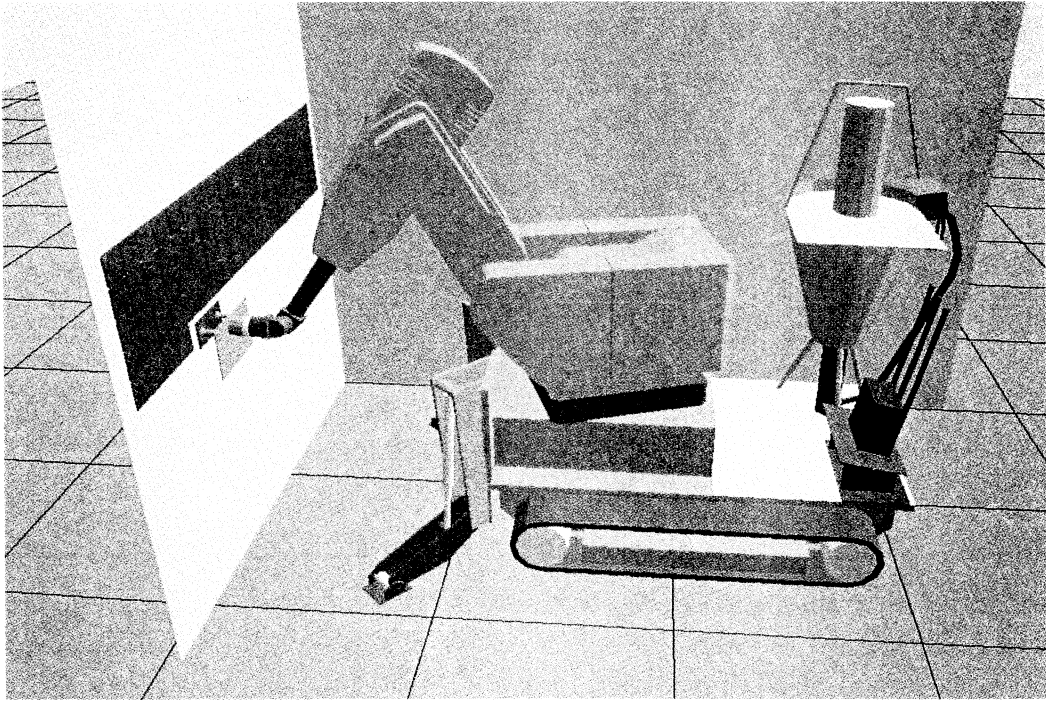


Lauri Koskela, Taisto Kemppainen, Hannu Lehtinen,  
Mika Matikainen, Hannu Sainio & Karl-Johan Serén

## Rakentamisen sisävalmistustöiden robotisointi



# Rakentamisen sisävalmistustöiden robotisointi

Lauri Koskela & Taisto Kemppainen

Yhdyskunta- ja rakennussuunnittelun laboratorio

Hannu Lehtinen & Mika Matikainen

Sähkö- ja automaatiotekniikan laboratorio

Hannu Sainio

Konepajan tuotantotekniikan laboratorio

Karl-Johan Serén

Rakennetekniikan laboratorio



ISBN 951-38-4140-5  
ISSN 1235-0605  
Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1992

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 42, 02151 ESPOO  
puh. vaihde (90) 4561, telekopio 456 4374, teleksi 122972 vttha sf

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 42, 02151 ESBO  
tel. växel (90) 4561, telefax 456 4374, telex 122972 vttha sf

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 42, SF-02151 ESPOO, Finland  
phone internat. + 358 0 4561, telefax + 358 0 456 4374, telex 122972 vttha sf

VTT, Yhdyskunta- ja rakennussuunnittelun laboratorio, Itätuulenkuja 11, 02100 Espoo  
puh. vaihde (90) 4561, telekopio (90) 464 174

VTT, Laboratoriet för samhälls- och byggnadsplanering, Östanvindsgränden 11, 02100 Esbo  
tel. växel (90) 4561, telefax (90) 464 174

VTT, Laboratory of Urban Planning and Building Design, Itätuulenkuja 11, SF-02100 Espoo, Finland  
phone internat. + 358 0 4561, telefax + 358 0 464 174

VTT, Sähkö- ja automaatiotekniikan laboratorio, Otakaari 7 B, PL 34, 02151 ESPOO  
puh. vaihde (90) 4561, telekopio (90) 456 6475

VTT, Laboratoriet för elektroteknik och automation, Otsvängen 7 B, PB 34, 02151 ESBO  
tel. växel (90) 4561, telefax (90) 456 6475

VTT, Laboratory of Electrical and Automation Engineering, Otakaari 7 B, P.O.Box 34, SF-02151 ESPOO, Finland  
phone internat. + 358 0 4561, telefax + 358 0 456 6475

VTT, Konepajan tuotantotekniikan laboratorio, Metallimiehenkuja 6, PL 111, 02151 ESPOO  
puh. vaihde (90) 4561, telekopio (90) 460 627

VTT, Laboratoriet för produktionsteknik i verkstäder, Metallmansgränden 6, PB 111, 02151 ESBO  
tel. växel (90) 4561, telefax (90) 460 627

VTT, Laboratory of Production Engineering, Metallimiehenkuja 6, P.O.Box 111, SF-02151 ESPOO, Finland  
phone internat. + 358 0 4561, telefax + 358 0 460 627

VTT, Rakennetekniikan laboratorio, Kemistintie 3, PL 26, 02151 ESPOO  
puh. vaihde (90) 4561, telekopio (90) 456 7003

VTT, Konstruktionstekniska laboratoriet, Kemistvägen 3, PB 26, 02151 ESBO  
tel. växel (90) 4561, telefax (90) 456 7003

VTT, Laboratory of Structural Engineering, Kemistintie 3, P.O.Box 26, SF-02151 ESPOO, Finland  
phone internat. + 358 0 4561, telefax + 358 0 456 7003

Tekninen toimitus Inkeri Heikkilä

VTT OFFSETPAINO, ESPOO 1992

Koskela, Lauri, Kemppainen, Taisto, Lehtinen, Hannu, Matikainen, Mika, Sainio, Hannu & Serén, Karl-Johan. Rakentamisen sisävalmistustöiden robotisointi [Robotization of interior construction]. Espoo 1992, VTT, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1327. 60 s. + liitt. 18 s.

**UDK** 007.52:693.6:69.003

**Keywords** robots, automation, automatic control equipment, surface finishing, machinery, ceramic tiles, preparation, building automation, construction, construction costs, construction equipment, walls, ceilings, prototypes, rooms, tolerances, product development, quality, building boards

## TIIVISTELMÄ

Rakentamisen sisävalmistustyöt käsittelevät pääasiassa sisätilojen pintoja, väliseiniä, muita rakenteita ja varusteita. Sisävalmistustyöt ovat sekä kustannuksellisesti että ajallisesti merkittävä rakennusvaihe: niiden osuus rakennuskustannuksista on 20 - 50 % ja rakennusajasta 30 - 55 %.

Sisävalmistuksen robotisoinnin keskeisiä perusteita ovat korkeat kustannukset, ammattitaitoisen työvoiman saannin vaikeus, työturvallisuuskysymykset, pyrkimys lyhyempään rakennusaikaan sekä onnistuneella automaatiolla saavutettava tasainen laatu. Ongelmana robotisoinnin kannalta on se, että sisävalmistustyöt koostuvat suuresta määrästä lyhytkestoisia tehtäviä ja että työpisteiden sijainti muuttuu jatkuvasti.

Prototyyppeja ja kehityshankkeita on lukuisista sisävalmistusroboteista. Ehkä pisimmällä ovat levytysmanipulaattorit, apuvälineet seinä- tai kattolevytyksen suorittamiseksi. Betonipinnan hiertoon on niinkään kehitetty useita tuotantokäyttöön soveltuvia laitteita. Tutkimusvaiheessa ovat muuraus, maalaus, tasoitetyöt, materiaalinkäsittely jne. Tuotantokäyttöön ei sisävalmistusroboteja ole vielä saatu. Robottitekniikan kehittyminen ja halventuminen ja samanaikainen työn hinnan kallistuminen madaltavat kuitenkin kannattavuuskynnystä jatkuvasti.

Projektissa on tutkittu rakentamisrobotiikan soveltuvuutta laatoitusrobotin prototyypin avulla. Tavoitteena oli perustekniikoiden kehittäminen ja kokeilu.

Tavoitteeksi asetetun laitteistokokoonpanon mukainen järjestelmä ulottuu työkalullaan mihin tahansa 3,2 m korkean huoneen sisäpintaan. Tämä lähes kokonaan valmiista komponenteista koottu järjestelmä sisältää pienen sähköhydraulisen telaketjuajoneuvon, teollisuusrobotin, laastijärjestelmän sekä laattakasetin. Tähän järjestelmään erityisesti suunniteltuja osia ovat ultraääni- ja voima/momenttianturein varustettu kahden laatan imukuppitarrain sekä laastinlevityssuutin, joka toimii kaupallisen laastinsekoitus- ja pumppausjärjestelmän yhteydessä.

Vaunu liikkuu työpisteiden välillä melko lyhyitä matkoja. Rakentamisen toleranssien pohjalta on vaunun paikoitusjärjestelmälle asetettu vaatimus: vaunun täytyy kyetä liikkumaan 10 x 15 m<sup>2</sup> kokoisessa huonetilassa 50 mm ja yhden asteen tarkkuudella. Vaunun ohjausjärjestelmän ytimenä on PC-laitteistopohjainen reaaliaikakäyttöjärjestelmällä varustettu ohjain.

Kokeissa saavutettiin n. 17 sekunnin tahtiaika laattaa kohti. Laatan paikkatark-



kuuden ja laastin levityksen tasaisuuden suhteen päästiin lähelle rakennusalan yleisiä laatuvaatimuksia. Vaunun paikoitusjärjestelmän todettiin kokeissa yltävän riittävään tarkkuuteen huonetilassa.

Robotisoitu laatoitus tavoitteeksi asetetulla laitteistolla on alustavien laskelmien mukaan yksivuorotyössä hieman kalliimpaa kuin käsityö. Kaksivuorotyössä robotisoitu laatoitus on käsityötä edullisempaa.

Prototyypin edelleenkehittäminen tuotteeksi edellyttää useiden osajärjestelmien pitkäjänteistä jatkokehitystä.

Kokeellinen työ ja kirjallisuustutkimus antavat myös viitteitä sisävalmistusrobotiikan edellytyksistä yleensä. Robotisointi edellyttää toisaalta robottitekniikan, toisaalta rakennustekniikan kehittämistä. Robottien voimanlähteiden, navigoinnin ja ohjausmenetelmien on kehityttävä, ja rakentamiseen soveltuvia robottiratkaisuja on luotava. Automaation tehokas käyttöönotto edellyttää rakentamisen kehittämistä järjestelmälliseksi, suunnitelluksi ja säännöllistetyksi toiminnaksi. Rakennusjärjestelmä, -materiaalit sekä rakennussuunnitelma ja tuotantoprosessi on mukautettava kulloisessakin tilanteessa automatisoinnin vaatimuksiin.

Koskela, Lauri, Kempainen, Taisto, Lehtinen, Hannu, Matikainen, Mika, Sainio, Hannu & Serén, Karl-Johan. Rakentamisen sisävalmistustöiden robotisointi [Robotization of interior construction]. Espoo 1992, VTT, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1327. 60 p. + app. 18 p.

**UDC** 007.52:693.6:69.003

**Keywords** robots, automation, automatic control equipment, surface finishing, machinery, ceramic tiles, preparation, building automation, construction, construction costs, construction equipment, walls, ceilings, prototypes, rooms, tolerances, product development, quality, building boards

## ABSTRACT

Inner works in construction deal primarily with interior surfaces, interior walls and other structures and installments. Inner works are an important construction phase from both cost and time aspect: Their share from construction costs is 20 - 50 % and from the total construction time 30 - 55 %.

Robotization of inner works is motivated by high costs, lack of skilled labor, safety considerations, pursuit of a shorter construction time and the promise of a stable quality to be attained by automation. However, robotization is made problematic by the fact that inner works consist of a great amount of tasks with relative short duration, and the work points change continuously.

There are prototypes or development projects for several construction robots for inner works. Among the most advanced are board manipulators. Also there are several prototype robots for concrete trowelling. Robotization of masonry, painting, plastering and material handling are in the research stage. The actual use of inner works robots beyond pilot studies is still very limited. However, efficiency increase and cost reduction in robot technology, together with increase of labor costs widen the implementation potential continuously.

The feasibility of construction robotics has been investigated by means of a tiling robot prototype. The target system can reach any inner surface of a room with a maximum height of 3,2 m. The robot system consists of an industrial robot, a track-based vehicle and processing tools for automated cladding of ceramic tiles (mortar system and tile cassette). The system has been composed primarily from commercial components. Specially for this system were following subsystems designed and constructed: a suction gripper for two tiles, equipped with ultrasonic and force/torque sensors; a nozzle for spreading mortar, (attached to a commercial mortar mixing and pumping unit).

The vehicle moves rather short distances between subsequent work points. On basis of construction tolerances, the following requirement was set: the vehicle has to be able to navigate in a room of 10 x 15 m<sup>2</sup> with an accuracy of 50 mm and one degree.

A cycle time of 17 seconds per tile was reached in the experiments carried out. The current quality requirements, as for dimensional accuracy for tile position and evenness of mortar, were nearly (but not totally) attained. The positioning system of the vehicle was proven to be accurate enough in a room space.

According to initial evaluation, robotized cladding is slightly more expensive than manual cladding in one shift operation. However, in two shift operation robotized cladding is more economical than manual work.

If the prototype device is to be developed to the point at which it becomes a viable commercial product, several subsystems have to be further developed as a long term effort.

Experimental research and literature study also pinpoint to general preconditions of construction robotics. Development of both robot technology and construction technology is needed. The power sources, navigation methods and control systems have to become more efficient, and robot solutions suitable to construction environment have to be created. Efficient implementation of automation presupposes that construction is developed to a systematic, planned and regularized activity. The construction system, materials, design solutions and the construction plan have to be adapted to the requirements of automation.

## ESIPUHE

Tämä raportti on osa Rakentamisrobotiikka-projektin lopputulostuksesta. Mainittu hanke on osa Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) istunnon käynnistämää, vuosina 1988 - 1990 toteutettua tutkimusohjelmaa Rakentamisen tieto- ja automaatiojärjestelmät. Ohjelman rakentamisrobotiikan osaprojektissa tähdättiin sisävalmistustöihin soveliaiden robottitekniisten ratkaisujen kehittämiseen ja pilotointiin sekä rakentamisen mittausten kehittämiseen. Samalla pyrittiin varmistamaan alan kansainvälisen tutkimustiedon siirto kotimaisen teollisuuden käyttöön. Tässä raportissa esitetään em. osaprojektin tulokset sisävalmistusrobotiikan osalta.

Hankkeen johtoryhmään ovat kuuluneet dipl.ins. Antti Hoppania (Rautaruukki Oy), dipl.ins. Pertti Helle (Partek Kehityskeskus), dipl.ins. Ilkka Laine (SRTL), dipl.ins. Eero Timonen (VTT, elektroniikan laboratorio) sekä tekniikan tohtori Torsti Kivistö (VTT, yhdyskunta- ja rakennussuunnittelun laboratorio).

Sisävalmistusosaprojektia tukeneeseen teollisuustukiryhmään ovat kuuluneet dipl.ins. Erik Sumelius (Oy Partek Ab), tekniikan tohtori Raimo Ahola (Noptel Oy), dipl.ins. Heikki Lempinen (Oy Lohja Ab), ins. Seppo Leimala (Gyproc Oy) ja rakennusmestari Pekka Lönnberg (A.W. Liljeberg Oy).

Projektia ovat rahoittaneet VTT, projektiin osallistuneet yritykset sekä Rakentamisen tieto- ja automaatiojärjestelmät -tutkimusohjelman teollisuusrahoittajat. Projektiin osallistuivat johtoryhmäyrityksinä Rautaruukki Oy, Oy Partek Ab ja Suomen Rakennusteollisuusliitto sekä seurantaryhmän jäseninä Gyproc Oy, Noptel Ky, Lännen Engineering Oy, Savonvarvi Oy, A-Rakennusmies Oy, Prometrics Oy, Oy Tampella Ab Tamrock, Orion-yhtymä Oy Normet, YIT-yhtymä Oy, Oy Renlund Ab, Oy Lohja Ab, A.W. Liljeberg Oy, Parma Oy, Tallberg Tuotantotekniikka Oy ja Tallberg Rakennustekniikka Oy.

Materiaalista tukea projektille ovat antaneet Gyproc Oy, Oy Partek Ab sekä Oy Lohja Ab Muuraustuotteet.

Raportissa kuvattavan laatoitusrobotin prototyypin yleissuunnittelun ja käsivarren ohjelmoinnin on suorittanut Hannu Lehtinen. Mekaanisen suunnittelun ja toteutuksen on tehnyt Hannu Sainio. Liikkumisalustan ohjauksen on suunnitellut ja toteuttanut Mika Matikainen. Karl-Johan Serén on osallistunut käsivarren ohjelmointiin ja laitteen kokeiluihin. Taisto Kempainen on osallistunut rakennusteknisenä asiantuntijana laitteiston suunnitteluun ja arviointiin. Hän on myös toiminut projektiryhmän vetäjänä. Projektin vastuullisena päällikkönä on ollut Lauri Koskela.

Tiedotteen luvut 1, 2, 3 ja 6 on kirjoittanut pääosin dipl.ins. Lauri Koskela. Dipl.ins. Hannu Lehtinen on kirjoittanut kohdat 3.2, 4.2 ja pääosin kohdan 4.3. Dipl.ins. Taisto Kempainen on kirjoittanut kohdat 4.1, 4.5, 4.6, 4.7 ja 5.1. Dipl.ins. Mika Matikainen on kirjoittanut osin kohdan 4.3.2. Dipl.ins. Karl-Johan Serén on kirjoittanut kohdan 4.4. Muiden kohtien kirjoittamiseen ovat osallistuneet kaikki kirjoittajat.

Kiitän kaikkia projektin toteutukseen osallistuneita ja sitä tukeneita.

Lauri Koskela

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	5
ESIPUHE	7
1 JOHDANTO	12
2 SISÄVALMISTUKSEN ONGELMAT JA ROBOTISOINTITARVE	14
2.1 Sisävalmistustöiden luonne	14
2.2 Robotisointitarve	14
3 ROBOTISOINTIMAHDOLLISUUDET SISÄVALMISTUKSEN ERI OSA-ALUEILLA	16
3.1 Yleisiä sisävalmistuksen robotisoinnin kehityshankkeita	16
3.1.1 Technionin sisävalmistuksen robotisointihanke	16
3.1.2 Ruotsalainen sisävalmistuksen robotisointihanke	17
3.1.3 Robotisoitu rakentamisjärjestelmä	17
3.2 Materiaalinkäsittelyn automaatio	18
3.2.1 Materiaalinkäsittelyn automaation tarve	18
3.2.2 Ulkomainen tutkimus- ja kehitystyö	19
3.2.3 Kotimainen tutkimus	20
3.2.4 Automaatio osana materiaalinkäsittelyn kehittämistä	20
3.3 Muurausrobotiikka	21
3.3.1 Muurausrobotiikan tarve	21
3.3.2 Tutkimus- ja kehitystyö	21
3.3.3 Kehitysnäkymät	22
3.4 Maalauksen ja muiden ruiskutustehtävien robotiikka	22
3.4.1 Robotiikan tarve	22
3.4.2 Tutkimus- ja kehitystyö	22
3.4.3 Tulevaisuuden työkaluja	23
3.5 Levytysautomaatio	23
3.5.1 Levytystyöt ja niiden robotisointitarve	23
3.5.2 Levymanipulaattorit	24
3.5.3 Levytysrobotit	24
3.5.4 Kehitysnäkymät	25
3.6 Sisävalmistusmittaukset	25
3.6.1 Sisävalmistusmittausten automaation tarve	25
3.6.2 Kehitetyt ratkaisut	25
3.6.3 Kehitysnäkymät	26
3.7 Sisävalmistuksen yleiset apuneuvot	26
3.7.1 Tarve	26
3.7.2 Tutkimus- ja kehitystyö	26
3.7.3 Kehitysnäkymät	27
3.8 Lattiatyöt	28
3.8.1 Robotisoinnin tarve	28

3.8.2	Tutkimus- ja kehitystyö	28
3.8.3	Kehitysnäkymät	28
4	LAATOITUSROBOTTIKOKEILUT	29
4.1	Laatoituksen robotisointitarve	29
4.2	Vaatimusmäärittely	29
4.3	Tekniset ratkaisut	30
4.3.1	Perusratkaisu	30
4.3.2	Vaunun ohjausjärjestelmä	32
4.3.2.1	Karkea paikkaohjaus riittää	32
4.3.2.2	Reaaliaikainen PC-verkko ohjaimena	32
4.3.2.3	Merkintälasku navigoinnin perustana	33
4.3.2.4	Liikeohjeen laskeminen	33
4.3.2.5	Vaunun paikkaestimointi liikkeiden aikana	34
4.3.2.6	Muut navigointimahdollisuudet	34
4.3.3	Laatoitusprosessi	34
4.3.3.1	Seinän laatoitusjärjestys	36
4.3.3.2	Robotin ohjelmisto	37
4.3.4	Rakentamiseen soveltuva F/T-anturi	40
4.4	Laatoituskokeet	40
4.4.1	Yleistä	40
4.4.2	Alustavat laastikokeet	40
4.4.3	Laatoituskokeet kiinteästä asemasta	41
4.4.4	Laatoituskokeet liikkuvalla alustalla	43
4.4.5	Teknisen ratkaisun arvio kokeiden perusteella	44
4.5	Robotisoitu laatoitus esimerkkikohteessa	46
4.6	Laatoitusrobotiikan talous	46
4.7	Laatoitustyön mukauttaminen robotisointiin soveltuvaksi	47
4.8	Jatkokehitys	48
5	SISÄVALMISTUKSEN KEHITTÄMINEN ROBOTISOINNIN AVULLA	50
5.1	Edellytysten luominen robotisoinnille	50
5.2	Kehitysehdotukset	51
5.2.1	Rakentamisrobotiikan perustekniikoiden kehittäminen	51
5.2.2	Rakentamisrobotiikan sovellusten kehittäminen	51
5.2.3	Rakentamisprosessin hallinnan parantaminen	51
5.2.4	Käytännönläheinen työmenetelmien ja työkalujen kehittäminen	52
6	YHTEENVETO	53
6.1	Sisävalmistusrobotiikan tarve ja nykytila	53
6.2	Laatoitusrobottikokeilut	53
6.3	Sisävalmistuksen robotisoinnin yleiset edellytykset	55
6.4	Sisävalmistusrobotiikan kehittäminen	55
6.5	Miten rakentamisen eri osapuolet voivat edistää ja hyödyntää rakentamisrobotiikkaa?	56

**KIRJALLISUUSLUETTELO**

57

**LIITTEET**

**LIITE 1. Työmaan materiaalinkäsittelyn kehittäminen automaation avulla esimerkkitapauksen valossa**

**LIITE 2. Sisävalmistusvaunun ohjausjärjestelmä**



# 1 JOHDANTO

Rakentamisrobotiikkaa on tutkittu ja kehitetty kymmenisen vuotta. Kiinnostus rakentamisen robotisointiin on tänä aikana johdonmukaisesti kasvanut, niin myös tähän sijoitetut voimavarat. Rakentamisrobottien prototyyppien lukumäärä nousee toiselle sadalle. Työmaille asti ovat robotit kuitenkin ehtineet vain harvoissa tapauksissa, silloinkin lähinnä kokeilujen puitteissa.

Rakentamisrobotiikan tutkimus- ja kehitystyötä tehdään määrällisesti eniten Japanissa. Työ on yleensä organisoitu yritysten tutkimuslaitoksissa toimivien moniteknisten tutkijaryhmien vastuulle. Yhdysvalloissa on kiinnostus rakentamisrobotiikkaan ollut perustutkimuspainotteinen.

Rakentamisrobotiikan kaupallistuminen on lähtenyt liikkeelle nykyisten koneiden mekatronisoinnista. Raskaat maa- ja vesirakentamisen koneet ovat olleet ensimmäisiä kohteita. Talonrakentamisen puolelta esimerkin tarjoaa työmaanosturin tietokoneavusteinen ohjaus. - Tarkkaan ottaen tällaiset koneet eivät useinkaan ole varsinaisia robotteja. Rakentamisrobotiikka -käsitettä onkin tässä tulkittu kansainvälisen käytännön mukaan väljästi.

Ensimmäiset markkinoille tulleet varsinaiset rakentamisrobotit ovat olleet uudentyyppisiä erikoisautomaatteja. Betonilattian hierto ja nosturin nostoapuvälineet ovat olleet ensimmäisiä sovelluskohteita.

Rakentamisrobotiikan perustutkimuksen puolella mielenkiinto kohdistuu toisaalta monitoimirobotteihin, toisaalta robotisoituihin rakentamisjärjestelmiin. Modulaarisia monitoimirobotteja perustellaan sillä, että kukin työvaihe kestää kerrallaan vain vähän aikaa, eikä ole käytännöllistä pitää työmaalla suurta määrää erilaisia erikoisrobotteja. Toisaalta painotetaan sitä, että rakentamisjärjestelmä on suunniteltava uudestaan robotisointiin soveltuvaksi, ennenkuin laajamittaiseen automaatioon pääs-

tään.

VTT:ssa on vuodesta 1985 tarkasteltu rakentamisen robotisointimahdollisuuksia, rakentamisrobotiikan ongelmia ja ulkomailla tehtyä rakentamisrobotiikkaan kohdistuvaa tutkimus- ja kehitystyötä.

Vuonna 1988 toteutetussa "Rakentamisrobotiikan soveltuvuustutkimuksessa" kartoitettiin suomalaisesta näkökulmasta tarkoituksenmukaisia robotisointikohteita rakentamisessa ja määriteltiin viiden robotisointiteeman toimivuustavoitteita ja teknisiä ratkaisuja (Koskela et al. 1989).

VTT:ssa tarkastellut teemat olivat

1. nosturiautomaatio, lähinnä taakkaan kiinnittyminen ja irrottautuminen siitä sekä taakan konevoimainen asemointi (Lempinen & Pieskä 1988)
2. esivalmistusautomaatio, erityisesti teräs- ja betonijulkisivuelementtien joustava valmistus- ja kokoonpanoautomaatio (Salo 1988)
3. sisävalmistustöiden robotisointi, erityisesti seinä- ja kattopintojen käsittely monitoimirobotilla (Salo 1988)
4. materiaalinkäsittely työmailla (Koskela & Toivola 1988)
5. muurausautomaatio, jossa on tarkasteltu suorien väliseiniä robotisoitua muurausta (Lehtinen 1988).

Tehdyn työn perusteella käynnistettiin projekti Rakentamisrobotiikka, joka on osa VTT:n "Rakentamisen tieto- ja automaatiojärjestelmät" -tutkimusohjelmaa. Tämä hanke jakautui kahden osaprojektiin:

1. Sisävalmistustöiden kokeilurobotti (jota tässä tiedotteessa esitellään)
2. Kolmiulotteinen paikanmittaus ja navigointi rakentamisessa (Pieskä et al. 1989).

Tässä tiedotteessa luodaan ensin katsaus sisävalmistustöiden robotisoinnin tarpeeseen ja

kehityksen nykytilaan. Pääosa raportista muodostuu laatoitusrobottikokeilun kuvauksesta. Lopuksi eritellään sisävalmistuksen robotisoinnin edellytyksiä ja jatkotoimia.

## 2 SISÄVALMISTUKSEN ONGELMAT JA ROBOTISOINTI-TARVE

### 2.1 Sisävalmistustöiden luonne

Sisävalmistustyöt ovat hyvin moninaisia. Ne koskevat pääasiassa sisätilojen pintoja, väliseiniä, muita rakenteita ja varusteita. Keskeisiä sisävalmistustöitä ovat mm.

- tasoitetyöt
- rappaus
- maalaus
- tapetointi
- laatoitus
- levyväliseinien asennus
- väliseinien muuraus
- alakattojen asennus
- ovien asennus
- ikkunoiden asennus
- lasitustyöt
- akustointi
- mattotyöt
- parkettityöt
- vesi- ja kosteuseristykset
- listoitukset
- keittiökalusteiden yms. asennus
- varusteiden asennus
- siirrot
- siivous.

Sisätöiden osuus rakennuskustannuksista on 20 - 50 %, keskimäärin 48,1 % (Tilastokeskus 1983). Rakennusajasta sisätöihin kuluu 30 - 55 %. Sisätyöt ovat sekä kustannuksellisesti että ajallisesti merkittävä rakennusvaihe.

Sisävalmistustöiden luonteenomaisia piirteitä robotisoinnin kannalta ovat mm. seuraavat:

- rakennushankkeet ovat moninaisia ja keskenään erilaisia
- paljon erilaisia materiaaleja, tarvikkeita ja työvälineitä, joiden siirtoja on myös runsaasti
- runsaasti aliurakoitsijoita ja materiaalitoimittajia
- lukuisia, lyhytkestoisia tehtäviä, kutakin pieniä määriä, toistuvuus vähäistä
- samaa työvaihetta ei yleensä päästä

tekemään yhtäjaksoisesti, vaan se jakaantuu useaan eri jaksoon, työpisteiden sijainti muuttuu alinomaan

- käsityövaltaisuus
- materiaalien ja työn kalleus
- sisävalmistuksen virheitä ja puutteita ei saada piiloon tai korjatuksi yhtä helposti kuin perustus- ja runkovaiheissa
- ympäristöolosuhteet (lämpötila, vetoisuus, kosteus, pöly) saattavat olla vaikeita.

Sisävalmistustöiden luonteesta johtuu, että sisävalmistustöissä kyseeseen tulevat lähinnä helposti liikuteltavat monitoimirobotit.

### 2.2 Robotisointitarve

Sisävalmistuksen robotisoinnin keskeisiä perusteita eri maissa ovat

- korkeat kustannukset
- laantunut tuottavuus
- ammattitaitoisen työvoiman saannin vaikeus
- laatukysymykset
- työturvallisuus
- työviihtyvyys
- pyrkimys lyhyempään rakennusaikaan.

Sekä työvoiman saannin, työturvallisuuden että työviihtyvyyden kannalta keskeisenä ongelmana on se, että rakennustyöt ovat fyysisesti raskaita. Ruotsalaisessa selvityksessä (Olofsson & Ahlberg 1989) on tarkasteltu neljän eri räsistustekijän kannalta, mitkä rakennusalan ammatit ovat mahdollisia naisille. Lopputuloksena on se, että vain sangen harvat, lähinnä kuljettajan ja varastonhoitajan ammatit ovat soveliaita keskivertonaiselle. Rajoittavaksi tekijäksi muodostuu lähinnä yläraajojen lihasvoima; se on naisilla jopa 50 - 60 % alempi kuin miehillä. Useissa rakennusammateissa ylittyy myös miesten fyysinen suorituskyky, mikä heijastuu kulumasairauksien yleisyytenä.

Rakennustyötä keventävien menetelmien ja koneiden kehittäminen korostuu siten sekä ergonomisista lähtökohdista että tarpeesta laajentaa rakennusammattien rekrytointipohjaa.

Useissa rakentamisrobotiikan soveltuvuusselvityksissä onkin tarkasteltu eri sisävalmistustöiden kehittämistarpeita ja -mahdollisuuksia robotisoinnin kannalta (Salo 1988). Esim. ruotsalaisessa selvityksessä (Åhman & Johanson 1988) todetaan siivous, levytystyöt, muuraus sekä hionta, maalaus ja tasoitetyöt soveliaimmiksi sisävalmistuksen robotisointikohteiksi. Arviointiperustana oli tällöin sekä ergonominen ja työturvallisuudesta johtuva tarve että robotisoinnin tekninen helppous.

Toisaalta robotisointi on vain yksi kehittämiskeino, jota täytyy punnita muita vaihtoehtoja vasten. Pitkälle viety esivalmistus, apuvälineiden järjestelmällinen soveltaminen ja työn huolellinen ennakkosuunnittelu ovat robotisointia välittömämpiä tapoja sisävalmistuksen kehittämiseen. Samalla ne luovat edellytyksiä myöhemmässä vaiheessa tapahtuvalle automaation käyttöönotolle.

### 3 ROBOTISOINTIMAHDOLLISUUDET SISÄVALMISTUKSEN ERI OSA-ALUEILLA

#### 3.1 Yleisiä sisävalmistuksen robotisoinnin kehityshankkeita

##### 3.1.1 Technionin sisävalmistuksen robotisointihanke

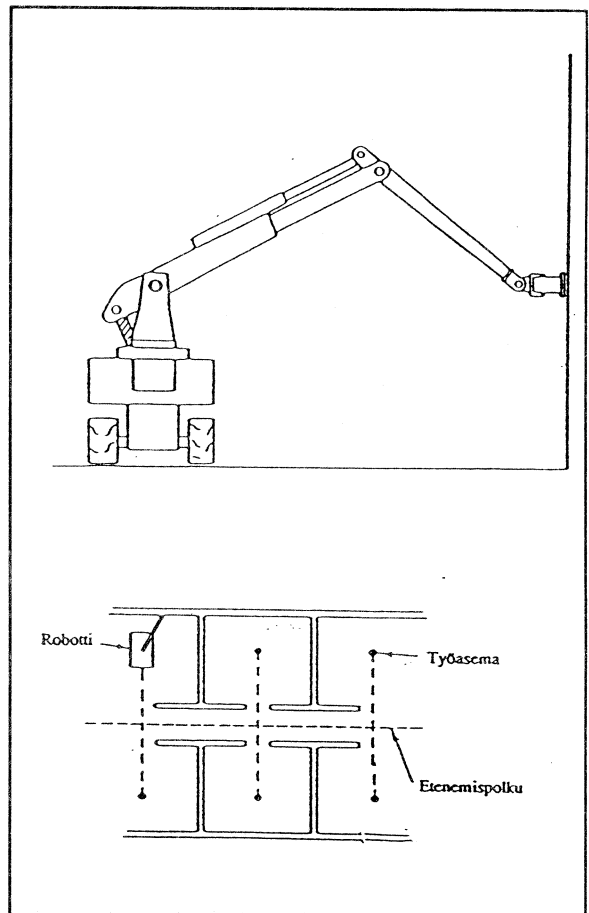
Sisävalmistuksen robotisointia on pitkään tarkasteltu Israelin teknillisen korkeakoulun, Technionin rakennusosastolla. Lähtökohtana on ollut yleinen sisävalmistustöiden robotin (kuva 1) vaatimusmäärittely (Warszawski 1990). Sen mukaan

- vapausasteita tulee olla 6 (manipulaattorilla 3 ja ranteella 3)
- manipulaattorin ulottuvuuden tulee olla 2,5 - 3,0 m (robottikäsivarren optimiulottuvuudeksi on myöhemmin simulointikoekoiden avulla saatu 1,8 - 2,6 m) ja voimakapasiteetin 10 - 15 kg
- tarttujan rakenne ja materiaalinsyöttöjärjestelmä riippuvat sovelluksesta
- ohjausjärjestelmä on automaattinen tai kauko-ohjattu
- myös anturointi riippuu suuresti sovelluksesta
- liikkumisjärjestelmä perustuu pyöriin tai telaketjuihin; manipulaattori, ohjausjärjestelmä ja voimalähde ovat vaunussa.

Eo. vaatimusmäärittely voidaan tulkita kuvaukseksi robottiperheestä, jonka eri jäsenet on mukautettu kulloiseenkin sovellukseen, tai monitoimirobotista, jolla on eri tarttuja, ohjausjärjestelmä ja materiaalinsyöttöjärjestelmä kuhunkin työhön. Robottimäärittely on tarkoitettu mm. seuraaviin sisävalmistustöihin: maalaus, tasoitetyöt, hitsaus, muuraus, laatoitus.

Technionin rakennusosasto on pitkäjänteisesti kehittänyt määriteltyä sisävalmistusrobotia. Työ on edennyt pienoismallikokeista vaunulla liikkuvalla 30 kg teollisuusrobotilla suoritettaviin soveltuvuuskokeisiin. Tutkimusryhmä on kokeillut laatoitusta, harkkomuurausta ja

maalausta sekä tasoitteen levitystä (Rosenfeld et al. 1990). Liikkuvuuden järjestelmälle takaa kolmipyöräinen vaunu, jonka tukijalat ovat kuularuuveja. Tukijalat levittyvät auki ja nostavat robottikäsivarren ilmaan työskentelykohtaan saavuttaessa.



