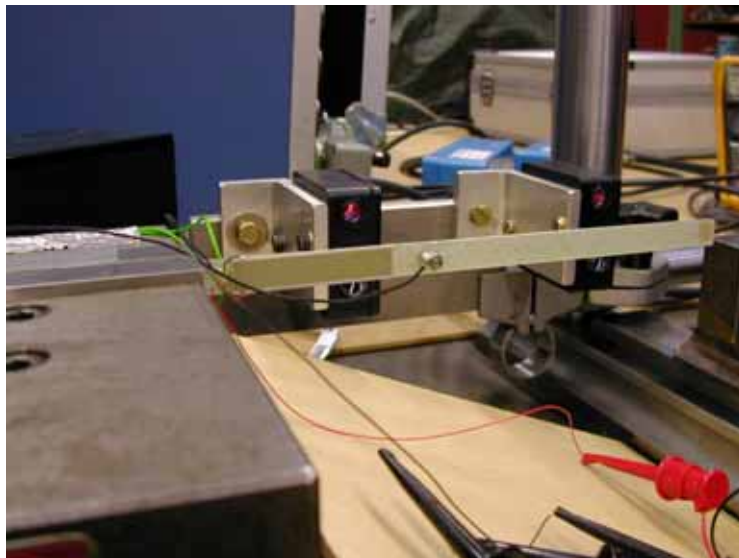
Varsin suoraviivainen tapa vaimentaa rakenteen värähtelyä on tuottaa aktiivisesti vastaliikettä. Tähän voidaan sovelluksesta riippuen käyttää esimerkiksi pietsosähköisiä aktuaattoreita tai muistimetalliaktuaattoreita. Pietsosähköisten aktuaattorien etuna on niiden nopeus, muistimetalliaktuaattorit sen sijaan ovat voimakkaampia. Muistimetalliaktuaattorien käyttökelpoisuutta rajoittavat aktuaattorien hitaus sekä terminen väsyminen, pietsojen käyttökelpoisuutta voiman- ja venymäntuoton pienuus.

Tässä funktionaalisten materiaalien soveltamistavassa sijoitetaan sensoreita ja aktuaattoreita rakenteen niihin kohtiin, joissa rakenteen ominaismuotojen mukaiset liikkeet ovat suurimpia. Jos rakenteessa on joku kohta, jonka värähtely on erityisen haitallista, pyritään tähän kohtaan sijoittamaan sensori. Aktuaattori pyritään taas sijoittamaan kohtaan, jossa tuotetulla vastaliikkeellä voidaan minimoida tuon kriittiseen kohdan värähtely. Tekniikkaa on tutkittu myös VTT:ssä sijoittamalla yksinkertaiseen lasikuitu-epoksi-

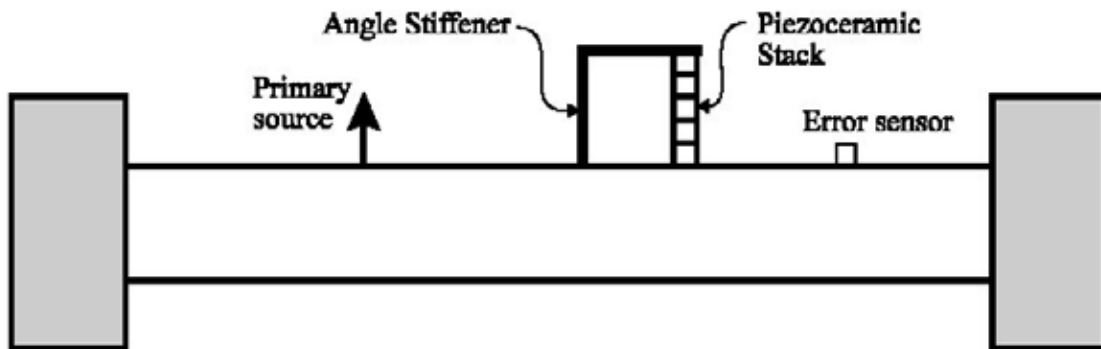
laminaattiulokepalkkiin venymäliuska ja kiihtyvyyssanturi mittaamaan palkin liikettä ja pietsoaktuaattori tuottamaan vastaliikettä [42] (kuva 27). Palkin värähtely onnistuttiin vaimentamaan erittäin nopeasti sekä asemaan, nopeuteen että kiihtyvyyteen perustuvalla säädöllä. Kokeissa käytettiin halpaa laminoitua pietsoaktuaattoria, jonka voiman- ja liikkeentuotto ei riitä isojen rakenteiden värähtelyn vaimentamiseen.

Pietsosähköisten pinoaktuaattorien voimat sen sijaan ovat kohtuullisia. Tätä voisi hyödyntää vaikkapa kuvan 28 mukaisella konstruktiolla [59] esimerkiksi jäykistetyissä kerroslevypaneeleissa.

Helikopterin roottorien värähtelyn vaimentamista aktiivisesti vastaliikettä tuottamalla on tutkittu lähteessä [60]. Komposiittipalkkien ja laattojen värähtelyn vaimentamista aktiivisesti vastaliikettä tuottamalla on tutkittu lähteissä [61–74]. Tekniikka toimii yleensä muuten hyvin, mutta sitä rajoittavat akтуаattorien ominaisuudet.



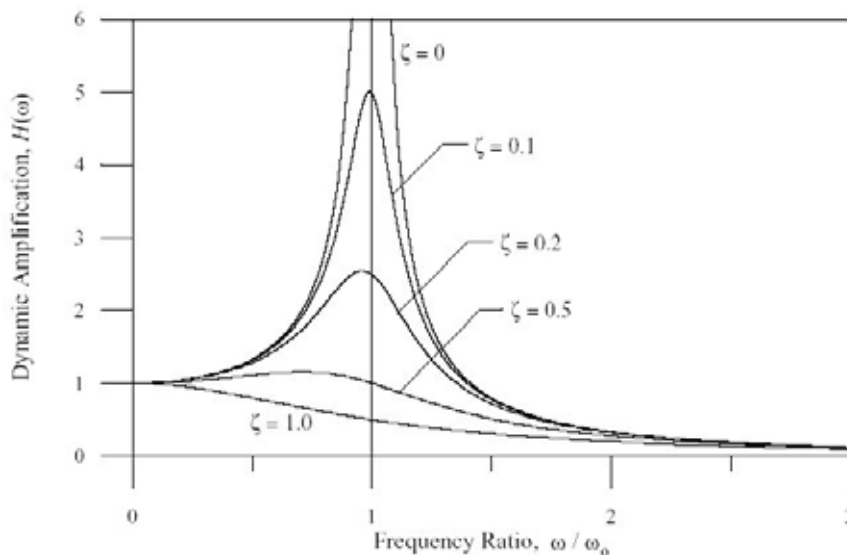
Kuva 27. Laminaattiulokepalkin vapaan värähtelyn vaimentaminen pietsoakтуаattorilla [42].



Kuva 28. Pietsosähköisen pinoaktuaattorin käyttö jäykisteessä [59].

3.1.5 Jäykkyyden muuttaminen

Rakenteen jäykkyydellä on suuri merkitys rakenteen värähtelykäyttäytymisessä. Jos rakenteeseen kohdistuvan herätteen taajuus on lähellä rakenteen ominaistaajuutta, syntyy resonanssitilanne, jossa rakenteen värähtelyamplitudi kasvaa voimakkaasti (ks. kuva 29) ja voi rikkoa rakenteen. Jäykkyyden muuttaminen muuttaa rakenteen ominaistaajuutta. Muuttamalla rakenteen jäykkyyttä aktiivisesti aktuaattorien tai aktiivisten liitosten tms. avulla voidaan välttää resonanssitilanteen syntyminen.



Kuva 29. Yhden vapausasteen värähtelijän siirtymän vahvistus taajuussuhteen funktiona [75].

Rakenteen jäykkyyttä aktiivisesti säätämällä voidaan ehkä myös parantaa rakenteen iskunkestävyyttä tai törmäyskestävyyttä, koska isku tai törmäys on dynaaminen tapahtuma. Ihminen osaa hyödyntää rakenteen jäykkyyden säätämistä esim. siten, että valmistautuu

palleaan suuntautuvaa iskua vastaan jännittämällä vatsalihaksensa. Tällöin jännitetyt vatsalihakset suojaavat herkkiä sisäelimiä. Laskuvarjohyppääjä koukistaa jalkojaan juuri ennen maahantuloa jännittäen lihaksensa mutta joutaen polvista. Tällöin kuormituksesta tulee vähemmän iskumainen eikä luita katkea. Myös rakenteissa voitaisiin eri osien jäykkyyttä dynaamisesti säätämällä törmäyksen aikana parantaa törmäyskestävyyttä ja ehkä myös ohjata törmäysenergiaa vähemmän vaaralliseen suuntaan ja näin parantaa esim. ajoneuvon tai aluksen henkilöturvallisuutta. Törmäyssovellutuksissa jäykkyydenhallintaan kannattaa yhdistää muodonhallinta.

Eräs tapa rakentaa adaptiivinen jäykkyydeltään ja vaimennukseltaan säädettävä iskuenergiaa absorboiva rakenne esitetään lähteessä [76]. Siinä ristikkomainen rakenne koostuu pienistä sauvoista, joissa jokaisessa on säädettävä kitkavaimennin. Kyseinen rakenne lienee kuitenkin turhan monimutkainen käytännön sovellutuksiin. Parempi tapa voisi olla aktiivinen iskuenergian ohjaaminen hyvin iskuenergiaa absorboiviin passiivisiin rakenteisiin.

Robottiikassa on havaittu, että kävelevän robotin nivelten jäykkyyttä aktiivisesti säätämällä voidaan vähentää robotin tarvetta säätää liikettään pienten virheiden kumuloitumista korjaavien rotaatioaktuaattorien avulla [77]. Nivelten jäykkyyden aktiivisella säätämällä voidaan myös parantaa robotin tai jopa hermostoltaan vaurioituneen ihmisen kykyä seistä paikallaan [78].

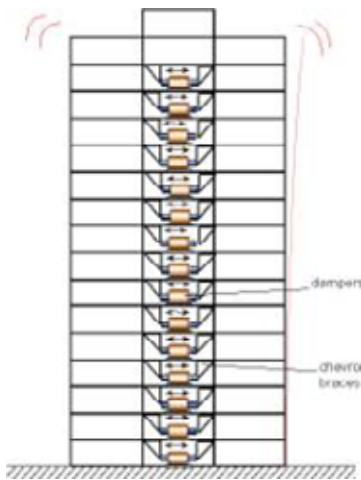
Erilaisten ohjainten jäykkyyttä aktiivisesti säätämällä voidaan ohjaintuntumaa ja ohjauksen läpäisevyyttä säätää esim. siten, että liian rajut liikkeet eivät välity ohjaimesta ohjattavaan laitteeseen [79].

Siltojen ja talojen ym. suurten paikallaanseisovien rakenteiden maanjäristysvärähtelyn eristämistä ja vaimentamista rakenneosien, esim. liitosten, jäykisteiden tai kannatin-kaapeleiden, jäykkyyttä aktiivisesti säätämällä on tutkittu melko paljon [80–82]. Magnetoreologisessa värähtelyvaimentimessa jäykkyys muuttuu yhdessä vaimennuksen muuttumisen kanssa [83]. Siltarakenteiden ja talojen maanjäristysvärähtelyiden vaimentaminen vaatii järeitä aktuaattoreita. MR- ja magnetostriktiivisten aktuaattorien vaatimat suuret kelat on helpompi toteuttaa näihin paikallaanpysyviin rakenteisiin kuin liikkuviin koneisiin.

Lujitemuovisissa siltarakenteissa voisi käyttää myös muistimetalliaktuaattoreita rakenteen jäykkyyden ja muodon muuttamiseen. Lujitemuovisten aktiivisten esijännityskaapeleiden, joiden jännitystä ja siten rakenteen jäykkyyttä voidaan aktiivisesti muuttaa, pitkäaikaiskestävyyttä ja säätöä tarkastellaan lähteessä [84]. Muistimetalliaktuaattoreilla voitaisiin ehkä toteuttaa myös kriittisen rakenneosan automaattinen jäykistyminen palotilanteessa.

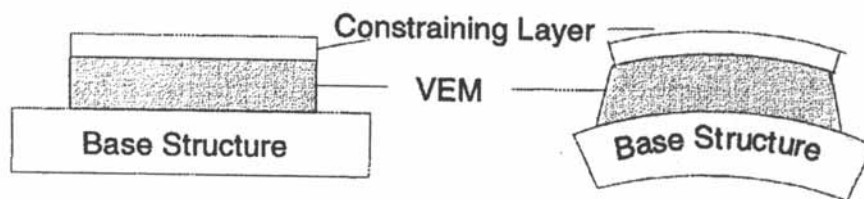
3.1.6 Vaimennuksen muuttaminen

Rakenteen värähtelyä voidaan vaimentaa parantamalla materiaalin vaimennusominaisuuksia. MR-nesteitä ja elastomeerejä voidaan käyttää lisäämään rakenteeseen viskoosia vaimennusta. Tällöin myös jäykkyys muuttuu. Esimerkkejä MR-vaimentimien soveltamisesta talonrakennuksessa löytyy lähteistä [85–89] (ks. myös kuva 30), sillanrakennuksessa lähteistä [88, 90] ja autoissa lähteistä [91, 92]. MR-vaimentimia pidetään ehkä parhaina puoliaktiivisinä vaimentimina siltojen ja talojen ym. paikallaan seisovien suurten rakenteiden maanjäristysvärähtelyjen vaimentamiseen. MR-vaimentimet tulevat lisääntymään myös ajoneuvoissa.



Kuva 30. Kerrostalon värähtelyjen vaimentaminen MR-vaimentimien avulla [88].

Levyäisten ja putkimaisten rakenteiden värähtelyä on menestyksellisesti vaimennettu passiivisilla rajoitetun kerroksen (Passive Constrained Layer Damping) konstruktioilla, joissa varsinaisen rakenteen päälle laminoidaan kerros viskoelastista materiaalia ja viskoelastisen kerroksen päälle vielä jäykistävä kerros, joka voi olla samaa tai eri materiaalia kuin perusrakenne. Jäykistävä kerros rajoittaa viskoelastisen kerroksen pinnan muodonmuutoksia, mikä aiheuttaa kerrokseen leikkausmuodonmuutoksia, joissa dissipoi energiaa (ks. kuva 31).



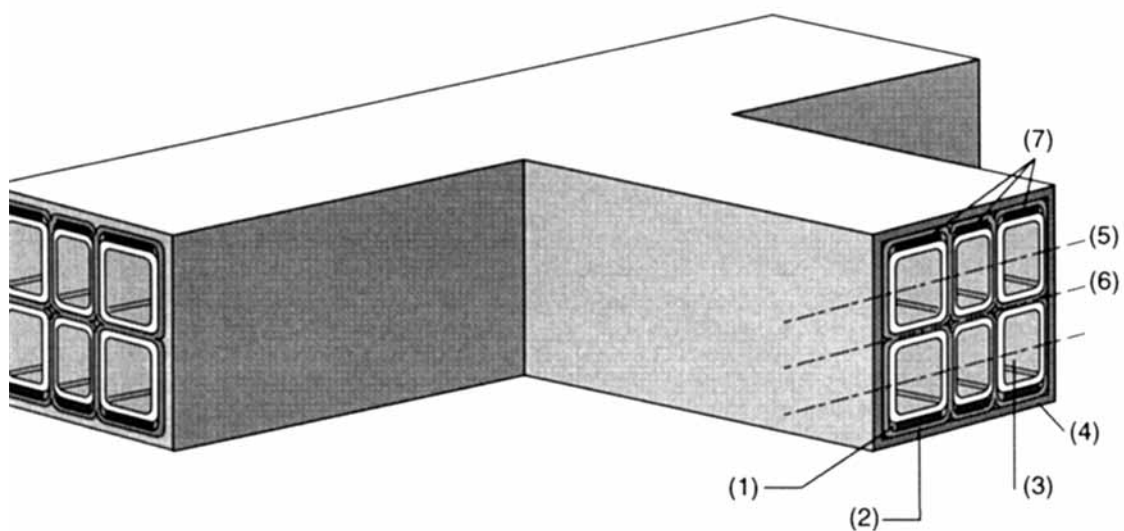
Kuva 31. Periaatekuva värähtelyn vaimentamisesta rajoitetulla viskoelastisella kerroksella (PCLD) [93].

Tämä vaimennustapa sopii myös lujitemuovirakenteisiin, jolloin jäykistävä kerros voi olla myös samaa laminaattia. Kerroksia voi olla useampiakin, jolloin perusmateriaalikerrokset (lujitemuovikerrokset) ja viskoelastiset kerrokset vuorottelevat. PCLD-menetelmällä on paljon sovellutuksia rakenneäänenvaimennuksessa. Esimerkiksi Swedacin viskoelastista kerrosta AVS-700 voidaan valmistajan mukaan käyttää lujitemuovirakenteisissa huviveneissä ja sota-aluksissa, tuulivoimalan lavoissa ja koneiden koteloidissa [94]. PCLD-menetelmää on sovellettu myös lentokoneissa [95] ja monissa avaruusrakenteissa [96]. PCLD:n soveltamista helikopterin roottorinlapaan on myös tutkittu [97]. PCLD-menetelmällä voidaan saada lujitemuovilaminaatin tai kerroslevyn vaimennus moninkertaistettua [98]. Vaimentavan kerroksen paksuuden on kuitenkin oltava riittävän suuri, mielellään peruslaminaatin paksuuden luokkaa. PCLD-menetelmä ei kuitenkaan ole kovin tehokas matalilla taajuuksilla [99].

Myös VTT:ssä on kokeiltu PCLD-menetelmää teräksisessä kotelopalkissa [100]. Kokeissa käytettiin teräksisen kotelopalkin päälle liimattua ScotchDamp-vaimennusteippiä. Kun teippiä liimattiin vain palkin päihin, jäi vaimennustulos melko vaatimattomaksi (häviökerroin noin 0.4, kun pelkän teräksisen kotelopalkin häviökerroin oli noin 0.2), mutta kun teippiä liimattiin useana eri palana koko palkin pituudella kaikissa kotelon ulkopinnoissa, oli vaimennustulos varsin hyvä (häviökerroin noin 1.2). Em. kokeilujen jälkeen on markkinoille tullut monia, mahdollisesti merkittävästikin parempia viskoelastisia materiaaleja ja uusia rakenteen päälle liimattavia PCLD-konstruktioita, joissa on rajoittava kerros mukana. Isoissa rakenteissa kannattavinta lienee käyttää CLD-vaimennuspaloja vain niissä kohdissa rakennetta, joissa muodonmuutokset perusrakenteen pinnassa ovat suurimmat.

Jäykkien ja raskaiden rakenteiden, kuten koneperustuksien ja mastojen jalustojen, värähtelynvaimennukseen voisivat soveltua leikkausputkivaimentimet [101, 102]. Tässä CLD-konseptin versiossa rakenteen sisään jätetään (esim. suorakaiteen muotoisia) aukkoja, joihin asennetaan viskoelastisella kerroksella päällystettyjä putkia, jotka liimataan perusrakenteeseen epoksilla (ks. kuva 32). Putkien jäykkä sisäkerros toimii tällöin rajoittavana kerroksena. Lisäksi putkien neutraaliakseli sijaitsee eri kohdassa kuin koko rakenteen neutraaliakseli. Tällaisessa konstruktiossa viskoelastiseen materiaaliin syntyy voimakasta leikkausta, jossa dissipoituu energiaa tehokkaasti. Leikkausputkilla toteutettava vaimennusjärjestely on suunniteltava kuhunkin rakenteeseen erikseen.

- (1) Epoxy. Injected around the tubes to create a tight bond between the square tubes and base. It transmits shock loads and vibrations at all frequencies from the base structure to the viscoelastic polymer tape.
- (2) A high-loss damping viscoelastic polymer tape wrapped around the internal tubes. Relative motion between the tubes and the base shears the viscoelastic layer of the tape to dissipate vibration energy to the submicron level.
- (3) Internal tubes. Can act as conduits for temperature-controlled fluid to minimize machinery temperature differentials.
- (4) Base structure. The longitudinal hole of this structure must maximize the interior perimeter for greater contact with the damping materials.
- (5) Neutral axis of the tubes
- (6) Neutral axis of the base structure
- (7) Plates. Welded to the interior tubes to displace the tubes' neutral axes as far away from that of the base as possible. This results in relative motion between the base and the tubes that shears the viscous layer of the polymer tape.



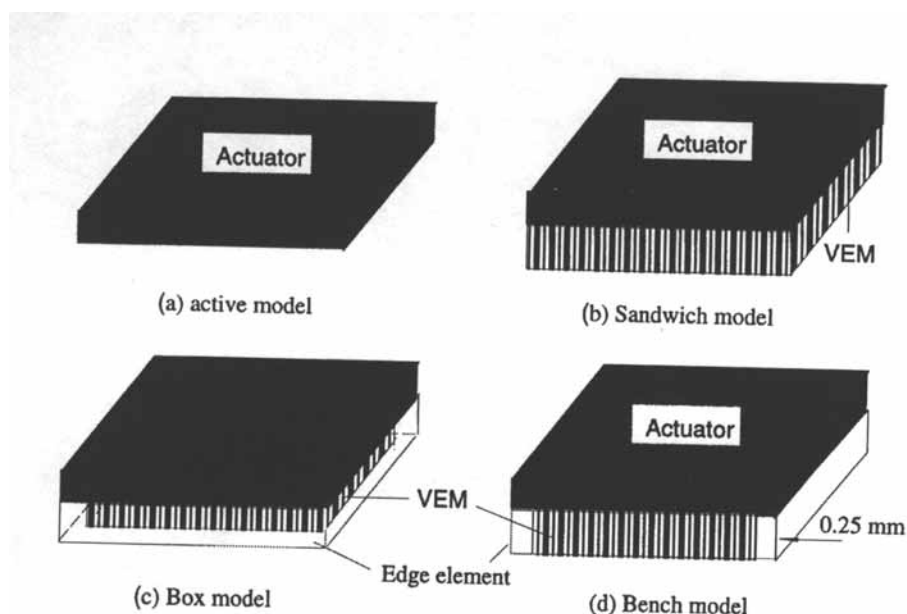
Kuva 32. Leikkausputkivaimentimia massiivisessa rakenteessa (CNC-hiomakoneen perustus) [102].

Aktiivisessa rajoitetun kerroksen konstruktiossa (Active Constrained Layer Damping) jäykistävänä kerroksena käytetään pietsoaktuaattoria. Tällä tekniikalla voidaan rakenteen vaimennusta kasvattaa huomattavasti, esim. Kawieckin [103] mukaan jopa kymmenkertaiseksi verrattuna vastaavaan passiiviseen vaimennuskonstruktion. Aktuaattori sekä lisää viskoelastisen kerroksen leikkausmuodonmuutosta ja sitä kautta energian dissipoitumista että tuottaa vastaliikettä varsinaiseen rakenteeseen. ACLD-tekniikan on osoitettu toimivan hyvin monenlaisissa joustavissa rakenteissa [104–115].

ACLD-tekniikalla voidaan saavuttaa hyviä vaimennustuloksia myös jäykissä rakenteissa, joissa pietsoaktuaattorien voima ei riitä tehokkaaseen aktiiviseen värähtelynvaimennukseen vastaliikettä tuottamalla [116, 117]. ACLD:n etuna verrattuna vastaavaan passiiviseen konstruktion on myös mahdollisuus kattaa laajempi taajuuskaista (passiivinen osa vaimentaa korkeita taajuuksia, aktiivinen osa matalia taajuuksia). ACLD:n etuna verrattuna aktiiviseen värähtelynvaimennukseen pelkästään vastaliikettä

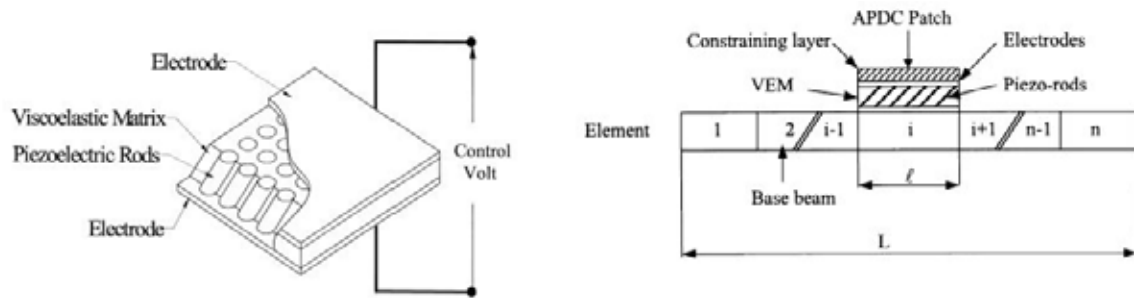
tuottamalla on myös sen luotettavuus: rakenne vaimentaa värähtelyjä myös passiivisena. ACLD-tekniikkaa on sovellettu esimerkiksi helikopterin roottorinlavoissa [118, 119]. Rajoittava kerros voisi koostua myös aktiivisesta lujitemuovilaminaatista, jonka sisässä on pietso- tai muistimetalliaktuaattoreita. Myös leikkausputkikonstruktiossa olisi mahdollista käyttää rajoittavana kerroksena (sisäputkena) aktuaattoreita sisältävää laminaattia.

Aktiivisessa värähtelynvaimennuksessa ohjattavuus eli kyky kontrolloida vaimennuksen suuruutta ja vaimennusprofiilia taajuustasossa on tärkeä. Varadan ja muut [93] ovat tutkineet erilaisten ACLD-konstruktioiden tehokkuutta ulokepalkin taivutusvärähtelyn vaimentamisessa ja havainneet, että kerroslevykonstruktioilla (kuva 33b) saavutetaan suurin kokonaisvaimennustulos, mutta ohjattavuuden kustannuksella, koska tässä passiivisen vaimennuksen osuus on suurimmillaan ja viskoelastisen kerroksen pieni jäykkyys välittää aktuaattorin tuottamaa liikettä huonosti rakenteeseen. Kuvan 33c laatikko-konstruktioilla taas vaimennus jää melko heikoksi, koska reunaelementit jäykistävät viskoelastista kerrosta liikaa. Kuvan 33d penkkikonstruktioilla saavutetaan varsin hyvä vaimennustulos ja ohjattavuus on silti hyvä, koska passiivisen ja aktiivisen vaimennuksen osuudet ovat tasapainossa. Kaikki em. konstruktiot kasvattavat rakenteen ominaistaajuutta, koska ne lisäävät rakenteen kokonaisjäykkyyttä. Kokeilemalla erilaisia reunaelementteiltään epäjatkuvia muunnelmia penkkikonstruktioista voidaan ehkä löytää sopiva vaimennustekniikka myös laatta- ja levyrakenteiden 2D-taivutukseen. ACLD-tekniikalla voidaan myös räätälöidä rakenteen taajuusvaste halutulle alueelle.



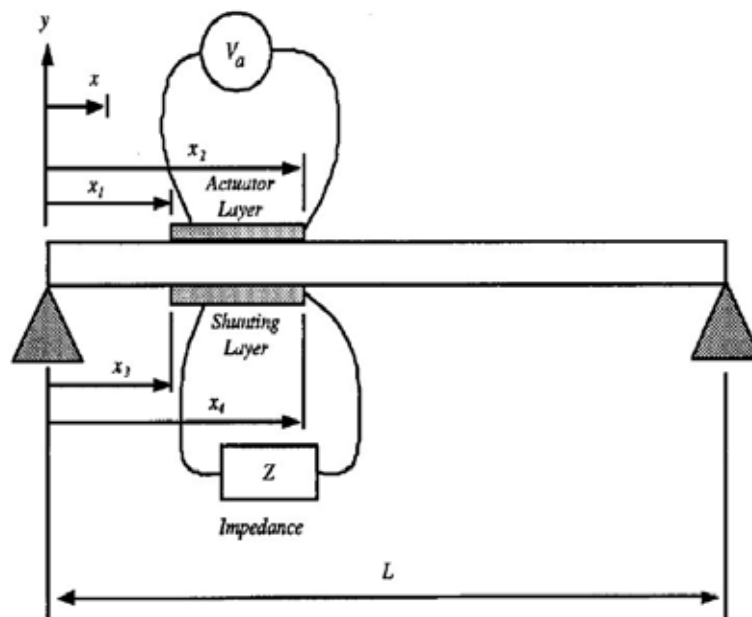
Kuva 33. Erilaisia ACLD-konstruktioita [93].

ACLD:stä on kehitetty [120, 121] myös kuvan 34 mukainen komposiittiaktuaattori (Active Piezoelectric Damping Composite) APDC, jossa on pietsosähköisiä sauvoja viskoelastisessa polyuretaanimatriisissa vinossa asennossa.



Kuva 34. APDC-komposiittiaktuaattori [120].

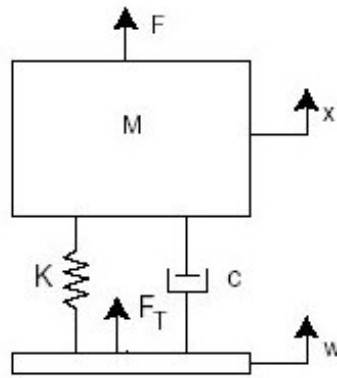
Värähtelyenergiaa voidaan pietsosähköisten aktuaattorien avulla myös muuttaa sähköenergiaksi ja siitä vastusten avulla lämpöenergiaksi. Tätä ns. shunttivastustekniikkaa (ks. kuva 35) on hyödynnetty mm. urheiluvälineissä, kuten K2:n ja Headin suksissa ja lumilautoissa (kehittäjä ACX myi tekniikan Mide Corporationille) sekä baseball-mailoissa, polkupyörissä ja urheilukengissä [122, 123].



Kuva 35. Värähtelyjen vaimentaminen shunttivastuspiirin avulla [124].

3.1.7 Värähtelyn eristäminen

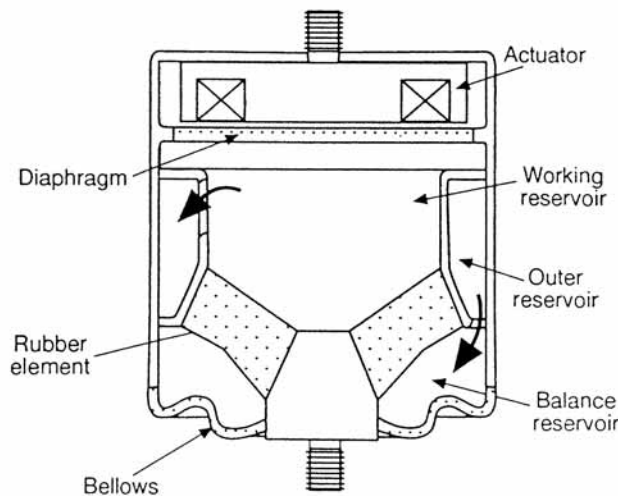
Värähtelyn eristämisessä (kuva 36) tavoitteena on joko estää värähtelevän kappaleen liikkeen välittyminen alustaan tai estää värähtelevän alustan liikkeen välittyminen herkkään laitteeseen tai ihmiseen. Esimerkkinä edellisestä on paperikoneen perustus, jälkimmäisestä ajoneuvon pyörän ja korin välinen liittymäkohta. Ajoneuvon moottorin ripustus [125, 126] sisältää nämä molemmat elementit.



Kuva 36. Kaaviokuva värähtelyn eristämisestä [127].

Passiiviseen värähtelyn eristämiseen on käytetty elastomeeri- ja jousivaimentimia sekä hydraulisia ja pneumaattisia vaimentimia. Passiivisen vaimennuksen ongelmana on vaimentuvan taajuuskaistan rajallisuus. Jotta vaimennus sopeutuisi herätteen muutoksiin, on varsinkin hydraulisista vaimentimista kehitetty erilaisia puoliaktiivisiä versioita, joissa vaimentimen jäykkyyttä (joissakin myös vaimennusta) voidaan muuttaa. Passiivisen ja aktiivisen vaimennuksen yhdistelmä, jota myös joskus erheellisesti kutsutaan puoliaktiiviseksi, vaikka siinä rakenteeseen tuodaan ulkopuolista energiaa, sopeutuu herätteen muutoksiin vielä paremmin. MR-vaimentimia on käytetty sekä puoliaktiivisinä että aktiivisinä.

Auton moottorin ripustuksen tulisi olla löysä, jotta moottorin värähtely ei välittyisi runkoon, mutta toisaalta ripustuksen tulisi olla jäykkä, jotta moottori ei hypähtelisi kuoppaisella tiellä. Kuvassa 37 on esitetty eräs passiivisen ja aktiivisen vaimennuksen yhdistelmä auton moottorin ripustukseen [128]. Siinä elektromagneettisella aktuaattorilla toteutettu aktiivinen vaimennus toimii yhdessä passiivisen hydraulisen vaimennuksen kanssa.



Kuva 37. Esimerkki aktiivisesta auton moottorin ripustuksesta [128].

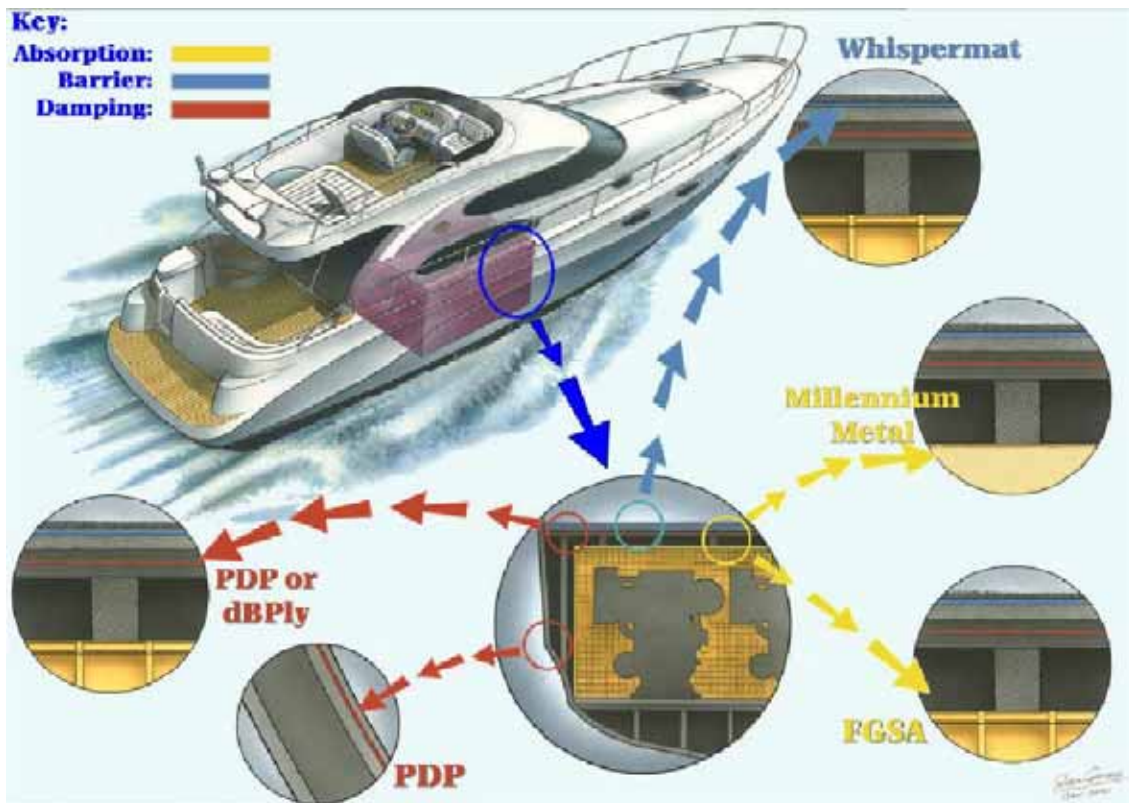
Esimerkkejä siltojen ja talojen maanjäristysvärähtelyjen eristämisestä ja vaimentamisesta rakenteen jäykkyyttä ja vaimennusta aktiivisesti säätämällä löytyy mm. lähteistä [88, 129]. MR-vaimentimet ovat usein parhaita tällaisiin suuriin rakenteisiin. Lähteessä [130] on esitetty DC-9-lentokoneen moottorin värähtelyn aktiivinen eristäminen.

3.1.8 Meluntorjunta

Meluntorjunta liikkuvassa ajoneuvossa, jonka rakenteet on mitoitettu jäykkyyteensä nähden keveiksi (esimerkiksi veneessä, ks. kuva 38), on haastava tehtävä.

Lujitemuovirakenteet ovat ongelmallisia melun kannalta, koska niiden värähtelytaajuu-
det ovat materiaalin keveydestä johtuen matalia eli värähtelyn aallonpituus on suuri. Ääntä, jonka aallonpituus on useita metrejä, on vaikea torjua esteillä (äänen heijastumi-
sella ja taipumisella esteiden pinnoista). Lisäksi äänen etenemisnopeus lujitemuoveissa on lähellä äänen nopeutta ilmassa, jolloin runkoääni muuttuu helposti ilmaääneksi. Kerros-
levyt ovat usein vielä ongelmallisempia melun kannalta kuin pelkät laminaatit [98].

Ääni on värähtelyä, ja oleellinen osa meluntorjuntaa onkin värähtelyn torjunta, värähte-
lyn syntymisen estäminen ja värähtelyn vaimentaminen.



Kuva 38. Meluntorjuntaan veneessä voidaan käyttää monenlaisia ratkaisuja [131].

Meluntorjunnassa on tärkeää pyrkiä vaimentamaan värähtelyä ensiksi siellä missä värähtely syntyy, esimerkiksi veneen tai ajoneuvon moottorissa [132, 133]. Funktionaalisia materiaaleja voisi käyttää moottorissa tai pyörivässä koneessa pienentämään välyksiä tai epäkeskeisyyttä sekä estämään ja vaimentamaan iskuja aktiivisen muodonhallinnan ja aktiivisen vaimennuksen keinoin. Erytisesti kannattaa huomioida aktiivisen säädön kyky sopeutua taajuuden muutoksiin. Moottorin värähtelyn etenemistä runkovärähtelyksi rakenteisiin pyritään estämään erilaisten passiivisten, puoliaktiivisten tai aktiivisten värähtelyneristimien avulla [134, 135].

Seuraavaksi pyritään eristämään ääni lähteensä luo, esimerkiksi moottoritilaan, koteloinnin ja värähtelyä vaimentavien tai ääntä absorboivien pintojen avulla. Tässä voidaan hyödyntää esimerkiksi passiivisia ja aktiivisia CLD-vaimennuskonstruktioita [93, 98] sekä joustavia liitoksia.

Kotelointiin joudutaan käytännössä aina tekemään aukkoja ja läpivientejä. Niiden tiivistämiseen ja tiiviiden säilyttämiseen voitaisiin soveltaa funktionaalisia materiaaleja. Erytisesti, jos virtaus aukon läpi on nopeaa ja virtauspaine on suuri, joudutaan käyttämään erilaisia äänenvaimentimia. Resisttiivisessä absorptiovaimentimessa käytetään ääntä absorboivia materiaaleja, kun taas reaktiivisessa ontelovaimentimessa ääni pyritään vaimentimen sisäisen rakenteen muodoilla heijastamaan takaisin tulosuuntaansa. Ontelovaimentimien ongelmana on se, että ne toimivat vain kapealla taajuuskaistalla. Vaimentuvan taajuuskaistan laajentamisessa voisi olla merkittävää hyötyä aktiivisesta muodonhallinnasta.

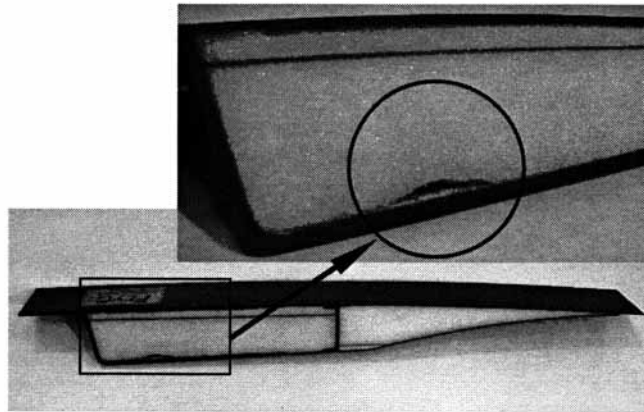
Jos em. toimenpiteillä ei saada värähtely- ja äänitasoja riittävän alhaisiksi, on pyrittävä estämään värähtelyn etenemistä rakenteissa ja vaimentamaan rakenteiden värähtelyä. Runkovärähtelyä voidaan vaimentaa erilaisilla vaimennusmateriaaleilla ja passiivisilla ja aktiivisilla CLD-konstruktiolla. Runkovärähtelyn etenemistä voidaan estää mm. oikein mitoitetuilla katkoksilla rakenteissa, esimerkiksi kaksoisseinillä, joiden väliin jätetään ilmapäli, jonka leveys on alle torjuttavan äänen aallonpituuden. Ongelmana kaksoisseinärakenteissa on se, että äänen aallonpituuden ollessa sama kuin ilmapälin leveys syntyy resonanssitilanne ja ääni vahvistuu. Myöskään äänen aallonpituuden ollessa alle ilmapälin leveyden ei kaksoisseinärakenne toimi hyvänä ääneneristimenä. Aktiivisella kaksoisseinällä, jossa ilmapäliä voidaan muuttaa äänen taajuuden funktiona, voisi olla käyttöä joissakin rakenteissa. Runkoäänen etenemistä voidaan torjua myös joustavilla liitoksilla. Käyttämällä joustavissa liitoksissa funktionaalisia materiaaleja voitaisiin ehkä vähentää rakenteelta vaadittavan jäykkyyden ja värähtelyn torjunnan välisen ristiriidan aiheuttamia ongelmia.

Runkoäänen muuttumista ilmaääneksi voidaan mahdollisesti ehkäistä pintojen muodonhallinnalla. Oleskelutiloihin voidaan sijoittaa ääntä absorboivia pintoja ja ilmaäänen

etenemistä voidaan estää seinillä ja ovilla. Ääntä voidaan myös torjua vastaääntä tuottamalla. Tätä periaatetta on sovellettu esimerkiksi kuulosuojaimissa. Piettosähköisillä kalvoilla ja EMFI-kalvoilla [136] on mahdollisuuksia vastaäänän tuottamisessa.

3.1.9 Kunnonvalvonta

Tärkeä sovellutusalue funktionaalisilla materiaaleilla toteutetuille ja kuituoptyisille sensoreille on lujitemuovirakenteen kunnonvalvonta. Rakenteen tai koneen kunnan tarkkailu paitsi vähentää onnettomuusriskiä myös pidentää rakenteen käyttöikä ja tuottaa rahallista säästöä, kun rakenteen korjaustoimenpiteet voidaan ajoittaa ja mitoittaa oikein ja mahdollisesti myös alentaa käyttökuormituksia rakenteen elinkaaren lähestyessä loppuaan. Erityisen tärkeä ja haastava alue lujitemuovirakenteiden kunnonvalvonnan kannalta on kerroslevyjen ytimen vaurioiden (säröjen, rusementumisen, irtoamisen pintalevystä) havaitseminen iskuvaurioiden yhteydessä (ks. kuva 39).



Kuva 39. Kerroslevyn ytimen irtoaminen pintalevystä ja rusementuminen iskuvaurion yhteydessä [137].

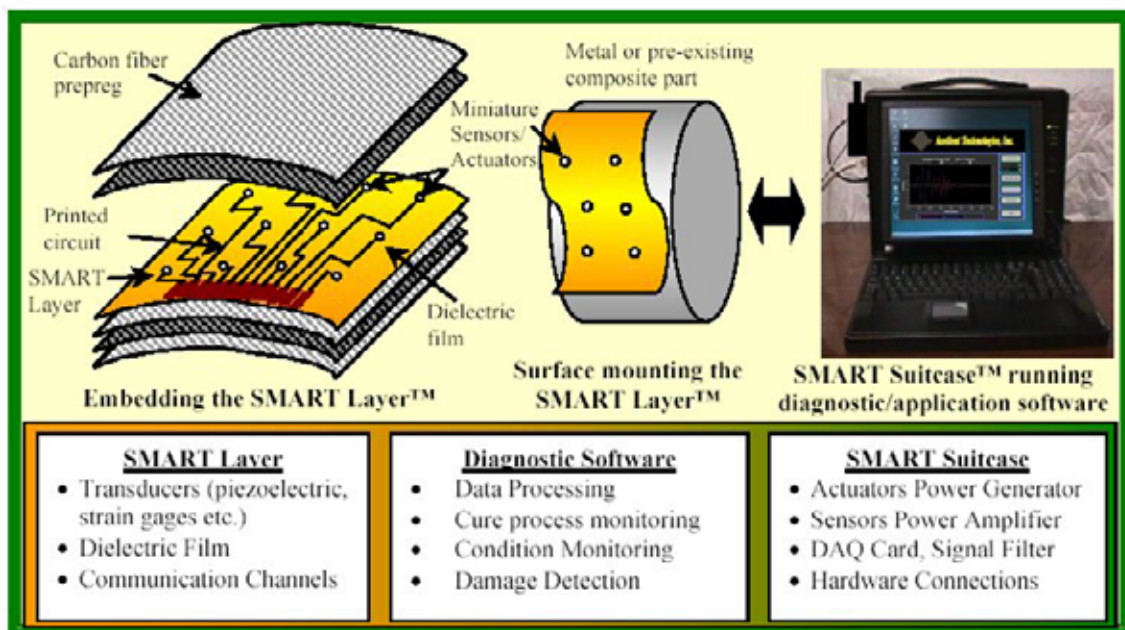
Rakennetta rikkomattomaan säröjen havainnointiin voidaan soveltaa esimerkiksi piettosolla tuotettua ultraääntä [27]. Kuituoptyisia sensoreita ja piettosähköisiä kalvoja (kuva 40) on "leivottu" lujitemuovilaminaattien sisään [138, 139]. Molemmilla sensortyypeillä voidaan havaita rakenteen muodonmuutoksia ja rakenteeseen syntyviä säröjä. Kuituoptyisten sensorien ongelmana on signaalien tulkinta, koska ne reagoivat hyvin moneen eri asiaan (kuidun venymään ja käyristymään ja lämpötilaan koko kuidun matkalla, pintojen heijastusindekseihin, kosteuteen). Samantyyppinen signaalien tulkintaongelma on myös piettosähköisillä kalvoilla.

Sensorien ja aktuaattorien sijoittaminen lujitemuovirakenteeseen on kuitenkin ongelmallista, sillä erityisesti väsyttävien kuormitusten alaisena voi sensorin tai aktuaattorin muodostama epäjatkuvuuskohta rakenteessa toimia särön ydintäjänä. Lisäksi lujitekuitu-

jen joutuminen mutkalle pienentää laminaatin tason suuntaista puristuslujuutta merkittävästi. Japanissa on kehitetty halkaisijaltaan pieniä kuituoptyisiä sensoreita sekä tutkittu muistimetallikalvon ja lujitemuovilaminaattirakenteen välisen rajapinnan vahvistamista parantamalla kalvon pinnan tartuntaominaisuuksia eri tekniikoilla: ruiskupinnoituksella, sooli-geeli-tekniikalla, pommittamalla pintaa ioneilla sekä hapettamalla pintaa elektrolyttisesti [140]. ILSS eli kerrosten välinen leikkauslujuus saatiin vastaamaan kahden lujitemuovikerroksen välistä arvoa. Stanfordissa taas tutkitaan sensorin ja lujitemuovilaminaattirakenteen välisen rajapinnan vahvistamista nanoputkien avulla [141].

Muodonmuutosta havainnoivilla sensoreilla voidaan toteuttaa kuormituslaskureita, joiden antaman tiedon perusteella voidaan ennustaa rakenteen jäljellä olevaa elinikää.

Rakenteen kuntoa voidaan havainnoida myös hiilikuitujen sähköisten ominaisuuksien avulla [142]. Lasikuitulaminaatissa voisi ajatella kuitujen päällystämistä sopivalla sähköä johtavalla materiaalilla.



Kuva 40. Pietsokalvoa voi käyttää laminaatin sisällä havaitsemaan säröjä ja muodonmuutoksia [139].

Eräs lujitemuovirakenteiden kannalta tärkeä kunnonvalvontasovellutusalue on lujitemuovirakenteen valmistusprosessissa syntyvien jäännösjännitysten, säröjen ym. valvonta. Esimerkkinä tästä on rakenteen sisään leivottujen kuituoptyisten sensorien käyttö lujitemuovisissa siltojen esijännityskaapeleissa [143]. Kyseisessä tutkimuksessa kuituoptyiset sensorit sijoitettiin rakenteeseen jo ennen matriisin kovettumista, ja ne toimivat myös valmiissa sillassa käytönaikaisessa kunnonvalvonnassa.

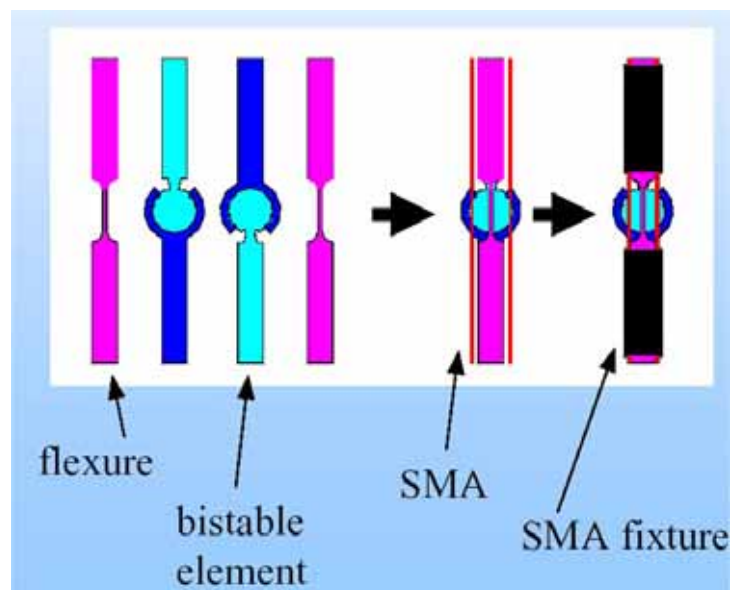
Kunnonvalvontaan voidaan yhdistää myös korjaavat toimenpiteet, kuten rakenteen jäykistäminen aktuaattorien avulla tai matriisisärön korjaaminen, josta kerrotaan enemmän kohdassa 3.1.13.

Kunnonvalvontaa hyvin lähellä on rakenteen kosteudenmuutosten tarkkailu ja kosteusvaurioiden havaitseminen, jota voidaan toteuttaa esim. sähköisesti.

3.1.10 Liitokset

Muistimetalleilla on toteutettu ns. on-off-liitoksia, joissa liitos voidaan kytkeä irti. Tällä tekniikalla on avaruusaluksissa korvattu pulttien räjäyttämisen kantoraketin vapauttamiseksi [144].

Planeettatutkimuksessa tarvitaan roboteilta kykyä ylittää erilaisia esteitä, tasapainottaa itsensä kaltevalla pinnalla jne. [145]. Tämän aikaansaamiseen on kaavailtu, että robotit voitaisiin rakentaa binäärilogiikalla osista, joiden välissä olisi joustavia liitoksia, joita ohjattaisiin on-off-aktuaattoreilla, esimerkiksi muistimetalliaktuaattoreilla kuvan 41 tapaan [146].



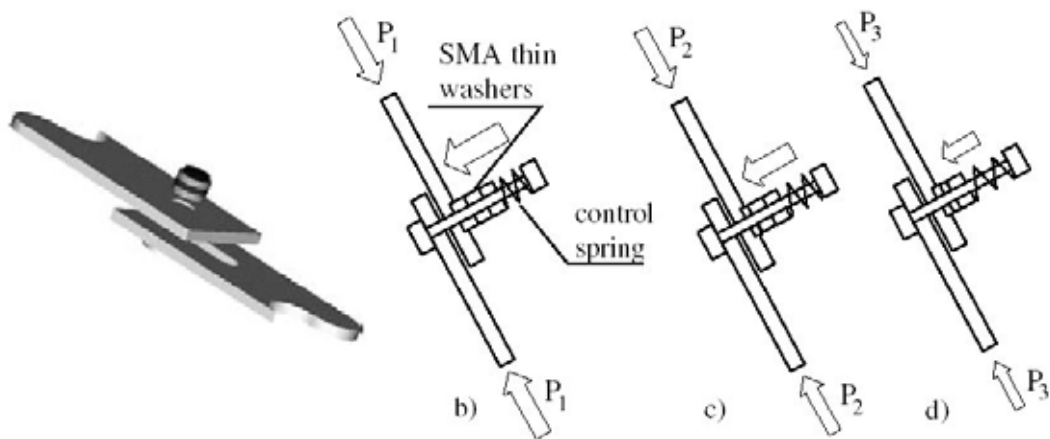
Kuva 41. Binääriliitos robotissa toteutettuna SMA-aktuaattoreilla [146].

Muistimetallien tai pietsosähköisten materiaalien avulla voidaan toteuttaa myös jäykkyyttä ja vaimennustaan muuttavia liitoksia, esim. kitkaliitoksia [147–149] (kuva 42).

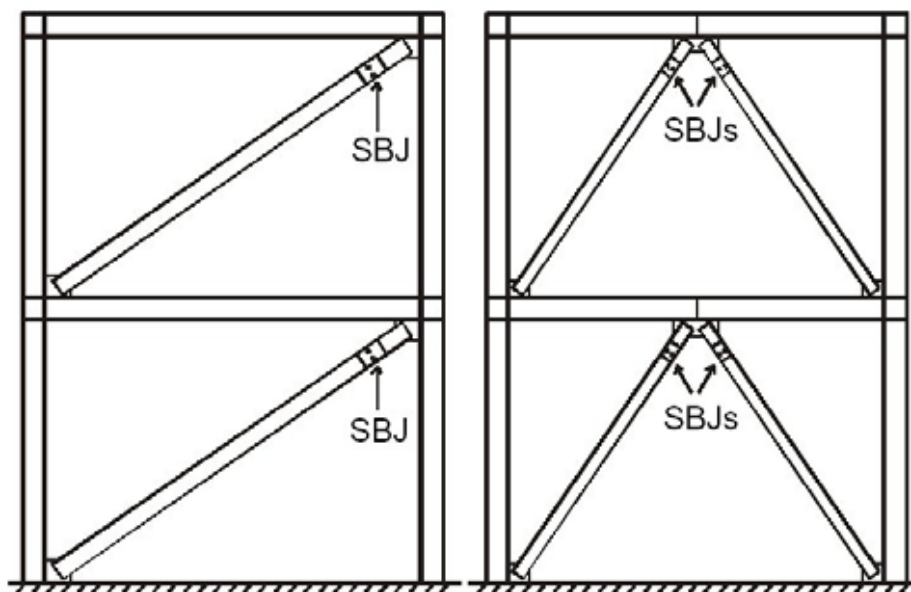
Muistimetalleilla toteutettuja järeitä aktiivisia kitkaliitoksia voitaisiin käyttää esimerkiksi talon- ja sillanrakennuksessa tyypillisten kehärakenteiden vinojäykisteissä (kuva 43)

[150]) maanjäristysvärähtelyjen vaimentamiseen ja estämään rakenneosien rikkoutumista maanjäristystilanteessa jakamalla kuormia optimaalisesti eri rakenneosien kesken.

Aktiivisia kitkaliitoksia voidaan käyttää rakenteen jäykkyyden ja vaimennuksen säätelyn lisäksi rakenteen muodonhallintaan tai törmäysenergian suuntaamiseen esimerkiksi autokolarissa.



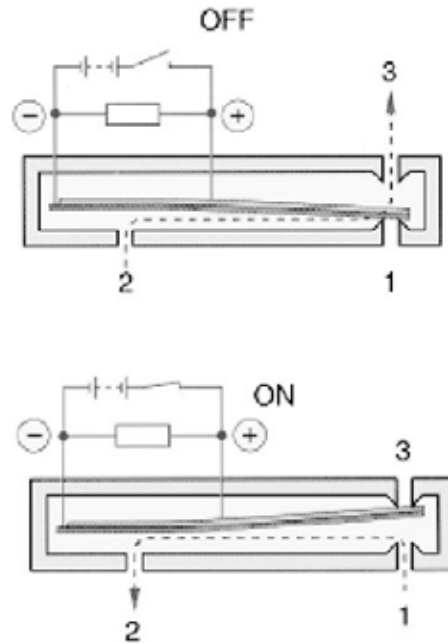
Kuva 42. Aktiivinen kitkaliitos toteutettuna muistimetalliprikoilla [76].



Kuva 43. Kitkaliitoksia rakennuksen kehärakenteen vinojäykisteessä (SBJ = sliding bolted joint) [150].

3.1.11 Venttiilit

Prosessiteollisuudessa ja hydraulikassa käytetään paljon venttiileitä virtauksen säätämiseen. Pietsosähköisillä aktuaattoreilla voidaan toteuttaa erittäin nopeita säädettäviä venttiileitä [27, 151] (kuva 44).



Kuva 44. Pietsoventtiilin toimintaperiaate [151].

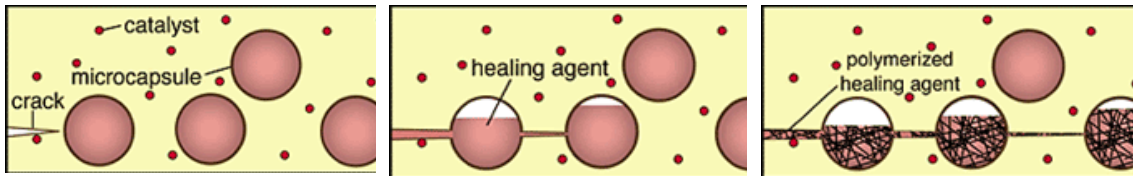
3.1.12 Anturien käyttövoiman ottaminen rakenteen muodonmuutoksista (power harvesting)

Liikkuvissa rakenteissa, kuten helikopterin tai tuulivoimalan roottorinlavoissa, suuri johtojen määrä on ongelma. Jos sensorit voidaan saada energiaomavaraisiksi, vähenee tarvittavien johtojen määrä. Tekniikkaa voidaan soveltaa myös päälle puettavassa elektronikassa [152]. Power harvestingia on kokeiltu mm. CIMSS:ssä VirginiaTechissä tuottamalla pietsosähköisten aktuaattorien avulla rakenteen muodonmuutoksista sähköenergiaa [149]. Pietsokiteillä voitaneen saavuttaa suurempia tehoja kuin perinteisillä pietsoaktuaattoreilla. Myös elektroaktiivisia polymeereja [153] voisi periaatteessa käyttää, mutta niissä tarvitaan paljon suurempi jännite kuin pietsoaktuaattorissa.

