



Tuotteiden digitaalinen suorakuviointi

Kirjoittajat: Pasi Puukko, Anu Ilmonen, Jorma Koskinen, Ilari Marstio, Timo Salmi, Tiia-Maria Tenhunen

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Tuotteiden digitaalinen suorakuviointi		
Projektin nimi Tuotteiden digitaalinen suorakuviointi	Projektin numero/lyhytnimi 70981 / DIDECO	
Raportin laatija(t) Pasi Puukko, Anu Ilmonen, Jorma Koskinen, Ilari Marstio, Timo Salmi, Tiia-Maria Tenhunen	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 29/-	
Avainsanat inkjet, robot, decoration	Raportin numero VTT-R-00255-12	
Tiivistelmä <p> Projektissa tutkittiin inkjet- eli mustesuihkutulostamisen soveltumista kolmiulotteisten kappaleiden kuviointiin. Keskeisimpänä tavoitteena oli rakentaa tutkimus- ja demonstraatioympäristö palvelemaan asiakastarpeita ja avaamaan uusia näkökulmia inkjetin teknologisen potentiaalin hyödyntämiseen. Tutkimusympäristöstä rakennettiin kaksi eri versiota kattamaan yleisimmät nähtävissä olevat tarpeet. Molemmat perusratkaisut saatiin toteutettua projektin kuluessa ja todettiin toimiviksi. </p> <p> Merkittävin tulostuslaatuun vaikuttava tekijä oli tulostuspään etäisyys kuvioitavasta pinnasta eli pisaran lentomatka. Tulostusetäisyys kuvioitavasta pinnasta vaikutti kuvanlaatuun siten, että hyväksyttävissä oleva laatu saavutettiin tyypillisesti vielä noin 5–8 millimetrin etäisyydellä, tulostusparametrejä säätämällä tätäkin pidemmällä etäisyydellä. Hyväksyttävissä olevaan tulostuslaatuun vaikuttivat pisaran koko, pisaran lentonopeus ja toisaalta vaadittu laatutaso. Vuorovaikutuskokeet eri värien ja substraattien välillä toivat selvästi esiin, että samankin värityypin (esimerkiksi UV-kovettuvat värit) eri värisarjojen välillä on merkittäviä eroja. Vielä suuremmat erot havaittiin eri substraattien välillä. </p> <p> Tehdyt testit osoittivat, että yleisellä tasolla tarkasteltuna mustesuihkumenetelmä soveltuu kolmiulotteisten kappaleiden kuviointiin. Tavanomaisia kappaleita kyetään kuvioimaan tekniikalla moneen sovellukseen riittävällä laadulla. Voidaankin olettaa, että suoratulostuksen käyttö kappaleiden kuvioinnissa tulee merkittävästi lisääntymään tulevaisuudessa. Projektissa kehitetty ympäristö tarjoaa hyvät puitteet sekä yksittäiseen tuotetestaukseen että laajempien tutkimuskokonaisuuksien läpiviemiseen. </p>		
Luottamuksellisuus	julkinen	
Espoossa 24.1.2012 Laatija	Tarkastaja	Hyväksyjä
Pasi Puukko, Senior Scientist	Esa Torniainen, Development Manager	Pia Qvintus, Technology Manager
VTT:n yhteystiedot Pasi Puukko, Biologinkuja 7, Espoo. PL 1000, 02044 VTT		
Jakelu (asiakkaat ja VTT) VTT ja hankkeeseen osallistuneet yritykset		
<p style="text-align: center;"> <i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i> </p>		

Alkusanat

Projekti DIDEKO, Tuotteiden digitaalinen suorakuviointi toteutettiin 1.6.2010-31.12.2011 välisenä aikana. Projektin rahoitukseen osallistui Tekes – teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus, VTT sekä joukko yrityksiä. Projektin johtoryhmä koostui rahoittajien edustajista. Lämpimät kiitokset kaikille osapuolille jotka mahdollistivat projektin toteutuksen sekä osallistuivat johtoryhmätyöskentelyyn.

Espoossa 24.1.2012

Pasi Puukko, Anu Ilmonen, Jorma Koskinen, Ilari Marstio, Timo Salmi, Tiia-Maria Tenhunen

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	2
1 Johdanto.....	4
2 Tavoite.....	5
3 Tutkimusongelman kuvaus.....	5
3.1 Suorakuviointin tarjoamat mahdollisuudet	5
3.2 Vaihtoehtoisista menetelmistä	5
3.3 Suorakuviointiin liittyvät haasteet.....	6
3.3.1 Suuttimien ja kappaleen välinen etäisyys	6
3.3.2 Kuvan muokkaustarpeet	6
3.3.3 Materiaalivuorovaikutukset.....	7
3.3.4 Suorakuviointin luotettavuus	7
4 Rajaukset	7
5 Menetelmät.....	7
5.1 Projektissa kehitetyn tutkimusympäristön kuvaus	7
5.2 Muut käytetyt menetelmät.....	9
5.2.1 Painojäljen kestotestausmenetelmät.....	9
5.2.2 Painolaadun arviointi.....	10
5.2.3 Substraattien analysointi	10
5.3 Käytetyistä materiaaleista	10
5.3.1 Musteet	10
5.3.2 Substraatit.....	11
6 Tulokset.....	11
6.1 Materiaalivuorovaikutukset	11
6.1.1 Värin ja pinnan välinen adheesio	11
6.1.2 Substraatteihin liittyvät tulokset.....	12
6.1.3 Näytteiden visuaalinen laatu	14
6.2 Teknologinen potentiaali	16
6.2.1 Kuvointietäisyys	16
6.2.2 Tulostuspään toiminta haastavassa ympäristössä.....	20
6.2.3 Integrointiin liittyvät testit.....	23
7 Tulosten tarkastelu	25
8 Johtopäätökset	25
9 Yhteenveto	27

1 Johdanto

Tuotteiden imagon rakentamisessa tuotteiden kuviointi ja muotoilu näyttelee merkittävää osaa. Kuvioinnilla voidaan vaikuttaa vahvasti kuluttajan ja loppukäyttäjän tuotteesta saamaan mielikuvaan. Prosessinäkökulmasta kuviointi saattaa olla kuitenkin prosessin heikon lenkki. Tuotteiden kuviointi ja merkkaus on monen tuotteen osalta hidasta ja perustuu osittain käsityövaltaisiin prosesseihin. Kuvioinnin automatisoinnilla voidaan saavuttaa merkittävää tuotantotehokkuuden lisääntymistä. Kuviointi saatetaan myös teettää alihankintana, mikä lisää tuotteiden läpimenoaikaa. Tuotteiden kuviointi osana valmistusprosessia lisää joustovaraa tuotannossa. Esimerkiksi pakkausteollisuudessa on jo pitkään keskusteltu mahdollisuudesta painaa pakkaus valmiina, siinä vaiheessa kun se on jo täytetty. Tällainen toimintatapa antaisi täysin uusia mahdollisuuksia pakkausten suunnitteluun, personointiin ja koko pakkauksen prosessiketjuun. Käytännössä mahdollisuudet ovat olleet tähän saakka varsin rajallisia.

Kuluttajat haluavat enenevässä määrin erottua joukosta ja tehdä arjen itsensä näköiseksi. Erityisesti nuorten keskuudesta tutuksi tullut tuotteiden 'tuunaus' tai kustomointi on valtaamassa alaa myös vanhempien kuluttajien keskuudessa. Samalla kustomoitujen tuotteiden kirjo kasvaa. Kuluttajat ja yhä useammin myös yritykset haluavat ja osaavat myös vaatia personoituja ja kustomoituja tuotteita, kuten kannettava tietokone omalla tai yrityksen kuvalla, kännykkä logolla ja kamera omalla nimellä varustettuna. Yksinkertaiset nimiöinnit ja vastaavat voidaan toteuttaa kaivertamalla, mutta monimuotoisempaan yksittäiskappaleiden kuviointiin käytännössä ainoa keino on ollut tarran painaminen ja lisääminen kappaleeseen. Tämä on melko työlästä eikä laadultaan välttämättä vastaa odotuksia.