Kuva 1. Kaaviokuva sisävalmistusrobotista ja sen etenemispolusta.

Laatoitus ei Technionissa ainakaan vielä kesällä 1990 ollut täysin automaattista:

- laattaan levitetään (toistaiseksi käsin) 5 liimapistettä
- robotti voi ottaa laatan aukaistusta laatikosta lattialta, mutta joutuu päästämään

otteen hetkeksi irti kaltevalla keskitys-  
asemalla

- liimausjärjestelmää kehitetään edelleen;  
se aiotaan yhdistää laattavaunuun eli
  - kehitetään kärrymoduli, joissa on kussakin laattoja varten kuor-  
matila ja liimasäiliö liimanlevi-  
tysjärjestelmineen
  - operaattori kuljettaa täysinäisiä  
kärryjä työkohteen lähelle
  - robotti etsii kärryn tarkan paikan  
anturoinnin avulla ennen laattojen  
käytön alkua.

Väliseinien kipsiharkkomuuraus on melko nopeata suurten harkkojen (n. 700 x 500 x 100 mm<sup>3</sup>) ansiosta. Robotin 30 kg hyötykuorma on tarkkaan käytetty. Harkkoissa on ohjavia pintoja ja valukanava ylhäältä kaadettavia liimoja varten. Harkkoja varten on tehty kahden ison imukupin tarrain. Harkko ohittaa mittausaseman, jonka avulla saadaan harkon paikka tarraimessa tietoon ja täten korjatuiksi tulevat asennuspisteet. Videosta päätellen robotin kiihtyvyyksiä on jouduttu hidastamaan harkkojen putoamisvaaran vuoksi; nyt aikaa kuluu noin 60 s/harkko, mutta pyritään 20 s tahtiin.

Maalaus- ja tasoitteenlevitysversiossa on robotin tarttujaan asennettu maaliruisku, jonka yhteydessä on pieni maalin puskurisäiliö, jota syötetään suuremmasta, vaunussa olevasta säiliöstä. Ruiskun etäisyys seinästä, sen asento seinään nähden ja liikenopeus ohjelmoidaan tasaisen maalipinnan aikaansaamiseksi. Esteet, kuten ovet ja ikkunat, havaitaan joko manipulaattorissa olevan sensorin avulla tai tieto niistä ohjelmoidaan etukäteen työn alkaessa.

Technionissa tehty työ on hyvä esimerkki pitkäjänteisestä tavoitteellisesta perustutkimuksesta, jota voidaan tehdä myös suhteellisen niukoin voimavaroin.

### 3.1.2 Ruotsalainen sisävalmistuksen robotisointihanke

Ruotsissa tehdyssä soveltuvuustutkimuksessa on pyritty asettamaan toiminnalliset vaatimukset sisävalmistustöiden robotille ja hahmottelemaan tekniset perusratkaisut (Glimskär 1990). Tarkasteltavat työt ovat maalaus, tasoitetyöt ja hionta.

Hahmoteltu ratkaisu perustuu telaketjuajoneu-  
volle asennettuun hydraulikäsivarteeseen, joka kannattaa erityistä kehikkoa. Työkalu liikkuu kehikossa kahdessa suunnassa. Työkaluina suunnitellaan käytettäväksi markkinoilla olevia tuotteita, kuten timanttilaikkahiomakonetta, maalausrullaa ja erityistä tasoitustyökalua, joka samanaikaisesti levittää tasoitetta ja tasoittaa sen.

### 3.1.3 Robotisoitu rakentamisjärjestelmä

Japanilainen Ohbayashi-rakennusliike on kehittä-  
mässä automatisoitua rakentamisjärjestelmää, joka kattaa sekä runko- että sisävalmistustyöt (Teraoku 1990, Anon. 1990). Kun perustukset ja ensimmäinen kerros on saatu rakennetuksi, suuri, koko kerrosalan peittävä, katettu rakentamisrobotilava asennetaan ensimmäisen kerroksen päälle. Tämä lava, "Super Construction Floor", sisältää materiaalsiirto- ja varastointijärjestelmän, nosturin, joukon hitsaus-, kokoonpano-, asennus- ja tarkastusrobotteja ja ohjaushuoneen työasemineen. Automaattinen välivarasto voi olla myös rakennuksen kellari-  
tiloissa. Materiaali siirretään rakentamisrobotilavalle rakennuksen hissikuiluun sijoitetun nostojärjestelmän avulla.

Automaattiset laitteet rakentavat aina yhden kerroksen lavalta käsin, ja lava nostetaan sitten hydraulisylinterien avulla kerrosta ylemmäs. Lavarakenne kattoineen jää rakennuksen kahdeksi ylimmäksi kerrokseksi; rakentamisrobotit ja muu erikoisvarustus luonnollisesti poistetaan siitä. Rakennuksen suunnittelu, tuotannon suunnittelu ja työnaikainen tuotannonohjaus suori-

tetaan yhdenntyn CAD/CAM-järjestelmän avulla.

Rakentamistapa edellyttää rakennusosien pitkälle menevää esivalmistusta; näin myös sisävalmistusvaiheen osalta.

Järjestelmä soveltuu lähinnä hankkeisiin, joissa kerrokset ovat samanlaiset: toimistorakennuksiin, hotelleihin ja asuinkerrostaloihin. Mikäli alimmat kerrokset poikkeavat ylemmistä, ne rakennetaan ensin tavanomaisin tekniikoin, ja rakentamisrobotilava asetetaan työskentelämään niiden päältä.

Ohbayashi väittää järjestelmällä saavutettavan seuraavat edut:

- työvoimatarve tällä järjestelmällä on 10 % tavanomaiseen rakentamiseen verrattuna
- voidaan soveltaa 24-tuntista työskentelyä, mikä lyhentää rakentamisaikaa lähes puolella
- työturvallisuus paranee työn käytön vähetessä
- telineiden tarve poistuu.

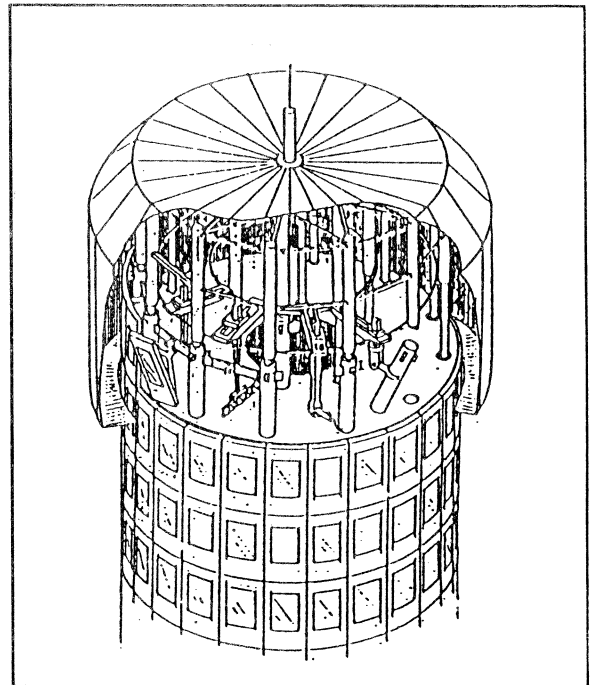
Järjestelmää on tarkoitus käyttää ensi kertaa täydessä mittakaavassa vuoden 1991 aikana. Myös eräät muut japanilaiset rakennusyrietykset ovat kehittämässä samantapaisia järjestelmiä (esim. Sakamoto & Kumano 1991).

## 3.2 Materiaalinkäsittelyn automaatio

### 3.2.1 Materiaalinkäsittelyn automaation tarve

Tarkastelun kohteena ovat ne kevyet ja keskiraskaat, lähinnä sisävalmistusvaiheen siirrot, joita ei suoriteta rakennusnosturilla. Työmäärältään tällaiset materiaalsiirrot edustavat 20 - 30 % sisävalmistusvaiheen koko työpanoksesta.

Välittömien työkustannusten ohella materiaalinkäsittely - ja etenkin siinä ilmenevät häiriöt



Kuva 2. Ohbayashin robotisoidun rakentamisjärjestelmän periaatekaavio.

- aiheuttaa moninaisia välillisiä kustannuksia, jotka liittyvät mm. materiaalin menekkeihin, työturvallisuuteen ja muihin työmaan yleiskustannuksiin.

Vaakasiirrot ovat yhä fyysisesti raskas, tapaturma-altis ja paljon työaika vaativa tehtävä. Tilannetta luonnehtivat seuraavat havainnot:

- talonrakennustyömailla kannetaan edelleen suuria tavaramääriä
- siirtokalustoa, etenkin erilaisia kärryjä, suunnitellaan ja valmistetaan työmaakohtaisesti, vaikka vastaavia tuotteita on olemassa
- motorisoitua kalustoa sisäsiirtoihin on verraten vähän
- epäjärjestys ja jätteet vaikeuttavat siirtokaluston käyttöä
- viime vuosien arkkitehtonisen laadun korostaminen on johtanut kerrosten monitasoratkaisuihin ja vaakasiirtojen vaikeutumiseen.

Rakennustöiden automatisointi ja robotisointi tuo uuden näkökulman materiaalinkäsittelyyn: automaattiset koneet voivat toimia vain järjestyneissä olosuhteissa, ja niiden materiaalintarve aikayksikköä kohti on yleensä suurempi kuin manuaalisessa työssä, joten materiaalinsiirtokysymykset korostuvat automatisointia pohdittaessa.

### 3.2.2 Ulkomainen tutkimus- ja kehitystyö

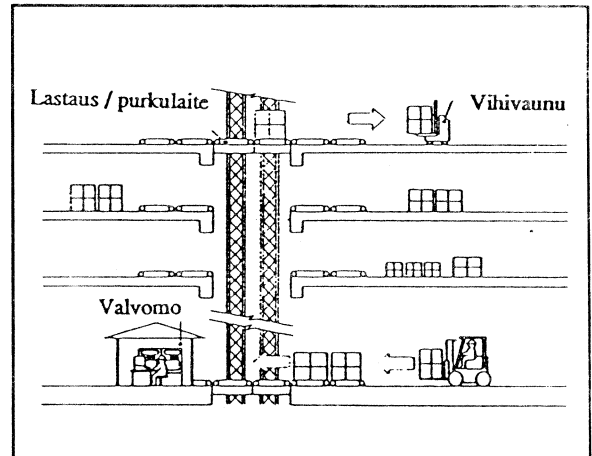
Japanilainen Takenaka-rakennusliike on toteuttanut prototyyppiasteelle kaksi työmaan automaattista materiaalinsiirtojärjestelmää. Erona niissä on lähinnä vaakasiirtojen järjestäminen.

Toinen järjestelmä soveltuu sellaisille materiaaleille, joiden yhteydessä voidaan käyttää kuormalavoja (kuva 3). Automaattinen materiaalinsiirto käsittää tällöin seuraavat vaiheet. Siirtoa edeltää materiaalin lavoitus ja siirto-osoitteen syöttö järjestelmään. Kuormalavat lastataan haarukkatrukilla rakennushissin edessä olevalle hihnakuljettimelle, jolta ne siirtyvät hissiin. Hissi nousee määrättyyn kerrokseen, jossa materiaali siirtyy hihnakuljettimelle. Haarukkavihivaunu ottaa lavat hihnakuljettimelta ja siirtää materiaalin osoitettuun välivarastointipaikkaan. Vihivaunu ohjautuu optisesti lattialle kiinnitetyn nauhan avulla. Tietokone ohjaa kaikkia toimintoja, eikä manuaalisia työvaiheita varsinaisen siirron aikana ole. Järjestelmän yhteydessä on valvomo, josta siirtoja seurataan mm. televisiomonitorein.

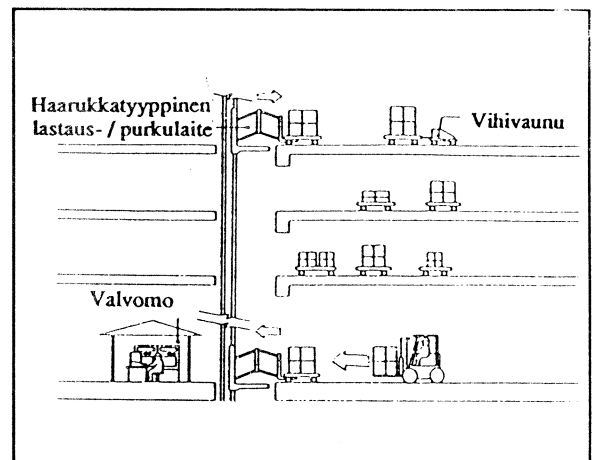
Toisessa järjestelmässä tavara voi olla pitkää, esim. putket ja levyt (kuva 4). Tavara lastataan pitkälle pyörälustalle. Rakennushissiin asennettu, saksimekanismin varassa ulostyöntävä haarukka kahmaisee hissikuilun edessä odottavan pyörälustan ja määräkerroksessa sysää sen ulos. Itseohjautuva vetovihivaunu vie pyörälustan perille.

Tällaiset järjestelmät soveltuvat lähinnä erittäin suuriin toimistorakennushankkeisiin. Perusideoiden pohjalta voidaan kehittää myös pienem-

piin kohteisiin soveltuvia järjestelmiä.



Kuva 3. Takenakan automaattinen kuormalavojen siirtojärjestelmä.



Kuva 4. Takenakan automaattinen pyörälustalle sijoitetun materiaalin siirtojärjestelmä.

Myös Fujita-rakennusliike on julkistanut kehittä-

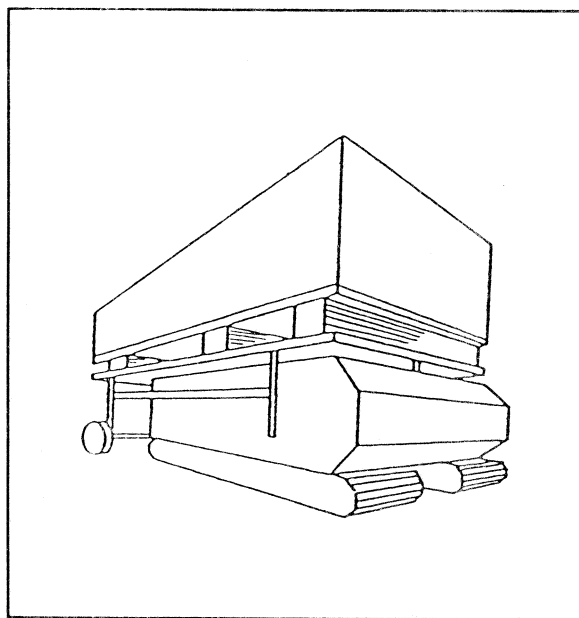


täneensä samantyyppisen järjestelmän. Keskeisenä ideana siinä on se, että järjestelmä siirtää yöllä kerrokseen seuraavana päivänä tarvittavat sisävalmistusvaiheen materiaalit.

Ranskassa on tarkasteltu sisävalmistuksen materiaali siirtoja Norpac-firman (Bouyguesin tytäryhtiö) ja Ecole des Mines de Douai -oppilaitoksen yhteistyönä. Tutkimusryhmä ehdottaa telaketjuilla kulkevaa vaunua (kuva 5), joka pystyisi

- kuljettamaan siirtolavoja
- nousemaan portaita
- kuljettamaan jätteitä ym. kippilavan avulla.

Ensi vaiheessa pyritään kauko-ohjattuun toimintaan. Laitteen painoksi arvioidaan 400 kg, kooksi (pituus, leveys, korkeus) 130 x 65 x 55 cm<sup>3</sup> ja nopeudeksi 1m/s. Voimalähdettä ei määritellä. - Nämä kaavailut ovat varsin samantyyppisiä kuin VTT:n "Rakentamisrobotiikan soveltuvuustutkimuksen" materiaalinkäsittelyosassa.



Kuva 5. Sisävalmistuksen materiaalinkäsittelyyn kaavailtu liikkuva alusta.

### 3.2.3 Kotimainen tutkimus

Materiaalinkäsittelyn automaatiota on tarkasteltu VTT:n rakentamisrobotiikkaprojekteissa ja TKK:n hankkeessa "Rakentamisen teollinen tuotantojärjestelmä" (Kanerva et al. 1990).

Japanilaisten ideoiden pohjalta pyrittiin määrittelemään Suomen olosuhteisiin soveltuva keveämpi järjestelmä. Keskeisenä ideana on se, että kuorman siirtyminen purkauspaikalta kerrokseen (ja, mikäli mahdollista, työkohteeseen) tapahtuisi automaattisesti, lähes ihmiskäden koskematta. Tällöin järjestelmän toimintaperiaatteena olisi ensisijaisesti se, että JOT-periaatteiden mukainen autokuorma siirtyisi em. järjestelmän avulla automaattisesti purkauspaikalta määräkerrokseen.

Järjestelmää on tarkemmin kuvattu liitteessä 1.

### 3.2.4 Automaatio osana materiaalinkäsittelyn kehittämistä

Materiaalinkäsittely tarjoaa oppikirjaesimerkin siitä, että automaatio on vain yksi keino tuottavuuden kohottamiseen.

Materiaalihallinto on laaja kokonaisuus, ja sen kehittämistä tulisi lähestyä usealla eri aikajännteellä.

Lyhyellä tähtäyksellä tulisi keskittyä materiaalihallinnon kehittämiseen tunnettujen periaatteiden ja apuvälineiden pohjalta sekä toisaalta tuotannonohjausjärjestelmän ja erityisesti sen materiaalihallintoon liittyvien osien täydellistämiseen. Mm. ruotsalaiset kokemukset osoittavat, että voidaan päästä huomattaviin säästöihin (Asplund 1991). Suomessa saatujen kokemusten mukaan voidaan jo huomion kiinnittämisellä ja palautteen annolla aikaansaada oleellista edistystä (Hyödynmaa et al. 1986, Santala et al. 1988).

Keskipitkällä aikavälillä on tarpeen kehittää materiaali toimittajien ja työmaiden välistä tilaus- ja toimitusmenettelyä ns. JOT-periaat-

teiden mukaiseksi, jolloin avainasiana on aika-taulutettujen, työkohdekohtaisten materiaaliereiden toimittaminen työmaalle. Myös viivakoodien käyttöönotto on tärkeää tässä vaiheessa.

Automaattisen siirtojärjestelmän osajärjestelmien kehittäminen on niinkään keskipitkän tähtäyksen tehtävä. Sinänsäkin käyttökelpoisia osajärjestelmiä ovat mm.

- moottoroitu siirtoalusta työmaakäyttöön (käsiohjaus)
- purku/väliavarastointijärjestelmä
- rakennushissin puoliautomaattinen käyttö: kuorman itsenäinen siirto määräkerokseen, kun työntekijä on lastinpurkutasolla
- pienkonteista koostuva jätteenkuljetusjärjestelmä.

Tämän jälkeen voidaan laajemmin alkaa soveltaa automaattista materiaalinkäsittelyä työmaalla niissä puitteissa kuin se on taloudellisesti kannattavaa yhdistämällä eri osajärjestelmiä.

### 3.3 Muurausrobotiikka

#### 3.3.1 Muurausrobotiikan tarve

Vaikka ulkoseiniä muurataan rakennuksilla noin 10 kertaa enemmän kuin väliseiniä (noin 420 000 m<sup>2</sup> vuodessa), niin väliseinät ovat potentiaalisempia automatisointikohteita yksinkertaisine ja toistuvine ominaisuuksineen.

Pääkaupunkiseudulla on esiintynyt niukkuutta muurareista. Muurattavia väliseiniä onkin tämän vuoksi korvattu paljon levyseinillä jo suunnitteluvaiheessa.

Robotisointia puoltavat seuraavat piirteet:

- muuraukseen tarvitaan paljon taitoa ja kokemusta, jotka voidaan siirtää tietokoneille (ja roboteille), jotka eivät unohda oppimaansa
- perusprosessi toistuu usein (ja yleensä) samanlaisena.

#### 3.3.2 Tutkimus- ja kehitystyö

Muurausautomaation esitutkimuksessa (Lehtinen 1988) on määritelty iteratiivisesti toiminta-vaatimukset, alustavat mekaaniset ratkaisut ja muurausjärjestelmän taloudellisia tunnuslukuja. Tehtävän helpottamiseksi päätettiin analysoida vain sellaisia suoria väliseiniä, joiden koko on enintään 11 x 3,2 m<sup>2</sup>, jotka muurataan ohutsaumamenetelmällä ja jotka voivat sisältää suorakulmaisia aukkoja. Ohutsaumamenetelmää käytettäessä laasti voidaan levittää tiileen kastamalla, mikä helpottaa automatisointia.

Kahta mekaanista vaihtoehtoa on analysoitu. Monimutkaisemmassa järjestelmässä on tiiliä purkava manipulaattori, tiilien kuljetusjärjestelmä, muurauskohdalle liikkuva vaunu, laastiallas, katkaisuasema ja kahdelle lineaariliikkeelle asennettu SCARA-robotti. Prosessin ohjaukseen tarvitaan kuuden vapausasteen voima- ja momenttimittausta. Viimeisten tiilikerrosten muuraukseen on kehitettävä erityistarrain. Mekaniikaltaan yksinkertaisempi ratkaisu on kuuden vapausasteen teollisuusrobottikäsivaren asentaminen liikkuvalla vaunulle tiililetkan kanssa. Molemmissa ratkaisussa käytetään samoja komponentteja. Mekaniikan hintaa nostavat vaatimus muurata samalla järjestelmällä koko seinä, seinän suuri koko sekä suuret materiaalivirrat.

Muuraus esitettyjen järjestelmien avulla on itse asiassa puoliautomaattista, koska seinään täytyy asentaa muurauksen edistyessä siteitä ja muita osia. Järjestelmien markkinahinnaksi on arvioitu noin 1,5 Mmk. Kriittisiä tekijöitä kannattavuuden kannalta ovat seinän koko ja valmistelutöiden monimutkaisuus. Työvaiheanalyysin perusteella takaisinmaksuajan minimiksi on saatu noin kolme vuotta suurilla väliseinillä ja noin 4,5 vuotta keskimääräisen kokoisilla väliseinillä. Tällöin on käytetty yksivuorotyötä ja nykyistä muurauksen keskityöansiota. Mutta muurausautomaatio voisi olla ratkaisu jo nyt havaittavaan muuraustyövoiman saatavuusongelmaan. Ihminen voisi keskittyä väliseiniä haastavampiin muuraustöihin.

Harkkomuuraus on tiilimuurausta tehokkaampaa suuremman kappalekoon vuoksi. Israelissa on kokeiltu erityisesti robottia varten suunniteltujen kipsiharkkojen muurausta sisävalmistusrobotilla, kuten edellä on selostettu. Tällöin korostuvat järjestelmän liikkumis- ja kantokykyvaatimukset.

### 3.3.3 Kehitysnäkymät

Automaattisessa työmaalla tehdyssä väliseinämuurauksessa keskeiset ongelmat ovat:

- Muurausnopeuden ollessa taloudellinen, on tiilien virtaus niin suuri, että materiaalinkäsittelyn järjestäminen on hankalaa ja kallista sekä manuaalisesti että automaattisesti.
- Väliseinien muurausvaiheessa ei lattiaita ole usein valettu.

Näistä syistä VTT:ssä päätettiin valita laatoitus ensimmäiseksi sisävalmistusrobotin koesovellukseksi.

Muutamia puoliautomaattisia harkkomuurausmanipulaattoreita on ollut jo 1960-luvulta lähtien kokeilukäytössä ja lisää kehitetään. Ne eivät ole kuitenkaan toistaiseksi jääneet rakentamistyövälineiden joukkoon.

Muurauksen automaatioon kohdistuva tutkimus- ja kehitystyö on eri maissa muutaman viime vuoden aikana lisääntynyt huomattavasti (esim. Böhm 1991, Drees et al. 1991).

## 3.4 Maalauksen ja muiden ruiskutustehtävien robotiikka

### 3.4.1 Robotiikan tarve

Erityyppiset ruiskutustehtävät, kuten maalaus, ovat olleet ensimmäisiä teollisuusrobottien sovelluskohteita. Rakentamisessa ruiskutustehtäviä ovat mm.

- maalaus
- tasoitteen levitys
- hiekkapuhallus

- palosuojauksen levitys.

Maalaustöiden robotisoinnin kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi mm. maalauksen edullinen kustannus muihin pinnotteisiin verrattuna sekä käsin tehtävien valmistelevien töiden suuri osuus; käsin ruiskuttamalla syntyy valmista jälkeä hyvin tehokkaasti. Maalaustyö on luonteeltaan liikkuvaa, ja samassa työpisteessä viivähdetään vain hyvin lyhyt aika.

Toisaalta niin maalauksessa kuin muissakin ruiskutustehtävissä on ongelmana työhygienia.

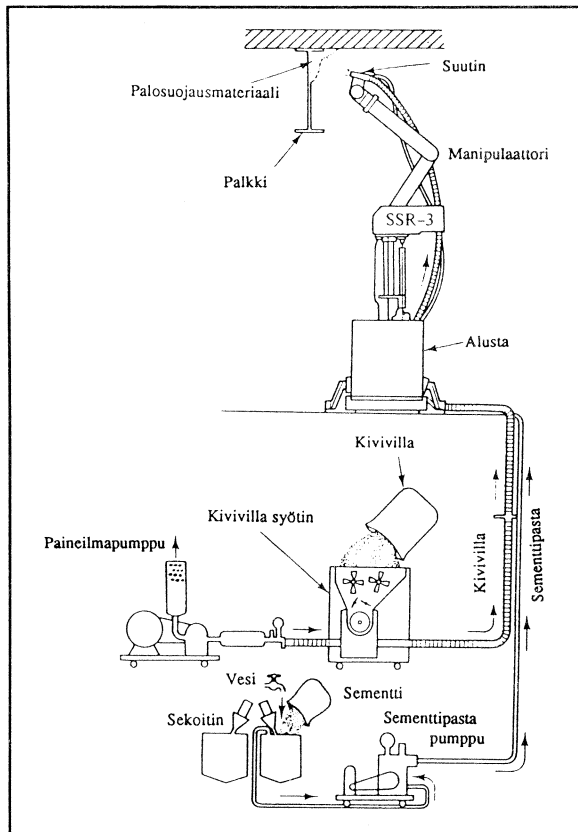
### 3.4.2 Tutkimus- ja kehitystyö

Kehittynein ruiskutusrobotti on Shimizun palosuojausrobotti, jonka kolmas versio SSR-3 valmistui vuonna 1986 (Ueno & al. 1988). SSR-3 on teräspalkkien palosuojaukseen tarkoitettu robotti. Laitteessa on liikkuma-alusta ja nelivapausasteinen manipulaattori (kuva 6). Robotti ohjelmoidaan off-line-menetelmällä PC-koneella, ja ohjelma tallennetaan C-kasetille. Myös ohjausjärjestelmä on onnistuttu pakkaamaan vaunulle; edellisessä versiossa ohjausjärjestelmän suurikokoinen kaappi oli kaapelein kytketty ruiskutusrobottiin.

Ranskassa on kehitetty kokeilumielessä SOFFITO-niminen sisäkattojen maalausrobotti (Salagnac & al. 1988). SOFFITOn lähtökohta ei ollut konkreettinen tarve sisäkattojen maalauksen robotisointiin, vaan pyrkimys selvittää sisävalmistustöihin sovellettavan robotiikan keskeisiä kysymyksiä.

SOFFITossa on sähkökäyttöinen liikkumalusta, ultraääniantureita paikantamista varten, normaali teollisuusrobotti manipulaattorina, maaliruisku sekä valmiit ohjainkortit antureille ja manipulaattorille. Ohjausyksiköt on sijoitettu liikkumalustalle; energialähde on ulkopuolinen.

Kehitystyössä selvitettiin perusteellisesti ruiskumaalauksen tekniikkaa. Keskeisinä maalauksen laatuun vaikuttavina parametreina kokeiltiin suuttimien kulkunopeutta, ruiskutuskulmaa,



Kuva 6. Palosuojausrobotti SSR-3.

maalisuihkun leveyttä, maalin viskositeettia ja ruiskutuspainetta.

Kuten edellä on todettu, myös Israelissa on tehty kokeita sisäseinien robotisoidusta maalauksesta ja tasoitteen levytyksestä.

USA:ssa Purduen yliopistossa on suunniteltu monitoimista sisävalmistusrobottia ja on laskettu kokoonpanon kannattavuutta eri tehtäviin. Maalaukseen laite ei taloudellisesti sovelu, mutta kylläkin laajojen ja tukalien sisätilojen hiekkapuhallukseen ja muuhun pintakäsittelyyn (Skibniewski 1988).

Ruotsalaisessa soveltuvuusselvityksessä pakkaus- ja maalaustyöt osoittautuivat yhdeksi lupaavimmista rakentamisrobotiikan kokeilu-kohteista (Åhman & Johansson 1988).

Myös VTT:n soveltuvuustutkimuksessa maa-

laustyöt osoittautuivat yhdeksi varteenotettavaksi harjoittelukohteeksi kannattavuusongelmista huolimatta (Salo 1988). Robottien vaikeasti toteutettavan liikkumiskyvyn ja aikaa vievän tehtävänmäärittelyn johdosta maalausrobotti on ensi vaiheessa todelliseen käyttöön taloudellisesti kannattamaton.

### 3.4.3 Tulevaisuuden työkaluja

Rakentamisen monimuotoistuminen, restaurointi ja laatuvaatimusten kohoaminen ovat hidastamassa tekniikaltaan vaikeiden ja työmailla tällä hetkellä kömpelöiden sisämaalautusautomaattien käyttöönottoa. Toisaalta maalauksessa työtaturma-alttiit tai muutoin terveydelle haitalliset tehtävät lienevät ensimmäisiä sovelluskohteita. Sisämaalusrobotit saattavat uudelleen mahdollistaa terveydelle vaarallisten, mutta teknisesti erinomaisten maalien ja muiden ruiskutettavien aineiden käytön.

Vielä kehitystyötä tarvitsevia teknisiä ongelmia ovat ruiskutusrobotin liikkuvuus, tehtävän määrittely sekä maalausta paitsi jäävien pintojen suojaus. Niinikään ruiskutettavien aineiden mukauttaminen ja ruiskutusprosessin hallinta ovat keskeisiä kysymyksiä.

## 3.5 Levytysautomaatio

### 3.5.1 Levytystyöt ja niiden robotisointitarve

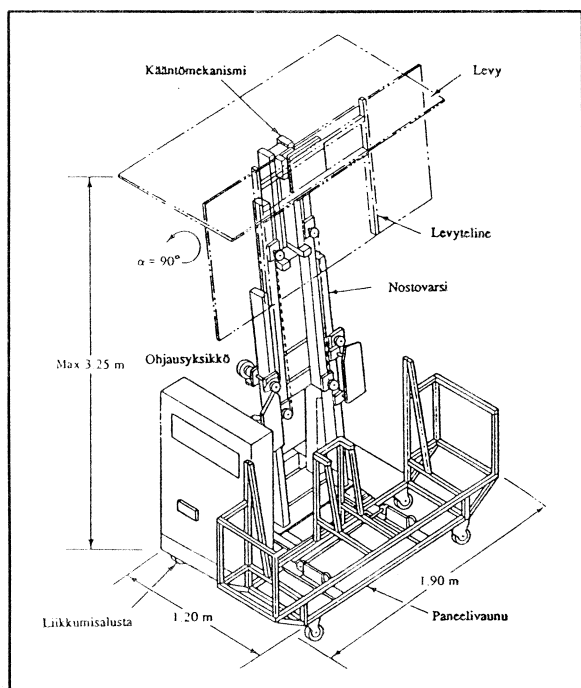
Sisävalmistusvaiheessa rakennuslevyjä käytetään pääasiassa keveiden väliseinien ja alaslaskettujen kattojen levyttämiseen sekä lattiarakenteisiin. Suosituimmat levytyypit ovat kipsilevy, lastulevy, kuitulevy sekä sementtiselloosalevy.

Levytystyöt käsittävät levyjen siirron työpisteeseen, levyjen sahaus, kiinnityksen ja viimeistelyn. Levyjen painon ja epäedullisen työasennon johdosta levytystyö on ergonomisesti kuluttavaa.

### 3.5.2 Levymanipulaattorit

Prototyyppeasteelle on Japanissa viety tiittävästi kolme levymanipulaattoria.

Shimizu-rakennusliikkeen kehittämä "CFR-1" on kattolevyjen asennuslaite, mekatroninen statiivi, joka poimii levyn mukana kulkevasta makasiinista ja siirtää levyn oikealle paikalleen kiinnittämistä varten (kuva 7). Asennuslaite etenee itsenäisesti levyn leveyden verran asennuksen jälkeen. CFR-1:n avulla vältetään kahden asentajan tarve ja levyjen vaivalloinen tukeminen. Vaikka laite on ilmeisesti vielä prototyyppeasteella, saadut kokemukset ovat lupaavia: työsaavutus on 25 levyä tunnissa, mikä on huomattavasti parempi kuin perinteisin menetelmin suoritettussa työssä. - Vastaväntätyyppisen kattolevymanipulaattorin on kehittänyt myös Taisei.

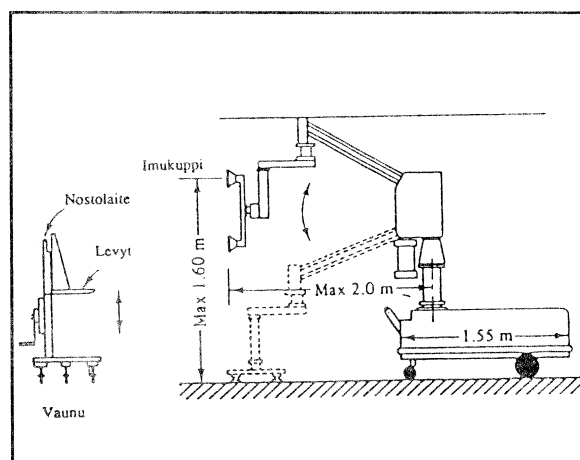


Kuva 7. Shimizun kehittämä kattolevyjen asennuslaite.

Taisei on kehittänyt seinälevyjen asennusmanipulaattorin (kuva 8). Laitetta käytetään raskaiden, jopa 80 kg painoisten levyjen asentami-

seen väliseinätöissä. Laite painaa 800 kg, ja sen ulkomitat ovat 1,55 x 0,65 m<sup>2</sup>. Manipulaattori tarttuu erityisessä vaunussa olevaan kipsilevyyn imukupein. Operaattori ohjaa käsin laitteen käsivartta kevyesti johdattelemalla; ohjaukseen tarvittava voima on vain murto-osa taakan käsivaraiseen liikutteluun verrattuna.

Laite pitää taakan tarkasti ohjatussa asennossa, jolloin levyt kiinnitetään joko asentajan käsiruuvaimella tai laitteen yhteyteen sijoitettavilla työkaluilla automaattisesti. Myös tämä laite etenee itsenäisesti seuraavan levyn asennuskohdalle. Taisein levymanipulaattori vaikuttaa vielä jossain määrin kömpelöltä ja raskaalta; työnäytöksen aikana operaattorin kypärä osui useaan kertaan käsivarsistoon.



Kuva 8. Taisei-rakennusliikkeen kehittämä levymanipulaattori.

### 3.5.3 Levytysrobotit

Yhdysvalloissa on ollut yksi väliseinätyön robotisointiin tähtäävä hanke. MIT:ssa on 1980-luvun lopulla ollut työn alla keveitä levyväliseiniä kokoava kolmen robotin WALLBOT-perhe: Trackbot kiinnittää lattiaan ja kattoon teräsprofiilijuoksut paikantaen aseman lasersäteiden avulla, Studbot kiinnittää pystytolpat ja Screwbot levyt (kaksi ensimmäistä on saatu prototyyppeasteelle, viimeisimmästä ei ole myöhempiä tietoja). WALLBOT-sarja on tarkoitettu yksinkertaisille, suorille seinäosuuk-

sille; esimerkiksi oviaukot tehdään käsin. Työ on ollut akateemista perustutkimusta eikä ole toistaiseksi johtanut tuotekehitykseen.

### 3.5.4 Kehitysnäkymät

Tähänastiset levymanipulaattorit eivät vielä ole valmiita tuotteita, eivätkä ne välttämättä sovi Suomen olosuhteisiin kovin hyvin. Levymanipulaattori on tekniseltä vaikeusasteeltaan kohtuullinen. Kaupallisia tuotteita mm. alustan osalta voitaisiin todennäköisesti käyttää sen osina. Olisi järkevää käynnistää soveltuvuus selvitys levymanipulaattorin kehittämisestä Suomessa.