3.1.13 Vaurion itsekorjaus (self healing)

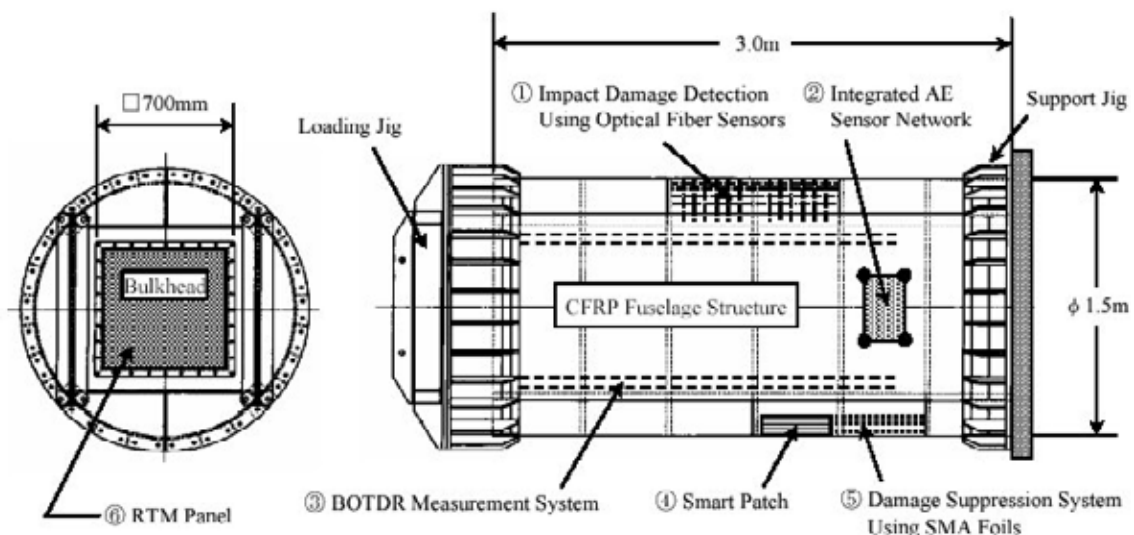
Lujitemuovirakenteen vaurion korjaamiseen on kehitetty kapselit, joista rakenteen vaurioitua vapautuu kahta komponenttia kovettumatonta matriisimateriaalia, joka täyttää

säröjä ja kovettuessaan korjaa vauriota [154, 155] (kuva 45). Tätä tekniikkaa voisi soveltaa pitkäaikaiskuormitetuissa rakenteissa pienten matriisisäröjen korjaamiseen, jotta ne eivät toimisi isompien säröjen ydintäjinä. Kuitujen katkeamista tällä tekniikalla ei voida korjata.



Kuva 45. Lujitemuovirakenteen vaurion korjaaminen korjausainekapseleiden avulla [155].

Pietsosähköisiä ja muistimetalliaktuaattoreita on käytetty pitämään säröpintoja yhdessä vaurion jälkeen (kuva 46). Näin voidaan estää vaurion kasvaminen myös silloin, kun kuituja on katkennut.



Kuva 46. Kunnonvalvonta ja särön avautumisen estäminen kuituoptiikalla ja muistimetallikalvolla [156].

3.2 Käyttökohteet

3.2.1 Kuljetusvälinetekniikka

Kuljetusvälinetekniikka on hyvin moninainen alue, jolla on paljon erilaisia mahdollisia sovelluskohteita älyratkaisuille. Tässä esitellään kuljetusvälinetekniikan älyratkaisuja melko laajasti, myös ei-lujitemuovisten rakenteiden osalta. Samalla pyritään luomaan tulevaisuutta eli miettimään mahdollisia kohteita, joissa lujitemuoviratkaisut voivat tulevaisuudessa yleistyä.

3.2.1.1 Lentokoneet ja helikopterit

Monet lentokoneiden siivissä ja helikoptereiden roottorinlavoissa käytetyt tekniikat ovat sovellettavissa myös esimerkiksi tuulivoimaloiden roottorinlapoihin, erilaisten turbiinien lapoihin sekä lentokoneiden ja laivojen potkureihin.

Yleistä lentolaitteiden älysovelluksista

Seuraavassa kuvataan älymateriaalisovellusten käyttöä kiinteä- ja pyöriväsiipisissä lentolaitteissa. Kiinteäsiipisiin luokitellaan muun muassa lentokoneet, miehittämättömät pienoislentokoneet ja ohjukset. Pyöriväsiipisten ryhmään lasketaan kuuluvaksi muun muassa helikopterit.

Kuten yleensäkin älysovelluksissa, myös lentotekniikassa voidaan kuvata järjestelmään liittyviä komponentteja **aistimilla**, **lihaksilla** ja **aivoilla**. Kukin edellisistä komponenteista voi olla kiinteästi rakenteen sisään integroitu, rakenteeseen erillisesti liitetty tai täysin rakenteesta erillään.

Lentolaitteissa älysovelluksia on tutkittu varsin paljon ja joitain toteutuksia on käytetty kaupallisesti saatavilla olevissa tuotteissa. Tyypillisesti älykkäät systeemit liittyvät kuormituksen, liiketilän tai rakenteen kunnan monitoroimiseen ja sen perusteella tehtävään päätökseen. Älykäs järjestelmä pyrkii mahdollisesti pienentämään rakenteen kuormia, vaimentamaan rakenteen värähtelyä tai valvomaan laitteen kuntoa ja pitkäaikaisominaisuuksia.

Lentokoneiden kuormat aiheutuvat pääasiassa liikehtimisestä, rakenteen ja virtauksen vuorovaikutuksesta, maakuljetuksista ja laskeutumisesta. Maassa koneeseen aiheutuu staattisia tai transientteja kuormia tankkauksesta ja kuormaamisesta. Nousussa kiihdytys ja laskeutuessa jarrutus kiitoradalla aiheuttavat massavoimia. Lisäksi suuressa nopeudessa suhteellisen pienetkin alustan epätasaisuudet saattavat aiheuttaa pyörien tuennalle iskumaisia kuormituksia. Laskeutumisessa pyörien tuenta kokee voimakkaan iskumaisen kuormituksen. Lennossa dynaamiset kuormat johtuvat koneen suunnan ja asennon muutoksista sekä ilmavirtauksen puuskista.

Lentokone voi kokea erilaisia isku- tai shokkikuormia törmätessään kiinteään tai liikkuvaan esineeseen (lintuun, ammukseseen tms.). Myös huollossa tulevat mahdolliset törmäykset tai työkalujen putoamiset voivat aiheuttaa iskukuormia ja rakenteen vaurioita.

Lentokone aiheuttaa liikkueessaan melua, joka voidaan kokea lentokoneen sisä- tai ulkopuolella. Melu syntyy moottorissa ja ilmavirtauksessa.

Pyöriväsiipiset helikopterit ovat taloudellisesti mitaten yksi tutkituimpia kulkuneuvoja. Myös älykkäiden järjestelmien soveltaminen on ollut nopeaa, sillä joissain nykyisissä tuotantohelikoptereissa on toteutettu värähtelynvaimennus älymateriaaleilla.

Robert Loewyn 1997 kirjoittaman review-artikkelin mukaan [157] älykkäillä materiaaleilla on huomattavia mahdollisuuksia ilmailuteollisuudessa.

Kiinteäsiipisiin lentolaitteisiin sopivia ja hitaaseen muodonmuutokseen perustuvia sovelluksia ovat

- suorituskyvyn tai ohjattavuuden parantaminen
- sakkasominaisuuksien hallitseminen
- väsymisenkestävyyden parantaminen.

Nopean muodonmuutoksen sovelluksia kiinteäsiipisille ovat

- aeroelastisten ominaisuuksien parantaminen (virtaus, rakenteen elastisuus, siiven dynamiikka)
- flutter-ominaisuuksien hallinta (yhdistyneiden värähtelymoodien yhdistyminen virtauksesta saatavaan energiaan)
- buffeting-ongelmien korjaaminen (pyörteisen virtauksen osuminen lentolaitteen takaosaan).

Nopeita kiinteä- ja pyöriväsiipisiin käyttökelpoisia sovelluksia ovat

- värähtelyn vähentäminen (estäminen ja vaimentaminen)
- ulkoisen melun pienentäminen
- ohjattavuuden parantaminen.

Loewy esittää artikkelissaan lupaavimpina pitämiään sovelluksia ja listaa ongelmia, joita ei ole vielä ratkaistu. Merkittävimmät ongelmat liittyvät aktuaattorien suorituskyvyn (voiman- ja liikkeentuoton, nopeuden) rajallisuuteen.

Lentotekniikan erityishaasteina Loewy esittää

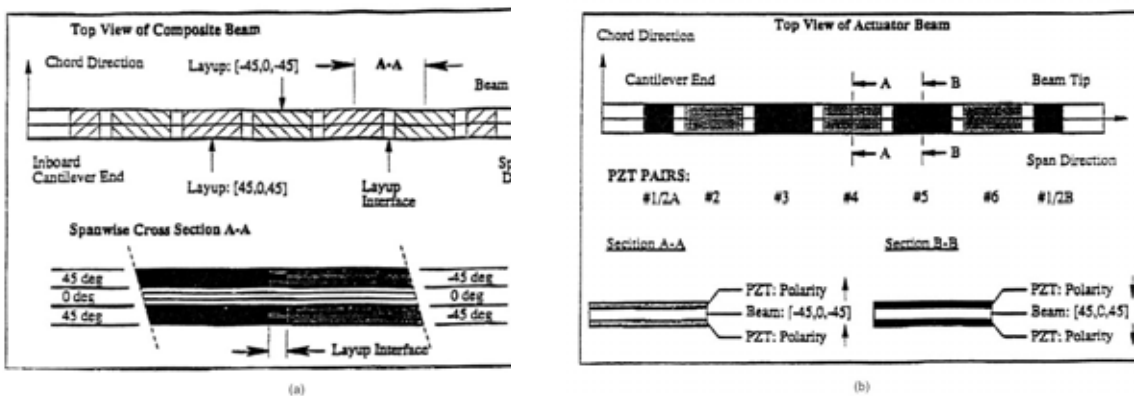
- suurten ja samalla kevyiden rakenteiden vaatimukset
- menetelmien käyttövarmuuden
- luotettavuuden pitkäaikaisessa käytössä
- riittävän suorituskyvyn
- massatuotantovaatimukset
- alhaiset kustannukset.

Sulautetun rakenneälyn käyttöä lentokoneiden ja avaruussukkuloiden kunnonvalvonnassa on tutkittu ja sovellettu mm. Stanfordin yliopistossa (158, 159). Tutkimus on tuottanut esimerkiksi pietsoantureihin pohjautuvan verkkokerroksen, joka voidaan integroida lujitemuovilevykenttään aistimaan iskuvaurion energiamäärää ja sijaintia. Parhaimmillaan sulautetulla järjestelmällä voidaan selvittää iskuenergia ajan funktiona reaaliaikaisesti laboratorio-olosuhteissa. Hankalasti tarkastettavissa pulttiliitoksissa voidaan käyttää pietsonauhaa, johon ilmaantuu sähköisiin ominaisuuksiin vaikuttavia säröjä rakenteen vaurioituessa.

Mielenkiintoisimmat sovellusalueet älyrakenteiden käytössä tulevaisuudessa lienevät rakenteiden monitorointi, kunnonvalvonta, värähtelyn aktiivinen hallinta, rakenteen aktiivinen muodonhallinta virtausominaisuuksien muuttamiseksi sekä vastamelun tuottaminen.

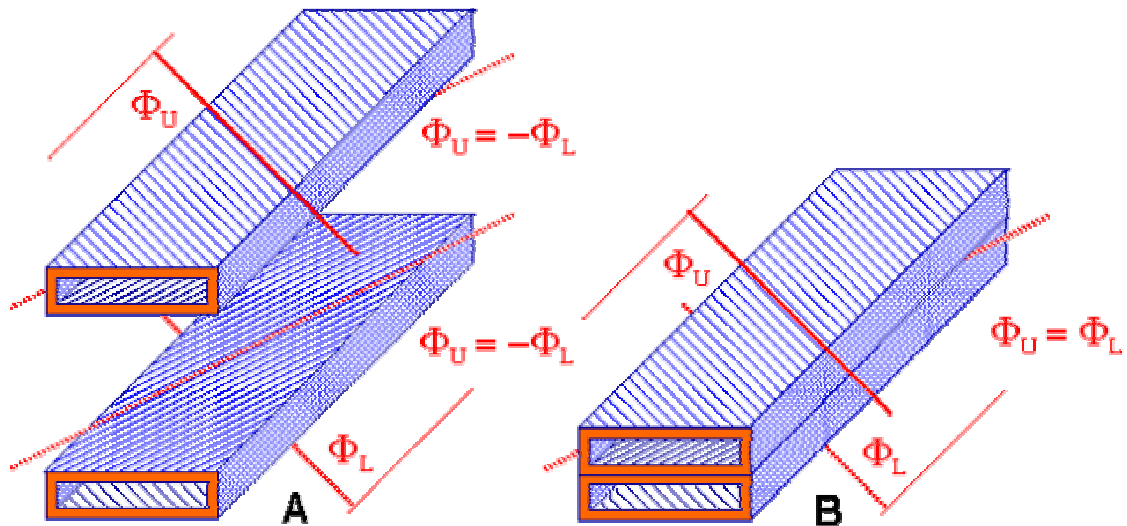
Älykkäissä rakenteissa kannattaa hyödyntää myös komposiittirakenteen räätälöitävyyttä. Tyypillisesti lujitemuovirakenteissa käytetään symmetrisiä ja balansoituja laminaatteja ja kerroslevyjä. Tällöin rakenteen normaalikuormat eivät aiheuta leikkausvoimia. Epäsymmetrisiä laminaatteja on vältetty mm. lämpötilan aiheuttamien muodonmuutosten vuoksi. Kuitenkin älykkäissä rakenteissa haluttuja muodonmuutoksia voidaan vahvistaa epäsymmetrisellä räätälöinnillä. Mm. lähteissä [160, 161] on kuvattu komposiittirakenteita, joissa venymällä ja kiertymällä on yhteys: taipuessaan palkki myös kiertyy.

Kuvassa 47 esitetään räätälöity komposiittirakenne, jossa palkin peräkkäiset segmentit kumoavat toistensa taipuman mutta vahvistavat kiertymää [160].



Kuva 47. Rakenne jossa palkin peräkkäiset segmentit kumoavat taipumaa ja vahvistavat kiertymää [160].

Lähteessä [162] on esitetty kvasi-balansoitu palkkirakenne (kuva 48). Kyseinen rakenne koostuu kahdesta epäsymmetrisesti laminoidusta palkkirakenteesta, jotka liitoksen jälkeen muodostavat symmetrisen rakenteen. Näin voidaan toteuttaa yhdistetty rakenne, jonka puolikkaat on räätälöity halutun muodonmuutoksen mahdollistamiseksi.



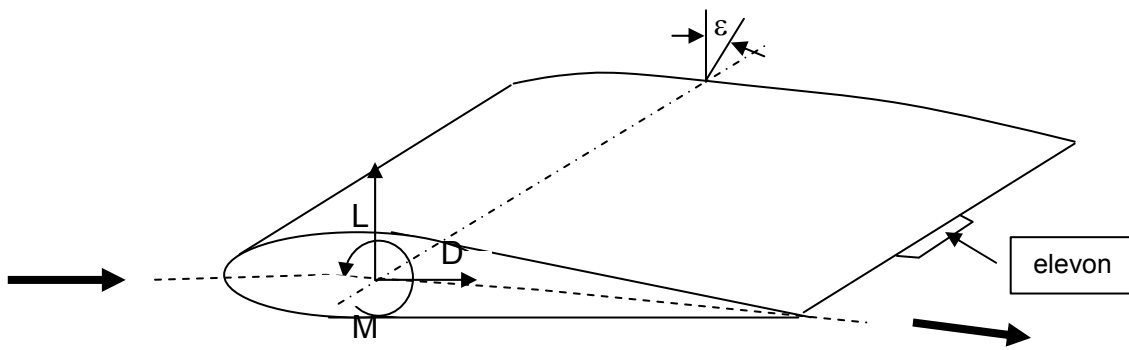
Kuva 48. Kvasi-balansoitu palkkirakenne [162].

Jos pystytään hyödyntämään virtauksen tai pyöriiväsiipisessä laitteessa keskipakoisvoiman energiaa rakenteen muodon muuttamiseksi, voidaan muuttaa melko jäykänkin rakenteen muotoa. Esimerkiksi kääntöpotkurikoneissa V22 Osprey ja XV-15 (tilted rotor aircraft) on hyödynnetty kuitulujitettujen komposiittien epäsymmetristä räätälöitävyyttä. Lavan kiertoon vaikutetaan keskipakoisvoiman avulla. Kun keskipakoisvoima kasvattaa säteen suuntaista voimaa, lapa kiertyy säteen funktiona. Tällä tavoin vaikutetaan passiivisellä älykkyydellä myös rakenteen väsymisikään. [163]. Tämä vaatii tarkkaa rakennesuunnittelua ja ekstensiivistä mallinnusta, jotta vältettäisiin aeroelastisen stabiliteetin menetys.

Seuraavissa kohdissa esitellään erilaisia lentolaitteiden älysovelluksia, joita on tutkittu. Vain harvoja niistä on toteutettu kaupallisesti.

Nostovoimaa tuottavat pinnat

Siipiprofiilin geometrian muuttamisella vaikutetaan siiven aerodynaamisiin ominaisuuksiin: nostovoimaan L , vastukseen D ja nokkaa alas kääntävään momenttiin M (Kuva 49). Profiilin keskiviivan käyryys, etureunan säde ja profiilin paksuus ovat verrannollisia sekä nostovoimakertoimeen että vastuskertoimeen. Hitaassa lentonopeudessa edellä mainittuihin profiilin ominaisuuksiin vaikuttaminen on kannattavaa. Suurin hyöty nostovoima-vastussuhteessa on saavutettavissa transsoonisessa nopeudessa ($Ma=0,95-1,2$) [164] eli lähellä äänen nopeutta.



Kuva 49. Siipiprofiili ja siipi.

Kentuckyyn yliopiston tutkimuksessa haluttiin siirtää virtauksen irtoamispistettä siiven päällä. Siinä kiinnitettiin pienoislentokoneen siipiprofiilin päälle Thunder-aktuaattoreita ja näiden päälle melko joustava kalvomainen kerros, jonka muotoa aktuaattorit jaksoivat muuttaa (ks. kohta 3.1.3 ja lähde [46]). Virtauksen muuttamista on tutkittu myös käyttämällä rakenteen pinnalla suurta joukkoa MEMS-aktuaattoreita, jotka ovat hyvin pieniä ja keveitä [49].

Pyörivissä siivissä voidaan jättöreunalaippojen (engl. elevon) käytöllä estää tasosta poikkeavaa liikettä ja estää värähtelyjä. Yleensä näissä kokeiluissa on käytetty muisti-metalliaktuaattoreita ja optisia sensoreita.

Indusoituneeseen vastukseen, siiven tyvestä alkavaan sakkaukseen ja siiven tyven taivutusmomentin pienentämiseen voidaan vaikuttaa muuttamalla siiven kiertoa pituusakselinsa ympäri (kulma ε kuvassa 49). Eräissä tutkimuksissa Lockheed L-1011 -koneessa on pyritty kasvattamaan siiven väsymisikää aktiivisella kierron muuttamisella. Tällöin vaikutetaan taivutusmomenttiin puuskittaisissa olosuhteissa matkanopeustehokkuuden kustannuksella.

Giurgiutiu vertaili vuonna 2000 saavutuksia roottorinlapojen kiertämisessä funktionaalisilla materiaaleilla toteutettujen aktuaattorien avulla [165]. Tyypillisesti tehtävään on käytetty kahta eri lähestymistapaa: koko lavan vääntämistä pitkin lapaa asennetuilla aktuaattoreilla (integral twist actuation) tai lavan kärjen lähelle sijoitetun laipan kääntämistä aktuaattoreilla (servo-flap actuation). Aktuaattoreina on käytetty erilaisia pietso-aktuaattoreita (pinoja, bendereitä, C-aktuaattoreita, AFC-aktuaattoreita) sekä magnetostriktiivisiä ja elektrostriktiivisiä aktuaattoreita. Myös liikkeenvahvistimia on käytetty (plastiset nivelet, X-aktuaattori).

Giurgiutiun mukaan koko lavan vääntämiseen aktuaattoreilla perustuvat systeemit törmäävät lapojen suureen jäykkyyteen ja siksi servolaippasysteemit ovat toimivampia. Toisaalta, mikäli kompaktit aktuaattorit tulevaisuudessa kehittyvät riittävän tehokkaiksi

toimiakseen ilman erillisiä mutkikkaita liikkeenvahvistimia, on integral twist actuation ehkä parempi tapa, koska sillä päästään yksinkertaisempaan rakenteeseen.

Giurgiutiun mukaan alan tutkimuksessa on päästy laboratorioskaalasta todellisten helikopterien kokoluokkaan, mutta tämä väite on ehkä hieman ennenaikainen, koska kaikki hänen mainitsemansa tutkimukset tehtiin helikopterin roottorinlapojen pienoismalleilla. Esimerkiksi MIT:n tutkimuksessa [166] tutkittiin 1/6 Mach -skaalatun helikopterin roottorinlavan aktiivista kiertoa virtausominaisuuksien muuttamiseksi ja sitä kautta värähtelyn vähentämiseksi. Hiilikuituvahvisteisen lasikuitukomposiitin sisään oli integroitu pietsosähköisiä AFC-aktuaattoreita. Tässä tutkimuksessa päästiin 1–1,5 asteen maksimikiertoon. Toisessa tutkimuksessa [167] pyrittiin kiertämään 1/8 Froude-skaalatun helikopterinlavan kärkiosaa useilla pietsoaktuaattoreilla. Tässä hyödynnettiin komposiittien räätälöitävyyttä tuottamalla yhteys taivutuksen ja väännön välille. Maksimikierto oli tällöin 2–2,5 astetta.

Hall ja Precht [168] testasivat 1/5-skaalatun Boeing CH-47D -tandem-helikopterin roottorinlavan aktiivista mallia tuulitunnelissa. Tässä mallissa oli jättöreunassa servolaippa (10 % jänteen mitasta), jota aktuoitiin ISA-benderiaktuaattorilla käyttäen liikkeenvahvistukseen plastisia niveliä (solid state flexural hinges). Laipan kulmanmuutokseksi saatiin +/- 11 astetta 0–90 Hz taajuusalueella. Myöhemmissä tutkimuksissa on käytetty mm. ISA-pinoaktuaattoreita, C-block-aktuaattoreita ja Recurved-aktuaattoreita. Kahdella jälkimmäisellä saavutettiin siiven pienoismalleissa servolaipan 15–25 asteen kulmanmuutos 0–40 Hz taajuusalueella [169, 170]. Precht ja Hall [171] rakensivat ISA-laippa-aktuaattorin (X-aktuaattorin), joka koostuu pietsopinoaktuaattoreista ja X:n muotoisesta liikkeenvahvistimesta. Tällä aktuaattorilla saatiin 1/6 Mach -skaalatussa CH-47D-roottorinlavan mallissa aikaan laipan kulmanmuutokseksi 4–5 astetta 0–200 Hz taajuusalueella.

Suuren jäykkyyden omaavien siipien tapauksessa passiivinen älykkyys (komposiittirakenteen elastinen räätälöinti ja keskipakoisvoiman ja/tai virtauksen energian passiivinen hyödyntäminen) voi joko yksinään tai yhdessä aktuaattoreilla ohjattavien servolaippojen kanssa johtaa toimivimpiin ratkaisuihin.

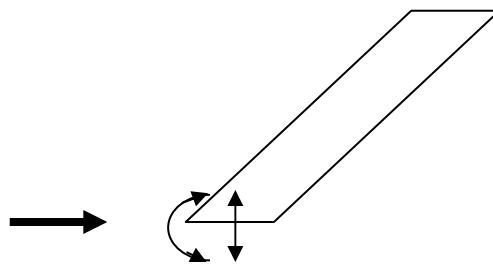
Siiven rajakerroksen imulla tai kiihdyttämällä voidaan hallita virtauksen irtoamista ja siiven sakkausta. Tämä ei ole kovin käytetty tapa, mutta sitä on sovellettu älymateriaaleihin perustuvilla virtauskanavilla muutamissa pohjoisamerikkalaisissa ja venäläisissä sotilaskoneissa. Stanewsky on tutkinut lähteessä [45] erilaisia tapoja virtauksen ja rajakerroksen hallitsemiseksi eri menetelmillä.

Rakenteen dynamiikan ja aeroelastiikan muuttaminen

Lähteessä [172] on kuvattu tutkimusta, jossa MEMS-tekniikalla on pyritty jäljittelemään nopeiden kalojen ja meressä elävien nisäkkäiden pinnan muodon muutoksia suurissa virtausnopeuksissa. Aktiivisella pinnan muodon muuttamisella on havaittu olevan vaikutusta vastukseen.

Erytisesti helikoptereissa ohjaamon ja matkustamon sisäinen melu on ongelmallinen. Roottorien ja lapojen kärjet sekä voimansiirron värähtelyt (sekä ilmaitse että rakenteellisesti aiheutuvat) aiheuttavat melua. Älymateriaaliaktuaattoreita on sijoitettu tietyille seinäalueille ja voimansiirron kiinnityspisteisiin vasteen minimoimiseksi [173, 174]. Tässä tapauksessa tutkimus on keskittynyt melun vähentämiseen matkalla lähteestä kuu-
lijaan eikä melun syntymisen vähentämiseen.

Kun jossain lentokoneen osassa kaksi erilaista värähtelymuotoa sijaitsee läheisillä ominaistajuuksilla ja lisäksi ulkoisesta virtauksesta saadaan energiaa värähtelyn tuottamiseen (kuva 50), puhutaan flutterista.



Kuva 50. Siiven kahden värähtelymuodon yhdistelmä.

Flutteria korjaamaan on kehitetty vaimennusmenetelmiä, joilla viivytetään toisen värähtelymuodon alkua. Pintalevyihin on asennettu venymäaktuaattoreita vaimennuksen aikaansaamiseksi. Näitä menetelmiä ei ole suunniteltu koneeseen alkuvaiheessa, mutta niillä voidaan lieventää ilmeneviä ongelmia. Tulokset on havaittu hyviksi koko koneen kustannus-hyötysuhteen, elinikäkustannusten ja suoritusarvojen perusteella. Flutterin hallitsemista taivutus- tai vääntöominaisuuksilla ja pietsosähköisten materiaalien avulla on tutkittu lähteissä [175, 176].

Buffeting-ilmiössä taas siiven suuresta nuolikulmasta johtuva etureunapyörre irtoaa ja voi aiheuttaa voimakkaasti turbulenttisen virtauskentän, joka osuu siiven takana oleviin koneen osiin. Kaksoispyrstöisten F/A 18 ja F-22 Raptor -hävittäjien pyrstöjen buffeting-värähtelyn aktiivista vaimentamista pietsoilla on tutkittu [177, 178]. Tulokset ovat teknisesti lupaavia, mutta yleensä flutteri ja buffeting ovat niin vaikeasti hallittavia ilmiöitä, ettei niiden korjaaminen älymateriaaleilla liene kannattavaa lähitulevaisuudessa. Ky-

seisissä lentotiloissa liikehtiminen on vaarallista, ja se pyritään välttämään jo lentokoneen suunnitteluvaiheessa.

Pyörivän siiven akustiikka ja värähtelyt

Helikoptereissa nostovoima saadaan aikaan pyörivällä roottorilla. Virtauksessa etenevän pyörivän roottorin aerodynamiikka on varsin monimutkainen. Kukin lapa saa aikaan pyörteen, joka aiheuttaa seuraavalle lavalle epästationääriin virtauksen. Roottorin navan tulee olla riittävän jäykkä nostovoiman välittämiseksi koneen runkoon ja moottorin voimansiirron välittämiseksi lavoille. Helikopterin värähtelyn ongelmallisuus johtuu edellä mainitusta pyörteisestä virtauksesta ja naparakenteesta. Helikopterien värähtelyt ja siitä aiheutuva melu ovatkin ehkä tutkituin alue älykkäiden materiaalien soveltamisessa lentotekniikassa [179].

Nopea yksittäisen lavan kohtauskulman säätö on perinteisesti tehty seuraavasti. Säätömekanismi on liitetty nivelisesti roottorin keskiössä sijaitsevaan ohjauslevyyn (engl. swashplate), jonka avulla voidaan säätää lavan kohtauskulmaa ja pyörimistasoa roottorin pyörimisen eri vaiheissa.

Älykkäillä rakenteilla on nykyisin pyritty toteuttamaan yksittäisen lavan erillinen säätö (Individual Blade Control: IBC) [180]. Laboratoriokokeissa on havaittu nopeataajuisen lavan säätöön vaikuttavan tehon olevan alle kymmenesosa verrattaessa perinteiseen tekniikkaan. Kyseisessä tapauksessa on ohjattu väännössä joustavaa lapaa (vääntöjäykkyys suhteellisen pieni).

Helikopterien roottorinlapojen pienoismallikokeissa on servolaippojen ja liikkeenvahvistuksen avulla saatu lupaavia tuloksia. Lähteessä [181] kuvataan roottorinlavan värähtelykuormitusten vähentämistä kiertämällä lapaa magnetrostriktiivisellä aktuaattorilla aktuoidun jättöreunalaipan avulla ja todetaan, että aktiivisesti säädettävä jättöreunalaippa vaatii suuremman kulmanmuutoksen kuin perinteinen ohjauslevytekniikka, mutta se vaatii vain 20–40 % tehosta.

Helikopterien roottorinlapojen värähtelyjen vaimentamista lisäämällä rakenteeseen viskoosia vaimennusta aktiivisella ja passiivisella Constrained Layer -tekniikalla on tutkittu lähteessä [118]. Tulokset osoittavat, että ACLD on potentiaalinen tekniikka helikopterien roottorinlapojen värähtelyjen vaimentamiseen.

Ohjainpinnat lentävässä laitteessa

Ohjuksissa pienen koon vaatimukset, hydraulisten ja pneumaattisten tehonlähteiden massa ja nesteen virtauksen rajoitukset ovat ohjanneet älykkäiden rakenteiden tutkimusta. Lähteessä [182] on esitetty menetelmä, jolla saavutetaan ohjainpinnan $\pm 3^\circ$ taipuma hiili-epoksivääntölevyllä.

Ohjuksissa älykkäiden materiaalien käyttö on perusteltua, sillä rakenteiden suunniteltu elinikä on lyhyt, kuormitustaso on korkea ja niissä esiintyy aeroelastisia ongelmia.

Helikopteri AH-64 Apachessa tutkittiin [183] rakenteeseen integroitujen aktuaattorien käyttöä kopterin ohjauksessa. Ne havaittiin soveltumattomiksi useista syistä ja todettiin, että servolaippojen käyttö on perusteltua. Tällöin on yhdistettävä erilaisia materiaaleja sekä käytettävä mahdollisimman suuren venymän antavia aktuaattoreita.

Myös kahden aktuaattorityypin yhdistämistä on kokeiltu. Lähteessä [184] kuvataan muistimetallilanka-aktuaattorin soveltamista pienoishelikopterin ohjaamisessa. Siinä on toteutettu liikkeen vahvistus vipu- ja nivelmekanismeilla. Syklinen nopea ohjaus on toteutettu pietsoilla, ja kollektiivinen ohjaus tapahtuu muistimetallilangalla. Pienois-helikopterin nousu ja laskeutuminen onnistuivat jo pelkästään muistimetalliaktuaattoreilla.

Rakenteen sisään sijoitetut aktuaattorit

Rakenteissa voidaan käyttää erillisiä keskitettyjä tai rakenteen sisään integroituja aktuaattoreita. Mikäli samoja aktuaattoreita käytetään antureina, niiden tulee olla integroituja rakenteen kuormitustilan monitoroimiseksi. Rakenteen sisään integroituja aktuaattoreita käytettäessä on syytä olla huolellinen. Aktuaattorien venymän tulee soveltua kuitujen ja matriisimateriaalin mekaaniseen käyttäytymiseen. Kuituja vastaan kohtisuorassa sijaitsevat aktuaattorit voivat aiheuttaa matriisin säröilyä. Kuitujen suuntaiset aktuaattorit eivät välttämättä tuota riittäviä siirtymiä, sillä ne on sijoitettu lujitekerroksen jäykkimmän suunnan mukaisesti. Erisuuntaisten kerrosten rajalle sijoitetut aktuaattorit saattavat saada aikaan kerrosten välistä leikkausta.

Erityisesti laminaatin tason suuntaisessa puristuskuormituksessa aktuaattorien ja muiden rakenteen sisällä olevien vieraiden esineiden aiheuttamat epäjatkuvuuskohdat toimivat valmistusvirheiden kaltaisina delaminaation alkuina, jännityskeskittyminä, kuitujen nurjahduskohtina tai pintalevyn irtoamisen lähtökohtina (kuva 51) [185]. Lisäksi laminaattirakenteen sisään integroitua aktuaattoria tai sensoria on sen rikkouduttua yleensä mahdoton vaihtaa.



Kuva 51. Rakenteeseen integroitu vieras esine.

JAS Gripen -lentokoneen suunnittelun yhteydessä tutkittiin sensorien ja tiedonsiirtovalokuitujen sijoittamista hiilikuitulaminaatteihin. Tällöin pyrittiin rakenteen liitoskohtaan laminoimaan standardiliitin, johon rakenteen ulkopuolinen äly saatettiin suoraan yhdistää. Rakenteesta tuli kuitenkin niin mutkikas, että sen kuormankantokyky oli vaatimaton alkuperäiseen rakenteeseen verrattuna.

Yhteenvetoa lentolaitteiden älysovelluksista

Loewy toteaa artikkelinsa yhteenvedossa seuraavaa:

- Käyttökelpoisten älymateriaaliyhdistelmien löytäminen lentoteknisiin sovelluksiin on hyvin vaikeaa.
- Käytännön vaatimien siirtymien saavuttaminen pietsoilla, muistimetalleilla ja magnetostriktiivisillä materiaaleilla vaatii erilaisten liikettä vahvistavien järjestelyjen käyttöä (nivel- ja varsisysteemit).
- Muistimetallit tuottavat suurempia voimia ja siirtymiä kuin pietsot, mutta ne vaativat suurempia tehoja jäähdyttävän virtauksen vallitessa.
- Magnetostriktiiviset aktuaattorit ovat kilpailukykyisiä pietsoihin verrattaessa, mutta ne eivät sovellu yhtä hyvin rakenteeseen integroitaviksi.
- Pietsot soveltuvat parhaiten integroitaviksi ja niiden liikenopeus on hyvä.
- Yksittäisen lavan säätö (IBC) magnetostriktiivisillä tai pietsomateriaaleilla vaikuttaa lupaavalta, mutta niiden rakenteellinen integroitavuus on vähintään haasteellista.

Älymateriaalien edut verrattaessa perinteisiin aktuaattoreihin ovat materiaalien yksinkertaisuus, liikkuvien osien puute, kulumiskestävyys, suuri hyötysuhde sekä vähäinen säätö- ja huoltotarve.

3.2.1.2 Laivat ja veneet

Laivoissa ja veneissä dynaamisia kuormia ovat nestevirtauksen aiheuttamat kuormitukset, aaltojen iskumaiset kuormitukset (slamming), jään aiheuttamat kuormitukset, moottorin ja potkurin aiheuttamat kuormitukset sekä purjeveneiden mastoissa myös tuulen aiheuttamat kuormitukset. Moottoroiduissa aluksissa melu on usein merkittävä ongelma sekä matkustajille että ympäristölle. Nopeissa veneissä tärinä on suorastaan terveydelle vaarallista. Pohjakosketukset ja karilleajot ovat valitettavan yleisiä.

Pohjan muodon muuttaminen virtausominaisuuksien muuttamiseksi erilaisissa ajo-tilanteissa voisi olla eduksi nopeassa veneessä. Aaltojen iskujen aiheuttamaa melua ja tärinää voitaisiin torjua muodonhallinnan ja ACLD-värähtelynvaimennuksen avulla. Potkurin aiheuttamat kavitaatioiskut ovat merkittävä äänilähde veneissä, pienissä laivoissa ja isommissakin laivoissa, jos asuintilat ovat lähellä potkuria [186]. Myös niiden aiheuttamaa tärinää ja melua voisi torjua em. keinoilla.

Äänenvaimennusta veneessä käsiteltiin esimerkkinä kohdassa 3.1.8 Meluntorjunta. Todellisuudessa ainakin Suomessa meluntorjunta veneissä on vielä aika vaatimatonta. Ongelmana on veneitä valmistavien yritysten pienuus: ne eivät voi sijoittaa suuria summia meluntorjunnan kehittämissä projekteihin. Tällä alueella olisi kuitenkin paljon tehtävissä kohtuullisinkin kustannuksin. Jo passiivisellakin rajoitetun kerroksen vaimennuksella voitaisiin merkittävästi pienentää lujitemuovirakenteisten veneiden tärinää ja melutasoja [98].

Kaikuluotausta on käytetty laivoissa ja veneissä jo kauan. Tähän voitaisiin yhdistää törmäystilanteeseen varautuminen mukauttamalla rakennetta siten, että vene pysyisi pystyssä ja vaurioituisi mahdollisimman vähän. Esimerkkejä voisivat olla kölin muuttaminen joustavaksi hetkeä ennen törmäystä ja jälleen jäykistäminen tai potkurinlavan muuttaminen joustavaksi sen ollessa osumaisillaan kiveen, köyteen tai verkkoon. Myös veneen kyljen jäykistäminen fenderikuormalle rantautumisen yhteydessä voisi tulla kyseeseen.

Purje on joustava rakenne, jonka muodonhallintaan voisivat soveltua esimerkiksi piezosähköiset aktuaattorit. Purjeen muodonhallinta käännöksiä yhteydessä esimerkiksi aktiivisten lattojen avulla voisi parantaa kilpapurjeveneiden nopeutta.

Käytönaikaiselle kunnonvalvonnalle voisi olla kysyntää erityisesti sotilasaluksissa. Esimerkiksi SPA (Systems Planning and Analysis Inc) on kehittänyt nopean signaalintulkintajärjestelmän kuituoptisten sensorien tuottaman informaation käsittelyyn ja kokeillut sitä Yhdysvaltain armeijan LPD 17 -amfibioaluksen potkurien sekä brittiläisen Triton-tutkimusaluksen rungon kunnonvalvonnassa [187].

3.2.1.3 Maakulkuneuvot

Maakulkuneuvoissa tyypillisiä dynaamisia kuormia ovat moottorin aiheuttamat kuormitukset, alustaherätteet ja törmäyskuormat.

Autot

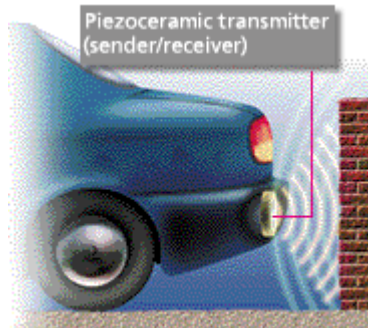
Autot liikkuvat kovaa vauhtia ja ruuhkaisilla väylillä. Siksi niissä törmäyskuormat ovat varsin todennäköisiä ja joskus hyvin vakavia. Autoja käytetään pitkiä aikoja, ja kaupungeissa suuria joukkoja autoja liikkuu lähes koko ajan, joten meluntorjunta on myös tärkeä osa autojen suunnittelua. Mukavuus on tärkeä tekijä erityisesti henkilöautojen myynnin kannalta. Alustaherätteet ovat merkittävä dynaaminen kuormitus, koska kovassa vauhdissa pienikin töyssy tuntuu voimakkaana. Jos autolla joudutaan liikkumaan epätasaisessa maastossa, joudutaan auton alustarakenne ja värähtelyneristys suunnittelemaan eri tavalla kuin maanteille ja kaduille tarkoitetuissa autoissa. Ajoneuvon suunnittelua maastokäyttöön käsitellään enemmän työkoneiden yhteydessä.

Puoliaktiivinen värähtelynvaimennus ja värähtelyjen eristäminen magnetoreologisilla iskunvaimentimilla on jo tuotteistettua tekniikkaa ja on jo käytössä ainakin General Motorsin Corvettessa ja Cadillacin Sevillessä [91, 92].

Ajoneuvon moottorin ripustus on hyvä esimerkki ajoneuvossa esiin tulevasta värähtelyn eristämisiongelmaista, jossa herätteiden taajuudet vaihtelevat ja siksi passiiviset ratkaisut toimivat huonosti. Moottorin ripustuksen tulisi olla löysä, jotta moottorin värähtely ei välittyisi runkoon, mutta toisaalta ripustuksen tulisi olla jäykkä, jotta moottori ei hypähtele kuoppaisella tiellä. Tämän ristiriidan ratkaisemiseen on kehitelty erilaisia puoliaktiivisia ja aktiivisia vaimentimia, joista enemmän lähteessä [127]. Kuvassa 37 kohdassa 3.1.7 esitettiin eräs passiivisen ja aktiivisen vaimennuksen yhdistelmä auton moottorin ripustukseen [128].

Auton korin värähtelyjen ja melun vaimentamiseen on käytetty monenlaisia passiivisia vaimentimia, kuten rajoitetun viskoelastisen kerroksen vaimennusta (esimerkiksi bussilattioissa käytetty ns. sandwich-vaneri [188]), viritettyjä massavaimentimia (Tuned Mass Damper) [189] ja monia muita. Tällä alueella on kuitenkin vielä kehittämistä, ja aktiiviset versiot (ACLD, aktiiviset massavaimentimet) ovat vasta tulossa. Vastääänen tuottamista auton sisälle asennetuilla kaiuttimilla on myös tutkittu [190]. Tämän menetelmän etuna on mahdollisuus luoda auton sisätilaan kunkin auton imagoon sopiva (rauhallinen, sporttinen jne.) äänimaailma. Menetelmän toimivuus edellyttää kuitenkin usein rinnalleen myös rakenteellista vaimennusta, jolla poistetaan häiritsevimpiä äänikomponentteja.

Parkkeerauksen apuvälineeksi on kehitetty autoihin asennettavia tutkia [27], jotka varoittavat, kun tullaan liian lähelle toista autoa tai pylvästä (kuva 52).



Kuva 52. Parkkeeraustutka [27].

Ainakin Audin, BMW:n, DaimlerChryslerin, Fordin, GeneralMotorsin, Jaguarin, Lexuksen, Porschen, Volkswagenin ja Volvon [191] kalleimpiin malleihin on toteutettu Adaptive Cruise Control -järjestelmä, eli auton keulaan on asennettu tutka ja/tai infrapunakamera, joka tarkkailee edellä kulkevia autoja, ja laitteen antaman tiedon perusteella järjestelmä sopeuttaa auton nopeuden siten, että pysytään turvallisella etäisyydellä edellä ajavasta. Tämän lisäksi on toteutettu tai suunnitteilla monia törmäysvaaran havaitsevia järjestelmiä, joissa tarkkaillaan myös mahdollisesti eteen ilmestyviä jalankulkijoita, pyöräilijöitä, sivutieltä tulevia autoja jne. ja varoitetaan kuljettajaa ja hidastetaan ajonopeutta. Erityisesti pimeällä, sumussa tai sateessa tällainen järjestelmä lisää turvallisuutta merkittävästi. Samantyyppisiä järjestelmiä suunnitellaan myös rekkoihin [192], ja ne toteutunevat melko pian myös halvempiin autoihin ja tullevat aikanaan pakollisiksi. Autotutkien toteuttamiseen voidaan soveltaa myös esimerkiksi pietsosähköisiä materiaaleja.

Törmäyksen ennakointiin voidaan tulevaisuudessa ehkä yhdistää myös automaattiväistö. Vieläkin pidemmälle meneviä konsepteja, kuten autojoukkojen automaattiohjausta, on kaavailtu [193].

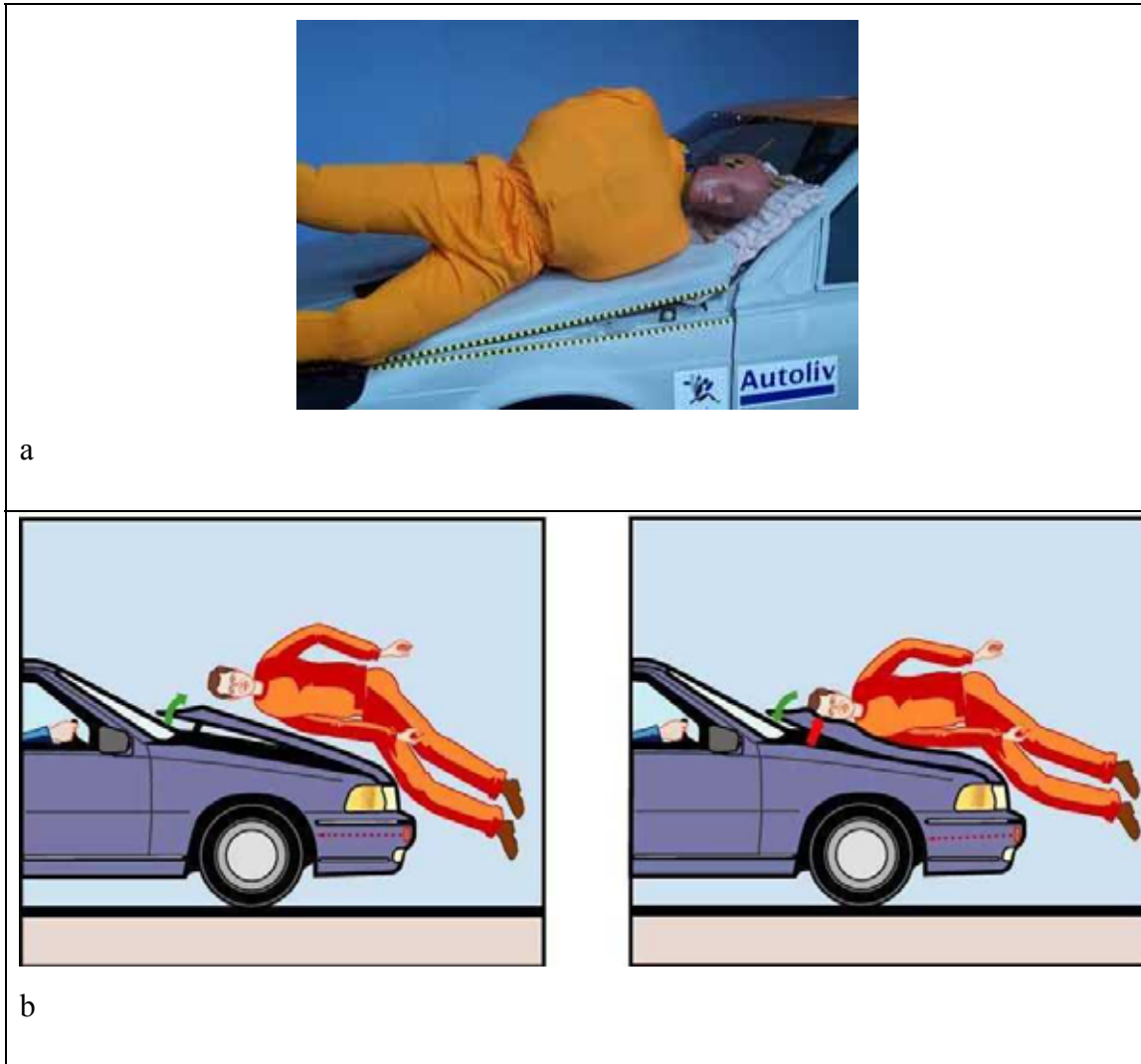
Auto voi myös automaattisesti valmistautua lähestyvään törmäykseen. Mm. uuteen Lexus-mallistoon tulee järjestelmä, joka poistaa turvavöistä löysän ja parantaa jarrutustehoa juuri ennen lähestyvää törmäystä [192]. Turvavöihin on kehitetty myös aktiivisia järjestelmiä, jotka rajoittavat matkustajaan kohdistuvaa kuormitusta löysäämällä vyötä hiukan, jos vyö puristaa matkustajaa liikaa törmäyksen aikana. Tähän voidaan yhdistää myös turvavöiden sopeuttaminen erilaisiin törmäyksiin ja matkustajien kokoon, painoon, ikään jne.

Lujitemuoviset osat ovat yleistymässä autojen koreissa, mutta niiden delaminaatioherkkyys on merkittävä ongelma [195]. Tähän tarvitaan erilaisia kunnonvalvonta- ja itsekorjausratkaisuja (ks. kohdat 3.1.9 ja 3.1.13).

Muodon- ja jäykkyydenhallintaa voisi käyttää myös auton törmäyskestävyyden parantamiseen ja törmäysenergian ohjaamiseen vähiten vaaralliseen suuntaan (ohi kuljettajan ja matkustajien), koska törmäys on dynaaminen tapahtuma. Istuimen hallittu irrottaminen yhdessä turvavöiden aktiivisen säädön kanssa törmäyksen aikana voisi vähentää matkustajaan kohdistuvia dynaamisia kuormia [195]. Moottorin ripustuksen ja ympäröivien rakenteiden jäykkyyttä muuttamalla voitaisiin saada moottori liikkumaan törmäyksessä matkustamon ali sen sijaan, että se tulee kuljettajan syliin. Sivutörmäyksessä voitaisiin auton ovipaneeli ehkä kaareuttaa ennen iskua ja iskun aikana paneelin kaarevuutta ja jäykkyyttä muuttamalla pehmentää iskua jakamalla iskuenergiaa pidemmälle ajalle. Ovipaneeli voitaisiin ehkä myös tilapäisesti tukea auton sivupilareihin ja palkkeihin ja näin suojata matkustajia.

Ainakin Ford on ottanut käyttöön jalankulkijaa suojaavan keula-airbagin [196]. Autoliv on kehittänyt jalankulkija-airbagin kanssa yhdessä käytettäväksi myös konepellin, joka avautuu hieman auton keulan osuessa jalankulkijaan ja sulkeutuu hitaasti pehmentäen päähän kohdistuvaa iskua [197] (kuva 53). Myös auton keularakenteiden muotoa ja jäykkyyttä muuttamalla voitaisiin pehmentää jalankulkijaan kohdistuvaa iskua päälleajotilanteessa. Tämänsuuntaisia ajatuksia on esittänyt DaimlerChryslerin johtokunnan jäsen Klaus-Dieter Vöhringer [195]. Hirvikolarissa voitaisiin ehkä estää hirveä osumasta tuulilasiin.

Autoihin voitaisiin myös luoda järjestelmä, joka kahden auton nokkakolarissa osuttaisi kummankin auton keulan lujimmat osat kohdakkain tai autojen keulojen synkronoitu muodonmuutos voisi aikaansaada osittaisen ohiliukumisen, jolloin molempien autojen turvallisuus paranisi. Henkilöauto voisi myös reagoida eri tavalla, jos lähestyvä törmäys olisi rekan kanssa, kuin henkilöauton kanssa.



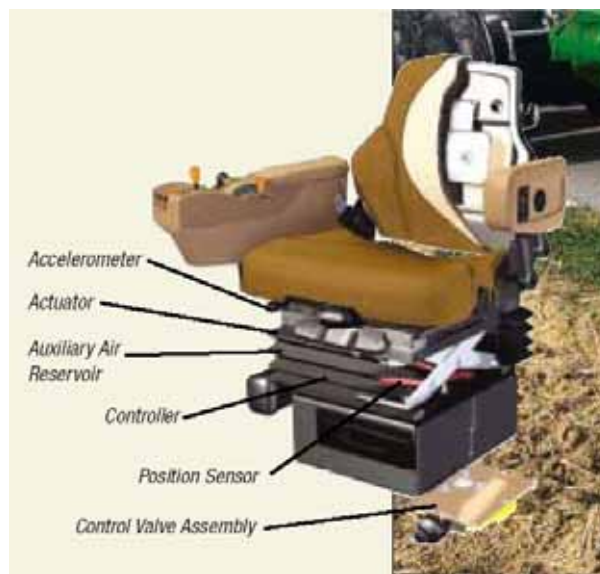
Kuva 53. Menetelmiä jalankulkijan suojaamiseksi a) keula-airbag, b) avautuva konepelti [168].

Työkoneet

Työkoneissa on moottorin aiheuttamien kuormitusten, alustaherätteiden ja törmäyskuormien lisäksi usein vielä kuormauksesta ja työtehtävistä riippuvia dynaamisia lisäkuormituksia. Alustaherätteet ovat usein varsin hankalia, jos kone joutuu liikkumaan epätasaisessa maastossa. Maastossa työkoneen alustan tulisi olla "pehmeä" ja pyörien pystyä kääntymään hyvinkin suuriin kulmiin toisistaan riippumatta. Toisaalta työkoneilla joudutaan ajamaan myös maanteillä, jolloin alustan pitäisi olla "kova" ja pyörien liikkeiden pienempiä ja keskenään koordinoituja. Tämä ristiriita on parhaiten ratkaisutavissa erilaisilla aktiivisilla tai puoliaktiivisilla järjestelmillä [198].

Koska kuljettaja joutuu usein viettämään suuren osan päivää työkoneessa, ovat melu ja värinä merkittäviä terveysriskejä [199]. Käsiin kohdistuva värinä aiheuttaa verisuoni-, hermo-, iho- ja lihasvaurioita käsissä [200] ja vartaloon kohdistuva värinä aiheuttaa väsymystä, päänsärkyä sekä erilaisia selkä-, niska- ja munuaissairauksia [201].

Työkoneen hytin, erityisesti ohjaajan istuimen (kuva 54), eristäminen alustaherätteistä on paljon tutkittu alue [202–205]. Eristämiseen voidaan käyttää passiivisia, puoliaktiivisia ja aktiivisia vaimentimia. Magnetoreologiset vaimentimet [206] ovat esimerkki tehtävään hyvin soveltuvasta puoliaktiivisesta tekniikasta. Myös puoliaktiivisia pneumaattisia ja hydraulisia vaimentimia on olemassa.



Kuva 54. Työkoneen istuimen eristäminen alustaherätteistä (John Deere -traktorin aktiivinen istuin [207]).

Moottorin eristämiseen rungosta sekä hyttivärähtelyjen vaimentamiseen ja melun torjuntaan voidaan työkoneissa käyttää samoja tekniikoita kuin autoissakin. Myös kunnonvalvontatekniikat ovat pääosin samoja kuin autoissa.

Säätöjärjestelmät sen sijaan eroavat autojen vastaavista paljonkin, koska työkoneessa on enemmän liikkuvia elimiä, niveliä jne. ja pyörien on pystyttävä tekemään isoja liikkeitä toisistaan riippumatta. Työkoneissa on nykyään muutenkin paljon elektroniikkaa ja tietokoneohjausta joystickineen. Esimerkiksi metsätyökoneessa tukin liikuttelun hallinta ja kaadettujen tukkien määrän kirjaaminen on tietokoneavusteista.

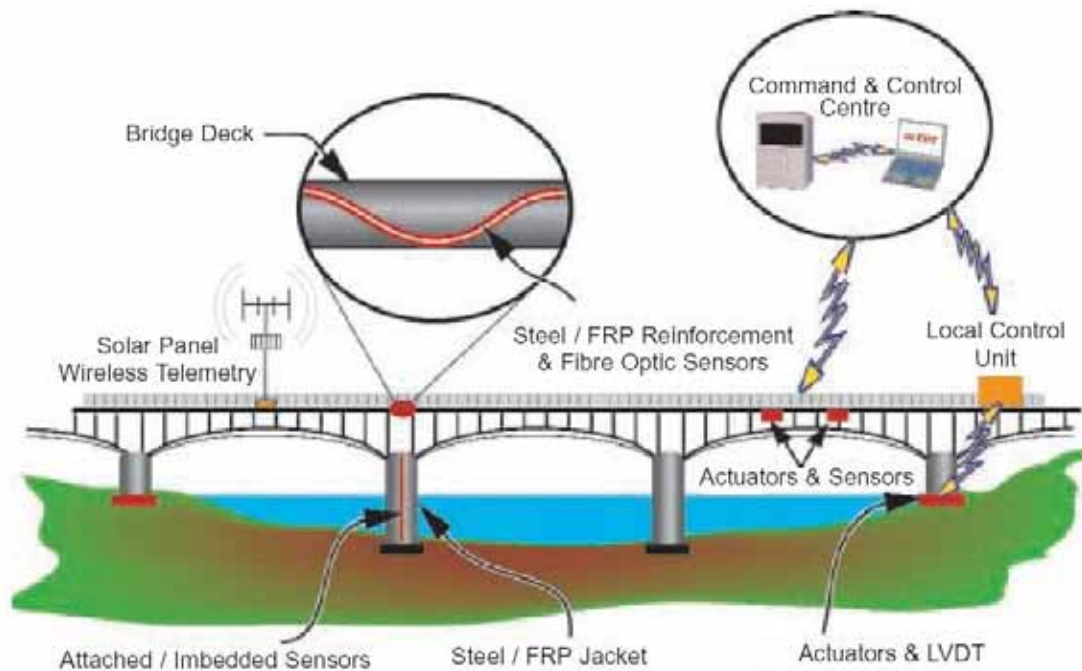
Käytettävien sensorien, aktuaattorien ja tiedonkäsittelyjärjestelmien määrää rajoittaa niiden hinta. Työkoneen hinta ei saa paljon nousta älytekniikan vuoksi. Luxusautoissa hinta ei ole niin määräävässä asemassa.