Kuluttajatuotteissa ja kappalevalmistuksessa on jäljitettävyyttä entistä tärkeämpi tekijä. Usein onkin tarvetta kappaleiden yksilöintiin esimerkiksi muuttuvan numerosarjan muodossa; sen avulla voidaan tarvittaessa jäljittää valmistuserä mahdollisten valmistusvirheiden osalta. Tuotteiden merkkaus voi palvella myös osana tuotteen väärennöksenestoa: paras suojaus saadaan kun sekä itse tuote että pakkaus ovat suojattuja. Muuttuvan tiedon lisääminen tuotteeseen on kuitenkin varsin työlästä käyttäen perinteisiä menetelmiä.

Tämän hankkeen tavoitteena oli selvittää mustesuihkutulostuksen potentiaali kolmiulotteisten kappaleiden kuvioinnissa. Lähtöajatus perustuu mustesuihkutekniikan ja robotiikan hyödyntämiseen kuvioinnin automatisoinnissa. Tällainen toimintatapa tarjoaisi monia etuja ja antaisi ratkaisuja yllämainittuihin haasteisiin:

- tuotannon tehostaminen integroimalla kuviointi kappaletuotantoon
- personoidusti kuvioitujen tuotteiden valmistus
- web-pohjainen tuotepersonointi
- muuttuvan tiedon hyödyntäminen jäljitettävyydessä ja kopiointiestona
- varastokustannusten pienentäminen siirtymällä tarvepohjaiseen tuotantoon
- lisäarvoratkaisut hyödyntämällä esimerkiksi toiminnallisia musteita

Yllämainittujen hyötyjen lisäksi digitaalinen suorakuviointi voi tarjota monia muita etuja, joita ei ole vielä hahmotettu. Esimerkiksi tuotekehityksessä pikamallinnusta hyödyntävä lähestymistapa yhdessä suorakuviointin kanssa tarjoaa täysin uuden tyyppisiä mahdollisuuksia tuotekehitykseen.

2 Tavoite

Projektin yleisenä tavoitteena oli selvittää inkjet- eli mustesuihkumenetelmän soveltuvuus kolmiulotteisten kappaleiden kuviointiin. Yksityiskohtaisempina tavoitteina on:

- Luoda tutkimusympäristö, jonka avulla voidaan selvittää digitaalisen suorakuviointin tuotekohtainen soveltuvuus
- Selvittää eri materiaalien ja erityyppisten värien yhteensopivuus ja soveltuvuus käyttötarkoitukseen
- Demonstroida digitaalisen suorakuviointin soveltuvuus case-tuotteiden avulla

3 Tutkimusongelman kuvaus

3.1 Suorakuviointin tarjoamat mahdollisuudet

Digitaalinen suorakuviointi tarjoaa monia uusia mahdollisuuksia. Digitaalisen menetelmän luonteeseen liittyen jokaisen kappaleen kuviointi voi olla yksilöllinen, ilman että menetelmän kustannukset nousevat merkittävästi. Tämä antaa mahdollisuuden esimerkiksi internetpohjaiseen tuotteiden personointiin ja kustomointiin, jossa kuluttaja voi muokata tuotteen haluamansa kaltaiseksi, ja tehdä tilauksen. Vastaavan tyyppisiä järjestelmiä on jo käytössä graafisessa tulostuksessa esimerkiksi valokuvakirjojen muodossa. Tämän tyyppinen toimintatapa voisi avata monille yrityksille täysin uusia liiketoimintamahdollisuuksia.

Kosketuksettomana menetelmänä inkjet on myös suhteellisen helppo integroida kiinteäksi osaksi tuotantolinjaa. Tuotteen kuviointi voitaisiin tehdä osana tuotteen valmistusta ja näin mahdollisesti nopeuttaa merkittävästi tuotteen läpimenoaikoja. Vaikka kuviointi toteutettaisiin käyttäen erillistä järjestelmää, on läpimenoajat selkeästi lyhyempiä verrattuna prosessiin, jossa kuviointi alihankitaan. Suorakuviointi on mahdollista myös automatisoida melko täydellisesti, mistä syntyy merkittäviä kustannussäästöjä.

Digitaaliset menetelmät mahdollistavat myös tarpeenmukaisen tuotannon, jossa tuote valmistetaan tai kuvioidaan esimerkiksi tilausten pohjalta. Koska tuotteen yksilöinti tehdään vasta tarvittaessa, mahdollistaa toimintatapa varastokustannusten pienenemisen.

Painomenetelmiä käytetään myös enenevässä määrin erilaisten toiminnallisten elementtien lisäämiseen. Esimerkiksi painoväri, joka reagoi värimuutoksella lämpötilan muutokseen, voi toimia indikaattorina sopivasta tarjoilu- tai säilytyslämpötilasta. Tällaisten toiminnallisten musteiden avulla voidaan tuottaa lisäarvoa kuvioitaviin tuotteisiin. Erikoipainovärejä käyttäen voidaan myös lisätä tuotteisiin aitoustunnisteita. Jo pelkästään tuotteen yksilöinti sarjanumeron avulla parantaa mahdollisuuksia tuotteen elinkaaren seuraamiseen.

3.2 Vaihtoehtoisista menetelmistä

Kolmiulotteisten kappaleiden kuviointiin on olemassa useita menetelmiä. Eniten käytetty menetelmä lienee tampopaino, jossa painokuva siirretään painettavalle pinnalla käyttäen hyvin joustavaa painolaattaa eli klisettä. Tampopainolla on mahdollista tuottaa hyvin korkealaatuisia monivärikuvia ja tarjolla oleva värivalikoima on laaja, sillä menetelmässä voidaan hyödyntää myös silkkipainovärejä. Analogisena menetelmänä sillä on kuitenkin rajoituksensa liittyen tuotteiden yksilöintiin ja kustannustehokkaisuuteen pieniin painosarjoihin.

Toinen yleisesti käytetty kuviointimenetelmä on erilaisten siirtokuvien ja tarrojen käyttö. Jos siirtokuva tuotetaan käyttäen digitaalista menetelmää, on mahdollista tehdä personoituja tuotteita. Laadullisesti voidaan lähestyä jopa valokuvalaatuja. Tyypillisesti tällaiset menetelmät vaativat kuitenkin useita työvaiheita, eivätkä siten kovin hyvin sovellu teollisiin käyttöihin. Työvaiheet lisäävät myös kustannuksia.

Tuotteita voidaan myös kuvioida suoraan esimerkiksi laserin avulla. Laserkuviointi on digitaalinen menetelmä, ja mahdollistaa siten yksilöllisten kuvioiden tuottamisen. Menetelmä rajoittuu kuitenkin yhteen väriin minkä lisäksi eri materiaalit vaativat erityyppisten lasereiden käyttöä.

Väri voidaan levittää myös tuotteen pinnalle kastamalla tuote nesteeseen, jonka pinnalta väriaine tarttuu tuotteeseen. Menetelmää käytetään erityisesti tuotteissa, joissa tuotetaan kuvioita, joissa yksityiskohtien toisto ei ole kriittistä.

3.3 Suorakuviointiin liittyvät haasteet

3.3.1 Suuttimien ja kappaleen välinen etäisyys

Inkjet tulostuspäät on pääosin optimoitu tulostamaan noin 1-2 mm etäisyydeltä tulostettavasta pinnasta. On hyvin oletettavaa, että tätä optimietäisyyttä ei saavuteta kolmiulotteisten kappaleiden kuvioinnista, vaan etäisyys on tyypillisesti suurempi. Tällaiseen tilanteeseen törmätään lähes väistämättä, jos kuvioitavassa kappaleessa on kaksoiskaarevuutta pienellä kaarevuussäteellä. Keskeinen kysymys menetelmän toimivuuden kannalta onkin, kuinka suurempi etäisyys vaikuttaa pisaroiden lentorataan ja miltä etäisyydeltä tulostus voidaan toteuttaa, niin että laatu pysyy hyväksyttävällä tasolla. Olennaista on myös selvittää, mitkä parametrit vaikuttavat pisaroiden lentorataan ja osumatarkkuuteen ja toisaalta, voidaanko näihin tekijöihin vaikuttaa.