## 3.6 Sisävalmistusmittaukset

### 3.6.1 Sisävalmistusmittausten automaation tarve

Sisävalmistusmittausten automaation tarve johtuu toisaalta mittatarkkuusvaatimusten kiristymisestä, toisaalta rakennuskoneiden tarpeista sinänsä. Etenkin komponenttirakentaminen edellyttäisi nykyistä pienempien toleranssien soveltamista. Toisaalta automaattisten rakennuskoneiden on jatkuvasti tiedettävä sijaintinsa kolmessa ulottuvuudessa. Korjausrakentamisen volyymin kasvu lisää niinkään tarvetta nopeisiin ja tarkkoihin mittauksiin.

### 3.6.2 Kehitetyt ratkaisut

Rakentamisen mittauksiin ja rakennuskoneiden navigointiin ja paikoitukseen liittyviä toiminnallisia vaatimuksia ja teknisiä ratkaisuja on lähemmin tarkasteltu viitteissä (Pieskä & Lindholm 1989, Pieskä et al. 1990, Lindholm & Pieskä 1990).

Huonetilassa suoritettuun reaaliaikaiseen kaksiulotteiseen paikanmittaukseen on kehitteillä useita järjestelmiä. Ne perustuvat tavallisesti laservalolla suoritettuun kulmamittaukseen (esim. Ochi & Mio 1988). Niissä käytetään joko aktiivisia majakoita tai passiivisia heijastimia.

Ranskalaisen paikotusjärjestelmän (Salagnac et al. 1990) ideana on, että robotin asema suorakulmaisessa huoneessa tunnetaan, kun mitataan kohtisuorat etäisyydet kahteen seinään. Sekä lähetin että vastaanotin on asennettu kulkuneuvoon, joten systeemi ei vaadi erityistä adaptaatiota ympäristöön. Tämän CSTB:ssä kehitetyn ultra-äänipaikannusjärjestelmän periaatteet ovat seuraavat:

- kumpikin anturi voi pyyhkäistä 90 astetta
- molemmista pyyhkäisystä lasketaan lyhin etäisyys toisiaan vastaan kohtisuorassa oleville vaakasuorille seinille ja kulmat, missä ko. lyhimmat etäisyydet sijaitsevat
- anturijärjestelmä laskee anturijärjestelmän geometrian ja huoneen nimellisten mittojen mukaan, missä paikassa ja asennossa (kieritymiskulmassa) vaunu on, joten mitään majakoita ei tarvitse asentaa huoneeseen.

Hollannissa on rakentamissovelluksiin kehitetty laseriin perustuva, tasossa toimiva laserpaikannin, CAPSY (de Vos & Schouten 1989). Sen suunnittelussa huomioon otettuja vaatimuksia ovat 3 mm tarkkuus, yksinkertaisuus, käyttökelpoisuus nykyoloissa, matala hinta ja vankka rakenne. CAPSY:n (Computer Aided Positioning System) toiminta perustuu kolmiomittausperiaatteeseen. Laite asennetaan rakennuskoneeseen, josta se mittaa heijastimista (vähintään 3 kpl) palautuvan lasersäteen suunnan. Kun heijastinten sijainti tunnetaan, voidaan kulmatiedon perusteella laskea koneen sijainti.

Suunta voidaan määrittellä jopa asteen tuhannesosan (3 - 4 sekuntia) tarkkuudella, jolloin huonetiloissa saavutetaan helposti vaadittu kolmen millimetrin tarkkuus. Toistaiseksi heijastinten tilalla on käytetty vastaanottimia, jotka ilmoittavat tietokoneelle, kun lasersäde kohtaa valoherkän ilmaisimen. Seuraavana askeleena kehittäjillä onkin saada sama laitteisto toimimaan yksinkertaisten heijastinten avulla.

Mainittakoon, että em. CAPSY-järjestelmää sovelletaan TNO:ssa kehitettävässä mittaus- ja

merkintärobotissa; se merkitsee paikat johon väliseinät on sijoitettava tai reiät sisäkattojärjestelmää varten porattava (Krom, de Vos & Tolman, 1990).

Myös ultraäänitekniikkaa sovelletaan useilla eri tavoilla sekä liikkuvan robotin paikantamiseen että esteen havainnointiin. Ultraäänianturit ovat kohtuullisen halpoja, ja antureiden tarkkuus vaihtelee metristä muutamaa millimetriä. Yleisimmin käytettyjä tekniikoita ovat lähetetyn ja vastaanotetun signaalin vaihe-eron tai kulkuajan mittaaminen. Kun sijoitetaan lähettämiä/vastaanottimia tunnettuihin kohtiin ympäristöön ja vastaanotin/lähetin ajoneuvoon, geometriatiedoista voidaan laskea kulkuneuvon paikka.

Yhtenä mahdollisuutena on myös se, että sisätiloissa käytettävien robottien navigointi tulee perustumaan yhä enenevässä määrin talon rakenteisiin sijoitettujen osien aistimiseen. Esimerkiksi käy CSTB:ssä kehitetty järjestelmä, joka pyrkii paikantamaan itsensä betonilaattaan sijoitetun raudoituksen avulla (Salagnac et al. 1988). Eriväriset lattia- tai seinälaatat mahdollistavat puolestaan konenäön tehokkaan hyväksikäytön. Tällainen rakenteellinen paikantamisjärjestelmä tarjoaa mahdollisuuksia soveltaa robotiikkaa myös rakennuksen käytön aikaisissa siivous- ja huoltotöissä.

### 3.6.3 Kehitysnäkymät

Mittalaitteiden tekninen kehitys etenee nopeasti. Ilmeisesti parin vuoden sisällä tarkka paikannittausjärjestelmä sisävalmistusrobotia varten on valittavissa useista markkinoilla olevista halvoista tuotteista.

Mittaustekniikka ei kuitenkaan yksin riitä: on luotava yhtenäiskoordinaatistoon ja yhtenäiseen tietokantaan perustuva mittaus- ja tietosysteemiikka, jotta mittaukset sujuisivat käytännössä. Systematiikan tulisi sisältää myös liittyvä rakennuksen tuotetietomallipohjaiseen kuvaukseen.

## 3.7 Sisävalmistuksen yleiset apuneuvot

### 3.7.1 Tarve

Useimmissa sisävalmistustöissä joutuvat raajat ja selkä voimakkaan rasituksen kohteeksi, etenkin silloin, kun työskennellään seinän yläosan tai katon asennuksessa. Tällaisia töitä ovat esim. kattolevytytys, putkien asennus jne. Tarve kehittää apuneuvoja tällaisiin töihin on ilmeinen. Mm. Hollannissa tehdyssä soveltuvuustutkimuksessa päädytään suosittelemaan keveän nostomanipulaattorin kehittämistä työmaan tarpeisiin (Verschuren & van der Eijk 1987).

### 3.7.2 Tutkimus- ja kehitystyö

Edellä kohdassa 3.5 on selostettu levytysmanipulaattoreita, jotka ovat yhteen työläjiin kehitettyjä apuvälineitä. Toinen kehityssuunta pyrkii yleiskäyttöisiin apuvälineisiin, jotka joko nostavat työntekijän siten, että ergonomisesti hyvä työasento saavutetaan, tai tukevat tarvicketta, rakennusosaa tai työkalua asennuksen aikana.

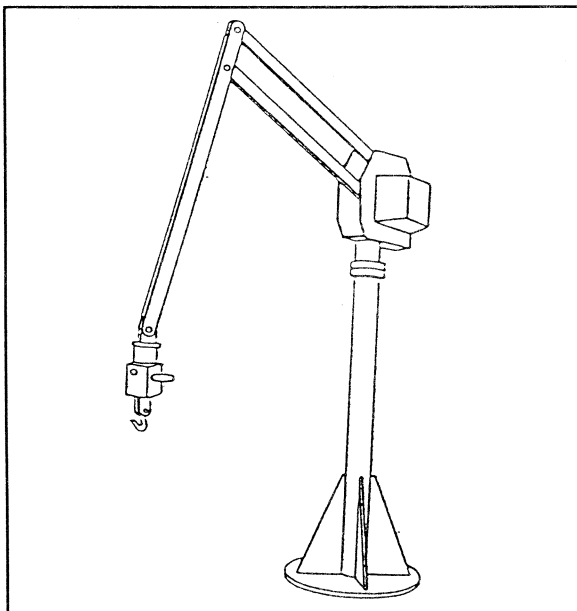
Yleiskäyttöistä, liikkuvaa telineettä on kehittänyt mm. Fujita (Fujita 1991). Se on tarkoitettu sellaisiin sisävalmistustöihin, joissa työskennellään lähellä sisäkattoa. Laite painaa 400 kiloa, työtason korkeus voi vaihdella välillä 0,61 - 1,81 m, ja sen siirtymisnopeus on 25 m/min. Laite etenee sekä pitkittäin että sivuittain (ja viistoon) ja pystyy myös kääntymään ympäri siten, että tason toinen pää pysyy paikallaan. Laitteen avulla voidaan siten ahtaissakin tiloissa edetä ripeästi työskentelypisteestä toiseen. Laite on akkukäyttöinen.

Komatsu on esitellyt ideoita konepajoilla sovelletun tasapainotetun manipulaattorin käytöstä työmailla (Ohtubo & al. 1988, Takeda & al. 1989). Manipulaattoria ohjataan kädellä pienoismallin avulla. Ohjaaja tuntee manipulaattoriin vaikuttavan taakan. Laite pitää taakan tarkasti ohjatussa asennossa, jolloin taakka



voidaan kiinnittää kohteeseensa. Toiminta perustuu voima-anturiin, joka mittaa kulloisenkin taakan painon ja rekisteröi käsivoimin aiheutetut keveät siirtelyt eri suuntiin. Kun ohjausvaikutus loppuu, laite pitää taakan tarkasti siinä paikassa, johon se on jätetty. Tällaisten käsinohjattavien laitteiden, joissa on yhdistetty koneen toistokyky ja kapasiteetti käyttäjän havainto- ja oivalluskykyyn, kehityskustannukset ovat selvästi automaattien kehityskustannuksia pienempiä, ja laitteiden monikäyttöisyys on myös selkeä etu.

Tämän kehitystyön pohjalta Komatsu, Takenaka-rakennusliike ja Nagoyan yliopisto ovat yhteistyössä kehittämässä vaunulla liikkuvaa kuusiakselista manipulaattoria, joka on tarkoitettu raskaiden rakennusosien nostoon ja siirtoon. Ohjausyksikkö on tarkoitettu kiinnittämään ohjaajan ranteeseen käsiohjausta varten.



Kuva 9. Tasapainoitettu manipulaattori.

Hollannissa The Research Institute for Labour Economy in the Building Trade (SAOB) on laajaan työntutkimusaineistoon perustuen ryhtynyt C.P. Verschurenin johdolla kehittämään erilaisia kauko-ohjattavia manipulaattoreita raskaimpia ja toistuvia rakennustöitä varten. Robottien käyttöä rakennustyömaalla hollantilaiset pitävät vielä epätaloudellisena. Mani-

pulaattorien kehitystavoitteiksi hollantilaiset asettivat mm:

- erimuotoisten ja -painoisten rakennusmateriaalien paikoilleenasettamisen käyttäjän ohjaamana
- vakaan toiminnan myös kovassa tulessa
- haluttujen liikeratojen toistamisen ja käyttäjän mahdollisuuden puuttua laitteen toimintaan myös työkierron aikana.

Hankkeen tuloksena on toistaiseksi kehitetty manipulaattori erilaisten pienekköjen (max. 300 kg) rakennusosien nostamista ja tukemista varten (HLD 300, Hydraulic Lifting Device). Kyseessä on kevyt, mallista riippuen 125 - 300 kg nostoihin pystyvä sähkötoiminen pyöränosturi. Sitä voidaan soveltaa esim. raskaiden harkkojen nostoon muurauksessa.

### 3.7.3 Kehitysnäkymät

Yleisten rakennustöiden apuvälineiden kehittäminen on keskeinen tehtävä sisävalmistustöiden kehittämisessä.

Rajoittavana tekijänä on lähinnä voimansyöttö: akkujen kapasiteetti on vielä liian pieni. Tällanne on kuitenkin tältä osin muuttumassa.

Vaunujen ja apulaitteiden kehittäminen muodostaa tärkeän tutkimus- ja kehitysoaiheen. Liikkumalustan yhteyteen voitaisiin suunnitella manipulaattori- ja työkaluperhe erityyppisiä tehtäviä varten:

- tukiteline levyjen kuljettamiseen
- tukiteline putkien, kanavien, listojen ja rullien siirtelyyn
- tiililetkojen siirtelyyn sopiva apuvälineistö
- erityyppisten standardilavoille pakattujen tarvikkeiden siirtelyyn sopiva apuvälineistö
- käänneltävä hydraulipöytä suurten esineiden tilanteenmukaiseen liikutteluun ahtaissa paikoissa
- saksilava henkilö- ja tarvikenostoihin.



### 3.8 Lattiatyöt

#### 3.8.1 Robotisoinnin tarve

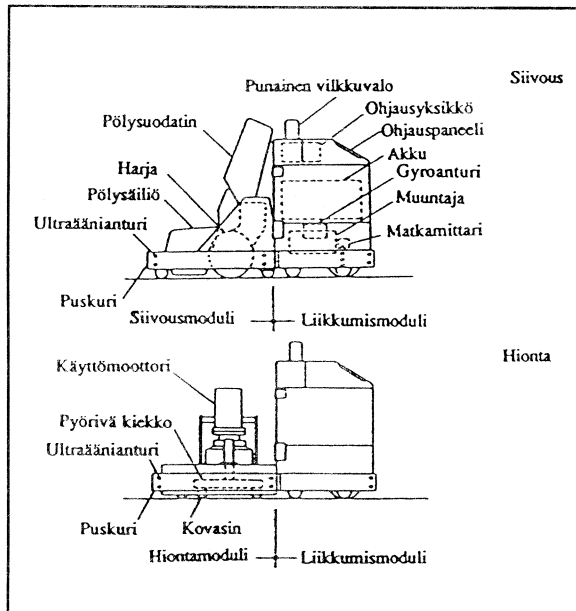
Lattiapintojen käsittely käsittää mm. seuraavat työt

- betonipinnan (tai parketin) hionta
- siivous
- betonin hierto ja liippaus.

Koneellisesti suoritettuinakin lattiatyöt ovat monotonisia ja usein raskaita.

#### 3.8.2 Tutkimus- ja kehitystyö

Lattiapintojen betonointi on ollut suosituimpia robotisointikohteita Japanissa. Jo tuoteasteelle ehtineistä hankkeista tarjoaa hyvän esimerkin Shimizu-rakennusliikkeen jo 1980-luvun puolivälissä julkistama betonilattioiden hionnan ja siivouksen monitoimilaite MTV-1. Se koostuu vaunusta ja työstöyksiköstä (kuva 10). Työstöyksikkö on vaihdettava: joko hiontalaite tai pölynimuri.



Kuva 10. Siivous- ja hiontarobotti MTV-1.

Laite voi liikkua ja väistää esteet itsenäisesti. Aluksi laite etenee huonetilan seiniä myöten

kartoittaen näin käsiteltävän työskentelyalueen. Laاتمansa kartan avulla robotti tekee yksikohtaisen reittisuunnitelman (kuva 11).

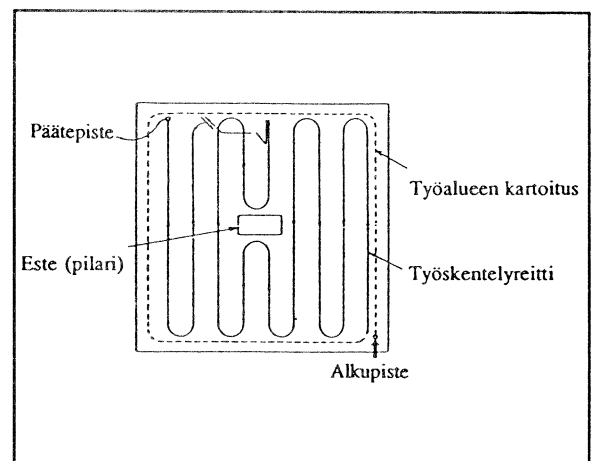
Voimanlähteenä on kaksi akkua. Paikantaminen tapahtuu matkamittarin ja suunnan ilmaisevan gyroskoopianturin avulla. Esteet laite havaitsee ultraäänianturin avulla.

Laitteen tehokkuus on siivouksessa 8 neliometriä/minuutti ja hionnassa 2 neliometriä/minuutti.

Myös useita itsenäisesti toimivia siivousrobotteja on julkistettu (Engelberger 1989, Sirkkola 1990).

#### 3.8.3 Kehitysnäkymät

Lattiatyöt on ilmeisesti se alue, jossa rakentamisrobotit tulevat ensinnä kaupallisiksi tuotteiksi. NykYTEKNIKAN avulla voidaan tuottaa teknistaloudellisesti kelpoisia tuotteita. Yleistymisen esteenä on lähinnä tuotekonseptin outous ja tarve järjestää työalue automaattiseen navigointiin soveltuvaksi.



Kuva 11. Siivous- ja hiontarobotti: työskentelyalueen kartoitus ja reitinmuodostus.

## 4 LAATOITUSROBOTTIKOKEILUT

### 4.1 Laatoituksen robotisointitarve

Laattojen käyttö Suomessa 1980 - luvun jälkipuoliskolla on ollut suuruusluokaltaan 4 milj. m<sup>2</sup>/vuosi, josta on robotisoitavissa ehkä n. 0,6 - 1,0 milj. m<sup>2</sup>/vuosi. Laattojen käyttö on pitkällä aikavälillä kasvussa. Robotisoitavissa on ehkä 180 - 300 laatoittajan ja rakennusmiehen työpanos, mikä vastaa suuruusluokalleen työ-kustannusta 250 - 300 milj. mk/vuosi. Robotisoidun laatoituksen kohteina ovat suuret laatoitettavat pinnat, joita esiintyy mm. seuraavissa hankkeissa:

- uimahallit, kylpylät
- tehtaiden ja muiden suurten työpaikkojen sosiaalitulat
- laboratoriot
- leikkaussalit yms. sairaaloiden tilat
- pesulat
- suurkeittiöt
- lääketehtaat
- kemian teollisuus
- meijerit, teurastamot ym. elintarviketeollisuus
- isot lattiapinnat esim. tavarataloissa, kokoon-tumis- ja majoitusrakennuksissa.

Laatoittajalle suurimmat laatoitustyön kuormitavuustekijät ovat työasennot, jotka ovat epä-mukavia tai "pakkoasentoja", staattinen lihas-tyo sekä toistuva yksipuolinen työliike. Rasi-tuksenalaisia ruumiinosia ovat selkä, lantio, olkapäät, käsivarret, kädet, ranteet ja polvet (Andersson et al. 1983).

Laatoittaja kävelee työssään sekä taakan kansa että ilman noin 30 - 40 % työajasta, seisoo paikallaan noin puolet ajasta ja loppuajan hän työskentelee polvillaan tai kyykyssä. Energian kulutus laatoituksen pohjustustyössä on 470 - 610 W eli keskiraskaasta raskaaseen työhön (Järvenpää 1980).

Ergonomiset näkökohdat puoltavat siten laatoi-

tuksen kehittämistä myös robotiikan keinoin;

tosin laatoitus ei ole ergonomian kannalta vaikeimpia työtehtäviä rakentamisessa.

### 4.2 Vaatimusmäärittely

Rakentamisen automatisointi on oleellisesti vaikeampaa kuin automatisointi konepajatyyp-pisessä ympäristössä. Sisävalmistusrobotti - joutuu liikkumaan ja sitä siirretään paljon paikasta toiseen, koska yksittäiset työt sa-massa paikassa eivät kestä kovin kauan

- työskentelee epätarkasti tunnetussa ympäris-tössä
- joutuu työskentelemään vaihtelevissa olosuh-teissa.

Sisävalmistusrobotti on sitä taloudellisempi mitä enemmän tehtäviä se pystyy suorittamaan. Jotta sisävalmistusrobotti kykenisi suoritta-maan useita eri tehtäviä, sen täytyy ulottua mihin tahansa huoneen sisäpintaan. Asuin- ja liikerakennuksissa huoneet ovat yleensä mata-lampia kuin 3,2 m.

Keveys on yksi vaikeimmin toteutettavista sisävalmistusrobotille asetetuista vaatimuksista. Normaalit huonetilat on mitoitettu kestävänsä vähintään vain 1,5 kN kuorman neliometriä kohden (Suomen Rakennusmääräyskokoelma 1983). Sisävalmistusrobotin kantavan pinnan pitää toisaalta pienenä vaatimus kuljettamiseen kapeiden oviaukkojen ja käytävien kautta sekä työmaalta toiselle. Betonirakenteet eivät ole usein saavuttaneet rakennusvaiheessa lopullista lujuuksiaan eikä niitä voi tällöin kuormittaa mitoitushyötykuorman asti. Teräsrakenteiden osalta tällaista ongelmaa ei ole.

Sisävalmistustehtävien monimuotoisuus vai-keuttaa monitoimisen järjestelmän kehittämistä. Esimerkiksi suihkuttamalla suoritettu pintakä-sittely tai harkkomuuraus johtaisivat aivan erilaisiin käsivarsimekanismeihin.

Sisävalmistusrobotin käyttö tulee asettamaan lisävaatimuksia myös rakennustyömaan siisteydelle ja järjestykselle. Järjestelmän täytyy pystyä kulkemaan myös epätasaisella ja roskaaisella alustalla, vaikka työtila olisikin siistimpi. Lisäksi robotin stabiliteetin pitää tietenkin sallia epätasaisuuksien aiheuttamat kallistukset.

Rakennustyömaan olosuhteisiin kuuluu myös pöly, jota irtoaa mm. työstettävistä materiaaleista, käsittelemättömistä betonilattioista ja muista betonirakenteista sekä rakennuksen ulkopuolen täytehiekasta. Rakennuksen sisälle puhaltavat ilmavirrat levittävät pölyä tehokkaasti, varsinkin silloin, kun ikkunat ja ovet ovat asentamatta.

Suhteellisen kosteuden vaihtelut voivat olla suuret. Rakennuksen sisällä on usein sama suhteellinen kosteus kuin ulkona, varsinkin ennen rakennusaikaisen lämmityksen aloittamista. Myös rakenteiden rakennusaikainen kosteus nostaa suhteellista kosteutta.

Lämpötila voi vaihdella suuresti, mutta robotin työskentelypaikassa lämpötila ei yleensä ole miinuksella puolella.

Yhden henkilön tulisi kyetä operoimaan järjestelmää ja suorittamaan materiaalitäydennykset. Lisäksi järjestelmän tulisi kyetä ainakin puolen tunnin itsenäiseen toimintaan.

Vaatimukset sisävalmistusjärjestelmälle ovat siis hyvin tiukat, koska rakentamismenetelmät ovat kehittyneet ihmisen työpanosta varten. Toisaalta riittävän ulottuvaa, mutta kevyttä käsivartta ei ole markkinoilta saatavilla ja erityisen käsivarren tai järjestelmän kehittäminen rakentamistehtäviin vaatii suuria resursseja.

## 4.3 Tekniset ratkaisut

### 4.3.1 Perusratkaisu

Suunnittelun peruslaitteiston (kuva 12) avulla järjestelmä voi ulottua työkalullaan mihin

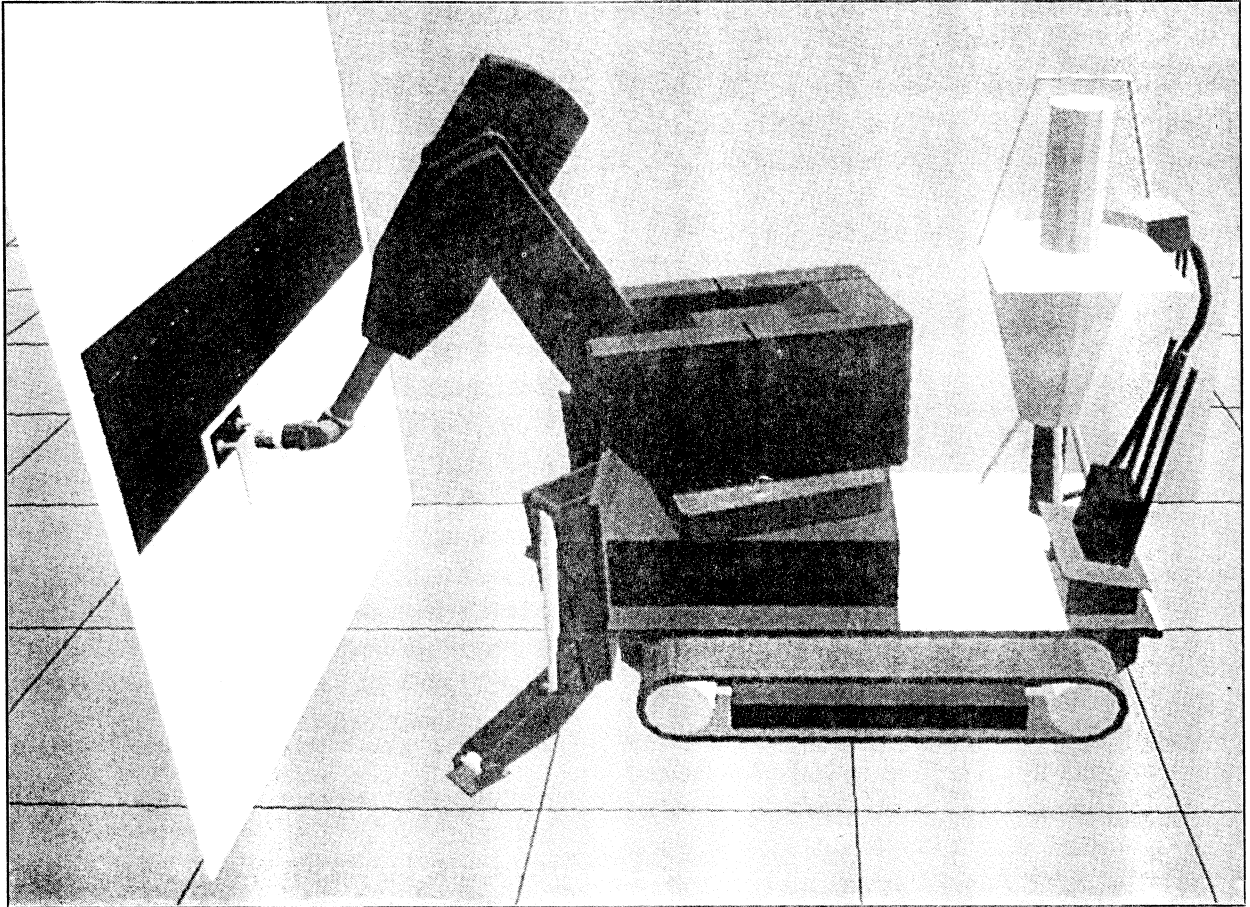
tahansa 3,2 m korkean huoneen sisäpintaan. Lähes kokonaan valmiista komponenteista koottu järjestelmä sisältää pienen hydraulisen telaketjuajoneuvon, teollisuusrobotin ja korotusmekanismien. Valitettavasti teollisuusrobotin ohjausyksikön pienentäminen vaunua varten ei ole tässä vaiheessa teknistaloudellisesti mahdollista; mutta niiden välillä olevaa kaapelia hyödynnetään myös tehonsyöttöön.

Telaketjuajoneuvon uskotaan sopivan toistaiseksi pyörällistä vaunua paremmin epätasaiselle työmaalattialle. Varastokuljetuksiin tarkoitetut vihivaunut painavat noin 1000 kg ja niiden kovat pyörät voivat juuttua esim. rakennusjätteisiin tai lattian saumakohtiin. Telaketjuvaunun liikkumiskyky on parempi pieniä esteitä, kuten kaapeleita, sisältävässä tai pintavalamattomassa ympäristössä, lisäksi se voidaan kuljettaa rakennustyömaalla muita apulaitteita käyttämättä työkohteeseen; myös ylös portaita. Vastaavasti nimellinen paikkaohjaus on hankalampaa telaketjujen epämääräisen luiston vuoksi käännyttäessä. Tällöin korostuu ulkoisen paikanmittausjärjestelmän tarpeellisuus.

Vaunu on rakennustyömaan kuljetuksiin tarkoitettu sähköhydraulinen ja jatkuvatoimisella hydraulipumpulla varustettu. Sen tuottamaa hydraulitehoa käytetäänkin vaunun tukijalkojen nostamiseen.

Sisävalmistusrobotin ulottuvuus huoneen pintoihin on toteutettu useita komponentteja käyttäen. Telaketjuvaunun avulla käsivartta siirretään työtilan vaakatasoon suuntaisesti. Korotusmekanismia käyttämällä robottikäsivarren työalue laajennetaan käsittämään lattia, seinän alareunat ja katto.

Kahta erilaista korotusmekanismia on analysoitu. Mekaanisesti yksinkertaisempi on itse asiassa kallistuva lava, johon robottikäsivarsi on kiinnitetty. Lavan optimi asennot selvitettiin kolmiulotteisella tietokonesimuloinnilla. Vaikeimmaksi havaittiin ulottuminen seinän alareunaan työkalun ollessa vaakatasossa; tällöinhän työkalun pituus ei lisää ulottuvuutta alaspäin seinällä.



*Kuva 12. Sisävalmistusrobotin peruslaitteisto.*

Teleskooppisylinteristä muodostettu korotusmekanismi on mekaanisesti vaativampi, mutta säilyttää robotin asennon samana. Myös työalue, jolle työkalu ulottuu lattialla on suurempi kuin kallistuvan mekanismin tapauksessa. Paremmaksi valittiin teleskooppisylinteri, koska tällöinärkevin tapa on sijoittaa vaunu kyljittäin seinälle, jolloin laatoitusasemasta toiseen liikutaan vaunua siirtämällä suoraan eteenpäin. Projektin loppuvaiheessa päätettiin kuitenkin olla toteuttamatta korotusmekanismeja, koska sen toteuttaminen olisi vienyt liikaa voimavaroja itse laatoitusprosessin kehittämislä.

Järjestelmän painon minimointiin pyrittiin kaikkiin keinoin. Telaketjuajoneuvo painaa vain noin 400 kg. 10 kg hyötykuorman ja kuuden vapausasteen NOKIA NRS 10 -robotin jalustana oleva vahvistinyksikkö voidaan irrottaa ja

siirtää robotin ohjausyksikön viereen; tällöin käsivarren painoksi saadaan noin 180 kg. Kallistusmekanismi ei välttämättä tarvitse toimilaitteita, koska robotin käsivarren avulla voidaan siirtää käsivarsi- ja kallistuslevy-yhdistelmän painopiste kallistusakselin toiselle puolelle. Tällöin levy ja käsivarsi kallistuvat toiseen asentoon, vaikka ääriasunnoissaan levy on 25 tai 10 astetta vaakatasosta. Tässä auttaa erityisesti robotin käsivarren epäsymmetria ensimmäisen akselin suhteen.

Robotin ohjausyksikön ja vaunun välisen kaapelin aiheuttamia kulkuongelmia voidaan pienentää esimerkiksi kelaamalla vapaana oleva kaapeli aina kerälle ja varustamalla kaapeli tietyin välein pyörillä varustetuilla pienillä laveteilla.

Huonoina puolina järjestelmällä on pieni kuor-

matila, pieni kuormankantokyky sekä tarve käyttää kaapelia robotin ja ohjausyksikön välillä. Käsivarren ohjausyksikön tilantarve ja energiankulutus ovat niin suuria, että täysin itsenäinen akuilla varustettu järjestelmä tulisi paljon suuremmaksi ja painavammaksi.

### 4.3.2 Vaunun ohjausjärjestelmä

#### 4.3.2.1 Karkea paikkaohjaus riittää

Vaunu liikkuu työtilan prosessointikohtien välillä melko lyhyitä matkoja. Koska rakennuksen toleranssit ovat muutamien senttimetrin luokkaa, niin vaunun paikoitusjärjestelmälle voidaan asettaa vaatimus, että vaunun täytyy kyetä liikkumaan 10 x 15 m<sup>2</sup> kokoisessa huonetilassa ainakin 50 mm ja 1 asteen tarkkuudella. Robotin käsivarsi joutuu kuitenkin suorittamaan tarkan paikannuksen ennen työtehtävän aloittamista uudessa paikassa. Vaunu voi siten käyttää hyväksi robotin laskemia paikkamittaustarkennuksia. Jotta robotti pystyisi käsittelemään mahdollisimman suuren alueen kerrallaan tulee vaunu ajaa työpaikkaan robotin puoleinen lyhyt sivu seinään päin.

Koska vaunu voi liikkua myös epätasaisella alustalla ja vaunun painopiste on korkealla, kaatumisriskiä ei saa lisätä äkkinäisillä liikkeillä. Tämän vuoksi liikkeiden kiihtyvyyksien täytyy olla pieniä ja siten nopeusohjauksen tarkkaa.

#### 4.3.2.2 Reaaliaikainen PC-verkko ohjaimena

Vaunun ohjausjärjestelmän ytimenä on PC-laitteistopohjainen reaaliaikakäyttöjärjestelmällä varustettu ohjain (Matikainen 1991). Se tai ohjausjärjestelmän yhteydessä oleva käyttöliityntätietokone saa ulkoisessa tietokoneessa suunnitellun tehtävän vaunun paikkaohjetietoina ja samalla robotti kuhunkin paikkaan liittyvän paikkaohjetietueen.

Käyttöliityntätietokone on kytkettävissä ohjausjärjestelmään tarvittaessa ARCNET-väylän

välityksellä. Näin liikkuvassa vaunussa ei tarvita sarjaväylää kummempia käyttöliityntälaitteita tai monitoria. Paikallaan olevaan käyttöliityntätietokoneeseen voidaan kehittää graafiset käyttöliityntäohjelmistot ja se voi saada rakentamistehtävän parametrit levykkeellä tai sarjaliikenneväylää pitkin. Järjestelmän kehitysvaiheessa voidaan käyttää vain yhtä PC:tä.

Varsinaisen paikanmäärityksen ja navigoinnin lisäksi ohjausjärjestelmä huolehtii tukijalkojen laskemisesta saavuttaessa työalueelle samoin kuin lavetin laskemisesta tai nostosta robotin antamien ohjeiden perusteella.

Operaattori voi antaa yksinkertaisimpia ja tavallisimpia käskyjä järjestelmälle käyttöpainikkeiden avulla. Näillä painikkeilla käyttäjä ilmoittaa koska vaunun tulee aloittaa työskentely tai koska annetaan uudet ohjeet seuraavasta työstöalueesta.

Vaunun siirtäminen huoneesta toiseen voidaan hoitaa käyttämällä erillistä käsiohjainta. Tällöin normaalin kaapelin tilalle kytketään pelkästään vaunulle tehoa syöttävä kaapeli ja käsiohjain puolestaan kytketään erilliseen vaunun ohjausjärjestelmän rinnalla olevaan liittimeen.

Telaketjujen hydrauliventtiileille annetaan analoginen virtausohje eli kummankin telaketjun nopeutta ohjataan erikseen. Paikoitusjärjestelmän valinnassa päädyttiin telaketjun veto-  
pyörien pyörintäkulman ja samalla pyörintänopeuden mittaukseen ns. merkintälaskumenetelmällä (dead reckoning). Antureiksi valittiin absoluuttiset kulma-anturit, koska ne ovat suojatumpia häiriöitä vastaan kuin inkrementtianturit ja koska absoluuttianturien lukeminen voidaan hoitaa standardibinäari-I/O-kortilla, mikä on halvempi tapa kuin inkrementtianturien vaatima erikoiskortti aseman päivitykseen. Vaunun asennon muuttumista tarkkaillaan ilmasuihkun poikkeamiseen perustuvalla gyrolla, josta saadaan kiertymisnopeuteen verrannollinen signaali.

### 4.3.2.3 Merkintälasku navigoinnin perustana

Merkintälaskumenetelmä kehitettiin vaunulle, koska sitä tarvitaan liikkeiden stabiloimiseksi, vaikka ulkoinen paikanmittausjärjestelmä olisi käytössä. Lipsumisten minimoimiseksi vaunu liikkuu suoraan tai vakiosäteistä ympyräliikettä. Liikeradat toteutetaan nopeuden kannalta ns. trapetsisyklein, jotta telaketjujen lipsuminen minimoituisi. Ympyräliikkeen aikana telaketjuja ajetaan samaan suuntaan eri nopeuksilla niin ikään lipsumisen minimoimiseksi.