3.2.2 Rakennustekniikka

3.2.2.1 Sillat

Silloissa tärkeimpiä dynaamisia kuormia ovat ajoneuvojen aiheuttamat värähtelyt, tuulen aiheuttamat värähtelyt sekä maanjäristyskuormat. Myös jään ja virtauksen aiheuttamat kuormat voivat olla merkittäviä. Pienissä silloissa myös jalankulkijoiden aiheuttamat askelkuormat voivat olla merkityksellisiä. Sillat on yleensä mitoitettava myös ajoneuvon tai aluksen törmäykselle siltapilariin. Sillat ovat alttiina vaihteleville säille ja saasteille. Erittäin pitkäikäisiksi tarkoitettuina rakenteina sillat ovat otollinen kohde kunnonvalvonnalle.

Kuvassa 55 esitetään älykkään, kuntoaan tarkkailevan sillan toteuttamiseen tarvittavia elementtejä.



Kuva 55. Älykäs silta [208].

Lujitemuovirakenteita on Euroopassa käytetty silloissa melko vähän, Yhdysvalloissa jonkin verran enemmän [209–212]. Lähteessä [213] on kuvattu kevyen liikenteen lujitemuovinen siltarakente Australiasta ja lähteessä [214] lujitemuovinen maantiesiltarakente Yhdysvalloista. Lähteessä [215] kerrotaan Euroopan ensimmäisestä kokonaan lujitemuovisesta maantiesillasta, joka rakennettiin Englannissa 2002. Tämän sillan jänneväli on 10 metriä ja sallittu akselipaino 40 tonnia. Lujitemuovirakenteen keveys on eduksi nostosilloissa, mutta toisaalta rakenteen keveys ja joustavuus saattavat olla hyvinkin ongelmallisia sillan värähtelykäyttäytymisen kannalta.

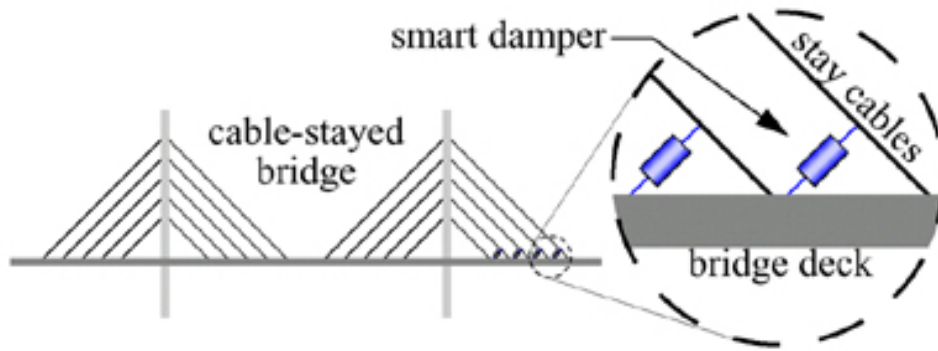
Kokonaan lujitemuoviset sillat tuskin tulevat valtaamaan alan markkinoita, mutta lujitemuovilaminaatteja tullaan tulevaisuudessa varmaan käyttämään paljonkin mm. korvaamaan betoniraudoitusta sillan esijännityskaapeleissa [212] sekä kansirakenteissa [216, 217]. Lujitemuovisten rakenneosien etuja ovat keveys ja hyvä säänkestävyys. Sillankannessa laminaatti voi toimia myös muottina, jonka sisään teräsbetonirakenne valetaan, ja sillan käyttöaikana laminaatti toimii osana kuormaa kantavaa rakennetta.

Kuituoptikka soveltuu hyvin lujitemuovisen siltarakenteen kunnonvalvontaan ja muodonmuutosten mittaamiseen (ks. kuva 56). Myös venymäliuskoja käytetään yleisesti.



Kuva 56. Kuituoptisia sensoreita sillan kannen lujitemuovisessa tukirakenteessa [217].

Siltojen kannatinkaapeleiden värähtelyjä on vaimennettu passiivisilla lineaarisilla vaimentimilla (esimerkiksi nestevaimentimilla), puoliaktiivisilla vaimentimilla (nestevaimentimilla, joissa neste virtaa säädettävän aukon läpi tai ER- tai MR-nestevaimentimilla (kuva 57) tai säädettävillä kitkavaimentimilla) [218–220]. Aktiivisia vaimentimia voidaan toteuttaa esimerkiksi muistimetallien tai pietsojen avulla samaan tapaan kuin säädettävissä kitkaliitoksissa.



Kuva 57. Sillan värähtelyvaimennus kannatinkaapeleihin asennettujen aktuaattorien avulla [88].

Liittämällä sillan kannatinkaapeleihin aktuaattoreita ja kansirakenteeseen esimerkiksi kuituoptyisia sensoreita voidaan toteuttaa siltarakenteen muodonhallintaa ja värähtelyjen aktiivista vaimentamista. Silloissa on käytetty Euroopassakin lujitemuovisia esijännityskaapeleita ja betonin lujitteita ja joissakin näistä silloista on käytetty myös kuituoptiikkaa [212]. Vaurioituneita vanhoja siltoja on korjattu [212, 221] ja vaurioitumista ehkäisty lujitemuovijäykisteillä. Lähteessä [222] kuvataan tällaisen korjauksen kunnonvalvontaa kuituoptiikan avulla.

Muista materiaaleista rakennettujen siltojen maanjäristysvärähtelyjä on eristetty ja vaimennettu säätämällä rakenteen jäykkyyttä ja vaimennusta aktiivisesti [80, 82]. MR-vaimentimia pidetään erittäin potentiaalisina siltojen maanjäristysvärähtelyjen vaimentamiseen [88, 90]. Lähteen [223] mukaan MR-tekniikka soveltuu hyvin myös sillan tuulivärähtelyjen vaimentamiseen.

3.2.2.2 Talonrakennus

Asuintaloissa ja julkisissa rakennuksissa pääasiallisia dynaamisia kuormia ovat askelvärähtely sekä maanjäristystilanne. Askelvärähtelyjen vaimentaminen on erityisen tärkeää konserttisalien aitorioissa ja lehtereillä, mutta se on tärkeää myös asuin- ja toimistorakennuksissa. Tehdasrakennuksissa erilaiset koneiden aiheuttamat kuormitukset ovat usein merkittäviä. Varastorakennuksissa liikutaan myös trukeilla ym. koneilla, joiden aiheuttamat dynaamiset kuormitukset sekä törmäyskuormat on huomioitava mitoituksessa. Ajoneuvon törmäys rakennukseen ulkoapäin on yksi mitoituskuormista useimmissa rakennuksissa. Akustiikka ja äänenhallinta ovat tärkeä osa rakennussuunnittelua.

Lujitemuovisia isoja rakenteita käytetään talonrakennuksessa varsin vähän. Lähteessä [212] on kuvattu lujitemuovinen toimistorakennus. Tämä on kuitenkin harvinainen poikkeus. Lujitemuovirakenne on joustava ja soveltuu paremmin vetokuormien kuin isojen puristus- tai taivutuskuormien alaiseen rakenteeseen. Lisäongelmia voivat aiheut-

taa liitoksien ja läpivientien aiheuttamat poikittaiset vetokuormitukset, alkusäröt ja mutkat kuitusuunnissa. Nykytekniikalla pääosin tai suurelta osin lujitemuovinen rakennus tai rakennuksen osa tulee uudisrakentamisessa kysymykseen lähinnä silloin, kun raskeampien materiaalien kuljettaminen rakennuspaikalle on hankalaa. Uudet ristikkotyypiset lujitemuovirakennekonseptit, kuten IsoTruss (aiemmin PYRAMatrix) [224], voivat ehkä tulevaisuudessa tuoda lujitemuoveja myös talonrakennuksen puristus- ja taivutuskuormitettuihin kantaviin rakenneseisiin.

Ns. modulaarisessa rakennustavassa voidaan jokin rakennuksen osa, esimerkiksi kylpyhuone, rakentaa kokonaan tehtaalla. Lujitemuovisia, sisältä viimeistelyä kylpyhuoneelementtejä on toteutettu Suomessakin. Tyypillisesti kylpyhuone-elementin lattia tehdään yhtenäisenä, allasmaisena laminaattirakenteena ja siihen liitetään erikseen valmistetut seinäelementit. Tällaisen elementin äänenhallintaan voisi soveltaa esimerkiksi rajoitetun viskoelastisen kerroksen vaimennusratkaisuja.

Värähtelyjen ja äänen hallinta funktionaalisten materiaalien avulla voisi mahdollistaa lujitemuovirakenteiden nykyistä huomattavasti laaja-alaisemman käytön talonrakennuksessa.

Erilaisia betoni-, tiili- ja puurakenteita voidaan korjata ja/tai vahvistaa maanjäristyskuormille lujitemuoveilla. Tällaisten korjausten kunnonvalvonta voisi olla yksi funktionaalisten materiaalien käyttökohde.

Talojen maanjäristysvärähtelyjä on eristetty ja vaimennettu säätämällä rakenteen jäykkyyttä ja vaimennusta aktiivisesti [81, 82]. MR-vaimentimien soveltuvuutta rakenteiden maanjäristysvärähtelyjen vaimentamiseen on tutkittu paljon [85, 86, 87, 88, 89]. MR-tekniikka näyttäisi soveltuvan hyvin monenlaisten rakennusten ja rakenteiden maanjäristysvärähtelyjen vaimentamiseen. Aktiivisten kitkavaimentimien käyttö jäykisteissä (ks. kuvat 42 ja 43 kohdassa 3.1.10) on toinen lupaava menetelmä maanjäristysvärähtelyjen vaimentamiseen.

Urheiluhalleja on toteutettu kangasrakenteisina joustavina rakenteina ("kuplahalleina"). Tällaisten joustavien rakenteiden muodonhallintaan ja tuulen aiheuttamien liikkeiden vaimentamiseen voisi ehkä käyttää pietsosähköisiä aktuaattoreita.

3.2.2.3 Mastot ja tornit

Mastoissa ja torneissa mitoittavia dynaamisia ovat kuormia tuulen aiheuttamat kuormitukset, maanjäristystilanne ja joskus lentokoneen törmäys mastoon. Jään ja lumen kerääntyminen muuttaa usein maston dynamiikkaa merkittävästi. Lentokentällä mastojen pitää rikkoutua lentokoneen törmätessä mastoon, jotta lentokone vaurioituisi mahdollisimman vähän. Tämän voisi toteuttaa esimerkiksi pietso- tai muistimetalliaktuaattorien avulla on-off-liitoksilla.

Lujitemuovisia, putkimaisia ja ristikkorakenteisia kevyitä radio- ja valomastoja, puhelinpylväitä jne. käytetään jo paljon [225–227]. Näissä keveys ja korroosionkestävyys ovat merkittäviä etuja teräsrakenteisiin verrattuna. Uudet ristikkotyypiset lujitemuovirakennet ratkaisut, kuten IsoTruss [224], saattavat johtaa lujitemuovirakenteen yleistymiseen myös isommissa masto- ja tornirakenteissa.

Harustettujen mastojen haruksissa voidaan käyttää samantyyppisiä passiivisia lineaarisia vaimentimia tai puoliaktiivisia vaimentimia kuin siltojen kannatinkaapeleissa ja myös aktiivisia vaimentimia voidaan toteuttaa samoilla tekniikoilla kuin kohdassa 3.2.2.1 esitettiin [218, 219, 220, 228].

3.2.2.4 Tuulivoimalat

Tuulivoimalan torni on yleensä metallirakenteinen, putkimainen (ks. kuva 58a) tai ristikkorakenteinen (ks. kuvat 58b ja c), mutta lujitemuoviratkaisujakin on kaavailtu [229, 230]. Pienemmissä voimaloissa torni saattaa olla myös harustettu hoikka masto. Roottorin lavat ovat pääosin lujitemuovirakenteisia kaksi- (kuva 58d) tai kolmikotelo-rakenteita (ks. kuvat 58e ja f) [231]. Yleisin lujitemateriaali on lasikuitu, mutta lapojen koon kasvaessa on hiilikuitujen käyttö yleistymässä [232, 233]. Matriisi on yleensä polyesteriä, vinyylisteriä tai epoksia. Myös puu-epoksi-laminaatteja käytetään [229]. Kerroslevyjen ydinaineena käytetään yleensä PVC-vaahtoja taikka alumiini- tai aramidikuitu-paperihunajakennoja, mutta toisinaan käytetään myös balsapuuta [232, 233, 234].

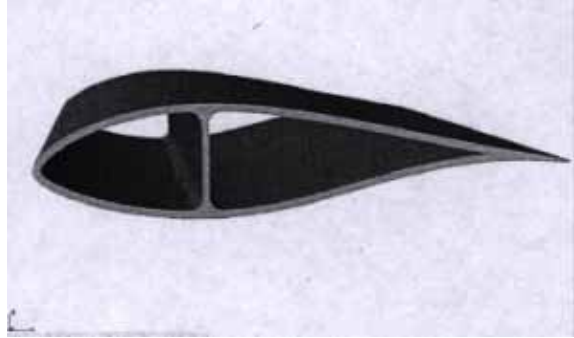
Tuulivoimalan dynaamisia kuormia ovat virtauksen ja painovoiman aiheuttamat värähtelykuormitukset sekä maanjäristystilanne. Lapoja on jouduttu vaihtamaan värähtelyongelmien takia, ja joskus värähtelyt ovat rikkoneetkin lapoja. Tuulivoimaloita on vastustettu myös melun vuoksi, ja voimalan lapojen pyörimisnopeutta joudutaan rajoittamaan lavan kärjestä lähtevän melun vähentämiseksi. Jään ja lumen keräytyminen lapoihin muuttaa niiden dynaamisia ominaisuuksia.

Nykyään tuulivoimaloita pyritään rakentamaan merelle, jolloin mukaan tulevat tyypilliset offshore-kuormitukset, kuten aallot ja liikkuvan ja murskautuvan jään aiheuttamat kuormat [235]. Voimalan osien kuljettaminen ja asentaminen paikalleen asettavat myös omat vaatimuksensa rakenteelle. Offshore-olosuhteisiin on kaavailtu myös harustettua tornia [236]. Mikäli esimerkiksi IsoTruss-tyyppinen lujitemuovirakenne täyttäisi muut vaatimukset, olisi suuressa offshore-tuulivoimalassa kevyen lujitemuovirakenteen kuljetuksen ja pystytyksen helppous merkittävä etu verrattuna painavan metallirakenteisen tornin kuljettamiseen ja pystyttämiseen.

a)



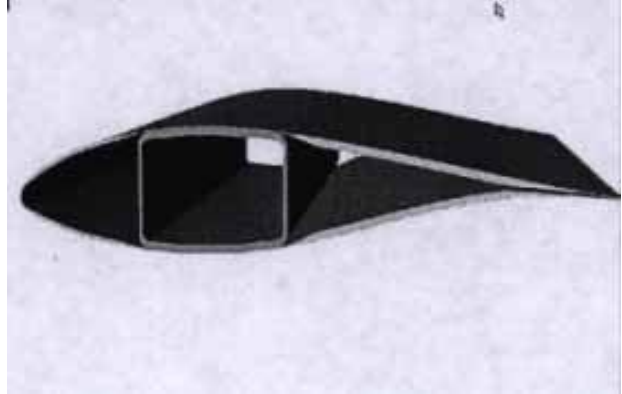
d)



b)



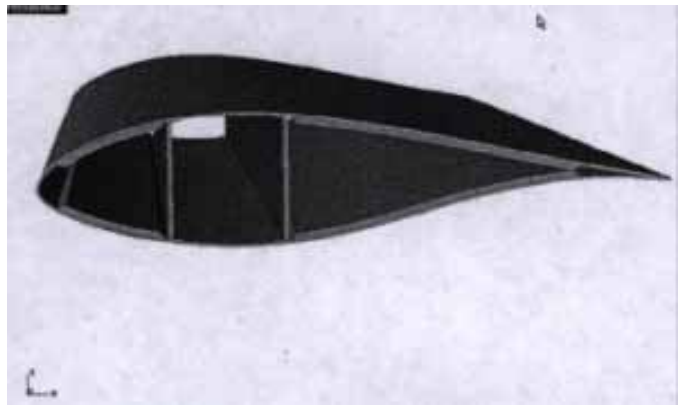
e)



c)



f)



Kuva 58. Tuulivoimalan tornin ja roottorinlavan rakenneratkaisuja [227, 231, 237].

Ankarissa olosuhteissa ja pyrittäessä pitkään käyttöikään kunnonvalvonnan tarve korostuu. Kuormituslaskureiden avulla voitaisiin ennustaa lapojen, generaattorin ja tornin jäljellä olevaa käyttöikää ja ajoittaa osien korjaus- ja vaihtotoimenpiteet oikein. Samalla mahdollistuisi myös elinikänsä loppua lähestyvän laitoksen kuormien rajoittaminen alentamalla pyörimisnopeutta, pysäyttämällä voimala kovilla tuulilla tai "rakenteellisten releiden" avulla.

Tuulivoimalat ovat nykyään teholtaan varsin pieniä verrattuna muuntyyppisiin voimalaitoksiin, joten tuulivoimaloiden kokoa pyritään koko ajan kasvattamaan. Pisimmät nykyisistä lavoista ovat noin 40–50-metrisiä [238]. Tavoitteena on tuplata nykyinen lavan pituus. Tämä edellyttää hiilikuiturakenteeseen siirtymisen lisäksi älyratkaisuja värähtely- ym. ongelmien ratkaisemiseen.

Tuulivoimalan roottorinlavoissa voisi käyttää samantyyppisiä tekniikoita tehon ja kuormitusten säätämiseen ja värähtelyn vaimentamiseen kuin on kokeiltu lentokoneiden siivissä ja helikopterien roottorinlavoissa (ks. kohta 3.2.1.1).

Passiivisen älyn (siiven kierron keskipakoisvoiman ja elastisesti räätälöidyn komposiittirakenteen avulla) soveltamista tuulivoimalan lapaan on tutkittu mm. Sandia National Laboratoriesissa [239, 240]. Tekniikka on lupaava, mutta vaatii vielä tutkimusta ja edellyttää kehittyneitä vaimennusratkaisuja, jotta vältetään aeroelastisen stabiliteetin menetyt. Koska lapojen pyörimisnopeus on pienempi kuin helikopterien siivissä, voisi älyratkaisuja tuulivoimalan lavoissa ehkä toteuttaa myös muistimetalliaktuattorien avulla. Rajoitetun kerroksen vaimennus (CLD) passiivisena tai aktiivisena on yksi varsin lupaava menetelmä lapojen värähtelyjen vaimentamiseen.

Tuulivoimalan lapojen kunnonvalvontaa funktionaalisten materiaalien avulla on tutkittu ainakin Yhdysvalloissa (North Carolina AT, NREL, Sandia National Laboratories) [241] ja Risøssa Tanskassa [242, 243]. Näistä ensin mainitussa pyrittiin kehittämään pietsoaktuattoreilla tuotetun jännitysaallon etenemiseen perustuva särönhavaitsemisjärjestelmä. Risø'n tutkimuksessa taas mukana oli monta erilaista tekniikkaa: kuituoptiikka, akustinen emissio, ultraääni, röntgensäteet, venymäliuskat ja kiihtyvyyssanturit (myös MEMS). Tavoitteena oli havaita säröjä liimaliitoksissa sekä delaminaatiota ja kuitujen poikki kulkevia säröjä lujitemuovilaminaateissa. Tuloksena oli, että kunnonvalvontajärjestelmä tuulivoimalan lapoihin on teknisesti ja taloudellisesti mahdollista toteuttaa monellakin erilaisella tekniikalla. Valintakriteereinä esitettiin hinta, pienimmän havaittavan särön koko, kyky erottaa särön koko, sensorien saatavuus, kestävyys kenttäolosuhteissa sekä se, tarvitaanko lapoihin sähköjohtoja. Tekniikoiden ja järjestelmien lopullinen paremmuusjärjestys puuttuu em. dokumenteista.

Tornin värähtelynvaimennukseen voisi soveltaa Shear Tubeja tai magnetoreologisia elastomeerejä. Ristikkorakenteessa voisi käyttää aktiivisia kitkaliitoksia värähtelynvaimennukseen. Harustetuissa torneissa voisi harusten värähtelynvaimennukseen soveltaa aktiivisia kitkavaimentimia tai puoliaktiivisia MR-vaimentimia.

Jos lapojen kärjestä lähtevää melua pystyttäisiin älyratkaisujen avulla vähentämään, voitaisiin pyörimisnopeutta, ja siten voimalan tehoa, nostaa [244]. Tähän voisi kokeilla funktionaalisten materiaalien avulla liikutettavia laippoja tai aktiivista pintaa toteutettuna joko makroskoopilla kalvomaisilla aktuaattoreilla tai MEMSeillä.

3.2.2.5 Offshore-rakenteet

Offshore-rakenteissa on voimakkaita dynaamisia kuormituksia: aaltojen aiheuttamat kuormitukset, liikkuvan ja murskautuvan jään aiheuttamat kuormitukset, tuulen aiheuttamat kuormitukset, maanjäristystilanne, laivan törmäys. Liikkuvan jään aiheuttamat dynaamiset kuormitukset ovat rikkoneet majakoita Suomessakin ennen kuin ilmiö opittiin hallitsemaan [245].

Offshore-tuulivoimaloita käsiteltiin jo kohdassa 3.2.2.4.

Öljynporauslautat ovat alttiina rajuille aalto- ja jääkuormille. Tyypillisesti öljynporauslautta harustetaan pohjaan kiinni. Harusten kuormia rajoittamaan voisi käyttää erilaisia vaimentimia. Myös lautan vakauden parantaminen aktiivisilla ratkaisuilla voisi olla mahdollista.

3.3 Koneenrakennus

Paikallaanseisovissa koneissa ja koneperustuksissa mitoittavia dynaamisia kuormia ovat koneiden aiheuttamat värähtelyt ja maanjäristystilanne. Joskus myös liikkuvien ajoneuvojen aiheuttamat kuormitukset ja törmäyskuormat tulevat mukaan kuvaan. Monissa koneissa melu on suuri ongelma.

Kuten kohdassa 3.1.8 jo mainittiin, melua kannattaa torjua niin lähellä melun lähdettä kuin mahdollista. Kohdassa 3.1.8 esitettyjä meluntorjunnan periaatteita ja menetelmiä voidaan käyttää useimmissa koneenrakennuksen kohteissa. Koneiden aiheuttaman melun taajuuskaista on usein kapea ja ennalta tiedossa, jolloin aktiivisessa vaimennuksessa voidaan käyttää myös eteenpäinkytkettyjä menetelmiä.

Murskaimien ym. paljon melua tuottavien koneiden meluntorjunnassa voisi käyttää koteloitua ACLD-värähtelynvaimennuksella. Ongelmaksi jää kuitenkin vielä suoraan koteloinnista läpi rakenteen alimman ominaistajuuden pakkovärähtelynä menevä ääni, jonka torjumiseen ei vielä ole valmiita menetelmiä. Funktionaaliset materiaalit, esimerkiksi ElektroAktiiviset Polymeerit (EAP [153]), voisivat ehkä tuoda ratkaisun myös tähän ongelmaan. Vastamelun tuottamista erilaisilla kalvoilla (mm. EMFI [136]) voisi myös kokeilla.

Pumppuakselin värähtelyjä on vaimennettu kiinnittämällä akseliin kolme Marcon Torque-aktuaattoria 120 asteen välein [246]. Kunkin aktuaattorin siirtyvä kärki on kiinnitetty isoon metallivanteeseen, joka siten on aktuaattorien välityksellä kiinni akselissa. Kun aktuaattoreihin johdetaan virta, syntyy akselin ja sen ulkopuolella olevan vanteen välille suhteellinen vääntö. Tätä systeemiä voidaan käyttää passiivisena värähtelynvaimentimena, tai sillä voidaan vaimentaa värähtelyä aktiivisesti. Torque-aktuaattorin resonanssitaajuus on 1,35 kHz (sitä voidaan alentaa lisäämällä vanteeseen massaa). Esimerkiksi jyrskineen hallitsevat mikrometriamplitudin värähtelytaajuudet ovat alueella 40–400 Hz, joten pietsoaktiivinen aktuaattori sopii näiden värähtelyjen vaimentamiseen [247].

Pyörivien akselien värähtelynvaimennusta on tutkittu paljon VTT:ssä [248]. Perinteisiä teräksisiä teloja pyritään mm. paperiteollisuuden kohteissa korvaamaan lujitemuovisilla. Tämä edellyttää lujitemuovirakenteen muodon- ja jäykkyydenhallintaa sekä tehokasta värähtelynvaimennusta.

Potentiaalisia muodonhallintatehtäviä löytyy myös turbiinien ja tuulettimien siipien virtausominaisuuksien hallinnassa ja meluntorjunnassa.

Tarkkuusinstrumentit, mittauslaitteet ja elektronimikroskoopit vaativat liikkumattoman ja suorana (tasomaisena) pysyvän alustan [249]. Tässä muodonhallintatehtävässä voidaan käyttää monia erilaisia aktuaattoreita, esimerkiksi magnetostriktiivisiä aktuaattoreita tai muistimetalleja sekä MR-nesteitä (mahdollisesti yhdessä hydrauliiikan kanssa) tai MR-elastomeerejä.

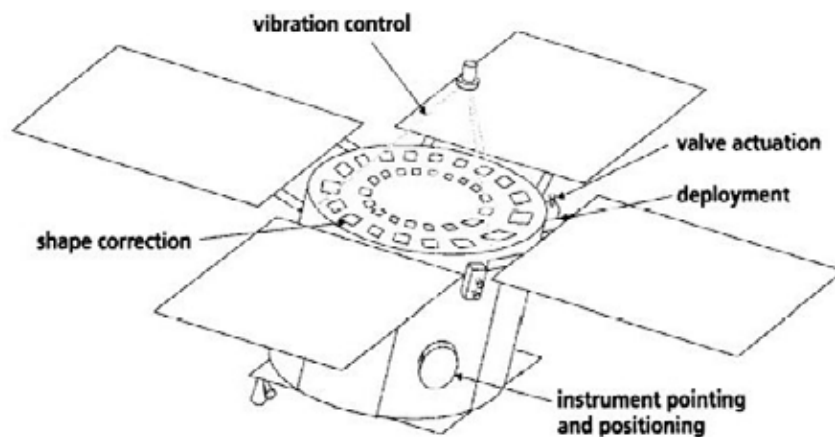
Maanjäristyskuormille voidaan koneperustuksissa käyttää samoja menetelmiä ja aktuaattoreita kuin silloissa ja talonrakennuksessa (ks. edellä kohdat 3.2.2.1 ja 3.2.2.2).

3.4 Avaruustekniikka

Avaruusalusten dynaamisia kuormia ovat erittäin suuret kiihdytyskuormat, laitteiden aiheuttamat värähtelyt, laskeutumiskuormat sekä sukkuloissa paineisku ja kitkan aikaansaama kuumeneminen sukkulan palatessa ilmakehään. Sukkulat toteutetaan yleensä

alumiinirakenteisina. Suuret lämpötilan- ja paineenvaihtelut ovat merkittävä kuormittava tekijä useimmissa avaruustekniikan laitteissa. Avaruusrakenteiden erityisvaatimuksia ovat keveys, pieni tilantarve kuljetuksen aikana, matalien ja korkeiden lämpötilojen ym. vaativien olosuhteiden kesto sekä huoltovapaus.

Funktionaalisilla materiaaleilla on potentiaalia monenlaisten tehtävien suorittamiseen avaruudessa. Suurin funktionaalisten materiaalien käyttöä avaruustekniikassa rajoittava tekijä on tiedon puute siitä, miten ko. materiaalit käyttäytyvät avaruuden olosuhteissa [250]. Kuvassa 59 on mahdollisia funktionaalisten materiaalien sovelluskohteita satelliiteissa.



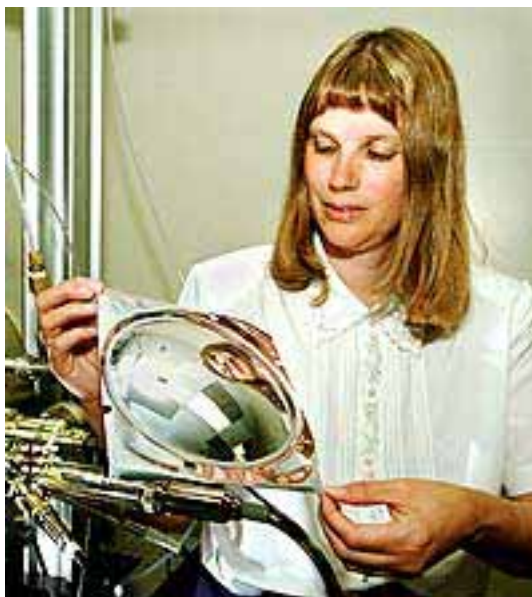
Kuva 59. Funktionaalisten materiaalien potentiaalisia sovelluskohteita satelliiteissa [250].

Avarusteleskooppien, satelliittien yms. peilien ja antennien muodon- ja suuntauksenhallinta [43] voisi olla sekä halvemmallalla että luotettavammin toteutettavissa funktionaalisten materiaalien avulla kuin perinteisillä tekniikoilla; tosin funktionaaliset materiaalit vaativat ehkä enemmän panostusta säätöjärjestelmään ja ohjauslaitteisiin.

Pulttien räjäyttämisen irrottamiseksi on korvattu muistimetallien avulla on-off-liitoksilla [145].

CIMSS:sä VirginiaTechissä on tutkittu puhallettavia rakenteita, joiden ideana on pieni koko kuljetuksen aikana ja laajentuminen käyttökuntoon avaruudessa [149]. Esimerkkinä kapton-rengas jonka on tarkoitus toimia peilin tai antennin runkona. Tällaisen joustavan rakenteen muodonhallintaan soveltuvat hyvin esim. pietsosähköiset aktuaattorit.

Erittäin lupaava konsepti on Sandia National Laboratoriesin ja Kentuckyn Ylipiston kehitteillä oleva kalvomainen pietsosähköinen peili (ks. kuva 60), joka on kuljetuksen aikana kokoonkäärittynä. Vapautettuna kalvopeili avautuu lähes oikeaan muotoonsa ja peilin lopullinen muodonhallinta toteutetaan elektronikykillä [251].



Kuva 60. Kalvomainen pietsosähköinen avaruuspeili [251].

Avaruusrakenteet ovat yleensä kevyitä mutta silti melko jäykkiä rakenteita. Rakenteiden keveys tekee niistä ongelmallisia värähtelyjen kannalta. Värähtely on paitsi epämukavaa miehitettyjen alusten ja asemien henkilökunnalle myös haitallista erilaisille mittaus- ja kontrollijärjestelmille miehittämättömissäkin laitteissa [252]. Erityisen paljon värähtelyongelmia on erilaisissa kalvomaisissa rakenteissa ja aurinkopaneeleissa. Värähtelynvaimennus onkin yksi lupaavimmista funktionaalisten materiaalien käyttöalueista avaruustekniikassa. Mm. pietsosähköisiä aktuaattoreita [251] ja rajoitetun kerroksen viskoelastista vaimennusta [96] on käytetty avaruusrakenteiden värähtelynvaimennuksessa.

Avaruusaluksissa on koko ajan toiminnassa suuri joukko erilaisia laitteita, joten äänenvaimennus on tarpeen astronauttien hyvinvoinnin kannalta. Esimerkiksi venäläisen MIR-avaruusaseman sisätiloissa oli melutaso niin korkea, että se aiheutti kosmonauteille kuulovaurioita [253]. Funktionaaliset materiaalit ja CDL-konstruktiot tarjoavat välineitä melutason alentamiseen.

Tehontarpeen pienentäminen ja luotettava toiminta myös tehonsyötön katkettua ovat tärkeitä useimmissa avaruusteknisissä laitteissa. Lähteessä [44] on esitetty magnetostriktiivinen aktuaattori, joka pystyy säilyttämään venymätilansa ilman jatkuvaa tehonsyöttöä.

NASAn pitkän tähtäimen kaavailuissa on "iätön avaruussukkula", joka kykenisi liikkumaan sekä ilmakehässä että avaruudessa, tarkkailemaan oma kuntoaan, korjaamaan vaurionsa sekä muuttamaan muotoaan tarkoituksenmukaisesti [254]. Aluksessa yhdistyisivät kunnonvalvonta- ja vaurion itsekorjaustekniikat (self healing) modulaariseen itse

muotoaan muuttavaan robotiikkaan (modular self-reconfigurable robot) [255]. Modulaarinen itse muotoaan muuttava robotti koostuu itsenäisistä osista, jotka voivat yhdistyä erilaisiksi konfiguraatioiksi suorittamaan erilaisia tehtäviä. Modulaarisessa robotiikassa ja muussakin avaruusrobotiikassa on paljon potentiaalisia sovelluskohteita funktionaalisille materiaaleille, esimerkiksi pietsosähköisille kiihtyvyyssantureille ja gyroskoopeille sekä muistimetalliaktuaattoreille [256]. Tästä on enemmän kohdissa 3.1.10 ja 3.7.

3.5 Prosessitekniikka

Prosessitekniikassa merkittäviä dynaamisia kuormia ovat mm. virtauskuormitukset (esim. putkivirtaus), paine- ja lämpötilakuormat, jopa räjähdykset. Rakenteilta vaaditaan usein myös kemiallista kestävyyttä.

Putkivirtauksen ohjaamisessa voisi käyttää nopeita pietsoventtiileitä (ks. kohta 3.1.11) sekä putken sisäpintojen muodonhallintaa. Myös MEMS-aktuaattoreilla voitaisiin aktiivisesti hallita putken sisäpinnan virtausominaisuuksia.

Putkessa virtaavasta nesteestä tai kaasusta voi sakkautua ainesta putken seinämiin, erityisesti mutkapaikoissa. Monissa tapauksissa tätä voidaan estää tarttumattomilla pinnoitteilla. Mikäli sakkautumisen estäminen ei ole mahdollista, voidaan tarttuneen aineksen irrottamiseksi ehkä käyttää putken seinämien värähtelyttämistä.

3.6 Urheiluvälinetekniikka

Laskettelussa, lumilautailussa ja vesihiihdossa alustaherätteet aiheuttavat välineeseen käyttäjälle epämukavia ja suoritusta haittaavia värähtelyjä. ACX on kehittänyt passiivista värähtelynvaimennusta shunttivastustekniikalla [96] mm. laskettelusuksiin (K2 Merlin VI), lumilautoihin (K2 Electra) ja vesisuksiin. Laskettelusuksissa tavoitteena on edistää suksen reunan pysymistä kontaktissa lumen kanssa. Shunttivastustekniikkaa on sovellettu myös baseball- ja tennismailoissa vaimentamaan huonojen osumien (iskujen) aiheuttamaa haitallista värähtelyä. Suksissa ja lumilautoissa, samoin kuin tennismailoissa, ollaan siirtymässä passiivisesta shunttivastustekniikasta aktiiviseen tekniikkaan, jossa muodonmuutoksesta talteenotettua energiaa siirretään sopivassa vaiheessa takaisin rakenteeseen [257].

Maastopyöräilyssä alustaherätteet ovat voimakkaita ja usein varsin iskumaisia. ACX on kehittänyt järjestelmän, jossa mikroprosessoriohjatun iskunvaimennuksen elementit ovat iskunvaimentajan männän liikettä seuraava anturi, tietoa analysoiva piiri ja

pietsosähköinen bimorph-aktuaattori venttiilissä. Millisekunnissa venttiili säätaa iskunvaimentajan öljynvirtausta iskujen mukaisesti [258].

3.7 Robotiikka

Robotin kuormitukset ovat hyvin erilaisia robotista riippuen. Kävelevän robotin on hallittava varsin vaativia liikesarjoja ja kyettävä korjaamaan toiston aikana syntyvät pienet virheet. Robotin tartuntaelimiä ja muiden työelimiä liikkeiden on usein oltava hyvin tarkkoja ja värähtelyttömiä, erityisesti kirurgisissa roboteissa ja mikroelektronikan roboteissa (kuva 61).

Monissa roboteissa pyritään matkimaan ihmisen tai eläimen rakennetta ja toimintatapaa (esimerkkejä kohdassa 3.1.3 mainitut kala- ja käärmerobotit sekä kohdassa 3.1.5 mainitut kävelevät robotit).

Pääpaino robotiikassa on liikkeiden- ja muodon- ja jäykkyydenhallinnassa [52, 53, 77, 78, 145, 146] (ks. esimerkit kohdissa 3.1.3, 3.1.5 ja 3.1.10), mutta värähtelynvaimennuksella on myös tärkeä osansa. Liikkeenhallinta toteutetaan useimmiten aktiivisten liitosten avulla.

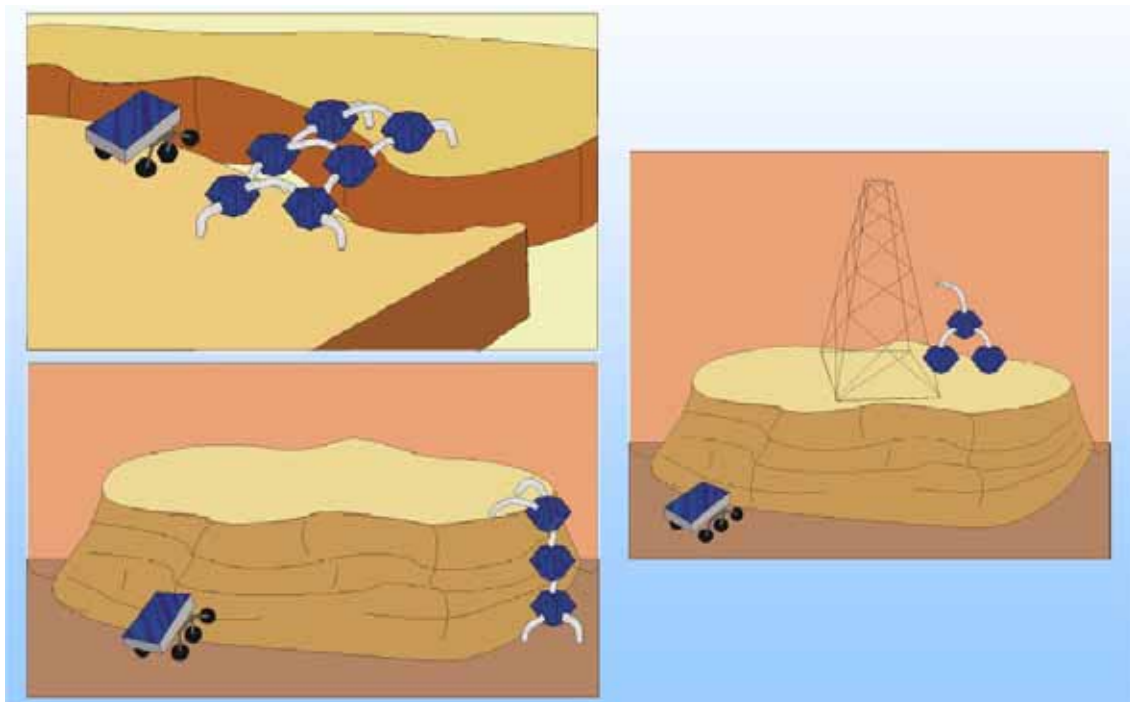


Kuva 61. Roboteilta vaaditaan tarkkuutta esimerkiksi kirurgiassa sekä mikrokokoonpanotekniikassa [259, 260].

Roboteissa käytetään monenlaisia sensoreita, mm. tutkia, kiihtyvyyssantureita ja gyroskoppeja. Pienikokoiset pietsoihin perustuvat sensorit ovat suosittuja.

Perinteisten sähkömoottorien ja hydrauliiikan tilalla tai lisäksi voidaan aktuaattoreina käyttää mm. pietso- ja muistimetalliaktuaattoreita. Elektroaktiivista polymeeria voidaan käyttää "keinolihasena" pienissä roboteissa [261].

Avaruusrobotiikka on oma vaativa alueensa, jossa pyritään kehittämään mahdollisimman autonomisia, huoltovapaita, pienen tehonkulutuksen omaavia, oman energiansa tuottavia, kuljetuksen aikana pieneen tilaan mahtuvia, kevyitä ja erilaisiin tilanteisiin ja olosuhteisiin sopeutuvia robotteja, jotka mm. kykenevät liikkumaan hyvin epätasaisessa maastossa. Tähän on kehitteillä erilaisia modulaarisia itse muotoaan muuttavia robotteja, jotka koostuisivat itsenäisistä osista, jotka kykenisivät yhdistymään erilaisiksi konfiguraatioiksi suorittamaan erilaisia tehtäviä [255, 256]. Modulaarisen robotin lisäetuna perinteisiin robotteihin on se, että viallinen moduuli voidaan hylätä tai siirtää korjattavaksi ilman, että koko robotin toiminta estyy tai häiriintyy. Eräs kaavailu planeettatutkimuksen robottien rakenteeksi on koota suuren muuntelukyvyn omaava robotti binääri-logiikalla toimivista varsin yksinkertaisista osista (ks. kuva 62) [145, 146]. Tällöin yksittäinen osa olisi halpa, ja osia voisi valmistaa sarjatuotantona. Samoja tekniikoita kuin avaruusrobotiikassa voidaan soveltaa myös muissa roboteissa, jotka joutuvat liikkumaan vaativassa ympäristössä, jonne ihminen ei pääse.



Kuva 62. Vieraalla planeetalla robotin on kyttävä ylittämään erilaisia esteitä [146].

3.8 Lääketieteen sovellukset

Lääketieteen sovelluksissa tarkkuus on erityisen tärkeää, mutta tarvittavat voimat ovat suhteellisen pieniä. Erityisvaatimuksia ovat bioyhteensopivuus ja miniatyrisointi.

Sijoittamalla joukko piezosähköisiä ultraäänilähteitä koveran kuoren sisälle voidaan tuottaa kohdistettu ultraäänipulssi, jolla rikotaan munuaiskiviä [27].

Kirurgin skalpellin terä voidaan saattaa värähtelemään terän suunnassa, mikä mahdollistaa tarkan leikkaamisen pienemmällä voimalla ja vähemmällä vaurioilla ympäröivään kudokseen [27].

Sydän- ja verisuonisairauksissa verisuoniin syntyy tukoksia. Näitä tukoksia on viime aikoina poistettu ns. pallolaajennustekniikalla, jossa verisuoneen viedään ilmapallomainen rakenne, joka laajennetaan puhaltamalla palloon ilmaa, jolloin ympäröivä verisuoni laajenee. Jotta verisuoni ei tukkeutuisi uudelleen, on NiTiNOL-muistimetallista tehty suonensisäisiä tukirakenteita (engl. stent) [262, 263]. Kyseessä on ristikkomainen rakenne, joka on kudoksen sisään vietäessä supistuneena mutta laajenee ruumiinlämmön vaikutuksesta superelastisesti lopulliseen muotoonsa.

NiTiNOL-materiaalin bioyhteensopivuus on hyvä, ja siksi siitä on olemassa monia muitakin lääketieteen sovellutuksia, esimerkiksi hammasrautoja [264].

Robotit ovat voimakkaasti tulossa ja jo tulleetkin leikkaussaleihin. Robotin tarkkuus ja kyky käsitellä pieniä objekteja auttavat leikkaamaan mahdollisimman pienin kudosaaurioin. Mm. sydän-, silmä- ja aivoleikkauksia tehdään jo robottien avulla (ks. myös kohta 3.7) [259].

3.9 Yhteenvetoa funktionaalisten materiaalien soveltamistavoista toimirakenteissa

Funktionaaliset materiaalit tarjoavat lukemattomia mahdollisuuksia erilaisten lujitemuovirakenteiden toiminnan, kestävyuden ja turvallisuuden parantamiseen. Maailmalla on tehty monia tutkimuksia, joissa lujitemuovirakenteeseen on onnistuneesti yhdistetty sensoreita ja aktuaattoreita. Valmiita kaupallisia sovelluksia on kuitenkin toistaiseksi vähän.

Potentiaalinen sovellusalue on hyvin laaja alkaen siltojen kaltaisista rakenteista erilaisiin värähteleviin koneisiin ja ajoneuvoihin ja prosessitekniikan virtaussovellutuksiin. Vaadittavat sensorit, aktuaattorit ja tekniikat ovat moniin sovelluksiin jo olemassa, tut-

kittuja ja toimiviksi havaittuja; tarvitaan vain tekniikoiden yhdistämistä ja soveltamista. Aktuaattorien ja sensorien sijoitus ja säätöohjelma joudutaan toimirakenteessa useimmiten rakentamaan tapauskohtaisesti, ja joidenkin aktuaattorien osalta tarvitaan tutkimustyötä myös aktuaattorin toiminnan karakterisointiin, koska riittävän luotettavaa tietoa ei ole saatavissa esimerkiksi muistimetalliaktuaattorien valmistajilta.

Nopeimmin tuotteistettavissa ovat erilaiset värähtelyhallintasovellutukset. Monissa tapauksissa paras vaihtoehto on passiivisen ja aktiivisen vaimennuksen yhdistäminen. Erityisen lupaava tekniikka levymäisten lujitemuovirakenteiden värähtelynvaimennukseen on aktiivinen rajoitetun viskoelastisen kerroksen vaimennus (ACLD). Värähtelynvaimennuksen toteuttaminen säätämällä liitosten jäykkyyttä ja vaimennusta esimerkiksi aktiivisen kitkaliitoksen avulla on taas hyvin potentiaalinen tekniikka suuriin ristikkotyypisiin rakenteisiin. Meluntorjunta värähtelyhallinnan kautta on myös alue, jolla on saavutettavissa hyviä tuloksia kohtuullisella panostuksella, erityisesti lujitemuovirakenteisten ajoneuvojen ja veneiden meluntorjunnassa sekä meluavien koneiden koteloinnissa.

Muodon- ja jäykkyydenhallinnalla pystyttäisiin tekemään paljon sellaista, mikä ei perinteisin tekniikoin ole mahdollista tai kannattavaa. Esimerkiksi ajoneuvojen törmäysturvallisuuden parantamisessa sekä tuulivoimaloiden tehontuoton kasvattamisessa ja käyttöiän pidentämisessä mahdollisuudet ovat suuret. Aktiivisella muodonhallinnalla voidaan saavuttaa monenlaisia etuja (esim. nopeuden lisäys, tehonkulutuksen väheneminen, ohjattavuuden paraneminen) nopeissa autoissa, veneissä, lentokoneissa jne.

Virtauksen ohjaamisessa ja rakenteen pinnan virtausominaisuuksien muuttamisessa on potentiaalia monenlaisten ongelmien ratkaisemiseen prosessitekniikassa, lentotekniikassa ja veneenrakennuksessa. Makroskooppisten sensorien ja anturien lisäksi varteenotettavia ovat myös MEMS:t eli mikroelektromekaaniset sensorit ja aktuaattorit, jotka ovat pieniä, kevyitä ja ainakin tulevaisuudessa myös halpoja.

Sensorien ja aktuaattorien sijoittaminen lujitemuovilaminaatin sisään on ongelmallista, sillä erityisesti väsyttävien kuormitusten alaisena voi sensorin tai aktuaattorin muodostama epäjatkuvuuskohta rakenteessa toimia särön ydintäjänä. Lisäksi lujitekuitujen joutuminen mutkalle pienentää laminaatin tason suuntaista puristuslujuutta merkittävästi. Näihin ongelmiin etsitään ratkaisuja useissa tutkimuksissa. Kerrostenvälisen leikkauslujuuden kasvattamisessa erilaisilla aktuaattorin tai sensorin pinnoitustekniikoilla on jo melko hyvin onnistuttukin. Toinen lähestymistapa on rakenteen itsekorjaus (self healing). Matriisivaurioita voidaan korjata korjausainekapseleilla, jotka rikkoutuessaan vapauttavat kahta komponenttia kovettumatonta matriisivainetta. Katkenneita kuituja voidaan ehkä korvata puristamalla säröpintoja yhteen esimerkiksi muistimetalliaktuaattoreilla.

Rakenteen kunnonvalvonta on usein taloudellisesti hyvinkin kannattavaa, koska se mahdollistaa korjaustoimenpiteiden oikean ajoittamisen ja mitoittamisen sekä rakenteen eliniän ennustamisen. Kuituoptiikka ja pietsokalvotekniikka ovat keskenään kilpailevia välineitä lujitemuovirakenteen kunnonvalvontaan. Hiilikuitulujitteinen lujitemuovi on materiaali, jonka kunnonvalvontaa voidaan toteuttaa myös ilman erillisiä sensoreita, hiilikuitujen sähköisten ominaisuuksien perusteella. Tällöin vältetään erillisten sensorien aiheuttama särön ydintyminen.

Erityisen tärkeä ja haastava alue lujitemuovirakenteiden kunnonvalvonnan kannalta on kerroslevyjen ydinaineen vaurioiden havaitseminen. Tähän voitaisiin käyttää monenlaisia sensoreita, mutta onnistuneen konstruktion luominen vaatii vielä paljon tutkimusta. Toinen tärkeä kunnonvalvontasovellutusalue on lujitemuovirakenteen valmistusprosessissa syntyvien jäännösjännitysten, säröjen ym. valvonta. Tähän on jo onnistuneesti käytetty kuituoptiikkaa.

4. Toimirakenteiden teknologiat ja niiden kehitystrendit

Ismo Vessonen & Merja Sippola

Lyhenteet

IR	Infra Red
RF	Radio Frequency
μ C	Micro Controller
DSP	Digital Signal Processing
RFID	Radio Frequency Identification
WLAN	Wireless Local Area Network
ICT	Information and Communication Technology
CAD	Computer Aided Design
FEM	Finite Element Method
CAE	Computer Aided Engineering

4.1 Toimirakenne – älykäs kone

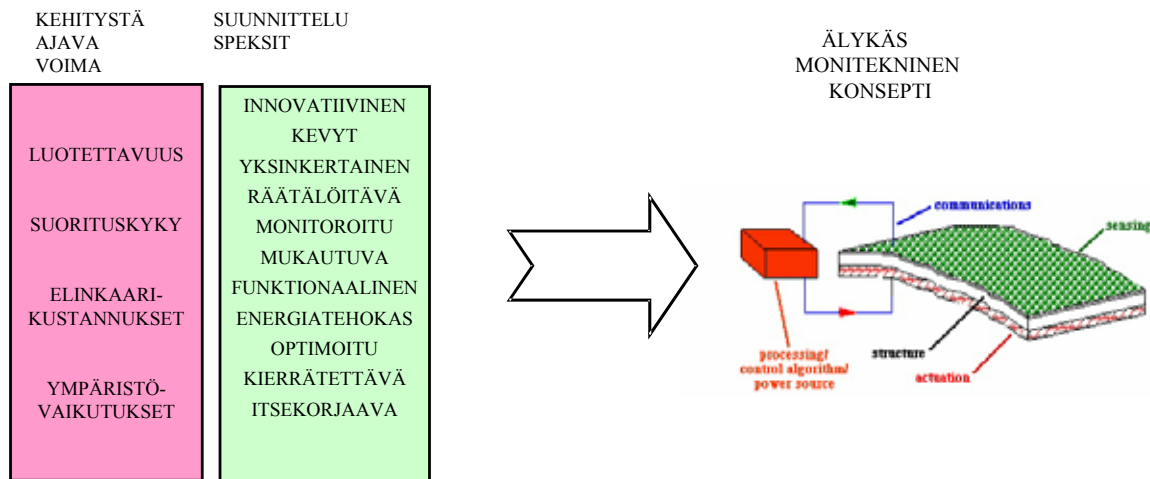
Älykäs kone tai toimirakenne (kuva 63) on järjestelmä, jolla on suorituskykyinen toiminnallisuus varsinaisessa perustehtävässään, mutta joka sen lisäksi omaa havainnointi-, päättely-, reagointi- ja kommunikointikyvyn. Havainnointikyvyn (anturit, mittaus, monitorointi) ja päättelykyvyn (tiedonkäsittely, diagnostiikka) avulla järjestelmä seuraa ja on jatkuvasti tietoinen itsensä ja ympäristönsä tilasta. Reagointikyvyn (aktuaattorien, funktionaalisten materiaalien, ohjauksen, säädön) avulla järjestelmä sopeutuu muuttuviin ympäristö- ja käyttöolosuhteisiin ja suorittaa mahdollisesti itsenäisiä lokaaleja vaurioiden korjaustoimenpiteitä. Kommunikointikyvyn avulla järjestelmän toimintaan liittyvät tiedot viestitään käyttäjälle ja muille intressiryhmille (omistaja, suunnittelija, huolto jne.).

Älykäs toimirakenne pyrkii itsenäisesti adaptoitumaan eri ympäristö- ja käyttöolosuhteisiin, mukaan lukien myös odottamattomat poikkeustilanteet, ja siten toimimaan optimaalisesti kaikissa eteen tulevissa käyttötilanteissa.

Älykkyyden integroinnilla koneiden ja kuljetusvälineiden rakenteisiin tavoitellaan erityisesti suorituskyvyn, tuottavuuden, luotettavuuden ja turvallisuuden kasvattamista ja samanaikaisesti pyritään minimoimaan elinkaarikustannukset ja tuotteen negatiiviset ympäristövaikutukset.

Termi toimirakenne korostaa erityisesti aktiivisen reagoinnin eli toimilaitte (aktuaattori) -ominaisuuden roolia, joka perinteisen lujusopin ja rakenteiden mekaniikan näkö-

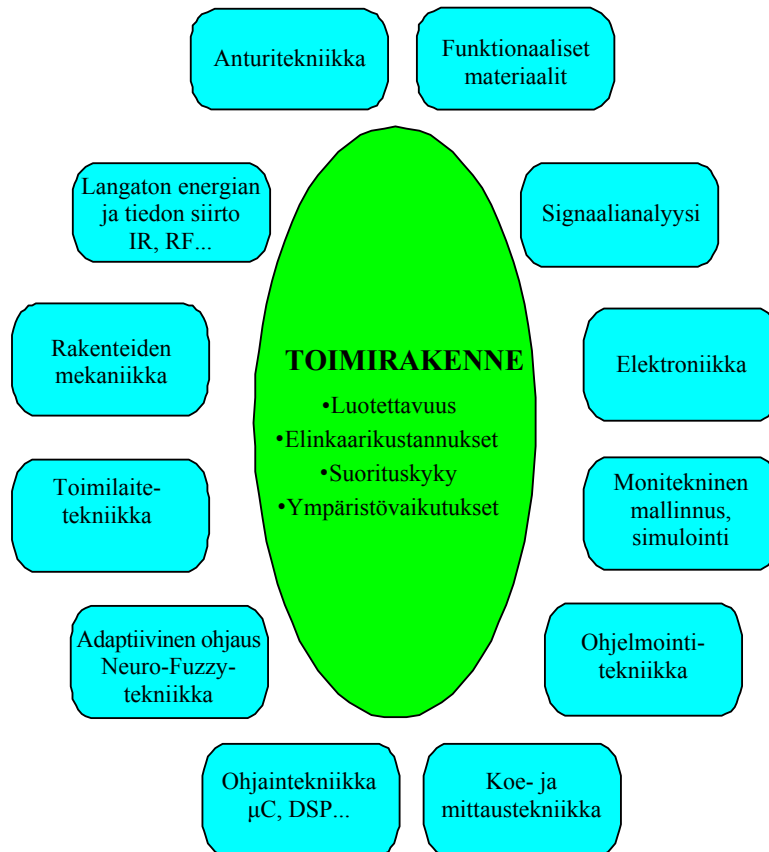
kulmasta uutena asiana tarjoaa merkittäviä uusia mahdollisuuksia ja samalla haasteita käytännön rakenneratkaisujen toteutukseen. Tulevaisuuden toimirakenteissa funktionaalisten materiaalien avulla toteutetut jakautuneet sensorit ja aktuaattorit ovat merkittävästi osalta korvanneet diskreettejä ratkaisuja. Kompaktit, langattomat, hajautetut ohjainratkaisut ohjaavat ja säätelevät itsenäistä funktionaalisuutta omaavien osajärjestelmien toimintaa sekä hoitavat toimintainformaation ja ohjaukaskäskyjen välittämisen edellyttämää tietoliikennettä. Kaikki tämä toiminnallisuus on tarkoituksenmukaisella tavalla sulautettu suorituskykyiseksi kompaktiksi kokonaisuudeksi siten, että rakenteen massa ja energiantarve koko elinkaaren aikana minimoituvat.



Kuva 63. Toimirakenteiden kehityksen lähtökohdat ja konsepti.

Parhaimmillaan toimirakenneteknologia tarjoaa mahdollisuuden lähestyä kone- tai kuljetusvälinerakenteen suunnittelua aivan uudesta näkökulmasta, joka mahdollistaa uudenlaisten innovatiivisten rakennekonseptien käytön konstruktiolta vaaditun funktionaalisuuden toteuttamiseksi. Älyratkaisujen avulla voidaan tavoitella esimerkiksi rakenteen kuormankantokyvyn ja informaationsiällön optimaalisempaa hyödyntämistä, materiaaltarpeen minimoimista ("äly korvaa rautaa"), monimutkaisen mekaanisen rakenteen yksinkertaistamista aktiivisten materiaalien avulla jne.

Tällaisen älykkään rakenteen luomiseen (ideointiin, suunnitteluun, toteuttamiseen, testaukseen ja elinkaaren hallintaan) tarvitaan suuri joukko erilaisia tekniikoita (kuva 64), joiden tehokas ja tuloksellinen soveltaminen vaatii ehdottomasti eri alojen asiantuntijoiden yhteistyötä. Kaikkia tarvittavia tekniikan osa-alueita ei yksittäinen henkilö voi hallita. Niinpä toimirakenteen luomisessa tarvitaan eri alojen insinööriosamisten yhdistämistä, konkreettisen tekemisen kautta muotoutuvaa yhteistyötä. Käsillä oleva julkaisu on laadittu osana tällaista yhteistyöprojektia, jossa VTT, TKK ja Oulun Yliopisto pyrkivät juuri tällaisen monialayhteistyön kautta luomaan uutta generistä teknologiaosaamista älykkäiden rakenteiden ja koneiden alalle. Tämä "Toimirakenteet"-projekti on osa Tekesin MASINA – Koneenrakennuksen teknologia -ohjelmaa 2002–2007.