Niin kutsutuissa jatkuvatoimisissa tulostuspäissä tulostusetäisyys saattaa olla normaaleissa graafisissa sovelluksissa suurempi, noin 10 mm, koodauksen tarkoitetuissa päissä jopa useita senttimetrejä. Koodauksen tarkoitetut päät soveltuvat merkkaukseen, jossa laatuvaatimukset eivät ole kovin korkeat. Jos tuotteen kuvioinnin laatuvaatimukset eivät ole korkeita, voi tällaisten päiden käyttö tarjota vaihtoehdon kuvioinnin tekemiseen.

3.3.2 Kuvan muokkaustarpeet

Kuvan muuttaminen painokuvaksi vaatii muun muassa kuvan värierottelun tekemisen, sävyntoiston säädön ja rasteroinnin. Mustesuihkutekniikan kyseessä ollessa kuva täytyy myös mahdollisesti ”viipaloida” sopiviksi blokeiksi jotta kuva voidaan tarvittaessa toteuttaa useamman pyyhkäisyn avulla. Nämä toimenpiteet ovat normaaleita inkjet painamiseen liittyviä toimenpiteitä ja tarjolla on useita kaupallisia ohjelmistoja, jotka kykenevät ne suorittamaan.

Tämän lisäksi kolmiulotteisten kappaleiden kuvioiminen saattaa vaatia muita kuvankäsittelytoimenpiteitä. Tasomaisen kuvan projisoiminen esimerkiksi pallopinnalle saattaa vaatia kuvan muokkaamista vääristymien korjaamiseksi. Esimerkkinä voidaan ajatella shakkiruudukkoa joka painetaan pyöreälle pinnalle. Kuvassa saattaa tapahtua vääristymiä, ellei kuvaa muokata. Tällaisessa tilanteessa olisi kuitenkin kyse kaksoiskaarevan pinnan kuvioinnista, ja jos kaarevuussäde on pieni, saattavat tulostusetäisyyteen liittyvät haasteet muodostua merkittävämmiksi.

3.3.3 Materiaalivuorovaikutukset

Värin ja kuvioitavan pinnan väliset vuorovaikutukset ratkaisevat lopulta, saavutetaanko kuvioinnille asetettu laatuvaatimus. Käytännössä tämä tarkoittaa värin hallittua leviämistä ja riittävän adheesion saavuttamista.

Leviäminen voi olla joko liian voimakasta, jolloin menetetään yksityiskohtien toistokyky tai liian vähäistä, jolloin yksittäisten suuttimien tuottamat linjat näkyvät tulostusjäljessä ja kuva näyttää raidalliselta. Jos leviämisessä on paikallista vaihtelua, tulos näkyy laikullisena painojälkenä. Hallittu leviäminen pinnalle on lähtökohta myös riittävän adheesion muodostumiselle; värin tulee kastella kuvioitava pinta tarttumisen aikaansaamiseksi.

Inkjet tulostuksessa käytetään eri väryypppejä: lähinnä vesipohjaisia, liuotinpohjaisia ja UV-kovettuvia värejä. Värien soveltuvuus sekä tulostuspäähän että eri substraateille vaihtelee. Erityisesti UV-kovettuvilla väreillä on teollisen käytön kannalta edullisia ominaisuuksia: värit kuivuvat vain UV-säteilyn vaikutuksesta, joten tulostuspäät säilyvät pitkiäkin aikoja tulostuskuntoisina tulostuskertojen välillä ilman että niitä täytyy välillä puhdistaa. UV-värin ja erityyppisten materiaalien välinen adheesio on yleensä parempi kuin esimerkiksi vesipohjaisten värien. Tarttumista voidaan parantaa erilaisilla pintakäsittelymenetelmillä, kuten koronoinnilla.

3.3.4 Suorakuviointin luotettavuus

Toimintavarmuus on edellytys teolliseen soveltamiseen. Tulostuspäiden toimintavarmuus on parantunut huomattavasti viimeisten vuosien aikana, ja päitä käytetään yleisesti teollisessa tuotannossa. Käyttö kolmiulotteisten kappaleiden kuviointiin voi kuitenkin tuoda mukanaan haasteita ja normaalista poikkeavia käyttötilanteita, jotka vaikuttavat menetelmän luotettavuuteen. Tällaisia käyttötilanteita voivat olla esimerkiksi tilanteet, jossa tulostuspäätä käytetään normaalista poikkeavassa asennossa tai jos tulostuspäätä liikutetaan voimakkaasti kiihdyttäen tai hidastaen tulostuksen aikana. Tulostuspään lisäksi kriittinen elementti on värijärjestelmä: järjestelmän tulee kyetä pumppaamaan väripäälle väri olosuhteissa, joissa pää ei liiku pelkästään tasomaisesti, vaan vapaasti kolmiulotteisessa avaruudessa.

4 Rajaukset

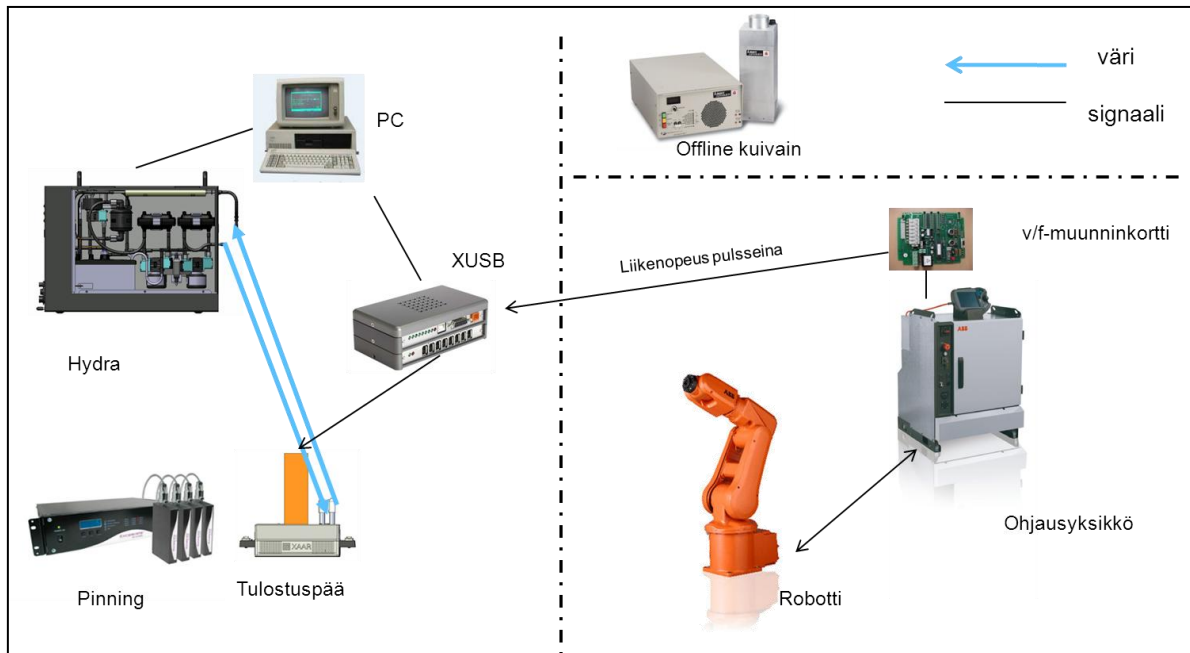
Projektissa keskityttiin kolmiulotteisten kappaleiden korkealaatuiseen kuviointiin käyttäen piezo toimisia Drop-on-Demand tulostuspäitä. Projektissa ei tarkasteltu muiden tulostuspäättyyppien soveltuvuutta tähän tarkoitukseen.