Aloitettaessa työskentely huoneessa vaunun paikka kalibroidaan ajamalla vaunun perä kiinni seinään käsiohjaimen avulla. Ajon aikana tarkkaillaan gyrolla ohjauskulman muutosta ja jos mitattu arvo poikkeaa merkittävästi lasketusta arvosta keskeytetään liike ja operaattori alustaa vaunun paikan ja asennon uudelleen. Vähäisiä asema- ja asentovirheitä voidaan korjata tarkistamalla paikka robotin avulla ympäristön yksityiskohdista kuten nurkista.

Robotin työskentelypisteet ja näitä paikkoja yhdistävät radan välipisteet lasketaan etukäteen ulkoisella tietokoneella. Ratapisteiden väliset kaarevat tai suorat liikeradat toteutetaan vaunun ohjausjärjestelmässä.

### 4.3.2.4 Liikeohjeen laskeminen

Vaunun ratanopeuden ja telaketjujen nopeuksien välillä vallitsee seuraava yhteys

$$V_v = \frac{V_l + V_r}{2} \quad (1)$$

ja kääntymisnopeuden ja telaketjujen nopeuksien välillä seuraava yhteys

$$\omega_v = \frac{V_r - V_l}{d} \quad (2)$$

missä  $v_r$  ja  $v_l$  ovat telaketjujen nopeudet,  $d$  on telaketjujen välinen etäisyys,  $v_v$  on vaunun ratanopeus ja  $\omega$  vaunun kääntymisnopeus.

Halutut liikeradat hajotetaan yhdeksi tai kahdeksi kaarevuussäteeltään vakioksi liikesegmentiksi. Tällä liikesegmentillä vaunun kiertymisnopeus on vakio, kun liikutaan vakiovauhdilla; kiertymisnopeus on myös suoraan verrannollinen ratanopeuteen. Täten saadaan laskettua kullekin ajanhetkelle vaunun toivottu nopeus ( $v_v$ ) ja kääntymisnopeus ( $\omega$ ) eli avoin ohjaus.

Avoimeen ohjaukseen lisätään korjaustermit, jotka saadaan paikka- ja asentoestimaattien avulla, joita ylläpidetään jatkuvasti seurannan avulla. Mittauksessa käytetään gyrolla mitattua vaunun pyörimiskulmaa, telaketjujen pyörimisnopeutta ja pyörimiskulmaa.

Rungon ohjaussuureet muutetaan lopuksi telaketjujen nopeusohjeiksi. Kaavoista (1) ja (2) saadaan ratkaistua

$$\begin{bmatrix} v_l^o \\ v_r^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{d}{2} \\ 1 & \frac{d}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_v^o \\ \omega_v^o \end{bmatrix} \quad (3)$$

missä  $v_v^o$  ja  $\omega_v^o$  ovat halutut vaunun rata- ja kulmanopeudet. Ympyräliikkeiden aikana voidaan kaava (3) muuntaa kaavan (4) muotoon, koska vaunun rata- ja kulmanopeudet ovat vakioita, jolloin myös kaartosäde on vakio.

$$\begin{bmatrix} v_l^o \\ v_r^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{d}{2} \\ 1 & \frac{d}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} R * \omega_v^o \\ \omega_v^o \end{bmatrix} \quad (4)$$

#### 4.3.2.5 Vaunun paikkaestimointi liikkeiden aikana

Vaunun asema ja asento työalueella lasketaan vaunun rata- ja kulmanopeuksista. Liiketyypistä riippuen on käytössä kaksi eri tyyppistä paikkaestimaattoria. Lineaariliikkeiden aikana vaunun rata- ja kulmanopeudet lasketaan kaavojen (1) ja (2) mukaisesti ja paikka näistä tiedoista kaavojen (5) - (7) mukaisesti.

$$X(t) = X(t-1) + \Delta T * \frac{v_l^{est} + v_r^{est}}{2} * \cos \Omega \quad (5)$$

$$Y(t) = Y(t-1) + \Delta T * \frac{v_l^{est} + v_r^{est}}{2} * \sin \Omega \quad (6)$$

$$\Omega(t) = \Omega(t-1) + \Delta T * \frac{v_r^{est} - v_l^{est}}{d} \quad (7)$$

missä  $v_r^{est}$  ja  $v_l^{est}$  ovat mitatut ja eksponentiaalisuodatetut oikean ja vasemman telaketjun nopeudet.

Kaariliikkeiden aikana kyseinen paikkaestimaattori ei kuitenkaan anna luotettavaa tulosta, koska nopeampi telaketju vetää hitaampaa telaketjua sivuttaissuunnassa perässään. Tästä syystä kaariliikkeiden aikana lasketaan vaunun paikka ja asento gyroskoopilla mitatusta kulmanopeudesta kaavojen (8) - (10) mukaisesti.

$$X(t) = X(t-1) + \Delta T * \omega_v^{est}(t) * R_x * \cos \Omega \quad (8)$$

$$Y(t) = Y(t-1) + \Delta T * \omega_v^{est}(t) * R_y * \sin \Omega \quad (9)$$

$$\Omega(t) = \Omega(t-1) + \Delta T * \omega_v^{est}(t) \quad (10)$$

missä  $R_x$  ja  $R_y$  ovat kokeellisesti määritetyt kaartosäde vakiot ja  $\omega_v^{est}$  on gyroskoopilla

mitattu ja sen jälkeen eksponentiaalisuodatettu vaunun kulmanopeus.

Paikkaestimaattorien tarkkuus 4 metrin lineaariliikkeessä on 10 mm ja 90 asteen kaarrokossa 30 mm ja 3 astetta. Nämä tulokset saatiin kun telaketjujen välykset poistettiin ennen liikkeiden suoritusta. Välykset aiheuttavat n. kolme kertaa suuremmat paikannusvirheet liikkeissä. Välysten havaitseminen käytetyillä antureilla on mahdotonta.

#### 4.3.2.6 Muut navigointimahdollisuudet

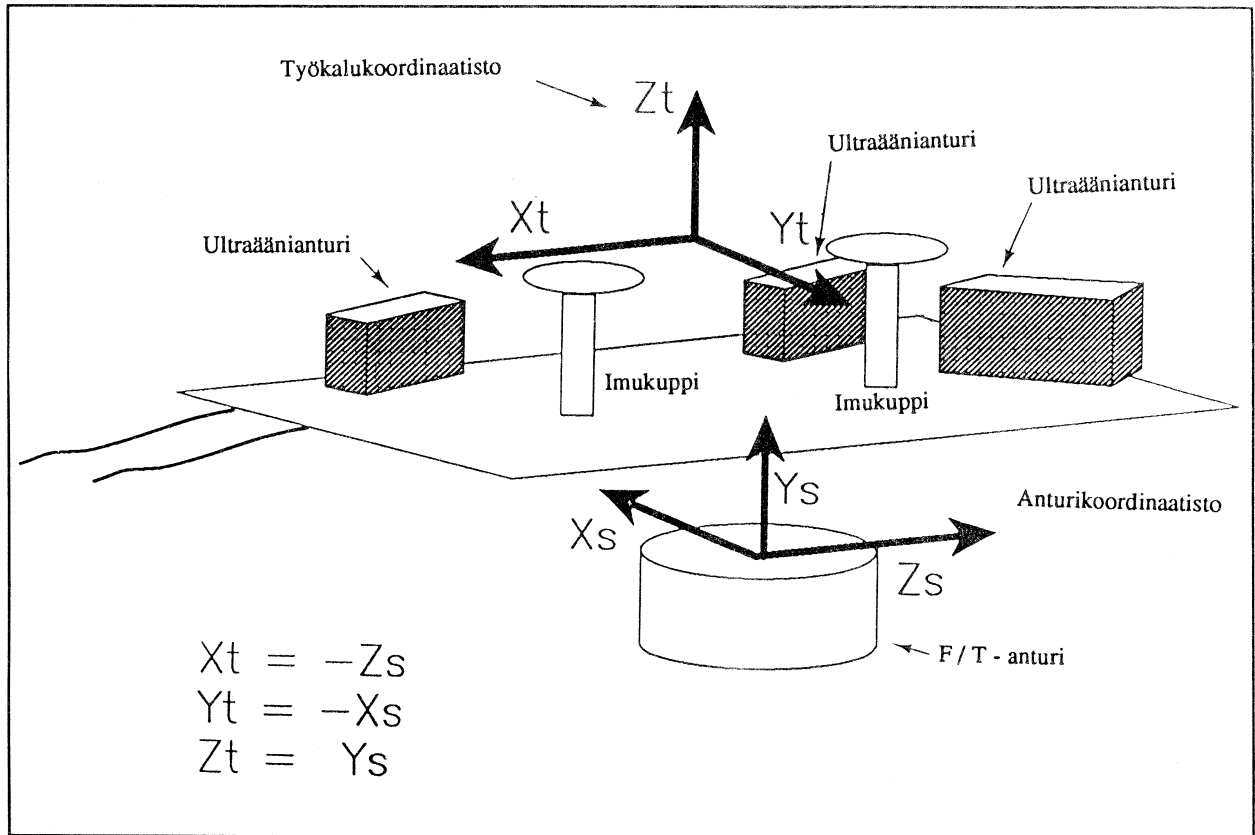
Huonetilassa suoritettuun reaaliaikaiseen kaksiulotteiseen paikanmittaukseen on kehitteillä useita järjestelmiä. Ne perustuvat tavallisesti laservalolla suoritettuun kulmamittaukseen. Niissä käytetään joko aktiivisia majakoita tai passiivisia heijastimia. Ilmeisesti parin vuoden sisällä tarkka paikanmittausjärjestelmä sisävalmistusrobotia varten on valittavissa useista markkinoilla olevista halvoista tuotteista.

Myös ultraäänipaikannus on mahdollista sisätiloissa, mutta lähettimen ja vastaanottimen välillä tulee olla kaapeli- tai radioyhteys, mikä voi olla hankalaa toteuttaa liikkuvan vaunun kanssa rakennusolosuhteissa. Ultraäänien herkkyys ilmavirtauksille saattaa haitata ultraäänien käyttöä joissakin rakennusvaiheissa.

#### 4.3.3 Laatoitusprosessi

Sovelluksena on siis laatoitus, jossa saumaus tehdään käsityönä. Luonnos tarraimesta ja sen anturoinnista on esitetty kuvassa 13. Siihen on merkitty myös F/T-anturin ja robotin työkalulaipan koordinaatit. Niitä voidaan molempia siirtää ja kiertää mielivaltaisesti, jotta mitattavat voimat tai liikkeet tai molemmat saadaan generoitua sopivimman koordinaatiston suhteen. Koska työkalu on kiinnitetty





Kuva 13. Tarrain ja sen anturointi.

siten, että akselit ovat yhdensuuntaisia, koor-  
dinaatistojen kiertoa ei ole tarvinnut tehdä.

Ultraäänianturit on asennettu kaikki laattojen  
suuntaiseen tasoon kolmioon. Tällöin on mah-  
dollista työkalun kiertäminen seinän suuntai-  
seksi antureiden avulla. Tarraimen kiinnitysle-  
vyn lyhyellä sivulla oleva anturi voidaan lii-  
kuttaa pneumaattisen sylinterin avulla havaitse-  
maan seinää myös laattojen ollessa kiinnitety-  
nä tarraimen. Täten anturi saadaan suojaan  
vietäessä laatta aivan sivuseinän viereen ja/tai  
seinän alaosaan lattian lähelle.

Robotti levittää imukuppitarraimessaan olevaan  
laattaan laastin liikkeellä leveän suuttimen  
läheisyydessä ja vie laatan seinälle. Robotin  
tarraimen ja ranteen välissä olevan kuuden  
vapausasteen voima- ja momenttianturin (F/T)  
(Ledecz ym. 1990) avulla varmistetaan sekä  
se, ettei törmäyksiä tapahdu liikkeiden aikana  
että laatan hyvä tarttuminen seinään perustus-

voimaa seuraamalla.

Järjestelmän suunnittelun päämäärät olivat  
seuraavat:

- laatat asennetaan seinälle noin 10 s väliajoin
- vaunun laattakasetteihin mahtuu noin 200  
laattaa
- kiinnityslaastia on säiliössä vähintään reilun  
puolen tunnin tarvetta varten.

Laatoitusprosessin kulku on seuraava:

- vaunu liikkuu oikeaan paikkaan huoneessa  
käsivarsi kuljetusasentoon taitettuna
- tukijalat laskeutuvat järjestelmän stabiloimi-  
seksi
- robotti tarkentaa työympäristönsä kosketta-  
malla F/T-anturilla varustetulla työkalulla  
ulottuvilla oleviin tasopintoihin kolmeen eri  
kohtaan
- robotti (käsivarsi) noutaa kaksi laattaa imu-



kuppitarraineen

- robotti vie kaakelit laastipumpun suuttimelle, joka alhaalta päin pusertaa jatkuvasti kaakelin levyistä laastimattoa kaakeleiden alapinnalle
- ylimääräinen laasti pyyhitään pois ja laastiin kammataan urat teräsreunalla
- robotti asentaa kaakelit seinälle ulkoiselta tietokoneelta saatujen nimellisten kaakelin paikkojen perusteella
- seinän yläosaa laatoitettaessa robottikäden varsi nostetaan korotusmekanismin avulla asemaan, jossa se ulottuu 3,2 m korkean huoneen yläosan sisäpintoihin, mutta myös kuormatilaan; toisessa korotusmekanismin asennossa työkalu ulottuu lattialle ja seinän alaosaan kuormatilan lisäksi.

Robotin ranteessa olevaa F/T-anturia voidaan käyttää kaakelointiprosessissa monipuolisesti hyväksi varmistamaan esimerkiksi

- kaakelien löytäminen kasetista oletetulta paikalta ja liiallisten hakuvoimien havainnointi
- että laastia on tarttunut kaakeliin haluttu määrä (punnitus ennen ja jälkeen kaakelin levitystä)
- seinäkontaktin ja riittävän puristusvoiman ilmaisu
- kaikkien pikaliikkeiden valvonta törmäysten huomaamiseksi (anturi saattaa kuitenkin vahingoittua ennen nopeiden liikkeiden keskeytymistä).

Työkalu on suunniteltu siten, että toisessa reunassa olevia kaakeleita voidaan kiinnittää myös lattian tai seinän nurkkaan. Tämän vuoksi yksi kolmesta ultraäänietäisyysanturista liikkuu pneumaattisen männän avulla.

Edellisen kaakelin etsintä sujuu nopeasti, koska robotti tietää, mihin edellinen kaakeli sijoitettiin. Tällöin etsintäetäisyydet ovat lyhyitä. Etsintä käy hitaammin, kun koko järjestelmä on siirtynyt telakointiasemasta seuraavaan.

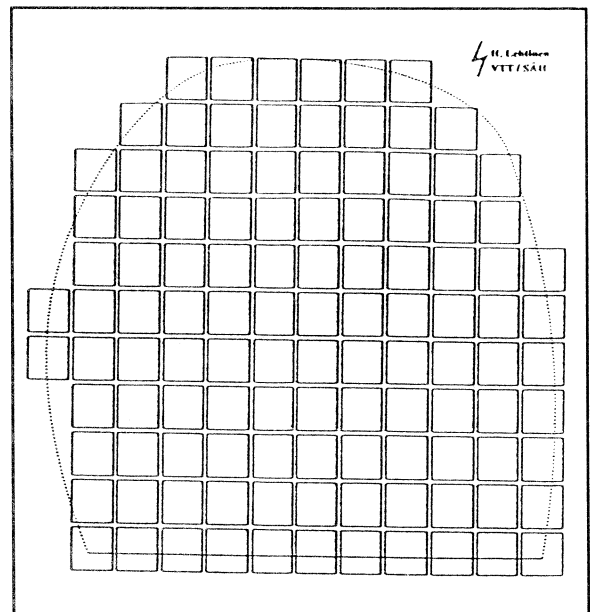
Kaakelointi voidaan aloittaa myös tukilautaa

vasten, jollei muuta etsittävää yksityiskohtaa ole käytettävissä. Tukilautaa voi olla myös pystysuora-aukon pystyreunalla.

#### 4.3.3.1 Seinän laatoitusjärjestys

Kuvassa 14 on periaatteellisesti esitetty ne seinällä olevat laatat, joihin robotti ulottuu yhdestä vaunun asemasta. Kuvassa 15 on esimerkki kerrallaan yhdestä vaunun asemasta laatoitettavista alueista ja niiden muodostamasta suorakulmaisesta laatoitetusta kuviosta. Kuten kuvasta 16 huomataan, niin oikeaan nurkkaan ja keskelle laatoitettavat alueet ovat vakiomuotoisia, mutta viimeinen oikealle sijoitettava laattakuvio riippuu seinän leveydestä.

Laatoitus oikealta vasemmalle sopii paremmin valittuun robotin sijoitukseen vaunulle. Mikäli vasemmalla tulee seinä vastaan, niin vaunu täytyy kääntää ennen viimeisten alueiden laatoitusta.



Kuva 14. Robotin yhdestä työasemasta kiinnittämät laatat.

Aukkoja ja muita muotoja kuvan 15 laatoituskuviioon saadaan jättämällä haluttuja laattoja-

leita pois. Eri tilanteita varten robotin ohjelmistoon kannattaa koota joukko kaakelin asennusaliohjelmia, joita kutsutaan tilanteen mukaan. Kuvan 15 oikeasta alanurkasta lähdettäessä tarvittavia tapauksia ovat esimerkiksi seuraavat:

- oikealla olevan sivuseinän viereen ja alla olevan lattian yläpuolelle (tai kiinni tukilautaan)
- oikealla olevan sivuseinän viereen
- alla olevan lattian yläpuolelle (tai kiinni tukilautaan)
- nimelliseen kohtaan paljaalle seinälle
- oikealla olevan kaakelin viereen
- alla olevan kaakelin yläpuolelle
- oikealla olevan kaakelin viereen ja kiinni vasemmalla olevaan sivuseinään sekä alla kiinni alla olevan lattian yläpuolelle (tai tukilautaan)
- oikealla olevan kaakelin viereen ja kiinni vasemmalla olevaan sivuseinään
- oikealla olevan sivuseinän vierelle ja alla olevan kaakelin yläpuolelle
- oikealla olevan kaakelin viereen ja alla olevan kaakelin yläpuolelle
- oikealla olevan kaakelin viereen ja alla olevan lattian yläpuolelle sekä vasemmalla olevan seinän viereen
- yllä olevan katon alapuolelle ja alla olevan kaakelin yläpuolelle
- yllä olevan katon alapuolelle ja alla olevan kaakelin yläpuolelle sekä oikealla olevan seinän vierelle
- yllä olevan katon alapuolelle ja alla olevan kaakelin yläpuolelle sekä oikealla olevan kaakelin viereen
- alla olevan kaakelin yläpuolelle ja oikealla olevan kaakelin viereen sekä vasemmalla olevan seinän viereen
- yllä olevan katon alapuolelle ja alla olevan kaakelin yläpuolelle sekä oikealla olevan kaakelin viereen että vasemmalla olevan seinän viereen.

Yllä oleva aliohjelmajoukko voi varsinaiseen asentamiseen käyttää yhteistä aliohjelmia; ne itse asiassa etsivät vain kaakelin todellisen paikan antureiden avulla ja kutsuvat varsinaista

asennusohjelmaa, joka suorittaa kiinnittämisen nykyiselle kohdalleen liikkumalla laatan normaalin suuntaisesti (työkalukoordinaatiston Z-akseli).

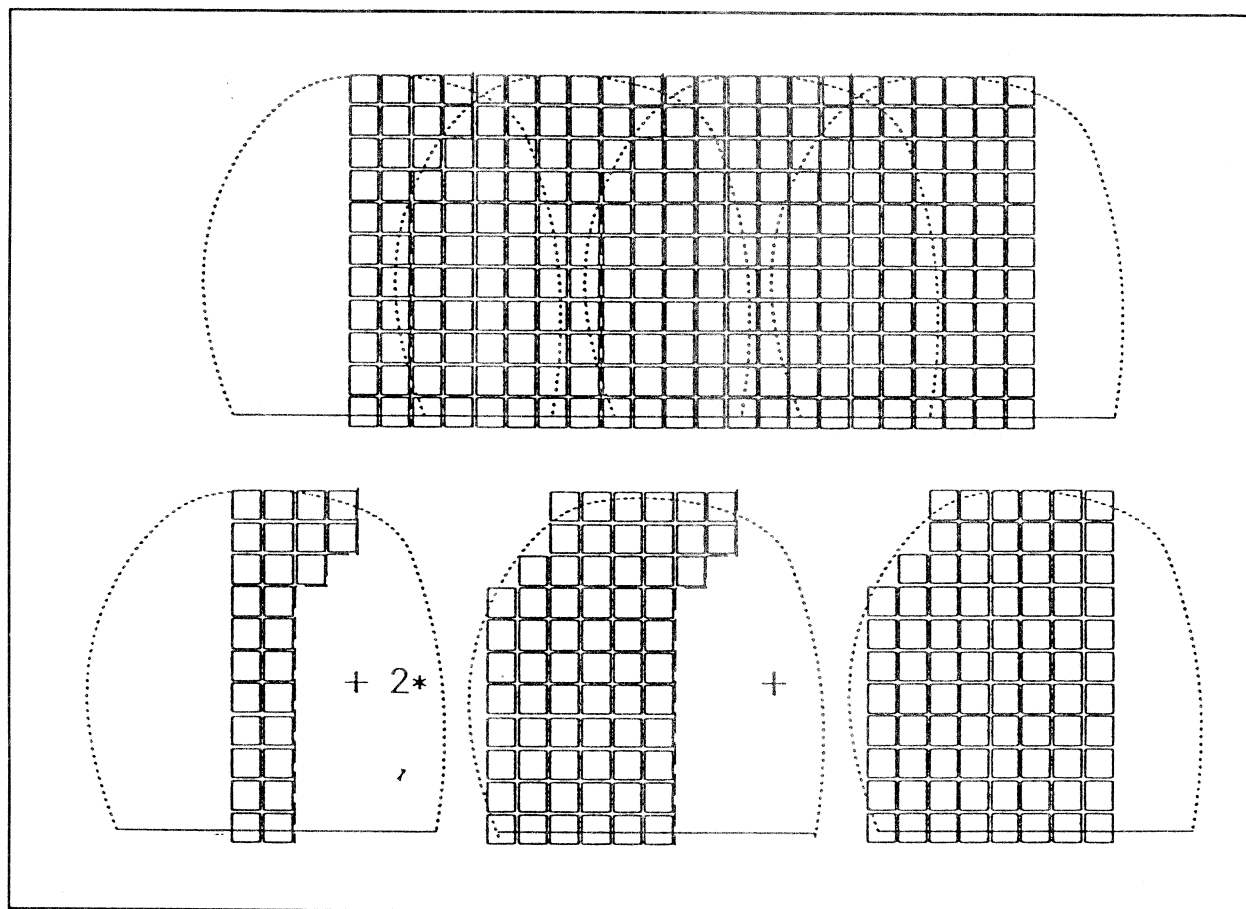
#### 4.3.3.2 Robotin ohjelmisto

Selvyiden vuoksi täsmennetään ensin muutamia robotiikan käsitteitä.

Robotin jalustaan on yleensä sidottu suorakulmainen koordinaatisto, jota kutsutaan maailmakoordinaatistoksi. Työkalun sijainnin määrittävät yksikäsitteisesti robotin nivelkulmien asennot, mutta myös tietojoukko, jota kutsutaan asemaksi. Se sisältää työkalupisteen maailmakoordinaatiston X-, Y- ja Z-koordinaatit, robotin työkalun asennon maailmakoordinaatisto ja lisäksi ns. konfiguraatitiedon. Konfiguraatitieto ilmoittaa, millä alueella ne nivelet ovat, jotka voivat ratkaista halutun asennon ja pisteen usealla eri tavalla. Tämä johtuu esimerkiksi siitä, että ranteiden nivelien työalue on usein yli 360 astetta.

Kehitetty robotin ohjelmisto muodostuu seuraavista osista:

- työtehtäväkoordinaatiston (robottien ohjelmointikielissä usein kutsuttu käsitteellä FRAME) eli laattakuvion saumojen suuntaisen koordinaatiston etsintä; lattian suunta määrää vaakasauman suunnan seinän tasossa
- pikaliikkeiden varmistus ranteessa sijaitsevan voima-anturin avulla eli törmäyksen tapahtuminen pysäyttää robotin liikkeen
- laattojen haku varmistaen oikea tarttuminen F/T-anturin avulla
- laastin levitys laattojen alapinnalle
- työkalun asennon tarkistus seinän suuntaiseksi ultraääniantureiden avulla
- laattojen kiinnittäminen seinälle mahdollisten viereisen tai alapuolisen laattojen reunojen etsimisen jälkeen 3 mm saumarakoa käyttäen
- uuden nimellisen laatan asennuspisteen laskenta laattakuviolla.



Kuva 15. Suorakulmaisen seinän laatoitukseen tarvittavat robotin siirrot ja kerralla laatoitettavat alueet; keskellä laatoitetaan vakiomuotoisia alueita.

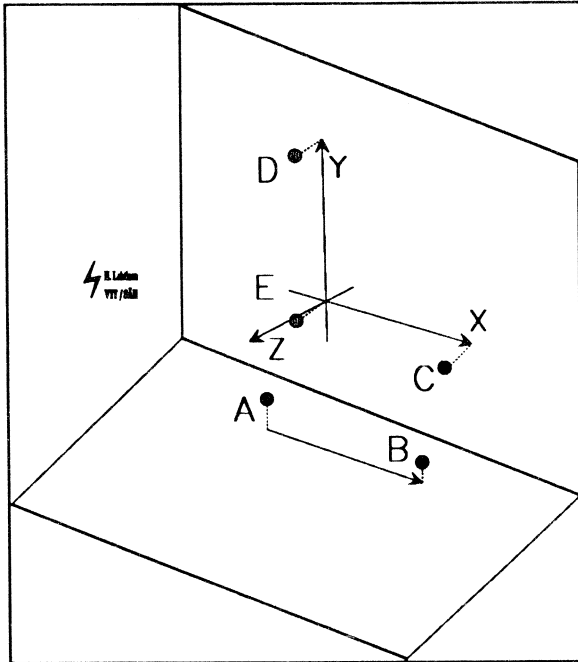
Työtehtäväkoordinaatisto etsitään antureiden avulla liikkumalla työkalukoordinaatiston Z-akselin eli laattojen normaalin suuntaisesti, kunnes anturit havaitsevat lattian tai seinän. Mikäli etsintöjen aloituskohdat ovat robotin jalustan suhteen vakiopaikoissa, niin kannattaa käyttää ns. tarkkuuspisteitä, joissa robotin nivelet ovat opetustilanteen kulmissa. Tällöin tarraimen kaapelit ovat aina samassa lähtötilanteessa, eivätkä myöhemmät suorat interpoloinnit kierä kaapelia robotin ranteen tai käsivarren ympäri kiristyen.

Kaikki tarvittava tieto seinän ja lattian nimellisestä sijainnista voidaan pakata kolmeen nimelliseen etsinnän aloitusasemaan, joiden avulla muut lasketaan. Näiden kolmen aseman laskenta riittää myös robotin automaattiseksi ohjelmoimiseksi huoneen suunnittelutiedon mukaan.

Kuvan 16 asemista A ja B lähdettyjen etsittyjen lattiakohtien avulla lasketaan lattianrajan suuntainen vektori ( $\underline{V}$ ). Vähentäen asemasta C vektori ( $\underline{V}$ ) saadaan tehtäväkoordinaatiston x-akselin määräävä suora C- ja E- asemista lähdettyjen seinäkontaktikohtien välille. Koordinaatiston y-akselia varten täytyy etsiä asema seinällä D- asemasta lähtien. Kaiken kaikkiaan tarvitaan siis viisi etsintäliikettä. Ne kannattaa suorittaa voima-anturin avulla työkalukoordinaatistossa. Tällöin etsintäsuunta sisältyy työkalun asentoon nimellisessä etsintäasemassa (A, B tai C).

Etsintäohjelman lopuksi siirretään työkalu seinälle kiertäen työkalu tehtäväkoordinaatiston akseleiden suuntaiseksi. Tämän jälkeen ultraääniantureilla tarkistetaan työkalu asento seinän suuntaiseksi ja tätä asentoa käytetään myöhemmin ensimmäisten laattojen kiinnittämiseen.

Tällä tavalla saadaan työkalu jo ensimmäisen laattaparin kohdalla asentoon, jossa kapeakeilaisia ultraääniantureita (n. 5 astetta) voidaan käyttää kohtisuoruuden tarkistamiseen.



Kuva 16. Seinän ja lattian nimellisen aseman määrittäminen.

Laattojen hakuohjelma on ohjelmoitu siten, että operaattorin on vietävä tarrain ensimmäisen ja viimeisen laatan tartuntakohtaan ja tallennettava nämä asemat. Ohjelma laskee sitten tarvittavat siirrokset laattapinin pienentyessä.

Työkalun asento seinän suhteen pystysuoran suoran ympäri tarkistetaan laatan nimelliselle paikalle tullessa. Mikäli asento on jotain tiettyä rajaa vinompi, niin työkalu siirretään kohdalle, jossa etäisyysanturit eivät havaitse laattoja vaan paljasta seinää ja asento tarkistetaan kahdessa vapausasteessa. Löydetty oikea asento kopioidaan laatan nimellisen aseman asennoksi ja siirrytään uudestaan nimelliseen asennusliikkeiden alkamispaikkaan uudessa asennossa.

Asento tarkistetaan myös siirryttäessä seinälle

ensimmäisen kerran laattojen kanssa. Asennon tarkistus näyttää olevan välttämätön, koska ranteen nivelien eri asennoista johtuen, asento seinälle ei ole tarkkaan sama, vaikka tehtäväkoordinaatisto on seinän suuntainen. Kaapelointi on suunniteltu siten, että robotin ranteen voi antaa tulla asemiin missä tahansa konfiguraatiossa; tämä saattaa kuitenkin heikentää nimellisen laatoituskohdan ja asennon tarkkuutta.

Edellisten laattojen reunat voidaan etsiä ultraääniantureiden avulla. Nämä etsintäliikkeet on ohjelmoitu omiksi aliohjelmiksi, jotka voidaan aktivoida tarpeen ja käyttökokemusten mukaan kullekin laattaparille omalla tavallaan. Tarve riippuu robotin maailmakoordinaatiston tarkkuudesta; se voi vaihdella robotiiksilön, lämpötilan ja käyttötuntien mukaan. Sivuttaiset etsintäliikkeet ovat melko hitaita (noin 7 mm/s); suuremmilla nopeuksilla etsintätulos on tarvittavaa tarkkuutta epätarkempi.

Muita nopeasti valittavia korjaustoimenpiteitä ovat:

- laattojen reunojen etsintä siirtää myös nimellistä laatan asemaa; joko kokonaan etsinnän mukaan tai nimellisen ja etsityn kohdan puoliväliin
- työkalun asento tarkistetaan seinätason suuntaiseksi kahdessa dimensiossa (tämä on todettu tarpeelliseksi suorittaa joka toisella vaakarivillä ja etäisyysantureiden ilmoittaessa yli puolen asteen asentovirheestä)
- laatan sivuttaista luistoliikettä laattapattjan päällä voidaan korjata vastakkaissuuntaisella korjausliikkeellä kahdessa seinätason suunnassa F/T anturien antamien sivuttaisvoimien mukaan.

Voima-anturilla voidaan varmistaa, että riittävä puristusvoima saavutetaan, jolloin liike voidaan pysäyttää tällaisessa kohdassa. Sen avulla havaitaan myös mahdolliset laatan tason momentit, joita aiheutuu esimerkiksi laattojen mennessä osittain päällekkäin.

Mikäli robotin maailmakoordinaatistossa on

virhettä, operaattori voi valita nimellisten laattojen kiinnityspisteiden sijasta seuraavia toimintamoodeja:

- nimellistä asemaa siirretään havaitun paikan ja edellisen nimellisen kohdan puoliväliin
- naapurilaattojen reunojen mukaan löydetty paikka nimetään nimelliseksi laatoituskohdaksi, jota siirretään seuraavaksi nimelliseksi etsinnän aloituskohdaksi.

#### 4.3.4 Rakentamiseen soveltuva F/T-anturi

Epämääräisessä ympäristössä toimimiseen soveltuva kuuden vapausasteen F/T eli voima- ja momenttianturi (Ledeczi, Lehtinen & Banki 1990) on eräs projektin sivutuotteista. Useiden tukifunktioiden lisäksi sen pääfunktiot ovat:

- ilmoittaa milloin robotin ranteessa tuntuu jokin tietty F/T-alue (kaikki voimat ja momentit ovat tiettyjen rajojen sisällä)
- luokitella robotille kullakin hetkellä havaittu voima tai momentti kahdessa vapausasteessa kerrallaan.

Periaatteena on, että sensori(järjestelmä) mittaa jatkuvasti F/T-tietoa ja lähettää tulokset robotille kysyttäessä yksinkertaisessa muodossa. Sensori "ohjelmoidaan" eli tehtävien parametrit määritetään etukäteen päätteen avulla. Robotin ohjelman suorituksen aikana annetaan tehtävien numeroita sensorille.

### 4.4 Laatoituskokeet

#### 4.4.1 Yleistä

Suoritettavat laatoituskokeet voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin:

- Laastikokeet, joiden tavoitteena oli varmentaa käytettävän laastin seossuhteet reologisten ominaisuuksien (pumpattavuus ja työstettävyyssika) sekä tuoreen laastin adheesio-ominaisuuksien (laattojen kiinnipysyvyys ja valumattomuus) suhteen. Samalla

selvitettiin laastinsekoitin- ja pumppausyksikön rajoituksia.

- Kiinteästä asemasta tehdyt laatoituskokeet, joiden tavoitteena oli testata ja varmentaa oheislaitteiden ja raaka-aineiden moitteeton yhteistoiminta laatoitusprosessissa sekä varmentaa varsinaisessa laatoitusprosessissa esiintyvien liikerata- ja asentamistapausten perusratkaisujen mielekäs toiminta. Kokeissa saavutettuja työtuloksia verrattiin rakennusalalla käytössä oleviin ohjeisiin sekä lopputuloksen laadun (RYL 90 - RT 14-10380, 1988; RT 34-10341, 1987) että suoritusnopeuden suhteen (RT 160-R2, 1978).
- Laatoituskokeet liikkuvalla alustalla. Kokeiden tarkoituksena oli varmentaa kokonaisu-järjestelmän toimivuus eli liikkumisalustan yhteistoiminta varsinaista laatoitusprosessia eri työpisteissä suorittavan robottiyksikön kanssa.

Kokeissa käytettiin kohdassa 4.3 kuvatun laitteiston lisäksi seuraavia koerakenteita, tarvikkeita ja raaka-aineita:

- Koerakenteina käytettiin puurakenteisesta kehikosta ja 1200 x 3600 mm<sup>2</sup>:n kokoisista kipsiseinälevyistä (Gyproc) rakennettuja koeseiniä. Tähän alustaan kiinnitettiin varsinaiset lyhyemmistä kipsilevypaloista koostuvat pintalevyt, joihin laatat kiinnitettiin.
- Tarvikkeet ja raaka-aineet:
  - Laasti: Partek Höganäs FIX FB12 -kuivalaasti
  - Keraamiset laatat: Pukkila 147 x 147 x 6 mm<sup>3</sup>.

#### 4.4.2 Alustavat laastikokeet

Kokeissa sekoitettiin laasti Putzmeister Spray Boy -sekoitin- ja pumppausyksikössä kuivalaastin valmistajalta saatujen ohjeiden mukaisesti. Kuiva-aine-vesisuhde paino-osuuksina oli 3,45:1. Laatat (6 kpl) vedettiin yksitellen käsin laastisuuttimen kampareunan yli ja asennettiin koeseinään käsin painamalla. Laattojen paikat merkittiin seinään. Kiinnipysyvyys heti asen-

nuksen jälkeen todettiin käsin kokeilemalla. Yli vuorokauden jälkeen asentamisesta tarkistettiin laattojen alasvaluminen silmämääräisesti

ja laattojen kiinnipysyvyys terävällä työkalulla. Yhteenvedo koetuloksista esitetään taulukossa 1.