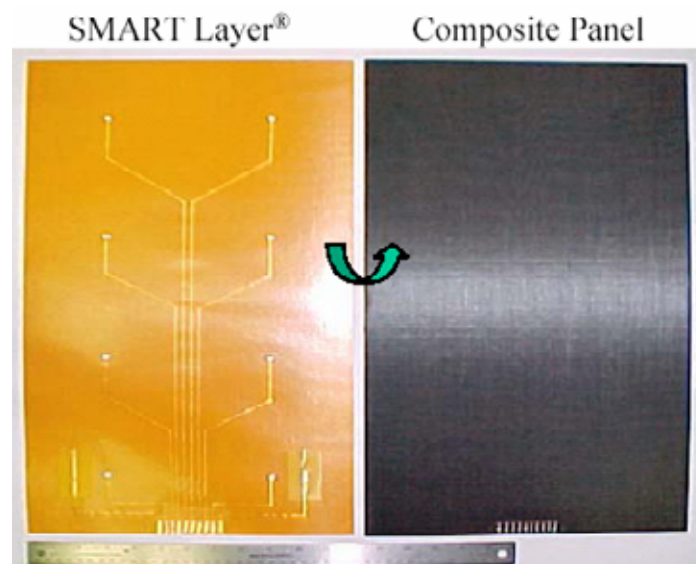
Kuva 64. Toimirakenteen luomiseen tarvittavia tekniikoita.

Seuraavassa on esitetty katsaus toimirakenneteknologian eri osa-alueiden kehitystrendeihin ja haasteisiin. Esitetyt haasteet kuvaavat erityisesti pidemmän aikavälin kehitystavoitteita. Käytännössä toimivien sovellusten kehittäminen lyhyemmällä tähtäimellä on täysin mahdollista ja realistista, vaikeivät nämä usein varsin kaukaisiltakin tuntuvat tavoitteet vielä tätä päivää olisikaan.

4.2 Anturit ja mittaustiedon käsittely

Älykkäiden rakenteiden toteutuksen perusedellytyksenä on kerätä mittaustietoa kuormituksista, sekä rakenteen ja sen ympäristön tilasta, jotta päätökset tilanteeseen sopivasta aktiivisesta reagoinnista voitaisiin tehdä. Antureiden tuottama mittauksen raakadata työstetään päätöksenteon edellyttämään muotoon hyödyntämällä modernin signaalianalyysin ja konediagnostiikan menetelmiä. Monissa sovelluksissa korostuu erityisesti tarve identifioida rakenneteknisten suureiden (venymän, paineen, siirtymän, kiihtyvyyden, vaurion jne.) jakautumaa suhteellisen laajalla alueella. Tämän toteuttamiseen tarvitaan sulautettavaa halpaa, langatonta ja energiatehokasta mittaustekniikkaa. Erityisen tärkeää olisi pyrkiä suunnittelemaan anturointi, tiedonsiirto, mittaustiedon käsittely ja lopputulosten kommunikointi eteenpäin yhtenäisenä kokonaisuutena, jolloin kerättävä arvokas informaatio voitaisiin hyödyntää maksimaalisesti aina tulevien tuotesukupolvien suunnittelua ja yrityksen ylemmän tason ohjausjärjestelmiä myöden. Älykkäiden rakenteiden anturi- ja mittausteknologian kehittämiseen liittyy mm. seuraavia haasteita:

- automaattisesti konfiguroitavien, nopeaa paikallista älykkyyttä omaavien, sulautettujen antureiden verkoston toteuttaminen
- helposti toteutettava automaattinen kalibrointi + toimialueen vaihto, mittaus-tiedon laatu tai epävarmuus tiedon käsittelyssä
- antureiden välinen kommunikointi
- virtuaaliset ohjelmistoilla toteutetut anturit, "soft sensors"
- mittaus-tiedon jalostaminen sensoritiedon fuusioalgoritmien avulla, tietämyksen tuottaminen suuresta datamäärästä
- reaaliaikainen anturitiedon käsittely
- nopeat prosessorit ja kenttäväylät
- robustit kommunikointiarkkitehtuurit
- langattomuuden ja liikkuvuuden mahdollistava anturointi
- RFID, IR, Bluetooth, WLAN, konenäkö
- käyttöenergian generointi: langaton siirto, power harvesting
- antureiden ja toimilaitteiden/funktionaalisten materiaalien integrointi (kuva 65)
- halpa, ympäristösietoinen ja standardisoitu plug & play -anturitekniikka
- antureiden energiankulutuksen ja vahvistintarpeen minimointi (multiplexing).



Kuva 65. Anturiverkon integrointi komposiittipaneelin sisään [265].

4.3 Toimilaitteet ja rakennekonseptit

Funktionaaliset materiaalit ovat toimirakenteiden toteutuksessa eräs tärkeimmistä mahdollistavista teknologioista. Parhaimmillaan kaikki adaptoitumiseen tarvittavat piirteet – anturointi, toimilaite ja ohjaus – voidaan liittää yhteen ja samaan materiaaliin, jolloin voidaan puhua todellisesta älykkästä materiaalista. Näitä varsinaisia älykkäitä materiaaleja on olemassa varsin harvoja (esim. valoherkkä lasi), ja useimpia tässä yhteydessä käsiteltäviä materiaaleja voidaankin kutsua lähinnä funktionaaliseksi materiaaleiksi, jotka kykenevät suorittamaan tietyn toiminnon (venymän, viskositeetin muutoksen, valon läpäisykyvyn muutoksen jne.) ulkoisen herätteen (sähkö- tai magneettikentän, valaistuksen, lämpötilan jne.) vaikutuksesta. Yleisessä tapauksessa voidaankin sanoa, että puhtaasti älykkääseen materiaaliin perustuva rakenneäly on erikoistapaus ja useimmiten käytännön ratkaisuja haetaan yhdistämällä soveltuvan funktionaalisen materiaalin toimilaitteominaisuudet sulautettujen antureiden avulla toteutettuihin mittauksiin ja kompaktiin säätö- ja ohjaustekniikkaan.

Toimirakenteisiin liittyen on usein varsin hedelmällistä käyttää kehitettävien ratkaisujen innoittajana luonnon vuosituhansien kuluessa muovaamia eläviä olioita (biomimetics) ja niissä toteutuvaa mukautuvuutta ulkoisiin olosuhteisiin, ikääntymiseen, vaurioitumiseen jne. Esimerkkinä tällaisesta lähestymistavasta on mm. rakenteen mekaanisen impedanssin hallittu muuttaminen (puoliaktiivinen jäykkyys ja/tai vaimennusmuutos), jota erityisesti luonto on soveltanut elävien olentojen rakenteissa. Ihminen voi esimerkiksi voimakkaasti heilahtelevassa ajoneuvossa nopeasti muuttaa niskalihastensa avulla päänsä kytkentäjäykkyyttä muuhun kehoon nähden ja näin estää pään heilahtelun kasvamisen vaurioita aiheuttavalle tasolle.

Toimirakenteiden tulevassa kehityksessä tulee korostumaan erityisesti keveillä rakenneratkaisuilla ja energiatehokkaasti toteutettu funktionaalisuus. On varsin todennäköistä, että erityisesti räätälöitävien yhdistelmä rakenteiden merkitys tulee korostumaan, sillä räätälöitävyys mahdollistaa erilaisten aktiivisten sensori- tai aktuaattoritoimintoja sisältävien rakenneosien, elementtien, kerrosten, pintojen jne. sulauttamisen rakenteeseen. Lisäksi näköpiirissä on, että erilaisilla aktiivisilla polymeereilla tulee olemaan merkittävä rooli toimirakenteiden edellyttämien sensori- tai aktuaattoritoimintojen toteutuksessa.

Toimilaiteteknologiaan liittyy mm. seuraavia kehityshaasteita:

- integroitujen, nopeiden, sähköisten, plug & play toimilaitteiden kehittäminen
- trendi on kohti "all electric" -ratkaisuja
- funktionaalisten materiaalien ominaisuudet sovellusten edellyttämälle tasolle (kuva 66)
- ympäristösietoiset, modulaariset, itsevirittyvät ja -diagnostisoivat toimilaitteet
- ohjaamiseen tarvittava tehoelektronikka sovellusten edellyttämälle tasolle

- toimilaitteiden energiatehokkuuden kehittäminen, power harvesting
- halpa toteutus, kompakti rakenne
- toimilaitteiden massan, energiankulutuksen ja vahvistintarpeen minimointi
- uudet älykkäät rakennekonseptit
- innovatiiviset rakenneratkaisut ja opin ammentaminen luonnon rakenteista
- Mahdollisimman rajoitetulla toimenpiteellä on mahdollisimman suuri vaikutus.
- Miten aktiivisuus voidaan sulauttaa rakenteen sisään, pintaan tai modulaarisen rakenteen liitoksiin?
- funktionaalinen materiaali + yhdistelmä rakenne tai liitos
- aistivien ja muotoaan muuttavien pintojen toteutus.



Kuva 66. Kuormitusten aiheuttaman taipuman aktiivinen oikaiseminen muistimetallilankojen avulla. VTT Tuotteet ja tuotanto, patenttihakemus FI 20045053.

4.4 Päättely-, säätö- ja ohjausjärjestelmät

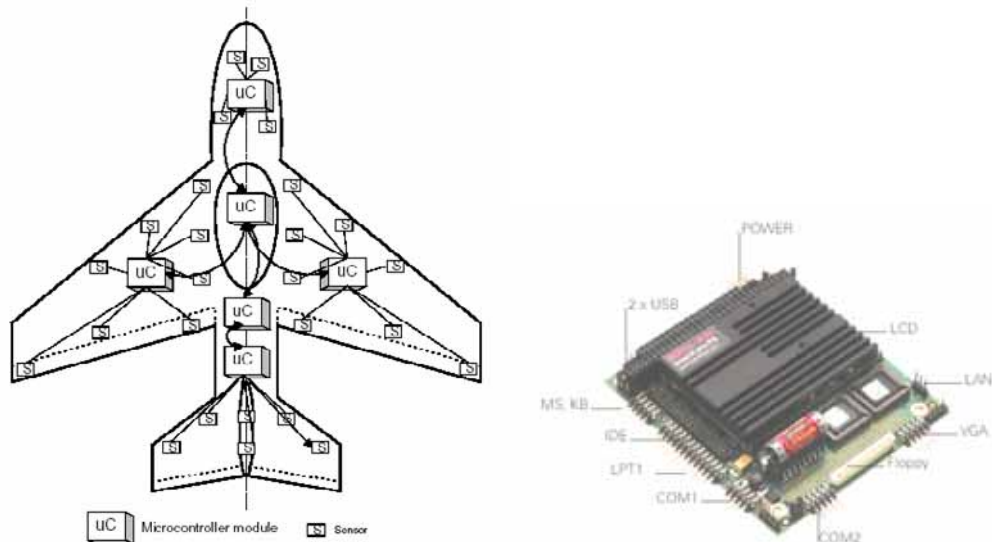
Aktiivisiin rakenteisiin liittyvä älykkyys keskittyy tyypillisesti säätö- ja ohjausjärjestelmään ja siellä erityisesti ohjelmistotekniikan avulla toteutettuihin signaalianalyysi-, diagnostiikka-, päättely-, säätö- ja päätöksentekoa algoritmeihin. Trendinä on, että kokonaisjärjestelmän ohjaukseen liittyviä toimenpiteitä tehdään lähempänä ohjattavaa prosessia, mikä puolestaan johtaa ohjausjärjestelmien hajauttamiseen. Prosessia ei enää ohjaakaan enää yksi keskitetty ohjausyksikkö, vaan järjestelmän tiedon käsittelyä ja "älykkyyttä" hajautetaan tapauskohtaisesti tarkoituksenmukaisella tavalla. Esimerkkinä tästä ovat edellisissä kohdissa mainitut paikallista älykkyyttä sisältävät anturi- ja toimilaittejärjestelmät ja niiden yhdistelmät, joissa osa laskenta-, päättely- ja ohjaustoiminnoista suoritetaan laitteiden paikallisella tasolla. Hajautettu ohjaus vaatii tuekseen tätä varten suunnitellut ohjausstrategiat sekä tarkoitukseen sopivat halvat, kompaktit, modulaariset ja kenttäväyläliitännöillä varustetut plug & play -ohjaimet, jotka voidaan tarpeen mu-

kaan konfiguroida ohjaamaan sensoriverkon tiedonkeruuta, toimilaitteohjausta, kokonaisen aktiivisen osajärjestelmän toimintaa, useamman osajärjestelmän yhteistoimintaa jne.

Aktiivisten rakenteiden säädön ja ohjauksen suunnittelun kannalta keskeinen ominaisuus on järjestelmän adaptiivisuus siten, että optimaalinen toimintatila voidaan löytää huolimatta systeemissä ajanoloon väistämättä tapahtuvista muutoksista. Yksinkertaisimmillaan tällainen mukautuminen on ennalta hyvin määriteltyjä toimintaparametrien muutoksia ennalta määrättyjen ehtojen täytyessä. Todellinen älykäs adaptoituminen edellyttää kuitenkin ohjauksen kykyä oppia eteen tulevista käyttötilanteista ja kykyä päätellä opitusta aineistosta optimaalisia ja turvallisia tapoja selvittää mm. odottamattomista tapahtumista ja äärikuormitustilanteista.

Toimirakenteiden säätö- ja ohjausjärjestelmien kehittämiseen liittyviä haasteita voidaan kuvata siis seuraavasti:

- yleiskäyttöisten, hajautettujen, modulaaristen plug & play -ohjaimien toteuttaminen
- mikrokontrollerit, PC-ohjaimet, DSP, ohjelmoitavat logiikat jne.
- hajautetut, halvat, kompaktit, keskenään verkotetut ohjaimet (kuva 67)
- nopea reaaliaikainen tiedonkäsittely (mittaustiedon taajuussisältö vähintään useita kilohertsejä), liityntä nopeaan kenttäväylään
- rakenteisiin integroidut ohjaimet
- modulaarisen, hajautetun, adaptiivisen ja oppivan ohjauksen toteuttaminen
- systeemin dynamiikan on-line-identifiointimenetelmien kehittäminen
- ennakkotietoon ja mittauksiin perustuen itseviritteiset säätimet
- modulaariset, vikasietoiset, paikallisesti virittyvät tai adaptoituvat säätimet
- käytönaikaisesti adaptoituvan ja oppivan ohjauksen toteutus
- virtuaalimallien hyödyntäminen ohjauksen suunnittelussa, toteutuksessa ja käytössä
- käyttäjäkokemusta hyödyntävä ohjaus (esim. sumea säätö).



Kuva 67. a) Hajautetun ohjausjärjestelmän arkkitehtuuri. b) PC-104-ohjainkortti.

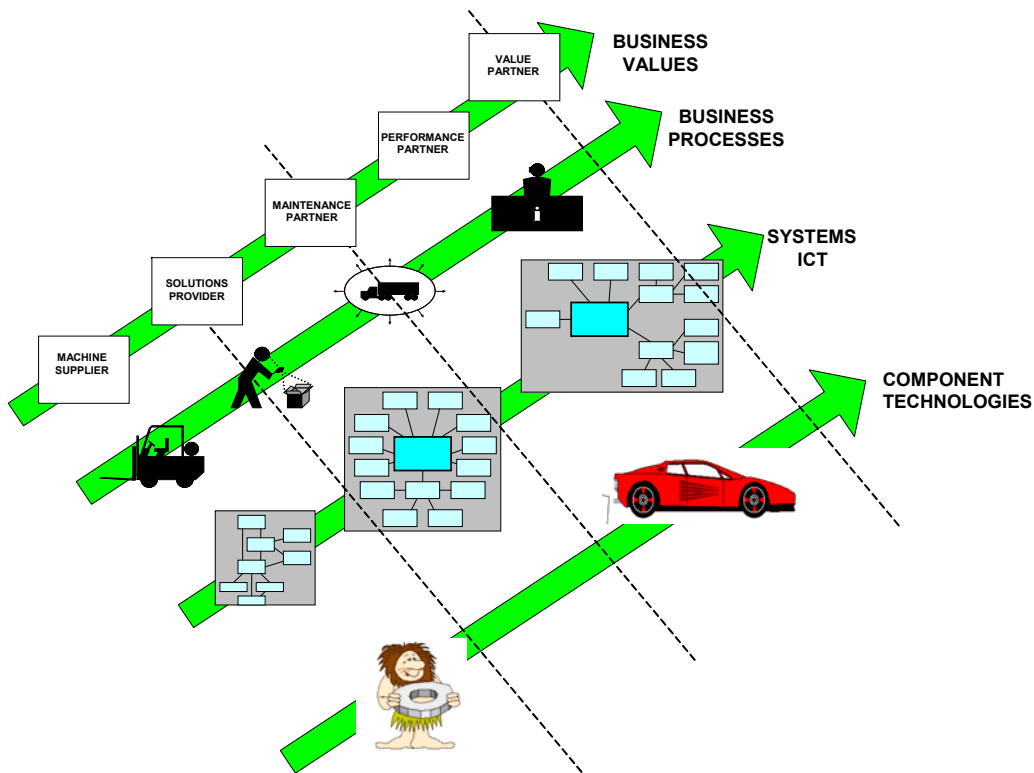
4.5 Kommunikaatio

Toimirakenteille tyypillisessä sovelluksessa älykäs rakenneosa suorittaa itsenäisesti varsin reaaliaikaorientoitunutta mittaus- ja ohjaustehtävää, joka tavallisimmin liittyy äänen, värähtelyn, kestävyys- tai geometrisen muodon hallintaan. Erityisesti pitkälle adaptoitumis- ja oppimiskykyisissä ratkaisuissa aktiivisen järjestelmän ei välttämättä tarvitse kommunikoida kovinkaan intensiivisesti ympäröivän maailman kanssa. Konejärjestelmän ylempien hierarkiatasojen ohjauskäskyjen välitys aktiiviselle osajärjestelmälle ja jonkinlaisen järjestelmän toimintaa käsittelevien raporttien kommunikointi konejärjestelmätasolle on kuitenkin minimitasollakin välttämätöntä.

Toisaalta aktiivisen toimirakennejärjestelmän operointi edellyttää joskus hyvinkin intensiivisiä mittauksia kuormituksista, ympäristöolosuhteista ja rakenteen vasteista. Tämä tieto on parhaimmillaan varsin monipuolisesti hyödynnettävissä paikallisen aktiivisen ohjauksen lisäksi sellaisenaan tai pidemmälle jalostettuna informaationa tai tietämyksenä järjestelmän tilan monitorointiin ja diagnostiikkaan sekä järjestelmätason ohjaukseen. Älykkäiden konejärjestelmien perusajatukseen kuuluu laajojen mittausjärjestelmien tuottaman perusdatan ja siitä pidemmälle jalostetun informaation laajamittainen hyödyntäminen järjestelmien elinkaaren kaikissa vaiheissa. Onnistuneiden sovellusten edellytyksenä on tämän informaation kommunikointi oikeaan aikaan ja paikkaan sekä oikeassa muodossa kaikille sitä tarvitseville käyttäjäryhmille. Järjestelmän kaikkien tasojen rakenne- tai komponenttitasolta kone- konejärjestelmä- ja tuotantolaitostasojen kautta aina yritystason ohjaus- ja päätöksentekojärjestelmiin saakka pitää tukea informaation tehokasta kommunikointia ja hyödyntämistä sekä tasojen sisällä horisontaalisesti että tasojen välillä vertikaalisesti. Mittaustieto yhdistettynä käyttäjä-

kokemukseen sekä muista lähteistä saatavaan tietoon on myös itsessään tuote, joka mahdollistaa aivan uudentyyppisiä palvelukonsepteja (kone diagnostiikka, troubleshooting, huolto ja ylläpidon suunnittelu, uusien tuotesukupolvien suunnittelu jne.), jotka mahdollisesti tulevat olennaisesti muuttamaan eri alojen liiketoimintamalleja.

Älykkäiden tuotteiden ja rakenteiden ominaisuuksien ja informaation täysimääräinen hyödyntäminen edellyttää rakenne- tai komponentti-, tietojärjestelmä- ja liiketoimintatason älyratkaisujen sekä tähän liittyvän kommunikaatioteknologian koherenttia kehitystä ja käyttöönottoa [266].



Kuva 68. Älykkäiden tuotteiden ja rakenteiden ominaisuuksien ja informaation täysimääräinen hyödyntäminen.

4.6 Mallinnus, simulointi, testaus ja järjestelmätason yhteensovittaminen

Lisättäessä kone- ja kuljetusvälinerakenteisiin säätö- ja ohjaustekniikan keinoin toteutettua oppivaa mukautumiskykyä on väistämättä seurauksena konstruktioiden moniteknistyminen. Tämä kehitys ei välttämättä suoraan merkitse tuotteiden monimutkaisuudesta ja valmistuskustannusten nousua. Monissa tapauksissa älykkäällä järjestelmällä tavoitellaan paremman suorituskyvyn lisäksi mekaanisten rakenteiden yksinkertaistamista, materiaali-, työ- ja ylläpitokustannusten eli elinkaarikustannusten säästöjä, jotka oikeuttavat suunnittelutyöltään perinteisiä toteutuksia työläämmän konstruktiovaihtoehdon valinnan.

Monitekniisyyden myötä älykkäiden toimirakenteiden suunnittelussa erityisesti kysymykseksi nousee toteutuksen turvallisuuden ja luotettavuuden varmistaminen. Suunnittelu-prosessin yhteydessä yhteen sovitetaan oletettujen kuormitusten, mekaanisen rakenteen, mittausten, funktionaalisten materiaali-järjestelmien sekä säädön ja ohjauksen muodostama kokonaisuus. Luotettavuusvaatimuksen korostumisesta johtuen rakenteen peruskuormankantokyvyn jättäminen "älykkyyden" varaan onkin sovellus, jota tuskin tullaan aivan heti näkemään. Sen sijaan käyttömukavuutta ja kestoikää lisäävinä perusfunktionaalisuutta täydentävinä sovelluksina äänen, värähtelyn ja kestävyuden älykäs ja aktiivinen hallinta ovat varsin potentiaalisia. Lisäksi tietyissä sovelluksissa voidaan saada aikaan uutta funktionaalisuutta rakenteen muotoa muuttamalla, joka on mahdollista toteuttaa aktiivisten toimirakenteiden avulla.

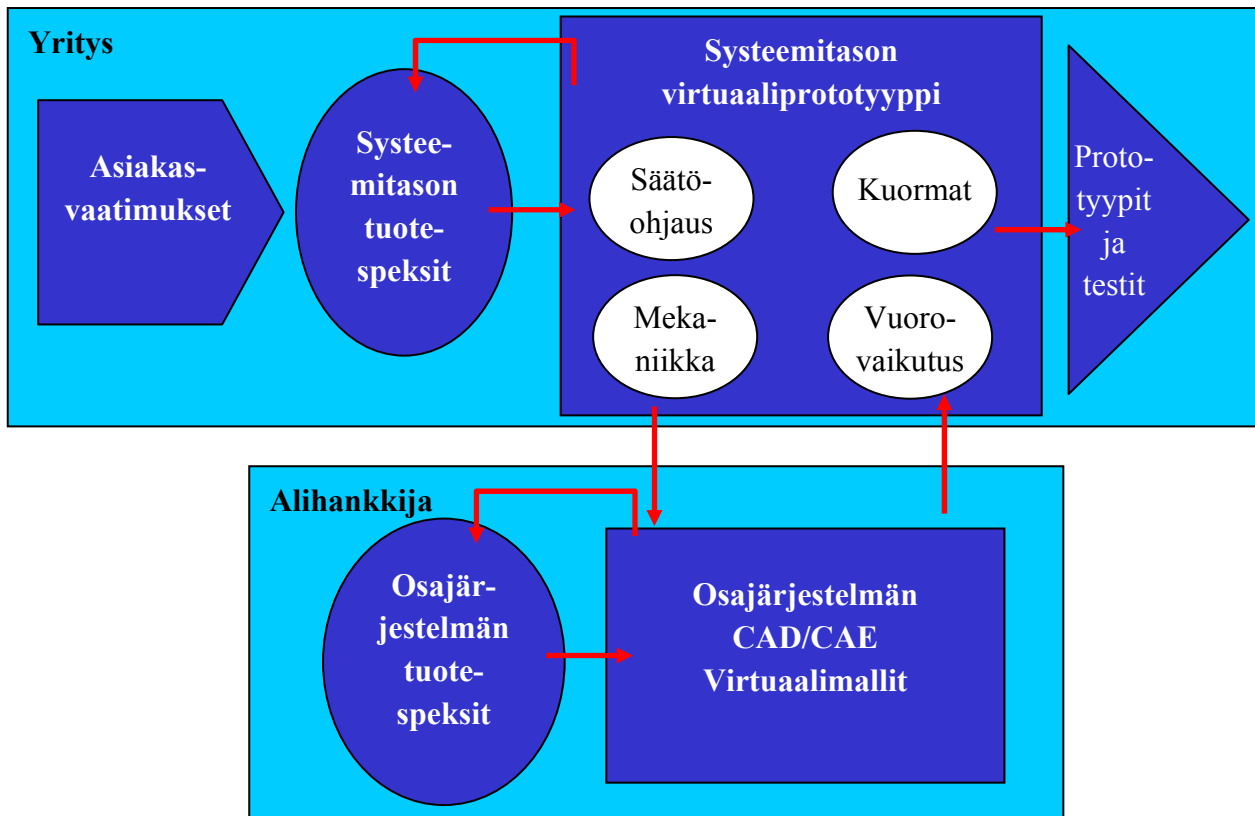
Tällaisen monitekniisen kokonaisuuden järjestelmätason luotettavan toiminnan varmistava suunnittelu vaatii toteutuakseen kaikkien yhteen sovitettavien osa-alueiden kuvaukseen kykenevän mallinnus- ja simulointiympäristön. Toimirakenteiden suunnittelun yhteydessä joudutaan mallintamaan mekaanisten järjestelmien dynaamista käyttäytymistä, jolloin sopivan perustan simulointijärjestelmälle muodostavat epälineaarisen monikappaledynamiikan aikataason simulointiin soveltuva ohjelmisto täydennettynä CAD-järjestelmien tuottamalla osakappaleinformaatiolla sekä FE-ohjelmistojen tuottamalla kuvauksella rakenteiden joustavuudesta. FEM-ohjelmia voidaan tapauskohtaisesti käyttää myös sellaisenaan toimirakenteiden suunnittelun apuvälineinä. Keskeisenä suunnittelun osa-alueena on säädön ja ohjauksen suunnittelu, johon tarkoitukseen on saatavissa erikoistuneita simulointiympäristöjä, jotka nykyisellään voidaan linkittää käytettäväksi yhtäaikaaisesti mekaniikan simuloinnin kanssa. Rajoitetummin säätöratkaisuja voidaan tutkia myös ohjelmoimalla säätimet monikappaledynamiikka- tai FE-ohjelmiston sisään. Erityiskysymyksen älyrakennusratkaisujen suunnittelussa muodostavat erilaiset vuorovaikutusilmiöt (fluidi-rakenne, sähkömekaaninen vuorovaikutus, virtaus-rakenne, maaperä-rakenne), joiden käsittelyyn on olemassa omia erityisohjelmistojaan, tai ilmiöiden kuvaukset voidaan ohjelmoida osaksi em. yleisempiä simulointiympäristöjä. Lisäksi kysymykseen tulevat linkit erilaisiin spesialisoituneisiin suunnitteluympäristöihin (sähkö-järjestelmien simulointiin, prosessisimulointiin jne.).

Vaikka älykkäiden toimirakenteiden kokonaisjärjestelmän suunnittelu ja tapahtuukin pääasiassa simulointimallien avulla virtuaalimaailmassa, tarve fyysiseen testaukseen laskentamalleissa käytettyjen mallinnusperiaatteiden ja oletusten varmentamiseksi tulee jossakin muodossa aina olemaan olemassa. Tässä varmennustyössä on tärkeää pitää huolta simulointi- ja testaustilanteiden yhteismitallisuudesta.

Toimirakenteiden toteutukseen tarvittavia hardware-teknologioita on maailmalla kehitetty useita, ja niitä on jo osittain kaupallisesti saatavissa. Hieman yleistäen voidaan sanoa, että toimirakenteiden toteuttamiseen tarvittavat teknologiat ovat merkittävässä määrin jo saatavilla. Sovellusten toteuttaminen on yhtäältä kiinni teknologian ominaisuuksien kehittämisestä sovellusten edellyttämälle tasolle. Erityisesti on kuitenkin ky-

symys kokonaisvaltaisesta integroivasta osaamisesta, jonka avulla teknologiapalasia kootaan toimiva kokonaisuus, ja siitä, miten tähän liittyvä suunnittelu- testaus- ja toteutusprosessi hallitaan.

Keskeistä on tehokkaiden integrointisuunnittelun työkalujen aikaansaaminen esimerkiksi yhdistämällä eri tarkoitukseen rakennettuja simulointiympäristöjä tai luomalla kokonaan uusia kokonaisvaltaisempia simulointiympäristöjä, joiden sellaistenkin kehitystyö on maailmalla käynnissä. Kiihtyvässä tuotekehitystahdissa innovatiiviset ja toteutuskelpoiset ratkaisut on löydettävä nopeasti ja kehitettävä luotettavalle tasolle minimoidulla fyysisten prototyyppien määrällä. Systemaattinen ja tehokas simulointipohjaisen suunnittelun hyödyntäminen tuote-, tuotannon- ja käytön suunnittelussa on avain hallittuun älykkäiden rakenneratkaisujen käyttöönottoon. Simulointipohjaisen suunnittelun prosessi verkottuneessa toimintaympäristössä esitetään kuvassa 69.



Kuva 69. Simulointipohjainen älytuotteen suunnitteluprosessi verkottuneessa ympäristössä [267].

5. Pietsosähköisten materiaalien FEM-mallinnus ABAQUS-ohjelmalla

Kim Calonius, Antti Timperi & Otso Cronvall

Symbolit

σ_{ij}	jännityskomponentti
D_{ijkl}^E	materiaalin jäykkyudet
φ	sähköinen potentiaali
q_i	sähkövuovektorin komponentti (tai sähköinen siirros) materiaalin i-suunnassa
e_{ijk}^φ	pietsosähköinen jännityskytkentä
d_{ijk}^φ	pietsosähköinen jännityskytkentä
g_{ijk}^φ	pietsosähköinen jännityskytkentä
ε_{jk}	pienen venymien teorian mukainen venymäkomponentti
D_{ij}^φ	materiaalin dielektrinen matriisi
E_i	sähköisen potentiaalin gradientti (sähkökenttä) i-suunnassa
N	interpolaatiofunktio
B	interpolaatiofunktion derivaatta
M^{MN}	massamatriisi
K_{uu}^{MN}	siirtymien jäykkyysmatriisi
$K_{\varphi\varphi}^{MN}$	dielektrinen jäykkyysmatriisi
$K_{\varphi u}^{MN}$	pietsosähköinen kytkentämatriisi
P^M	mekaaninen voimavektori
Q^M	sähköinen varausvektori

Lyhenteet

FEM	Finite Element Method (elementtimenetelmä)
UEL	user element – ABAQUS-ohjelman käyttäjäalirutiini
UEXPAN	ABAQUS-ohjelman käyttäjäalirutiini
UMAT	user material – ABAQUS-ohjelman käyttäjäalirutiini
URDFIL	ABAQUS-ohjelman käyttäjäalirutiini

5.1 Yleistä

Jännityksen ja sähkökentän kytkentää materiaalissa kutsutaan pietsosähköiseksi vaikutukseksi. Tällöin sähkökenttä saa aikaan venymää materiaalissa ja päinvastoin. ABAQUS/Standard-elementtimenetelmäohjelmalla voidaan ratkaista täysin kytketty pietsosähköinen tehtävä. Siinä käytetyissä elementeissä ovat solmupistemuuttujina sekä siirtymävapausasteet että sähköinen potentiaali.

Kirjallisuudesta löytyy paljon esimerkkejä, joissa tutkitaan pietsosähköisen materiaalin käyttöä sensorina tai aktuaattorina rakenteessa. Tapausta on tutkittu kokein ja analyttisesti laskemalla, mutta myös numeerisesti mallintamalla. Elementtimenetelmä on luonnollinen valinta numeerisiin rakenneanalyysiin, mutta harvassa kaupallisessa FEM-ohjelmassa on valmista mahdollisuutta aktiiviseen säätöön pietsoilla tai muillakaan funktionaalisilla materiaaleilla. Vasta viime vuosina täyden sähkömekaanisen kytkennän mahdollistava pietsosähköinen materiaalimalli on liitetty näihin ohjelmiin. Aiemmin ilmiötä mallinnettiin käyttäen hyväksi analogiaa lämpölaajenemisen kanssa. Lin ja Abatan [268] ovat tutkineet kahden tunnetun ohjelmiston, ANSYS (Swanson Inc.) ja ABAQUS (Abaqus Inc.), soveltuvuutta pietsosähköisiin ongelmien ratkaisuun. Tutkimuksen mukaan kummankin koodin antamat tulokset vastasivat hyväksi todettujen analyttisten metodien antamia tuloksia. Kyseessä oli ABAQUS-ohjelman versio 5.2 (1993) [268].

Tässä luvussa kerrotaan ABAQUS/Standard-ohjelman version 6.3-1 mahdollisuudet pietsosähköisten materiaalien mallinnukseen ja lopuksi vielä esitetään, kuinka aktiivinen säätö voidaan toteuttaa käyttäjän koodaamalla alirutiineilla. Osassa tekstiä oletetaan, että lukija tuntee vähintäänkin pintapuolisesti ohjelman. Tarkoituksena onkin, että tämän luvun avulla lukija pystyy ratkaisemaan pietsosähköisen tehtävän ABAQUS-ohjelmalla.

5.2 Konstitutiivinen malli

Pietsosähköistä vaikutusta kuvaavat mekaanisen tasapainotilan ja sähkövuon säilymisyyhtälön yhdistävät konstitutiiviset perusyhtälöt. ABAQUS approksimoi pietsosähköisen materiaalin käyttäytymisen olevan lineaarista. Materiaalimallissa sähköinen vaste koostuu pietsosähköisestä ja dielektrisestä vaikutuksesta. Ikedan (270) mukaan konstitutiiviset perusyhtälöt voidaan esittää kolmessa eri muodossa:

e-muoto:

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl}^E \varepsilon_{jk} - e_{mij}^\varphi E_m \quad (1)$$

$$q_i = e_{ijk}^\varphi \varepsilon_{jk} - D_{ij}^{\varphi(\varepsilon)} E_j, \quad (2)$$

missä

σ_{ij} on jännityskomponentti

D_{ijkl}^E materiaalin jäykkyydet

φ sähköinen potentiaali

q_i sähkövuovektorin komponentti (tai sähköinen siirros) materiaalin i-suunnassa

e_{ijk}^φ pietsosähköinen jännityskytkentä

ε_{jk} pienten venymien teorian mukainen venymäkomponentti

D_{ij}^φ materiaalin dielektrinen matriisi

E_i sähköisen potentiaalin gradientti (sähkökenttä) i-suunnassa.

Kun e_{ijk}^φ on nolla, yhtälöitä yhdistävät termit häviävät ja jäljelle jää kaksi perustapauksen yhtälöä.

d-muoto:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}^E \sigma_{kl} - d_{mij}^\varphi E_m \quad (3)$$

$$q_i = d_{ijk}^\varphi \sigma_{jk} - D_{ij}^{\varphi(\sigma)} E_j \quad (4)$$

g-muoto:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}^g \sigma_{kl} - g_{mij}^\varphi q_m \quad (5)$$

$$E_i = -g_{ijk}^\varphi \sigma_{jk} + (D^{\varphi(\sigma)})_{ij}^{-1} q_j \quad (6)$$

S_{ijkl} ovat materiaalin yhteensopivuustensorit ja e_{ijk}^φ , d_{ijk}^φ ja g_{ijk}^φ ovat pietsosähköiset vakiot eri muodoissa. Näissä yhtälöissä yliviitteet E , q , ε , tai σ tietyn ominaisuuden yllä kertovat, että kyseinen ominaisuus on määritelty, kun sähkökenttä, sähkövuo, venymä tai jännitys on nolla. Koska kaikki yllä olevat yhtälöt ovat saman konstitutiivisen mallin

muotoja, voidaan eri vakiot määrittää toistensa avulla. Vakioiden välillä pätevät seuraavat suhteet [270]:

$$e_{mij}^{\varphi} = D_{ijkl}^E d_{mkl}^{\varphi} \quad (7)$$

$$d_{mij}^{\varphi} = D_{mk}^{\varphi(\sigma)} g_{kij}^{\varphi} \quad (8)$$

$$D_{ij}^{\varphi(\sigma)} - D_{ij}^{\varphi(\varepsilon)} = d_{ikl}^{\varphi} e_{jkl}^{\varphi} \quad (9)$$

$$D_{ijkl}^q - D_{ijkl}^E = e_{mij}^{\varphi} (D^{\varphi(\varepsilon)})_{mn}^{-1} e_{nkl}^{\varphi} \quad (10)$$

ABAQUS käyttää e -muodon yhtälöitä, jossa yhtälöt ilmaistaan pietsosähköisen jännitserroinmatriisin e_{mij}^{φ} avulla tai d -muodon yhtälöitä, joissa yhtälöt ilmaistaan pietsosähköisen venymäkerroinmatriisin d_{mij}^{φ} suhteen.

Konstitutiiviset g -muodon yhtälöt voidaan esittää myös seuraavasti:

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl}^q \varepsilon_{kl} - D_{mkl}^q g_{mkl}^{\varphi} q_m \quad (11)$$

$$q_i = D_{im}^{\varphi(\sigma)} g_{mjk}^{\varphi} \sigma_{jk} + D_{ij}^{\varphi(\sigma)} E_j \quad (12)$$

Kirjallisuudessa esiintyy erilaisia muotoja yhtälöille sekä muuttujien ja vakioiden nimille. Yllä olevien yhtälöiden ja vakioiden välisien suhteiden avulla voidaankin vertailla eri analyysituloksia ja verifioida niitä koetuloksiin.

5.3 Kinematiikka

Pietsosähköisten elementtien vapausasteet solmupisteissä ovat siirtymät sekä sähköinen potentiaali. Ne approksimoidaan seuraavasti elementin yli:

$$u = N^N u^N \quad (13)$$

ja

$$\varphi = N^N \varphi^N, \quad (14)$$

missä N^N on interpolaatiofunktioiden matriisi, u^N sekä φ^N ovat solmupistesuureita. Tilavuus- ja pintavoimat sekä vastaavat varaukset interpoloidaan myös edellä mainitulla tavalla.

Venymän ja sähköisen potentiaalin gradientit määritellään seuraavasti:

$$\varepsilon = \mathbf{B}_u^N \mathbf{u}^N \quad (15)$$

ja

$$\mathbf{E} = -\mathbf{B}_\varphi^N \varphi^N, \quad (16)$$

missä B_u^N ja B_φ^N ovat elementin interpolaatiofunktioiden derivaatat. Geometrisesti epälineaarisissa analyyseissä nämä määritellään vallitsevassa konfiguraatiossa.

5.4 Systeemyhtälöt

Kun yhdistetään edellä mainitut konstitutiiviset yhtälöt ja likimääräiset solmupistevoimat tasapainoyhtälöihin, saadaan seuraava systeemyhtälöryhmä solmupistesuureiden suhteen määriteltynä:

$$\mathbf{M}^{MN} \ddot{\mathbf{u}}^N + \mathbf{K}_{uu}^{MN} \mathbf{u}^N + \mathbf{K}_{\varphi u}^{MN} \varphi^N = \mathbf{P}^M \quad (17)$$

ja

$$\mathbf{K}_{\varphi u}^{MN} \mathbf{u}^N - \mathbf{K}_{\varphi\varphi}^{MN} \varphi^N = -\mathbf{Q}^M, \quad (18)$$

missä

$$\mathbf{M}^{MN} = \int_V \rho \mathbf{N}^M \cdot \mathbf{N}^N dV \quad (19)$$

on massamatriisi (sähkövuon säilymisyhtälössä ei ole hitaustermiä), ρ on massa-tiheys,

$$\mathbf{K}_{uu}^{MN} = \int_V \mathbf{B}_u^M : \mathbf{D}_m : \mathbf{B}_u^N dV \quad (20)$$

on siirtymien jäykkyyismatriisi,

$$\mathbf{K}_{\varphi\varphi}^{MN} = \int_V \mathbf{B}_\varphi^M \cdot \mathbf{D}_\varphi \cdot \mathbf{B}_\varphi^N dV \quad (21)$$

on dielektrinen jäykkyyismatriisi,

$$\mathbf{K}_{\varphi u}^{MN} = \int_V \mathbf{B}_\varphi^M \cdot \mathbf{e} : \mathbf{B}_u^N dV \quad (22)$$

on pietsosähköinen kytkentämatriisi,

$$P^M = \int_V N^M \cdot P_v dV + \int_S N^M \cdot P_s dS + P_c^M \quad (23)$$

on mekaaninen voimavektori ja

$$Q^M = \int_V N^M \cdot Q_v dV + \int_S N^M \cdot Q_s dS + Q_c^M \quad (24)$$

on sähköinen varausvektori. Näissä lausekkeissa konstitutiiviset ominaisuudet määritellään matriisimuodossa, missä D_m on mekaaninen yhteys, D_ϕ sähköinen yhteys ja e on pietsosähköinen yhteys. Kuormavektorit sisältävät pistemäiset suureet sekä tilavuus- ja pintasuureet. Tuntelemattomat suureet ovat siirtymät ja potentiaali solmupisteissä. Kun ne on laskettu, venymä- ja potentiaaligradientit lasketaan edellä mainituilla lausekkeilla. Jännitykset ja sähkövuon tiheys saadaan sen jälkeen konstitutiivisten yhteyksien kautta.

5.5 Pietsosähköinen analyysi

5.5.1 Ratkaisuproseduurit

Kahdessa ABAQUS-ohjelman analyysityypissä on yhtenä vapausasteena sähköinen potentiaali. Ensimmäinen näistä on yhdistetty lämmönsiirto- ja sähköinen analyysi, jossa siis samanaikaisesti ratkaistaan sekä sähkökenttä että lämpötila. Toinen on pietsosähköinen analyysi, johon keskitytään tässä kohdassa. Pietsosähköisessä materiaalissa sähkökenttä aiheuttaa venymää ja jännitys taas aikaansaa jännitteen materiaalin pintojen välille. Tämä kuvataan ABAQUS-ohjelmassa määrittelemällä pietsosähköiset ja dielektriset kertoimet materiaalille ja sitä voidaan käyttää ominaistajuuksien määrittämisessä, transientissa epälinearisessa dynaamisessa analyysissä, sekä lineaarisessa että epälinearisessa staattisessa analyysissä ja vakiotilan dynaamisissa analyyseissä. Kaikissa analyysityypeissä pietsosähköinen käyttäytyminen oletetaan kuitenkin lineaariseksi. Esimerkiksi hystereesi-ilmiötä ei voida taten liittää mukaan. Analyysi voidaan suorittaa yhdessä, kahdessa tai kolmessa ulottuvuudessa kontinuumimekaniikan mukaisesti.

Pietsosähköinen analyysi suoritetaan käyttämällä pietsosähköisiä elementtejä, joille määrätään pietsosähköiset materiaaliarvot.

Pietsosähköiset analyysit voidaan ratkaista käyttäen seuraavia proseduuria:

- *FREQUENCY (ominaistajuuksien ratkaisu)
- *MODAL DYNAMIC (transientti ominaisarvoihin perustuva dynaaminen analyysi)
- *STATIC (staattinen jännitysanalyysi)
- *DYNAMIC (dynaaminen analyysi käyttäen suoraa aikaintegrointia)

- *STEADY STATE DYNAMICS (vakiotilan dynaaminen analyysi käyttäen ominaisuustoja)
- *STEADY STATE DYNAMICS, DIRECT (vakiotilan dynaaminen analyysi suoralla ratkaisulla)
- *STEADY STATE DYNAMICS, SUBSPACE PROJECTION (vakiotilan dynaaminen analyysi käyttäen aliavaruuksia).

5.5.2 Alkutila ja -ehdot

Varsinaisia alkuehtoja pietsosähköisille arvoille ei voida määrittää.

5.5.3 Reunaehdot

Kaikki vapausasteet voidaan määrittää ennalta käyttäen *BOUNDARY-käskyä. Reunaehto voi olla myös ajasta riippuva tietyllä amplitudikäyrällä käyttäen lisäksi *AMPLITUDE-optiota.

5.5.4 Kuormat

Sekä mekaanisia että sähköisiä kuormia voidaan asettaa. Mekaaniset kuormat voidaan asettaa solmupisteisiin kaikille siirtymä- ja kiertymävapasteille (1–6) käyttäen *CLOAD-optiota. Jakautuneet kuormat asetetaan elementeille käyttäen *DLOAD- tai *DSLOAD-optioita. Sähkövarauksen suhde sähköpotentiaaliin solmupisteessä vastaa pistevoiman suhdetta siirtymään. Sähkövarauksen voi määrittää solmupisteessä *CECHARGE-optiolla tai elementissä *DECHARGE- ja *DSECHARGE-optioilla. Kuorma voi olla myös ajasta riippuva. Tällöin em. optioiden lisäksi käytetään *AMPLITUDE-optiota kuvaamaan kuorman muoto ajan funktiona.

Ominaisuusmuototehtävissä ei voida käyttää sähköisiä kuormia, koska niillä ei ole vaikutusta rakenteen massaan tai jäykkyyteen. Vakiotilan dynaamisessa analyysissä suoralla ratkaisumenetelmällä sähköisen kuorman reaalin osa määritellään parametrilla LOAD CASE=1, imaginäärinen (eri tahdissa oleva) osa parametrilla LOAD CASE=2, esimerkiksi: *CECHARGE, LOAD CASE=1 tai 2.

5.5.5 Ennaltamäärätyt kenttämuuttujien arvot

Vaikka lämpötila ei olekaan sallittu vapausaste, solmupisteiden lämpötilat voidaan silti määrittää etukäteen *TEMPERATURE-optiolla. Ne vaikuttavat silloin lämpötilasta

riippuviin materiaaliominaisuuksiin normaaliin tapaan. Käyttäjä voi määrittellä lisäksi omat kenttämuuttujat *FIELD-optiolla.

5.5.6 Materiaaliominaisuudet

Pietsosähköisille materiaaleille määritellään pietsosähköinen kytkentämatriisi ja dielektrinen matriisi. Mekaaninen käyttäytyminen voidaan ohjelmassa kuvata ainoastaan lineaarisesti kimmoisella mallilla. Materiaalin dielektriset ominaisuudet määritellään dielektrisellä matriisilla $D_{ij}^{p(\varepsilon)}$, jonka komponentit luetellaan *DIELECTRIC-option alla. Matriisi voi olla isotrooppinen, ortotrooppinen tai täysin anisotrooppinen. Pietsosähköiset ominaisuudet määritellään puolestaan antamalla joko edellä esitetyt jännityskertoimet e_{mij}^p tai venymäkertoimet d_{mkl}^p . Kummassakin tapauksessa komponentteja on 18 kappaletta. Niiden ensimmäinen alaindeksi viittaa sähkövuon suuntaan ja kaksi seuraava mekaanisen rasituksen komponenttiin. Kuitenkin varsinkin teollisuudessa käytetään useimmiten vain kahta indeksiä, jolloin indeksit 11, 22, 33, 12, 13 ja 23 korvataan indekseillä 1, 2, 3, 4, 5 ja 6.

5.5.7 Elementit

Pietsosähköisessä analyysissä täytyy käyttää pietsosähköisiä elementtejä, joiden solmupisteiden yhtenä vapausasteena (vapausaste 9) on sähköinen potentiaali. Kuitenkin normaalejakin elementtejä voidaan käyttää samassa mallissa. Pietsoelementtejä löytyy solidielementtien ja sauvaelementtien (truss element) joukosta. Sauvaelementit ovat kaksitai kolmesolmuisia elementtejä, jotka välittävät vain aksiaalisia voimia. Solidielementit ovat ABAQUS-ohjelman vakioelementtejä. Niihin eivät kuulu rakenne-elementit, kuten palkki-, kuori-, kalvo- ja ristikkoelementit. Niihin eivät myöskään kuulu rakoa, jousa tai vaimenninta kuvaavat erikoiselementit. Solidielementtejä voidaan käyttää kaikissa analyyseissä, joita ABAQUS tarjoaa.

Interpolaatio elementin sisällä voi olla ensimmäistä (lineaarinen interpolaatio) tai toista astetta (kvadraattinen interpolaatio). Kahdessa ulottuvuudessa on käytössä kolmikulmaiset ja nelikulmaiset elementit, kolmessa ulottuvuudessa on käytössä kolmioprisma ja neli- tai kuusitahokkaat elementit. Kahdessa ulottuvuudessa voidaan käyttää pyörähdys-symmetristä mallia tai mallia, joka perustuu joko tasojaännitys- tai tasovenymäteoriaan. Analyysiaikojen säästämiseksi redusoitu integrointi on mahdollinen. Pietsosähköisiä elementtityyppejä on lukuisia, mutta käytetyimpiä lienevät 8-solmuinen lineaarinen kuusitahokas (C3D8E) ja 4-solmuinen bilineaarinen tasojaännitysnelikulmio (CPS4E).

5.5.8 Tulostiedot

Seuraavia sähköisiä tulosmuuttujia saa kirjoitettua elementin integrointipisteistä:

EENER	sähköstaattinen energiatiheys
EPG	sähköisen potentiaalin gradienttivektorin suuruus ja komponentit
EPGM	sähköisen potentiaalin gradienttivektorin suuruus
EPGn	sähköisen potentiaalin gradienttivektorin komponentit (n = 1, 2, 3)
EFLX	sähkövuovektorin (siirros) suuruus ja komponentit
EFLXM	sähkövuovektorin suuruus
EFLXn	sähkövuovektorin komponentit (n = 1, 2, 3).

Seuraavia sähköisiä tulosmuuttujia saa kirjoitettua koko elementistä:

CHRGs	jakautuneen sähköisen varauksen arvot
ELCTE	sähköstaattinen kokonaisenergia elementissä

Seuraavia sähköisiä tulosmuuttujia saa kirjoitettua solmupisteistä:

EPOT	sähköinen potentiaali
RCHG	reaktiivinen sähköinen varaus.
CECHG	keskitetty sähköinen varaus.

5.5.9 Pietsosähköisen analyysin sapluuna

*HEADING

*MATERIAL, NAME=...

*ELASTIC

*PIEZOELECTRIC

*DIELECTRIC

*AMPLITUDE, NAME=...

*STEP,

*STATIC

tai *DYNAMIC, *FREQUENCY, *MODAL DYNAMIC, *STEADY STATE DYNAMICS (, DIRECT tai SUBSPACE PROJECTION)

*BOUNDARY

*CECHARGE, AMPLITUDE=...

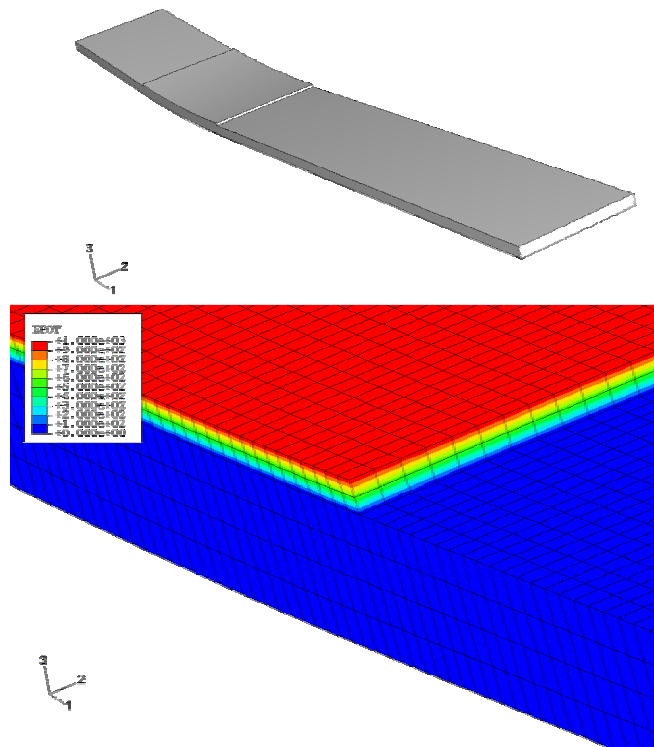
*DECHARGE ja/tai *DSECHARGE

*CLOAD ja/tai *DLOAD ja/tai *DSLOAD

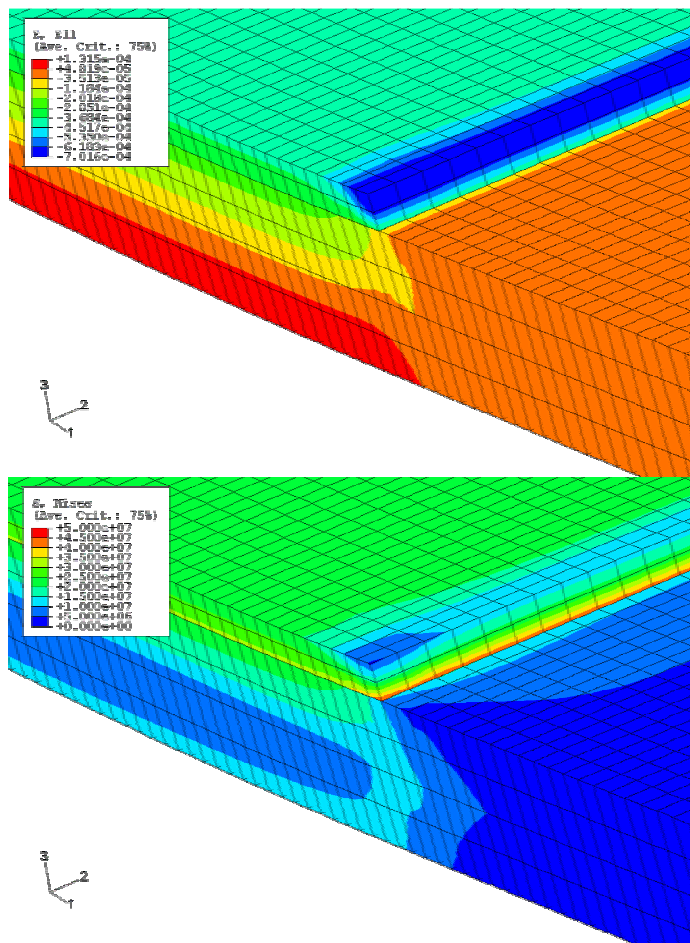
*END STEP

5.6 Esimerkkianalyysi

Esimerkkianalyysinä käsitellään yksinkertaista tapausta, jossa ulokepalkin yläpintaan on liimattu pietsoliuska (kuva 70 ylhäällä). Koko malli on verkotettu kolmiulotteisilla niin kutsutuilla solidielementeillä. Kun pietsoliuskan yläpintaan asetetaan reunaehtona tietty sähköinen potentiaali ja pidetään itse palkki nollapotentiaalissa, pietsoliuskaan syntyy jännite. Pietsoliuskan kulman lähikuvassa (kuva 70 alhaalla) sininen väri kuvaa nollapotentiaalia, punainen korkeinta potentiaalin arvoa. Jännite synnyttää pietsomateriaaliin tässä tapauksessa venymää palkin pitkittäissuunnassa, jonka seurauksena koko palkki taipuu. Kuvassa 71 näytetään venymän (ylhäällä) ja von Misesin vertailujännityksen (alhaalla) jakautuminen palkissa. Jännitysarvot kertovat, mistä pietsoliuska ja etenkin sen liimaus palkkiin saattaa helpoiten lähteä väsymään. Esitetty analyysi on hyvin alustava eikä siinä ole esimerkiksi mallinnettu liimakerrosta.



Kuva 70. Ulokepalkin deformoitunut muoto yllä. Sähköisen potentiaalin tasa-arvo-pintakuvaaja alla.



Kuva 71. Pitkittäissuuntaisen venymän kuvaaja yllä, von Misesin jännitys alla.

5.7 Aktiivisen säädön toteuttaminen ABAQUS-ohjelmistossa

Rakenteen aktiivinen säätö voidaan ABAQUS-ohjelmassa aikaansaada käyttäjäalirutiinien avulla. Käyttäjäalirutiinien avulla voidaan luoda kytkentä, jossa rakenteen jotkin ominaisuudet tai kuormitukset ovat valittujen ratkaisumuuttujien funktioita.

Yksinkertainen aktiivisen pietsorakenteen malli on jo toteutettu käyttäen vakio-pietsoelementtejä sekä URDFIL- ja UEL-käyttäjäalirutiineja. URDFIL:n avulla voidaan lukea eri muuttujien arvoja ohjelman tulostiedostosta. UEL:n avulla taas voidaan luoda mielivaltaisia elementtejä, joita voidaan käyttää joko erillisinä tai yhdessä vakio-elementtien kanssa määrittelemällä elementtien halutut solmupisteet yhteisiksi. Yleisessä tapauksessa UEL:ssa on muodostettava mm. elementin kuormitusvektori ja jäykkyysmatriisi.

Toteutetussa ratkaisussa URDFIL:ssa luetaan vakio-pietsoelementeillä mallinnetun sensorielimen pintasolmujen sähköiset potentiaalit. Luetut potentiaalit voidaan esimerkiksi keskiarvoistaa kuvaamaan todellisen rakenteen sensorielimen elektrodien välille syntyvää jännitettä. URDFIL:ssa voitaisiin lukea myös sähköisen potentiaalın gradientti pietsoelementtien integrointipisteissä, joiden arvot voitaisiin niin ikään keskiarvoistaa elektrodien väliseksi jännitteeksi ottamalla huomioon sensorielimen elektrodipintojen välinen etäisyys. Sensorielimen tieto välitetään URDFIL:stä UEL:iin ns. common-lohkon avulla. UEL:n avulla on luotu elementti, jonka solmujen sähköisen potentiaalın sisältävä vapausaste on sidottu vakio-pietsoelementeillä mallinnetun aktuaattorielimen pintasolmujen vastaavaan vapausasteeseen. ABAQUS-ohjelman pietsoelementeissä sähköisen potentiaalın sisältävän vapausasteen kuormituksena toimii solmussa sijaitseva sähkövaraus, joten mallinnetun rakenteen aktuaattorielintä voidaan kuormittaa sähköisesti halutulla tavalla määrittelemällä luodulle elementille UEL:ssa sopivat sähkövaraukset sisältävä kuormitusvektori. Aktuaattorielimen pinnoille luotu varausjakauma voidaan tarvittaessa muuntaa pintojen väliseksi jännitteeksi ottamalla huomioon käytetyn pietso-materiaalın dielektrinen ominaisuus. Aktiivinen rakenne aikaansaadaan ottamalla huomioon URDFIL:sta UEL:iin välitetty sensorielimen tieto määritettäessä aktuaattorielimen pinnoille tuotavia sähkövarauksia.