5 Menetelmät

5.1 Projektissa kehitetyn tutkimusympäristön kuvaus

Projektin keskeisin tavoite oli rakentaa tutkimus- ja demonstraatioympäristö 3D kappaleiden kuviointiin. Lähtökohtana oli tarjota teollisuudelle ympäristö, jossa voidaan testata mahdollisimman joustavasti digitaalisen suorakuviointin soveltumista erilaisiin tarpeisiin ja sovelluksiin huomioiden erityyppiset tuotteet (koko, muoto, kuvioinnin laatuvaatimukset). Käytettävän tulostuspään tulee tarjota riittävän korkea resoluutio jotta saavutettavasta laatupotentialista saataisiin riittävän kattava kuva. Laitteiston integroiminen tulisi viedä sille

tasolle, että voidaan riittävässä määrin demonstroida kokonaisratkaisun toimivuutta. Laitteiston peruskomponentit on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Digitaalisen suorakuviointin tutkimus- ja demoympäristön peruskomponentit.

Laitteiston suunnittelussa hyödynnettiin VTT:llä valmiina olevia komponentteja, joiden käyttöön löytyy osaamista. Keskeisin tehtävä oli integroida laitteistot toimimaan yhtenä kokonaisuutena. Suunnittelussa päädyttiin kahteen perusratkaisuun, joiden avulla voidaan kattaa valtaosa erilaisista tarpeista:

1. Robotti liikuttaa yhtä tulostuspäätä, kappale pysyy paikoillaan
 - a. tulostuspään pidikkeessä varaus kahden tulostuspään tai yhden tulostuspään ja välikuivaimen käyttöön
2. Robotti liikuttaa kappaletta tulostuspäiden pysyessä paikoillaan. Mahdollisuus neljän tulostuspään käyttöön.

Integroidun laitteiston olennaiset komponentit keskeisine teknisine tietoineen on listattu seuraavassa:

- robotti: ABB IRB 120
 - ulottuvuus 580 mm
 - kuorma 3 kg
 - toistotarkkuus 0.01 mm
 - IRC5 MultiMove robottiohjain
- Tulostuspää ja ohjauselektronikka: Xaar 1001 + XUSB
 - natiivi resoluutio 360 dpi
 - harmaasävyt: 8
 - pisarakoko: 6-42 pl
 - tulostusmatriisin leveys: 70,5 mm
- Värijärjestelmä: Xaar Hydra
 - läpivirtaustekniikka
- Offline kuivaus erillisessä UV-kaapissa

Perusratkaisu 1 käytännön toteutus on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Suorakuviointin käytännön toteutus, kuvassa yksivärikuviointiin soveltuva ratkaisu.

Molemmat perusratkaisut saatiin toteutettua projektin kuluessa ja todettiin toimiviksi. Kummassakin ratkaisussa kontrollerilta välitetään tulostuspään ohjauselektronikalle tietoa robotin työkalupisteen nopeudesta, ja tätä tietoa käytetään tulostamisen synkronointiin. Tulostuksen aloituspisteen hallinta hoidetaan trigger-signaalin avulla.

5.2 Muut käytetyt menetelmät

5.2.1 Painojäljen kestotestausmenetelmät

Painojäljen ja pinnan adheesiota sekä kemikaalinkesto-ominaisuuksia testattiin kirjallisuudessa mainituilla yleisesti käytetyillä testimenetelmillä. Teippitestissä painettuun alueeseen kiinnitettiin Scotch Magic 3M 810 19mm-teippi, jonka toinen pää kiinnitettiin 500g:n painoon. Teipin annettiin olla näytteessä 3 min, jonka jälkeen se repäistiin irti painon avulla. Adheesio määritettiin teippiin jääneen painovärimäärästä. Raaputustestissä raaputettiin metallisella kärjellä kolme kertaa sekä kone että poikkisuuntaan. Kemikaalikestotestissä käytettiin paperiliuskoja, jotka oli kastettu 5% entsyymipesuaineliuokseen, 2% etikkahappoliuokseen tai 2% natriumkloridiliuokseen. Kostutuksen jälkeen näyte ja kostutettu liuska olivat kosketuksissa 3 tunnin ajan lasilevyn alla, jonka jälkeen näytteen painettua pintaa ja liuskaa tarkasteltiin. Lisäksi koville muoveille (ABS, harmaa PC ja kirkas PC) ja polyuretaanille käytettiin heksaanibensiiniä, etanolia ja vesi/glykoli-seosta. Testissä pisara kemikaalia asetettiin painetulle pinnalle 10 sekunniksi, jonka jälkeen pisara pyyhittiin paperiliinalla ja tuloksia tarkasteltiin sekä muutoksina näytteessä että liinaan tarttuneesta painovärimäärästä.

5.2.2 Painolaadun arviointi

Painolaadun arvioinnin osalta tyydyttiin lähinnä laadun visuaaliseen arviointiin. Esitesteissä näytteistä mitattiin joitakin laatuun liittyviä suureita (viivan leviäminen, densiteetti) mutta mittaukset todettiin ongelmallisiksi kolmiulotteisilta pinnoilta. Myös mittausten soveltaminen hyvin erityyppisille materiaaleille oli ongelmallista. Laatuodotukset eri tuotetyypeillä vaihtelevat suuresti; yhdellä tuotteella riittävä laatuaso ei takaa riittävää laatuodotusten täyttymistä toisella tuotteella.

5.2.3 Substraattien analysointi

Substraatit analysoitiin pinnan sileyden osalta käyttäen Veeco profiometriä. Mittaukset tehtiin kolmella eri suurennoksella 5X, 20X ja 50X. Raportissa tulokset on esitetty 5X suurennoksella mitatuista näytteistä. Tulokset on esitetty Rt karheutena, mikä vastaa maksimaalista korkeuseroa pinnan korkeimman ja matalimman kohdan välillä mitatulla alalla.

Näytteiden pinta-energian määrittäminen toteutettiin kosketuskulmamittaus periaatteella. Mittaukset tehtiin CAM 200 laitteistolla käyttäen viittä eri nestettä: tislattua vettä, etyleeniglykolia, trikresyylifosfaattia, formamidia ja di-iodometaania. Nesteiden kosketuskulmat materiaalien pinnoilla määritettiin ja pintaenergiat laskettiin käyttäen OWRK metodia.

5.3 Käytetyistä materiaaleista

5.3.1 Musteet

Tulostusmusteina käytettiin kolmea eri UV-mustetta: UV väri 1, UV väri 2 ja UV väri 3, sekä yhtä vesipohjaista väriä (vesipohjainen väri 1).

UV väri 1 –sarjan musteet ovat akrylaattipohjaisia UV-kuivuvia musteita, jotka soveltuvat monille eri alustoille. UV väri 1-musteet ovat miedon hajuisia ja nopeasti kuivuvia, minkä vuoksi ne soveltuvat myös pienitehoisemmille UV-kuivauslaitteistoille. Myös UV väri 2 on akrylaattipohjainen ja se on suunniteltu erityisesti Xaar 1001-inkjetpäille. Musteella on tavanomaista suurempi joustavuus, joten se soveltuu hyvin myös joustaville ja semi-joustaville substraateille. Värin adheesiota olefiinisille muoveille voidaan valmistajan mukaan parantaa korona- tai plasmakäsittelyllä. Muste sopii myös ulkokäyttöön tarkoitetuille tuotteille.

UV väri 3 on vähäisen migraation UV-kuivuva yleismuste, joka soveltuu mm. papereille, kartongeille ja muoveille. Metallipinnoille suositellaan esikäsittelyä (primeria), jotta adheesio saadaan riittävälle tasolle.