*Taulukko 1. Yhteenvedo laastikokeiden tuloksista. Laasti: Partek Höganäs FIX FB12, kuiva-aine-vesi-suhde 3,45/1.*

Ominaisuus	Havainnot
Laastin pumpattavuus	Riittävän hyvä
Laastin työstettävyysaika	n. 2 tuntia
Laattojen kiinnipysyvyys heti asennuksen jälkeen	Riittävän hyvä
Laattojen kiinnipysyvyys laastin kovettua	Hyvä, eivät irtoa käsin ilman työkaluja
Laattojen alasvaluminen	Ei havaittavaa alasvalumista
<b>Muut havainnot:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suuttimen rakenne ja pumpun epäkeskisyys aiheuttavat sykemäistä aaltoilua kampa-reunan yli kulkevassa laastikerroksessa.</li> <li>- Sekoittimen ollessa yhtämittaa päällä yli puoli tuntia laastiin tulee silminnähtäviä ilmakuplia, jotka nostavat laastin ilmapitoisuutta, mikä voi huonontaa adheesio-ominaisuuksia.</li> <li>- Laastimäärän pienentyessä sekoittimessa laastivirta kampa-reunan yli katkoilee, koska pumppu imee ilmaa.</li> </ul>	

#### 4.4.3 Laatoituskokeet kiinteästä asemasta

Varsinaiset laatoituskokeet robotilla aloitettiin kiinteästä asemasta siten, että robotti, laastinsekoitin- ja pumppausyksikkö sekä laattakasetti olivat pultattuina lattiaan. Kokeissa tarkasteltavat seikat olivat seuraavat:

- Laatoitusprosessin yleinen toimivuus pääpainon ollessa yhtenäisen laattapinnan valmistuksessa.
- Antureiden toiminta paikan haun yhteydessä: paikan haku lattia- ja seinäpintojen suhteen, tarraimen yhdensuuntaistaminen seinätasoon nähden sekä paikan tarkentaminen viereisten laatoituspaikkojen reunojen perusteella.
- Saavutettava työjälki (laadulliset näkökohdat) verrattuna rakennusalan yleisiin vaatimuksiin ja ohjeisiin, jotka tosin suurelta osin perustuvat subjektiivisiin arvioihin ja

ovat täten vaikeasti kvantifioitavissa.

- Suoritusnopeus, jonka vertailulukuna käytettiin tahtiaikaa asennettua laattaa kohti (s/laatta). Vertailuluku on keskiarvo, ja siihen sisältyvät yhdessä työpisteessä suoritettavat, varsinaiseen laatoitusprosessiin liittyvät osavaiheet, kuten paikan hakutoiminnot, tarraimen asento- ja paikkakorjaukset, laattojen haku kasetista, laastinlevitys laattojen takapintaan sekä laattojen asennus seinään. Vertailulukuun ei sisälly sivuaikoja eikä aputöiden vaatimaa aikaa.

Kokeissa laatoitettiin 6x8 laatan kokoinen alue, johon käyttäjällä oli mahdollisuus valita yhden laattaparin muodostama aukko mielivaltaiseen paikkaan laattakentässä. Kokeiden yhteydessä laadittujen robotin ohjausohjelmien kuvaukset ovat kohdassa 4.3.3.2. Kokeet videokuvattiin. Kokeet tehtiin kolmena koesarjana:

Taulukko 2. Kiinteästä asemasta suoritettujen laatoituskoesarjojen laadulliset tulokset verrattuna rakennusalan yleisiin ohjeisiin (RYL 90 - RT 14-10380, 1988; RT 34-10341, 1987).

Vaatimus	Tulos <sup>1)</sup>		
	Koes. 1	Koes. 2	Koes. 3
Laatoituksen ulkonäön tulee olla tasalaatuinen, yhdenmukainen, eikä siinä saa olla häiritseviä hammastuksia (RYL 90).	-	+/-	+/-
Laatoituksen saumoissa tulee ottaa huomioon laattojen mittapoikkeamien vaikutus (RYL 90).	-----	-----	-----
Yhtenäisillä sekä viereisillä pinnoilla saumojen leveyksien on oltava mahdollisimman yhdenmukaisia (RYL 90).	-	+/-	+/-
Saumojen keskiviivojen tulee jatkua suorina (RYL 90).	-	+/-	+
Keskiviivojen keskinäisen etäisyyden tulee olla sama yhtenäisillä ja viereisillä pinnoilla (RYL 90).	+/-	+/-	+
Valmiin seinän suurin sallittu tasaisuuspoikkeama $\pm 3$ mm mittauspituudella 2000 mm (luokka 2: tavanomainen) (RYL 90)	++	++	++
Kaakelilaatan takapinnasta tulee olla vähintään 3/4 laastin peittäjä (RT 34-10341)	++	++	++
Kiinnityslaasti saa nousta ainoastaan sauman puoleen väliin (RT 34-10341)	-	+/-	++

- 1) ++ = Vaatimus voidaan täyttää kaikilta osin  
 + = Vaatimus voidaan täyttää lähes täysin  
 +/- = Vaatimus täyttyy varauksin tai ei kaikilta osin  
 - = Vaatimus ei täyty  
 ----- = Ei mahdollista nykyisessä konfiguraatiossa

- Ensimmäisessä koesarjassa laatoitettiin kaksi laattakenttää (ilman aukkoa) käyttäen pelkästään kolmea ultraäänietäisyysanturia tarraimessa. Ultraääniantureiden avulla robotti suoritti sekä paikan hakutoiminnot että tarraimen asentojen korjaukset. Laattojen kiinnitysvoimaa (puristusvoima seinään) ei voitu säätää.
- Toisessa koesarjassa laatoitettiin kaksi laattakenttää käyttäen ultraääniantureiden lisäksi tarraimen ja robottikäsivarren laipan väliin asennettua F/T-anturia (katso kohtaa 4.3.4). F/T-anturin avulla robotti suoritti paikan hakutoiminnot ja säätö laattojen asennuksen puristusvoimaa. Ultraääniantureita robotti käytti tarraimen asentojen korjauksiin ja laatoituspisteiden paikantarkennukseen.
- Kolmannessa koesarjassa käytettiin pääpiir-

teissään samaa konfiguraatiota kuin toisessa koesarjassa.

Ensimmäisessä koesarjassa saatiin keskimääräiseksi tahtiajaksi noin 17 s/laatta. Manuaalisessa työssä seinälaattojen pelkkään asennukseen kuluu 0,45 - 0,60 tth/m<sup>2</sup> (RT 160-R2, 1978) eli vastaavalla laattakoolla 36 - 57 s/laatta. Saavutettu työn laatu oli varsin huono (taulukko 2, tulossarake 1). Koesarjan aikana havaittiin useita ongelmia. Puristus seinälle siirsi laattaa seinän suunnassa robotin nivelten asennon mukaan, koska robotti taipui ja laasti luisti, jolloin laattojen nimelliset asemat siirtyivät (kuva 7). Tämä johtui osittain myös voimatakaisinkytkennän puuttumisesta, koska F/T-anturi ei ollut käytettävissä. Lisäksi laastinlevitys oli epätydyttävä: etummaisen laatan reunaan ja laattojen väliin muodostui purseita.

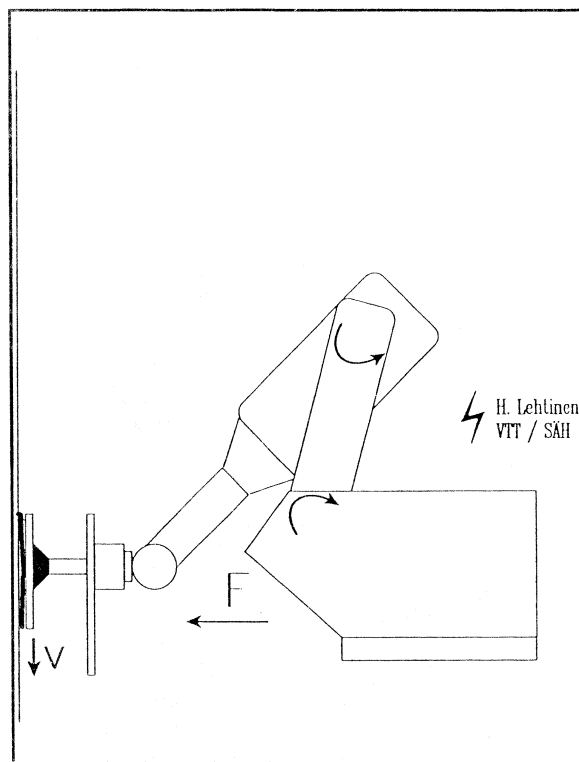
Edellä mainittujen ongelmien lisäksi aiheutti robotin absoluuttisen koordinaatiston virheellisyys tarvetta suoristaa työkalu seinän suuntaiseksi varsin usein, mikä hidasti toimintaa.

Toisessa koesarjassa työn laatu oli lähempänä hyväksyttävää robotin nivelten kalibroinnin jälkeen (taulukko 2, tulossarake 2). Robotin absoluuttikoordinaatiston tarkkuutta merkitsevämmäksi olivat tulleet paikoitusvirheet laattojen hakemisen yhteydessä. Laasti levisi laattojen alle tasaisesti aiheuttamatta purseita. Saatutettu tahti aika oli edelleen n. 17 s/laatta (21 s/laatta, mikäli asennuspaikan korjaushakua ultraääniantureilla käytetään). Luotettavaa kiinnittymistä ei kuitenkaan edelleenkään saatutettu, mikä johtui ilmeisesti väliaikaisista kommunikointihäiriöistä robotin ohjausjärjestelmän ja F/T-anturin välillä. Laattojen luistamista laastipatjan päällä esiintyi edelleen. Tämän estämiseksi kehitettiin muuttujalla aktivoitava kompensointiliike ohjausohjelmaan, koska varsinkin vaunun päältä laatoitettaessa ylimääräisen pystysuuntaisen voimakomponentin todennäköisyys on merkitsevä.

Kolmannen koesarjan yhteydessä havaittiin robotin 1. nivelessä kalibrointivirhe. Korjauksen jälkeen työn laatu parani edelleen verrattuna toisen koesarjan tuloksiin (taulukko 2, tulossarake 3). Jälki ei kuitenkaan kaikilta osin täyttänyt vaatimuksia. Päävirhelähteet ovat ilmeisesti tarraimen ja laattakasetin epätarkkuuksien aiheuttamat asentovirheet. Lisäksi havaittiin, että laasti on erittäin herkkä vesipitoisuuden pienillekin vaihteluille.

#### 4.4.4 Laatoituskokeet liikkuvalla alustalla

Laatoituskokeet liikkuvalla alustalla suunniteltiin suoritettavaksi siten, että telaketjuajoneuville (ks. kohdat 4.3.1 ja 4.3.2) asennettu robotti laatoittaisi kaksi laattakenttää eri seinäpinoilla kohdassa 4.3.3 kuvatun prosessin mukaisesti. Koeseinät oli asennettu suorakulmaisesti toisiinsa nähden (kuva 19), ja telaketjuajoneuvon tuli liikkua itsenäisesti näiden



*Kuva 17. Laatan puristusvoima seinää vastaan voi aiheuttaa liukumista laastipatjan päällä robotin nivelestä riippuvaan suuntaan.*

kahden laatoitusaseman välillä tehden hallitun 90°:n kaartoliikkeen. Kokeiden alkuvaiheessa tapahtuneen laiterikon takia kokeita ei voitu viedä läpi suunnitelmien mukaisessa laajuudessa. Telaketjuajoneuvon liikkumiskyky voitiin kuitenkin todentaa. Lisäksi voitiin todentaa ajoneuvon ja robotin ohjausjärjestelmien yhteistoiminta. Aikaisempien kokeiden (kohta 4.4.3) perusteella tiedetään myös, että robotti pystyy hakemaan ja paikantamaan seinäpinnat sekä asentamaan laatat kohtuullisella tarkkuudella.





*Kuva 18. Laatoitusrobotti kokeiluympäristössään.*

#### 4.4.5 Teknisen ratkaisun arvio kokeiden perusteella

Kokeet ovat osoittaneet, että robottien on mahdollista toimia epätarkassa rakentamisympäristössä. Laatoitusjälki parani jatkuvasti lähelle RYL-laatua ja silmämääräisesti tyydyttävää. Kokeiden aikana huomattiin, että se sama pieni epämääräisyys ja laattojen asentojen vaihtelu, joka näkyy seinällä (kuva 20), tapahtuu myös laattoihin tartuttaessa. Tarrainta (kuva 19) ei kuitenkaan voitu enää rakentaa uudelleen projektiin loppuvaiheessa.

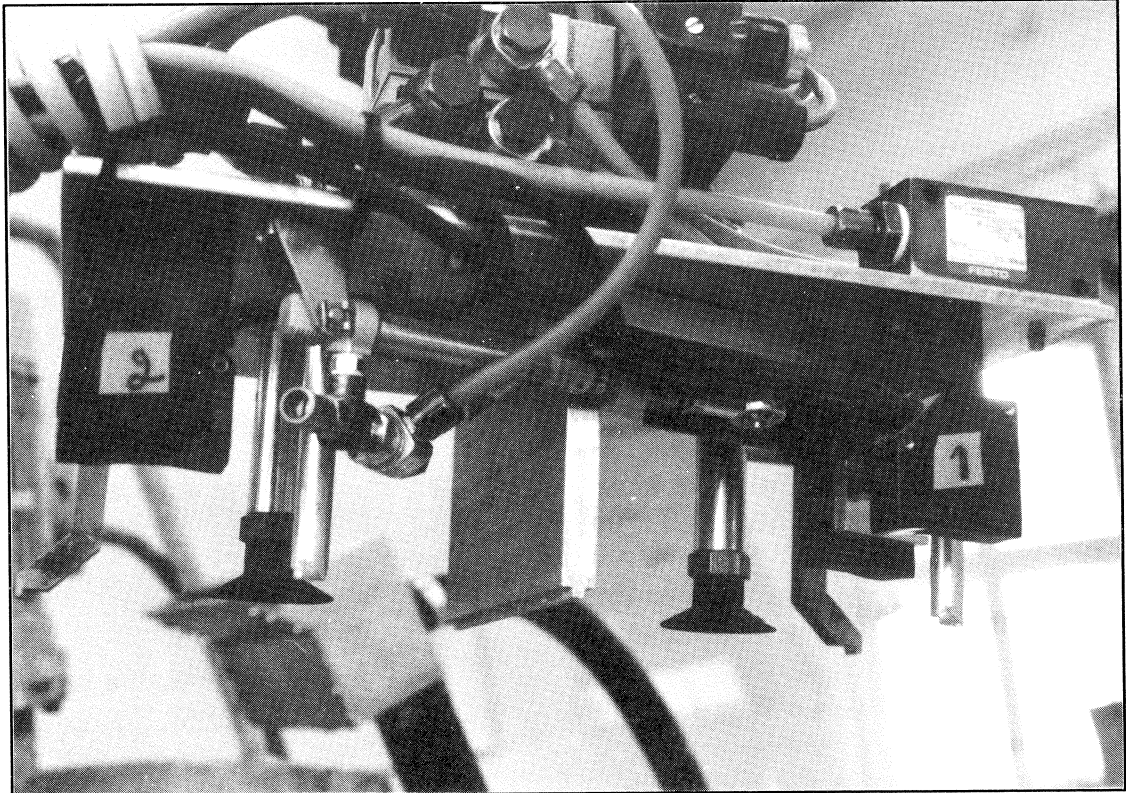
Järjestelmän eräksi heikoiksi lenkeiksi voidaan todeta robottikäsivarren ja F/T-antureiden

rikkoutumistodennäköisyys törmäysten yhteydessä. Niitä ei usein voi työmaolosuhteissa korjata. Vahvemman anturin käyttö pienentäisi rikkoutumisriskiä, mutta samalla myös mittauksen herkkyyttä. Työmaolosuhteissa, kun laite on automaattisesti ohjelmoituna, törmäyksiä ei voida eliminoida täydellisesti etukäteen.

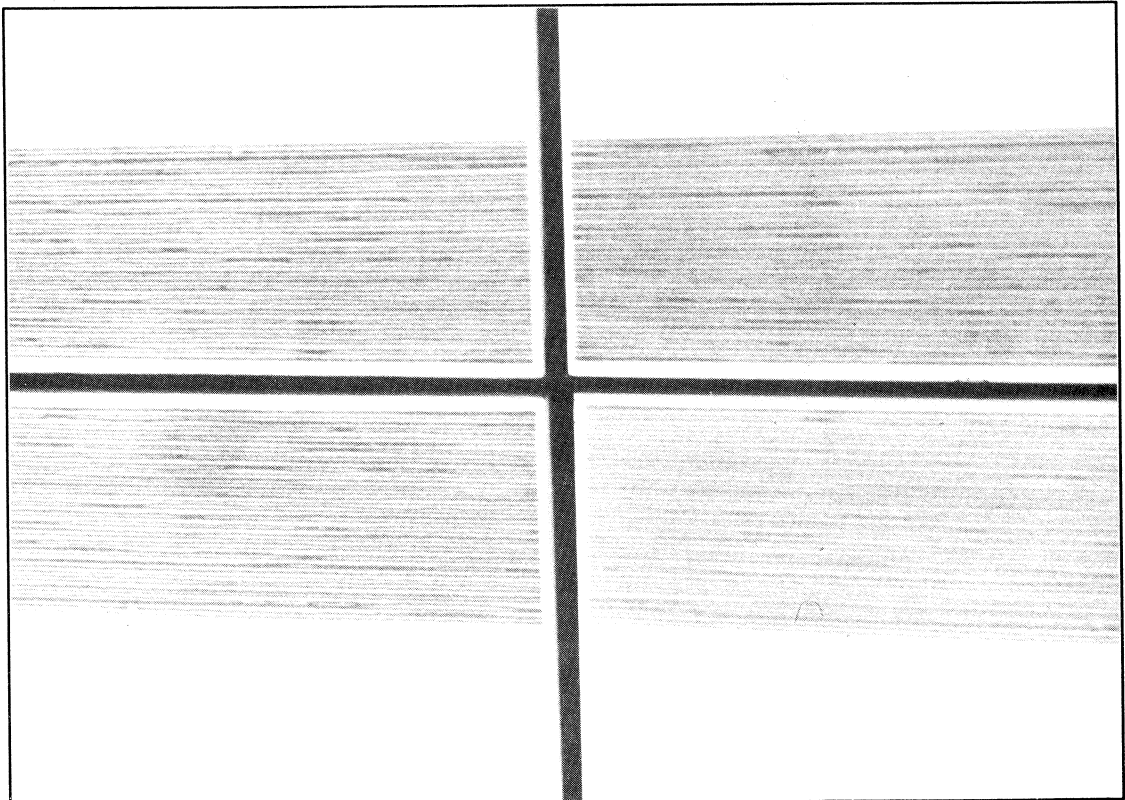
Robotin runkoon ja työkalun lähelle voisi kiinnittää muutamia leveäkeilaisia ultraääniantureita törmäyksiä varten, jotka pysäyttäisivät liikkeen havaitessaan ylimääräisiä esteitä.

Vaunun kokeissa todettiin, että sisäkaarteiden puoleinen telaketju voi irrota vetopyörältä. Tämä edellyttää vaunun telaketjuratkaisun vahvistamista. Sisäisiin mittauksiin perustuva paikantamisjärjestelmä ei anna riittävää tarkkuutta jatkuvassa ajossa. Riittävä luotettavuus saavutetaan liittämällä vaunuun ulkoinen paikantamisjärjestelmä.

Robottikäsivarsi on markkinoilta saataviin verrattuna melko kevyt, kunhan vahvistinyksikkö siirretään lähelle robotin ohjausyksikköä. Teollisuusrobotin ohjausyksikkö on sen sijaan painava ja suuri, koska se on suunniteltu kattamaan suuren joukon erilaisia tarpeita. Kertaluokkaa pienemmän, kevyemmän ja liikkeiltään sekä ulottuvuudeltaan vastaavaa luokkaa olevan robottikäsivarren suunnittelu maksaa satoja miljoonia markkoja eikä ole edes mahdollista kuin muutamalle robotteja kehittäväälle organisaatiolle maailmassa.



*Kuva 19. Laatoitusrobotin tarrain.*



*Kuva 20. Robotin suorittamaa laatoitusta.*

## 4.5 Robotisoitu laatoitus esimerkkikohteessa

Robotisoitua laatoitusta työmaan kannalta tarkasteltiin kirjoituspöytätyönä valitun esimerkkityömaan pohjalta. Esimerkkikohteena oli pääkaupunkiseudulla sijaitseva terveysasemarakennus, josta tarkasteltiin yhden siiven yhtä kerrosta. Tarkastelun piiriin kuului seitsemän huonetta, joissa seinälaatoitusta oli yhteensä 343,5 m<sup>2</sup>. Huonetta kohti seinälaatoitusta oli keskimäärin 49 m<sup>2</sup>. Huoneiden lattiapinta-ala oli yhteensä 137 m<sup>2</sup> ja keskimääräinen lattiapinta-ala 19,5 m<sup>2</sup>/huone eli laatoitusta oli 2,5 m<sup>2</sup>/lattia-m<sup>2</sup>.

Robotin tarvitsema työaika esimerkkikohteen laatoituksen tekemiseen oli laskennallisesti 2 viikkoa 1 päivä, kun työpäivän pituus oli 8 h/vrk. Vaunun avulla liikkumiseen kului työajasta n. 2,4 %.

Robotin liikkeet esimerkkikohteen tyypillisessä huoneessa käyvät ilmi kuvasta 21. Kunkin liikkeen pääte pistettä vastaava robotin saavuttama alue seinällä on merkitty liikkeen numerolla.

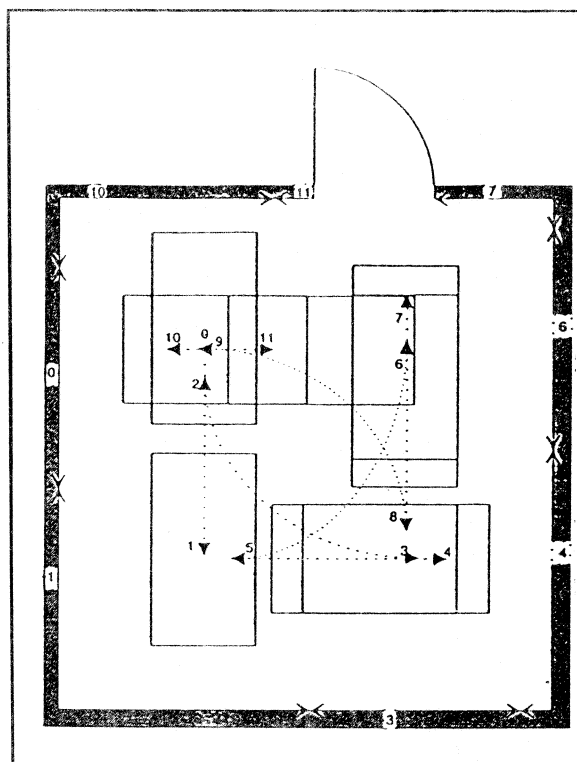
Laatoituksen robotisointi ylipäätään systematisoi työmaatoteutusta ja pakottaa valmistelemaan työt etukäteen niin hyvin, että häiriötön robottityö on mahdollista. Esimerkkikohteen valossa tehdyt havainnot robotisoidun laatoituksen työmaatoteutuksesta esitetään alempana kohdassa 4.7.

## 4.6 Laatoitusrobotiikan talous

Laatoitusrobotiikan taloudellisten tekijöiden tarkastelu ei ole ehdottoman eksaktia, vaan enemmänkin suuntaa antavaa.

Pääomakustannusten osalta oletetaan:

- 1) kuoletusaika 3/5 vuotta
- 2) korko 6/10/15 %
- 3) käyttöaste 75/90 %
- 4) vuodessa 250 työpäivää ja työpäivässä 8/16 työtuntia



Kuva 21. Vaunun liikkeet laatoitettaessa 4500 x 4500 mm huonetta. Vaunun liikkeet on numeroitu alkaen lähtöpisteestä 0.

- 5) robottisysteemin hankintahinta 1 milj. mk, joka jakautuu seuraaviin kustannuseriin:
  - a) teollisuusrobotti 620 000 mk
  - b) telaketjuvaunu 190 000 mk
  - c) apulaitteet 190 000 mk.

Pääomakustannukseksi työtuntia kohti mk/h saadaan:

korko	k-aste	kuloletusaika 3 v		5 v	
		8 h/tpv	16 h/tpv	8 h/tpv	16 h/tpv
6 %	90 %	208	104	132	66
	75 %	249	125	159	79
10 %	90 %	223	112	147	73
	75 %	268	135	176	88
15 %	90 %	243	122	166	83
	75 %	292	147	199	100

Huoltokustannukset: huoltoväli 500 käyttötuntia, huolto 3 500 mk/kerta, huoltokustannus 7 mk/h.

Korjauskustannukset: arviolta huoltokustannuksen suuruusluokkaa eli 7 mk/h.

Vakuutuskustannukset (palo, rikkoutuminen): 20 000 mk/a = 10/5 mk/h (vastaten 8/16 työtuntia/työpäivä).

Energiakustannukset: teho 2 kW, 35 p/kWh eli n. 1 mk/h.

Siirto-, valmistelu- ja asennuskustannusten osalta oletukset ovat:

- 1) työmaan keskikoko 500/1500 m<sup>2</sup> laatoitusta
- 2) tahtiaika 17 s/laatta
- 3) 180 laattaa (4 m<sup>2</sup>)/vaunun pysäytys, jota vastaava aika:
  - nosto + lasku 1 min
  - asennus 180 x 17 s = 51 min
  - häiriöt 1 min/40 laattaa = 4,5 min
  - laattojen pano kasettiin 3 min
  - vaunun siirto 1 min
  - paikantaminen 1,5 minyhteensä 62 min/4 m<sup>2</sup> = 0,258 h/m<sup>2</sup>
- 4) valmistelevat työt (mm. laastin sekoitus) ja lopetustyöt (mm. laastisekoittimen puhdistus) 1 h/tpv x 1,6 x 45 mk/h = 72 mk/tpv
- 5) siirrot työmaalle ja työmaalla 2 tpv/työmaa, kustannukset yhteensä 7 900 mk/työmaa
- 6) operaattorin kustannukset 1,6 x 12 800 mk/kk = 20 480 mk/kk = 985 mk/tpv. Operaattori huolehtii robotin toiminnan lisäksi mm. laattojen ja laastin syötöstä robotille sekä käsityönä tehtävistä laattojen sahausista, loveuksista yms.
- 7) robotti tekee ainoastaan suoraa peruslaatoitusta, joka ei sisällä laattojen sahausta, loveusta tai vastaavaa eikä myöskään saumausta.

**Kaikkiaan robotisoidun laatoituksen kustannukset ovat siten (5 v, 15 %, 75 %, 8 h/tpv)**

**109 mk/m<sup>2</sup> (500 m<sup>2</sup>) ja 97 mk/m<sup>2</sup> (1500 m<sup>2</sup>) ja vastaavasti kaksivuorotyössä 83 mk/m<sup>2</sup> (500 m<sup>2</sup>) ja 71 mk/m<sup>2</sup> (1500 m<sup>2</sup>).**

Robottilaatoituksen suurimmat kustannuserät ovat pääomakustannukset ja operaattorin kustannukset.

Laatoituksen kustannukset käsityönä tehtynä ilman saumausta 0,45 h/m<sup>2</sup> x 1,6 x 90 mk/h = 65 mk/m<sup>2</sup>. Telineiden ja muiden aputöiden osuus 0,15 h/m<sup>2</sup> x 1,6 x 50 mk/h = 12 mk/m<sup>2</sup>. Kaikkiaan käsityönä tehdyn laatoituksen kustannukset 77 mk/m<sup>2</sup>.

Laskelman pohjalla on monia oletuksia ja arvioita. Laskelma viittaa kuitenkin siihen, että robotti jo nykyisellään kilpailisi kannattavuudessa käsityön kanssa. Erityisesti kaksivuorotyössä tulisi robotisoitu laatoitus käsityötä edullisemmaksi.

#### **4.7 Laatoitustyön mukauttaminen robotisointiin soveltuvaksi**

Robotisointi edellyttää käytettävien materiaalien, työtapojen ja työjärjestyksen mukauttamista. Koko käsityöprosessi pitää mukauttaa robotiprosessiksi.

Konkreettisesti laatoituksen robotisointi edellyttää **suunnitteluvaiheessa** seuraavaa:

- laatoitettavat pinnat mitoitetaan siten, että laattojen leikkaamiset, rei'itykset, loveukset yms. minimoidaan eli pyritään kokonaisuun laattoihin ja suoriin pintoihin
- robotin aiheuttama kuormitus otetaan huomioon rakenteiden mitoituksessa, robotin paino saattaa olla joidenkin rakenteiden suunnittelussa määräävä
- oviaukkojen, käytävien ja muiden robotin kulkuväylien ja työskentelytilat mitoitetaan siten, että robotti pääsee liikkumaan ja työskentelemään.

**Materiaaleilta** laatoituksen robotisointi edellyttää seuraavia ominaisuuksia:

- laasti on toisaalta pitkään käyttökelpoista eli sen avo aika on pitkä, mutta toisaalta kuivuu laatan asennuksen jälkeen nopeasti, eli laatat pysyvät asennuksen jälkeen paikoillaan (eli mm. mitään naruja ei tarvita)
- laattojen mittatarkkuutta on parannettava; mittavaihtelujen huomioonotto robottijärjestelmän avulla koituu liian kalliiksi
- laatoitustyön lopettamisen jälkeen laastin puhdistus laitteista on oltava vaivatonta ja nopeaa
- laastin pakkaus on sellainen, että purettaessa pölyäminen on mahdollisimman vähäistä
- laattojen saumausta kehitetään siten, että sen voi robotti tehdä laattojen asennuksen jälkeen
- sekä laastin että laattojen pakkaukset ovat robottiprosessin kannalta tarkoituksenmukaisia.

Robotisoitu laatoitus asettaa vaatimuksia myös työmaalle :

- laatoitettavat pinnat ovat suoria, epätasaisuudet on poistettu
- laatoitettavien pintojen mittatarkkuus on riittävän hyvä.
- työvaiheet on aikataulutettu ja järjestetty siten, että robotti voi työskennellä mahdollisimman vähin keskeytyksin ja liikkumisin paikasta toiseen.
- työmaan järjestyksestä ja siisteydestä huolehditaan, jotta robotti pääsee esteettä liikkumaan
- voimakkaat ilmavirtaukset ja niiden aiheuttama pölyäminen on estetty
- lämpötila ja kosteus ovat robotin kannalta sopivat
- robotin tarvitseman sähkön saanti on otettu huomioon rakennusaikaisessa sähköistyksessä
- laastin tekemiseen ja laitteiden puhdistamiseen tarvittavan veden saanti ja pesuveden poisjohtaminen on järjestettävä
- robotin käyttämät lattiapinnat ovat niin valmiit ja sellaisessa kunnossa, että liikkuminen käy päinsä.

Laatoituksen mukauttaminen robotisoinnin

vaatimusten mukaiseksi on mahdollista tehdä suurelta osin helpostikin. Joidenkin detaljien (mm. saumauksen teko samanaikaisesti laattojen asennuksen kanssa) mukauttaminen saattaa edellyttää suurempia panostuksia. Ylipäätään mukauttaminen systematisoi ja tehostaa muutoinkin työmaan toimintaa.

## 4.8 Jatkokehitys

Välittömiä, nykyistä järjestelmää parantavia, kehitysehdotuksia ovat:

- työkaluun aktiivisesti laattoja keskittävä mekanismi (vasteita vasten laattoja puristavat sormet)
- täyden seinäpinnan laatoituksen toteuttaminen
- uä-antureiden siirto 5 mm tarraimeen päin tai korvaaminen optisilla antureilla, jotka kykenevät lukemaan etäisyyttä vinosta pinnastakin.

Laatoitusrobotin edelleenkehittäminen seinälaatoitukseen työmaalla edellyttää seuraavien osajärjestelmien tai ominaisuuksien jatkokehitystä:

- vaunun liikeohjaukskäskyjen ja robotin liikeratojen muodostaminen suunnittelutiedon perusteella
- ohjauksyksikön pienentäminen ja asentaminen vaunuun
- keveämmän käsivarren soveltaminen ja kokonaispainon alentaminen muutoin
- turvajärjestelmän kehittäminen
- ulkoisen paikoitusjärjestelmän liittäminen telaketjuvaunuun
- järjestelmän luotettavuuden ja tehokkuuden parantaminen sekä kustannusten alentaminen
- laattojen sahausjärjestelmän kehittäminen.

Kehitetty järjestelmä voidaan myös mukauttaa lattialaatoituksen kokeiluun. Tällöin edellytetään edellä selostetun korotusmekanismin toteuttamista.

Prototyypin pohjalta voidaan myös kehittää

kiinteä laatoitusasema tehdaskäyttöön. Tällainen laatoitusasema voisi koostua kattoon ripustetusta teollisuusrobotista ja siihen liittyvästä laasti- ja laatta-asehasta sekä materiaalien siirtojärjestelmistä. Laatoitusaseman avulla voitaisiin laatoittaa tehtaassa

- kylpyhuone-elementtejä ja hyttielementtejä
- sisustuslevyjä
- julkisivulevyjä tai -elementtejä.

Laattojen ja muiden laattojen latominen betonielementtimuottiin on yksi mahdollinen sovelluskohde.

Kehitettyä telaketjuvaunun ohjausta voidaan ajatella sovellettavan muissa liikkuvissa robotijärjestelmissä tai materiaalinsiirroissa yleensä.

Vaunun ja teollisuusrobotin muodostamaa kokonaisuutta voidaan käyttää tutkimushankkeissa, joissa kokeillaan muita sisävalmistustöitä tai tiedonsiirtoa robotin ja rakennushankkeen muiden tietojärjestelmien välillä:

- maalaus
- saumaus
- tasoitus
- muuraus
- tiedonsiirto rakentamisrobotin ja hanketietokannan välillä.

## 5 SISÄVALMISTUKSEN KEHITTÄMINEN ROBOTISOINNIN AVULLA

### 5.1 Edellytysten luominen robotisoinnille

Sisävalmistustöiden robotisointi edellyttää toisaalta robottitekniikan, toisaalta rakennustekniikan kehittämistä.

Robottitekniikan osalta edellytykset jakautuvat yleisiin ja rakentamissovelluksiin liittyviin. Yleisen robottitekniikan kehittymistä vaativat alueet ovat erityisesti

- voimanlähteiden tekniikka, lähinnä akkujen kapasiteetin nosto ja niiden painon alentaminen
- mittaus- ja navigointitekniikka, joka sallii huokean, tosiaikaisen kolmiulotteisen paikanmittauksen
- tietotekniikan tehon kasvattaminen, jotta ohjauslaitteet voidaan pakata tehokkaasti liikkuvaan järjestelmään
- joustavien ja nopeiden ohjelmointityökalujen ja käyttöliittymien kehittyminen.

Edellämainittuihin kysymyksiin kohdistuu suuri, maailmanlaajuinen kehityspanostus, ja vakaa suorituskyvyn kasvu on odotettavissa.

Robottitekniikan rakentamissovellusten tarpeita ovat erityisesti

- robotin, sen tarttujen ja muiden lisälaitteiden kehittäminen paremmin rakennusmateriaalien käsittelyyn sopiviksi
- robotin ja sen lisälaitteiden kehittäminen työmaolosuhteisiin sopiviksi (pöly, tuuli, kosteus, lämpötila jne.)
- tiedonsiirtostandardit rakennuksen tuotetietomallin, tuotantotietomallin ja robottijärjestelmän välillä
- muut standardoidut liittymät ja modulaariset perusosat, kuten ulkoiset paikanmittausjärjestelmät ja käyttöliittymät.

Näiden tarpeiden osalta tutkimustyötä on jo jonkin verran tehty, mutta panostuksia tarvi-

taan oleellisesti enemmän.

Myös rakennustekniikan osalta edellytykset jakautuvat yleisiin ja sovelluskohtaisiin.

Yleisistä edellytyksistä tärkein on rakentamisen systematisoiminen. Automaation tehokas käyttöönotto edellyttää rakentamisen kehittämistä järjestelmälliseksi, suunnitelluksi ja säännöllistetyksi toiminnaksi. Tällainen selkeyttämisprosessi on sinänsä kannattava ja hyödyllinen ja saattaa jopa poistaa automaatiotarpeen. Selkeyttämiseen sisältyy mm.

- tuotteiden ja tuotantoprosessien yksinkertaistaminen
- virheiden eliminointi prosessista
- siisteyden ja järjestyksen parantaminen.