Vaihtoehtoisia keinoja aktiivisen pietsorakenteen mallintamiseksi ABAQUS-ohjelmassa voisivat olla esimerkiksi kokonaisen pietsoelementin ohjelmoiminen UEL:lla, pietso-materiaalın käyttäytymisen mallintaminen käyttäen UMAT- tai UEXPAN-käyttäjäalirutiinia yhdessä normaalien rakenne-elementtien kanssa tai sähköiset potentiaalit sisältävien reunaehtojen muuttaminen suoraan common-lohkon avulla. Nämä vaihtoehdot ovat toistaiseksi tutkimatta. Kaksi ensimmäistä vaihtoehtoa mahdollistaisivat pietsoelimen mallintamisen mm. kuorielementeillä, mikä saattaisi olla hyödyllistä esimerkiksi aktiivisia tuuliturbiinin lapoja mallinnettaessa.

6. Joustavien mekaanisten järjestelmien säädön simulointi

Mikko Lehtonen & Juha Kortelainen

Symboli- ja lyhenneluettelo

CAD	tietokoneavusteinen suunnittelu (Computer Aided Design)
dx	siirtymä x-suuntaan
F	voima
FE	elementti (Finite Element)
FEM	elementtimenetelmä (Finite Element Method)
HCC	Higher Harmonic Control
mnf	ominaismuotokuvauksen tiedostomuoto (Modal Neutral File)
Mt	vääntömomentti
PID	säädintyyppi (Proportional, Integral, Derivative).

6.1 Johdanto

Tuotteiden suunnittelun kasvaneet vaatimukset ovat tuoneet lisävaatimuksia myös erilaisten järjestelmien simulointiin. Mallinnettavien järjestelmien koko ja monimutkaisuus ovat kasvaneet ja toisaalta malleilla tehtävistä simuloinneista saatavan informaation yksityiskohtaisuuden ja tarkkuuden vaatimukset ovat tiukentuneet. Esimerkiksi mekanismien simuloinnissa yhä useammin ideaalisen jäykän kappaleen oletus on liian karkea, jotta simuloinneista haettava tieto olisi riittävän tarkkaa tuotteiden suunnittelun tarpeisiin. Vastaavasti säätöjärjestelmien suunnittelussa ja simuloinnissa mekaanisen järjestelmän vasteen kuvaaminen yksinkertaistetulla tavalla ei enää välttämättä vastaa suunnittelun tarpeita.

Tässä luvussa kuvataan yhdistelmä-laskennan suorittaminen mekaanisten ja säätöjärjestelmien suunnitteluun tarkoitetuilla ohjelmistoilla MSC.ADAMS ja Matlab/Simulink. Yhdistelmä-laskennan etuna on, että eri osajärjestelmien suunnittelijat voivat käyttää työssään tuttuja ja parhaiten tehtävään sopivia työkaluja ja kuitenkin koko järjestelmän toimintaa voidaan simuloida yhtenä kokonaisuutena. Yhdistelmä-laskennassa eri osajärjestelmien kuvaaminen suhteellisen tarkalla mallilla parantaa simulointitulosten tarkkuutta ja lisää simuloinnin hyödyllisyyttä.

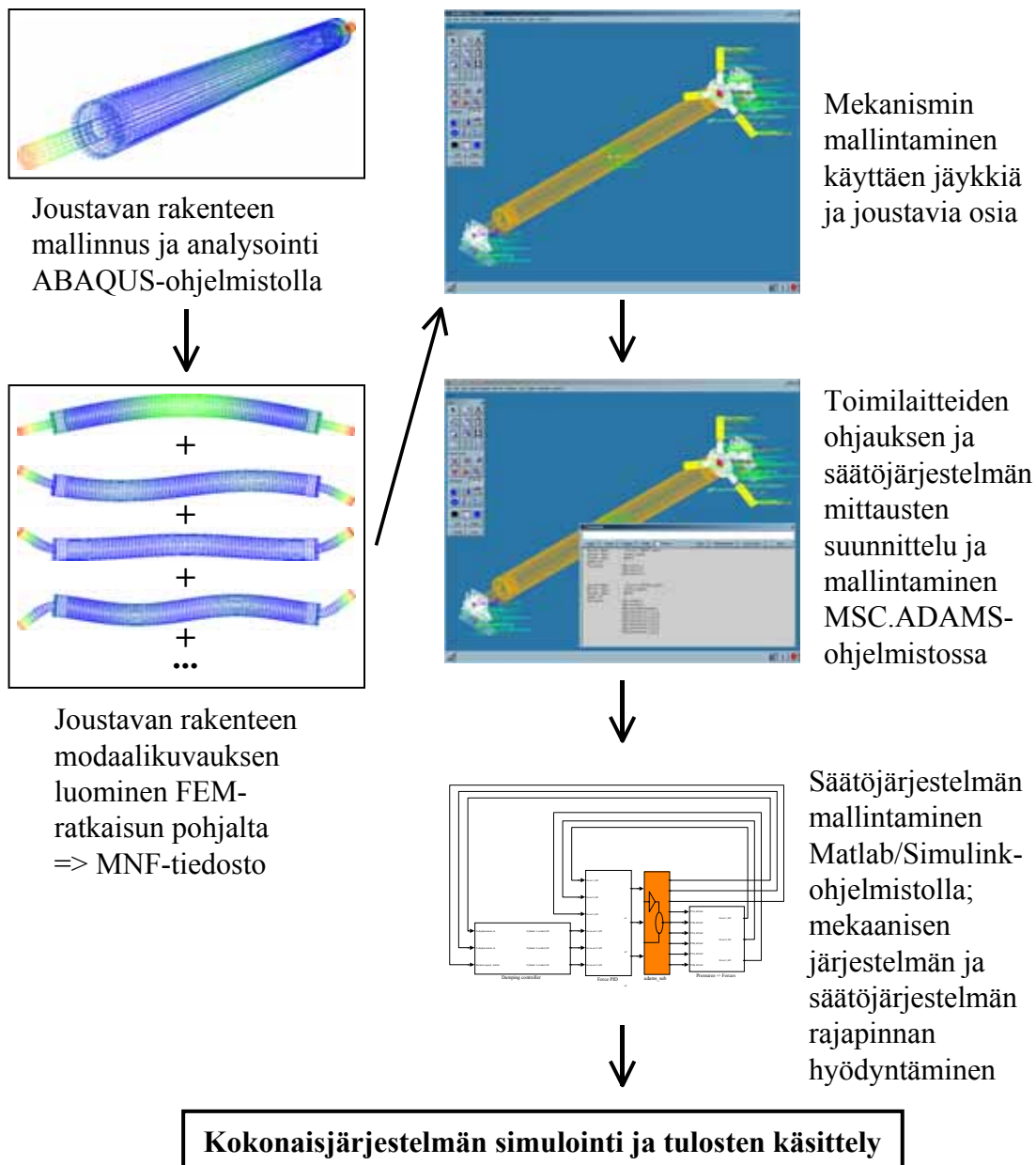
Tämän kirjoituksen tarkoituksena on käsitellä tarvittavat käytännön työvaiheet yhdistetyn mekaniikka- ja säätöjärjestelmän simulointimallin luomiseksi sekä käytettävissä

olevat vaihtoehdot kokonaisjärjestelmän simuloinnissa käytettäessä MSC.ADAMS- ja Matlab/Simulink-ohjelmistoja. Tekstissä kuvataan myös, miten FE-menetelmällä mallinnettujen ja analysoitujen rakenteiden joustavaa kuvausta voidaan hyödyntää mekaniikkamalleissa sekä miten MSC.ADAMS-ohjelmistossa käytettävien joustavien rakenteiden kuvaus tehdään käyttäen ABAQUS-ohjelmistoa.

Yhdistetyn mekaniikka- ja säätöjärjestelmän mallintaminen ja simulointi koostuu karkeasti seuraavista vaiheista (ks. kuva 72):

- joustavan rakenteen mallintaminen ja analysointi ABAQUS-ohjelmistolla
- joustavan rakenteen modaalikuvauksen luominen FEM-ratkaisun pohjalta
- mekanismin mallintaminen käyttäen jäykkiä ja joustavia osia
- toimilaitteiden ohjauksen ja säätöjärjestelmän mittausten suunnittelu ja mallintaminen MSC.ADAMS-ohjelmistossa
- säätöjärjestelmän mallintaminen Matlab/Simulink-ohjelmistolla; mekaanisen järjestelmän ja säätöjärjestelmän rajapinnan hyödyntäminen
- kokonaisjärjestelmän simulointi ja tulosten käsittely.

Tässä osassa julkaisua kuvataan tarkemmin MSC.ADAMS-mekaniikkasimulointi-ohjelmiston ja Matlab/Simulink-ohjelmiston kytkentä käyttäen kahta rinnakkaista ratkaisuprosessia. Kohdassa 6.2.5 Simulointi esitetään lyhyesti myös muut mahdolliset simuloinnissa käytettävissä olevat mallien kytkentätavat.



Kuva 72. Yhdistetyn mekaniikka- ja säätöjärjestelmän mallintamis- ja simulointiprosessi.

6.2 Mekanismin mallintaminen

6.2.1 MSC.ADAMS-ohjelmisto

MSC.ADAMS-ohjelmisto on yleiskäyttöinen mekanismien mallintamiseen ja kinematiikan sekä dynamiikan simulointiin tarkoitettu ohjelmisto. Ohjelmiston avulla voidaan mallintaa ja simuloida sekä yksinkertaisen nivelmekanismin että esimerkiksi monimutkaisen ajoneuvon dynaamista käyttäytymistä. MSC.ADAMS-ohjelmiston avulla on mahdollista mallintaa mekanismien lisäksi myös kytkettyjä järjestelmiä, jotka sisältävät esim. säätö- tai hydraulisia osajärjestelmiä.

Mallinnusprosessi MSC.ADAMS-ohjelmistolla on varsin intuitiivinen. Mekanismin malli luodaan CAD-tyylisesti graafisella esikäsittelijällä. Käyttäjän ei tarvitse huolehtia mallin matemaattisen kuvauksen luomisesta, ohjelmisto tekee sen automaattisesti. Mallin simuloinnin tuloksia voidaan tarkastella sekä yksittäisten suureiden graafien että koko mallin animaatioidenkin avulla. Laskennan tulokset voidaan siirtää numeerisessa muodossa käytettäväksi edelleen esimerkiksi muun suunnittelun apuna ja lähtötietoina [271].

Yksi MSC.ADAMS-ohjelmiston vahvuuksista on sen varsin avoin ja joustava tapa kuvata mallinnuskomponentit. Esimerkiksi liitosten osalta komponenttikirjastosta löytyvät kaikki perusliitokset, kuten saranaliitos tai vakionopeusnivel. Jos käyttäjä kuitenkin haluaa käyttää jotain erityistä tapaa liittää osat toisiinsa, on liitos mahdollista koota ns. primitiivikomponenteista, jolloin halutut vapausasteet voidaan määrätä yksitellen. Määrittäessä osiin vaikuttavia voimia voiman funktio voidaan määrittellä käyttäen ns. *function expression* -muotoa, jolloin käyttäjällä on suuri vapaus määrittää voiman riippuvuus muista mallin komponenteista ja suureista haluamallaan tavalla.

MSC.ADAMS-ohjelmiston käyttämä tapa kuvata joustavat rakenteet ominaismuotojen avulla mahdollistaa suhteellisen tehokkaan ja nopean laskennan. Lisäksi laskentaan ei tarvita ulkopuolisia ohjelmia tai laskentarutiineita sen jälkeen, kun joustavista rakenteista on tehty modaalikuvaukset [272, 273].

MSC.ADAMS-ohjelmisto on rakenteeltaan modulaarinen. Erilaisia peruskäyttöä suppeampaan mutta spesifioidumpaan käyttöön tarkoitettuja moduuleja on saatavilla runsaasti. Näistä merkittävimmät tässä yhteydessä ovat Flex, Controls ja Hydraulics.

6.2.2 Mekanismin mallin luominen

Mekanismin malli MSC.ADAMS-ohjelmistossa koostuu massallisista osista, osat kytkevistä liitoksista, osiin vaikuttavista voimista sekä apu- ja sidosyhtälöistä. Mallin osat voivat olla ideaalisen jäykkiä tai joustavia. Jäykkien osien osalta MSC.ADAMS huomioi osan massan ja inertiaan. Joustavien osien osalta laskennassa huomioidaan osan massa, inertia, massajakauma ja joustavuus.

Monimutkaisemman mekanismin mallin toiminnallisuutta voi kokeilla yksinkertaistetulla mallilla, jossa kaikki osat on mallinnettu jäykkinä kappaleina. Kun mallin toiminnallisuus on hyväksyttävällä tasolla, voidaan mallia monimutkaistaa muuttamalla osa mallin rakenteista joustaviksi.

Kun mekanismin malli toimii hyväksyttävästi, voidaan mekaniikkamalliin kytkeä säätöjärjestelmän malli. Käytettäessä ulkopuolista säätöjärjestelmän mallia, joka on mallinnettu käyttäen esimerkiksi Matlab/Simulink-ohjelmistoa, on säätö- ja mekaanisen järjestelmän rajapinta syytä suunnitella huolellisesti. Rajapinnalla tarkoitetaan tässä yhteydessä sitä mallintamisen tasoa, jossa kaksi ohjelmaa kytkeytyvät toisiinsa. Säätö-

järjestelmän rajapinnan määrittäminen MSC.ADAMS-ohjelmistossa on suoraviivaista. Mekaniikkamallissa määritetään, mitkä mallin suureet toimivat syötteenä säätöjärjestelmän mallille (plant output, mekaniikasta mitattavat suureet) ja mitkä ovat säädöltä tulevat ohjaussuureet (plant input). Määritetty rajapinta näkyy Matlab/Simulink-ohjelmistossa syöte- ja paluukanavana.

6.2.3 Joustavan rakenteen mallintaminen

MSC.ADAMS-ohjelmistossa voidaan osan joustavuus kuvata värähtelymuotokomponenteilla. Joustavien komponenttien kuvaus siirretään MSC.ADAMS-ohjelmistoon mnf-tiedostoina (modal neutral file). Tarvittavat tiedot mnf-tiedostojen muodostamiseksi lasketaan FEM-ohjelmistojen avulla. Mnf-tiedosto sisältää mm. käytetyn elementti-verkon geometrian, massatiedot, ominaisarvot ja -muodot, yleistetyt jäykkyydet ja massat, käytetyt yksiköt jne. [269].

Mnf-tiedostojen luonti ABAQUS-ohjelmiston avulla ja siirto MSC.ADAMS-ohjelmistoon jakaantuu neljään vaiheeseen:

1. Tehdään kustakin joustavasta komponentista ABAQUS-malli (ABAQUS-analyysin lähtötiedostoon). Komponentit mallinnetaan erillisinä alirakenteina.
2. Ajetaan ABAQUS-analyysi.
3. Ajetaan ABAQUS/ADAMS-ohjelma, joka muodostaa ABAQUS-analyysin tulosten (.fil tiedoston) perusteella mnf-tiedoston.
4. Luetaan mnf-tiedosto MSC.ADAMSiin.

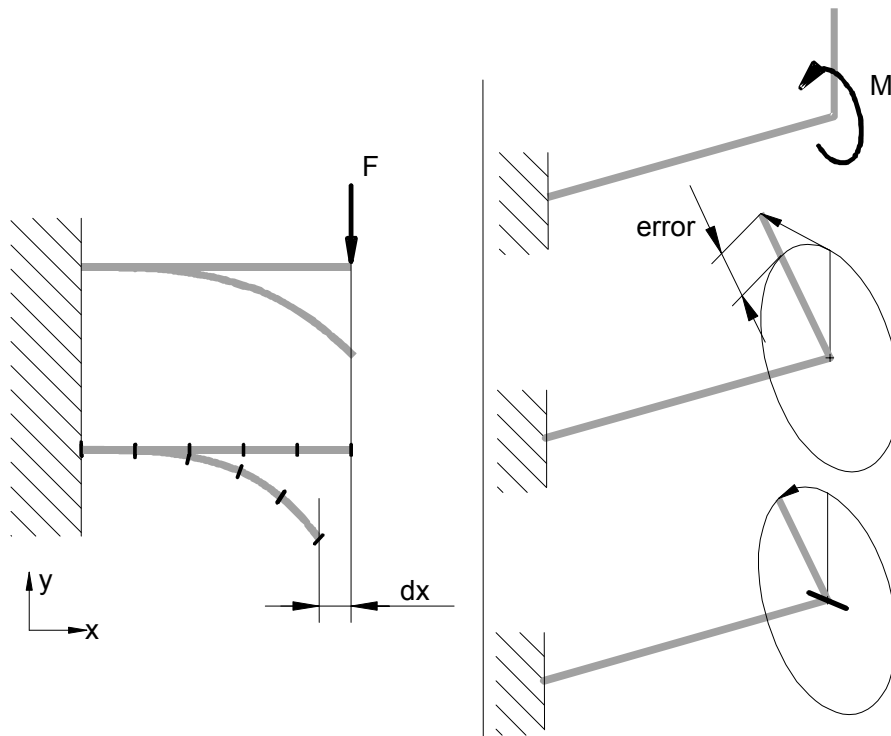
Lähteessä [269] on esitetty tarkemmin, mitä edellä mainituissa vaiheissa tulee tehdä. Proseduuri on varsin yksinkertainen.

ABAQUS/ADAMS tukee useimpia ABAQUSin elementtityyppejä, mutta joitakin poikkeuksia kuitenkin on [269, kohta 2.4]. Värähtelymuotokomponentti kiinnitetään MSC.ADAMSiin muihin osiin solmuista. Kiinnityspisteitä on syytä käyttää MSC.ADAMSiin puolella mahdollisimman vähän vapausasteiden lukumäärän minimoimiseksi. FE-malli tehdään ABAQUSin puolella esimerkiksi siten, että kiinnityksen jousto kuvautuu oikein, vaikka MSC.ADAMSiin puolella tehdään kiinnitys yhdessä solmussa niveltä kohti.

MSC.ADAMSiin käytetyillä värähtelymuotokomponenteilla voidaan kuvata lineaarisia muodonmuutoksia. Jos halutaan ottaa suureet siirtymät huomioon, osa tulee jakaa useampaan värähtelymuotokomponenttiin, jotka sitten liitetään toisiinsa MSC.ADAMSiin. Kuvassa 73 on vasemmalla ylhäällä mallinnettu ulokepalkki yhdellä värähtelymuotokomponentilla. Siirtymät ovat lineaarisia, jolloin pystysuuntaisella kuormituksella ei

palkissa esiinny vaaka-suuntaisia siirtymiä. Niiden huomioimiseksi ulokepalkki on alemmassa kuvassa jaettu viiteen osaan, jolloin myös vaaka-suuntaiset siirtymät saadaan huomioitua. Vastaavalla tavalla esimerkiksi tuulivoimalan lavat tulee mallintaa useammalla värähtelymuotokomponentilla, jos halutaan huomioida lapoja oikeasevan keskipako-voiman vaikutus.

Lähteessä [274] on esitetty tarkemmin joustavien osien mallinnusta MSC.ADAMSissa.



Kuva 73. Suurten siirtymien huomiointi lineaarisilla värähtelymuotokomponenteilla.

6.2.4 Säädön mallintaminen

Kirjoitettaessa mekaniikan ja säätöjärjestelmän rajapinnan kuvaus MSC.ADAMS-ohjelmistosta, ohjelma luo Matlab/Simulink-ohjelmistossa tarvittavat komponentit mallien kytkennälle. Kun mekaniikkamalli on luettu Matlab/Simulink-ohjelmistoon, malli näkyy yhtenä lohkona, jolla on syöte- ja paluukanavat. Säätöjärjestelmän mallintaminen Matlab/Simulink-ohjelmistolla tehdään tästä eteenpäin totutulla tavalla. [275]

6.2.5 Simulointi

Matlab/Simulink-ohjelmistolla tehdyn säätöjärjestelmän mallin kytkentä MSC.ADAMSilla tehtyyn mekanismin malliin on mahdollista tehdä seuraavilla tavoilla:

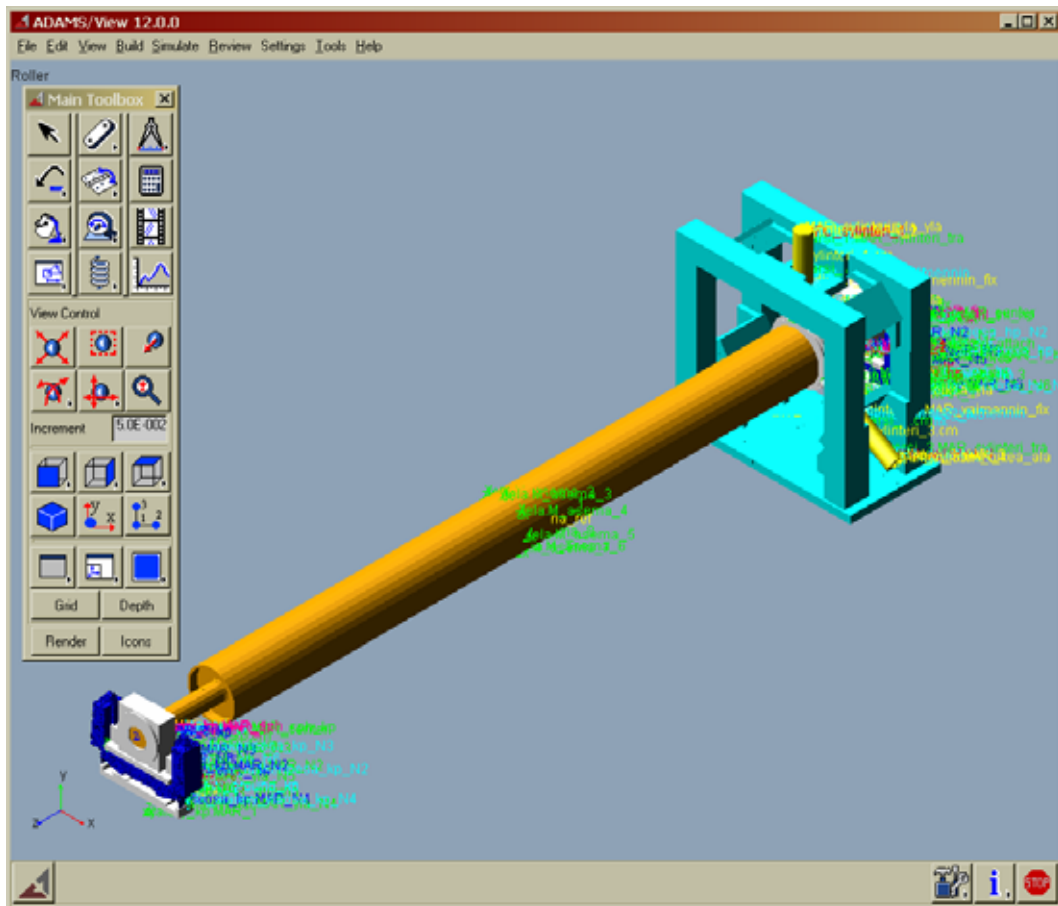
- **Diskreetti laskenta:** Simuloitaessa tällä menetelmällä MSC.ADAMS-ohjelmisto laskee mekaniikkaan liittyvän osuuden ja Matlab/Simulink vastaavasti säätöjärjestelmään liittyvän laskennan. Matlab/Simulink-ohjelmisto johtaa laskentaa.
- **Jatkuva laskenta:** Tässä menetelmässä Matlab/Simulink laskee sekä mekaniikan että säätöjärjestelmän osuuden. Käyttäjä voi valita, esitetäänkö mekaniikan malli linearisoituna koko laskennan ajan vai päivittääkö MSC.ADAMS-mekanismin lineaarista esitystä jokaisella laskennan aika-askeleella.
- **C-kielisen ohjelmakoodin käyttö:** Tässä vaihtoehdossa koko järjestelmän laskenta tehdään MSC.ADAMS-ohjelmistossa. Säätöjärjestelmän C-kielinen kuvaus luetaan MSC.ADAMS-ohjelmistoon. MSC.ADAMS tekee tarvittavat määrittäykset automaattisesti.

Yhdistetyn laskennan käytännön suorittaminen on kuvattu varsin yksityiskohtaisesti MSC.ADAMS-ohjelmiston käyttöohjeissa. Seuraavassa kohdassa kuvattavassa esimerkissä on käytetty diskreettiä laskentatapaa.

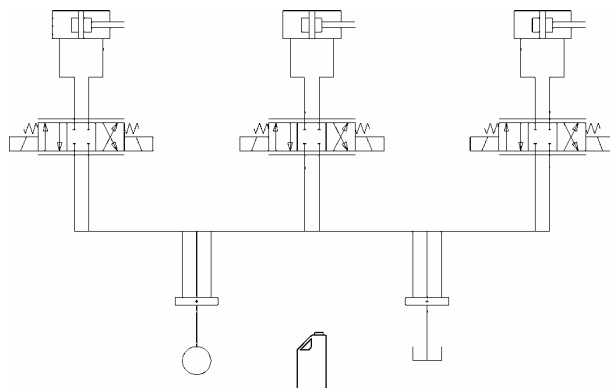
6.2.6 Esimerkki: telakoelaitteen värähtelyvaimentimen säädön simulointi

Työn tavoitteena oli tutkia aktiivisen säädön vaikutusta telakoelaitteen yhden pyörivän telan värähtelyjen vaimennuksessa. Kuvassa 74 esitetään telakoelaitteen mekaniikka-malli. Mallissa tela, aktiivisen vaimennusjärjestelmän kehikko sekä telan tukilaakereiden laakeripukit oli mallinnettu joustavina rakenteina. Tehdyn työn kuvaus on lähteessä [276] (raportti on julkinen, ja se on saatavilla mm. VTT Tuotteet ja tuotanto-yksikön www-sivuilta PDF-muodossa).

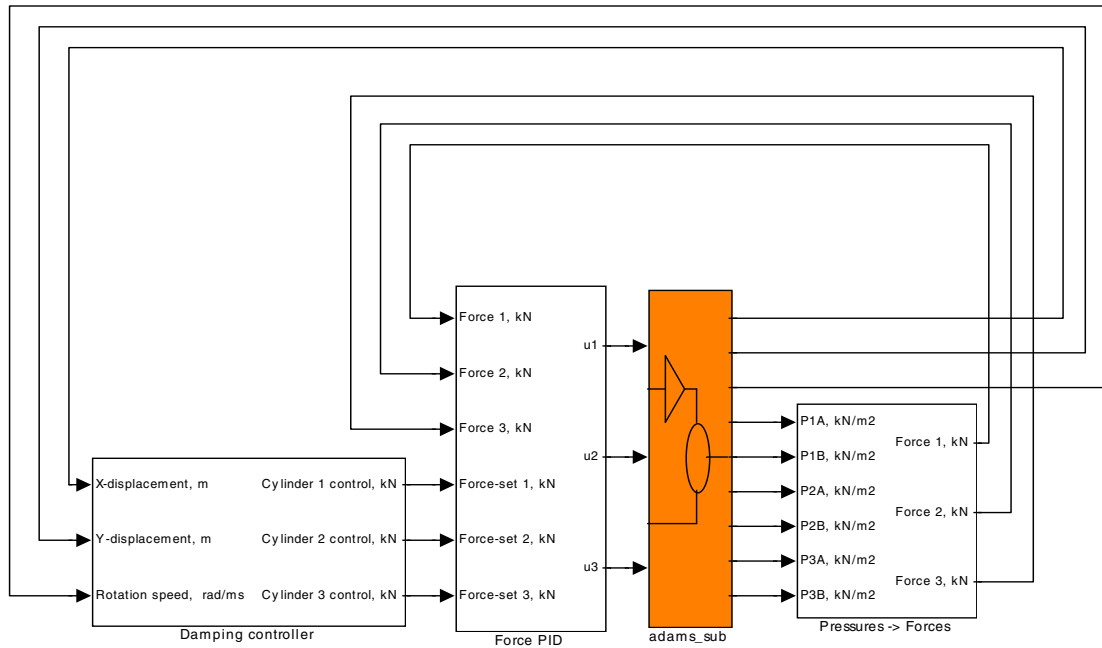
Telakoelaitteen aktiivinen värähtelyvaimennin oli hydraulitoiminen. Mallissa hydrauliiikka oli mallinnettu komponenteittain käyttäen MSC.ADAMS/Hydraulics-ohjelmistomoduulia. Hydraulitoimisen vaimennusjärjestelmän servoventtiilejä ohjattiin Matlab/Simulink-ohjelmistossa tehdyllä säätimen mallilla. Kuvassa 75 esitetään aktiivisen värähtelyvaimentimen hydrauliiikan piirikaavio ja kuvassa 76 esimerkki Matlab/Simulink-ohjelmiston käyttöliittymästä kyseisen telakoelaitteen mallin osalta.



Kuva 74. Telakoelaitteen mekaniikkamalli MSC.ADAMS-ohjelmiston esikäsittelijässä.

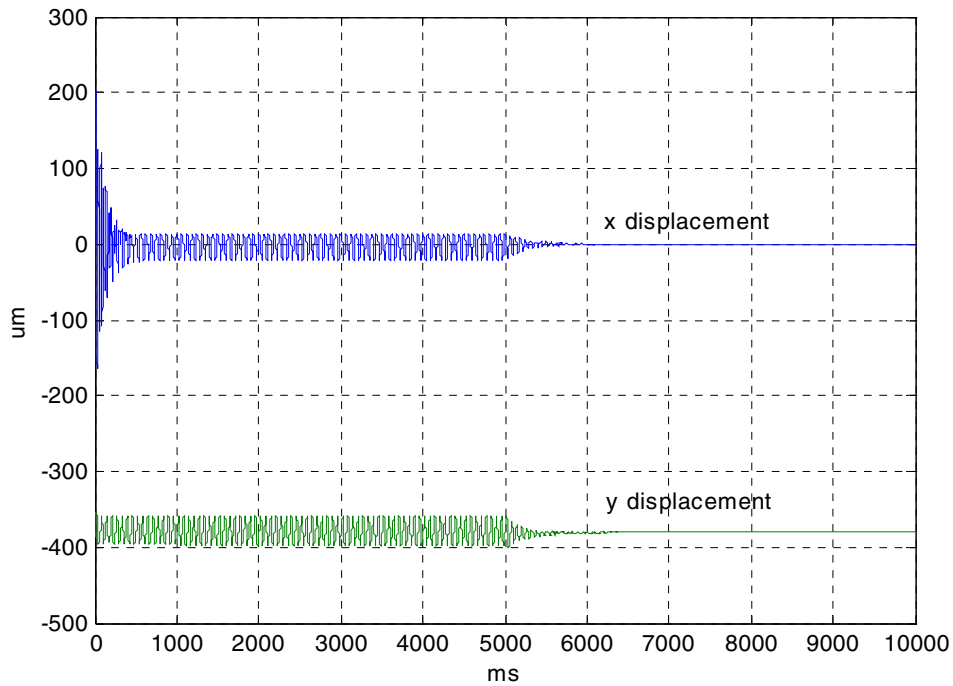


Kuva 75. Telakoelaitteen aktiivisen värähtelynvaimentimen hydraulisen toimilaitteen hydraulikaavio [276].

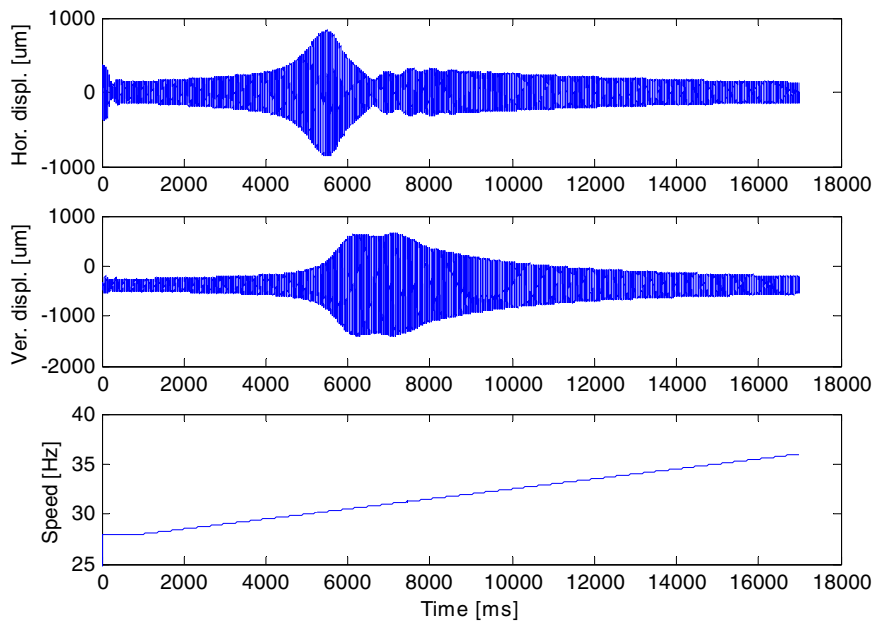


Kuva 76. Telakoelaitteen simulointimallin säätöjärjestelmän mallikuvaus Matlab/Simulink-ohjelmistossa. Kuvassa mekaniikkamalli on esitetty harmaalla korostettuna lohkona. [276]

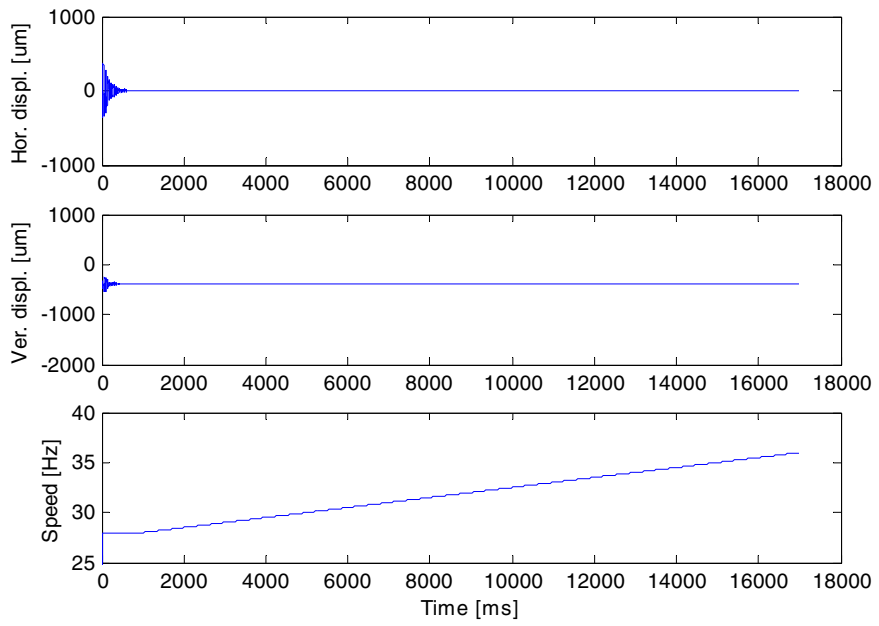
Käytännön simulointi toteutettiin MSC.ADAMS-ohjelmiston ja Matlab/Simulink-ohjelmiston rinnakkaisella ajolla niin, että laskentaa ohjattiin Matlab/Simulink-ohjelmistosta käsin. Kuvassa 77 esitetään telan keskikohdan asema tapauksessa, jossa tela pyörii vakionopeudella 16 Hz. Ensimmäisen ja toisen ominaistajuuden HHC-vaimennus (Higher Harmonic Control) kytketään päälle hetkellä 5000 ms simuloinnin alusta. Kuvissa 78 ja 79 esitetään simuloinnin tuloksista telan keskikohdan asema tapauksessa, jossa telan pyörimistä on kiihdytetty yli telan värähtelyn kriittisen taajuuden. Kuvassa 78 aktiivinen HHC-vaimennus on ollut kytkettynä pois päältä ja kuvassa 79 aktiivinen vaimennus on käytössä. [276]



Kuva 77. Ensimmäisen ja toisen ominaistajuuden HHC-vaimennus x - ja y -suunnassa (gain 0,01); vaimennus alkaa 5000 ms kohdalla. Telan pyörimisnopeus on 16 Hz. [276, kuva 27]



Kuva 78. Telan pyörimisen kiihdytys 0,5 Hz/s yli kriittisen pyörimisnopeuden. Aktiivinen vaimennus ei ole käytössä. Vakiovoima on asetettu arvoon 1 kN. [276, kuva 34]



Kuva 79. Telan pyörimisen kiihdytys 0,5 Hz/s yli kriittisen pyörimisnopeuden. Ensimmäisen ominaistaajuuden HHC-vaimennus on käytössä (gain 0,01). [276, kuva 35]

7. Funktionaalisten materiaalien ja lujitemuovisten toimirakenteiden säätötekniikoista

Lauri Kantola

Tärkeimpien lyhenteiden ja merkkien selitykset

P, PI, PD, PID	säädintyyppiä (Proportional, Integral, Derivative)
CST	Control System Toolbox
X(t)	asetusarvo
Y(t)	mittausarvo
E(t)	erosuure
G(t)	siirtofunktio
H(t)	takaisinkytkennän siirtofunktio
s	Laplace-operaattori
ω	kulmataajuus
P(t)	primäärin siirtotien siirtofunktio
j	kompleksioperaattori
ON-LINE	tosiainainen (säädön aikainen)
OFF-LINE	ei-tosiainainen
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
PC	Personal Computer
RF	Radio Frequency
PZT	Lead Zirconate Titanate
V _{DC}	tasajännite [V]
LV	Low Voltage
HV	High Voltage
RS-232	tiedonsiirtotie
I/O	Input/Output
ISA	Industry Standard Architecture
PCI	Peripheral Component Interconnect
PCMCIA	PC Memory Card International Association
PWM	Pulse Width Modulation
A/D	Analog to Digital

D/A	Digital to Analog
CPU	Central Processing Unit
GND	Ground
FIR	Finite Impulse Response
IIR	Infinite Impulse Response
DC	tasajännite
AC	vaihtojännite
DSP	Digital Signal Processing
PVDF	polyvinyylideenifluoridi
MSM	Magnetic Shape Memory Material
PMN	Lead Magnesium Niobate
NiTiNOL	kaupallinen muistimetallimateriaali (NiTi-seos)
SMA	Shape Memory Alloy
FEM	Finite Element Method
PWB	Printed Wire Board
ASET	Active Strain Energy Tuning
APT	Active Property Tuning
HHC	Higher Harmonics Control

7.1 Johdanto

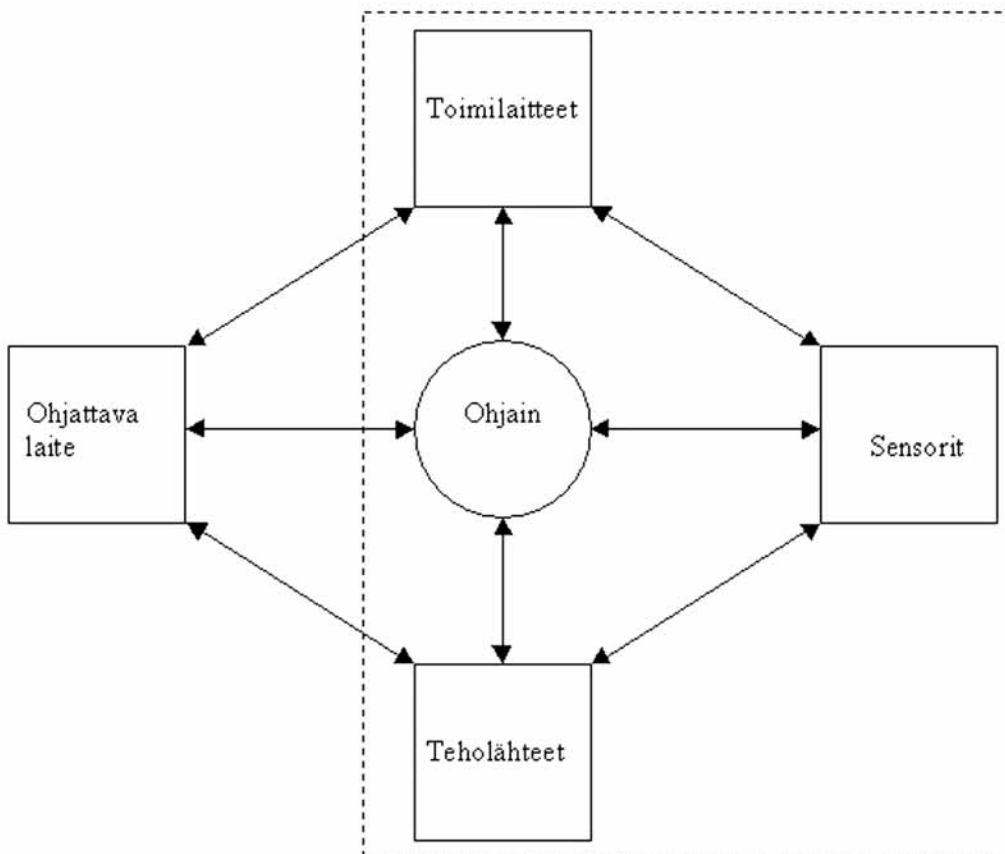
Tässä luvussa tarkastellaan funktionaalisten materiaalien ja lujitemuovisten toimirakenteiden ohjaus- ja säätötekniikoita. Uudet materiaalit tarjoavat mielenkiintoisia mahdollisuuksia toimirakenteiden toteuttamiseksi.

Toimirakenteiden muotoa voidaan hallita muodonhallinnan menetelmiä käyttäen. Toimirakenteen värähtelyjä taas voidaan hallita monilla värähtelynvaimennusmenetelmillä. Funktionaalisia materiaaleja voidaan ohjata useilla perinteisillä säätötekniikan menetelmillä. Ohjausjärjestelmän toteutuksessa täytyy kuitenkin huomioda ohjattavan materiaalin tai rakenteen erityispiirteet sekä ohjaustapa. Funktionaalisia materiaaleja tai toimirakenteita ohjataan tavallisesti materiaalin tai rakenteen tilaa muuttamalla. Esimerkiksi lämpötilan muutos saa muistimetallissa aikaan materiaalin sisäisen faasimuutoksen, joka näkyy ulospäin liikkeenä tai jännityksenä. Pietsosähköinen materiaali taas muuttaa muotoaan, kun sen pinnoilla oleva sähköinen potentiaaliero muuttuu. Funktionaalisilla materiaaleilla on aina myös materiaalista riippuva sisäinen dynamiikka, joka täytyy huomioida ohjaus- ja säätöjärjestelmää toteutettaessa.

Tässä luvussa keskitytään pietsosähköisten materiaalien sekä muistimetallien ohjaus- tekniikan tarkasteluun. Tärkeimpinä aihealueina ovat ohjaus- ja säätötekniikan perusteet, funktionaalisten materiaalien ohjausjärjestelmät, muodonhallinta sekä värähtely- vaimennus. Lähestyminen edellä mainittuihin alueisiin tapahtuu lujitemuovisia toimirakenteita silmällä pitäen. Lujitemuoviset rakenteet ja niiden erityispiirteet on pyritty huomiomaan aiheissa. Ohjausjärjestelmien alueella keskitytään ainoastaan PC- pohjaisiin ohjausjärjestelmiin ja niiden asettamiin erityisvaatimuksiin.

7.2 Yleistä toimilaitteiden ohjauksesta

Mekatroninen systeemi koostuu tavallisesti laitteen tai systeemin mekaniikasta, toimilaitteista, antureista, teholähteistä sekä ohjaimista. Ohjain voi esimerkiksi olla ihminen, mekanismi, ympäristö tai tietokone. Mekatroninen systeemi on siis ohjattava järjestelmä, jonka ohjauksesta ohjain vastaa. Kuvassa 80 esitetään kaaviokuva mekatronisesta systeemistä. Kuvassa on katkoviivalla rajattu tässä luvussa käsiteltävät ohjausjärjestelmän osat. Kuvassa nuolet tarkoittavat informaation tai vaikutusten mahdollista siirtymistä eri lohkojen välillä [277].



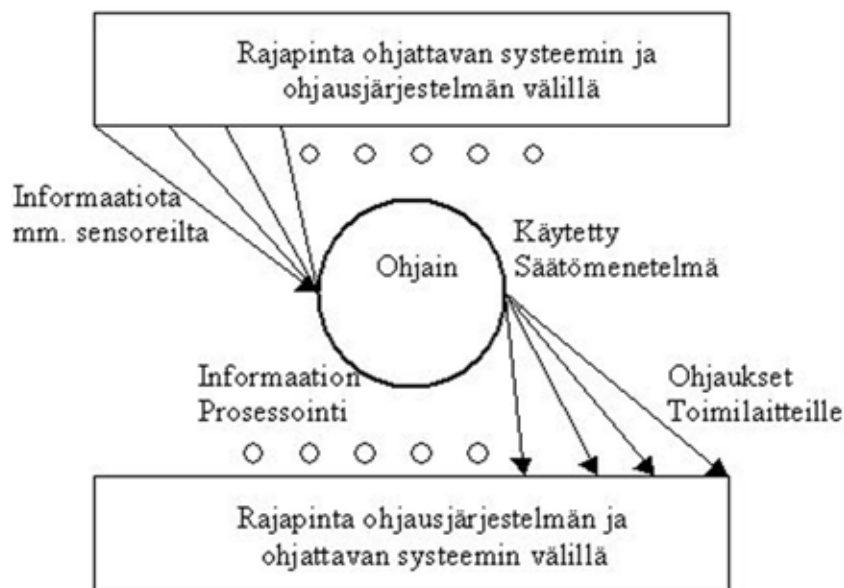
Kuva 80. Mekatroninen systeemi.

Ohjauksjärjestelmissä ohjain käyttää tavallisesti erilaisia säätömenetelmiä. Ohjaimen toteutetaan säädin, joka vaikuttaa systeemiin halutulla tavalla. Säätömenetelmät voidaan karkeasti luokitella seuraavasti [277]:

- suorat ohjausmenetelmät
- perinteiset säätömenetelmät
- kehittyneet säätömenetelmät
- älykkäät säätömenetelmät eli neuro-sumeat järjestelmät.

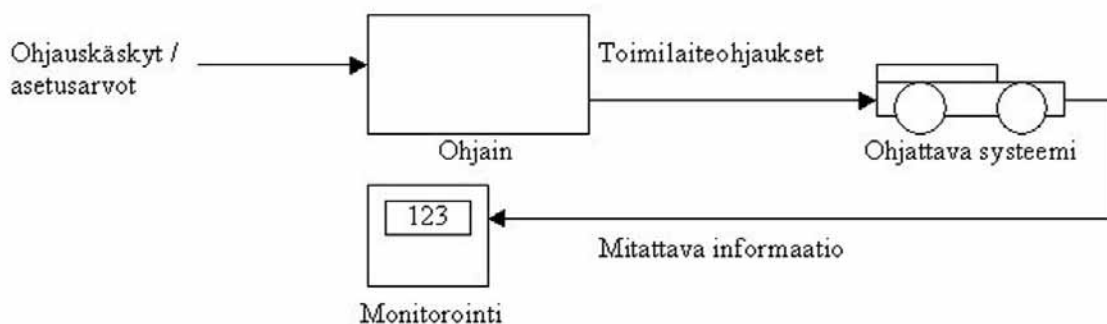
7.2.1 Ohjauksen ja säädön erot

Mekatronisessa järjestelmässä ohjain suorittaa koko järjestelmän hallintaa ohjauksjärjestelmänsä kautta. Ohjattava systeemi on tavallisesti mekaaninen konstruktio, jonka tilaan voivat vaikuttaa ohjauksjärjestelmän lisäksi myös ympäristö ja muut, esimerkiksi häiriöitä aiheuttavat, seikat. Ohjaimen tehtävänä on kerätä hallitusti informaatiota sensoreilta (ja käyttäjiltä), käsitellä sitä ja ohjata toimilaitteita edelleen halutulla tavalla. Toimilaite vaikuttaa suoraan tai epäsuorasti koko ohjattavan systeemin tilaan. Kuvassa 81 on kaavio-kuva ohjaimen toiminnasta. Kuvassa rajapinnat sisältävät sensori- ja aktuaattoritoiminnot.



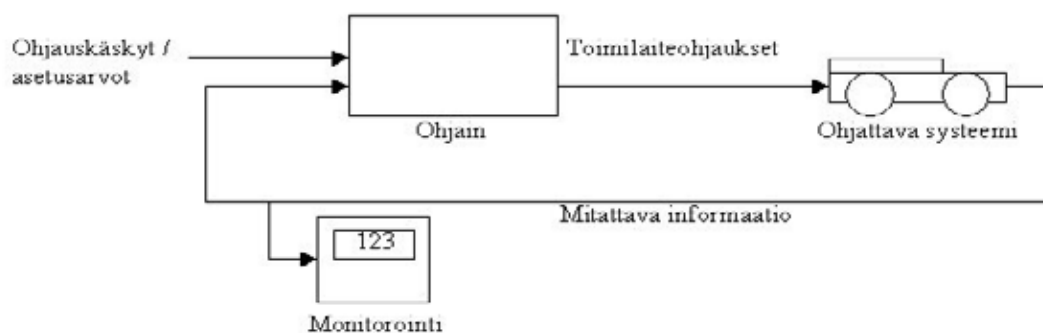
Kuva 81. Ohjaimen toiminta.

Sensoritiedon ja toimilaitteohjausten yhteensovittamiseksi käytetään erilaisia säätömenetelmiä. Mikäli säätömenetelmä ei suoraan käytä hyväkseen systeemistä mitattua informaatiota toimilaitteohjausten laskemiseksi, puhutaan suorasta ohjauksjärjestelmästä. Kuvassa 82 on tyypillisen suoran ohjauksen lohkokaavio. Usein puhutaan myös avoimen piirin ohjauksesta. Kuvan systeemissä informaatiota kerätään monitorointia varten [278].



Kuva 82. Tyypillinen ohjausjärjestelmä.

Mikäli systeemistä mitattua informaatiota käytetään apuna toimilaitteohjausten laskemisessa, puhutaan säätöjärjestelmästä. Kuvassa 83 on tyypillisen takaisinkytketyn säätöjärjestelmän lohkokaavio. Usein puhutaan myös suljetun piirin säädöstä [278].



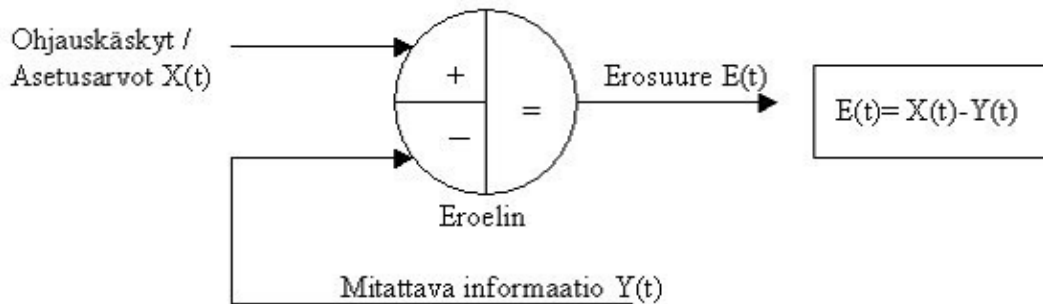
Kuva 83. Tyypillinen säätöjärjestelmä.

Tyypillisiä avoimen piirin ohjausjärjestelmiä ovat mm. askelmoottorin, mikroaaltouunin tms. järjestelmän ohjaus. Mikäli käytetään avoimen piirin ohjausta, ei suuria tarkkuusvaatimuksia voida yleensä asettaa. Lisäksi systeemin toiminta on tunnettava hyvin käyttöhäiriöiden ja virheiden välttämiseksi. Avoimen piirin ohjaus ei yleensä ota huomioon ympäristön olosuhteiden vaikutuksia tai käyttäjän virheellisiä komentoja. Lisäksi funktionaalisisista materiaaleista valmistetuille toimilaitteille tyypillinen hystereesi voi olla ongelma avoimen piirin ohjausta käytettäessä [278–279].

7.2.2 Takaisinkytketty säätö

Takaisinkytketyn säätöpiirin periaate esitetään kuvassa 86. Takaisinkytketty säätö tarkoittaa säätöä, missä säädettävän suureen todellinen arvo mitataan sensorilla ja viedään (kytketään) takaisin ohjaimen. Ohjain saa parametrinaan yleensä myös käyttäjän eli operaattorin antaman asetusarvon. Asetusarvo on referenssiarvo, johon säädettävästä systeemistä mitattua dataa jatkuvasti verrataan. Asetusarvon ja mitatun arvon eroa kutsutaan erosuureksi. Erosuure kertoo säädettävän suureen poikkeaman asetusarvostaan

tietyllä mittaushetkellä. Kuvassa 84 esitetään takaisinkytketyssä säädössä käytetty eroelin, joka laskee erosuureen jokaisella säätökierroksella. Erosuureen arvoa voidaan käyttää hyödyksi lukuisissa säätömenetelmissä. Esimerkiksi PID-säädössä erosuurella on keskeinen merkitys [278, 280, 281].



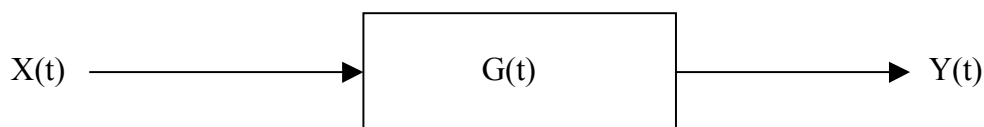
Kuva 84. Eroelimen toiminta.

Kuvassa 86 on esitetty erään systeemin lohkokaavio. Lohkokaavion signaalit ovat:

$X(t)$ = asetuarvo

$Y(t)$ = mittausarvo

$G(t)$ = säädettävä systeemi.



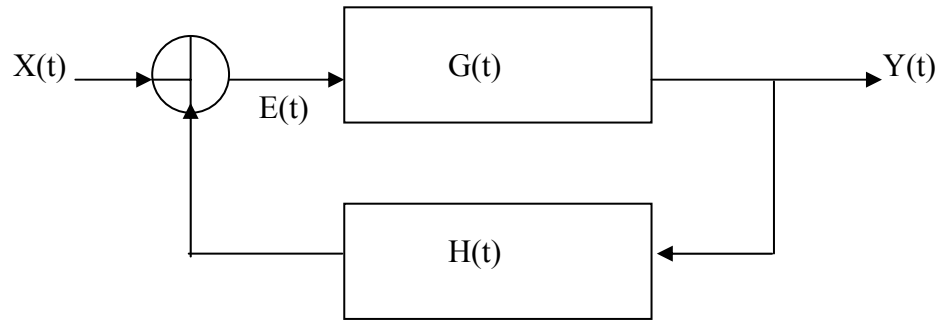
Kuva 85. Erään systeemin lohkokaavio.

Nyt voidaan johtaa systeemin siirtofunktioksi:

$$G(t) = \frac{Y(t)}{X(t)} \quad (25)$$

Siirtofunktio ilmoittaa prosessin ulostulon ja sisäänmenon suhteen. Siirtofunktio on tärkeä osa säätötekniikkaa. Sen avulla voidaan mallintaa useita säätötapahtumia. Siirtofunktioiden käsittelyyn on kehitetty useita tehokkaita tietokoneohjelmia. Eräs yleisesti käytetty ohjelmisto on Matlab ja sen erityisesti säätösysteemien suunnitteluun kehitetty Control System Toolbox.

Kun mittausarvo kytketään takaisin, ts. avoin piiri suljetaan, syntyy takaisinkytketty (suljettu) säätöpiiri. Kuvassa 86 on takaisinkytkennän lohkokaavio:



Kuva 86. Suljettu säätöpiiri.

Nyt voidaan johtaa suljetun systeemin siirtofunktioksi:

$$E(t) = X(t) - H(t)Y(t) \quad (26)$$

$$Y(t) = G(t)[X(t) - H(t)Y(t)] \quad (27)$$

$$\frac{Y(t)}{X(t)} = \frac{G(t)}{1 + G(t)H(t)} \quad (28)$$

missä

$H(t)$ = takaisinkytkennän siirtofunktio (esim. suodatin)

$E(t)$ = erosuure.

Laplace-tasossa siirtofunktioksi saadaan vastaavasti:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} = G_{tot}(s) \quad (29)$$

missä

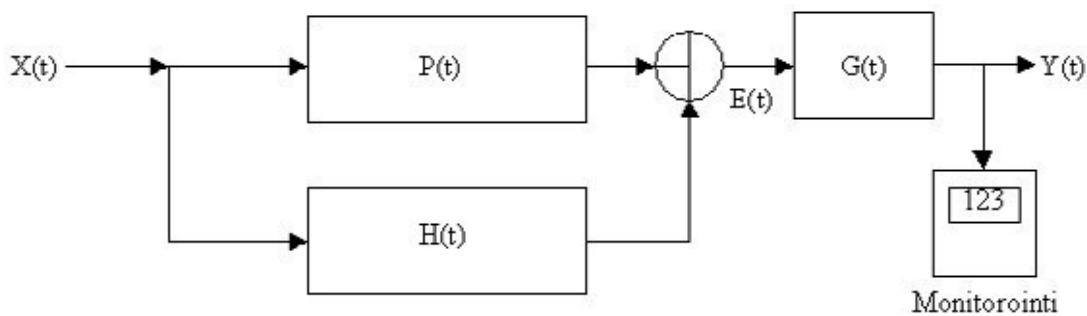
indeksi s viittaa Laplace-operaattoriin.

Taajuustasossa sijoitetaan edelliseen $s = j\omega$, jolloin päästään taajuusesitykseen.

Takaisinkytketty järjestelmä voidaan esittää myös muissa esitysmuodoissa, joista yleisimmin käytettyjä lienee modernin säätöteorian tilamallimuoto. Tilamallimuotoa ei kuitenkaan esitetä tässä luvussa. Kiinnostunut voi tutustua lähteisiin [128, 281].