Vesipohjainen väri 1:tä on tällä hetkellä saatavilla vain ”hitaille” väripäille, esim. Epson DX4 ja DX5. Väriä kuitenkin kehitetään viskoottisemmaksi eli soveltuvaksi myös nopeammille päille. Materiaaleille suositellaan esi- ja jälkilämmitystä (noin 50 °C), erityisesti jos substraatti on ei-huokoinen. Tulostuskokeet tehtiin mustevalmistajan omilla laitteistoilla Epson DX väripäillä PET-kalvolle, harmaalle polykarbonaatille sekä pigmenttipäällystetyille kartongille ja PE-päällystetyille kartongille.

5.3.2 Substraatit

Tulostusalustoina käytettiin seitsemää eri tavoin päällystettyä kartonkia, jotka nimettiin seuraavasti: pigmenttipäällystetty kartonki, polymeeripäällystetty kartonki 1, polymeeripäällystetty kartonki 2, polymeeripäällystetty kartonki 3, PET-päällystetty kartonki, PE-päällystetty kartonki 1 ja PE-päällystetty kartonki 2. Kartonkien lisäksi tulostusalustoina käytettiin kahdella eri metallilla päällystettyä ja lakattua kuparilevyä (esihopea, hopea) sekä lakattu kuparilevy ja lakattu messinkilevy, paksumpaa PET-materiaalia sekä PET-kalvoa, ABS-muovia, polykarbonaattimuovia (kirkas ja harmaa) sekä polyuretaania. Näistä valittiin esikokeiden perusteella mielenkiintoisimmat näytteet: pigmentti- ja PE-päällystetty (1) kartonki, hopeoitu kuparilevy, PET-materiaali, harmaa PC ja polyuretaani.

6 Tulokset

6.1 Materiaalivuorovaikutukset

6.1.1 Värin ja pinnan välinen adheesio

Värin ja pinnan välistä adheesiota tutkittiin kestopesteillä, jotka sisälsivät teippitestin, raaputustestin ja kemikaalinkestotestejä. Koronakäsittelyn vaikutuksia testattiin UV väri 1:llä, UV väri 1:llä ja UV väri 2:lla kestopestit tehtiin kaikille alustoille, UV väri 3:lla ja Vesipohjaisella väri 1:llä vain osalle. UV väri 3:lla testit tehtiin kiinnostaviksi valituille substraateille.

Kartongeille tehdyissä teippitesteissä voitiin havaita pinnan adheesio olevan hyvä kaikilla musteilla. Teippi repi ainoastaan PE-päällystetyn kartongin tapauksessa kartongin pintaa, mutta ei erityisesti tulostusjälkeä ja pigmenttipäällystetyllä kartongilla teippitesteissä ei irronnut painoväriä. Raaputustesteissä väriä irtosi ainoastaan polymeeripäällystetty kartonki 1:stä, PET-päällystetystä kartongista ja 2PE-päällystetystä kartongista.

Pinnoitetulla kuparilevyillä ainoa teippitestin kestänyt tulos saavutettiin UV väri 1-sarjalla koronakäsittelyn jälkeen. Koronakäsittely kuitenkin heikensi samalla tulostuslaatua. Raaputustesteissä kuparilevyjen lakattu metallipinta ei kestänyt. Kaikista kuparinäytteistä lähti väriä irti, mutta vähiten esihopeoidusta kuparilevyistä (UV väri 1 ja UV väri 2).

Paksumpi PET-materiaali kesti teippitestiä UV väri 1:llä ja UV väri 2:lla, mutta ei UV väri 3:lla. Raaputustesteissä väri irtosi helposti kaikilla värisarjoilla. Ohuempi PET-kalvo kesti kestopestit paksumpaa paremmin, sillä raaputus- tai teippitesteissä ei saatu viotusjälkeä väripintaan aikaiseksi (UV väri 3, Vesipohjainen väri 1).



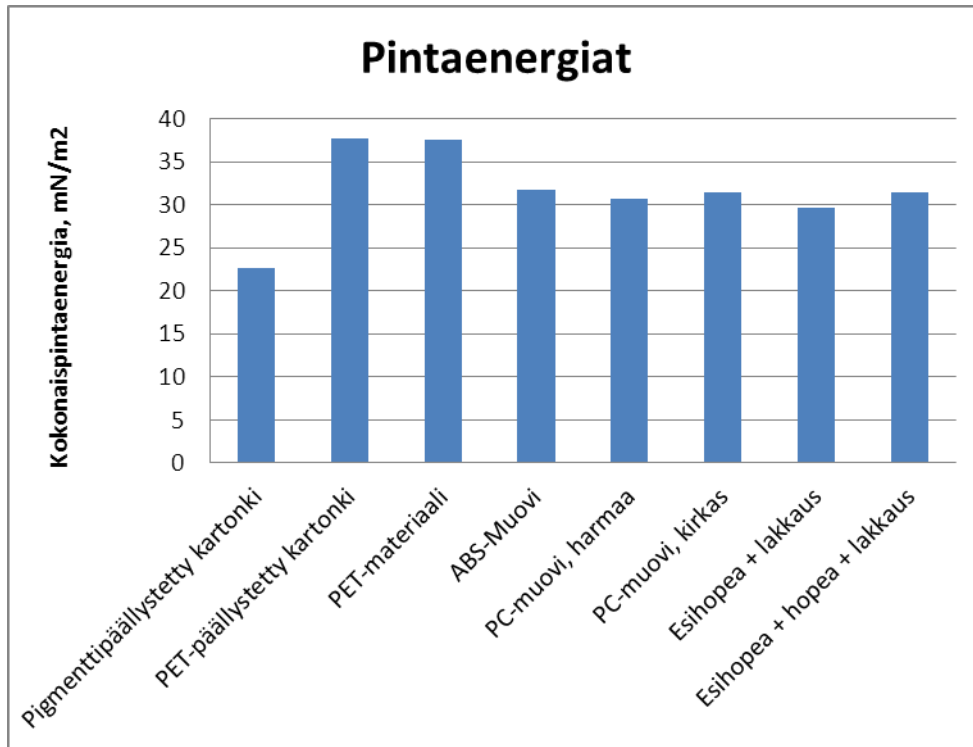
Kuva 3. UV väri 3:lla tulostettua paksumpaa PET-materiaalia

Kovista muoveista UV väri 1:llä ja UV väri 2:lla testattiin ABS, kirkas polykarbonaatti ja harmaa polykarbonaatti sekä UV väri 3:lla ja vesipohjaisella väri 1:llä harmaa-PC. Kaikki muovit selvisivät teippitesteistä ilman väripinnan irtoamista. Raaputustesteissä UV väri 2:lla tulostetut muovipinnat olivat ainoat, joissa väri lähti irti.

Kemikaalinkestotesteissä sekä UV väri 1:llä että UV väri 2:lla tulostettuihin näytteisiin tuli värimuutoksia polymeeripäällystetylle kartongille 1 ja polymeeripäällystetylle kartongille 3 sekä PE-päällystetylle kartongille kaikilla kemikaaleilla. Liuskoissa värimuutos havaittiin ainoastaan emäksen kohdalla, joissa myös muutokset kartongeissa olivat suurimmat. Metallipäällystetyillä kuparilevyillä ja polykarbonaateilla emäsluiskassa oli väriä, mutta itse väripinnalla ei silmämääräisesti havaittu muutoksia. Heksaanibensiini ei irrottanut polykarbonaattilevyistä mustetta. Polyuretaanista jäi pienet jäljet liinaan sekä heksaanibensiinillä että etanolilla. Polyuretaanipinnan painojälkeen ei kuitenkaan tullut silmämääräisesti havaittavia muutoksia.