Toinen tärkeä yleinen edellytys liittyy organisoitapoihin ja kehittämiskulttuuriin. On löydettävä sellaiset organisoitavat, joiden puitteissa voidaan tarkastella rakentamisen kokonaisketjun kehittämistä ja myös robotiikkaa yhtenä vaihtoehtona tällöin. Ns. tuotekauppa tai järjestelmätoimitukset ovat ilmeisesti tässä tärkeä ratkaisusuunta. Rakennusyriyten osalta mahdollisuutena on ns. konseptitalojen suunnittelu, jolloin työmenetelmiä ja kalustoa voidaan samanaikaisesti kehittää ja täydentää. Toisaalta tulisi päästä jatkuvaan kehittämiseen, joka kattaa sekä pienimuotoiset, työmaaläheiset kehittämiskohteet että suuret investoinnit ja kehityshankkeet. Sisävalmistuksen osalta Suomesta paljolti puuttuu pienimuotoinen työtapojen ja -menetelmien kehitystyö (päinvastoin kuin esim. Ruotsissa, jossa tällaista kehitystyötä tuetaan aktiivisesti). Robotisointi tulisikin nähdä mekanisoinnin jatkeena eikä uutena irrallisena ilmiönä.

Rakennusjärjestelmä, -materiaalit sekä rakennussuunnitelma ja tuotantoprosessi on mukautettava kulloisessakin tilanteessa automatisoinnin vaateisiin. Tähän sisältyy mm.

- oviaukkojen, käytävien ja muiden tilojen mitoittaminen robottien käyttöä ajatellen



- robottisysteemin kuormitusten huomioon ottaminen rakenteiden mitoituksessa
- materiaalien valinta ja niiden kehittäminen robottityöskentelyyn sopivaksi
- robottien työskentelytilojen olosuhteiden parantaminen (tuulisuus, lämpö, pöly, kosteus)

Mukauttamisen periaatteita tarkastellaan lähemmin viitteessä (Koskela et al. 1991).

## 5.2 Kehitysehdotukset

Rakentamisrobotiikka sinänsä on siis paljolti vielä tutkimusvaiheessa. Toisaalta se tarjoaa vision kehittyneestä rakentamisprosessista, jonka eräitä periaatteita voidaan alkaa toteuttaa käytännössä välittömästi.

### 5.2.1 Rakentamisrobotiikan perustekniikoiden kehittäminen

Rakentamisrobotiikan perustekniikoiden kehittäminen on verraten raskasta, ja sitä tulisikin edistää kansainvälisessä yhteistyössä. Ainakin seuraavat aiheet ovat lähivuosien painopisteitä:

- tiedonsiirtostandardien kehittäminen robotin ja hanketietokannan välille
- rakentamiseen soveltuvien mittaus- ja navigointijärjestelmien kehittäminen
- materiaalinkäsittelyn tietojärjestelmien kehittäminen: viivakoodien, saattomistien jne. hyväksikäyttötavat, automaattinen tunnistus
- turvallisuusjärjestelmien kehittäminen
- robottien käyttöliittymät
- rakentamisrobotiikan mukauttamisen periaatteiden muotoilu
- simuloinnin soveltaminen robotisoinnin soveltuvuustarkasteluissa
- liikkumisjärjestelmien kehittäminen.

### 5.2.2 Rakentamisrobotiikan sovellusten kehittäminen

Rakentamisrobotiikan työmaasovellusten kehittäminen on usein ainakin aluksi perustutkimus-

luontoista. Se soveltuisi hyvin korkeakouluissa opinnäytteiden muodossa tehtäväksi työksi. Kyseeseen tulevia sisävalmistuksen sovelluksia ovat mm.

- muuraus
- maalaus
- tasoitus
- yleiset apuvälineet siirtojen ja nostojen suorittamiseksi.

Toisaalta eri sisävalmistusvaiheiden esivalmistuksessa (esim. huone-elementtien maalaus ja laatoitus) voidaan nopeastikin päästä kannattaviin automaatio-sovelluksiin.

### 5.2.3 Rakentamisprosessin hallinnan parantaminen

Kuten edellä on todettu, on rakentamisprosessin hallinnan parantaminen välttämätön edellytys automaation käyttöönotolle. Japanista lähtöisin olevien uusien tuotannon ohjausperiaatteiden punaisena lankana on yksinkertaistaminen (Schonberger 1984). Lisäarvoa tuottamattomien tehtävien karsiminen ja virtautettu tuotantoprosessi luonnehtii selkeytettyä ja yksinkertaistettua tuotantoa. Näitä uusia tuotantomenetelmiä on ensinnä sovellettu massa-tuotannossa, kuten auto- ja elektroniikkateollisuudessa. Sittemmin niitä on alettu soveltaa myös erä- ja kertatuotannossa.

Yksinkertaistamisen ja selkeyttämisen periaatteiden soveltaminen rakentamiseen on ollut hajanaista ja sattumanvaraista. Pääsyyinä tähän on ilmeisesti ollut rakentamisen luonne projekti- ja kertatuotantona. Selkeyttämisen tarve rakentamisessa on kuitenkin selvä: rakentamisen tuottavuuskehitys on ollut heikko.

Tähän liittyvää tutkimus- ja kehitystarvetta on erityisesti seuraavilta osin:

- kehittyneiden logististen ratkaisujen periaatteet (suunnittelumenetelmät, JOT)



- tuotannonohjauksen periaatteet
- laatujohtamisen periaatteet.

On huomattava, että yksinkertaistamiseen ja selkeyttämiseen liittyvät kysymykset ovat osaltaan hyvin käytännöllisiä, ja niitä voidaan yrityksissä edistää välittömästäkin. Toisaalta tarvitaan selkeiden teoreettisten perusteiden muotoilua.

Sisävalmistuksen eri komponenttien esivalmistuksen kehittäminen parantaa niinikään hallittavuutta ja helpottaa työmaa-asennuksen mekanisointia ja automatisointia.

#### 5.2.4 Käytännönläheinen työmenetelmien ja työkalujen kehittäminen

Rakentamisrobotiikan kehittämisen aikajänne on pitkä; nopeasti ei synny laajaan käyttöön yleistyviä laitteita. Rakentamisen kehittämiseksi lyhyellä aikavälillä onkin tarpeen aktivoida työmenetelmien ja työkalujen käytännönläheistä kehittämistä ja kehitystyön tulosten levitystä. Ergonominen näkökulma on tässä keskeinen. Kohoava mekanisointiaste madaltaa osaltaan robotiikan soveltamiskynnystä jatkossa. Kehitettyjä mekaanisia ratkaisuja voidaan myös käyttää periaatteiltaan tai idealähteinä robotisoiduissa ratkaisuissa.

## 6 YHTEENVETO

### 6.1 Sisävalmistusrobotiikan tarve ja nykytila

Rakentamisen sisävalmistustyöt käsittelevät pääasiassa sisätilojen pintoja, väliseiniä, muita rakenteita ja varusteita. Sisävalmistustyöt ovat sekä kustannuksellisesti että ajallisesti merkittävä rakennusvaihe: niiden osuus rakennuskustannuksista on 20 - 50 % ja rakennusajasta 30 - 55 %.

Sisävalmistuksen robotisoinnin keskeisiä perusteita ovat korkeat kustannukset, ammattitaitoisen työvoiman saannin vaikeus, työturvallisuuskysymykset, pyrkimys lyhyempään rakennusaikaan sekä onnistuneella automaatiolla saavutettava tasainen laatu. Sekä työvoiman saannin, työturvallisuuden että työviihtyvyyden kannalta keskeisenä taustaongelmana on se, että rakennustyöt ovat fyysisesti raskaita. Tämän takia vain harvat rakennusammattit ovat soveliaita keskivertonaiselle. Useissa rakennusammateissa ylittyy myös miesten fyysinen suorituskyky, mikä heijastuu kulumasairauksien yleisyytenä. Rakennustyötä keventävien menetelmien ja koneiden kehittäminen korostuu siten sekä ergonomisista lähtökohdista että tarpeesta laajentaa rakennusammattien rekrytointipohjaa.

Toisaalta robotisointi on vain yksi kehittämiskeino, jota täytyy punnita muita vaihtoehtoja vasten. Pitkälle viety esivalmistus, apuvälineiden järjestelmällinen soveltaminen ja työn huolellinen ennakkosuunnittelu ovat robotisointia välittömämpiä tapoja sisävalmistuksen kehittämiseen. Samalla ne luovat edellytyksiä myöhemmässä vaiheessa tapahtuvalle automaation käyttöönotolle.

Ongelmana robotisoinnin kannalta on se, että sisävalmistustyöt koostuvat suuresta määrästä lyhytkestoisia tehtäviä ja että työpisteiden sijainti muuttuu jatkuvasti.

Prototyyppejä ja kehityshankkeita on lukuisista

sisävalmistusroboteista. Ehkä pisimmällä ovat levytysmanipulaattorit, apuvälineet seinä- tai kattolevytyksen suorittamiseksi. Betonipinnan hierto on ollut suosittu koekohde japanilaisille rakennusyriyksille. Tutkimusvaiheessa ovat muuraus, maalaus, tasoitetyöt, materiaalinkäsittely jne. Mielenkiintoisia ovat myös japanilaisten rakennusyriyten hankkeet luoda lähes täysin automatisoituja talonrakennusjärjestelmiä. Tuotantokäyttöön ei sisävalmistusrobotteja ole vielä saatu. Robottitekniikan kehittyminen ja halventuminen ja samanaikainen työn hinnan kohoaminen madaltavat kuitenkin kannattavuuskynnystä jatkuvasti.

### 6.2 Laatoitusrobotikokeilut

Projektissa on tutkittu rakentamisrobotiikan soveltuvuutta laatoitusrobotin prototyypin avulla. Tavoitteena oli perustekniikoiden kehittäminen ja kokeilu.

Tavoitteeksi asetetun laitteistokokoonpanon mukainen järjestelmä ulottuu työkalullaan mihin tahansa 3,2 m korkean huoneen sisäpintaan. Tämä lähes kokonaan valmiista komponenteista koottu järjestelmä sisältää pienen sähköhydraulisen telaketjuajoneuvon, teollisuusrobotin, laastijärjestelmän sekä laattakasetin. Tähän järjestelmään erityisesti suunniteltuja osia ovat ultraääni- ja voima/momenttianturein varustettu kahden laatan imukuppitarrain sekä laastinlevityssuutin, joka toimii kaupallisen laastinsekoitus- ja pumppausjärjestelmän yhteydessä.

Vaunu liikkuu työpisteiden välillä melko lyhyitä matkoja. Rakentamisen toleranssien pohjalta on vaunun paikoitusjärjestelmälle asetettu vaatimus: vaunun täytyy kyetä liikkumaan 10 x 15 m<sup>2</sup> kokoisessa huonetilassa 50 mm ja 1 asteen tarkkuudella. Vaunun ohjausjärjestelmän ytimenä on PC-laitteistopohjainen reaaliaikakäyttöjärjestelmällä varustettu ohjain.

Suoritetuissa kokeissa saavutettiin n. 17 sekunnin tahtiaika laattaa kohti. Laatan paikkatark-

kuuden ja laastin levityksen tasaisuuden suhteen päästiin lähelle rakennusalan yleisiä laatuvaatimuksia. Vaunun paikoitusjärjestelmän todettiin kokeissa yltävän riittävään tarkkuuteen huonetilassa.

Robotisoitu laatoitus tavoitteeksi asetetulla laitteistolla on yksivuorotyössä hieman kalliimpaa kuin käsityö. Kaksivuorotyössä robotisoitu laatoitus on käsityötä edullisempaa.

Robotisointi edellyttää käytettävien materiaalien, työtapojen ja työjärjestyksen mukauttamista. Koko käsityöprosessi pitää mukauttaa robotiprozessiksi. Konkreettisesti laatoituksen robotisointi edellyttää suunnitteluvaiheessa seuraavaa:

- laatoitettavat pinnat mitoitetaan siten, että laattojen leikkaamiset, rei'itykset, loveukset yms. minimoidaan eli pyritään kokonaisuun laattoihin ja suoriin pintoihin
- robotin aiheuttama kuormitus otetaan huomioon rakenteiden mitoituksessa, robotin paino saattaa olla joidenkin rakenteiden suunnittelussa määräävä
- oviaukkojen, käytävien ja muiden robotin kulkuväylien ja työskentelytilat mitoitetaan siten, että robotti pääsee liikkumaan ja työskentelemään.

**Materiaaleilta** laatoituksen robotisointi edellyttää seuraavia ominaisuuksia:

- laasti on toisaalta pitkään käyttökelpoista eli sen avo aika on pitkä, mutta toisaalta kuivuu laatan asennuksen jälkeen nopeasti eli laatat pysyvät asennuksen jälkeen paikoillaan
- laattojen mittatarkkuutta on parannettava; mittavaihtelujen huomioonotto robotijärjestelmän avulla koituu liian kalliiksi
- laatoitustyön lopettamisen jälkeen laastin puhdistus laitteista on oltava vaivatonta ja nopeaa
- laattojen saumausta kehitetään siten, että sen voi robotti tehdä laattojen asennuksen jälkeen
- sekä laastin että laattojen pakkaukset

ovat robotiprozessin kannalta tarkoituksenmukaisia.

**Robotisoitu laatoitus** asettaa vaatimuksia myös **työmaalle** :

- laatoitettavat pinnat ovat suoria, epätasaisuudet on poistettu
- laatoitettavien pintojen mittatarkkuus on riittävän hyvä.
- työvaiheet on aikataulutettu ja järjestetty siten, että robotti voi työskennellä mahdollisimman vähin keskeytyksin ja liikumisoin paikasta toiseen.
- työmaan järjestyksestä ja siisteydestä huolehditaan, jotta robotti pääsee esteettä liikkumaan
- voimakkaat ilmvirtaukset ja niiden aiheuttama pölyäminen on estetty
- lämpötila ja kosteus ovat robotin kannalta sopivat
- robotin tarvitseman sähkön saanti on otettu huomioon rakennusaikaisessa sähköistyksessä
- laastin tekemiseen ja laitteiden puhdistamiseen tarvittavan veden saanti ja pesuveden poisjohtaminen on järjestettävä
- robotin käyttämät lattiapinnat ovat niin valmiit ja sellaisessa kunnossa, että liikkuminen käy päinsä.

Prototyypin edelleenkehittäminen tuotteeksi edellyttää useiden osajärjestelmien ja piirteiden pitkäjänteistä jatkokehitystä. Keskeisimpiä välittömiä kehitystarpeita ovat

- vaunun ja robotin liikeradat suunnittelutiedoista muodostava ohjelmisto
- ulkoisen paikanmittausjärjestelmän liittäminen järjestelmään
- tarraimen ja laattakasetin parantaminen tarkkuuden vuoksi
- ohjausyksikön pienentäminen ja asentaminen vaunuun
- luotettavuuden ja käyttövarmuuden parantaminen.

### 6.3 Sisävalmistuksen robotisoinnin yleiset edellytykset

Kokeellinen työ ja kirjallisuustutkimus antavat viitteitä sisävalmistusrobotiikan edellytyksistä yleensä. Robotisointi edellyttää toisaalta robotitekniiikan, toisaalta rakennustekniikan kehittämistä.

Robottitekniikan osalta edellytykset jakautuvat yleisiin ja rakentamissovelluksiin liittyviin. Yleisen robotitekniiikan kehittymistä vaativat alueet ovat erityisesti

- voimanlähteiden tekniikka, lähinnä akkujen kapasiteetin nosto ja niiden painon alentaminen
- mittaus- ja navigointitekniikka, joka sallii huokean, tosiaikaisen kolmiulotteisen paikanmittauksen
- tietotekniikan tehon kasvattaminen, jotta ohjauslaitteet voidaan pakata tehokkaasti liikkuvaan järjestelmään
- joustavien ja nopeiden ohjelmointityökalujen ja käyttöliittymien kehittyminen.

Kuten kokeellinenkin työ osoitti, on raskasta kehittää alusta alkaen rakentamisrobotin kaikkia järjestelmiä ja piirteitä. Sekä laitteiden rakentamisen, käytön että huollon kannalta tarvitaan standardoituja liittymiä ja modulaarisia perusosia, kuten

- tiedonsiirto rakentamisrobotin ja hanke-tietokannan välillä
- ulkoiset paikanmittausjärjestelmät
- käyttöliittymät.

Myös rakennustekniikan osalta edellytykset jakautuvat yleisiin ja sovelluskohtaisiin. Yleisistä edellytyksistä tärkein on rakentamisen systematisoiminen. Automaation tehokas käyttöönotto edellyttää rakentamisen kehittämistä järjestelmälliseksi, suunnitelluksi ja säännöllistetyksi toiminnaksi. Tällainen selkeyttämisprosessi on sinänsä kannattava ja hyödyllinen ja saattaa jopa poistaa automaatiotarpeen. Selkeyttämiseen sisältyy mm.

- tuotteiden ja tuotantoprosessien yksinkertaistaminen
- virheiden eliminointi prosessista
- siisteyden ja järjestyksen parantaminen.

Toinen tärkeä yleinen edellytys liittyy organisoitapoihin ja kehittämiskulttuuriin. On löydettävä sellaiset organisoitavat, joiden puitteissa voidaan tarkastella rakentamisen kokonaisketjun kehittämistä ja tällöin myös robotiikkaa yhtenä vaihtoehtona tällöin.

Rakennusjärjestelmä, -materiaalit sekä rakennussuunnitelma ja tuotantoprosessi on mukautettava kulloisessakin tilanteessa automatisoinnin vaateisiin, kuten laatoituksen robotisoinnin yhteydessä havaittiin.

### 6.4 Sisävalmistusrobotiikan kehittäminen

Rakentamisrobotiikan kehittäminen on monitahoinen ja pitkäjänteinen tehtävä. Sen edistämiseksi tarvitaan aikatahtimeltaan eritasoisia kehityshankkeita. Rakentamisrobotiikan käyttöönotto voidaan puolestaan nähdä portaittaisen prosessina.

Rakentamisrobotiikan perustekniikoiden kehittäminen on verraten raskasta, ja sitä tulisikin edistää kansainvälisessä yhteistyössä. Ainakin seuraavat aiheet ovat lähivuosien painopisteitä:

- tiedonsiirtostandardien kehittäminen robotin ja hanketietokannan välille
- rakentamiseen soveltuvien mittaus- ja navigointijärjestelmien kehittäminen.

Edistyneiden rakentamisrobotiikan työmaasovellusten kehittäminen ja kokeilu on usein ainakin aluksi perustutkimusluontoista. Se soveltuu hyvin myös korkeakouluissa opinäytteiden muodossa tehtäväksi työksi. Toisaalta eri sisävalmistusvaiheiden esivalmistuksessa voidaan nopeastikin päästä kannattaviin automaatio-sovelluksiin.

Kuten edellä on todettu, on rakentamisprosessi

sin hallinnan parantaminen välttämätön edellytys automaation käyttöönotolle. Tähän liittyvät kysymykset ovat osaltaan hyvin käytännöllisiä, ja niitä voidaan yrityksissä heti edistää. Toisaalta tarvitaan selkeiden teoreettisten perusteiden muotoilua. Sisävalmistuksen eri komponenttien esivalmistuksen kehittäminen on luonnollisesti yksi tapa parantaa hallittavuutta ja helpottaa työmaa-asennuksen mekanisointia ja automatisointia. Rakentamisprosessin hallinnan parantaminen on runsaasti aikaa vaativa oppimisprosessi.

Rakentamisrobotiikan kehittämisen aikajänne on pitkä; nopeasti ei synny laajaan käyttöön yleistyviä laitteita. Rakentamisen kehittämiseksi lyhyellä aikavälillä onkin tarpeen aktivoida työmenetelmien ja yksinkertaisten työkalujen käytännönläheistä kehittämistä ja kehitystyön tulosten levitystä. Kohoava mekanisointiaste madaltaa osaltaan robotiikan kehittämis- ja soveltamiskynnystä jatkossa.

Rakentamisrobotiikka sinänsä on siis paljolti vielä tutkimusvaiheessa. Toisaalta se tarjoaa vision kehittyneestä rakentamisprosessista, jonka eräitä periaatteita voidaan alkaa toteuttaa käytännössä välittömästi. Joka tapauksessa tulee automaation ja robotiikan käyttöönotto olemaan keskeisimpiä rakentamista muovaavia tekijöitä kahden seuraavan vuosikymmenen aikana.

## **6.5 Miten rakentamisen eri osapuolet voivat edistää ja hyödyntää rakentamisrobotiikkaa?**

Rakentamisen eri osapuolten on siis harkittava toimintalinjoja rakentamisrobotiikan edistämiseksi ja hyödyntämiseksi. Seuraavassa hahmotellaan tiiviisti muutamien keskeisimpien osapuolten toimintamahdollisuuksia

### **\* Rakennusyrietykset**

- Tuotannonohjaus- ja laatu järjestelmien hioaminen tavoiteena muokata rakennustyöstä teolliseen tuotantoon verrattavissa oleva hallittu, häiriötön ja virheetön prosessi.

### **\* Materiaali- ja komponenttitoimittajat**

- Tuoteosatoimituksen kokonaisketjun, etenkin valmistuksen ja asennuksen mekatronisointi- ja robotisointimahdollisuuksien selvittäminen ja kehityshankkeiden käynnistäminen. Tuotteiden ja tuotantoprosessien mukauttaminen robotisoinnille sopivaksi. Erikoistuneiden asennusaliurakoitsijoiden verkoston luominen ja asennusrobottien kehittäminen yhteistyössä näiden ja konevalmistajien kanssa.

### **\* Rakennuskonevuokraajat**

- Rakentamisrobottien ja muiden kehittyneiden rakennuskoneiden suorituskyvyn seuranta ja niiden mukaanotto tuotevalikoimaan.

### **\* Rakennuskonevalmistajat**

- Nykyisten tuotteiden edelleenkehittäminen mekatronisoinnin avulla. Uudentyyppisten robotisoitujen koneiden tarvekartoitus ja tuotekehitys.

### **\* Tutkimuslaitokset**

- Robotiikan ja mekatroniikan osaamisen tarjoaminen yritysten rakentamisrobotiikka hankkeisiin. Rakentamisrobotiikan perustekniikoiden kokeilu ja edelleenkehittäminen. Rakentamisrobotiikan metodiikan kehittäminen. Osallistuminen kansainvälisiin rakentamisrobotiikan tutkimushankkeisiin ja ulkomaisen tutkimustiedon siirto Suomeen.

### **\* Opetus**

- Rakentamisen tietotekniikan ja rakentamisrobotiikan mukaanotto rakennustekniikan opetukseen. Tähän liittyvien opintolinjojen perustaminen ja kokeilulaitteistojen hankinta.

## KIRJALLISUUSLUETTELO

Andersson, Å. et al. 1983. Kartläggning av golvbranschens arbetsmiljö. Bygghälsans forskningsstiftelse. BHF 1983:4. 248 s.

Anon. 1990. Robots are muscling in on construction sites. The Japan Economic Journal, October 3, 1990. S. 19.

Asplund, E. 1991. MA och helhetssynen - en sammanfattning. Seminaari "JOT -tuotanto rakennusalalla" 20.3.1991, Helsinki. RIL K136 -1991. S. 49 - 58.

Böhm, D. 1991. The mason's elevator-handling-machine. 8th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Stuttgart 3 - 5 June 1991. Stuttgart. S. 819 - 832.

Drees, G., Laukemper, J., Pritschow, G. & Dalacker, M. 1991. Limits to profitability of automated masonry. 8th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Stuttgart 3 - 5 June 1991. Stuttgart. S. 833 - 842.

Engelberger, J.P. 1989. Robotics in service. Cambridge, The MIT Press. 248 s.

Fujita. 1991. Robots for Construction. Esite. Tokio. 24 s.

Glimskär, B. 1990. Robotstöd till arbetsmiljömässigt besvärliga byggarbeten. Tukholma. 179 s. Moniste.

Hyödynmaa, Marjo et al. 1986. Tapaturmatorjunnan tehostaminen rakennustoiminnassa työmaan omin keinoin. Helsinki. Työterveyslaitoksen tutkimuksia 4(1986)4, s. 378 - 396.

Järvenpää, E. 1980. Rakennustyökartoitusergonomia, Työolosuhteet 8. Helsinki. Työterveyslaitos. 158 s.

Kanerva, P., Enkovaara, E., Koponen, S. &

Hirsi, H. 1990. Rakentamisen teollinen tuotannonohjausjärjestelmä. Teknillinen korkeakoulu. Talonrakennustekniikan laboratorio. Julkaisu 17. Espoo. 77 s.

Koskela, L., Lehtinen, H., Lempinen, H., Pieskä, S., Salo, E., Wetlesen, Th., Kavli, T. & Sundh, H.-P.: Slutrapporten för initieringsprojektet "Byggrobotik". VTT, SI & NBI 1989. Espoo. 15 s.

Koskela, L. & Toivola, M. 1988. Työmaan materiaalinkäsittelyn kehittäminen. Rakentamisrobotiikan soveltuvuustutkimus, 4. robotisointiteema. Tutkimusseloste VTT/YRT 17.10.1988. 22 s. + liitt. 26 s.

Krom, R., de Vos, L. & Tolman, F. 1990. Standard components for construction robotics. The 7th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Bristol 5 - 7 June 1990. Proceedings. Bristol. S. 118 - 125.

Ledeczki, T., Lehtinen, H., & Banki, Z. 1990. Intelligent force-torque sensing functions enable easy interface to robots, 11th Int. Conf. on Assembly Automation, Detroit, Nov. 12 - 14th, 1990. Dearborn. SME. MS90 - 818, MS90 - 818 - 12.

Lehtinen, H. 1988. Muurausautomaation kehittäminen. Rakentamisrobotiikan soveltuvuustutkimus, 5. robotisointiteema. Muistio VTT/SÄH 13.10.1988. 27 s. + liitt. 19 s.

Lempinen, H. & Pieskä, S. 1988. Torninosturi-automaatio. Rakentamisrobotiikan soveltuvuustutkimus, 1. robotisointiteema. Muistio VTT/RTT ja VTT/ELE. 17 s + liitt. 17 s.

Matikainen, M. 1991. Sähköhydraulisen telaketjuvaunun ohjaus- ja paikantamisjärjestelmä. Espoo. Teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto. Diplomityö. Espoo. 80 s.

Ochi T. & Mio K. 1988. A positioning system

for mobile robots in construction applications ("Laser Positioner"), Proceedings, 5th Int. Symp. on Robotics in Constr., Tokyo June 6 - 8, 1988. Tokyo, s. 333 - 340.

Ohtubo, K. & al. 1988. The development and some applications of the head balanced manipulator for the construction industry. Proceedings, 5th Int. Symp. on Robotics in Constr., Tokyo June 6-8, 1988. Tokyo. S. 635 - 642.

Olofsson, B. & Ahlberg, B. 1989. Vilka byggriken är möjliga för genomsnittskvinnan? Bygghälsans Forskningsstiftelse. BHF 1989:4. 36 s.

Pieskä, S., Lindholm, M. & Koskela, L. 1990. Measurement requirements and advanced techniques for construction robotization. Espoo. Technical Research Centre of Finland, Research Notes 1090. 43 p. + app. 13 p.

Pieskä, S. & Lindholm, M. 1989. Mittaustarpeet ja -tekniikat rakentamisen robotisoinnissa. Oulu. VTT, elektroniikan laboratorio. Tutkimuslause. Oulu. 30 s.

Rosenfeld, Y. et al. 1990. Robotic performance of interior finishing works: development of full-size applications. The 7th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Bristol 5 - 7 June 1990. Bristol. Proceedings. S. 63 - 70.

RT14-10380. 1988. RYL 90. Rakennustöiden yleiset laatuvaatimukset 1990. Helsinki, Rakennustietosäätiö. 482 s.

RT-34-10340. 1987. Keraamiset laatat. Helsinki, Rakennustietosäätiö, RT-ohjetiedosto. 4 s.

RT34-10341. 1987. Keraamiset laatat, laatoitustyöt. Helsinki, Rakennustietosäätiö, RT-ohjetiedosto. 12 s.

RT160-R2. 1978. Keraamiset laattatyöt. Seinä- ja lattialaatoitus. Helsinki, Rakennustietosäätiö, Ratu-tuotantotiedosto. 3 s.

Sakamoto, S. & Kumano, T. 1991. Research and development of totally mechanized construction system for high-rise buildings. 8th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Stuttgart 3 - 5 June. 1991. Stuttgart. S. 197 - 208.

Salagnac, J.-L. et al. 1988. Soffito: a mobile robot for finishing in building. Proceedings, 5th Int. Symp. on Robotics in Constr., Tokyo June 6-8, 1988. Tokyo. S. 401 - 410.

Salagnac, J.-L., Vinot, B. & Pujol, D. 1990. Positioning with Ultra Sonic Sensors: Review of Techniques and Presentation of a New System. The 7th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Bristol 5 - 7 June 1990. Bristol. Proceedings. S. 253 - 260.

Salo, E. 1988. Joustava julkisivuelementtien valmistus- ja kokoonpanoautomaatio. Rakentamisrobotiikan soveltuvuustutkimus, 2. robotisointiteema. Muistio VTT/YRT 7.10.1988. 26 s.

Salo, E. 1988. Sisävalmistustyöt. Rakentamisrobotiikan soveltuvuustutkimus, 3. robotisointiteema. Muistio VTT/YRT 7.10.1988. 20 s. + liitt. 59 s.

Santala, Lasse et al. 1988. Hyvä järjestys kannattaa. Työkirja työyhteisöpalaveriin. Lohja Betonila Oy, Nummela. 33 s.

Sirkkola, E. 1990. Pölynimurirobotti Kanadasta. Tekniikan näköalat 3/1990, s. 38.

Skibniewski, M.J. 1988. Robotics in civil engineering. New York, Van Nostrand Reinhold. 233 s.

Suomen rakentamismääräyskokoelma. 1983. Helsinki. Sisäasiainministeriö, Rakenteiden määräykset ja kuormitukset, RT RakMK-20497. 4 s.

Takeda, S. et al. 1989. Bi-lateral manipulator for construction works. Sixth International

Symposium on Automation and Robotics in Construction. Proceedings. San Francisco, 6 - 8 June, 1989. San Francisco. S. 427 - 434.

Teraoku, H. 1990. Concept of fully automated building construction system. Proceedings of the First Symposium on Construction Robotics in Japan, Tokyo June 25 - 27, 1990. Tokyo. S. 79 - 84. (Japaninkielinen).

Talonrakennustoiminnan volyyymi-indeksi 1980 = 100. 1983. Helsinki, Tilastokeskus. Tutkimuksia nro 88. 79 s.

Ueno, T. et al. 1988. Research & development on robotic systems for assembly and finishing work. Proc. of the 5th ISRC, Tokyo June 6 - 8, 1988. Tokyo, Japan. JSCE, AIJ, RSJ & JIRA. S. 279 - 287.

de Vos & Schouten 1989. Sixth International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Proceedings. San Francisco, 6 - 8 June, 1989. San Francisco.

Warszawski, A. 1990. Industrialization and robotics in building. New York, Harper & Row. 466 s.

Åhman, P. & Johansson, J.-O. 1988. Robotar i byggbranschen - möjligheter och användningssområden. Göteborg. 130 s.

## Muuta rakentamisrobotiikka-projektin puitteissa tuotettua aineistoa

Annapalo, H. Annapalo: Technionin Building Research Stationin rakentamisrobotiikka-tutkimus. Matkakertomus. Espoo 4.9.1989. 13 s. + liitt.

Björk, H. Preliminär planering av en mobil platform för byggrobotar. Tekniska högskolan. Maskintekniska avdelningen. Diplomarbete. Esbo 1989. 80 s.

Elsilä, M., Koskela, L., Lempinen, H., Pieskä, S. & Salo, E. An Integrated Approach to the Development of Construction Site Crane Operations. Proc. of the 5th ISRC, Tokyo June 6-8, 1988. Tokyo, Japan. JSCE, AIJ, RSJ & JIRA. S. 643 - 652.

Koskela, L. The Current Status of Industrialized Construction and Construction Robotics in Finland. Proc. of the 5th ISRC, Tokyo June 6 -8, 1988. Tokyo, Japan. JSCE, AIJ, RSJ & JIRA. S. 31 - 34.

Koskela, L., Pieskä, S., Salo, E. & Enkovaara, E. Rakentamisrobotiikan 5. kansainvälinen symposium Tokiossa 6. - 8. kesäkuuta 1988. Matkakertomus. Espoo 1988, VTT/YRT. 42 s. + liitt. 9 s.

Koskela, L., Lempinen, H., Salo, E., Wetlesen, Th. The feasibility of construction robotics in Finland and Norway. Sixth International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Proceedings. San Francisco, 6 - 8 June, 1989. San Francisco. S. 80 - 86.

Koskela, Lauri: Rakentamisen robotiikka - ensimmäinen vuosikymmen. Rakennustekniikka 45(1989)6, s. 313 - 317.

Koskela, L. & Salo, E. Robotiikka kiiruhtaa hitaasti, mutta varmasti rakennusalalle. Teoksessa: M. Lohi (toim.). Kehityksen keihäänkärki. Rakentamisteknologiaa maailman huipulta. Helsinki 1989, SRTL, Rakennustuotanto. S. 40 - 57.

Koskela, L., Lehtinen, H. & Lindholm, M. Rakentamisrobotiikan 6. kansainvälinen symposium San Franciscossa 6. - 8.6.1989. Matkakertomus. Espoo 1989. 36 s. + liitt.

Lehtinen, H. Rakentamisrobotiikkaan liittyvä vierailu Technion Building Research Stationissa, Israel 31.10. - 5.11.1988. Espoo. Matkakertomus. VTT/SÄH. 5 s. + liitt. 2 s.

Lehtinen, H., Salo, E. & Aalto, H. Outlines of two masonry robot systems. Sixth International



Symposium on Automation and Robotics in Construction. Proceedings. San Francisco, 6 - 8 June, 1989. San Francisco. S. 143 - 150.

Lempinen, H. & Pieskä, S. On-site measurement needs and techniques for construction robotization. Paper presented at the International Symposium on the Automation of Construction Processes and Construction Machines. Magdeburg. May 22 - 25, 1989.

Pieskä, S. & Salo, E. Rakentamisrobottien perustekniikat. Valokynä 4/88. S. 2 - 10.

Pieskä, S. & Lindholm, M. Mittaustarpeet ja -tekniikat rakentamisen robotisoinnissa. Tutkimuslause. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, elektroniikan laboratorio. Oulu 1989. 30 s.

Salo, E. & Koskela, L. Tiivistelmät Tokiossa 6. - 8. kesäkuuta 1988 pidetyn rakentamisrobotiikan 5. kansainvälisen symposiumin esitelmistä. Espoo 1988, VTT/YRT. 103 s.

Salo, E. Maalausrobotit. Maalarimestarilehti 9 - 10/1988, s. 6 - 10.

Salo, E. Rakentamisrobotiikan kehittäminen perustuu prototyyppeihin. Valokynä 1/1988. S. 2 - 10.

Salo, E. & Koskela, L. Rakentamisrobotiikka. Nykytila ja kehitysnäkymät. Espoo 1987. VTT:n Tiedotteita n:o 746. 108 s. + liitt. 2 s.

Vähä, P., Elsilä, M. & Pieskä, S. Construction Crane Automation. Information Technology in Construction - First French-Finnish Seminar. Valbonne, Sophia Antipolis, October 4-5, 1988. 9 s.

# TYÖMAAN MATERIAALINKÄSITTELYN KEHITTÄMINEN AUTOMAATION AVULLA TAPAUSTUTKIMUKSEN VALOSSA<sup>1</sup>

## 1 Selvityksen tavoitteet ja rajaukset

Selvityksen tavoitteena oli empiirisesti kehittää näkemys tyypillisen teollisuusliikerakennuksen nykytilan mukaisesta materiaalinkäsittelyn kustannustasosta kokonaisuutena ja materiaalerittäin sekä havainnollistaa automaattisen siirtojärjestelmän soveltamista kohteessa sekä arvioida sen kannattavuutta.

## 2 Kohdekuvaus

Tarkasteltavana kohteena oli seitsemänkerroksinen teollisuusliikerakennus. Sen tilavuus on noin 56 000 m<sup>3</sup>. Talon tiloista on noin kolmasosa konttoritiloja ja sen ylimmässä kerroksessa sijaitsevat ravintolasali, keittiö sekä saunatilat. Pääosa talosta on siten teollisuuskäytössä. Rakennus on teräsrunkoinen, mistä syystä rakennusaika on lyhyt ja runkotyövaiheen kustannukset suhteellisen korkeat muihin rakentamisvaiheisiin verrattuina. Kohteessa on siirtoja huomattavasti helpottava lasiseinä, jonka kautta - ennen seinän asennusta - voidaan siirtää valtaosa sisävalmistusvaiheen materiaaleista.