7.2.3 Eteenpäinkytketty säätö

Eteenpäinkytketty (myötäkytketty) järjestelmä poikkeaa takaisinkytketystä säätöpiiristä siinä, että takaisinkytkentää mittauksesta ei välttämättä ole. Periaatteessa eteenpäinkytketty säätöpiiri on avoimen piirin ohjausta, johon on lisätty häiriön kompensointia. Häiriöllä tarkoitetaan yleensä tunnettua tai mitattavaa häiriötä, jonka haitallisia vaikutuksia eteenpäinkytkentähaara kompensoi. Eteenpäinkytketyssä säätöpiirissä voidaan sensoreita käyttää monitorointiin tai joissakin tapauksissa myös eteenpäinkytkentähaaran aktiiviseen manipulointiin. Tyypillisesti eteenpäinkytketyssä järjestelmässä mitataan häiriölähteestä signaalia, jota voidaan käyttää eteenpäinkytkentähaaran päivityksessä. Esimerkiksi jos kyseessä on pyörivä kone, voidaan pyörimisnopeutta käyttää eteenpäinkytkentähaaran viritukseen. Kuvassa 87 on eteenpäinkytketyn säätöpiirin ideaalinen lohkoakaavio [128]:



Kuva 87. Eteenpäinkytketty säätöpiiri.

Nyt voidaan johtaa systeemin toimintaa kuvaavaksi yhtälöksi:

$$E(t) = X(t)P(t) - X(t)H(t) \quad (30)$$

$$Y(t) = G(t) \{X(t)[P(t) - H(t)]\} \quad (31)$$

$$\Rightarrow Y(t) = 0, \text{ kun } [P(t) - H(t)] = 0 \Leftrightarrow P(t) = H(t) \quad (32)$$

yhtälöissä

$P(t)$ = primäärinen siirtotie

$H(t)$ = eteenpäinkytkentä.

Laplace-tasossa siirtofunktioksi saadaan vastaavasti:

$$Y(s) = G(s) \{X(s)[P(s) - H(s)]\} \quad (33)$$

missä

indeksi s viittaa Laplace-operaattoriin.

Taajuustasossa sijoitetaan edelliseen $s = j\omega$, jolloin päästään taajuusesitykseen.

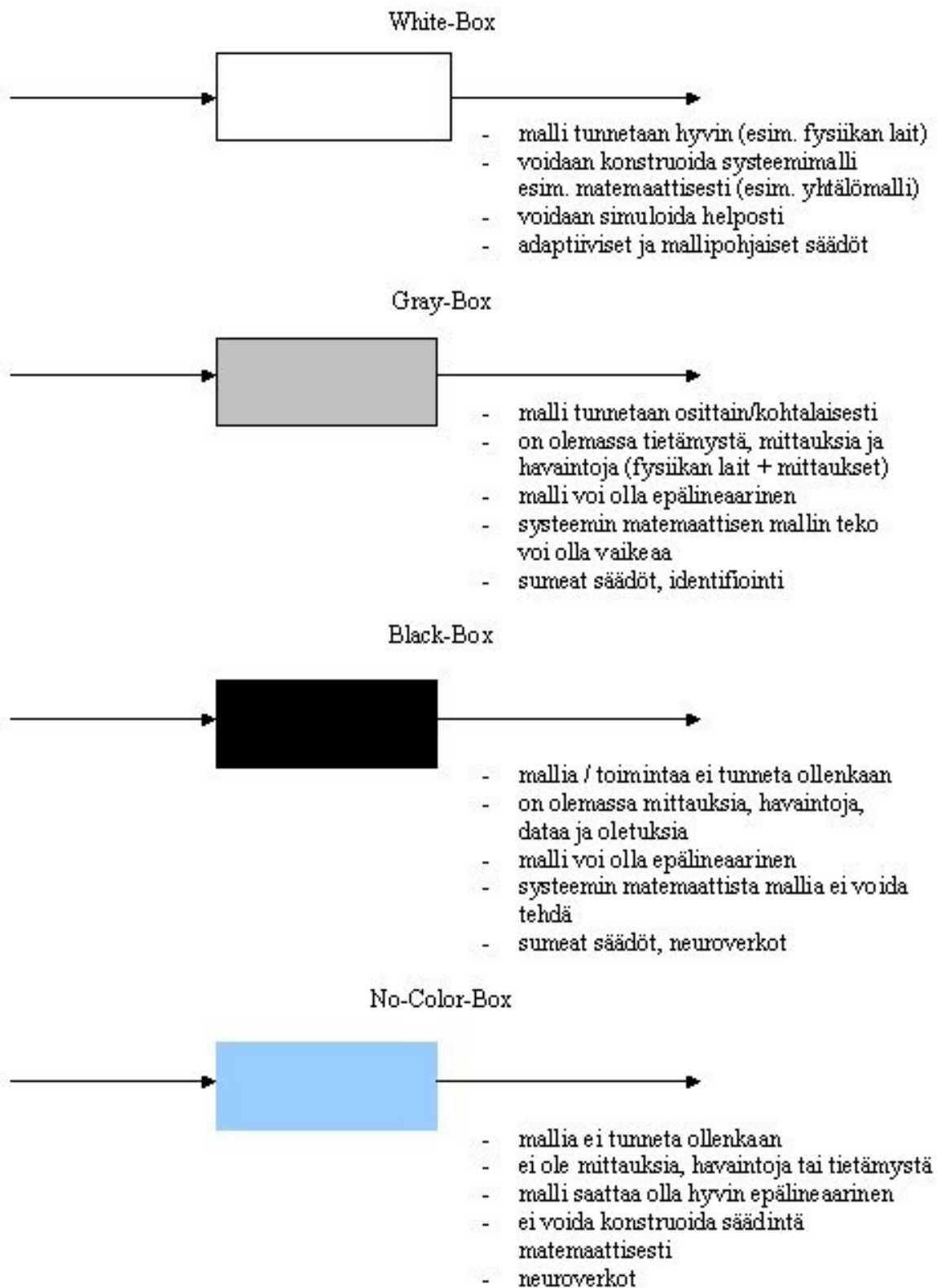
7.2.4 Kehittyneet menetelmät

Kehittyneillä säätömenetelmillä (Advanced Process Control) tarkoitetaan tavallisesti optimoivia ON-LINE-säätöjä. Säätömenetelmät vaihtelevat kaskadisäädöistä vahvistustaulukoinnin kautta aina malliprediktiivisiin säätimiin ja neuro-fuzzy-ratkaisuihin saakka. Kehittyneet säätömenetelmät mielletään usein hyvin monimutkaisiksi. Kysymys on usein kuitenkin systeemin säätötarpeiden ymmärtämisestä ja sopivan säätöstrategian valitsemisesta. Malliprediktiiviset menetelmät, sumea säätö, neuroverkot ja muut hienostuneet menetelmät ovat eräitä kehittyneitä säätövaihtoehtoja. Usein on kustannustehokkaampaa kehittyneiden menetelmien sijaan tyytyä perinteisiin säätömenetelmiin, kuten kaskadisäätöön tai eteenpäin- ja takaisinkytketyn säädön yhdistelmiin, jotka voidaan usein toteuttaa suhteellisen helposti. Joissakin tapauksissa moderneilla säätömenetelmillä on kuitenkin mahdollista saada erinomaisia tuloksia [282].

Kehittyneisiin säätömenetelmiin luetaan mm. [283, 277]:

- lineaaristen ja epälineaaristen prosessien identifiointi
- rekursiivinen identifiointi
- Kalman-suodin
- neuroverkot
- mallipohjainen säätö
- ennustava säätö
- tilamalliin pohjautuvat säädöt
- monimuuttujaprosessien säätö
- adaptiiviset systeemit.

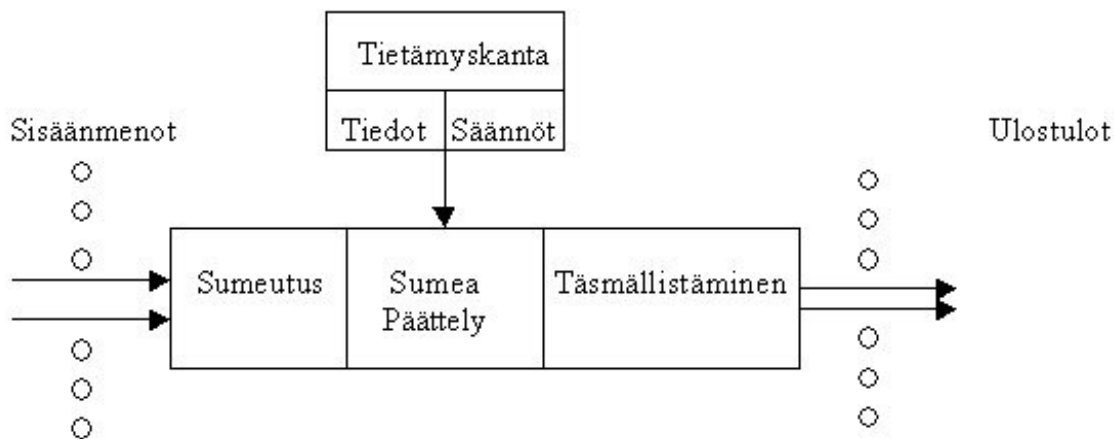
Kehittyneet menetelmät sisältävät sekä White-Box-, Gray-Box-, Black-Box- että No-Color-Box-järjestelmiä ja niiden säätömenetelmiä. Kuvassa 88 esitetään em. järjestelmien keskeisiä piirteitä [277].



Kuva 88. Kehittyneiden menetelmien käyttökohteita.

7.2.5 Sumea säätö

Sumea säätö on yleisesti käytetty kehittynyt säätömenetelmä. Lofti Zadehin tutkimuksiin pohjautuva sumea säätö ei välttämättä tarvitse säädettävän systeemin tarkkaa matemaattista mallia tai tarkkoja mittaustietoja. Sumea säätö on asiantuntijajärjestelmä, ja se käyttää hyväkseen säädettävästä systeemistä tunnettua tietoa. Tieto voi olla sanallisessa tai numeerisessa muodossa. Sumea säätö soveltuu lähes kaikkiin säätötilanteisiin. Se on myös helposti ymmärrettävissä ja uudelleen konfiguroitavissa. Kuvassa 89 on kaaviokuva sumean säätimen toiminnasta ja sumean päättelyn vaiheista [284].



Kuva 89. Sumean säätimen toimintaperiaate.

Sumeat säätimet voidaan ryhmitellä samankaltaisiin säädintyyppisiin kuin perinteiset säätimetkin. Ryhmittely perustuu tila- ja ohjaussuurevalintoihin. Sumeiden säätimien toiminnassa on kuitenkin suuria eroja perinteisiin säätimiin verrattuna. Seuraavassa käsitellään P, PI, PD ja PID-tyyppisten sumeiden säätimien perusrakennetta. Kuvassa 90 esitetään sumean säätimen käyttökohteita säätöjärjestelmissä [288–287].

P-tyyppinen sumea säädin

P-tyyppinen sumea säädin käyttää tilamuuttujanaan vain erosuuretta. Säädin saa sisäänmenonaan systeemistä lasketun erosuureen arvon, johon se reagoi säätöpinnan määräämällä tavalla (lähteessä [285] on lisäksi esitetty, että jos P-tyyppistä sumeaa säädintä verrataan PI-tyyppiseen sumeeseen säätimeen, huomataan, että se vastaa PI-tyyppisen säätimen taulukkoesityksessä keskimmäistä taulukon saraketta) [285].

PI-tyyppinen sumea säädin

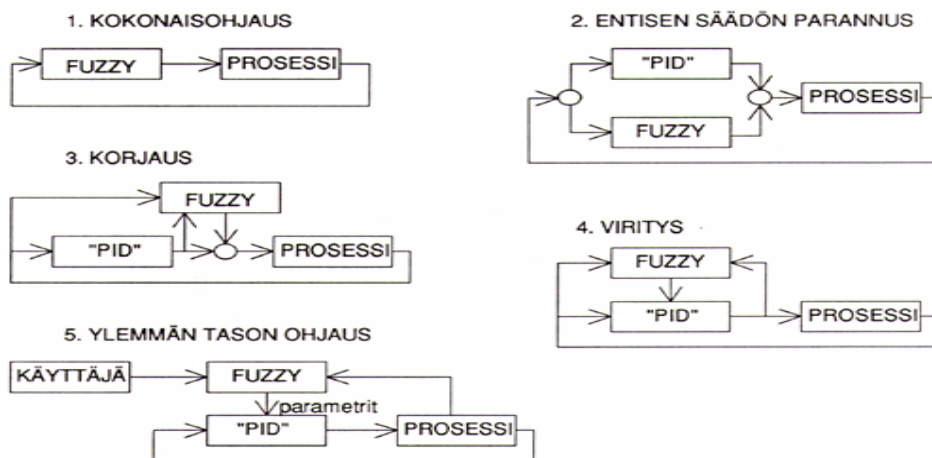
PI-tyyppinen sumea säädin käyttää tilamuuttujinaan sekä erosuuretta että erosuureen muutosta. Sisäänmenona voi olla myös erosuureen summa. Säättösääntöjen avulla saadaan määrättyä ohjauksen lingvistinen arvo ja siitä edelleen selkeytetty numeerinen ohjausarvo, joka yleensä lisätään edelliseen ohjausarvoon [285].

PD-tyyppinen sumea säädin

PD-tyyppinen sumea säädin käyttää tilamuuttujinaan erosuuretta ja sen muutosta kuten PI-tyyppinenkin sumea säädin. Säätimeistä saadaan ulos ohjausarvo. PD-tyyppinen sumea säädin on samankaltainen kuin PI-tyyppinen säädin. Ainoastaan käytettävät sääntösäännöt muuttuvat [285].

PID-tyyppinen sumea säädin

PID-tyyppinen sumea säädin käyttää tilamuuttujinaan erosuuretta, erosuureen muutosta sekä erosuureen summaa. Aikaisempiin säädintyyppisiin verrattuna tilamuuttujien määrä kasvaa, jolloin säätimen taulukkoesitys muuttuu kolmiulotteiseksi. Tällöin myös sääntökannan koko voi kasvaa huomattavan suureksi. PID-tyyppisiä sumeita säätimiä käytetään yksinkertaisissa tapauksissa vain harvoin [285].



Kuva 90. Sumean säätimen käyttökohteita.

Sumeiden säätimien suunnittelussa kannattaa käyttää apuna perinteisistä säätötavoista saatavia tietoja. Varsinkin simulointivaiheessa voidaan perinteistä säädintä käyttää apuna muuttujien käyttäytymisen arvioinnin helpottamiseksi. Myös laaja tuntemus prosessin tai systeemin käyttäytymisestä auttaa säätimen suunnittelussa, koska sumea säätö on pohjimmiltaan asiantuntijajärjestelmä. Mitattua dataa ja tunnettua tietoa kannattaa käyttää hyväksi mahdollisimman paljon. Säätimen suunnittelu ja viritys onnistuvat vain harvoin ilman kokemuseräistä tietämystä systeemistä ja sen käyttäytymisestä.

Simuloinneissa jäsenyysfunktioiden määrän lisääminen lisää myös sääntökannan kokoa, joten alkuvaiheessa yksinkertaista järjestelmää simuloitaessa kannattaa käyttää vain rajallista määrää jäsenyysfunktioita. Jäsenyysfunktion muoto kannattaa alussa valita kolmiomaiseksi. Muotoa voi myöhemmässä vaiheessa muuttaa jouhevammaksi. Selkeytysmenetelmänä kannattaa käyttää painopistemenetelmää, joskin se monimutkaisemmassa järjestelmässä saattaa muodostua pullonkaulaksi hitautensa takia. Sumealla säätimellä päästään suhteellisen helposti lähelle optimitulosta, mutta säätimen lopullinen viritys voi viedä yllättävän paljon aikaa ja resursseja [285].

7.3 Funktionaalisten materiaalien ohjausjärjestelmät

Tässä kohdassa käsitellään funktionaalisten materiaalien ohjausjärjestelmien erityispiirteitä. Funktionaalisten materiaalien hallittu ohjaus ja ohjausjärjestelmän suunnittelu vaativat perehtymistä ohjattavaan materiaaliin ja sen ominaisuuksiin. Materiaaleille ei tavallisesti voida antaa yksiselitteisiä suoritusarvoja tai ominaisuuksia, kuten muille yleisesti käytetyille toimilaitteille. Materiaalin (joka siis toimii toimilaitteena) toimilaitte ominaisuudet määräytyvät pitkälti materiaaliominaisuuksien ja rakenteen mukaisesti.

Toimilaitteen dynamiikka ja ohjaustapa riippuvat siis käytetystä materiaalista ja sen mahdollisesta seostuksesta. Myös käytettävissä olevat anturit ja muut oheislaitteet valitaan sovelluksen ja materiaalin mukaan. Tässä kohdassa käsiteltävät ohjausjärjestelmän osat ovat tyypillisiä kaupallisia asemasäätösovelluksiin soveltuvia komponentteja.

7.3.1 Ohjausjärjestelmän osat

Funktionaalisten materiaalien ohjausjärjestelmien perusrakenne noudattaa tavannaisten ohjausjärjestelmien rakenteita. Ohjausjärjestelmän perusosat ovat:

- anturit
- toimilaitteet
- vahvistimet
- mittauskortit
- signaalinkäsittelyn komponentit.

Koska materiaalien siirtymät ovat erittäin pieniä, toimintataajuudet suuria (yleensä) ja ohjausjännitteet usein merkittäviä, tulee jokaisen osan olla huolellisesti valittu. Hyvin suunniteltu ja toteutettu säätöjärjestelmä mahdollistaa jopa nanometrien tarkkuuksiin pystyvät asemoinnit ja kilohertsien taajuiset liikkeet (mm. piezoaktuaattoreilla).

7.3.1.1 Anturit

Pietsosähköisten ja elektrostriktiivisten toimilaitteiden asemanmittaus perustuu tyypillisesti seuraavien antureiden käyttöön:

- venymäliuska-anturit
- kapasitiiviset anturit
- LVDT-anturit.

Anturilta vaaditaan hyvin suuri resoluutio, koska mitattavat liikematkat ovat pieniä. Anturin on kyettävä mittaamaan mikrometritason liikkeitä luotettavasti ja toistuvasti [288, 279, 280].

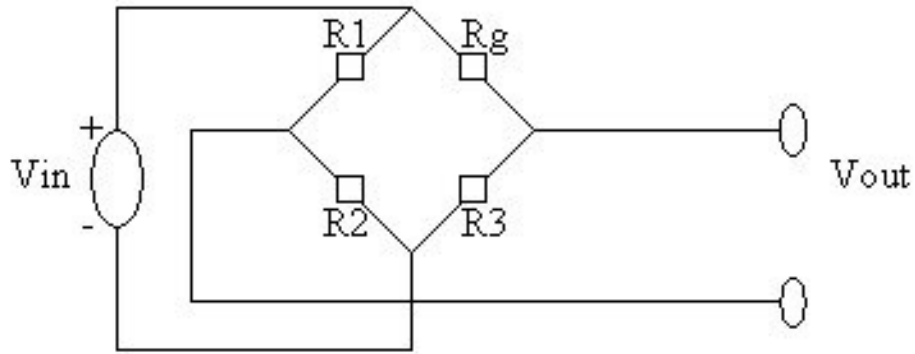
Venymäliuska-anturit

Venymäliuska koostuu pinnoitetusta resistiivisestä kalvosta ja anturin johdotuksista. Resisttiivinen kalvo liimataan tavallisesti suoraan toimilaitteen kylkeen. Toimilaitteen venyessä myös resisttiivinen kalvo venyy muuttaen resistanssiaan. Resistanssin muutos voidaan mitata jännitteen muutoksena. Venymäliuska kytketään tavallisesti siltakytkenään. Siltakytkenästä voidaan mitata tiettyä venymää vastaava jännitesignaali. Kuvassa 91 esitetään tyypillinen Wheatstonen siltakytkenä. Jännitesignaali vastaa suoraan venymäliuskan ja toimilaitteen venymää. Venymäliuskojen etuina voidaan mainita seuraavaa [289, 279, 280]:

- suuri kaistanleveys
- soveltuu tyhjiöön
- pieni ja kevyt rakenne
- ei muuta toimilaitteen dynamiikkaa
- kustannustehokas.

Haittoina mainittakoon:

- vaatii vahvistuksen
- lämmönkesto suhteellisen alhainen
- vaatii lämpötilan kompensoinnin.



Kuva 91. Tyypillinen Wheatstonen siltakytkentä.

Venymäliuskakytkenän mitoitukseen pätevät seuraavat peruskaavat [289, 279, 280]:

Wheatstonen siltakytkennän jännite:

$$U_{out} = U_{in} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_g} \right) \quad (34)$$

missä

R_1, R_2, R_3 ovat vastusarvot

R_g on venymäliuskan vastusarvo,

U_{out} on sillan lähtöjännite

U_{in} on sillan käyttöjännite.

Mittausliuskan resistanssien suhde Wheatstonen siltakytkennässä:

$$\frac{R_{g2}}{R_{g1}} = \left(\frac{1 + 2 \frac{U_{out}}{U_{in}}}{1 - 2 \frac{U_{out}}{U_{in}}} \right) \quad (35)$$

missä

R_{g2} on venymäliuskan vastusarvo jännityksen alaisessa tilassa

R_{g1} on venymäliuskan vastusarvo jännityksettömässä tilassa.

Mittausliuskan liuskakerroin on tällöin:

$$K = \left(\frac{\frac{\Delta R_g}{R_g}}{\frac{\Delta L}{L}} \right) \quad (36)$$

missä

$\Delta R_g / R_g$ on venymäliuskan resistanssin suhteellinen muutos

$\Delta L / L$ on liuskan venymä.

Kapasitiiviset anturit

Kapasitiiviset asema-anturit toimivat kondensaattorin tavoin. Kapasitiivinen asema-anturi koostuu kahdesta RF-levystä, jotka yleensä ovat osa kapasitiivista siltakytkenä. Toinen levyistä on kiinteä, ja toinen on kiinnitetty esim. pietsotoimilaitteen päähän. Toimilaitteen liikkua myös toinen kapasitiivisen anturin levyistä liikkuu etäännyen tai lähentyen kiinteää levyä. Levyjen keskinäinen etäisyys on kääntäen verrannollinen kapasitanssiin. Kapasitanssin muutos voidaan mitata ja hyödyntää edelleen asematietona. Kapasitiivisen anturin resoluutio on picometriluokkaa. Kapasitiivisten antureiden etuina voidaan mainita seuraavaa [289, 279, 280].

- stabiili anturi → Ei tarvitse kalibroida käytön aikana
- erittäin hyvä taajuusvaste.

Haittoina mainittakoon:

- vaatii vahvistuksen
- vaatii tilaa
- levyjen keskinäisen asemoinnin on oltava tarkka.

LVDT-anturit

LVDT-anturit perustuvat sähkömagneettiseen induktioon jossa liikkuva magneettinen osa aiheuttaa häiriön sitä ympäröivään käämiin. Anturi koostuu anturirungon keskelle sijoitetusta ensiökäämistä ja ensiökäämin molemmille puolille sijoitetuista toisiokäämeistä. Ensiökäämin johdetaan vaihtojännite, joka indusoi toisiokäämeihin jännitteet. Kun magneettinen osa liikkuu, häiriintyy anturin jännitetasapaino ja toisiokäämeihin indusoituvat erisuuruiset jännitteet. Tietyllä alueella anturin lähtöjännite on suoraan verrannollinen magneettisen osan poikkeamaan. Anturin lähtöjännite vahvistetaan ja mita-

taan edelleen aseman määrittämistä varten. LVDT-anturin etuna voidaan mainita seuraavaa [289, 279, 280]:

- hyvä lämpötilankesto
- stabiilisuus
- LVDT:llä mitataan liikkuvan osan asemaa (ei toimilaitteen)
- suhteellisen edullinen hinta.

Haittoina mainittakoon:

- vaatii tilaa
- ulkoiset magneettikentät saattavat häiritä toimintaa
- anturi ei välttämättä sovellu tyhjiöön.

7.3.1.2 Toimilaitteet

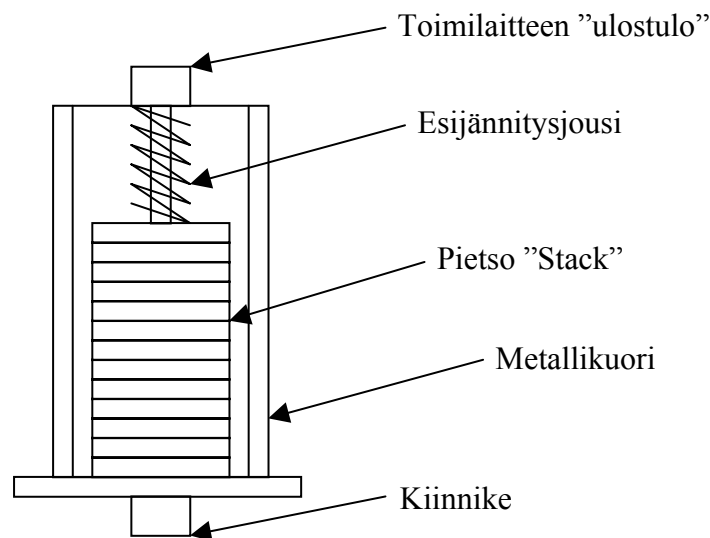
Funktionaalisilla materiaaleilla toteutettuja toimilaitteita on lukuisia. Laajin valikoima kaupallisia toimilaitteita löytyy pietsomateriaalien joukosta. Muiden materiaalien kohdalla toimilaitteita rakennetaan tavallisesti sovelluksen mukaan. Toimilaittevalmistajat myyvät suunnittelupalveluita ja voivat valmistaa tiettyä materiaalia asiakkaan toivomusten mukaisesti. Seuraavassa käsitellään kaupallisia toimilaitteita ja niiden ominaisuuksia tarkemmin. Tarkastelu on keskittynyt pietsotoimilaitteisiin.

Pietsosähköiset toimilaitteet hyödyntävät käänteistä pietsosähköistä ilmiötä. Kun pietsosähköisen materiaalin pinnoille tuodaan sähkövaraus, syntyy kiderakenteessa orientoitumista, joka ilmenee sähkökenttään verrannollisena venymänä. Venymän suuruus riippuu käytetystä sähkökentästä ja materiaalista. Venymän suunta määräytyy pietsomateriaalin polarisaation perusteella. Tyypillisiä pietsoilmiöön perustuvia toimilaitteita ovat erilaiset lineaariliikkeen toimilaitteet. Lisäksi muita pietsoilmiöön perustuvia toimilaitteita ovat pietsomoottorit, värähtelijät sekä erilaiset taivutusaktuattorit. Toimilaitteen liikesuunta määräytyy ensisijaisesti materiaalin polarisaation mukaisesti. Liike tapahtuu yleisimmin sähkökentän suuntaisella akselilla. Liike voi kuitenkin tapahtua myös esimerkiksi sähkökentän suuntaa kohtisuorassa olevalla akselilla. Toimittajat ilmoittavat tuotteissaan liikesuunnan sähkökentän suunnan mukaan. [289]

Pino- ja Chip-tyyppiset toimilaitteet

Tyypillisen pietsotoimilaitteen liikettä tuottava elementti on PZT-keramia. Toimilaitteet voivat olla joko yksikerroksisia tai monikerroksisia (pino-) aktuaattoreita. Pino-rakenteella saadaan pietsotoimilaitteen liikematkaa kasvatettua ja ohjausjännitettä pie-

nennettyä. Pietsoaktuaattorit jaetaan tavallisesti korkea- ja matalajännitepietsoihin. Korkeajännitepietsojen ohjausjännite on tavallisesti n. 1000 VDC, kun matalajännitepietsojen ohjausjännite taas on n. 100 VDC. Matalajännitepietsot ovat lähes poikkeuksetta monikerrosrakenteita. Toimilaitteet voivat olla avoimen tai suljetun piirin toimilaitteita. Suljetun piirin toimilaitteissa on sisäänrakennettu venymän mittausta. Mittaus tehdään tavallisesti venymäliuskoilla. Liikettä tuottava keraamirakenne asennetaan tavallisesti metallisen kuoren sisään. Pietsoakeraamin päässä on liityntä kuoren ulkopuolelle. Koska pietsoakeraamit eivät juuri kestä vetoa eivätkä leikkausjännityksiä, on toimilaitteen rakenne sellainen, että ei-toivotut kuormitukset estetään. Pietsoakeraami voidaan myös esijännittää jousella. Esijännitetyt pietsoakeraamit kestävät vetokuormaa huomattavasti enemmän kuin ilman esijännitystä olevat rakenteet. Kuvassa 92 esitetään tyypillinen kaupallinen monikerroksinen pietsoakeraamilaite [289].



Kuva 92. Tyypillinen monikerroksinen pietsoakeraamilaite.

Lineaariliikkeen toimilaitteita on saatavilla monissa muodoissa. Keraaminen rakenne voidaan valmistaa helposti sauvan, sylinterin tai putken muotoon. Toimittajat valmistavat toimilaitteita myös asiakkaan toivomusten mukaan [289].

Lineaariliikkeen toimilaitteet tuottavat tyypillisesti 5–1000 mikrometrin liikkeitä maksimi-ohjausjännitteellä. Niillä on erittäin nopea vasteaika, ja ne sopivat sekä staattisiin että dynaamisiin kuormitustilanteisiin. Lineaariliikkeen toimilaitteella vasteaika on millisekunnin osia ja resoluutio teoreettisesti ääretön. Mikäli toimilaitetta kuormitetaan dynaamisesti, on esijännitetty pietsoakeraamilaite suositeltava vaihtoehto. Toimilaitteen valinnassa onkin ensin huomioitava käyttötarkoitus ja käyttöolosuhteet [289].

Kiekkotyypiset toimilaitteet

Kiekkotyypiset toimilaitteet kuuluvat tavallisesti unimorphi- tai bimorphi-tyyppisten toimilaitteiden joukkoon. Toimilaitteissa liikettä tuottavana elementtinä toimii pietso-kalvo(i)lla pinnoitettu elastinen levy, joka ei voi muuttaa pituuttaan kiinnityspisteidensä yli. Kun pietsoon ajetaan käyttöjännitettä, se taipuu kaarelle, joka kulkee kiinnityspisteiden kautta. Kiekkotyypisillä toimilaitteilla saadaan suuri liike erittäin pienestä toimilaitteesta. Liikematkat ovat jopa 1000 μm . Bimorphi-aktuaattoreita saa tavallisesti joko rinnakkais- tai sarjarakenteisina. Erona on kahden levyn keskinäinen asemointi ja jännitteen syöttö. Rakenteesta riippuen joko voima tai kokonaisliike kasvaa [289, 290].

Sylinterimäiset toimilaitteet

Sylinterimäiset toimilaitteet ovat tavallisesti putkimaisia rakenteita, joiden perusaine on pietso-keramia. Putki on pinnoitettu sisä- ja ulkopuolelta hopealla tai muulla johtavalla pinnoitteella. Kun putken pinnoille ohjataan jännite, putki venyy sekä pituus- että säteissuunnassa. Sylinterimäiset toimilaitteet ovat tavallisesti korkean jännitteen pietsoja. Niitä käytetään yleisesti optisten komponenttien paikoitukseen ja laser-sovelluksissa. Sylinterimäisiin toimilaitteisiin kuuluvat myös erilaiset hunajakennorakenteet ja "riko- tut" sylinterirakenteet [289, 290].

Taivutustyyppiset toimilaitteet

Taivutustyyppiset toimilaitteet ovat joko uni- tai bimorphi-rakenteisia toimilaitteita. Saatavilla on yksi- tai monikerrosrakenteita. Toimintaperiaate on periaatteessa sama kuin kiekkotoimilaitteissa. Monikerrosrakenteen etuna ovat suuret liikematkat pienillä ohjauksjännitteillä. Taivutustyyppisellä pietso-toimilaitteella voi olla millimetrien liike alle 100 VDC:n ohjauksella. Keventynyt ohjauselektronikka avaa useita sovelluskohteita lääketieteessä ja muissa erikoissovelluksissa. Eräät kuuluisat toimilaiterakenteet, kuten Thunder- ja Rainbow-toimilaitteet, ovat taivutustyyppisiä toimilaitteita [289, 290].

Moonie- ja Symbaali-toimilaitteet

Moonie- ja Symbaali-toimilaitteet ovat pinotyypisiä toimilaitteita, joissa on rakenteeseen integroitu liikkeenvahvistus. Nimitysten ero tulee liikkeenvahvistimen muodosta. Moonie ja Symbaali hyödyntävät muotoiltua rakennettaan toiminnassaan. Kun pino-rakenne puristuu, liikkeenvahvistin liikkuu puristumaa suuremman matkan. Aktuaattorin liikesuunta on kohtisuorassa pietsoelementin liikettä vastaan. Liikkeenvahvistimen etuna on käyttöjännitteen aleneminen ja liikkeen samanaikainen kasvu. Ominaisuuksiltaan nämä toimilaitteet ovat taivutustyyppisten ja monikerrosrakenteiden "välimaastossa" [289, 290].

Liikkeenvahvistimilla varustetut toimilaitteet

Liikkeenvahvistimilla varustettuihin toimilaitteisiin kuuluvat kaikki toimilaitteet, joissa on liikkeenvahvistus. Myös Moonie ja Symbaali kuuluvat tähän ryhmään, mutta ne on erotettu myös omaksi ryhmäkseen ainutlaatuisen muotoilunsa ansiosta. Liikkeenvahvistus toteutetaan tavallisesti nivelellisillä tai elastisilla rakenteilla. Liikkeenvahvistuksen ansiosta toimilaitteen ulostulon liike kasvaa pietson liikkeeseen verrattuna. Liikkeenvahvistimen mekaaniset mitat määräävät vahvistuksen. Haittana voidaan kuitenkin mainita toimilaitteen tuottaman voiman pieneneminen [289, 290].

Erikoistoimilaitteet

Pietsokeraameista voidaan konstruoida myös erikoistoimilaitteita, joilla saadaan aikaan askelmaisia tai pyöriviä liikkeitä. Pyöriviä moottoreita ja lineaarimoottoreita on useaa eri tyyppiä. Kuitenkin vain harvoja moottorisovelluksia on kaupallisesti saatavilla. Erikoistoimilaitteisiin voidaan lukea myös usean akselin suuntaista liikettä tuottavat toimilaitteet. Näihin kuuluvat X,Y,Z-pöydät ja kallistustoimilaitteet. Erikoistoimilaitteet hyödyntävät jotain yksittäisen pietsoimilaitteen ominaisuutta. Erikoistoimilaitteissa on usein liikkeenvahvistus integroituna rakenteeseen. Valmistajat suunnittelevat erikoistoimilaitteitaan tilauksesta useisiin sovelluksiin [289, 290].

7.3.1.3 Vahvistimet

Funktionaalisisista materiaaleista valmistetut toimilaitteet vaativat aina teholähteen. Materiaalista riippuen teholähde voi olla jännitelähde, virtalähde, lämmitin, magneetti tai muu soveltuva laite. Jännitelähde valitaan aina sovelluksen vaatimusten mukaisesti. Teholähteen on yleensä oltava ohjattava. Ohjaus otetaan tavallisesti tietokoneen mittauskortilta joko digitaalisena tai analogisena lähtönä. Myös mikrokontrollereita tai signaaligenaraattoreita voidaan käyttää ohjauslaitteena. Fyysisesti vahvistin sijoittuu ohjaimen ja toimilaitteen väliin. Vahvistimille asetettuja vaatimuksia on lukuisia, ja ne on erikseen arvioitava sovelluksen ja ohjattavan materiaalin mukaan. Pietso materiaalien ohjaukseen on kehitetty lukuisia kaupallisia vaihtoehtoja. Seuraavassa käsitellään niiden erityispiirteitä.

Pietsotoimilaitteet vaatii toimiakseen verraten suuren ohjausjännitteen. Tavallinen pietso-toimilaitte vaatii ohjausjännitettä 100–1000 VDC maksimisiirtymän saavuttamiseksi. Pietso-toimilaitteen jännite-venymä-käyrä on melko lineaarinen. Siinä on kuitenkin havaittavissa hystereesiä, joka riippuu käytetystä materiaalista ja toimilaitteesta. Hystereesin takia pietso-toimilaitte ei palaudu samaa jännite-venymä-arvoreittiä, kuin mitä se venyessään kulkee. Tämä ei suoraan vaikuta vahvistintekniikkaan mutta on otettava huomioon sovelluksia ohjattaessa. Välillisesti hystereesi on kuitenkin vaikuttanut vahvistimiin. Kaupallisissa pietsovahvistimissa on usein sisäänrakennettu suljetun piirin säätö,

joka vähentää hystereesin vaikutusta merkittävästi. Suljetun piirin säätötoimintoa käytettäessä on toimilaitteessa oltava anturi, joka mittaa pietson todellista venymää tai asemaa. Pietsovahvistimilta vaaditaan erittäin hyvälaatuinen ohjaussignaali. Korkean jännitteen on oltava häiriötön ja kohinaton. Vain stabiili jännitelähde takaa hallitun ja tarkan ohjauksen.

Vahvistinrakenteet

Pietsovahvistimien rakenteet vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaan. Vahvistinrakenteina käytetään ainakin seuraavia [289, 279]:

- pöytävahvistimet
- PC-korttivahvistimet
- räkkivahvistimet
- eurokorttivahvistimet
- piirilevyvahvistimet.

Vahvistimen rakennetta valittaessa on erityisesti huomioitava pietsosovelluksen käyttötarkoitus ja toimintaympäristö.

LVPZT-vahvistimet

LVPZT-vahvistimet soveltuvat matalajännitepietsojen ohjaukseen. Tyypillisessä LVPZT-vahvistimessa on 1–3 kanavaa, ja se tuottaa -20–200 VDC:n ohjausjännitteen. Tehoa vahvistimissa on maksimissaan muutamia kymmeniä watteja. Tyypillisesti LVPZT-vahvistimissa on valittavissa seuraavat toiminnot [289, 279]:

- manuaalinen toimintamoodi
- ulkoinen toimintamoodi
- ulkoinen tietokoneohjaus
- manuaalinen suljetun piirin toiminta
- ulkoinen suljetun piirin toiminta
- ulkoinen tietokoneohjattu suljetun piirin toiminta.

Manuaalisessa toimintamoodissa pietson ohjausjännite säädetään manuaalisesti potentio-
metristä. Jännitealue on säädettävissä minimi- ja maksimiohjausjännitteen rajoissa. Manuaalinen toimintamoodi soveltuu järjestelmän testausvaiheen ohjaukseen sekä paikoitus-
ohjauksiin hitaasti käyttäytyvissä systeemeissä. Erilaisissa mittaus- ja paikoitus-
sovelluksissa käytetään manuaalista ohjausmoodia [289, 279].

Ulkoisessa toimintamoodissa vahvistimen ulostulo säädetään analogiasignaalilla. Ulkoinen ohjausjännite on tyypillisesti -2–12 VDC. Vahvistin vahvistaa ulkoisen ohjausjännitteen n. 10-kertaiseksi. Ulkoiseen ohjausjännitteeseen voidaan tyypillisesti lisätä DC-bias-jännitettä siten, että ohjausjännitealue muuttuu arvovälille -12–2 VDC. Ulkoisessa toimintamoodissa vahvistimen ohjaukseen käytetään tavallisesti tietokoneen I/O-korttia, signaaligeneraattoria tai muuta vastaavaa ohjauslaitetta. Ulkoinen toimintamoodi on käytössä dynaamisissa ohjaustilanteissa tai, kun tarvitaan systeemin tarkkaa tietokoneohjausta [289, 279].

Ulkoinen tietokoneohjaus lukee vahvistimelle binäärilukuja esim. RS-232-liitännän kautta. Vahvistinta ohjataan syöttämällä sille binäärilukuja tietokoneelta. Binääriluku vastaa suoraan jännitearvoja vahvistimen minimijännitteen ja maksimijännitteen väliltä [289, 279].

Manuaalinen suljetun piirin toiminta hyödyntää pietsotoimilaitteen aseman mittausta. Pietson asema mitataan siten, että asema-anturin viesti vastaa siirtymää minimin ja maksimin välillä. Manuaalisessa suljetun piirin toimintamoodissa vahvistin laskee suljetun piirin säätöä manuaalisesti annetun asetusarvon mukaan.

Ulkoinen suljetun piirin toiminta on pääpiirteissään samanlainen kuin manuaalinenkin. Erona on ulkoinen asetusarvon syöttö, joka lähetetään pietsovahvistimelle analogiasignaalina esim. tietokoneen I/O-kortilta tai signaaligeneraattorilta.

Ulkoisessa tietokoneohjatussa suljetun piirin toimintamoodissa vahvistinta ohjataan esim. RS232-liitännän kautta vastaavasti kuin ulkoisessa tietokoneohjauksessa. Vahvistin laskee suljetun piirin säätöalgoritmia ohjausviestin mukaisesti [289, 279].

HVPZT-vahvistimet

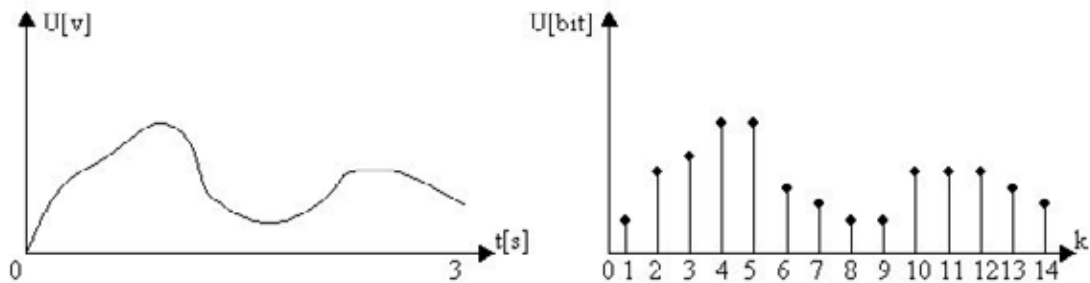
HVPZT-vahvistimet ovat soveltuvia korkeajännitepietsojen ohjaukseen. Tyypillisessä HVPZT-vahvistimessa on 1–3 kanavaa ja se tuottaa -20–1200 VDC:n ohjausjännitteen. Tehoa vahvistimissa on maksimissaan muutamia kymmeniä watteja. Tyypillisesti HVPZT-vahvistimissa on valittavissa samat toiminnot kuin LVPZT-vahvistimissakin. Koska HVPZT-vahvistimet tuottavat n. 10-kertaisen vahvistuksen matalajännitevahvistimiin verrattuna, on niiden laadun oltava korkea. Kohinatasojen on oltava alhaiset, ja korkeajännitesignaalin on oltava virheetön [289, 279].

7.3.1.4 Mittauskortit

Mittauskortti on keskeinen osa PC-pohjaista ohjausjärjestelmää. Mittauskortin valmistajia on useita ja korttivalikoima laaja. Mittauskortti sisältää tavallisesti analogisen ja digitaalisen I/O:n. Lisäksi kortilla saattaa olla laskureita, PWM-lähtöjä ja muita hyödyllisiä

ominaisuuksia. Kortit liitetään PC-pohjaisessa systeemissä sopivaan väylään (tavallisesti ISA-, PCI- tai PCMCIA-väylään).

Mittauskortin tehtävä on muuttaa reaali maailmasta mitattu sähköinen informaatio tietokoneen ymmärtämään muotoon. Tietokone ymmärtää vain digitaalista informaatiota. Analogiset eli jatkuva-aikaiset signaalit on siis muutettava digitaalisiksi signaaleiksi ennen niiden lukemista tietokoneelle. Tämä tapahtuu tavallisesti mittauskortilla sijaitsevilla A/D-muuntimissa. Vastaavasti digitaalinen informaatio voidaan muuttaa analogiseksi signaaliksi D/A-muuntimen avulla. Tietokone ymmärtää suoraan kaksitilaista eli binääristä informaatiota. Digitaalista I/O:ta voikin löytää mittauskortin lisäksi myös PC-tietokoneen porteista (sarja- ja rinnakkaisportit). Kuvassa 93 esitetään analogisen signaalin muuntaminen digitaalisiksi signaaleiksi (diskretointi). Kuvassa 94 puolestaan esitetään PC-pohjaisen säätöjärjestelmän rakenne [291].

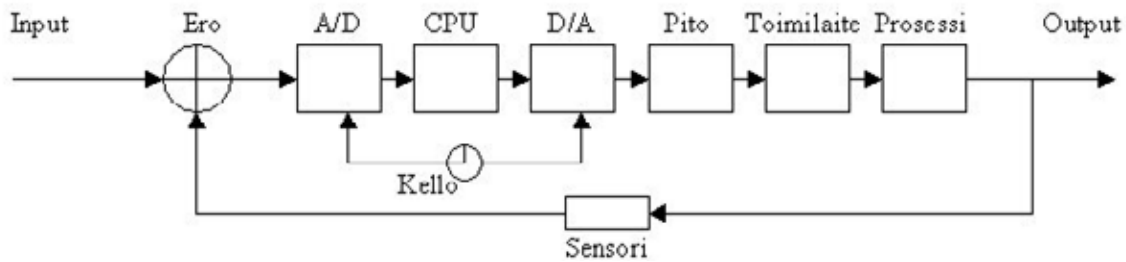


Kuva 93. Analogisen signaalin muuntaminen digitaalisiksi signaaleiksi.

Kuvan 93 merkinnöillä saadaan analogisen signaalin diskretoinnin näyteväli määritettyä. Sanallisesti ilmaistuna näyteväli on tietyn aikajakson ja aikajaksolla otettujen näytteiden lukumäärän suhde. Kuvan merkinnöillä näyteväliksi saadaan:

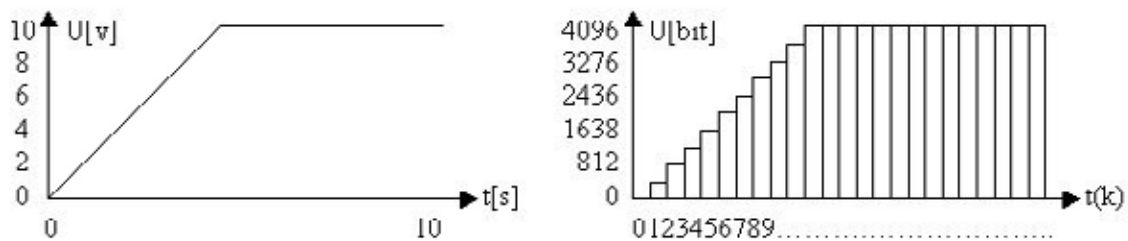
$$t = \frac{3s}{14} = 0.21s \quad (37)$$

Näytevälillä ja edelleen näytteistystaajuudella on tärkeä merkitys signaalien näytteistyksessä. Shannonin näytteistysteorian mukaan näytteistystaajuuden tulisi aina olla vähintään kaksi kertaa suurempi kuin mitattavan signaalin suurimman taajuuden. Mikäli näytteistystaajuus on pienempi kuin Shannonin teoreema edellyttää, tapahtuu laskostumista (signaalin taajuus-sisältö menetetään). Laskostumisessa näytteistetty signaali näyttää "tietokoneen silmissä" olevan matalammalla taajuudella, kuin se todellisuudessa onkaan. Shannonin näytteistysteoria antaa raja-arvon näytteistystaajuudelle. Käytännössä näytteistystaajuuden tulisi kuitenkin olla 5–10 kertaa suurempi kuin mitattavan signaalin suurin taajuus. Laskostumisen välttämiseksi tulisi myös aina käyttää analogisia alipäästösuodattimia (laskostumisenestosuodattimia) anturin ja mittauskortin välissä [291].



Kuva 94. PC-pohjaisen säätöjärjestelmän rakenne.

Mittauskortin A/D-muunnoksen suurimman tarkkuuden määrää A/D-muuntimen resoluutio. Tavallisesti korteilla on 12-bittiset A/D- ja D/A-muuntimet. 12-bittinen muunnin muuntaa mitattavan signaalin $2^{12} = 4096$ osaan. Riippuen signaalin jännitealueesta määräytyy samalla muunnoksen resoluutio. Kuva 95 havainnollistaa 0–10 VDC:n analogisen signaalin diskretoinnissa määräytyvät jännitetasot. A/D-muunnin on 12-bittinen.



Kuva 95. Signaalin diskretoinnissa määräytyvät jännitetasot.

Mittauskorttia PC-pohjaiseen järjestelmään valittaessa tulisi huomioida ainakin seuraavat asiat:

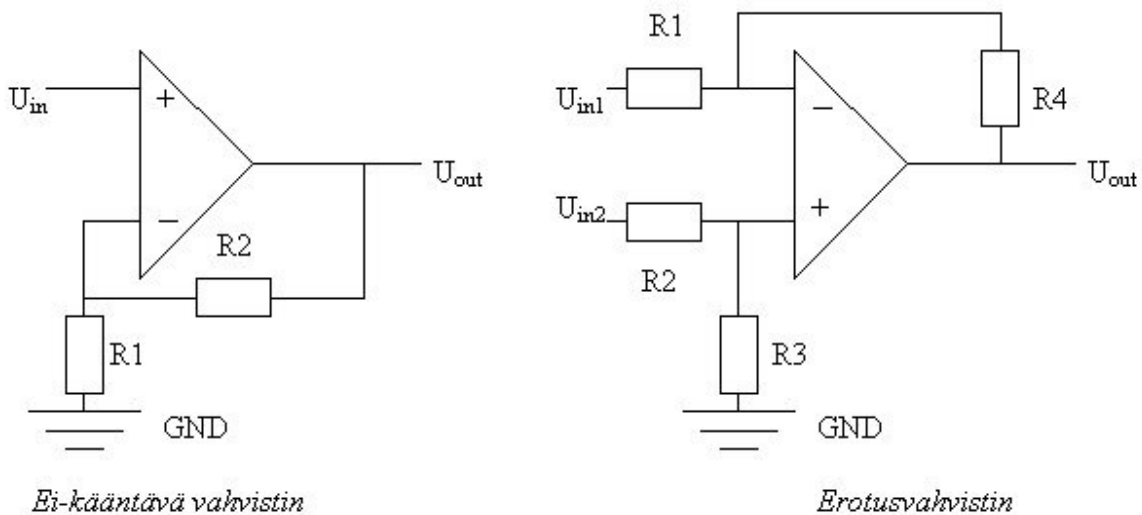
- analogiset sisäänmenot (lukumäärä, jännitealue ja resoluutio)
- analogiset ulostulot (lukumäärä, jännitealue ja resoluutio)
- digitaalinen I/O (kanavien ja porttien lukumäärä)
- laskurit (lukumäärä, laskuripiirin tyyppi ja koko)
- käyttöjärjestelmä tai alusta (PC, PC104, Windows, DOS, Linux)
- väylä (PCI, ISA, PCMCIA)
- hinta
- tuki ja palvelut
- manuaalit
- muut tarvittavat ominaisuudet.

7.3.1.5 Signaalinkäsittelystä

Signaalinkäsittelyä voidaan tehdä analogiaelektroniikkaa tai digitaalitekniikkaa hyödyntäen. Perinteisesti mekatronisen järjestelmän signaalinkäsittely rajoittuu signaalien vahvistamiseen, suodatukseen ja häiriösuojaukseen. Signaalivahvistimien avulla analoginen signaali voidaan vahvistaa sopivalle jännitealueelle. Yksinkertaisimmillaan analogisen signaalin käsittelyyn sopiva kytkentä on operaatiovahvistinkytkentä. Operaatiovahvistin koostuu useista transistoreista ja vastuksista, jotka on yhdistetty yhteen mikropiiriin. Operaatiovahvistimien perustyyppi on yleensä 741-piiri (esim. LM741). Operaatiovahvistimen avulla voidaan toteuttaa useita käyttökelpoisia vahvistin- ja suodatinpiirejä. Tyypillisiä operaatiovahvistimella toteutettuja vahvistinkytkentöjä ovat:

- jänniteseuraaja
- varausvahvistin
- erotusvahvistin
- ei-kääntävä vahvistin
- jännite-virta-muunnin
- instrumentointivahvistin.

Kuvassa 96 esitetään ei-kääntävän jännitevahvistimen ja erotusvahvistimen kytkentäkaaviot.

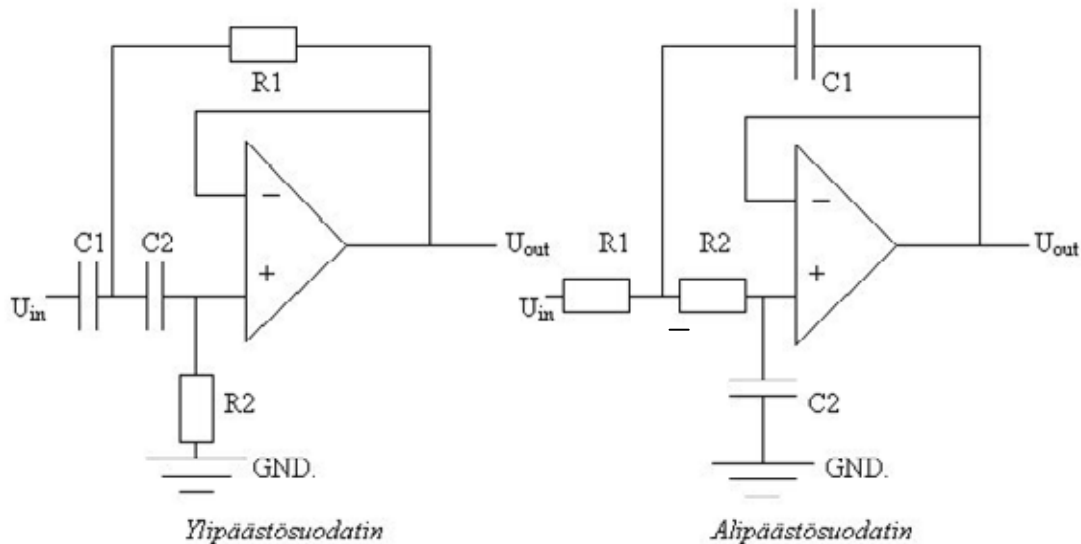


Kuva 96. Esimerkkejä vahvistimien kytkentäkaavioista.

Tyypillisiä operaatiovahvistimella toteutettuja suodatinkytkentöjä taas ovat

- alipäästösuodatin
- ylipäästösuodatin
- kaistanpäästösuodatin.

Kuvassa 97 esitetään yli- ja alipäästösuodattimien kytkentäkaaviot.



Kuva 97. Suodattimien kytkentäkaavioita.

Vahvistimien, suodattimien ja muiden operaatiovahvistinkytkentöjen mitoitusohjeita on löydettävissä kirjallisuudesta sekä operaatiovahvistimien valmistajien teknisistä ohjeista [291, 292].

Digitaalista signaalinkäsittelyä voidaan tehdä näytteistetyille signaalille. Näytteistettyä signaalia voidaan suodattaa ja käsitellä useilla eri menetelmillä joko ON-LINE tai OFF-LINE. Digitaaliset suodattimet jaetaan kahteen päätyyppiin:

- FIR (finite impulse response)
- IIR (infinite impulse response).

Suodattimet jaetaan sen mukaan, millainen niiden vaste on sisäänmenon impulssille. FIR:n ulostulo riippuu vain nykyisestä tai edellisistä sisäänmenoista, kun taas IIR:n ulostulo on riippuvainen edellisten sisäänmenojen lisäksi myös edellisistä ulostuloista. IIR-suodattimessa sisäänmenojen vaikutus näkyy suodattimen ulostulossa äärettömän kauan [293]. FIR-suodatin on aina stabiili, kun taas IIR:n stabiilisuusalue on määriteltävä mitoituksen yhteydessä.

Digitaalisen suodatuksen etuja ovat mm.

- suodattimen parametrisointi on helppoa
- käyttövarmuus
- hyvä tarkkuus ja toistuvuus
- monimutkaiset laskentaoperaatiot mahdollisia.

Signaalien häiriösuojaus on keskeinen osa signaalinkäsittelyä. Hyvällä häiriösuojauksella saadaan toiminnan taso parannettu ja käyttövarmuutta kasvatettua. Häiriöt voivat kytkeytyä signaaleihin monella eri tavalla. Eräitä häiriöiden kytkeytymistapoja ovat [280]

- kapasitiivinen kytkeytyminen
- magneettikentän induktiivinen kytkeytyminen
- säteilemällä etenevien häiriöiden kytkeytyminen.

Häiriöiltä voidaan suojautua seuraavilla menetelmillä [280]:

- huolellinen kotelointi
- huolellinen kaapelointi
- huolellinen maadoitus
- siirtotien oikea valinta.

7.3.2 Pietsomateriaalien ohjaustavoista

Pietsotoimilaitteiden ohjausmenetelmiä on lukuisia. Pietsoja voidaan ohjata suoraan avoimessa piirissä tai vaihtoehtoisesti suljetussa säätöpiirissä. Ohjausmenetelmä on valittava sovelluksen mukaisesti. Tavallisesti pietsotoimilaitteohjaukset jaetaan kolmeen luokkaan [289]:

- DC-ohjaus (servo-ohjaus)
- pulssiohjaus
- AC-ohjaus.

Näitä menetelmiä käytetään tavallisesti lineaaritoimilaitteiden, pulssimoottorien tai ultraäänimoottorien ohjaukseen [289].

Avoimen piirin ohjaus

Avoimen piirin ohjaus tarkoittaa suoraa ohjausta ilman suljettua säätöpiiriä. Pietsotoimilaitteiden avoimen piirin ohjausta voidaan käyttää silloin, kun hystereesin ja lämpötilavirheen vaikutuksella ei ole suurta merkitystä. Tyypillisiä avoimen piirin ohjauksia ovat pulssi- ja ultraäänikäytöt. Mikäli avoimen piirin ohjauksessa ajetaan jyrkkiä herätteitä (askeleita tai impulssimaisia herätteitä), on huomioitava mahdollinen ulostulon suuri ylitys ja mekaaninen värinä ("ringing"). Avoimen piirin osat ovat tyypillisesti seuraavat [289]:

- käskyelin (tietokone tai signaaligeneraattori)
- vahvistin (LVPZT- tai HVPZT-vahvistin)
- toimilaite.