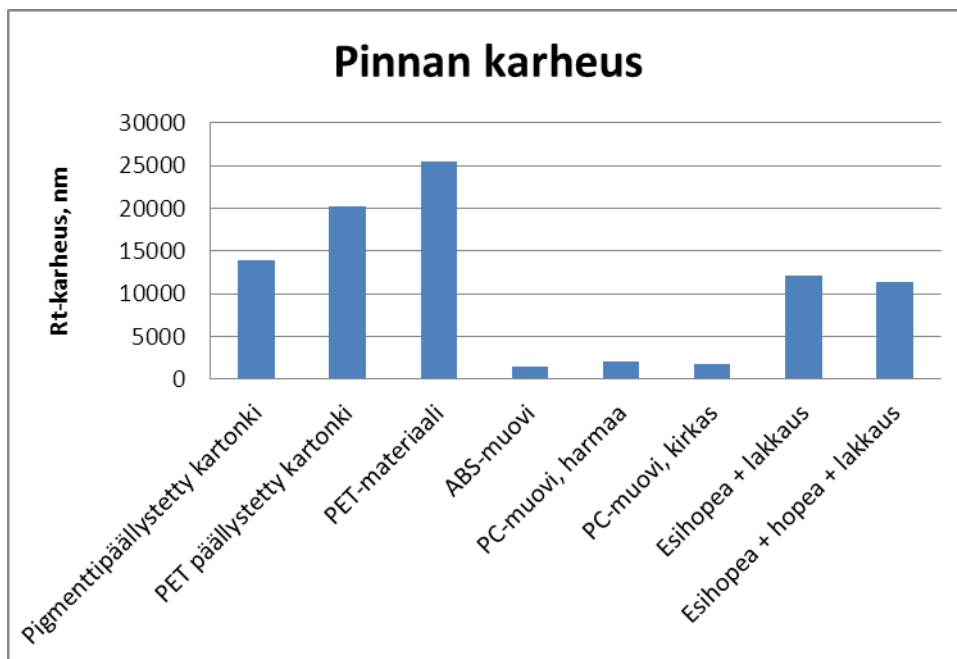
6.1.2 Substraatteihin liittyvät tulokset

Kuva 4 esittää pintaenergioita. Merkittävimmin muista näytteistä poikkeaa pintaenergiansa puolesta pigmenttipäällystetty kartonki, jonka pintaenergia on selkeästi muita näytteitä matalampi. Korkeimmat pintaenergiat ovat PET päällystetyllä kartongilla ja paksulla PET-kalvolla.



Kuva 4. Materiaaleille määritettyjä pintaenergioita. Määrittäminen tehtiin kosketuskulmamittauksen avulla.

Kuvassa 5 on esitetty materiaalien pinnan karheudet. Näytteistä ABS- ja PC muovit olivat selvästi sileimpiä, kun taas PET-muovi (paksu PET-materiaali) oli näytteistä karhein.



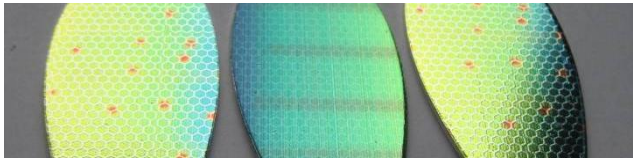
Kuva 5. Materiaalien pintakarheuksia määritettynä profiilometrillä. Lukuarvon kasvaminen tarkoittaa materiaalin pintakarheuden lisääntymistä.

6.1.3 Näytteiden visuaalinen laatu

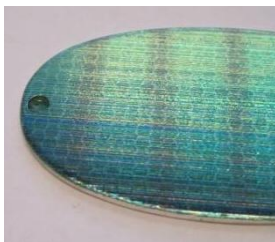
Laatupotentiaalipainatukset suoritettiin DWP-tulostimella (Xaar 1001-väripäät), jossa musteena käytettiin UV väri 2 -värisarjaa. Tarkoituksena oli tuottaa parasta mahdollista tulostuslaatua ja apuvälineinä käytettiin pinning-lamppuja ja koronakäsittelylaitetta. Pinning-lamput ovat UV-LED-lamppuja, jotka on asennettu jokaisen osaväriin jälkeen kuivattamaan osittain UV-väriä. Pinning-lampuista voidaan käyttää 0-4 lamppua kerrallaan. Kaikki näytteet kuivattiin lisäksi UV-jälkikuivaimella. Lisäksi testattiin koronakäsittelyn vaikutusta tulostusjälkeen. Polyuretaania lukuun ottamatta kaikki näytteet pyyhittiin isopropanolilla ennen tulostusta. Visuaalista laatua ja tulostusjäljen tasaisuutta tarkasteltiin myös muilla musteilla tulostetuista näytteistä.

Kartongeista testeihin valittiin pigmentti- ja PE-päällystetyt kartongit. Pinning-lamppujen käyttö on olennaista, sillä ilman niitä muste levisi liikaa pigmenttipäällysteisen kartongin pinnalle ja absorboitui PE-päällystettyyn kartonkiin. Pinning-lamppujen kanssa tulostusjälki oli erinomaista ja lähes raidatonta PE-päällystetyssä kartongissa. Pigmenttipäällystetyssä kartongissa jälki oli raidallista, mutta yksityiskohtien toistokyky oli hyvä. Koronakäsittelyllä ei ollut vaikutusta tulostusjälkeen.

Pinnoitetulla metallipäällystetyillä kuparilevyillä optimaalinen tulostuslaatu saavutettiin käyttämällä ainoastaan viimeistä pinning-lamppua. Kaikkien pinninglamppujen käyttö aiheutti liian nopean värin kiinnittymisen, jolloin väripinta jäi raidalliseksi. Myös ilman pinning-lamppuja tulostuslaatu oli raidatonta, joskin yksityiskohtien toistokyky hieman heikkeni. Tästä johtuen voitiin todeta, että pelkkä jälkikuivatuskin todennäköisesti riittää, mikäli se suoritetaan välittömästi tulostuksen jälkeen. Koronakäsittelyn todettiin huonontavan laatua.



Kuva 6. Tulostuslaatua pinnoitetulla metallipäällystetyillä kuparilevyillä



Kuva 7. Pinninglamppujen käyttö aiheutti raidallisuutta

Harmaan polykarbonaatin kohdalla pinning-lamppujen käyttö lisäsi tulostusjäljen raidallisuutta, mutta pinning-lamppujen pois jättäminen aiheutti ”suttuisuutta” ja epätarkkuutta eli väri levisi epätasaisesti. Koronakäsittelyllä ei ollut merkittävää vaikutusta tulostusjälkeen. UV väri 3:lla tulostusjäljestä saatiin lähes täysin tasaista ja reunoista tarkkoja ilman välikuivaimia.



Kuva 8. Polykarbonaatilla yksityiskohta ilman pinninglamppuja (vas.) ja pinning-lamppujen kanssa (oik.)



Kuva 9. Polykarbonaatti

PET-materiaalin pinnalle ei saatu aikaan laadullisesti tyydyttävää painatusjälkeä UV väri 2 -värisarjalla. Pinning-lamppujen kanssa tulostuslaatu oli erittäin raidallista ja ilman pinning-lamppuja väri levisi ja yksityiskohtien toistokyky huononi merkittävästi. Koronakäsittelyllä ei ollut vaikutusta tulostusjälkeen. UV väri 3:lla tehtyjen yksiväristen tulostuskokeet PET-materiaalille vaikuttivat lupaavilta, kun tarkasteltiin tulostusjäljen tasaisuutta ja reunan tarkkuutta. Yhden osaväriin perustuva testi ei kuitenkaan anna kattavaa kuvaa laatutasosta.



Kuva 10. PET-materiaalilla tulostusjälki oli raidallista sekä pinninglamppujen kanssa (vas.) että ilman (oik.). Ilman pinningkuivausta yksityiskohtien toistokyky oli heikko

Polyuretaanin kohdalla tuotteeseen nähden riittävä laatu saatiin aikaiseksi ilman koronakäsittelyä ja ilman pinning-lamppuja kaikilla musteilla.