## 3 Siirtojen järjestäminen: nykytila

Sisävalmistustyöt alkavat kohteessa kesälomien jälkeen syyskuussa, joten pääsisäänkäynnin pyöreä lasijulkisivu voidaan pitää lämpimän vuodenajan takia avonaisena kahden ensimmäisen kuukauden ajan eli noin lokakuun loppuun. Tarkoituksena on nostaa kaikki mahdollinen sisävalmistuksen materiaali tämän aukon kautta ajoneuvonosturin avulla, joka tilataan määrätyiksi päiviksi työmaalle. Tätä varten joudutaan rakentamaan yksi raskas kerroksesta toiseen siirrettävä vastaanottolava sekä mahdollisesti kevyempiä lavoja eri kerroksiin.

Sikäli kun nostoja ei voida suorittaa autonosturilla, eli varsinkin lokakuun alusta, siirtoihin käytetään työmaahissiä (2 kpl). Ensimmäinen työmaahissi saapuu työmaalle jo runkotöiden aikana (huhtikuun lopulla), toinen tarpeen mukaan esimerkiksi elokuun alussa.

Työmaahissin lastauksessa on apuna haarukoin varustettu traktori koko rakentamisen ajan. Siirrot työmaahissistä kerrokseen ja kerroksessa tehdään pumppukärryllä tai pienellä työntökärryllä. Siirtokalusto on siten seuraava:

- autonosturi (vuokrattu tietyiksi päiviksi)

---

<sup>1</sup> Laatijat: Sakari Pulakka, Markku Toivola ja Lauri Koskela.

- traktori
- hissit 2 kpl
- dumpperi
- työntökärryt
- pumppukärryt (useita).

#### 4 Siirtokustannusten arviointimenettely

Kustannusarvioinnin tavoitteena oli tehdä kokonaisvaltainen laskelma yhden kohteen sisävalmistusvaiheen materiaalinkäsittelykustannuksista. Tämäntyyppisiä laskelmia ei rakennusyryyksissä juurikaan ole tehty, koska materiaalinkäsittely sisällytetään tavallisesti kunkin tehtävän kokonaistyömenekkiin eikä se ole ajallisesti tahdistavaa. Samoin on esimerkiksi Ratu-tiedostoissa materiaalinkäsittely esitetty useiden nimikkeiden kohdalla työnosana "vastaanotto ja siirrot", joka ei kuitenkaan sisällä ns. lyhyitä siirtoja (esimerkiksi asennettavan välioven kolmen-neljän metrin pituinen siirto nipusta asennusaukkoon) ja josta ei myöskään kyetä johtamaan esimerkiksi työmaalueen vaakasiirtojen, pystysiirtojen eikä kerroksissa tapahtuvien vaakasiirtojen - jotka toteutetaan toisistaan poikkeavalla siirtotekniikalla - osuutta.

Tästä syystä määritettiin ja eriteltiin aluksi materiaalinkäsittelyn työprosessi sillä tarkkuudella, että tuloksia voitiin hyödyntää erityisesti materiaalinkäsittelyn kehittämismahdollisuuksia ja automaattisen siirtojärjestelmän soveltuvuutta arvioitaessa sekä materiaalinhallinnon suunnittelua ja seuranta suunniteltaessa.

Panostarve ja kustannukset (kustannustasossa 1/89) arvioitiin lähtien liikkeelle kohteessa käsiteltävistä materiaali-eristä ja valitusta siirtotekniikasta. Tällöin valittiin tarkan analyysin pohjaksi kolmannen kerroksen materiaalinkäsittely. Jokaisen materiaali-erän ja työnosan osalta arvioitiin työmaajohdon kokemukseen tukeutuen kunkin toimituserän (esimerkiksi kuormalava) sekä käsittely-yksikön (esimerkiksi tiililetka) vaatima tehollinen käsittelyaika (esimerkiksi vaakasiirrot kerroksissa 10 min/letka), joka kerrottiin käsittely-yksiköiden lukumäärällä kokonaisajan arvioimiseksi.

Työn yksikköhintoina käytettiin kohdetyömaan tavoitearvion mukaisia arvoja, jotka edustavat käypää keskimääräistä tasoa ja soveltuvat parhaalla mahdollisella tavalla yrityskohtaiseen työmenekkitasoon.

Kaluston käytöstä aiheutuvat kulut arvioitiin seuraavasti:

- määritettiin ajoneuvonosturin tarve vuorokausina sekä henkilötavarahissien tarve työmaalla yhteensä kuukausina
- määritettiin edellä mainitun kaluston hankintahinta
- kaluston pääomakustannukset vuotta kohti laskettiin kaavalla (Rakentajain kalenteri 1988 s. 491) :

$$A = H/t + P(t+1)H/200t \text{ (mk/v), jossa}$$

$$A = \text{kustannus mk/v (kiinteät kustannukset)}$$

H = uushankintahinta

t = käyttöaika vuosina

P = korkokanta (kalustolle asetetaan yleisesti 14 %:n tuottovaatimus)

- lopuksi kohdistettiin vuotta kohti arvioidut pääomakustannukset kaluston todelliselle käyttöajalle kohteessa.

Toteutettu materiaalinkäsittelyanalyysi kuvaa sekä materiaalinkäsittelyn jakautumista työnosittain että eri materiaalierien merkitystä materiaalinkäsittelykustannuksista. Tarkastelu ei kuitenkaan sisällä välillisiä kuluja, joiden osuus ja merkitys on mahdollista selvittää luotettavasti vain kohdekohtaisen seurannan avulla.

Välillisiä kuluja aiheuttavat esimerkiksi

- toimitusten ajallinen viivästyminen
- toimitetun materiaalin laatuerot ja -virheet (esimerkiksi listat ja lattialaatat)
- materiaalin vaurioituminen huomattavissa määrin (esimerkiksi tasoitesäkit, väliseinälevyjien nurkat jne.)
- välivarastointipaikan vaihtaminen (esimerkiksi kalusteiden sijoittelu lähelle asennuspaikkaa)
- materiaalia turmeleva tai vääränkokoisia materiaaleja niputtava (esimerkiksi eri kerrosten ikkunoita) pakkaustekniikka
- materiaalin välivarastointi siten, ettei sitä löydetä.

## 5 Arvioidut siirtokustannukset

Kolmannen kerroksen rakennusteknisten töiden sisävalmistusvaiheen materiaalinkäsittelyn palkkakustannuksiksi arvioitiin 57 000 mk. Tästä on tiilien ja laastin siirtojen osuus lähes kolmasosa, levyväliseinien ja lattialaattojen käsittelyn osuudet lähes 15 % sekä listojen, tasoitteiden ja kalusteiden käsittelyn osuudet 5...10 %. Muiden materiaalierien käsittelyn osuudet ovat pieniä. Materiaalinkäsittelyn kustannusosuus työkustannuksista materiaalierittäin on 30...60% lattialaatoituksessa, listoituksessa sekä kalusteasennuksessa. Alakattotyössä, ikkunoiden ja sisäovien asennuksessa, sisämaalauksessa sekä tasoitetoissa materiaalinkäsittelyn kustannusosuus on alle 15 % työpanoksesta.

Vaakasiirrot kerroksissa, välivarastointi sekä ns. lyhyet siirrot työkohteen tuntumassa muodostavat valtaosan materiaalinkäsittelyn kustannuksista. Silti niiden kustannusosuus ei ole kovin suuri. Yhteensä materiaalinkäsittely muodostaa hieman yli viidenneksen kolmannen kerroksen sisävalmistusvaiheen kokonaistyökustannuksista, mutta vain noin 3...4 % sisävalmistusvaiheen kokonaiskustannuksista. Edellä esitettyjen osuuksien suuruutta tukee rakennuskustannusindeksin painorakenne, jossa työkustannusten osuus (palkat ja sosiaalikulut) on noin 15 % sisävalmistusvaiheen kokonaiskustannuksista mikä vastaa noin 4 %:n materiaalinkäsittelyn osuutta (työkustannuksista noin neljännes aiheutuu materiaalinkäsittelystä).

Koneteknisten töiden siirrot ja niiden kustannukset määritettiin koko kohteen tasolla osaurakoiden projektipäälliköitä haastatteleamalla. Materiaalinkäsittelyn osuus kokonaistyöpanoksesta arvioitiin eri töissä seuraavaksi:

- ilmanvaihtotyöt 15 %
- sähkötyöt 10 %
- lämpö- ja vesityöt 10 %.

Koko kohteen sisävalmistusvaiheen rakennusteknisten töiden osuus on johdettu kolmannen kerroksen materiaalinkäsittelytarpeesta kokonaismäärien avulla. Konetekniset LVIS-urakoiden siirtotyöt on arvioitu edellä esitetyllä tavalla. Kalustokulut on arvioitu laskien koko kohteen tasolla yhteen ajoneuvonosturin tarve sekä käyttämällä hissien osalta sitä aikaa, jolloin ne ovat sisävalmistusvaiheen aikana käytössä. Tällöin on hissien käyttöaste vain 5...10% materiaalinkäsittelyyn ja niiden tärkein tehtävä onkin henkilöiden kuljetus.

Materiaalinkäsittelyn kokonaiskustannuksiksi muodostuu **850 000 mk**, joka kuluu noin kahdeksan kuukauden aikana. Jos vastaavankokoinen kohde olisi liikerakennus, sen materiaalinkäsittelykustannukset olisivat todennäköisesti luokkaa 1,5 mmk.

Vaikka kokonaiskustannukset ovat miljoonaluokkaa, niiden osuus rakennuskustannuksista on vain noin 1 %. Kokonaiskustannukset jakaantuvat seuraavasti:

- välivarastointi	6 000 mk
- otto	10 000 mk
- vaakasiirrot työmaalla	63 000 mk
- pystysirrot	60 000 mk
- vaakasiirrot kerroksissa	255 000 mk
- välivarastointi kerroksissa	26 000 mk
- lyhyet siirrot	215 000 mk
- pakkausten purku	20 000 mk
- hissien pystytys ja purku	14 000 mk
- ajoneuvonosturi	26 000 mk
- henkilö-tavarahissit	90 000 mk
- muu siirtokalusto	20 000 mk

Vaakasiirtojen markkamääräinen osuus on noin 2/3 kaikista siirroista ja ns. lyhyiden siirtojen osuus on suhteellisen iso. Materiaalinkäsittely vaakatasossa on tänä päivänä hyvin käsivaltaista ja tavanomaisia kärryjä apuvälineinä käyttävää toimintaa, jonka kehittämisvaihtoehtoja tarkasteltaessa on otettava huomioon myös ergonomia yms. inhimilliset näkökohdat. Erityisesti lyhyiden siirtojen helpottamiseksi olisi lähdettävä liikkeelle pienistä menetelmä- ja apuvälineparannuksista, jotka ehkäisevät selän rasitusta. Mekaanisen siirtokaluston (autonosturi, hissit, dumpperit) kustannukset ovat suhteellisen pienet ja niiden käyttöaste jää alhaiseksi.

Materiaalihallinnon laiminlyönti aiheuttaa lisäkustannuksia sekä materiaalinkäsittelyyn ja materiaalien hukkamenekkeihin että myös tahdistavien töiden työnkulkuun niiltä osin kuin materiaalitoimitusten viivästyminen johtaa tahdistavan työn aloitusajankohdan siirtymiseen tai sen keston kasvuun.

Laskelmien tekeminen osoitti, että materiaalinkäsittelyn kustannukset ovat suhteellisen pitkälle kohdekohtaisia ja että niiden vaihteluväli lienee laaja. Materiaa-

linkäsittelyn hallinnan parantaminen ja materiaalihukkien vähennystavoitteet edellyttävät tehostettua, päämateriaalien käyttöön kohdistettua seurantaa ja kohdekohtaisesti hyvin hoidettua siirtosuunnittelua.

Siirtosuunnittelun ja tarkasti ajoitettujen materiaalien toimitusajankohtien avulla on mahdollista vaikuttaa ensisijaisesti tahdistavien töiden kulkuun ja sitä pienemmällä painolla materiaalinkäsittelykustannuksiin.

## **6 Materiaalinkäsittelyn automaatio koekohteessa**

Rakentamisrobotiikan soveltuvuustutkimuksessa pyrittiin japanilaisten ideoiden pohjalta määrittelemään Suomen olosuhteisiin soveltuva keveämpi automaattinen materiaalinkäsittelyjärjestelmä (Koskela & Toivola 1988). Keskeisenä ideana on se, että kuorman siirtyminen purkauspaikalta kerrokseen (ja, mikäli mahdollista, työkohteeseen) tapahtuisi automaattisesti, lähes ihmiskäden koskematta. Tällöin järjestelmän toimintaperiaatteena olisi ensisijaisesti se, että JOT-periaatteiden mukainen autokuorma siirtyisi em. järjestelmän avulla automaattisesti purkauspaikalta määräkerrokseen.

Toiminnallisiksi tavoitteiksi järjestelmälle asetetaan seuraavat:

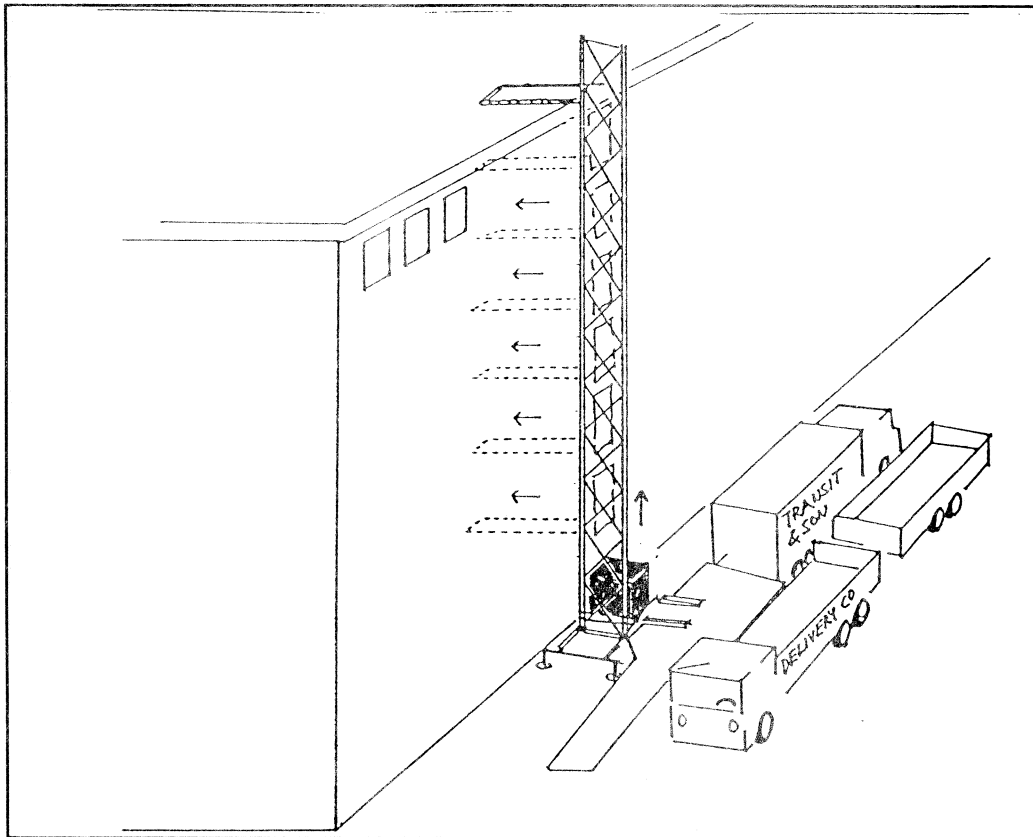
- nopeasti pystytettävä ja purettava
- soveltuu yleisimpien kuormatyyppien kuljetukseen
- helppokäyttöisyys, toimintavarmuus, ohitettavuus tarpeen vaatiessa
- vähentää oleellisesti työvoimatarvetta ja raskaita työvaiheita
- ulottuu (lähes) kaikkiin työpisteisiin
- soveltuu keskisuurille ja suurille kerrostalotyömaille.
- osajärjestelmät käytettävissä myös itsenäisesti.

Kohdetyömaan olosuhteissa on katsottu tarkoituksenmukaiseksi tarkastella vaihtoehtoa, jossa pystysiirto kerrokseen ja vaakasiirto kerroksessa on automatisoitu. Kaavailtu automaattinen siirtojärjestelmä (kuva 1) koostuu seuraavista osista:

- 1) purku ajoneuvosta lastaussillalle
- 2) pystysiirto oikeaan kerrokseen
- 3) vaakasiirto kerroksessa.

Automatisointi on ilmeisen järkevää aloittaa välillä tavarantoimitus - siirto kerrokseen, koska volyymit ovat suuria ja siirtoradat pysyviä; siirrot kerroksissa hajautuvat paikan ja ajan suhteen. Lähestymistapana olisi tällöin automatisoida pystysiirto, siten että usea kolli (= kuormalava) materiaalia kulkeutuu odotusasemista oikeaan kerroksen puskuriasemaan. Siirto odotusasemaan kuormasta, pystysiirtimen (= hissien) ohjelmointi sekä puskuriasemasta purkaminen tapahtuisivat manuaalisesti.

Esimerkkikohteen kerrosten selkeyden ansiosta on hyvin ajateltavissa, että vaakasiirrot hoidetaan vihivaunuilla.



*Kuva 1. Hahmotelma automaattisesta siirtojärjestelmästä.*

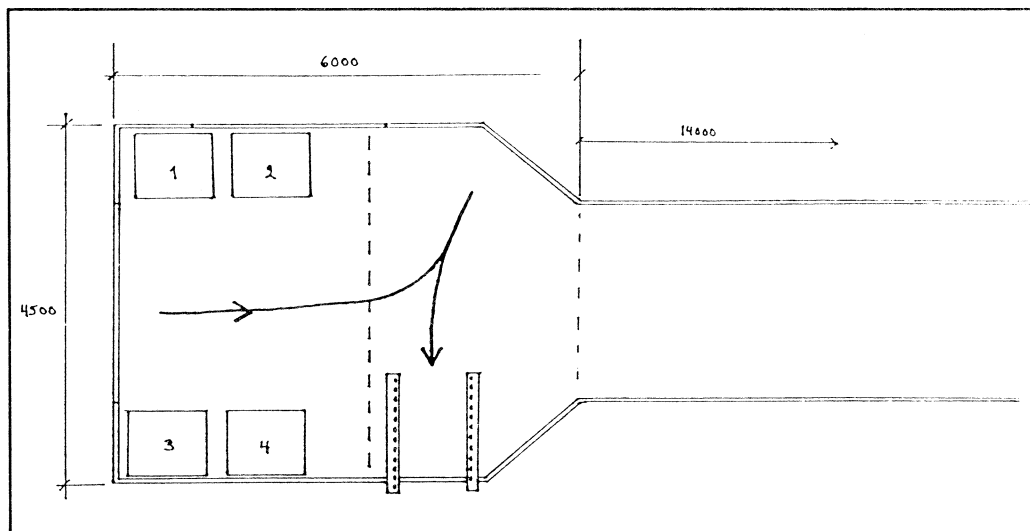
### **Lastin purku**

Lastin purkua voidaan yksinkertaisinkin toimenpitein kehittää. Markkinoilla on erityisiä siirrettäviä kuormaussiltoja. Niiden soveltuvuutta voitaisiin edelleen kehittää varustamalla ne nostolaitteella ja katoksella. Kuvassa 2 on esitetty ratkaisu, jossa tällaista kuormausrampia käytetään puoliautomaattisen rakennushissin yhteydessä. Työntekijä purkaa pumppukärryn (tai sen motorisoidun version) avulla kuorman suoraan rakennushissin odotusasemaan tai osittain välivarastoon kuormausrampille.

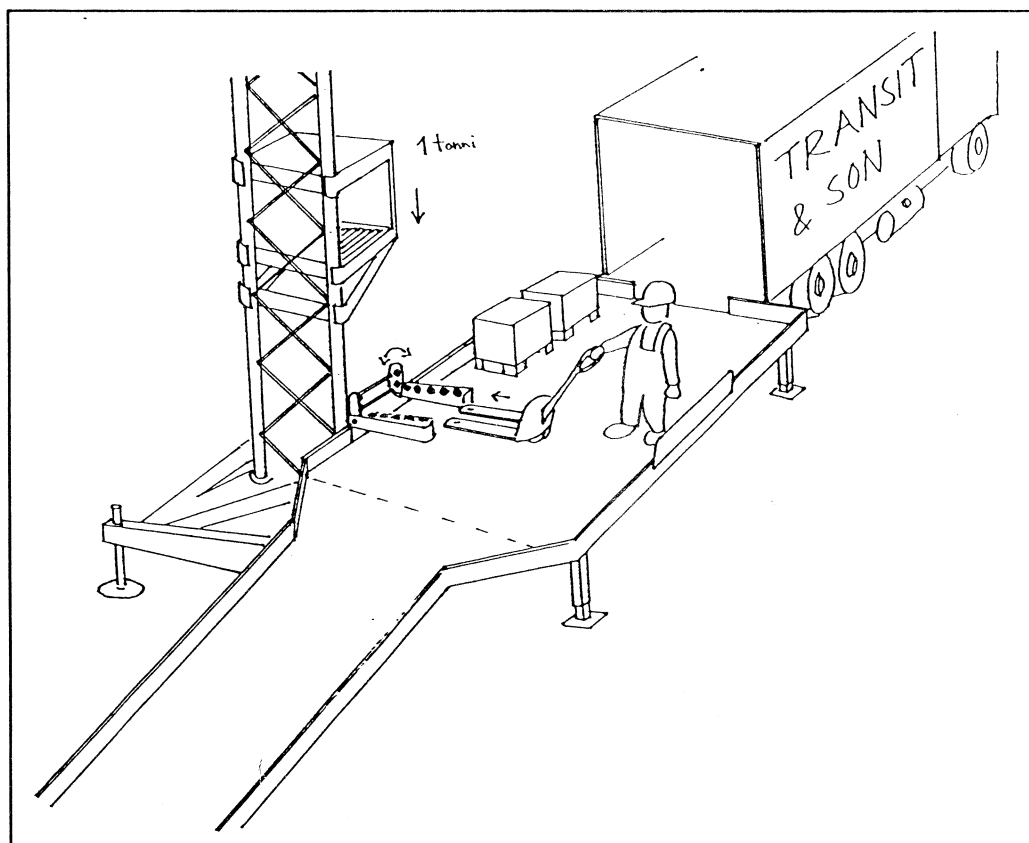
Lastin purkuun ajoneuvosta lastaussillalle ei ole ollut käytettävissä sellaisia tekniikoita tai kehittämissideoita, että manuaalinen ratkaisu voitaisiin ajatella korvattavaksi mekanisoidulla ratkaisulla. Pitemmällä aikavälillä lienee tavoitteeksi kuitenkin otettava mekanisoitu tai automatisoitu purku ajoneuvosta kuormausrampille. Kyseinen tehtävä esiintyy myös teollisuuden, tukkukaupan ja vähittäiskaupan piirissä, joten näillä aloilla kehitettävät mekanisointiratkaisut lienevät sovellettavissa myös tulevaisuuden rakentamisessa.

### **Pystysierrojen automatisointi**

Pystysierrojen automatisointiratkaisu perustuu pelkästään materiaalinkuljetukseen



*Kuva 2. Kaavakuva lastaussillasta, johon on liitetty lyhyt rullarata.*



*Kuva 3. Kuormalava siirretään pumppukärryllä odotusasemaan, josta hissi poimii sen saavuttuaan.*

tarkoitettuun nopeaan hissiin, joka on varustettu yksinkertaisilla mekanismeilla tavaran siirtämiseksi hissiin ja hissistä kerrokseen. Kuvassa 3 esitetään materiaalin siirto hissiin. Järjestelmässä on yhden kuormalavan odotusasema, josta siirtolava



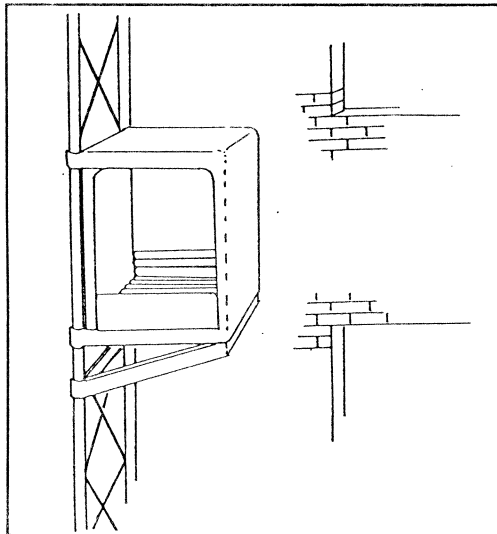
mekaanisesti tai painovoimaisesti siirtyy hissiin. Hissin ohjauslaitetta, josta määräkerros kullekin lavalle valitaan, ei ole piirretty näkyviin. Kuvassa 4 esitetään hissikorin yksityiskohta; sen lattia koostuu rullaradasta. Kuvasta 5 ilmenee yksinkertainen, painovoimaan perustuva ratkaisu taakan siirtämiseksi hissiin ja siitä kerrokseen. Kerroksessa on muutaman siirtolavan mittainen rullarata, josta siirtolavat haetaan pumppukärjellä tai vihivaunulla (kuva 6). Kuormauslavalta tulee olla puhelinyhteys kerrokseen, jotta voidaan tahdistaa taakkojen edelleenkuljetus kerroksen rullaradalta.

Kuvatun järjestelmän keskeisenä etuna on työajan säästö: työntekijän ei tarvitse seurata taakkaa hississä kerrokseen ja siirtää sitä pois hissistä. Myös hissien nopeuden kasvattaminen vaikuttaa työajan säästöön.

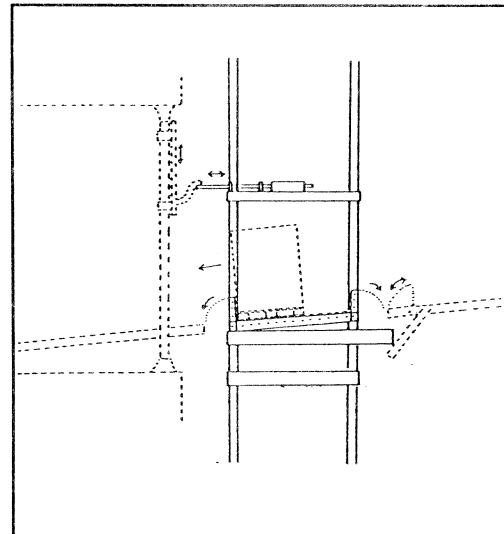
### Vaakasiirtojen automatisointi

Vaakasiirtojen automatisointi edellyttää seuraavia toimenpiteitä:

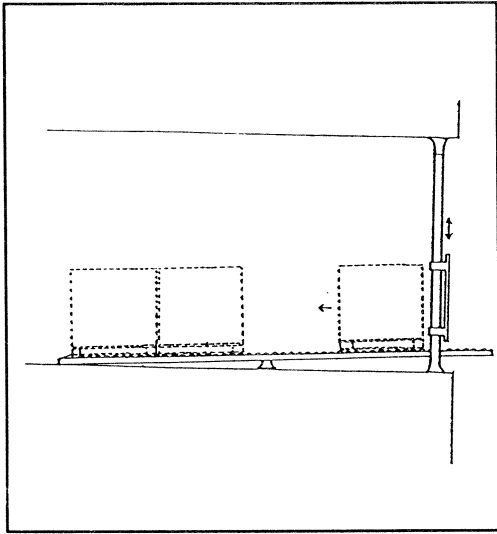
- vihivaunut, jotka ottavat kuormalavan kolleineen haarukkaansa (kuten pumppukärri) ja kuljettavat sen haluttuun paikkaan (kuva 7)
- reitit merkitään joko magneettisella nauhalla suoraan pintabetoniin tai käytetään lasermajakoita
- varataan tyhjänä pidettävät alueet tavaroiden laskemista varten
- vihivaunussa ultraäänitutka esteiden havaitsemiseksi
- vaihtoehtoisia reittejä samaan kohteeseen
- vihivaunu lukee tulevasta kollista viivakoodilla ilmaistun tunnisteiden, ja hakee hanketietokannasta oikean sijoituskohteen.



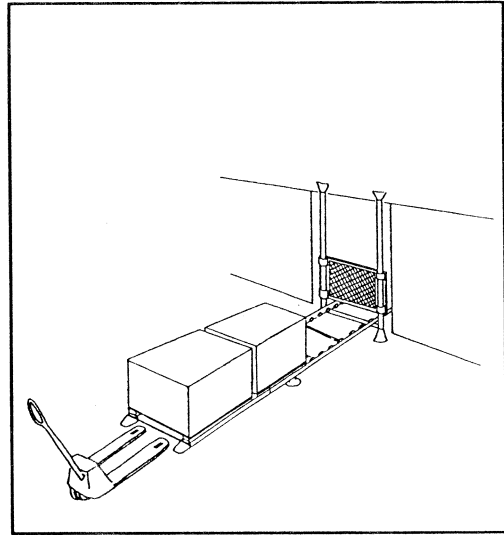
*Kuva 4. Tavarahissi.*



*Kuva 5. Kaavakuva hissistä sen saapuessa kerrokseen (vasen puoli) ja lastaussillalle (oikea puoli).*



*Kuva 6. Kerrokseen tuleva rullarata, jolla kuormalavat liukuvat painovoimaisesti pysäyttimeen saakka.*



*Kuva 7. Kerroksessa oleva rullarata puretaan pumppukärryllä tai viivaunulla.*

### **Materiaalit automaattisen siirtojärjestelmän kannalta**

Automatisointia varten siirrettävien tavaroiden tulisi olla mahdollisimman yhtenäisessä muodossa. Siirrettäväksi yksiköksi on valittu EURO-kuormalava (1000 mm x 800 mm, korkeus 1000 mm, maksimipaino 1000 kg). Tässä tapauksessa kuormalavan pituudelle ei ole asetettu tiukkoja rajoituksia, niin että mahdollisesti jopa sisäovet voitaisiin kuljettaa lavalla.

Tässä kohteessa esiintyvien sisävalmistustöiden materiaalien pakkaukset:

#### Kuormalavalla jo nyt:

- ikkunat
- palonsuoja-aine
- tasoitteet
- lattialaatat
- muovilistat
- osa kalusteista ja varusteista
- osa sähköteknisten töiden tarvikkeista
- osa lvi-laitteista
- palautettavat kuormalavat.

#### Kuormalavalle mahdollisesti pakattavat:

- tiilet
- roskat.

Erityistä tekniikkaa käyttäen kuormalavalla automaattisesti kuljetettaviksi soveltuvat:

- valmis muurauslaasti
- ovet
- osa kalusteista ja varusteista
- osa työvälineistä.

Muut, jotka eivät sovellu kuormalavalla kuljetettaviksi:

- pintabetoni
- levyväliseinät
- puulistat
- osa sähköteknisistä töistä
- osa lvi-laitteista
- osa työvälineistä.

Kuormalavalla jo olevat tai sille helposti pakattavat materiaalit edustavat suurta osaa sisävalmistusvaiheen siirtovolyymista. Ne materiaalit, jotka eivät sovellu kaavaillulla järjestelmällä kuljetettavaksi, siirretään joko nosturilla tai tavanomaisella rakennushissillä, jollainen joka tapauksessa tarvitaan henkilökuljetusten takia.

## **7 Automaattisen materiaalinkäsittelyn kustannukset ja hyödyt**

Edellä kuvatun automaattisen siirtojärjestelmän kustannusten ja hyötyjen arviointi ei voi olla kovin tarkkaa, koska itse järjestelmää ei ole olemassa ja sen suunnittelukin on vielä alkuvaiheessa.

Arvioimalla järjestelmällä aikaansaataavan työpanoksen väheneminen voidaan karkeasti hahmottaa paljonko automaattinen järjestelmä saa maksaa ollakseen vielä taloudellinen.

Työpanos automaatiota hyödynnettäessä on arvioitu seuraavin oletuksin:

- välivarastointiin liittyvä valmistelutyö ei vähene
- ottoaika vähenee 50 %
- vaakasiirtotyö työmaalla pienenee 60 %
- pystysiirtotyö vähenee 70 % (materiaali siirtyy ilman ihmistä hississä)
- vaakasiirtotyö kerroksissa pienenee 85 %
- välivarastointityö kerroksissa ei muutu
- lyhyiden siirtojen työpanos ei muutu
- jätteen käsittelytyö vähenee 50 % (edellyttää jätteen käsittelyjärjestelmää).

Edellä esitetyin lähtökohdin pystysiirtoon liittyvä työpanoksen väheneminen on noin 40 000 mk sekä vaakasiirroissa noin 260 000 mk. Pystysiirtoon tarkoitettujen automaattihissien (2 kpl) hankintahinnan kannattavuusrajaksi voidaan asettaa 630 000 mk (14 %:n tuottovaatimuksella muodostuen työkustannussäästövaikutuksen ja nykyisten rakennushissien hankintahintojen summasta). Vaakasiirtojärjestelmän hankintahinnan kannattavuusrajaksi voidaan asettaa 1,3 mmk.

Laitteiden hankintakustannukset ja käyttöiät on arvioitu seuraaviksi:

Lastaustaso (7 ton):	140 000 mk	(10 vuotta)
Puoliaut. tavarahissit:	300 000 mk/kpl	( 6 vuotta)
Vihivaunut (2 kpl):	150 000 mk/kpl	( 8 vuotta)

Lastaustason osalta on kyseessä markkinoilla olevan tuotteen hinta. Tavarahissin osalta on lähtökohdaksi otettu markkinoilla olevien henkilötavarahissien hinta. Vihivaunujen osalta perustana on teollisuuteen tarkoitettujen vihivaunujen hinta. Tavarahissin ja vihivaunujen osalta oletetaan, että rakentamiseen tarkoitettujen erikoissovellukset ovat sarjatuotannossa.

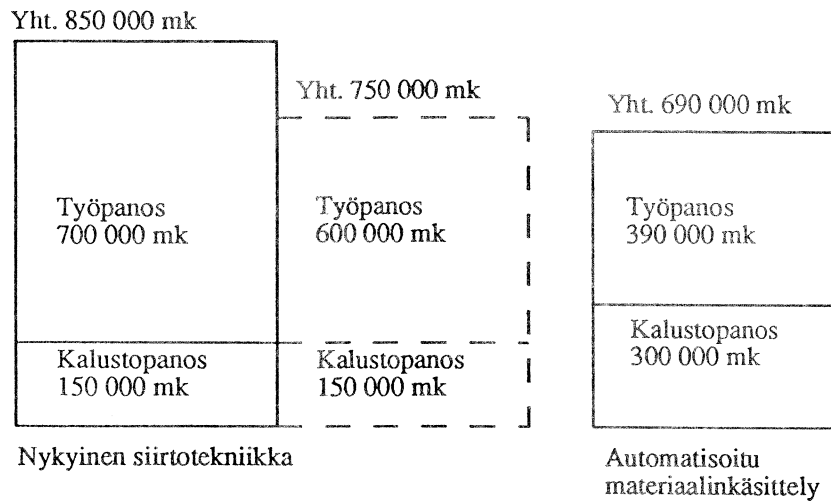
Lisäksi automaatioon liittyy ohjaus- ja tiedonsiirtojärjestelmä, jonka kohdekohtaiseksi kuluksi on arvioitu 30 000 mk. Automaation pystytyksen ja purkutyön tarvekuluineen (rullarata, liitokset yms.) arvioidaan olevan 50 000 mk.

Esitetyin laskentaperustein kohteen sisävalmistusvaiheen materiaalinkäsittelyn kokonaiskustannuksiksi muodostuu 690 000 mk. Vähennystä nykymuotoiseen materiaalinkäsittelyratkaisuun on 160 000 mk (noin 20 %). Vuositasolle muunnettuna kokonaiskustannukset vähenevät noin 200 000 mk. Tällöin on automaattisen siirtojärjestelmän kalustokustannusten kannattavuusraja vuositasolla 560 000 mk sekä järjestelmän enimmäishankintahinta 14 %:n tuottovaatimuksella ja 8 vuoden keskimääräisellä käyttöajalla noin 2,7 mmk.

Automaattisen siirtojärjestelmän kertahankintahinnaksi muodostuu noin 1,4 mmk, mikä lisättyinä purku- ja pystytystyön käytönaikaisilla kokonaiskustannuksilla (noin 0,1 mmk) alittaa selvästi kannattavuusrajan 2,7 mmk. Samoin sekä vaakasiirojen että pystysiirojen automatisointipyrkimykset näyttävät erikseen tarkasteltunakin taloudellisesti perustellulta.