Avoimen piirin ohjauksessa on myös huomioitava toimilaitteen lämpeneminen käytön aikana. Pietsotoimilaitteen lämmitessä tietyn jänniteohjauksen määräämällä aseman arvolla on taipumus ajelehtia suuremmaksi. Ilmiötä kutsutaan nimellä "drifting", ja se johtuu mm. toimilaitteen lämpölaajenemisesta ja muista ei-toivotuista lämpöominaisuuksista [289].

Suljetun piirin säätö

Suljetun piirin säätö muodostuu säädettävästä systeemistä ja säädettävän suureen takaisinkytkennästä. Systeemistä mitataan toimilaitteen asemaa (tai muuta tilaa), ja mitattua suureta verrataan asetus- tai ohjearvoon. Ohjearvon ja mitatun arvon erotuksen perusteella prosessia säädetään siten, että erosuure minimoituu. Suljetun säätöpiirin käyttö on usein perusteltua, sillä pietsomateriaaleissa ilmenee merkittävää hystereesiä ja lämpötilanvaihteluita. Suljetulla säätöpiirillä voidaan myös kompensoida tiettyjä käytön epälineaarisuuksia. Suljetun säätöpiirin osat ovat tavallisesti seuraavat [289]:

- käskyelin (tietokone tai signaaligeneraattori)
- vahvistin (LVPZT- tai HVPZT-vahvistin)
- toimilaite
- anturi (venymäliuska tms. anturi)
- säädin (tietokone, DSP, analogiaelektroniikka)
(säätimenä käytetään tavallisesti P, PD tai PID-säädintä (asemasäädössä)).

Suljetun piirin säädössä päähuomio on kiinnitettävä säätösystemin stabiilisuuteen, ulostulon ylitykseen ja pysyvän tilan poikkeamaan. Pietsotoimilaitteen vaste on tavallisesti erittäin nopea. Pysyvän tilan virheen minimointi voi joissain tapauksessa osoittau-

tua vaikeaksi tai se voi kestää liian kauan. Em. tekijöiden tarkastelussa auttaa, jos säädettävästä systeemistä voidaan muodostaa siirtofunktioesitys. Siirtofunktion avulla voidaan tarkastella systeemin stabiilisuutta ja muita ominaisuuksia suhteellisen tarkasti. Systeemin vaimennuksella vaikutetaan suljetun piirin vasteen (ulostulon) ylitykseen ja asettumisaikaan. Vaimennus voidaan toteuttaa erillisellä vaimenninelementillä tai ottaa huomioon säädintä suunnitellessa. Pienillä vaimennuksen arvoilla ulostulon ylitys on tavallisesti korkea ja systeemi vaimenee hitaasti. Suurilla vaimennuksen arvoilla systeemin vaste vastaavasti hidastuu ja vaimenee nopeasti. Suunnittelussa on huomioitava vaatimukset systeemin halutulle käyttäytymiselle [289].

Polarisaatio-ohjaus

Polarisaatio-ohjausta voidaan käyttää sovelluksissa, joissa hystereesin minimointi on tärkeässä asemassa. Polarisaatio-ohjaus on periaatteessa avoimen piirin ohjausta. Polarisaatio-ohjauksesta käytetään myös nimeä varausohjaus. Polarisaatio-ohjauksessa pietsotoimilaitetta syötetään polarisaatioon verrannollisella varauksella. Varauksen muutos aikayksikössä ilmaisee syöttövirran. Syöttövirtaa voidaan säätää esim. matalajännitteellä. Polarisaatio-ohjausta käytettäessä saadaan esiin virtaan verrannollinen toimilaitteen nopeus. Polarisaatio-ohjaus on todella tehokas vain pulssi- ja AC-ohjauksissa. Mikäli DC-ohjauksessa käytetään polarisaatio-ohjausta, täytyy toimilaitteen resistanssin olla suuri [289].

Pulssiohjaus

Kun pulssimainen sähkökenttä syötetään pietsosähköiselle toimilaitteelle muodostuu siinä mekaanista värähtelyä. Värähtely riippuu pulssin profiilista. Suuri ylitys ja toimilaitteen värähtelyä on myös havaittavissa. Nopea ja tarkka paikoitus on vaikeaa saavuttaa pulssiohjauksella. Pietsotoimilaite voi myös vaurioitua nopeiden sisäisten jännitysten muutosten seurauksena. Kun pulssiohjausta tehdään, on huomioitava pietsotoimilaitteen resonanssitaajuuden ja pulssin leveyden suhde. Voidaan osoittaa [289], että mekaaninen värähtely on pienimmillään silloin, kun pulssin leveys on tarkalleen sama kuin pietsotoimilaitteen resonanssitaajuuden jakso. Pulssin leveyden on vastattava tarkoin tätä jaksoa. Pienikin poikkeama pulssin leveydessä aiheuttaa mekaanista värähtelyä. Ramppimaisella herätteellä ajettaessa on rampin nousuajan vastattava pietsotoimilaitteen resonanssitaajuuden jakson aikaa, mikäli värähtelyltä halutaan välttyä. Pulssiohjauksen eräs sovellus on pulssin leveyden modulointi. Ohjausmenetelmä perustuu toimilaitteen hallittuun pulssitukseen, jossa pulssien työ- ja lepojaksoiden pituutta vaihdellaan. Ohjauspulssin leveys on suoraan verrannollinen haluttuun ohjaukseen.

Pulssin leveyden modulointi (PWM) on mahdollinen ohjaustapa, kun seuraavat ehdot toteutuvat [289]:

- pulssitaajuuden tulee olla vähintään 7 kertaa suurempi kuin ohjauksikäskytaajuuden
- ohjattavan systeemin ominaistajuuden tulee olla huomattavasti alhaisempi kuin pulssitaajuuden. Tämä estää systeemin reagoimisen yksittäisiin pulsseihin.

Pulssin leveyden moduloinnin etuina on vähäinen hystereesi ja yksinkertainen toteutustapa. Kuitenkin pulssin leveyden modulointia käytettäessä on huomioitava toimilaitteen kes-
toikä sekä väsyminen. Nämä tekijät voivat joissain tapauksissa muodostua ongelmiksi.

Resonanssiohjaus

Kun ohjaukseen käytetään vaihtojännitettä, voidaan vaihtojännitteen taajuus säätää siten, että se aiheuttaa resonanssin toimilaitteessa. Ohjaustapaa kutsutaan resonanssiohjaukseksi ja se kuuluu avoimen ohjauksen piiriin. Resonanssiohjauksella voidaan saada aikaan toimilaitteen suuri resonanssivenymä. Resonanssiohjausta käytetään usein pulssimoottorien ja muiden resonanssitoimilaitteiden yhteydessä [290].

7.3.3 Säätojärjestelmän dynamiikka

Käytettävä toimilaitte, ohjausjärjestelmä ja ohjattava systeemi määräävät koko systeemin dynamiikan. Dynamiikalla tarkoitetaan toiminta-aluetta, jolla staattinen tarkastelu ei enää riitä. Nopeissa liikkeissä esim. hitausmassat alkavat vaikuttaa merkittävästi tuloksiin.

Toimilaitteilla on aina oma toiminnallinen taajuuskaistansa. Pietsotoimilaitteiden taajuuskaista on hyvin leveä ja maksimitoimintataajuudet korkeita, kun taas esimerkiksi muistimetallien maksimitoimintataajuudet ovat melko vaatimattomia. Pietsotoimilaitte voi jopa rikkoa itsensä, jos sitä ajetaan liian korkeilla taajuuksilla. Tällöin materiaalin sisäiset voimat kasvavat liian suuriksi. Pietsotoimilaitetta ei saa ajaa lähellä sen sisäistä resonanssitaajuutta.

Myös toimilaittevahvistimilla on oma taajuuskaistansa. Nopeiden pietsotoimilaitteiden yhteydessä on tavallista, että jännitelähde muodostuu systeemin dynamiikkaa rajoittavaksi tekijäksi. PC-pohjaisissa järjestelmissä käyttöjärjestelmät ja ohjausohjelmat muodostavat oman ongelmakenttensä. Ohjausohjelman tarkka ajastus ei aina ole mahdollista nopeissa järjestelmissä. Erilaiset reaaliaikaproessorit ja DSP-kortit tarjoavat ratkaisuja näihin ongelmiin. Seuraavaksi käsitellään erityisesti pietsotoimilaitteiden dynamiikkaan liittyviä asioita [288].

Aktuaattorin resonanssi

Pietsotoimilaitteen resonanssitaajuus määräytyy materiaalin jousiominaisuuksien perusteella. Pietsoaktuaattori voidaan ajatella jouseksi, jolla on materiaalin kimmokertoimen suuruinen jousivakio. Todellisuudessa kimmo-ominaisuudet eivät pysy täysin vakioina, mutta ne antavat riittävän hyviä tuloksia.

Toisesta päästään jäykästi kiinnitetyn aktuaattorin resonanssitaajuus voidaan laskea seuraavasti [288]:

$$f_0 = \left(\frac{1}{2\pi}\right) * \sqrt{\frac{k_T}{m_{eff}}} \quad (38)$$

missä

f_0 = resonanssitaajuus

m_{eff} = kokonaismassa

k_T = jousivakio / kimmokerroin [N/m].

Jos edellisellä kaavalla laskettuun jouseen lisätään ylimääräinen massa M , saadaan resonanssitaajuus laskettua kaavasta 15 [288]:

$$f_1 = f_0 * \sqrt{\frac{m_{eff}}{m_{eff} + M}} \quad (39)$$

missä

f_1 = uusi (laskenut) resonanssitaajuus

Vaihekulma voidaan ratkaista seuraavasta [288]:

$$\varphi = 2 \arctan\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad (40)$$

missä

φ = vaihekulma

f = toimintataajuus.

Nousuaika

Pietsoaktuaattorin nousuaika on lyhyt. Tämä tekee pietsosta erinomaisen toimilaitteen nopeisiin sovelluksiin. Nopea toimilaite vaatii kuitenkin nopean vahvistimen. Vahvistimen nopeutta arvioitaessa on tutkittava, kuinka suuren virran vahvistin voi maksimissaan tuottaa. Vahvistimen suurimman toimintataajuuden voi määrittää esimerkiksi seuraavasta kaavasta [288]:

$$f_{\max} = \frac{i_{\max}}{2CU_{p-p}} \quad (41)$$

missä

i_{\max} = maksimivirta

C = toimilaitteen kapasitanssi

U_{p-p} = peak-to-peak-jännite.

Dynaamiset voimat

Kun pietsotoimilaitteeseen ohjataan jännite, se muuttaa pituuttaan. Mitä suurempi jännitteen muutosnopeus on, sitä enemmän toimilaitteen pituus pyrkii muuttumaan. Toimilaite joutuu kiihdyttämään oman massansa joka kerta jännitteen muuttuessa. Kiihtyvyys aiheuttaa toimilaitteeseen sisäisiä jännityksiä, jotka saattavat kasvaa hyvin suuriksi. Kiihtyvyyden seurauksena voi pahimmillaan olla toimilaitteen rikkoutuminen. Toimilaitteiden dynamiikkaa voidaan parantaa esijännittämällä pietsokeraami. Esijännitys tehdään jousella, joka puristaa keraamista aktuaattoria halutulla voimalla [288].

Toimilaitteen dynaamiset voimat sinimuotoisella jänniteohjauksella voidaan laskea seuraavasti:

$$F_{\text{dyn}} = \pm 4\pi^2 * m_{\text{eff}} * \left(\frac{\Delta L}{2}\right) * f^2 \quad (42)$$

missä

F_{dyn} = dynaaminen voima

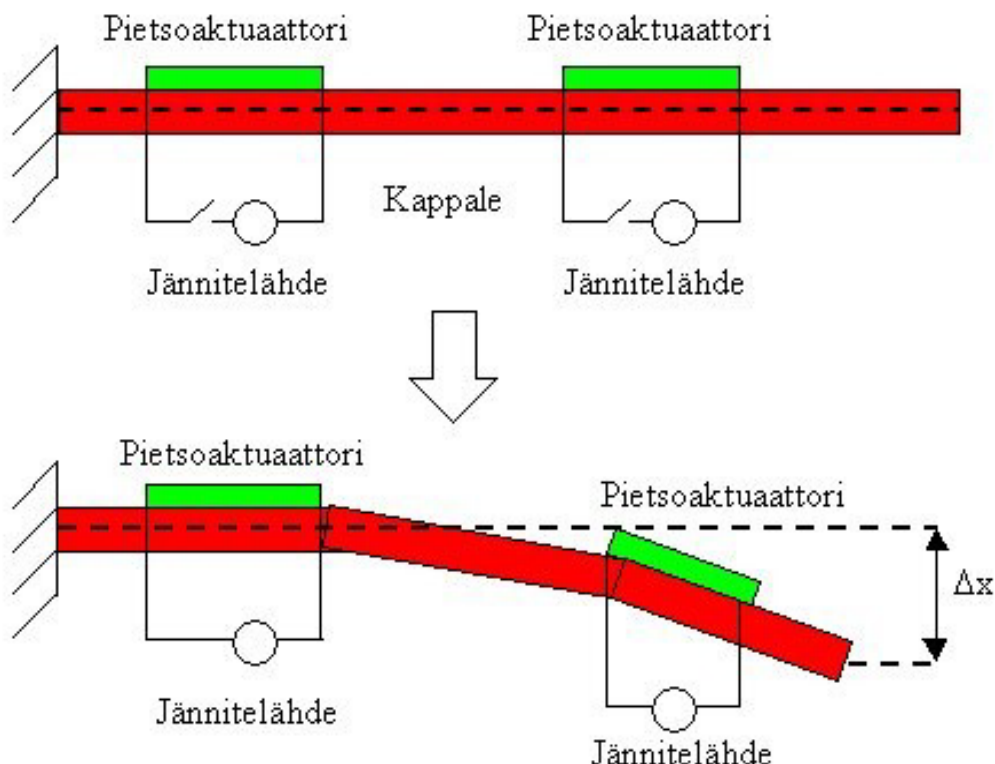
m_{eff} = kokonaismassa

ΔL = liikkeen amplitudi

f = taajuus.

7.4 Muodonhallinta

Muodonhallinnassa on kysymys rakenteen tilaan vaikuttamisesta siten, että haluttu muoto tai asema saavutetaan mahdollisimman tarkasti. Funktionaalisia materiaaleja voidaan hyödyntää muodonhallinnassa monella eri tavalla. Funktionaalisista materiaaleista tehdyt sovellukset on usein rakennettu siten, että aktuaattorin vaste vaikuttaa suoraan sovelluksen tai rakenteen muotoon. Esimerkiksi piezoaktuaattori voidaan liimata palkin pintaan siten, että piezon venymä saa aikaan palkin taipuman. Em. esimerkissä palkin taipuman hallinta on muodonhallintaa. Kuvassa 98 esitetään muodonhallinnan periaate.



Kuva 98. Muodonhallinnan periaate.

Kuvan systeemissä sauvaan on kiinnitetty kaksi piezoaktuaattoria. Kun piezoaktuaattorit ovat jännitteettöminä, on sauvan pään aseman poikkeama keskilinjasta nolla. Kun piezoihin syötetään vakiojännite, muuttuu sauvan pään asema keskilinjasta Δx :n verran. Jos poikkeamaa Δx voidaan hallita tarkasti, puhutaan muodonhallinnasta. Muodonhallinnan sovelluskohteita ovat erilaiset levy- ja palkkirakenteet, virtauspinnat, poikkileikkaukset, tarttumarakenteet ja tarkkuusasemoinnit.

Muodohallinnassa on ratkaistava mm. seuraavia ongelmia [295, 296]:

- toimilaitteiden optimaalinen sijoittelu rakenteeseen
- aktuaattorien määrä
- aktuaattorien ohjauksen laskenta
- sensorien optimaalinen sijoittelu rakenteeseen
- sensorien määrä
- tarvittavat voimat ja siirtymät.

Muodohallinnan ohjausjärjestelmää valittaessa on päätettävä mm. seuraavista asioista:

- Millainen ohjain tarvitaan (PC, mikrokontrolleri, DSP-prosessori)?
- Miten ohjain voidaan sijoittaa?
- Integroidaanko ohjain rakenteeseen?
- Miten tehonsyöttö tapahtuu?
- Millainen on oikea vahvistintekniikka?
- Mitä rakenteen halutaan tekevän?

Ohjausjärjestelmän on yleensä myös oltava kevyt ja kustannuksiltaan alhainen. Muodohallinnan sovelluksissa ohjaintietokoneen tai ohjauselektroniikan nopeus ei välttämättä ole määräävässä asemassa. Usein riittää, että rakenteen muoto muuttuu hitaasti ja ympäristön muutoksiin "sopeutuen". Ohjaimen sijoitus riippuu ohjattavasta rakenteesta. Mikäli ohjauksen kohteena on esimerkiksi virtauspinnan tai -putken muoto, voidaan ohjain sijoittaa ohjattavan kohteen ulkopuolelle. Tällöin ohjaimen kokoon ja painoon kohdistuvat vaatimukset ovat vähäisiä. Mikäli ohjattava muoto on siipi- tai esimerkiksi pyörivä rakenne (tuulimyllyn lapa), voi ohjaimen kokoon, painoon ja sijoitukseen kohdistua paljon suurempia vaatimuksia. Muodohallinnan ohjausjärjestelmää valittaessa joudutaankin usein tekemään kompromisseja systeemin suorituskyvyn ja toteutettavuuden välillä [297, 299, 300].

7.4.1 Muodohallinnan anturit

Muodohallinnassa käytetyt anturit ovat tavallisesti venymäliuskoja. Venymäliuskan käyttöä puoltavat mm. aiemmissa kappaleissa mainitut seikat. Venymäliuskoja on helppo liimata rakenteeseen, ja niiden tarkkuus on yleensä riittävän hyvä muodohallinnan tarpeisiin. Venymäliuskan signaalista voidaan helposti johtaa myös rakenteeseen vaikuttava voima. Myös voiman säätäminen voi olla muodohallinnan tavoitteena. Muita käyttökelpoisia antureita muodohallinnassa ovat LVDT-, kapasitiiviset-, laser- ja optiset

anturit. Optisista antureista valokuituun perustuvat anturit ovat lujitemuovirakenteiden kannalta erittäin mielenkiintoisia. Valokuitua voidaan mm. laminoida lujitemuovirakenteen sisään. Valokuituantureita voidaan käyttää sekä kytkiminä että asema-antureina. Valokuidun ominaisuuksia tarkkailemalla voidaan myös diagnosoida rakenteen vaurioita ja muita vikatilanteita [288, 277, 301].

Aktiiviset materiaalit voivat myös itsessään toimia sensoreina. Pietsosähköinen ilmiö mahdollistaa pietsokiteen mekaanisen puristuksen muuttumisen sähköiseksi energiaksi. PZT-keräämistä ja PVDF-kalvosta voidaankin siten valmistaa antureita, jotka soveltuvat moniin muodonhallinnan tilanteeseen. PVDF-kalvo on polymeerikalvo, jolla on pietsosähköisiä ominaisuuksia. PVDF-kalvosta valmistetut sensorit ovat dynaamisia sensoreita, ts. ne eivät suoraan sovellu pitkäaikaisiin staattisiin kuormitustilanteisiin. Sensori purkaa varauksensa PVDF-kalvon aikavakion määräämässä ajassa. Pietsosähköiset venymäliuskat ovat yleisesti käytettyjä antureita tarkkaa mittausta vaativissa sovelluksissa. Pietsosähköiset venymäliuskat kytketään Wheatstonen siltaan, kuten tavallisetkin venymäliuskat, ja ne ovat eräs tarkimmista venymää mittaavista antureista. Muistimetallejakin voidaan käyttää antureina. Muistimetallin käyttö anturina perustuu materiaalin deformaatioissa syntyvien muutosten mittaamiseen. Periaatteessa kaikkia funktionaalisia materiaaleja voidaan käyttää myös sensoreina. Muodonhallintasovelluksen anturointia suunniteltaessa olisikin hyvä pohtia, voidaanko sensoritoimintoja yhdistää aktuaattoritoimintoihin [302, 303].

7.4.2 Muodonhallinnan toimilaitteet

Muodonhallintaan soveltuvat lähes kaikki funktionaalisista materiaaleista valmistetut toimilaitteet. Toimilaitteelta vaadittavia ominaisuuksia ovat mm. riittävän suuri voima ja siirtymä. Voimaa tarvitaan muuttamaan rakenteen ominaisuuksia, kuten muotoa. Suuri siirtymä on eduksi, jos rakenteen siirtymien on oltava suuria. Rakennetta voidaan itsessään käyttää liikkeenvahvistimena muodonhallintasovelluksissa. Rakenne kannattaakin suunnitella siten, että se vahvistaa toimilaitteen pientä liikettä mahdollisimman paljon. Liikkeen vahvistuksen seurauksena suurin saavutettava voima kuitenkin pienee. Lujitemuovirakenteissa muotoilun vapaus on eräs hyvä ominaisuus. Taulukossa 13 vertaillaan eräiden funktionaalisten materiaalien soveltuvuutta lujitemuovirakenteiden muodonhallintaan.

Taulukko 13. Eräiden funktionaalisten materiaalien soveltuvuus muodonhallintaan [277].

Aktuaattorityyppi	Venymä [%]	Voima [N]	Kaista [Hz]	Ohjaustapa	Soveltuvuus
Pietso sähköiset materiaalit (PZT)	Max. 1	>1000	>1000	Jännite tai virta	Hyvä
Elektrostriktiiviset materiaalit (PNM)	Max. 1	>1000	>1000	Jännite tai virta	Kohtalainen
Magnetrostriktiiviset materiaalit (MSM)	Max. 10	<1000	<100	Magneettikenttä	Kohtalainen
Muistimetallit (NiTiNOL)	Max. 5–7	>100	<5	Lämpötila	Hyvä
Bimetallit	Taipuma vähäinen	Voima vähäinen	<5	Lämpötila	Heikko

* Taulukon arvot ovat ohjeellisia arvoja. Venymän, voiman ja taajuuden arvoihin voidaan vaikuttaa monin tavoin. Esimerkiksi muistimetallitoimilaitetta aktiivisesti jäähdyttämällä saadaan taajuuskaistaa kasvatettua.

Tavallisesti lujitemuovirakenteiden muodonhallinnassa käytetään pino- tai taivutus-tyyppisiä pietsoaktuaattoreita tai muistimetallimateriaaleja (lankoja). Toimilaitteet voidaan kiinnittää esimerkiksi liimaamalla tai laminoimalla ne osaksi lujitemuovista rakennetta. Joissain tapauksissa on edullista kiinnittää toimilaitteet rakenteen ulkopuolelle. Esimerkiksi muistimetalleja käytettäessä rakenteen ulkopuolelle kiinnitettyt aktuaattorit jäähtyvät nopeasti. Rakenteen ulkopuoliset kiinnitykset mahdollistavat myös merkittävät rakenteen siirtymät pienillä toimilaitteen siirtymän arvoilla [304, 305].

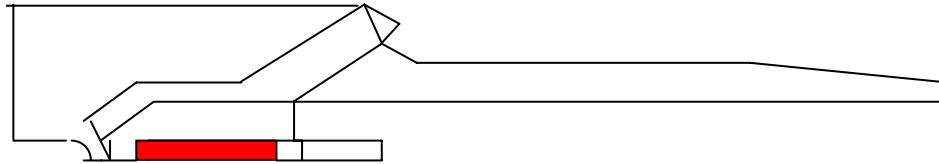
7.4.3 Muodonhallinnan menetelmistä

Muodonhallinnan säätömenetelmiksi soveltuvat periaatteessa kaikki normaalin asemäsäädön menetelmät. Myös suora muodon ohjausta voidaan käyttää. Muodonhallintaa suunniteltaessa kannattaa pohtia millaiseen suorituskykyyn (nopeuteen ja tarkkuuteen) järjestelmän tulee kyetä. Mikäli muodon tarkkuusvaatimukset ovat vaatimattomia, vasteajat pitkiä ja ympäristöolosuhteet vakaita, voi avoimen piirin ohjauskin tuottaa tyydyttävän lopputuloksen. Mikäli avoimen piirin ohjaus ei riitä, on syytä siirtyä perinteisiin säätömenetelmiin, kuten PID-säätöön. Helposti toteutettavista menetelmistä PID-tyyppiset säädinratkaisut ovatkin yleisesti käytössä. Muita tunnettuja säätömenetelmiä voidaan käyttää tarpeen mukaan. Mikäli systeemistä on muodostettu riittävän tarkka malli, antaa malliin perustuva ohjaus hyviä tuloksia. Malliin perustuvaa ohjausta käytettäessä voidaan mallinnusvirheitä korjata perinteisillä säädinratkaisuilla [306].

Mikäli säädettävä muoto on pinta tai muu kolmiulotteinen mutkikas rakenne, on toimilaitteiden sijoituksella, määrällä ja laadulla suuri merkitys ohjauksen lopputulokseen. Muodohallintaa monimutkaiseen rakenteeseen suunniteltaessa kannattaa rakenne mallintaa ja simuloida huolellisesti FEM-ohjelmalla. Rakenteen FEM-mallin avulla voidaan selvittää optimaaliset toimilaitteiden sijoituspaikat sekä muut toimilaitteilta vaadittavat ominaisuudet. Usein FEM-mallinnettu systeemi ja kokeelliset mittaustulokset yhdistetään ja simulointimalli verifioidaan. Mallien verifiointi on tärkeää jatkossa tapahtuvaa suunnittelua varten. Vastaava mallinnus ja simulointi voidaan tehdä myös säätöjärjestelmille. Säätöjärjestelmät verifioidaan FEM-mallin ja kokeellisten mittausten perusteella [277, 307].

7.4.4 Kuvaus tarkkuustarttujasovelluksen ohjausjärjestelmästä

Tässä kappaleessa kuvataan tarkkuustarttujasovelluksessa käytetty muodohallintamenetelmä. Lähteenä on käytetty mm. Heikki Kylmälän diplomityötä ”Aktiivimateriaaleilla toteutettujen toimilaitteiden ohjaus”. Kuvassa 99 on tarttujan periaatekuva [308].



Kuva 99. Tarttujan periaatekuva.

Tarkkuustarttujan ohjausjärjestelmä tehtiin Oulun yliopiston konetekniikan osastolla. Ohjausjärjestelmä toteutettiin PC-pohjaiselle alustalle. Ohjausjärjestelmän osat ovat:

- PC-tietokone
- mittaus- ja ohjauskortti
- jännitevahvistin
- pietsoaktuaattori (materiaali PZT)
- tarttujarakenne
- antureina venymäliuska (anturivahvistimineen)
- ohjelmakoodi tai ohjausohjelma.

Tietokone, käyttöjärjestelmä ja ohjelmistot

PC-tietokone on ohjausjärjestelmän alustana halpa ja tehokas. PC:n ohjelmavalikoima on laaja ja käyttökohteita paljon. PC-pohjainen järjestelmä on helppo valinta laboratorio-sovellukseen, jota käytetään puhtaissa, kuivissa ja valvotuissa olosuhteissa.

Käyttöjärjestelmänä käytettiin MS-DOS-käyttöjärjestelmää. DOS on vanha ja varmatoiminen käyttöjärjestelmä, joka tarjoaa riittävät valmiudet pehmeään reaaliaikakäyttöön. DOS-pohjainen ohjausjärjestelmä on helppo ottaa käyttöön, ja sille on saatavissa tavallisimmat ajurit ja muut tarvittavat ohjelmatyökalut.

Ohjelmointikielenä käytettiin C-kieltä. C on ohjelmointikieli, jonka opetukseen on panostettu paljon aikaisempina vuosina. C-kielellä toteutettu ohjelmakoodi on toimintavarmaa ja suhteellisen helposti ymmärrettävää. Kieli tarjoaa mm. tarvittavat matemaattiset ja graafiset työkalut. C-kieltä voidaan kääntää lukuisilla kääntäjillä. Tarttuja-sovelluksen yhteydessä kääntäjänä käytettiin Borland C/C++ 3.0 -kääntäjää. Ohjelman avulla C-ohjelmakoodista käännettiin ajovalmis tiedosto.

Mittaus- ja ohjauskortti

Mittaus- ja ohjauskorttina käytettiin Adlink 9112 -korttia. Kortti sisältää tarvittavat ominaisuudet koko järjestelmän hallitsemiseksi. Valmistajan ilmoittamia ominaisuuksia ovat mm.

- PCI-väyläliityntä
- 12-bitin (A/D) resoluutio
- 16 tai 8 analogia tuloa (riippuu kytkentätavasta)
- 110 KHz (A/D) näytteistystaajuus
- ohjelmitava kanavavahvistus
- yksi- tai kaksipuoleiset tulosignaalit
- 16 bitin digitaalinen I/O
- kaksi analogista lähtökanavaa
- kolme yleiskäyttöistä laskuria
- kompakti PWB
- 37-pinninen D-tyyppinen liitin.

Kortti kiinnitettiin PC:n vapaaseen PCI-väylään, ja tietokoneeseen asennettiin tarvittavat ajurit ja C-kieltä tukevat ohjelmakirjastot. Kortin manuaali antaa kaikki tarvittavat tiedot käyttöönottoa varten.

Jännitevahvistin

Käytetty pietsotoimilaite tarvitsee toimiakseen suhteellisen suuren käyttöjännitteen. Jännitelähteenä käytettiin PiezoSystem Jenan valmistamaa yksikanavaista jännitevahvistinta. Pietsovahvistin on sellainen, että sitä voidaan ohjata ulkopuolisella ohjausjännitteellä. Vahvistimen maksimaalinen antojännite on 160 VDC ja maksimivirta 40 mA.

Jännitelähteen vaikutus koko systeemin dynamiikkaan on riippuvainen käytetystä pietsoaktuaattorista. Mitä suurempi kapasitanssi aktuaattorilla on, sitä hitaammin (peak to peak) jännitelähde voi pietsoa ohjata. Muodonhallinnan sovelluksissa systeemin nopeuden ei kuitenkaan tarvitse olla kovin suuri. Tässä tapauksessa pietsoimilaitteen suurimmaksi toimintataajuudeksi (maksimiamplitudilla liikuttaessa) saatiin laskettua n. 10 Hz. Tähän sovellukseen käytetty jännitelähde oli riittävän nopea ja tarkka. Hinnaltaan jännitelähde oli edullinen.

Aktuaattori

Aktuaattorina käytettiin esijännittämätöntä ja koteloimatonta pinotyypistä pietsoaktuaattoria. Aktuaattorin pituus on n. 40 mm ja suurin saavutettava liike n. 80 μm . Aktuaattorin kapasitanssi on n. 4 μF . Aktuaattorilla saatiin generoitua tarvittava voimavaikutus. Aktuaattori kestää hyvin puristusta, mutta huonosti veto- ja leikkauskuormia. Materiaalina oli PZT.

Tarttujan rakenne ja anturointi

Tarkkuustarttuja valmistettiin alumiinista. Tarttujan rakenne on sellainen, että se vahvistaa pietsoaktuaattorin liikkeen n. 100-kertaiseksi. Vastaavasti tarttujan puristusvoima pienenee samassa suhteessa. Tartuntavoima on kuitenkin riittävän suuri useisiin käytännön sovelluksiin. Tarttujan mekaaniset mitat ovat n. 100 x 5 x 150 mm ja massa n. 150 g. Anturointi on tehty venymäliuskoilla. Tässä sovelluksessa on mahdollista mitata joko tarttujan sormien liikematkaa tai tarttujan sormien puristusvoimaa. Mikäli puristusvoimaa säädetään, on muodonhallinnan tavoitteena säätää rakenteen muotoa siten, että puristusvoima kehittyy halutulle tasolle.

Ohjausohjelma

Tarttujan ohjausohjelma on monipuolinen tutkimuskäyttöön kehitetty ohjausohjelma. Ohjelma koostuu käyttöliittymästä, jonka kautta voidaan liikkua eri ohjelmalohkojen välillä. Ohjelma on toteutettu siten, että käyttäjällä on mahdollisuus vaikuttaa mahdollisimman moneen muodonhallinnan ohjauksen parametriin. Käyttäjä voi esimerkiksi valita, ajetaanko tarttujaa avoimessa vai suljetussa säätöpiirissä. Lisäksi käyttäjä voi valita käytettävän säätötavan, asetusarvoradan ja säätövälin tai muuttaa säätimen parametreja. Ohjelma koostuu seuraavista päälohkoista:

- käyttöliittymä
- asetusarvogeneraattori
- parametrisointi

- grafiikan piirto eli näyttörutiinit
- ajastin
- datan loggaus
- säätimet.

Tulokset

Muodonhallinnan tuloksina saatiin mm. seuraavaa:

- yleiskäyttöisen pietsoaktuaattorin ohjausohjelman toteutus
- toimiva tarkkuustarttujan muodonhallinta (muodon ohjaus ja säätö)
- tarttujan paikoitustarkkuus 0,2–0,4 μm riippuen annetusta asetusarvosta
- aseman erosuure 1,2–2,4 % tehdyn liikkeen suuruudesta
- tarraimella toteutettavan voiman tarkkuus 0,08 N
- voiman prosentuaalinen erosuure 7,3 % maksimaalisesta voiman muutoksesta
- hystereesin poistaminen säädön avulla.

7.5 Rakenteiden värähtelyn hallinta

Värähtelynvaimennuksessa nopeat funktionaaliset materiaalit ovat viime aikoina saaneet runsaasti huomiota osakseen. Erityisesti rakenteiden värähtelyn vaimentamisessa funktionaalisilla materiaaleilla on nähty olevan laajat käyttömahdollisuudet.

Värähtely voi syntyä useista eri syistä. Värähtelyn lähde voi jatkuva tai satunnainen. Tyypillinen esimerkki jatkuvasta värähtelylähteestä on pyörivä kone. Pyörivät koneet aiheuttavat aina pyörimisnopeuteensa verrannollisia herätteitä alustaansa. Alusta puolestaan reagoi herähteisiin värähtelemällä. Satunnaisia herätelähteitä voivat taas ovat esimerkiksi laitteen ympäristön satunnaiset olosuhdemuutokset (tuuli, sade, törmäys) tai laitteen sisäiset häiriöt (osan rikkoutuminen, kuluminen).

Rakenteet voivat värähdellä vapaasti tai pakotetusti. Esimerkki vapaasta värähtelystä on palkki, joka on tuettu jäykästi juurestaan ja jonka toinen pää on vapaa. Kun palkin päätä poikkeutetaan äkillisesti, herää rakenteessa vapaa taivutusvärähtely. Värähtely vaimenee rakenteen sisäisen vaimennuksen määräämällä tavalla. Kaikissa reaali maailman rakenteissa on vaimennusta. Vaimennuksen seurauksena värähtelyenergia muuttuu vähitellen lämmöksi. Pakotettu värähtely taas on värähtelyä, jonka aiheuttaa jatkuva ja yleensä jaksollinen heräte (esim. pyörivä kone).

Rakenteiden värähtelyt voidaan karkeasti jakaa seuraavasti:

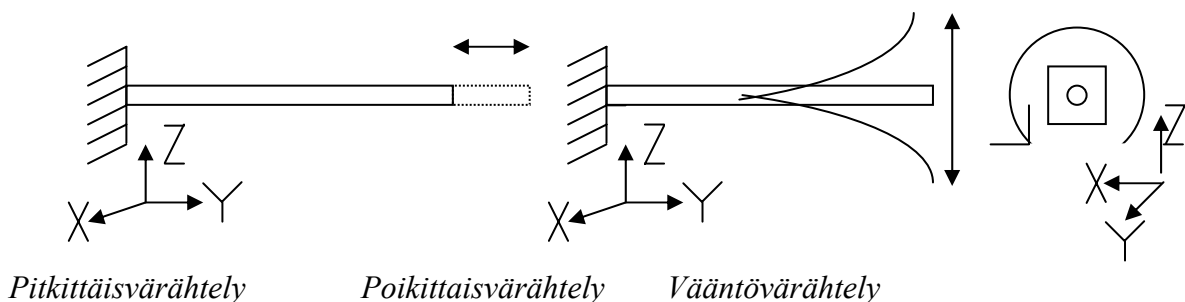
- pitkittäisvärähtelyt
- poikittaisvärähtelyt
- vääntövärähtelyt.

Pitkittäisvärähtelyssä rakenne, esim. palkki, värähtelee pituusakselinsa suunnassa. Pitkittäisvärähtelyllä on suuri energiasisältö, ja värähtelyt ovat suhteellisen korkealla taajuudella.

Poikittais- eli taivutusvärähtelyssä rakenne, esim. palkki, värähtelee kohtisuorassa suunnassa pituusakseliinsa nähden. Poikittaisvärähtelyt ovat matalampitaajuisia kuin pitkittäisvärähtelyt, ja poikittaisvärähtelyn energiasisältö ei ole yhtä suuri. Poikittaisvärähtelyt ja niiden hallinta muodostavat tärkeimmän alueen rakenteiden värähtelyvaimennuksessa.

Vääntövärähtelyssä rakenne, esim. palkki, värähtelee pituusakselinsa ympäri. Palkissa on vaikuttaa tällöin vääntökuorma. Vääntövärähtelyjen hallinta on pääasiassa pyörievien koneiden ongelma. Kuitenkin myös rakenteiden mekaniikan puolella vääntövärähtelyillä on keskeinen merkitys.

Todellisuudessa kaikki kolme värähtelytyyppiä esiintyvät yhtäaikaisesti. Värähtelyhallinnan tehtävänä onkin määrittää se värähtelytyyppi, jonka vaimentamisella on suurin vaikutus rakenteen käyttäytymiseen ja pyrkiä vaimentamaan se mahdollisimman hyvin. Kuvassa 100 esitetään kolme yleisintä värähtelytyyppiä.



Kuva 100. Kolme yleisintä värähtelytyyppiä.

7.5.1 Värähtelyhallinnan anturit

Värähtelyhallinnassa tärkein anturi on kiihtyvyyssanturi. Kiihtyvyyssanturia käytetään rakenteen tietyn pisteen kiihtyvyyksien mittaamiseen. Kiihtyvyyssanturin signaalista voidaan lisäksi laskea rakenteen mittauspisteen nopeudet integroimalla näytteistettyä signaalia ajan suhteen. Toinen tärkeä anturityyppi on asema-anturit. Asemaa mittaavia antureita voidaan tavallisesti käyttää laboratorioympäristössä. Niiden käyttäminen ulko-

tiloissa voi kuitenkin olla vaikeaa. Venymäliuskojen signaaleista voidaan usein ratkaista rakenteen tietyn pisteen asema. Venymäliuskoja siis voidaan pitää asema-anturin korvaajana useissa tilanteissa. Sekä venymäliuskat että kiihtyvyyssanturit soveltuvat kokonsa ja toimintaperiaatteensa puolesta hyvin lujitemuovirakenteen antureiksi. Ongelmia voi kuitenkin muodostua siinä, että ne mittaavat vain tietyn pisteen tai alueen kiihtyvyyttä tai venymää. Rakenteiden värähtelyn mittaamiseen onkin kehitetty jakaantuneita tai modaalisia sensoreita, joilla voidaan mitata suuremman alueen (tai koko rakenteen) tilaa. Värähtelyhallinnan sovelluksissa anturin valintaan vaikuttavia seikkoja ovat myös mm. anturin kaistanleveys, mittausalue, herkkyys ja anturivahvistinten tarve [277, 128, 307].

Kiihtyvyyssanturia käytettäessä on varmistuttava riittävästä mittausalueesta ja laadukkaasta signaalinkäsittelystä. Kiihtyvyyssanturin signaalia joutuu lähes poikkeuksetta suodattamaan analogisella alipäästösuodattimella. Alipäästösuodattimen katkaisutaajuus on valittava siten, että se on hieman suurempi kuin mitattava kiihtyvyyssignaalin taajuus. Esimerkiksi, jos rakenteen vaimennettava ominaisvärähtely on 28 Hz, voidaan alipäästösuodattimen katkaisutaajuudeksi valita 30 Hz. Tällöin Shannonin näytteenotto-teoreeman mukaisesti mittaussysteemin näytteistystaajuuden raja-arvoksi tulee 60 Hz. Kirjallisuudessa on lukuisia esimerkkejä siitä, miten useamman kiihtyvyyssanturin signaalista voidaan johtaa rakenteen värähtelykäyttäytymistä paremmin kuvaava malli. Rakenteen usean pisteen kiihtyvyyksiä tarkastelemalla voidaan värähtelyn etenemistä tutkia hyvin tarkasti. Esimerkiksi yksinkertaisissa palkki- ja levyrakenteissa Eulerin–Bernoullin yhtälö tukee em. tarkastelua [128, 309].

Jakautuneita sensoreita voidaan valmistaa esimerkiksi PVDF-kalvosta. PVDF-kalvosta on esimerkiksi mahdollista valmistaa anturi, joka tunnistaa vain tiettyjä värähtelymoodeja. Tällaisista modaaliantureista on mainintoja mm. lähteissä [128] ja [307].

7.5.2 Värähtelyhallinnan toimilaitteet

Värähtelynvaimennukseen soveltuvat toimilaitteet ovat tavallisesti pietso- tai elektrostriktiivisistä materiaaleista valmistettuja aktuaattoreita. Aktuaattorin valintaan vaikuttavat tekijät ovat pääpiirteissään samat kuin muodonhallinnan toimilaitteillekin. Toimilaitteen ja ohjausjärjestelmän dynamiikan merkitys kuitenkin korostuu varsinkin jäykkien rakenteiden yhteydessä. Rakenteiden ominaisvärähtelytaajuudet ovat tavallisesti melko korkeita, ja varsin merkittäviä monikertoja voi esiintyä jopa satojen hertsien taajuuksilla. Tavallisesti lujitemuovirakenteiden ensimmäinen ominaistajuus on muutamien kymmenien hertsien luokkaa. Värähtelynvaimennussysteemiin dynamiikan on tällöin kyettävä useiden satojen hertsien toimintataajuuksiin maksimaalisilla liikeamplitudeilla.

Muistimetalleilla voidaan toteuttaa matalataajuisien värähtelyjen vaimennukseen soveltuvia toimirakenteita. Muistimetalleilla voidaan myös muuttaa rakenteen jäykkyys-

ominaisuuksia värähtelyn vaimentumisen suhteen edulliseen suuntaan. Sovelluksien kannalta periaatteessa kaikki funktionaaliset materiaalit soveltuvat värähtelyn hallintaan. Kysymys on pikemminkin oikean aktuaattorin löytämisestä oikeaan sovellukseen. Aktuaattorin dynamiikan lisäksi myös muut edellisissä kappaleissa mainitut aktuaattorin valintaan liittyvät tekijät koskevat värähtelynvaimennussovelluksia [128, 310].

7.5.3 Värähtelynhallinnan menetelmistä

Värähtelynhallinnan säätömenetelmiä on lukuisia. Lähes kaikkia tunnettuja säätömenetelmiä voidaan soveltaa värähtelynvaimennussovelluksissa. Värähtelynvaimennuksella voi olla erilaisia tavoitteita. Eräät tutkimukset keskittyvät värähtelyenergian siirtymisen pienentämiseen moniosaisissa rakenteissa [128]. Toisissa tutkimuksissa taas keskitytään haitallisten resonanssipeikkien vaimentamiseen [128, 311]. Sekä eteenpäinettä takaisinkytkettyjä säätömenetelmiä voidaan käyttää [312, 313]. Värähtelynvaimennuksen menetelmistä on vaikeaa kirjoittaa lyhyttä yhteenvetoa. Seuraavassa esitellään kuitenkin kaksi varsin yleisesti käytettyä "erikoismenetelmää" rakenteen värähtelyjen hallitsemiseksi.

Eräs mielenkiintoinen värähtelynvaimennukseen liittyvä näkökohta on rakenteen jäykkyyden muuttaminen aktiivisesti siten, että resonanssia "vältellään". Yksinkertaisimmillaan tämä tarkoittaa sitä, että resonanssikohdat mitataan ja rakenteen jäykkyyttä muutetaan oikealla hetkellä siten, että resonanssikohdan yli "hypätään". Tässä tapauksessa rakenteelle haitallisia resonansseja ei esiinny ollenkaan, tai niiden vaikutus on vähäinen. Muistimetalleilla voidaan toteuttaa edellä mainitun kaltaisia toimirakenteita. Muistimetallilankoja voidaan esimerkiksi laminoida lujitemuovirakenteen sisään. Lankojen pituutta muuttamalla myös rakenteen jäykkyys muuttuu. Muistimetallisovellusten yhteydessä puhutaan usein ASET (Active Strain Energy Tuning) tai APT (Active Property Tuning) -menetelmistä. Em. menetelmiä on menestyksekkäästi käytetty ainakin lähteissä [128] ja [310].

Toinen varsin yleisesti käytetty menetelmä liittyy pakotettujen värähtelyjen vaimentamiseen. HHC (Higher Harmonics Control) -menetelmä on periaatteeltaan suhteellisen yksinkertainen ja on alkujaan kehitetty helikopterin roottorin värähtelyjen hallintaan. Menetelmässä lasketaan tai mitataan rakenteen tai systeemin taajuusvaste, jota hyödynnetään säädössä. Merkittävien herätetaajuuksien tunnistamisen jälkeen ohjausjärjestelmä laskee sopivaa vastavärähtelyä, joka ajetaan toimilaitteella rakenteeseen. Tutkimusten mukaan HHC-menetelmän avulla voidaan merkittävästi pienentää roottorirakenteen värähtelyjä. HHC-menetelmästä voidaan toteuttaa myös adaptiivinen säätöalgoritmi [314].

7.6 Yhteenvetoa ja ajatuksia toimirakenteiden ohjauksesta

Tässä luvussa tarkasteltiin funktionaalisten materiaalien ja lujitemuovisten toimirakenteiden ohjaus- ja säätötekniikoita. Keskiössä ovat funktionaalisista materiaaleista valmistettujen toimilaitteiden lisäksi olleet aktiivimateriaalien ohjaus- ja säätötekniikan perusteet, muodonhallinta sekä värähtelynvaimennus. Lujitemuoviset rakenteet ja niiden asettamat erityisvaatimukset ovat osaltaan olleet mukana kohdan aihepiireissä.

Aktiivinen rakenne vaatii toimiakseen tarkoituksenmukaisesti suunnitellun mekaanisen rakenteen, riittävän määrän havainnointiin tarvittavia sensoreita sekä liikettä tuottavia aktuaattoreita. Rakenteen ohjausjärjestelmän on puolestaan kyettävä hallitsemaan rakenteen käyttäytymistä asetettujen vaatimusten mukaisesti. Sensorien ja aktuaattoreiden määrä, rakenteen koko ja mahdolliset painorajoitukset ovat esimerkkejä tekijöistä, jotka vaikuttavat ohjausjärjestelmän suunnitteluun. Muita huomioitavia tekijöitä voivat olla tehon syöttö, vahvistintekniikka, johdotukset sekä kommunikointi ulkopuolisten laitteiden tai operaattorien kanssa.

Aktiivirakenteen toiminnallisuuden arviointia voidaan tehdä jo suunnitteluvaiheessa käyttäen hyväksi laskennallisia menetelmiä tai tietokoneavusteisia mallinnustyökaluja. Toimilaitteohjausten ja säätömenetelmien suunnittelu voidaan tuoda osaksi muuta mallinnusta. Esimerkkinä kokonaissuunnitteluun soveltuvasta mallinnusympäristöstä on I_Deas-Adams-Simulink-ympäristö. Joustavan kappaleen mekaaninen rakenne ja malli muodostetaan I_Deas:ssa. Malli viedään edelleen Adams-ympäristöön, joka soveltuu dynaamiseen analyysiin. Säätöjärjestelmien simulointiin soveltuva Matlab/Simulink toimii puolestaan yhdessä Adams-ympäristön kanssa.

Aktiivisten rakenteiden toteuttamiseen tarvittavat teknologiat ovat saaneet paljon huomiota kansainvälisessä tutkimuksessa. Tutkimuksen tuloksena toivotaan syntyvän työkaluja, joiden avulla aktiivinen rakenne saadaan kilpailukykyiseksi passiivisen rakenteen kanssa. Aktiivirakenteen ohjausjärjestelmä on keskeinen osa toiminnallisuutta. Järjestelmän suunnittelu ja toteutus vaatii innovatiivisen ja moniteknisen lähestymistavan. Tehtävää ei helpota se tosiseikka, että tällä hetkellä käytävissä olevat teknologiat ovat uusia ja usein vielä tutkimusvaiheessa. Myös järjestelmän hinta muodostuu helposti kalliiksi. Toimirakenteiden toteuttamisessa on siis paljon haasteita, mutta onnistuessaan ”älykäs” rakenne tarjoaa mielenkiintoisia vaihtoehtoja perinteisten rakenteiden rinnalle.

8. Johtopäätökset

Julkaisussa esitellään eri funktionaalisten materiaalien ominaisuuksia, kykyjä, rajoituksia ja käyttötapoja toimirakenteissa sekä toimirakenteiden suunnittelua, mallittamista ja säätöä. Julkaisussa visioidaan myös toimirakenteiden tulevaisuutta osana älykkäitä, kommunikoivia järjestelmiä. Vaikka julkaisun fokus on lujitemuovisessa toimirakenteissa, käsitellään julkaisussa myös muuntyyppisiä toimirakenteita.

Rakenteiden kommunikaatio- ja etäohjausvaatimusten sekä elinikäajattelun yleistyessä toimirakenteet tullevat pikkuhiljaa yleistymään eri aloilla. Keveissä kuormaa kantavissa rakenteissa lujitemuovinen toimirakenne on potentiaalinen vaihtoehto ja lujitemuovi tarjoaa hyvät mahdollisuudet rakenteen räätälöintiin sekä rakenteen passiivisen ja aktiivisen älykkyyden yhdistämiseen.

Funktionaalisiin materiaaleihin perustuvia sensoreita käytetään jo yleisesti. Lujitemuovirakenteiden kunnonvalvontasovelluksia tutkitaan paljon ja ne tulevat yleistymään. Tulevaisuudessa monet rakenteet tarkkailevat ympäristöään ja omaa kuntoaan, adaptoituvat muutoksiin ja kommunikoivat aktiivisesti.

Suurimman haasteen funktionaalisiin materiaaleihin perustuvien aktuaattoreiden käyttämisessä toimirakenteissa muodostaa aktuaattoreiden liikkeen- ja voimantuoton rajallisuus. Aktuaattoritekniikka kehittyy kuitenkin vauhdilla. Lisäksi liikkeen vahvistustekniikoilla ja muilla rakenneratkaisuilla voidaan lieventää näitä rajoituksia.

Toistaiseksi suoraan liikkeen tuottamiseen aktuaattoreilla perustuvat muodonhallinta ja värähtelynvaimennus sopivat vain suhteellisen pieniin tai joustaviin rakenteisiin. Sen sijaan erilaiset puoliaktiiviset tekniikat, kuten MR-vaimentimet, säädettävät kitkavaimentimet ja ACLD, ovat varsin lupaavia ja osin jo käytössä järeämmissäkin rakenteissa. Komposiittirakenteen räätälöinti, passiivisen ja aktiivisen älykkyyden yhdistäminen ja erilaiset virtaussovellukset omaavat potentiaalia esimerkiksi tuulivoimaloissa, lentolaitteissa ja myös vesikulkuneuvoissa. Läpimurtoja lienee odotettavissa siellä täällä muuallakin, erityisesti pienikokoisissa rakenteissa ja tarkkuussovelluksissa sekä etäohjatuissa systeemeissä.

Toimirakenteiden perusluonne on monitekninen, ja siksi toimirakenteen luominen vaatii monen eri alan asiantuntijoiden tiivistä yhteistyötä. Tätä julkaisua voidaan käyttää lähdemateriaalina hankkeita suunniteltaessa. Julkaisua voidaan käyttää myös antamaan yritysmaailman edustajille ideoita uusien tuotteiden kehittämiseen sulautetun rakenteilyn pohjalta. Lisäksi julkaisu voi toimia perusoppimateriaalina toimirakennetekniikoista, erityisesti materiaalien, mallituksen ja säädön osalta.

Lähteet

1. IntelliMat: smartmaterials.info, <http://www.smartmaterials.info/>
2. Piezo Film Sensors Technical Manual. Measurement Specialties Inc. P/N 1005663-1, REV B 02, APR 99. <http://www.msiusa.com/>
3. TRS Ceramics. <http://www.trsceramics.com/>
4. SRI International. <http://www.sri.com/>
5. Company Expertise: Shape Memory Alloy. Midé Technology Corporation. <http://www.mide.com/>
6. ETREMA Products, Inc. <http://www.etrema-usa.com/terfenol/index.asp>
7. Schoenecker, A., Sporn, D., Watzka, W., Seffner, L., Pannkoke, K. & Wierach, P. High-performance piezoelectric thin fibers and sheets as functional components for smart materials. Proceedings of SPIE, Vol. 3991, Smart Structures and Materials 2000: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies. Jack H. Jacobs, Ed. S. 11–16.
8. Sester, M. & Poizat, C. Simulation techniques for piezoelectric composite materials and their application to smart structures. Proceedings of SPIE, Vol. 3985, Smart Structures and Materials 2000: Smart Structures and Integrated Systems. Norman M. Wereley, Ed. S. 750–758.
9. Piezo Systems, Inc. <http://www.piezo.com/>
10. Dausch, D. E. & Wise, S. A. Compositional Effects on Electromechanical Degradation of RAINBOW Actuators. NASA/TM-1998-206282. Langley Research Center, Hampton, Virginia.
11. THUNDER Whitepaper. FACE International Corporation. <http://www.face-int.com/pdf/whtpaper.pdf>
12. Yoon, K. Joon, Shin, Seokjun, Park, Hoon C. & Goo, Nam Seo. Design and manufacture of a lightweight piezo-composite curved actuator. Institute of Physics Publishing: Smart Materials and Structures 11, 2002, s.163–168. PII: S0964-1726(02)30251-9
13. Piezo Products. CEDRAT Technologies. <http://www.cedrat.com/Piezo/piezo-products.htm/>

14. Srinivasan, A. V., McFarland, D. M., Canistraro, H. A. & Begg, E. K. Control of high-frequency smart structures through embedded NiTiNOL fibers. Proceedings of SPIE, Vol. 2779, 3rd International Conference on Intelligent Materials and 3rd European Conference on Smart Structures and Materials, Pierre-F. P. Gobin, Ed. S. 700–705.
15. Rediniotis, O. K. & Lagoudas, D. C. Shape Memory Alloy Actuators as Locomotor Muscles. Aerospace Engineering Department, Texas A&M University, College Station, TX 77843-3141
16. Frampton, K. D. A Comparison of Hierarchies for Decentralized Vibration Control.
17. Davies, H., Everall, L. A. & Gallon, A. M. Application of smart optical fiber sensors for structural load monitoring. Proceedings of SPIE, Vol. 4332, Smart Structures and Materials 2001: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, Anna-Maria R. McGowan; Ed. S. 114–123.
18. Ceysson, O., Risson, T. & Salvia, M. Carbon fibres: sensor components for smart materials. Proceedings of SPIE, Vol. 2779, 3rd International Conference on Intelligent Materials and 3rd European Conference on Smart Structures and Materials, Pierre-F. P. Gobin, Ed. S. 136–141.
19. Mook, G., Pohl, J., Michel, F. & Herold, S. Damage detection and characterization in smart CFRP composites. Proceedings of SPIE, Vol. 4703, Nondestructive Evaluation and Reliability of Micro- and Nanomaterial Systems, Norbert Meyendorf, George Y. Baaklini & Bernd Michel, Eds. S. 120–128.
20. Dry, C. M. Smart multiphase composite materials that repair themselves by a release of liquids that become solids. Proceedings of SPIE, Vol. 2189, Smart Structures and Materials 1994: Smart Materials, Vijay K. Varadan, Ed. S. 62–70.
21. Yang, Hong, Tao, Baoqi, Qiu, Hao Liang, Dakai. Self-diagnosis and self-repair using hollow-center optical fiber in smart structure. Proceedings of SPIE, Vol. 4221, Optical Measurement and Nondestructive Testing: Techniques and Applications, Feijun Song, Frank Chen, Michael Y. Hung & H. M. Shang, Eds. S. 264–268.
22. Birman, V. Stiffness of smart composites with shape memory alloy fibers in the presence of matrix cracks. Proceedings of SPIE, Vol. 3667, Smart Structures and Materials 1999: Mathematics and Control in Smart Structures, Vasundara V. Varadan, Ed. S. 578–585.