Laatua tarkasteltiin myös Vesipohjaisilla väreillä 1 painetuista näytteistä. Näytteet painettiin Epsonin 4880 skannaavalla mustesuihkutulostimella (1440dpi). Tulostimen resoluutio on huomattavasti DWP:tä (360 dpi) korkeampi, joten näytteitä ei voi suoraan vertailla keskenään,

mutta värin leviämistä, tasaisuutta ja yksityiskohtien toistokykyä eri substraateille voitiin arvioida tulostetuista näytteistä.

Tulostusjälki kummallekin testatulle kartongille oli erinomaista. Väri tosin imeytyi PE-päällystettyyn huomattavasti enemmän kuin UV-pohjaisilla väreillä, mikä heikensi mustan densiteettiä. Polykarbonaatilla yksityiskohtien toistokyky oli erinomaista, mutta ongelmia aiheuttivat paksut täyspeitteiset väripinnat, jotka halkeilivat paikoin. Vesipohjainen väri 1 suoriutui ohuella PET-kalvolla ongelmitta. Väripinnat olivat tasaisia ja yksityiskohdat toistuivat hyvin.

6.2 Teknologinen potentiaali

6.2.1 Kuviointietäisyys

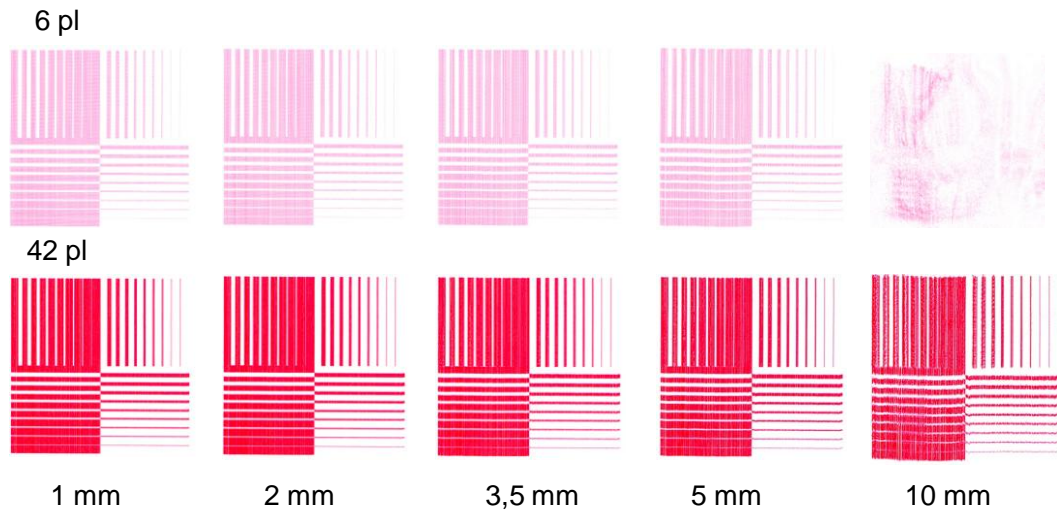
Jos kuvioitavassa kappaleessa on kaarevia pintoja tai pintoja, jotka eivät kuviointitilanteessa ole yhdensuuntaisia tulostuspään suutinlevyn kanssa, ei kuviointietäisyyttä voida pitää vakiona. Tulostuspään ja kuvioitavan pinnan etäisyyden vaikutusta kuviointitulokseen selvitettiin neljällä eri tulostuspäällä kokeissa, joissa muutettiin kuviointietäisyyttä, tulostusnopeutta ja tulostuspään ohjausjännitettä. Lisäksi tutkittiin tulostuspään ja kuvioitavan pinnan välisen kulman vaikutusta kuvioiden laatuun kolmessa eri koejärjestelyssä.

Kokeissa käytettiin Xaarin 1001-päiden lisäksi Dimatix SE128-, SL128- ja SX128-tulostuspäitä. Seuraavassa taulukossa on lueteltu tulostuspäiden tuottamat pisarakoot ja pisaroiden lentonopeudet, kun tulostuspään ohjausjännite on valittu pientä tulostusetäisyyttä (n. 2 mm) silmällä pitäen.

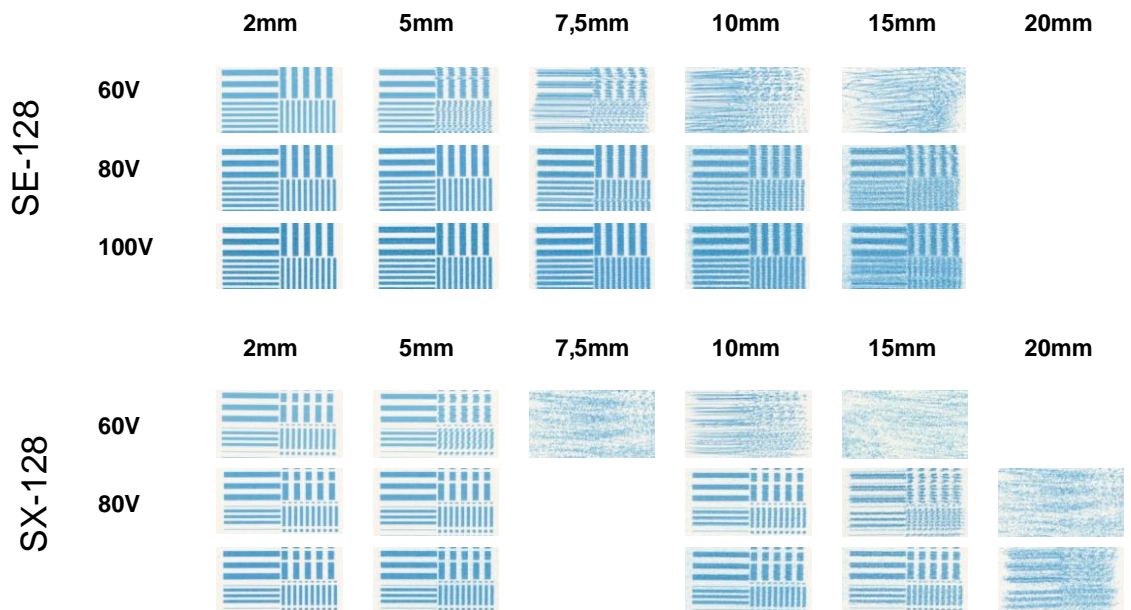
Taulukko 1. Tulostuspäiden tuottamien pisaroiden mitattuja ominaisuuksia

Pää	Tilavuus	Nopeus
SX128	20 pl@60 V	2,2 m/s@60V
SE128	31 pl@60 V	3,6 m/s@60 V
SL128	47 pl@60 V	2,8 m/s@60 V
Xaar 1001	~30-35 pl	~4 m/s

Kuvissa 11 ja 12 on esimerkkejä eri etäisyyksiltä tulostetuista viivakuvioista. Useimmissa tapauksissa kuvan laatu heikkenee etäisyyden kasvaessa 5 mm:stä 10 mm:iin. Dimatixin SE- ja SX-päillä nähdään kuviointituloksen olevan parempi, kun tulostusjännitettä on nostettu 80 tai 100 V:iin.