Keskeisenä ongelmana automaation käyttöönotettavuuden ja kannattavuuden tarkan arvioinnin kannalta on se, että kuvatus automaattisen siirtojärjestelmän häiriötön toiminta edellyttää sellaisia toimintatapamuutoksia, jotka jo sinänsä alentavat materiaalinkäsittelykustannuksia. Suunnitelmallisuus, yksiköidyt, ajallisesti tarkasti tapahtuvat toimitukset, siisteyden ja järjestyksen ylläpito ovat välttämättömiä sujuvalle materiaalinkäsittelyn automaatiolle. Nykyiseenkin toimintatapaan sovellettuina ne ilmeisesti vähentäisivät materiaalinkäsittelykustannuksia ainakin 10 - 20 % (mm. ruotsalaiset kokemukset viittaavat tähän (Asplund 1991)). Lisäksi kannattavuusarvio on voimakkaasti riippuvainen kohdekohtaisesti vaihtelevasta materiaalinkäsittelyn tarpeesta ja välillisten kustannusten (esimerkiksi hukat) eroista sekä siitä, mille hintatasolle edellä mainitut automaation osajärjestelmät todellisuudessa asettuvat.

Toisaalta näitä toimintatapamuutoksia on vaikea saada toteutetuksi nopeasti. Johtopäätöksenä on siis se, että materiaalinkäsittelyn automaation olennaisena edellytyksenä on materiaalinkäsittelyprosessin hallintaan tähtäävät toimintatapamuutokset; vasta näiden toteuttamisen jälkeen voidaan tarkasti arvioida automatisoiduilla ratkaisuilla saavutettavat hyödyt, jotka karkeasti tarkastellen näyttävät lisäkustannuksia isommilta.



*Kuva 8. Kohteen materiaalinkäsittelykustannusten vertailu nykytilan mukaisesti ja automatisoituna. Katkoviivoin on esitetty vastaavat spekuloidut vertailukustannukset kehittyneiden toimintatapojen mukaisessa tilanteessa nykyistä kalustoa käytettäessä.*

## 8 Arvio ja johtopäätökset

Keskeinen johtopäätös on siis se, että materiaalinkäsittelyn automaatio edellyttää sellaisten toimintatapamuutosten käynnistämistä, joiden avulla materiaalinkäsittelyprosessi saadaan tarkaksi ja hallituksi.

Toisaalta materiaalinkäsittelyn empiirinen selvittäminen on tärkeitä. Tarkennettujen kirjausten ja seurannan avulla voidaan saada parempi kuva materiaalinkäsittelyn nykytilasta ja kehittämispotentiaalista.

Materiaalinkäsittelyn simulointi tarjoaa tehokkaan keinon nykytilanteen ja uuden automatisoidun ratkaisun erittelemiseksi ja arvioimiseksi.

Materiaalinkäsittely vaakatasossa on tätä nykyä hyvin käsivaltaista ja tavanomaisia kättyjä apuvälineinä käytävää toimintaa, jonka kehittämisvaihtoehtoja tarkasteltaessa on otettava huomioon myös ergonomianäkökohdat. Erityisesti lyhyiden siirtojen helpottamiseksi olisi lähdeittävä liikkeelle pienistä menetelmä- ja apuvälineparannuksista, jotka ehkäisevät selän ja raajojen rasitusta.

Myös tietotekniset ratkaisut ovat välttämättömiä materiaalinkäsittelyn kehittämiseksi. Yksityiskohtainen tuotannosuunnittelu helpottuu tietokoneavusteisen järjestelmän avulla. OVT-ratkaisut nopeuttavat tiedonsiirtoa toimittajien ja työmaan välillä. Tavaroiden automaattisen tunnistuksen mahdollistavat järjestelmät, viivakoodit ja saattomuistit, myötävaikuttavat yleistyessään oleellisesti materiaalinkäsittelyn automaation mahdollisuuksia.

## 9 Yhteenveto

### **Materiaalinkäsittely kohteessa**

Tarkasteltava kohde oli 7-kerroksinen teräsrunkoinen toimistoteollisuusrakennus. Sisävalmistusvaiheen materiaalinkäsittelyn kannalta se on suhteellisen helppo: tyhjä teollisuustila antaa siirroille väljyyttä ja pitää sisävalmistusvaiheen materiaalinkäsittelytarpeen suhteellisen pienenä.

Selvityksessä laskettiin sisävalmistusvaiheessa käsiteltävät materiaalit koko kohteen tasolla yleensä ja kolmannen kerroksen osalta erityisesti. Kolmannen kerroksen materiaalinkäsittelyanalyysin avulla arvioitiin materiaaliakohtaisesti tarvittava siirtotyö sekä nosturitarve. Analyysistä johdettiin sisävalmistusvaiheen materiaalinkäsittelyn panostarve koko kohteen tasolla. Merkittävimmät siirrettävät materiaalit ovat tiili ja laasti, listat, tasoitteet ja kalusteet sekä lämpöpatterit ja ilmanvaihtokanavat ja -laitteet.

Suurin osa materiaaleista suunniteltiin nostettavaksi suoraan auton kuormalavalta kerrokseen, joissa on vastaanottolaituri. Lisäksi asennetaan kohteen molempiin päihin hissit, joiden pääasiallinen käyttökohde on henkilötyövälinekuljetukset. Hissillä suoritetaan pienikokoisten materiaalien (maaliastiat, listat, alumiinisäleet, sähkölaitteet) sekä ovien pystysirrot. Kerroksissa käytetään dumperia, pumppukärkyjä ja erikoiskärkyjä (esimerkiksi levykärkyjä) kantamisen ohella.

### **Materiaalinkäsittelyn merkitys ja kehittämismahdollisuudet yleisesti**

Sisävalmistusvaiheen materiaalinkäsittelykustannukset ovat kohteessa noin 1 % rakennus- ja LVIS-urakoiden loppusummasta. Markkamääräisesti ne vastaavat lähes yhtä miljoonaa markkaa. Jos samankokoinen kohde olisi puhtaasti liikerakennus, prosenttiosuus olisi todennäköisesti puolitoistakertainen. Ehkä suurempi kuin puhtaasti markkamääräinen materiaalinkäsittelykustannus on sisävalmistusvaiheen materiaalinkäsittelyn vaikutus kohteen etenemiseen. Tästä ei maassamme ole olemassa tutkittua tietoa. Yleinen käsitys kuitenkin on, että sisävalmistusvaiheessa sattuu hyvin paljon häiriöitä ja että ne aiheutuvat puutteellisesta tuotannonohjauksesta sekä siirtojen heikosta ajoituksesta ja suunnittelusta. Näin ollen olisi yritystasolla tärkeää seurata systemaattisesti sisävalmistustöiden etenemistä ja häiriöitä sekä kehittää keinoja, joiden avulla mahdollisesti havaittuja ongelmia voidaan helpottaa.

Materiaalinkäsittelyn välittömät tekniset kehittämismahdollisuudet eivät ole kovin suuria. Eräänä kehitystavoitteena on se, että rakennusyritys tarkastelee yhdessä kunkin vakiintuneen materiaalitoimittajan kanssa toimituserien siirtymistä asennuspaikalle analysoiden havaitsemiaan ongelmia sekä pohtien, miten siirtoja voidaan helpottaa (pakkaustekniikan parantaminen, erikoiskärkyjen vakiointi yms.). Toisaalta olisi hyödyllistä toteuttaa materiaaliakohtaisesti siirtotekniikan vaihtoehtotarjasteluja kannattavuuslaskelmineen.

Automaattisen siirtojärjestelmän muodostavat ohjausjärjestelmä, lastaustaso, henkilö-tavarahissit sekä vihivaunut. Tarkastellussa kohteessa kokonaisjärjestelmän kannattavuus osoittautui alustavissa laskelmissa kohtalaiseksi. Osajärjestelmistä vihivaunutekniikka ja lastaustaso ovat selvästi perusteltuja. Kokonaisjärjestelmä on myös materiaalin ohjattavuuden ja tuotannonohjauksen kannalta merkittävä kehitystavoite.

Kuvatun automaattisen siirtojärjestelmän häiriötön toiminta edellyttää sellaisia toimintatapamuutoksia, jotka jo sinänsä alentavat materiaalinkäsittelykustannuksia. Suunnitelmallisuus, yksiköidyt, ajallisesti tarkasti tapahtuvat toimitukset, siisteyden ja järjestyksen ylläpito ovat välttämättömiä sujuvalle materiaalinkäsittelylle. Automaattisen materiaalinkäsittelyn käyttöönotto voi tehokkaasti tapahtua vasta näiden toimintatapamuutosten toteuduttua.

Automaattisen materiaalinkäsittelyjärjestelmien kehittämistavoitteiden asettaminen edellyttää laajempaa ja tarkempaa empiiristä tietopohjaa materiaalinkäsittelyn eri työvaiheista. Myös simulointia voidaan tehokkaasti käyttää hyväksi järjestelmille asetettavien toiminnallisten tavoitteiden selvittämisessä.

## **Kirjallisuusluettelo**

Asplund, E. 1991. MA och helhetssynen - en sammanfattning. Seminaari "JOT - tuotanto rakennusalalla" 20.3.1991, Helsinki. RIL K136 -1991. S. 49 - 58.

Koskela, L. & Toivola, M. 1988. Työmaan materiaalinkäsittelyn kehittäminen. VTT, YRT. Tutkimusseloste. 22 s.

Rakentajain Kalenteri. 1988.

Mika Matikainen

# SISÄVALMISTUSVAUNUN OHJAUSJÄRJESTELMÄ

## 1 Ohjausjärjestelmän osajohjelmat ja niiden tehtävät

Ohjausjärjestelmä sisältää seuraavat itsenäiset osatehtävät: kellotaski, servotaski, hätäseistaski, viestinvälitystaski ja monitoritaski. Kutaakin ohjelmaa eli taskia ajetaan samanaikaisesti reaaliaikaisessa moniajoympäristössä.

Prioriteeteiltaan taskit ovat eriarvoisia. Suurimmat oikeudet omaa kello- ja hätäseistaski, hie-man näitä pienemmät servotaski. Alhaisimmat oikeudet on monitoritaskilla. Taskien suoritettua tehtävänsä asetetaan ne lepotilaan tietyksi ajaksi, minkä jälkeen ohjelmien suoritus alkaa uudestaan.

### 1.1 Kellotaski

Kellotaski lähettää 50 ms välein herätesignaalin servotaskille. Signaali aloittaa servotaskin suorituksen. Lähetyksen jälkeen kellotaski asetetaan lepotilaan, kunnes on aika lähettää seuraava herätesignaali servotaskille.

### 1.2 Servotaski

Servotaskin tehtävänä on toteuttaa vaunun liikkuminen paikasta toiseen. Jotta tämä onnistuisi tarkasti ja hallitusti, taski lukee anturitietoja, ohjaa vaunun telaketjuja ja laskee vaunun paikkaa ja asentoa.

Taskin suoritus alkaa viestin odotuksella. Viesti on joko 50 ms välein tuleva signaali kellotaskilta tai kysely tai komento joltain toiselta taskilta. Mikäli viesti on muulta kuin kellotaskilta, aloitetaan sanoman tulkintajakso, jossa

tarkistetaan kuka viestin on lähettänyt ja mikä viestin tarkoitus on. Muut taskit lähettävät servotaskille joko liikekomentoja, kyselyjä vaunun tilasta tai vaunun paikan kalibrointitietoja työskentelyn alkaessa tai kun on havaittu, että vaunun paikka on estimoitu väärin. Mikäli kyseessä on kysely, lähetetään vastaus välittömästi viestinvälitystaskin kautta eteenpäin. Mikäli viesti on liikekomento, otetaan se vastaan. Liikkeensuoritus aloitetaan kerralla kellotaskin signaalin tullessa. Liikekomennot vastaanotetaan monitoritaskilta. Komennot tulevat liike kerrallaan, kun edellinen liike on lopetettu. Liikekomennot ovat joko lineaari- tai kaariliikkeitä.

Vastaanotettuaan kellotaskin signaalin servotaski päivittää absoluuttisten kulma-anturien ja gyroskoopin lukemat. Seuraavaksi kulma-anturien lukemista lasketaan telaketjujen nopeudet ja gyroskoopin lukemasta vaunun kulmanopeus. Mittaustulokset suodatetaan ns. eksponentiaalisuodattimella (1) mittaushäiriöiden pienentämiseksi.

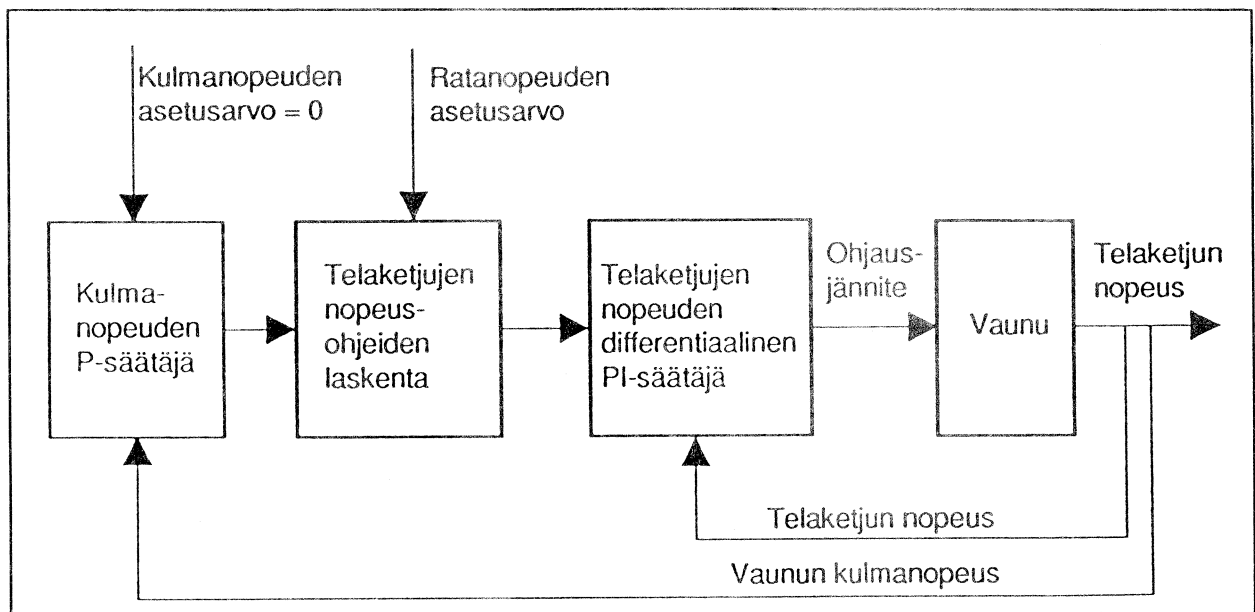
$$v_{est}(t) = 0.6 * v_{est}(t-T) + 0.4 * v_{mitt}(t), \quad (1)$$

missä

$v_{est}$	= suodatettu arvo
$v_{mitt}$	= anturin lukema
$T$	= mittaussväli= 50 ms

Nopeuslaskujen jälkeen ohjelma estimoii vaunun paikan ja asennon työalueella. Paikan laskennassa on käytössä kaksi eri tyyppistä estimaattoria, joista toinen valitaan vaunun ajaman liiketyypin perusteella. Mikäli vaunu ajaa suo-





Kuva 1. Lineaariliikkeen ohjausperiaate.

raan käytetään estimaattoria, joka päivittää vaunun paikan ja suuntakulman telaketjujen nopeuksien perusteella. Kaariliikkeessä paikka ja asento puolestaan päivitetään gyroskoopin tietojen perusteella. Gyroskoopin antamien lukemien perusteella voidaan laskea mm. vaunun ratanopeudet, koska kaartoliikkeet suoritetaan vakiokaartosäteellä.

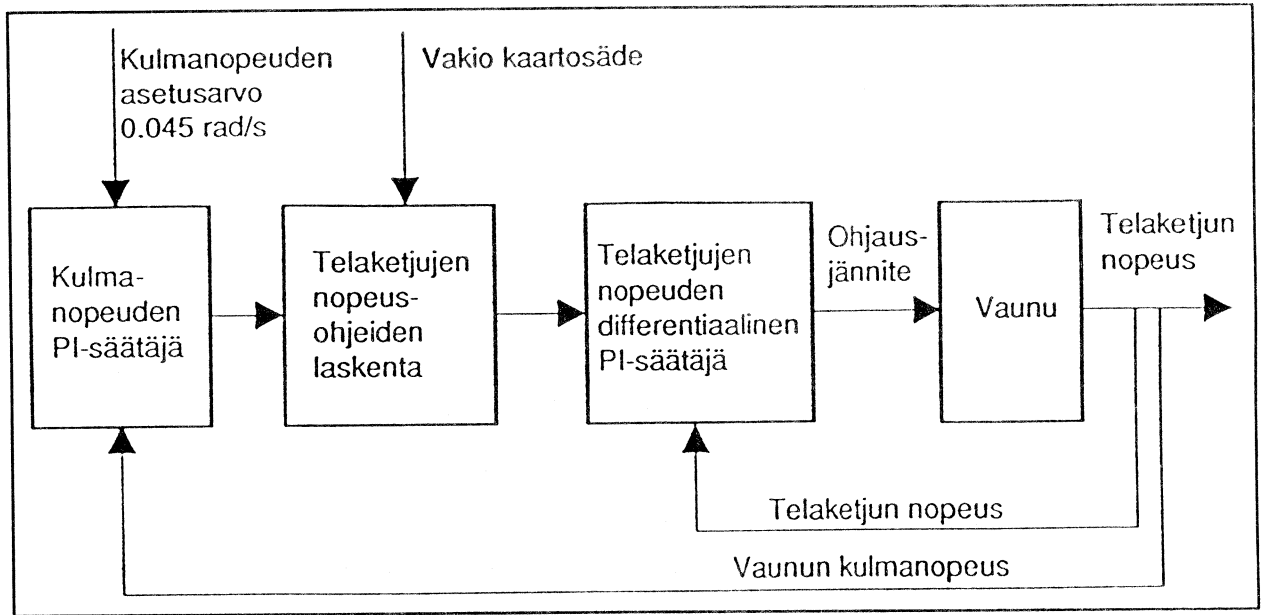
Seuraavaksi servotaski tarkistaa, onko toinen kahdesta liiketyypistä aloitettava vai jatketaanko nykyisen liiketyypin suoritusta. Mikäli kumpikaan liiketyypeistä ei ole aktiivinen, seuraavat jaksot ohjelmasta jätetään suorittamatta ja ohjelma siirtyy odottamaan seuraavaa signaalia tai komentoa.

Mikäli taski on saanut monitoritaskilta uuden liikekomennon, laskee ohjelma komennosta ilmenevän maalipisteen paikan ja aloittaa vaunun nopeuden kasvattamisen kohti matkanopeuksia. Vaunun matkanopeudet on valittu vakioiksi, lineaariliikkeessä ratanopeudeksi on valittu 0,07 m/s ja kaariliikkeessä kulmanopeudeksi on valittu 0,045 rad/s  $\approx$  2,58 astetta/s. Vaunu kiihdytetään näihin nopeuksiin 1,5 sekunnin aikana. Kiihdytysaika on valittu

riittävän pitkäksi, jotta vaunun liikkeet stabiloituisivat.

Jatkaessaan liikkeen suoritusta vaunu ohjaa liiketyyppejä joko ns. digitaalisilla differentiaalimuotoisilla P- tai PI-säättäjällä. Näitä säätäjiä voidaan kutsua liikesäätäjiksi. Suorassa liikkeessä ohjaus perustuu telaketjuista laskettuun kulmanopeuteen. Liikkeen aikana pyritään pitämään kulmanopeus nollassa. Tämän ohjauksen toteuttaa P-säättäjä. Kaariliikkeessä puolestaan kulmanopeus pyritään pitämään vaaditussa 0,045 rad/s PI-säättäjän avulla. Säätäjien avulla lasketaan ohjearvot telaketjujen nopeuksille. Liikesäätäjien antamat ohjearvot syötetään telaketjujen nopeussäätäjälle, joka huolehtii, että telaketjujen nopeudet pysyvät liikesäätäjien laskemissa arvoissa. Nopeussäätäjä on tyypiltään differentiaali PI-säättäjä. Kuvassa 1 on selvitetty liike- ja nopeussäädön periaate suoraan menossa ja kuvassa 2 kaartoliikkeessä.

Nopeussäätäjän ulostuloarvo on muutettava telaketjujen proportionaaliventtiilien analogiseksi ohjausjännitteeksi. Ohjausjännitteen tulee olla pienempi kuin 5 V. Kun säätäjien no



Kuva 2. Kaariliikkeen ohjausperiaate.

peusarvo on muutettu vastaavaksi jännitearvoksi, ne kirjoitetaan PC:n I/O-korttien välityksellä venttiilien ohjauksortille. Tämä siis toistuu 20 kertaa sekunnissa.

Liikkeidenohjausosuudella tarkistetaan myös, onko vaunu saanut suoritettua annetun tehtävän, eli onko vaunu liikkunut suoraan vaaditun etäisyyden tai onko se kääntynyt vaaditun astemäärän. Mikäli näin on tapahtunut asetetaan telaketjujen nopeusohjeet nolliksi, ilmoitetaan monitoritaskille, että liikekomento on suoritettu ja lopetetaan liiketyypin suoritus.

Suoritettuaan liikeohjaukseen liittyvät säädöt liikeohjaus asetetaan lepotilaan odottamaan joko herätepulssia kellotaskilta tai viestiä joltain toiselta taskilta.

### 1.3 Hätäseistaski

Hätäseistaski tarkkailee, onko jotain rakentamisrobotijärjestelmän hätäseispainikkeista painettu tai onko vaunun turvakaaren kytkin auennut. Turvapuskurin kytkimet ja hätäseis-painikkeet on kytketty sarjaan siten, että jonkun näistä kytkimistä auetessa moottorin käyttö-

jännite katoaa. Ohjausjärjestelmän virransyöttö ei kuitenkaan katkea.

Virhetilan syntyessä ohjelma lähettää monitoritaskille käskyn pysäyttää vaunu. Telaketjujen paikkaa ja asentoa mitataan törmäyksen jälkeenkin, eikä vaunua tarvitse välttämättä kalibroida uudelleen törmäyksen jälkeen.

### 1.4 Viestinvälitystaski

Viestinvälitystaskin tehtävänä on vastaanottaa viestejä servotaskilta ja välittää ne edelleen monitoritaskille. Tällä tavoin vältetään tilanne, jossa servotaski ja monitoritaski yrittävät lähettää toisilleen viestejä yhtä aikaa, ja siten estetään ohjausjärjestelmän jumittuminen.

### 1.5 Monitoritaski

Monitoritaski vastaanottaa robotilta ulkoisella tietokoneella lasketun vaunun reittisuunnitelman ja lähettää sen liike kerrallaan servotaskille. Liikekomentojen välitys servotaskille jatkuu, kun robotti on ilmoittanut toteuttaneensa tehtävänsä. Vaunun saavutettua prosessointiaseman, jossa robotin on tarkoitus työsken-

nellä, ohjelma laskee tukijalat ja pyytää ro-  
bottia aloittamaan työskentelyn. Kom-  
munkointi robotin kanssa hoidetaan sarja-  
väylää pitkin.

Monitoritaski toimii myös käyttöliittymänä  
ihmisen ja vaunun ohjausjärjestelmän välillä.  
Ohjelman avulla operaattori voi kalibroida  
vaunun paikan, tarkkailla vaunun liikkeitä ja  
anturien mittaustuloksia ja antaa itse liikeko-  
mentoja vaunulle, mikäli ennalta suunniteltua  
reittiä ei ole.

Taski lukee myös vaunun painonappeja, joiden  
välityksellä vaunu aloittaa työskentelyn.

## 2 Taskien väliset sanomat ja viestit

Taskien väliseen tiedonsiirtoon voidaan käyttää  
sanomia, jonoja tai signaaleita. Vaunun ohjaus-  
järjestelmä käyttää näistä hyväkseen sanomia  
ja signaaleja. Ohjelma, joka lähettää sanomia,  
pysähtyy, kunnes sanoma on kuitattu vastaan-  
otetuksi. Tällä tavalla QNX-käyttöjärjestelmäs-  
sä pystyy helposti tarkistamaan, että viesti on  
mennyt perille; toisaalta kuitenkin ohjelmien  
rinnakkaisuus kärsii. Seuraavassa on lueteltu  
taskeittain, mitä informaatiota ne vastaanotta-  
vat tai lähettävät joko vaunun antureilta tai  
muilta taskeilta.

### Kellotaski:

lähettää

- aktivointisignaalin 50 ms:n välein servotas-  
kille.

### Servotaski:

lähettää

- nopeusohjeet analogisena jänniteviestinä  
telaketjujen proportionaaliventtiileille
- sanomat viestinvälitystaskille: haluttu paik-  
ka ja asento saavutettu, gyron lukema,  
telaketjujen nopeudet, nykyinen paikka ja  
asento.

vastaanottaa

- herätesignaalin kellotaskilta
- sanoman monitoritaskilta: suorita seuraa-  
va liikesegmentti
- sanoman monitoritaskilta: kalibroitu vau-  
nun paikka ja asento
- sanoman monitoritaskilta: pysäytä vaunu  
hätäseis painettu
- sanoman monitoritaskilta: anna telaketju-  
jen nopeudet, vaunun paikka, vaunun  
asento tai gyron lukema
- absoluuttisten kulma-anturien lukeman  
vaunun kääntymisnopeuden gyrolta.

### Monitoritaski:

lähettää

- sanoman servotaskille: toteuta seuraava  
liikesegmentti
- sanoman servotaskille: vaunun kalibroitu  
paikka ja asento
- sanoman servotaskille: anna tiedot: tela-  
ketjujen nopeus, gyron lukema, vaunun  
paikka
- sanoman servotaskille: lopeta liike
- sanoman robotille: aloita työskentely  
prosessointiasema saavutettu
- tukijalkojen noston/laskun.

vastaanottaa

- seuraavat sanomat robotilta sarjaliikenne-  
taskin välittämänä: työskentelypisteet ja  
vaunun asennot näissä pisteissä, tehtävä  
alueella suoritettu, koko tehtävä valmis
- sanomat servotaskilta: vaadittu piste on  
saavutettu, vaunun paikka ja asento  
kalibroitu
- sanoman hätäseistaskilta: hätäseis pai-  
nettu.



<b>Tekijät</b> Koskela, Lauri, Kempainen, Taisto, Lehtinen, Hannu, Matikainen, Mika, Sainio, Hannu & Serén, Karl-Johan	<b>Projektin nimi</b> Rakentamisrobotiikka	
<b>Nimeke</b> <h2 style="text-align: center;">Rakentamisen sisävalmistustöiden robotisointi</h2>	<b>Toimeksiantaja</b> VTT:n johtokunta, 15 teollisuusrahoittajaa	
<b>Tiivistelmä</b> <p>Rakentamisen sisävalmistustyöt käsittelevät pääasiassa sisätilojen pintoja, väliseiniä, muita rakenteita ja varusteita. Sisävalmistustyöt ovat sekä kustannuksellisesti että ajallisesti merkittävä rakennusvaihe: niiden osuus rakennuskustannuksista on 20–50 % ja rakennusajasta 30–55 %.</p> <p>Sisävalmistuksen robotisoinnin keskeisiä perusteita ovat korkeat kustannukset, ammattitaitoisen työvoiman saannin vaikeus, työturvallisuuskysymykset, pyrkimys lyhyempään rakennusaikaan sekä onnistuneella automaatiolla saavutettava tasainen laatu. Ongelmana robotisoinnin kannalta on se, että sisävalmistustyöt koostuvat suuresta määrästä lyhytkestoisia tehtäviä ja että työpisteiden sijainti muuttuu jatkuvasti.</p> <p>Prototyyppaja ja kehityshankkeita on lukuisista sisävalmistusroboteista. Ehkä pisimmällä ovat levytysmanipulaattorit, apuvälineet seinä- tai kattolevytyksen suorittamiseksi. Betonipinnan hieppaamiseen on suunniteltu useita tuotantokäyttöön soveltuvia laitteita. Tutkimusvaiheessa ovat muuraus, maalaus, tasoitustyöt, materiaalinkäsittely jne. Tuotantokäyttöön ei sisävalmistusroboteja ole vielä saatu. Robottitekniikan kehittyminen ja halventuminen ja samanaikainen työn hinnan kallistuminen madaltavat kuitenkin kannattavuuskynnystä jatkuvasti.</p> <p>Projektissa on tutkittu rakentamisrobotiikan soveltuvuutta laatoitusrobotin prototyyppin avulla. Tavoitteena oli perustekniikoiden kehittäminen ja kokeilu.</p> <p>Tavoitteeksi asetetun laitteistokokoonpanon mukainen järjestelmä ulottuu työkalullaan mihin tahansa 3,2 m korkean huoneen sisäpintaan. Tämä lähes kokonaan valmiista komponenteista koottu järjestelmä sisältää pienen sähköhydraulisen telaketjuajoneuvon, teollisuusrobotin, laastijärjestelmän sekä laattakasetin. Tähän järjestelmään erityisesti suunniteltuja osia ovat ultraääni- ja voima/moment-</p> <p>tianturein varustettu kahden laatan imukupittarrain sekä laastinlevityssuutin, joka toimii kaupallisen laastinsekoitus- ja pumppausjärjestelmän yhteydessä.</p> <p>Vaunu liikkuu työpisteiden välillä melko lyhyitä matkoja. Rakentamisen toleranssien pohjalta on vaunun paikoitusjärjestelmälle asetettu vaatimus: vaunun täytyy kyetä liikkumaan 10 x 15 m<sup>2</sup> kokoisessa huonetilassa 50 mm ja yhden asteen tarkkuudella. Vaunun ohjauksjärjestelmän ytimenä on PC-laitteistopohjainen reaaliaikakäyttöjärjestelmällä varustettu ohjain.</p> <p>Kokeissa saavutettiin n. 17 sekunnin tahti aika laattaa kohti. Laatan paikkatarkkuuden ja laastin levityksen tasaisuuden suhteen päästiin lähelle rakennusalan yleisiä laatuvaatimuksia. Vaunun paikoitusjärjestelmän todettiin kokeissa ylittävän riittäväan tarkkuuteen huonetilassa.</p> <p>Robotisoitu laatoitus tavoitteeksi asetetulla laitteistolla on alustavien laskelmien mukaan yksivuorotyössä hieman kalliimpaa kuin käsityö. Kaksivuorotyössä robotisoitu laatoitus on käsityötä edullisempaa.</p> <p>Prototyyppin edelleenkehittäminen tuotteeksi edellyttää useiden osajärjestelmien pitkäjänteistä jatkokehitystä.</p> <p>Kokeellinen työ ja kirjallisuustutkimus antavat myös viitteitä sisävalmistusrobotiikan edellytyksistä yleensä. Robotisointi edellyttää toisaalta robottitekniikan, toisaalta rakennustekniikan kehittämistä. Robottien voimanlähteiden, navigoinnin ja ohjauksen menetelmien on kehitettävä, ja rakentamiseen soveltuvia robottiratkaisuja on luotava. Automaation tehokas käyttöönotto edellyttää rakentamisen kehittämistä järjestelmälliseksi, suunnitelluksi ja säännöllistetyksi toiminnaksi. Rakennusjärjestelmä, -materiaalit sekä rakennussuunnitelma ja tuotantoprosessi on mukautettava kulloisessakin tilanteessa automatisoinnin vaatimuksiin.</p>		
<b>Toimintayksikkö</b> Yhdyskunta- ja rakennussuunnittelun laboratorio, Itätuulenkujat 11, 02100 ESPOO		
<b>ISSN ja avainnimeke</b> 1235-0605 VTT TIEDOTTEITA – MEDDELANDEN – RESEARCH NOTES		
<b>ISBN</b> 951-38-4140-5	<b>Kieli</b> suomi, engl. tiiv.	
<b>Luokitus (UDK)</b> 007.52:693.6:69.003	<b>Avainsanat</b> robots, automation, automatic control equipment, surface finishing, machinery, ceramic tiles, preparation, building automation, construction, construction costs, construction equipment, walls, ceilings, prototypes, rooms, tolerances, product development, quality, building boards	
<b>Myynti:</b> Valtion painatuskeskus PL 516, 00101 HELSINKI Puh. (90) 56601 (vaihde) VTT, Informaatiopalvelulaitos PL 42, 02151 ESPOO Puh. (90) 456 4404 Telekopio (90) 456 4374	<b>Sivuja</b> 60 s. + liitt. 18 s.	<b>Lisätietoja</b>
	<b>Hintaryhmä</b> B	



<b>Authors</b> Koskela, Lauri, Kemppainen, Taisto, Lehtinen, Hannu, Matikainen, Mika, Sainio, Hannu & Serén, Karl-Johan		<b>Name of project</b> Rakentamisrobotiikka	
		<b>Commissioned by</b> VTT's Board, 15 teollisuusrahoittajaa	
<b>Title</b> <h2 style="text-align: center;">Robotization of interior construction</h2>			
<b>Abstract</b>			
<p>Inner works in construction deal primarily with interior surfaces, interior walls and other structures and installments. Inner works are an important construction phase from both cost and time aspect: Their share from construction costs is 20-50 % and from the total construction time 30-55 %.</p> <p>Robotization of inner works is motivated by high costs, lack of skilled labor, safety considerations, pursuit of a shorter construction time and the promise of a stable quality to be attained by automation. However, robotization is made problematic by the fact that inner works consist of a great amount of tasks with relative short duration, and the work points change continuously.</p> <p>There are prototypes or development projects for several construction robots for inner works. Among the most advanced are board manipulators. Also there are several prototype robots for concrete trowelling. Robotization of masonry, painting, plastering and material handling are in the research stage. The actual use of inner works robots beyond pilot studies is still very limited. However, efficiency increase and cost reduction in robot technology, together with increase of labor costs widen the implementation potential continuously.</p> <p>The feasibility of construction robotics has been investigated by means of a tiling robot prototype. The target system can reach any inner surface of a room with a maximum height of 3,2 m. The robot system consists of an industrial robot, a track-based vehicle and processing tools for automated cladding of ceramic tiles (mortar system and tile cassette). The system has been composed primarily from commercial components. Specially for this system were following subsystems designed and constructed: a suction gripper for two tiles, equipped with ultrasonic and force/torque sensors; a</p>		<p>nozzle for spreading mortar, (attached to a commercial mortar mixing and pumping unit).</p> <p>The vehicle moves rather short distances between subsequent work points. On basis of construction tolerances, the following requirement was set: the vehicle has to be able to navigate in a room of 10 x 15 m<sup>2</sup> with an accuracy of 50 mm and one degree.</p> <p>A cycle time of 17 seconds per tile was reached in the experiments carried out. The current quality requirements, as for dimensional accuracy for tile position and evenness of mortar, were nearly (but not totally) attained. The positioning system of the vehicle was proven to be accurate enough in a room space.</p> <p>According to initial evaluation, robotized cladding is slightly more expensive than manual cladding in one shift operation. However, in two shift operation robotized cladding is more economical than manual work.</p> <p>If the prototype device is to be developed to the point at which it becomes a viable commercial product, several subsystems have to be further developed as a long term effort.</p> <p>Experimental research and literature study also pinpoint to general preconditions of construction robotics. Development of both robot technology and construction technology is needed. The power sources, navigation methods and control systems have to become more efficient, and robot solutions suitable to construction environment have to be created. Efficient implementation of automation presupposes that construction is developed to a systematic, planned and regularized activity. The construction system, materials, design solutions and the construction plan have to be adapted to the requirements of automation.</p>	
<b>Activity unit</b> Laboratory of Urban Planning and Building Design, Itätuulenkuja 11, SF-02100 ESPOO, Finland			
<b>ISSN and series title</b> 1235-0605 VTT TIEDOTTEITA - MEDDELANDEN - RESEARCH NOTES			
<b>ISBN</b> 951-38-4140-5		<b>Language</b> Finnish, Engl. abstr.	
<b>Class (UDC)</b> 007.52:693.6:69.003		<b>Keywords</b> robots, automation, automatic control equipment, surface finishing, machinery, ceramic tiles, preparation, building automation, construction, construction costs, construction equipment, walls, ceilings, prototypes, rooms, tolerances, product development, quality, building boards	
<b>Sold by</b> Government Printing Centre P.O. Box 516, SF-00101 HELSINKI, Finland Phone internat. + 358 0 56601 VTT, Information Service P.O. Box 42, 02151 ESPOO, Finland Phone internat. + 358 0 456 4404 Fax + 358 0 456 4374		<b>Pages</b> 60 p. + app. 18 p.	<b>Note</b>
		<b>Price group</b> B	