23. Michaud, V. J., Schrooten, J., Parlinska, M., Gotthardt, R. & Bidaux, J.-E. Shape memory alloy wires turn composites into smart structures. Part II: manufacturing and properties. Proceedings of SPIE, Vol. 4698, Smart Structures and Materials 2002: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, Anna-Maria R. McGowan, Ed. S. 406–415.
24. Friend, C. M. & Morgan, N. B. Cyclic response of shape memory alloy smart composite beams. Proceedings of SPIE, Vol. 2361, Second European Conference on Smart Structures and Materials, Alaster McDonach, Peter T. Gardiner, Ron S. McEwen & Brian Culshaw, Eds. S. 94–97.
25. Xu, Y., Otsuka, K., Toyama, N., Yoshida, H., Jang, B.-K., Nagai, H., Oishi, R. & Kishi, T. Fabrication of TiNi/CFRP smart composite using cold drawn TiNi wires. Proceedings of SPIE, Vol. 4699, Smart Structures and Materials 2002: Active Materials: Behavior and Mechanics, Christopher S. Lynch, Ed. S. 564–574.
26. Jang, B.-K., Koo, J-H, Toyama, N., Akimune, Y. & Kishi, T. Influence of lamination direction on fracture behavior and mechanical properties of TiNi SMA wire-embedded CFRP smart composites. Proceedings of SPIE Vol. 4326, Smart Structures and Materials 2001: Modelling, Signal Processing, and Control in Smart Structures, Vittal S. Raom, Ed. S. 188–197.
27. <http://www.msiousa.com/piezo/>
28. <http://www.etrema-usa.com>
29. Claus R. O. Smart Materials and Structures Short Course. Virginia Tech, Blacksburg, USA, May 13–15, 2002.
30. Mueller, D. S. Summary of fixed instrumentation for field measurement of scour and deposition. <http://water.usgs.gov/osw/techniques/sedtech21/mueller2.html>. Suljettu
31. Hunt, S., Rudge, A., Carey, M., Parfitt, M., Chase, J. G. & Huntsman, I. Micro-electro-mechanical-systems direct fluid shear stress sensor arrays for flow control. Smart Mater. Struct., Vol. 11, 2002, s. 617–621.
32. Ho, C.-M. & Tai, Y.-C. Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS) and fluid flows. Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 30, 1998, pp. 579–612.
33. Kallio, M. & Ruuskanen, P. Smart polymers and elastomers, properties and applications. VTT Processes, Materials and Chemicals, Presentation, 4th December, 2002.
34. http://www.ceramtec.de/intl/prod/ta=prod*Geschaeftsbereich/la=en/le=0/

35. Wang, J. Gyros for RC helicopters. <http://www.heliproz.com/jwgyros.html>
36. Mita, A. Fiber Bragg Grating-Based Acceleration sensors for civil and building structures. Proc. Int. Workshop on Present and Future in Health Monitoring, Bauhaus-University Weimar, Germany, Sept. 3–6 2000. <http://www.mita.sd.keio.ac.jp>
37. Borenstein, J., Everett, H. R. & Feng L. Where am I ? Systems and methods for mobile robot positioning, Chapter 2: heading sensors. <http://www.eng.yale.edu/ee-labs/morse/other/intro.html>
38. <http://www.heliproz.com/hpnews.html>
39. Marek, J. Silicon microsystems for automotive applications. <http://www.imec.be/essderc/papers-97/305.pdf>
40. <http://www.hobbico.com/accys/hcam4010.html>
41. Strock, H. B. Emerging smart material systems: Opportunities for ceramics. <http://www.spie.org/web/oer/february/feb98/smartmat.html> Suljettu.
42. Sippola, M., Muukkonen, T. & Kantola, L. On the shape and vibration control of a flexible glass fiber laminated beam. Karhunen, J. (toim.). OST-03, Symposium on Machine Design, Raportti no 120, 2003. S. 71–80. Yht. 284 s.
43. Ceniceros, J. M., Jeppesen, C. D. & Ortiz, G. G. Vibration platform testbed for deep space acquisition, tracking and pointing. <http://lasers.jpl.nasa.gov/PAPERS/ATP/4272-33.pdf>
44. Horner, G. C., Bromberg, L. & Teter, J. P. A cryogenic magnetostrictive actuator using a persistent high temperature superconducting magnet, Part 1: Concept and design. <http://techreports.larc.nasa.gov/ltrs/PDF/1999/mtg/NASA-99-6spie-gchl.pdf>
45. Stanewsky, E. Adaptive wing and flow control technology. Progress in Aerospace Sciences, 2001. Vol. 37, Issue 7, s. 583–667.
46. Munday, D. & Jacob, J. Active control of separation on a wing with conformal chamber. <http://www.engr.uky.edu/~munday/pubs/munday-reno2001.ppt>
47. NASA Aerospace Technology News. http://www.aero-space.nasa.gov/curevent/news/vol2_iss6/bird.htm
48. SPA:Helicopter blade-vortex interaction noise suppression. <http://www.spa.com/smtnoise.htm>

49. Shih, C. & Ho, C.-M. Recent advances of MEMS applications in flow control.
<http://www.eng.fsu.edu/~shih/homepage/India%20invited%20talk%202000.pdf>
50. Flow control research at Georgia Tech, USA.
<http://mems.mirc.gatech.edu/research/flow.html>
51. Darpa Tactical Technology Office, USA.
<http://www.darpa.mil/tto/programs/mafc.html>
52. Paap, K. L., Christaller, T. & Kirchner, F. A robot snake to inspect broken buildings, Proc of the 2000 IEEE /RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems.
<http://ais.gmd.de/BAR/papers/e113.pdf>
53. Hirata, K., Takimoto, T. & Tamura K. Study on turning performance of a fish robot.
<http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/list/fish/isamec2000.pdf>
54. http://www.smartcarsdirect.co.uk/htmlpages/technical/s_crashtests.html
55. Choi, S., Lee, J. J., Seo, D. C. & Choi, S. W. The active buckling control of laminated composite beams with embedded shape memory alloy wires. Composite Structures, 1999. Vol. 47, s. 679–686.
56. Batra, R. C. & Geng, T. S. Enhancement of the dynamic buckling load for a plate by using piezoceramic actuators. Smart Mater Struct, 2001. Vol. 10, s. 925–933.
57. Geng, T. S. Enhancement of the dynamic buckling load and analysis of active constrained layer damping with extension and shear mode piezoceramic actuators.
<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-05302002-150756/unrestricted/geng.pdf>
58. Lee, H. J. & Lee J. J. Evaluation of the characteristics of a shape memory alloy spring actuator. Smart Mater Struct, 2000. Vol. 9, s. 817–823.
59. Young, A. J. Active control of vibration in stiffened structures. Doctoral Thesis, Dept. of Mech. Eng., University of Adelaide, South Australia,
<http://www.mecheng.adelaide.edu.au//anvc/publications/papers/1995/ajy-thesis.pdf>
60. Chattopadhyay, A., Liu Q. & Gu, H. Vibration reduction in rotor blades using active composite box beam. AIAA Journal, 2000. Vol. 38, No 7, s. 1125–1131.
61. Chattopadhyay, A., Gu, H. & Liu, Q. Modeling of smart composite box beams with nonlinear induced strain. Composites: Part B, 1999. Vol. 30, No 6, s. 603–612.

62. Choi, S. B., Park, Y. K. & Fukuda, T. A proof-of-concept investigation on active vibration control of hybrid smart structures. *Mechatronics*, 1998. Vol. 8, s. 673–689.
63. Gaudenzi, P., Carbonaro, R. & Barboni, R. Vibration control of an active laminated beam. *Composite Structures*, 1997. Vol. 38, s. 413–420.
64. Han, J.-H., Cho, K.-D., Youn, S.-H. & Lee, I. Vibration and actuation characteristics of composite structures with a bonded piezo-ceramic actuator. *Smart Mater Struct*, 1999. Vol. 8, No 1, s. 136–143.
65. Han, J.-H., Rew, K.-H. & Lee, I. An experimental study of active vibration control of composite structures with a piezo-film sensor. *Smart Mater Struct*, 1997. Vol. 6, s. 549–558.
66. Kang, Y. K., Kim, M. H., Park, H. C. & Agrawal, B. Multi-modal vibration control of laminated composite plates using piezoceramic sensors/actuators. *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, 1998. Vol. 9, s. 988–990.
67. Kang, Y. K., Park, H. C., Hwang, W. & Han, K. S. Prediction and measurement of modal damping of laminated composite beams with piezoceramic sensor/actuator. *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, 1996. Vol. 7, s. 25–32.
68. Lee, S.-W. R. & Li, H. L. Computational analysis for the torsional vibration control of an anti-symmetric piezoelectric composite laminate. *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, 2000. Vol. 10, s. 530–533.
69. Takawa, T., Fukuda, T. & Takada, T. Flexural-torsion coupling vibration control of fiber composite cantilevered beam by using piezoceramic actuators. *Smart Mater Struct*, 1997. Vol. 6, s. 477–484.
70. Yang, S. M. & Bian, J. J. Vibration suppression experiments on composite laminated plates using an embedded piezoelectric sensor and actuator. *Smart Mater Struct*, 1996. Vol. 5, s. 501–507.
71. Yang, S. M. & Jeng, C. A. Structural vibration suppression by concurrent piezoelectric sensor and actuator. *Smart Mater Struct*, 1996. Vol. 5, s. 806–813.
72. Yang, S. M. & Jeng, J. A. Vibration control of a composite plate with embedded optical fiber sensor and piezoelectric actuator. *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, 1997. Vol. 8, s. 393–400.
73. Yang, S. M. & Lee, Y. J. Interaction of structure vibration and piezoelectric actuation. *Smart Mater Struct*, 1994. Vol. 3, s. 494–500.

74. Yang, S. M. & Lee, Y. J. Vibration suppression with optimal sensor/actuator location and feedback gain. *Smart Mater Struct*, 1992. Vol. 2, s. 232–239.
75. College of engineering, University of Saskatchewan, Class CE 804.3 Class notes, http://www.engr.usask.ca/classes/CE/804/notes/har_sdof.pdf Suljettu.
76. Holnicki-Szulc, J., Pawlowski, P. & Wiklo, M. High-performance impact absorbing materials – the concept, design tools and applications. *Smart Mater Struct*, 2003. Vol. 12, s. 461–467.
77. Granata, K. P., Abel, M. F. & Damiano, D. L. Joint stiffness control in a forward-dynamic model of bipedal gait. http://www.indiana.edu/~hperk500/gcma99a/granata_p.pdf
78. Jaime, R.-P. On the control of paraplegic standing using functional electrical stimulation. <http://www.mech.gla.ac.uk/Postgrad/thesis/Thesis.html?ThesisID=47> Suljettu.
79. UBC Forestry, Canada. <http://www.forestry.ubc.ca/brchline/95sept/page4.html>
80. Miyamori, Y., Obata, T., Hayashikawa, T. & Sato, K. Study on active vibration control of cable structure by using adjustable stiffness system. The eighth East Asia–Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 5–7 December, 2001, Nanyang Technological University, Singapore. http://www.kozo.eng.hokudai.ac.jp/~bridge/miyamo/doc/easec8_1067.pdf
81. Zhou, F. & Spencer, B. F. A new advance in seismic isolation, energy dissipation and control of structures. 392 s. ISBN 7-5028-1730-1.
82. Iemura, H., Igarashi, A. & Nakata, N. Full-scale verification tests of semi-active control of structures using variable joint damper system. <http://eqgate.kuciv.kyoto-u.ac.jp/~toyooka/material/Paper3WCSC.pdf>
83. Holdhusen, M. H. & Cunefare, K. A. State-switched absorber used for vibration control. <http://www.me.gatech.edu/acoustics/IAL/projects/holdhusen/> Suljettu.
84. Arockiasamy, M. & Sandepudi, K. Active deformation control of bridges prestressed with aramid fiber reinforced plastic (AFRP) cables. <http://www11.myflorida.com/structures/Research%20Projects/active%20deformation%20control%20of%20bridges%20prestressed%20with%20aramid%20fiber%20reinforced%20plastic.pdf> Suljettu.

85. Washington University Structural Control and Earthquake Engineering Laboratory, USA. <http://wusceel.cive.wustl.edu/quake/research.htm#mrd>
86. Dyke, S. J., Spencer, B. F., Sain, M. K. & Carlson, J. D. An experimental study of MR dampers for seismic protection. *Smart Mater Struct*, 1998. Vol. 7, s. 693–703.
87. Gluck, J. & Ribakov, Y. The influence of dampers on earthquake response of tall buildings. In: Topping, B.H.V. (ed.). *Civil and Structural Engineering Computing*. Saxe-Coburg, UK, 2001. http://www.saxe-oburg.co.uk/pubs/contents/sl01_15.htm
88. Lord Corporation, Lord Corporation. http://www.rheonetic.com/seismic_mitigation.htm
89. Ni, Y. Q., Ko, J. M., Ying, Z. G., Liu, H. J. & Chen, Y. Development of smart damping systems for vibration control of civil engineering structures. Hong Kong Polytechnic University. <http://www.cse.polyu.edu.hk/~dynamics/assets/pdf/beijing1.pdf>
90. Hitchcock, G. H., Gordaninejad, F. & Wang, X. A new by-pass, fail-safe, magneto-rheological fluid damper. *Proc of SPIE Conf on Smart Materials and Structures*, San Diego, March 2002. <http://web.me.unr.edu/ciml/11.pdf>
91. Kerr, J. New MagneRide shock system offers better ride. Yahoo! Canada Autos. <http://ca.autos.yahoo.com/021120/11/qd3f.html> Suljettu.
92. <http://www.cadillac.com/cadillacjsp/models/gallery.jsp?model=escalade>
93. Varadan, V. V., Lim, Y.-H. & Varadan, V. K. Closed loop finite-element modeling of active/passive damping in structural vibration control. *Smart Mater Struct*, 1996. Vol. 5, s. 685–694.
94. <http://www.swedac-acoustic.se/>
95. Joyal, B. Constrained-layer systems provide weight-efficient, high-level damping. EAR Specialty Composites. <http://www.earsc.com/pdfs/engineering/CLD.pdf>
96. Gordon, S. Analysis of damping treatments applied to the MAP spacecraft. NASA Workshop on FEM and FEA, FEMCI group, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 18th May 2000. http://femci.gsfc.nasa.gov/workshop/2000/presentations/11_1530_Gordon.pdf

97. Wereley, N. M. Composite rotorcraft flexbeams with viscoelastic damping layers for aeromechanical stability augmentation, *Mechanics and Mechanisms of Material Damping*. American Society of Testing and Materials, 1997. ASTM STP, Vol. 1304. S. 62–77. <http://www.enaе.umd.edu/AGRC/faculty/Wereley/published/Abstracts/abstract13.htm>
98. Johansson, B. & Jackson, P. Damping of glass reinforced plastics in marine applications. Antiphon Inc. <http://www.tpcdayton.com/CD/NCDData/PDP%20Paper.pdf>
99. Illaire, H. Vibration control using Active Constrained Layer Damping. European Doctorate in Sound and Vibration Studies, University of Southampton, UK <http://www.isvr.soton.ac.uk/edsvs/pro07.htm>
100. Hildebrand, M., Vessonen, I. & Holopainen, J. Avoauton värähtelyn hallinta – kotelopalkkien vaimennuskokeet – kokeet lisäpalkeilla. VTT Valmistustekniikka, VAL2241C/94/LAI, Espoo, 1994.
101. The Shear Tube, Shear Damper for Precision Machine Tools. http://pergatory.mit.edu/perg/awards/shear_tube.html
102. Hallum, D. L. Out of the lab and into the shop, *American Machinist*, October 1994. http://demg.penton.com/content/am/out_of_the_box.pdf
103. Kawiecki, G. Current research, Segmented Active Constrained Layer Damping Treatments. http://www.engr.utk.edu/maes/maesold/f&s/prof_research/kawiecki/KAWCR1.htm Suljettu.
104. Agnes, G. S. & Napolitano, K. Active constrained layer viscoelastic damping. Proc of 34th SDM Conf, April 1993. S. 3499–3506.
105. Azvine, B., Tomlinson, G. & Wynne, R. Initial studies into the use of active constrained-layer damping for controlling resonant vibrations. In: Johnson C. (ed.). Proc of Smart Structures and Materials Conf on passive damping, Vol. 2193, Orlando, Florida, 1994. S. 138–149.
106. Baz, A. Active constrained layer damping. US Patent #5, 485,053, 1996.
107. Baz, A. Boundary control of beams using active constrained layer damping. ASME J of Vibration and Acoustics, 1997. Vol. 199, s. 166–172.
108. Baz, A. Robust control of active constrained layer damping. J. of Sound and Vibration, 1998. Vol. 221, No 3, s. 467–480.

109. Baz, A. & Ro, J. Partial treatment of flexible beams with active constrained layer damping. Conf. of Eng Sci. Soc., Charlottesville, VA, June 1993, ASME-AMD, Vol. 167. S. 61–80.
110. Baz, A. & Ro, J. Actively-controlled constrained layer damping. Sound & Vibration Magazine, 1994. Vol. 28, No 3, s. 18–21.
111. Baz, A. & Ro, J. Optimum design and control of active constrained layer damping. ASME J. of Vibration and Acoustics, 1995. Vol. 117B, s. 135–144.
112. Edberg, D. & Bicos, A. Design and development of passive and active damping concepts for adaptive structures. In: Knowles G. (ed.). Conf on Active Materials and Adaptive Structures. IOP Publishing, Bristol, UK, 1992. S. 377–382.
113. Plump, J. & Hubbard, J. E. Modeling of an active constrained layer damper. Twelveth Int. Congr. on Acoustics, Paper # D41, Toronto, Canada, 1986. S. 24–31.
114. Shen, I. Y. Hybrid damping through intelligent constrained layer treatments. ASME J of Vibration and Acoustics, 1994. Vol. 116, No 3, s. 341–349.
115. Van Nostrand, W., Knowles, G. & Inman, D. J. Finite element modeling for active constrained-layer damping. In: Johnson, C. (ed.). Proc of Smart Structures and Materials Conf on Passive Damping, Vol. 2193, Orlando, Florida, USA, 1994. S. 126–137.
116. Crassidis, J. L., Baz, A. & Wereley, N. H_∞ control of active constrained layer damping. University at Buffalo, USA. <http://www.acsu.buffalo.edu/~johnc/acld.pdf>
117. Baz, A. & Ro, J. Vibration control of rotating beams with active constrained layer damping. Smart Mater Struct, 2001. Vol. 10, s. 112–120.
118. Liu, Q., Chattopadhyay, A., Gu, H. & Zhou, X. Use of segmented constrained layer damping treatment for improved helicopter aeromechanical stability. Smart Mater Struct, 2000. Vol. 9, s. 523–532.
119. ARO-in-Review 2001, Mechanical Sciences. The U.S. Army Research Office. <http://www.aro.army.mil/aronreview01/mech/mech01.htm>
120. Arafa, M. & Baz, A. Dynamics of active piezoelectric damping composites. Composites: Part B, 2000. Vol. 31, s. 255–264.
121. Vibration and Noise Control Lab., University of Maryland. http://www.enme.umd.edu/vibnoise/vib_Web/pdf/laba.pdf

122. <http://www.mide.com/products.html>
123. <http://www.pricetool.com/otdr-review-3E97-D6DFFA0-3878BF3D-prod1>
124. Fleming, A. J. Optimization and implementation of multimode piezoelectric shunt damping systems. IEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002. Vol. 7, No 1. <http://rumi.newcastle.edu.au/reza/PAPERS/00990891.pdf>
125. McDonald, A. M., Elliott, S. J. & Stokes, M. A. Active noise and vibration control within the automobile. Proc of the Int. Symp. on Active Control of Sound and Vibration, Acoustical Soc of Japan, Tokyo, 1991. S. 147–156.
126. Yu, Y., Peelamedu, S. M., Naganathan, N. G. & Dukkipati, R. V. Automotive vehicle engine mounting systems: A survey. J of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2001. Vol. 123, s. 186–194.
127. Sciulli, D. Dynamics and control for vibration isolation design. Doctoral Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University. <http://scholar.lib.vt.edu/theses/public/etd-41337749731261/etd.pdf>
128. Fuller, C. R., Elliott, S. J. & Nelson, P. A. Active control of vibration. London: Academic Press Ltd, 1996. 332 s.
129. Wilde, K., Gardoni, P. & Fujino, Y. Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges. Engineering Structures, 2000. Vol. 22, s. 222–229.
130. Swanson, D. A. & Miller, L. R. Design and effectiveness evaluation of an active vibration isolation system for a commercial jet aircraft. http://www.lordmpd.com/inside/tech_papers/LL-6003.pdf
131. <http://www.tpcdayton.com/NoiseControl/index.asp>
132. Tanttari, J. & Saarinen, K. Työkoneiden melun vähentäminen – perusteet. Metalliteollisuuden keskusliitto MET, Helsinki, 1995. 124 s.
133. Hentinen, M., Hynnä, P., Lahti, T., Nevala, K., Vähänikkilä, A. & Järviluoma, M. Värähtelyn ja melun vaimennuskeinot kulkuvälineissä ja liikkuvissa työkoneissa, Laskentaperiaatteita ja käyttöesimerkkejä. Espoo: VTT Tiedotteita 2160, 2002. 118 s. + liitt. 164 s.
134. KK stiftelsen. http://www.kks.se/dethargorvi/projekt/projekt_om.asp?Iid=2702

135. Winberg, M., Johansson, S. & Lagö, T. Active control of engine induced noise in a naval application.
<http://www.bth.se/fou/forskinfor/nsf/35BC671C87DB0E5AC1256612004904F2/5D288029E3571041C1256C7F005958E3>
136. Lekkala, J. & Paananen, M. EMFi – New electret material for sensors and actuators. ISE10, 22.–24.9.1999, Delphi, Greece.
137. Shipsha, A. Failure of sandwich structures with sub-interface damage. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Department of Aeronautics, Sweden, Report 2001–13.
138. Han, N., Lee, D., Stewart, A., Pulliam, W. & Carman, G. Embedded fiber optic sensor research with application to flight. http://aml.seas.ucla.edu/research/areas/fiber-optic-sensors/embedded-fos-flight-II/2002-12_han.pdf
139. Lin, M., Beard, S. J., Kumar, A. & Qing, X. Development of structural health monitoring systems using SMART layer technology.
[http://alpha.tamu.edu/public/jongil_public/ACS\(2002Oct\)/Electromagnetism/2061.pdf](http://alpha.tamu.edu/public/jongil_public/ACS(2002Oct)/Electromagnetism/2061.pdf) Suljettu.
140. Ogisu, T., Ando, N., Takaki, J., Okabe, T. & Takeda, N. Improved surface treatment of SMA foils and damage suppression of SMA-foil embedded CFRP laminates. *J. Intelligent Mater. Struct.*, 2001. Vol. 12, s. 265–270.
141. <http://structure.stanford.edu/Project/project.htm>
142. Chung, D. D. L. Self-monitoring structural materials. *Materials Science and engineering*, R22. 1998, s. 57–78.
143. Kalamkarov, A. L., Fitzgerald, S. B., MacDonald, D. O. & Georgiades, A. V. On the processing and evaluation of pultruded smart composites. *Composites, Part B*, 1999. Vol. 30, s. 753–763.
144. <http://www.sma-mems.com/aero.htm> Suljettu.
145. Lichter, M. D., Sujan, V. A. & Dubowsky, S. Experimental demonstrations of a new design paradigm in space robotics. <http://robots.mit.edu/publications/PDF/173.pdf> Suljettu.
146. Dubowsky, S., Hunter, I. & Chirikjian, G. Self-transforming robotic planetary explorers. http://www.niac.usra.edu/files/library/fellows_mtg/jun00_mtg/pdf/367Dubowsky.pdf

147. http://www.mecha.uni-stuttgart.de/Forschung/forschung_adapstruk/research_semia_joints.htm
148. Unsal, M. Force control of a new semi-active piezoelectric-based friction damper. Part of Masters Thesis, University of Florida, 2002.
http://www.me.ufl.edu/CIMAR/thesis/memet_unsal_MS.pdf
149. Park, G. Smart Materials and Structures. CIMSS, Virginia Tech, USA.
http://www.ksea-nc.org/Symposium12/Gyuhae_Park/KSEA_GyuhaePark.pdf
150. Butterworth, J. Ductile concentrically braced frames using slotted bolted joints. SESOC Journal, University of Auckland.
<http://www.care.auckland.ac.nz/~jbut030/xbracesesoc.pdf> Suljettu.
151. PMV USA. <http://www.pmvusa.com/pdf/brochures/d3.pdf>
152. Energy-scavenging with shoe-mounted piezoelectrics.
http://www.computer.org/micro/homepage/may_june/shenck/04.htm
153. Artificial Muscle Transducers. <http://www.erg.sri.com/automation/actuators.html>
154. <http://www.erg.sri.com/automation/actuators.html>
155. Mechanical Engineering Magazine Online. Feature article: Sidebar: Smart vehicle, heal thyself.
<http://www.memagazine.org/backissues/nov01/features/wideopen/sbar1.html>
156. Takeda, N. Damage and health monitoring of composite structures in smart material and structure system program in Japan.
<http://alpha.tamu.edu/public/Temp/asc17/takeda.pdf>
157. Loewy, R. G. Recent developments in smart structures with aeronautical applications. Smart Mater Struct, 1997. Vol. 6, s. R11–R42.
158. <http://structure.stanford.edu/Project/project.htm>
159. <http://structure.stanford.edu/Project/ResearchProjects/eblaise/eblaise.pdf>
160. Bernhard, A. P. & Chopra, I. Development and hover testing of a smart trailing edge flap with a piezo-induced bending-torsion coupled actuator. AHS National Technical Specialists' Meeting on Rotorcraft Structures, Williamsburg, VA, USA, 1995.

161. Bernhard, A. P. & Chopra, I. Analysis of a bending-torsion coupled actuator for a smart rotor with active blade tips. *Smart Mater Struct*, 2001. Vol. 10, s. 35–52.
162. Garfinkle, M. & Pastore, C. Intrinsically-smart coupled box beams.
<http://www.pages.drexel.edu/~garfinkm/Spar.html>
163. Bauchau, O., Loewy, R. & Bryan, P. An approach to ideal twist distribution in tilt rotor VTOL blade designs. Rensselaer Rotorcraft Technology Center Report D-86-2, 1986.
164. Austin, F., Knowles, G. J., Jung, W. G., Tung, C. C. & Sheedy, E. M. Adaptive/conformal wing design for future aircraft. Proc 1st European Conf on Smart Structures, Glasgow, UK, 1992.
165. Giurgiutiu, V. Recent advances in smart-material rotor control actuation. Proc of the 41st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, and Adaptive Structures Forum, Atlanta, GA, USA, 3–6 April, 2000.
166. Rodgers, J. P. & Hagood, N. W. Hover testing of a 1/6th Mach-scale CH-47D blade with integral twist actuation.
<http://www.starboardinnovations.com/Downloads/Papers/ICAST98.pdf>
167. Bernhard, A. P. F. & Chopra, I. Hover testing of active blade-tips using a piezo-induced bending-torsion coupled beam. *J. of Intell. Mater. Syst. Struct.*, 1999. Vol. 9, s. 963–974.
168. Hall, S. R. & Prechtel, E. F. Development of a piezoelectric servoflap for helicopter rotor control. *J. of Smart Mater. Struct.*, 1996. Vol. 5, s. 26–34.
169. Clement, J. W., Brei, D., Moskalik A. J. & Barrett R. Bench-top characterization of an active rotor blade flap system incorporating C-block actuators. 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference and Exhibit, Long Beach, CA, USA, 1998.
170. Brei, D. Smart piezoelectric actuators. DARPA Flow Actuators Workshop, Arlington, VA, USA, October 25, 1999.
171. Prechtel, E. F. & Hall, S. R. An X-frame actuator servo-flap actuation system for rotor control. *SPIE*, 1998. Vol. 3329, s. 309–319.

172. Ho, C.-M., Tung, S. & Lee, G.-B. MEMS – a technology for advancements in aerospace engineering. 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, USA, 1997.
173. Lester, H. C. & Fuller, C. R. Active control of propeller induced noise fields inside a flexible cylinder. AIAA 10th Aeroacoustics Conf., Seattle, WA, USA, 1986.
174. Ushijima, T. & Kumakawa, S. Active engine mount with piezo-actuator for vibration control. Society of Automotive Engineers Paper 930201.
175. Santini, P., Gasbarri, P., Altobelli, M. & Rossi, A. A comparative overview of strain actuated surfaces' design. 5th Int Conf on Adaptive Structures, Sandai 1994. S. 21–33.
176. Lazarus, K. B. & Crawley, E. F. Multivariable active lifting surface control using strain actuation: Analytical and experimental results. 3rd Int Conf on Adaptive Structures, San Diego, CA, USA, 1992. S. 87–101.
177. US Air Force Research Laboratory, SBIR, Impact, Control system combats fighter aircraft tail vibration. <http://www.afrl.af.mil/sbir/impact/af93-158.pdf>
178. Hanagud, S. et al. Tail buffet alleviation of high performance twin tail aircraft using piezo-stack actuators. <http://www.ae.gatech.edu/research/sdssl/SDM-99-1320.pdf>
179. Friedmann, P. P. Aeroelastic, aeromechanical and vibration problems in helicopters. Proc. 33d Israel Ann. Conf. on Aviation and Astronautics, 1993. S. 37–82.
180. Ham, N. D. Helicopter gust alleviation, attitude stabilization and vibration alleviation using individual-blade-control through a conventional swashplate. Proc. 11th Eur. Rotorcraft Forum, London, UK, 1985. S. 75-1–5.
181. Friedmann, P., Carman, G. P. & Millott, T. A. Magnetostrictively actuated control flaps for vibration reduction in helicopter rotors – design considerations for implementation. Proc 36th Israel Ann Conf on Aerospace Sciences, 1996. S. 295–306.
182. Barrett, R. Aeroservoelastic DAP missile fin development. 3rd Int. Conf. on Adaptive Structures, San Diego, CA, USA, 1992.
183. Straub F. K. A feasibility study of using smart materials for rotor control. Smart Mater Struct, 1996. Vol. 5, s. 1–10.
184. Roglin, R. L. & Hanagud, S. V. A helicopter with adaptive rotor blades for collective control. Smart Mater Struct, 1996. Vol. 5, s. 76–88.

185. Rogers, J. P., Bent, A. A. & Hagood, N. W. Characterization of interdigitated electrode piezoelectric fiber composites under high electrical and mechanical loading. SPIE, San Diego, CA, USA, 1996.
186. Hynnä, P. Laivan potkuri äänilähteenä ja runkoäänen etenemisen ennustemenetelmiä. Espoo: VTT Tutkimuksia 472, 1987. 129 s.
187. <http://www.spa.com/smtdlpd.htm>
188. Practical aspects of bus noise control. Noise&Vibration Control Worldwide, October 1985, s. 247–252.
189. Rao, M. D. Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes. 2001 India–USA Symposium on Emerging Trends in Vibration and Noise Engineering. http://www.me.mtu.edu/~mrao/india-usa_u011.pdf
190. Necati, G. A. Prospects of improving vehicle sound quality by means of ANC. DAGA 2001, TU Hamburg–Harburg, 26.–29. 3.2001, <http://www.dega-akustik.de/Materialien/programm-web-ob.pdf> Suljettu.
191. The New York Times Automobiles: Stability Control Get Your Yaw-Yaws Out. <http://edmunds.nytimes.com/ownership/safety/articles/45992/article.html>
192. Bedell, D. Smart Car Systems Face Rough Road. Philadelphia Inquirer, 2002. April 26. <http://www.philly.com/mld/philly/business/technology/3143626.htm>
193. New Toyota Crash Smart, Dispatch Online, January 28, 2003. <http://www.dispatch.co.za/2003/01/28/features/MOTOR1.HTM>
194. Smart Belt. <http://www.autoliv.com>
195. Peelamedu, S. M., Naganathan, N. G. & Buckley, S. Impact analysis of automotive structures with distributed smart material systems. University of Toledo. <http://www.utoledo.edu/homepages/speelam/projects/spie1999.pdf>
196. Sharke, P. Smart Cars. Feature Article, ASME Mechanical Engineering Magazine Online, June 2003. <http://www.memagazine.org/contents/current/features/smartcar/smartcar.html>
197. http://www.autoliv.com/Appl_ALV/alvweb.nsf/pages/rd_pedestrianprotection
198. Dynamic Systems Group, University of Pretoria. <http://www.me.up.ac.za/research/dsg/dsg-res.htm>

199. Järveläinen, H., Karjalainen, M., Maijala, P., Saarinen, K. & Tanttari, J. Työkoneiden ohjaamomelun häiritsevyys ja sen vähentäminen. TKK, Akustiikan ja äänenkäsittelyn laboratorio, Espoo, 1998.
200. Workplace Health and Safety, All Shook Up – Understanding Vibration, Ergonomics. Revised September 2002.
<http://www3.gov.ab.ca/hre/whs/publications/pdf/erg026.pdf>
201. BC Research Inc, Feature article: ATV hazards studied. Canadian Silviculture Magazine, March 1997.
<http://news.bcresearch.com/web/news/news.nsf/NewsMedia/8535D9632A68798688256A5F00142BBA!OpenDocument>
202. Nevala, K. & Järviluoma, M. An active vibration damping system of a driver's seat for off-road vehicles. 4th Annual Conf on Mechatronics and Machine Vision in Practice, Toowoomba, Australia, September 23–25, 1997.
203. Testing Suspension Seats for End-Stop Impacts (TESTOPS). EC Standards Measurements and Testing Programme, Project no SMT4 CT97 2161, October 1997 to September 2000. http://www.humanvibration.com/EU/TESTOPS/html/final_report.htm
204. Värähtelyn ja ääneen hallinta -teknologiaohjelma, LiikkuVÄRE-projekti.
<http://www.katmi.com/vare/LiikkuVARE.htm>
205. New Suspension Structures and Damping Systems in Off-Road Vehicles. Leader: Juhala, M. HUT, Other Participants: Nevala, K. University of Oulu, Vähä, P. VTT, Consortium at TUKEVA Research Program, 2000–2003, Finland.
<http://www.hermia.fi/tukeva/project.htm>
206. TACOM Magnetorheological (MR) Damper Design, MagnetoRheological Fluid Optimized Active Damper suspension. <http://www.rodmillen.com/Mroads.htm>
207. http://www.deere.com/en_ZA/ag/images/library/equipment/ag/tractors/pdf/8020.pdf
208. Akhras, G. Smart materials and smart systems for the future. Canadian Military Journal, Vol. 1, No 3, s. 25–32. http://www.journal.dnd.ca/engraph/Vol1/no3/pdf/25-32_e.pdf
209. Cambridge Scientific Abstracts, Plastic Highway Bridges.
<http://www.csa.com/hottopics/bridge/abstracts.html>
210. U.S. Dept of Transportation, Federal Highway Administration, Bridge Technology. Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite Bridge Technology.
<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/frp/>

211. Composite Materials Featured in Chicago's LaSalle Street Bridge. BIRL Industrial Research Laboratory, Northwestern University, USA.
<http://iti.acns.nwu.edu/composites/bpspr96.html>
212. Burgoyne, C. J. Advanced composites in civil engineering in Europe, IABSE.
<http://www.iabse.ethz.ch/sei/backissues/abstracts.sei9904/burgoyne.pdf>
213. University of Southern Queensland: USQ pioneers new bridge technology.
<http://www.usq.edu.au/marketng/usqnews/archive/2002/03apr.pdf>
214. Core Craft Technologies Inc. <http://www.corecraft.com/bridge.html>
215. Reina, P. UK Contractors install composite highway bridge near Oxford. McGraw–Hill Construction Engineering News – Record.
<http://enr.construction.com/news/transportation/archives/021014a.asp>
216. Fiber-reinforced polymer rebar. 2001 Nova Award nomination 32, Construction Innovation Forum. http://www.cif.org/Nom2001/Nom32_01.PDF
217. Tennyson, R. C., Mufti, A. A., Rizkalla, S., Tadros, G. & Benmokrane B. Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fiber optic sensors. *Smart Mater Struct*, 2001. Vol. 10, s. 560–573.
218. Johnson, E. A., Baker, G. A., Spencer, B. F. & Fujino, Y. Semiactive damping of stay cables. http://www.usc.edu/dept/civil_eng/johnsone/papers/smartdamping_tautcable_jem.pdf
219. Main, J. A. & Jones, N. P. Free vibrations of taut cable with attached damper. I. Linear damper, ASCE, 2002. http://www.ce.jhu.edu/jmain/Linear_Damper.pdf
220. Main, J. A. & Jones, N. P. Free vibrations of taut cable with attached damper. II. Nonlinear damper, ASCE, 2002.
http://www.ce.jhu.edu/jmain/Nonlinear_Damper.pdf
221. Watson Bowman Acme. http://www.mbrace.com/home_pages/bridge-composite.html
222. Seim, J., Udd, E. & Schultz, W. Composite strengthening and instrumentation of the Horsetail Falls bridge with long gauge length Fiber Bragg Grating strain sensors. <http://www.bluer.com/15.PDF>
223. Lord Corporation. http://www.lordcorp.com/news/2002/lord_corporation_supplies_320_mr_fluid_dampers_for_cable-stayed_bridge_retrofit_to_control_wind_vibration.htm

224. <http://www.isotruss.com>
225. <http://www.alphalink.com.au/~gfs/mastsys/mastsys1.htm> Suljettu.
226. <http://www.strongwell-ebert.com/towers/towerbody.htm>
227. http://www.polymercomposites.co.uk/pdf/key_apps_utilities.pdf
228. Carne, T. G. Guy cable design and damping of vertical axis wind turbines.
<http://www.prod.sandia.gov/cgi-bin/techlib/access-control.pl/1980/802669.pdf>
229. <http://www.windpower.org/en/tour>
230. http://www.eere.energy.gov/news/archive.cfm/date_enn=%7Bd%20'2002-07-17'%7D#251
231. Zvanik, M. Composites and wind energy: Partners in performance. SAMPE Journal, January/February, 2002.
232. NREL Guideline DG02 Wind Turbine Design Strength Analysis, 1999.
http://www.nrel.gov/wind/docs/dg02_990830_strength_analysis.doc
233. http://www.sandia.gov/Renewable_Energy/wind_energy/asme/AIAA-2003-0696.pdf
234. <http://www.baltek.com/balsaonly/applications/industrial.html>
235. Holttinen, H., Liukkonen, S., Furustam, K.-J., Määttänen, M., Haapanen, E. & Holttinen E. Offshore-tuulivoima Perämeren jääolosuhteissa. Espoo: VTT Julkaisuja 828, 1998. 118 s. + liitt. 13 s.
236. Carey, J. M. Guyed support structures for offshore wind turbines. 2nd Symposium, Offshore Wind Energy – Construction and Environmental Aspects, Hannover, September 2002. <http://pc42.hydromech.uni-hannover.de/Mitarbeiter/MDORF/Gigawind.data/2symposium/Carey%20-%20Summary%20text%20-%20Hannover%202002.pdf>
237. Wikipedia, The free encyclopedia.
http://www.wikipedia.org/wiki/Wind_generator
238. Offshore wind energy Ready to power a sustainable Europe. Final report of Concerted action on offshore wind energy in Europe, 2001.
http://www.offshore-wind.de/media/article000325/CA-OWEE_Complete.pdf

239. Lobitz, D. W. & Veers, P. S. Enhanced performance of HAWTs using adaptive blades. http://www.sandia.gov/Renewable_Energy/wind_energy/asme/ASME1-96.pdf
240. Lobitz, D. W. & Veers, P. S. Aeroelastic behavior of twist-coupled HAWT blades. http://www.sandia.gov/Renewable_Energy/wind_energy/asme/ASME1-98.pdf
241. Ghoshal, A., Sundaresan, M. J., Schulz, M. J. & Pai, P. F. Structural health monitoring techniques for wind turbine blades. *J. of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics*, 2000. Vol. 85, No 3, s. 309–324.
242. Sørensen, B. F., Lading, L., Sendrup, P., McGugan, M., Debel, C. P., Kristensen, O. J. D., Larsen, G., Hansen, A. M., Rheinländer, J., Rusborg, J. & Vestergaard J. D. Fundamentals for remote structural health monitoring of wind turbine blades – a preproject. <http://www.risoe.dk/rispubl/AFM/afmpdf/ris-r-1336.pdf>
243. Lading, L., McGugan, M., Sendrup, P., Rheinländer, J. & Rusborg, J. Fundamentals for remote structural health monitoring of wind turbine blades – a preproject; Annex B – Sensors and non-destructive testing methods for damage detection in wind turbine blades. <http://www.risoe.dk/rispubl/AFM/afmpdf/ris-r-1341.pdf>
244. Braun, K. A., Arnold, H., Gordner, A., Hailer, F., Huurdeman, B. & Müller, M. Some blade tip modifications and their influence on aeroacoustics. <http://www.nrel.gov/contracts/pdfs/ewec96nrel.pdf>
245. http://www.fma.fi/vapaa_aikaan/majakat/kemi_i.php
246. Palis, F. et al. Vibration damping with a piezoelectric torque drive. *Proc. of Actuator 2000*, Bremen, Germany, 19–21 June 2000, s. 322–325.
247. Ullakko, K., Strand, J. & Honkanen K. Liikettä tuottavat materiaalit älykkäissä koneissa. *MET Julkaisuja*, 2, 2002.
248. Holopainen, T. (ed.). Modelling and simulation of multitechnological machine systems. *Symposium*, Espoo, 30.11. 2000. VTT Symposium 209. 175 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/symposiums/2001/S209.pdf>
249. <http://www.kineticsystems.com/>
250. Flint, E. M., Melchera, J. & Hanselka, H. The 'promise' of smart materials for small satellites. *Acta Astronautica*, 1996. Vol. 39, No 9–12, s. 809–814.
251. Burroughs, C. New deployable thin-film, ultralight mirror may be future of space telescopes and surveillance satellites. *Sandia Lab News*, 2000. Vol. 52, No 9, May 5.

252. Preumont, A. Active vibration control.
<http://www.ippt.gov.pl/~smart01/lectures/preumont.pdf>
253. US General Accounting Office. Report to Congressional Requesters, Space Station, Russian Commitment and Cost Control Problems,
<http://www.gao.gov/archive/1999/ns99175.pdf>
254. Abbott, D. et al. Development and evaluation of sensor concepts for ageless aerospace vehicles, Development of concepts for an intelligent sensing system. NASA Technical Report, CR-2002-211773, July 2002.
<http://techreports.larc.nasa.gov/ltrs/PDF/2002/cr/NASA-2002-cr211773.pdf>
255. Design of a modular self-reconfigurable robot.
<http://robot.anu.edu.au/%7Edavid/publications/pa01b.pdf>
256. Badescu, M. & Mavroidis, C. Novel smart connector for modular robotics.
<http://cronos.rutgers.edu/~mavro/papers/aim-u-206-vaz.pdf> Suljettu.
257. Yoshida, J. Piezoelectric racquets add professional oomph, EE Times, Systems and Software, 2002, Vol. 10. <http://www.eetimes.com/sys/news/OEG20020607S0077>
258. <http://www.acq.osd.mil/bmdo/bmdolink/pdf/68.pdf>
259. Current Science and Technology Center, Stories: Robotic Surgery.
<http://www.mos.org/cst/article/1623/>
260. Gornall, W. S. & Kuper, J. W. A single-robot technique for pigtailed fiber arrays to planar lightwave circuits. <http://documents.exfo.com/appnotes/anoteBurleigh004-ang.pdf>
261. Pelrine, R., Kornbluth, R., Joseph, J. & Chiba, S. Artificial muscle for small robots.
<http://www.erg.sri.com/publications/10673-PA-00-087.pdf>
262. <http://www.unipv.it/dms/auricchio/>
263. http://www.meca.polymtl.ca/SMA/publication_1/article_1/fin_elem.pdf
264. http://www.unipv.it/dms/auricchio/Research/Bio/Paper/CMES_02.pdf
265. <http://www.acellent.com>.
266. VTT ISS Roadmap dokumentaatio.
267. Ryan, R. R. Functional virtual prototyping.

268. Lin, M. W. & Abatan, A. O. Application of Commercial Finite Element Codes for the Analysis of Induced Strain-Actuated Structures. *Journal of intelligent material systems and structures*, 1994. Vol. 5, s. 869–875.
269. ABAQUS 6.3-1 online-dokumentaatio. ADAMS/ABAQUS User's manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 2002.
270. Ikeda, T. *Fundamentals of Piezoelectricity*. Oxford University Press, New York, 1990.
271. MSC.ADAMS, versio 12 Online-dokumentaatio. *Learning ADAMS/View Basics*, Mechanical Dynamics, Inc., 2002, Part number: 120VWBS-01.
272. MSC.ADAMS, version 12 Online-dokumentaatio. *Translating FE Model Data*, Mechanical Dynamics, Inc., 2002, Part number: 120FLEXTR-01.
273. MSC.ADAMS, version 12 Online-dokumentaatio. *Using ADAMS/Flex*, Mechanical Dynamics, Inc., 2002, Part number: 120FLXUG-01.
274. Kiviniemi, T. & Holopainen, T. Modelling of flexible members for simulation of vehicle dynamics. Espoo: VTT Valmistustekniikka, 1999. Raportti nro: VALB-424. 37 s.
275. MSC.ADAMS, version 12 Online-dokumentaatio. *Getting Started Using ADAMS/Controls*, Mechanical Dynamics, Inc., 2002, Part number: 120CTGS-02.
276. Järviluoma, M. & Kortelainen, J. ADAMS/Simulink Simulation of Active Damping of a Heavy Roller. Espoo: VTT Tuotteet ja tuotanto, 2003. Raportti nro: BTUO57-031129. 38 s.
277. Popovic D. & Vlacic L. *Mechatronics in engineering and product development*. Marcel Deccer, Inc. USA. 1999. 615 s.
278. Bollinger, J. G. & Duffie, N. A. *Computer control of machines and processes*. Addison–Wesley Publishing Company Inc. USA, 1988. 613 s.
279. PiezoSystem Jena. 2002. Piezosystem Jena. Tuoteluettelo.
280. Airila, M. *Mekatroniikka*. Otatieto Oy, 1993.
281. Ogata, K. *Modern control engineering*. Prentice–Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., USA, 1970. 833 s.
282. Siemens. Partneri 3/01. Siemens osakeyhtiön asiakaslehti.

283. Ikonen E. & Najim, K. Advanced process identification and control. Marcel Dekker, Inc., USA, 2002.
284. Koskinen, H. & Yli-Paunu, P. Sumea ohjaustekniikka koneautomaatiassa. Espoo: VTT Tiedotteita 1256, 1991. 45 s.
285. Juuso, E. Fuzzy-Neuromenetelmät prosessiautomaatiassa. Oulun yliopiston kurssin 470438S luentomoniste, 2002. 172 s.
286. Isomursu, P. et al. Sumean logiikan mahdollisuudet. Tekes-raportti 34/93, 1998.
287. Suomen automaatioseura r.y. Kehittyneiden säätömenetelmien soveltaminen prosessiteollisuudessa. Julkaisu no. 17, 1992.
288. Physic Instrumente. Micropositioning, Nanopositioning, Nanoautomation. Tuote-luettelo, 2001.
289. Uchino, K. & Giniewicz, J. Micromechatronics, Textbook. Marcel Decker, Inc., USA, 2002. 468 s.
290. Ylinen, R. Digitaalinen säätöteoria. Oulun yliopiston kurssin 470453S luentomoniste, 2002. 156 s.
291. Texas Instruments. Linear and interface circuit applications. Vol. 1. Amplifiers, Comparators, Timers and Voltege regulators. 1985. 280 s.
292. URL: <http://www.national.com/an/AN/AN-20.pdf>.
293. Golten, J. Understanding signals and systems. The McGraw–Hill Companies. UK. 1997. 315 s.
294. Schreurs, P. et al. SMA Actuators for Shape Control of Structures and Materials. Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Netherlands.
295. Tong, T. et al. Optimal Shape Control of Composite Thin Plates with Piezoelectric Actuators. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 1998. Vol. 9, s. 458–467. URL: <http://www.ent.ohiou.edu/~bobw/PDF/Jimms.pdf>
296. Chaudhry, Z. et al. Bending and Shape Control of Beams Using SMA Actuators. Center of Intelligent Material Systems and Structures. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg. URL: <http://www.cimss.vt.edu/Downloads/17-j.pdf>.

297. Oh, J. T. et al. Active Shape Control of Double Plate Structures using piezoceramics and SMA Wires. Technical Note. Smart Materials and Structures 10/2001, s. 1100–1106.
298. URL: <http://www.postech.ac.kr/me/cm/member/hcparkpaper/31.pdf>.
299. Pinkerton, J. L. et al. A Feasibility Study to Control Airfoil Shape Using THUNDER. NASA Technical Memorandum 4767. Langley Research Center. Virginia.
URL: <http://techreports.larc.nasa.gov/ltrs/PDF/1997/tm/NASA-97-tm4767.pdf>.
300. Shu, S. G. et al. Modeling of a flexible beam actuated by shape memory alloy wires. Smart Materials and Structures 6/1997, s. 265–277. URL:
<http://smart.tamu.edu/publications/docs/Papers/1997/beammodel.pdf>.
301. System Planning and Analysis, Inc. (SPA) Smart Materials Technology Development Group (SMTD). Distributed, Embedded Sensing for Quasi-Static Shape Control of Wings. URL: <http://www.spa.com/smtdmorphing.htm>.
302. Diaz, J. et al. A New Multi-Range Force Sensor. Robotics and Process Systems Division. Oak Ridge National Laboratory. URL:
http://www.csm.ornl.gov/Internships/final_presentations/Diaz2.pdf.
303. URL: <http://www.ent.ohiou.edu/~bobw/PDF/Jimms.pdf>. AVC Instrumentation. Kotisivu.
304. URL: <http://www.pcb.com/products/avc/avc740b02.html>.
305. <http://www.mate.tue.nl/~piet/res/sma/pdf/turasmash.pdf>.
306. Batra, R. C. Finite Dynamic Deformations of Smart Structures. Computational Mechanics 1997. Vol. 20, s. 427–438.
URL: [http://www.esm.vt.edu/~rbatra/pdfpapers/computational1997\(427-438\).pdf](http://www.esm.vt.edu/~rbatra/pdfpapers/computational1997(427-438).pdf).
307. Akhilesh, K. J. Vibration Analysis and Control of an Inflatable Toroidal Satellite Component Using Piezoelectric Actuators and Sensors. Doctoral Thesis. Virginia Polytechnic and State University. Mechanical Engineering, 2002. URL: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-07102002-020043/unrestricted/Chapter-5.pdf>.
308. Kylmälä, H. Funktionaalisilla materiaaleilla toteutettujen toimilaitteiden ohjaus. Oulun yliopisto, konetekniikan osasto, Diplomityö, 2002. 59 s.

309. Schwinn, A. et al. Self-Configurable Actuator-Sensor Array for Active Vibration Suppression. Laboratory for Process Automation. Saarland University, Germany. URL: <http://www.lpa.uni-saarland.de/pdf/Materialsweek2000.pdf>.
310. Ostachowicz, W. M. et al. Statics and Dynamics of Composite Structures with Embedded Shape Memory Alloys. URL: http://www.ippt.gov.pl/~smart01/lectures/ostachowicz_3_full.pdf.
311. Dunant, H. Spatial H Infinity Control of a Piezoelectric Laminate Beam: Experimental Implementation. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002. Vol. 10, No. 4. URL: <http://rumi.newcastle.edu.au/reza/PAPERS/01014673.pdf>.
312. Kashani, R. Active Vibration Damping. Tutorial for vibrations. URL: http://www.deicon.com/vib_tutorial/act_vib2_pdf.pdf.
313. Brennan, M. J. Feedforward and Feedback Control of Sound and Vibration – A Wiener Filter Approach. Journal of Sound and Vibration 2001. URL: <http://aalab.kjist.ac.kr/ksm/paper/jsv3.pdf>.
314. Fowler, L. Application of the Filtered-X LMS Algorithm for Disturbance Rejection in Time-Periodic Systems. Master of Science Thesis. Mechanical Engineering. Virginia Polytechnic Institute and State University. URL: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-5134151959631701/unrestricted/etd.pdf>.

Tekijä(t) Sippola, Merja; Brander, Timo; Calonius, Kim; Kantola, Lauri; Karjalainen, Jukka-Pekka; Kortelainen, Juha; Lehtonen, Mikko; Söderström, Patrik; Timperi, Antti & Vessonen, Ismo			
Nimeke Funktionaalisten materiaalien mahdollisuudet lujitemuovisessa toimirakenteessa			
Tiivistelmä Julkaisussa käsitellään funktionaalisten materiaalien ominaisuuksia, kykyjä, rajoituksia ja käyttötapoja toimirakenteissa, toimirakenteen luomiseen tarvittavia tekniikoita ja menetelmiä sekä toimirakenteiden tulevaisuutta ja kehitystarpeita. Julkaisun fokus on lujitemuovisissa toimirakenteissa. Toimirakenne, tai älykäs tai adaptiivinen rakenne, kykenee havainnoimaan ympäristöään, omaa kuntoaan ja kuormituksiaan sekä reagoimaan niihin aktiivisesti. Rakenne voi reagoida muuttamalla mekaanisia ominaisuuksiaan (muotoa, jäykkyyttä, vaimennuskykyä, jne.) ja/tai aktiivisilla voimavaikutuksilla. Toimirakenteen mahdollisia etuja perinteiseen rakenteeseen verrattuna ovat mm. toiminnallisuuden parantaminen, eliniän huomattavakin kasvu, korjauskustannusten pieneneminen ja rakenteen keveneminen. Funktionaalisilla materiaaleilla, kuten muistimetalleilla sekä pietsosähköisillä ja magnetoreologisilla materiaaleilla, on merkittävä potentiaali toimirakenteissa sekä anturi- että toimilaitesovelluksissa. Toimirakenteen luominen on varsin haastava monitekninen tehtävä, jossa tarvitaan monen insinöörialan osaamista, kuten materiaalitiedettä, rakenteiden mekaniikkaa, mallitusta, säätötekniikkaa, jne. Teknologioiden integrointiin liittyvä osaaminen ja tätä tukeva mallinnus ja simulointi ovat erityisen tärkeitä tekijöitä, kun tavoitellaan luotettavia ja optimoituja moniteknisiä rakennekonstruktioita. Luku 1 esittelee funktionaalisia materiaaleja ja niiden ominaisuuksia. Luku 2 esittelee eri tapoja, joilla rakenne voi sopeutua muuttuviin olosuhteisiin funktionaalisten materiaalien avulla. Käsiteltäviä aloja ovat mm. talon- ja sillanrakennus, koneet ja laitteet sekä kulkuvälineet, joihin paneudutaan lukuisten kirjallisuudesta poimittujen esimerkkien avulla. Luvussa 3 esitellään yleisellä tasolla älykkäiden rakenteiden eri tekniikoiden kehitystrendejä ja -tarpeita sekä kuvataan toimirakenteita osana teknisten laitteiden älykkyyttä hyödyntävää kokonaisjärjestelmää. Luvussa 4 esitetään työkaluja toimirakenteiden mallinnukseen ja simulointiin. Luvussa 5 kuvataan toimirakenteen ohjauksen peruseräatteen.			
Avainsanat smart materials, smart structures, adaptive structures, composite structures, fiber reinforcement, polymers, shape memory alloys, piezoelectric materials, magnetorheological materials, sensors			
Toimintayksikkö VTT Tuotteet ja tuotanto, Otakaari 7 B, PL 1705, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6476-6 (nid.) 951-38-6477-4 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Projektinumero G3SU00446	
Julkaisu-aika Elokuu 2004	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivu-ja 216 s.	Hinta E
Projektin nimi MASINA/Toimirakenteet		Toimeksiantaja(t) Tekes	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Published by



Series title, number and
report code of publication

VTT Research Notes 2250
VTT-TIED-2250

Author(s) Sippola, Merja; Brander, Timo; Calonius, Kim; Kantola, Lauri; Karjalainen, Jukka-Pekka; Kortelainen, Juha; Lehtonen, Mikko; Söderström, Patrik; Timperi, Antti & Vessonen, Ismo			
Title Potentiality of functional materials in smart structures made of fiber reinforced plastics			
Abstract This publication presents properties, benefits and limitations of smart materials and potential ways of using them in adaptive structures. It also sheds light on the techniques and methods for creating adaptive structures and the future and development needs of adaptive structures. The focus is in adaptive fiber reinforced polymer composite structures. Smart, or adaptive, structure can monitor its environment and its own condition and loads, and adapt to changes in these. The adaptation may involve large changes of the mechanical properties (shape, stiffness, damping etc.) of the structure and/or exertation of active forces. This provides possibilities for creating structures with increased performance, considerably longer life time, smaller maintenance costs and/or mass savings. Smart materials, like shape memory alloys and piezoelectric and magnetorheological materials, have great potential in sensor and actuator usage in adaptive structures. Design and implementation of an adaptive structure is a challenging multitechnical task that requires know-how from several fields of engineering, like materials engineering, structural mechanics, simulation, control engineering etc. System integration know-how along with supporting modelling and simulation are especially important abilities in order to achieve reliable and optimized system designs. Chapter 1 illustrates the properties of various smart materials. Chapter 2 shows the many ways a structure can adapt its mechanical properties using smart materials. Structures from civil engineering to mechanical engineering and vehicle engineering are discussed with examples from literature. In Chapter 3 general development trends and needs of various smart structures related technologies are presented and some light is also shed on the role of adaptive structures as a part of larger intelligent and communicating systems. Chapter 4 presents tools for modelling and simulation of adaptive structures. Chapter 5 presents the basics of control of adaptive structures.			
Keywords smart materials, smart structures, adaptive structures, composite structures, fiber reinforcement, polymers, shape memory alloys, piezoelectric materials, magnetorheological materials, sensors			
Activity unit VTT Industrial Systems, Otakaari 7 B, P.O.Box 1705, FIN- 02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-6476-6 (soft back ed.) 951-38-6477-4 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)			Project number G3SU00446
Date August 2004	Language Finnish, engl. abstr.	Pages 2160 p.	Price E
Name of project MASINA/Toimirakenteet		Commissioned by Tekes	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

Toimirakenne eli adaptiivinen rakenne on rakenne, joka kykenee tarkkai-
lemaan ympäristöönsä ja omaa tilaansa ja sopeutumaan havaitsemiinsa
muutoksiin muuttamalla ominaisuuksiaan – esimerkiksi muotoaan, jäyk-
kyyttään tai vaimennuskykyään. Toimirakenteita on mahdollista soveltaa
laajasti MASINA-ohjelman alaan kuuluvissa kone- ja kuljetusvälineraken-
teissa parantamaan rakenteiden toiminnallisuutta ja pidentämään raken-
teiden elinikää. Adaptiivisuus mahdollistaa myös kokonaan uudentyypisiä
tuotekonsepteja.

Funktionaaliset materiaalit ja lujitemuovikomposiitit tarjoavat monia
mahdollisuuksia toimirakenteiden luomiseen. Julkaisussa valotetaan toi-
saalta toimirakenteiden käyttömahdollisuuksia ja toisaalta niitä materiaa-
leja ja tekniikoita, joilla toimirakenteita voidaan luoda.

Julkaisu on koottu Tekesin MASINA-tutkimusohjelmaan kuuluvassa
projektissa Toimirakenteet. Julkaisun kirjoittamiseen on osallistunut tut-
kijoita VTT:stä, TKK:sta ja Oulun Yliopistosta.

Tätä julkaisua myy
VTT TIETOPALVELU
PL 2000
02044 VTT
Puh. (09) 456 4404
Faksi (09) 456 4374

Denna publikation säljs av
VTT INFORMATIONSTJÄNST
PB 2000
02044 VTT
Tel. (09) 456 4404
Fax (09) 456 4374

This publication is available from
VTT INFORMATION SERVICE
P.O.Box 2000
FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 9 456 4404
Fax + 358 9 456 4374