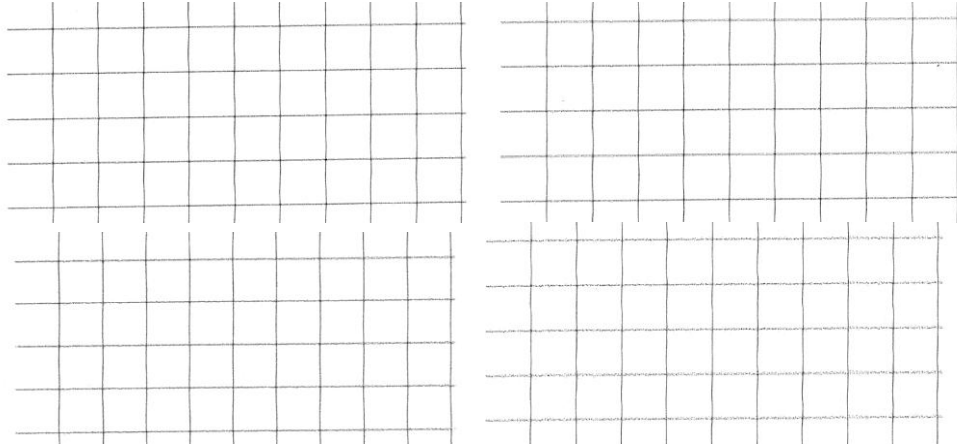
Kuva 11. Tulostusesimerkkejä Xaar 1001-päällä eri tulostusetäisyyksillä. Ylärivissä pisaran koko on 6 pl, alarivissä 42 pl.



Kuva 12. Tulostusesimerkkejä Dimatixin päällä, kun tulostusetäisyyttä ja -jännitettä on muutettu.

Tuloksista nähdään, että tulostusetäisyyden kasvaessa parempi tulostusjälki saavutetaan, kun pisaran koko on suurempi (42 pl Xaar 1001-päällä, SE-128 -pää) tai pisaran lähtönopeus on suurempi (tulostusjännite 80 V tai enemmän).

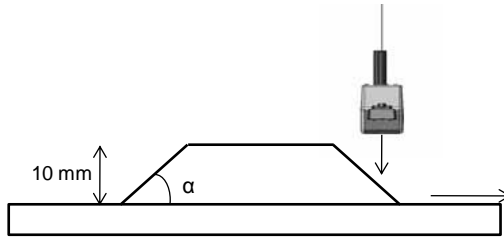
Integrointitestauksen yhteydessä tehtiin koesarja, jossa vaakatasossa olevalle paperille tulostettiin ruutukuviota robotin käsivarteen kiinnitetyn tulostuspään avulla. Ajosuuntaa vastaan kohtisuorat viivat olivat selvästi epätasaisempia kuin ajosuuntaiset viivat, kun kuviointietäisyys oli yli 4 mm. Viivojen epätasaisuus johtunee eroista pisaroiden lentoajoissa tai ajosuuntaisten ilmapirtauksien pienimittakaavaisista vaihteluista.



Kuva 13. Tulostusetäisyyden vaikutus viivakuvioidiin. Tulostuspään etäisyys vaakasuorassa olevan substraatin pinnasta $h=1$ mm (vasemmalla ylhäällä), $h=2$ mm (oikealla ylhäällä), $h=4$ mm (vas. alh.), $h=7$ mm (oik. alh.)

Eri koevaiheissa tutkittiin myös tulostuspään ja kuvioitavan pinnan välisen kulman vaikutusta kuviointitulokseen. Myös näissä kokeissa keskeinen muuttuja on tulostuspään ja kuvioitavan pinnan välinen paikallinen etäisyys.

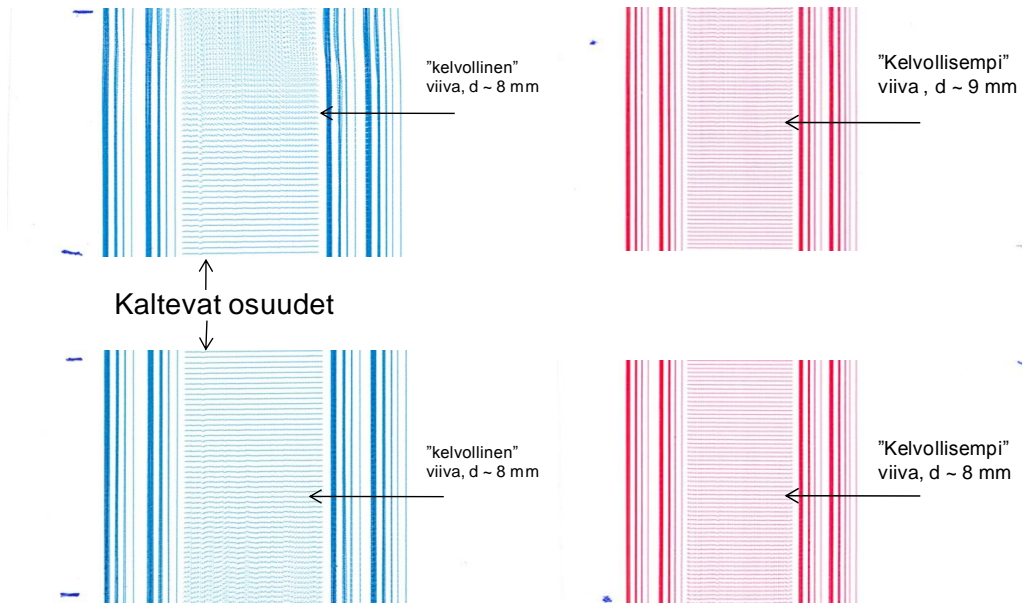
Ensimmäisessä kokeessa paikallaan olevan tulostuspään ali kuljetettiin kappaleita, joiden yläpinnassa on liikesuunnassa nousevia ja laskevia rampeja.



Kuva 14. Kappale, jossa on tulostussuunnassa nousevia ja laskevia pintoja. Kulma α voi olla 15° , 30° , 45° tai 60° .

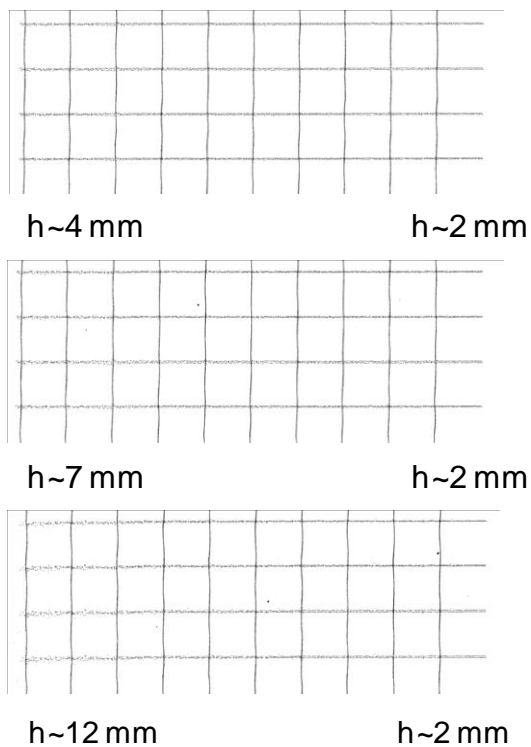
Kappaleen päälle kiinnitetylle paperiarkille tulostettiin kuva, jossa on tasavälein kapeita ajosuuntaa vastaan kohtisuorassa olevia viivoja. Viivojen toistumista (leveys, epätasaisuus) tarkastelemalla saatiin arvio suurimmasta hyväksyttävästä kuviointietäisyydestä.

Kuvassa on esimerkkejä Dimatixin SL-128- ja Xaarin X1001-päillä saaduista tuloksista. Suurimmaksi hyväksyttäväksi etäisyydeksi arvioitiin n. 8 mm.



Kuva 15. 15° kulmassa olevalle pinnalle kiinnitettylle paperiarkille tulostettuja viivoja. Vasemmalla Dimatix SL128-pää, oikealla Xaar 1001-pää.

Vaakatasossa olevalle paperille tulostettiin ruutukuvioita robotin käsivarteen kiinnitetyn tulostuspään avulla. Päätä kallistettiin siten, että suutinrivien toinen reuna oli 4 mm:n korkeudella tulostusalustasta toisen reunan ollessa 2 mm:n korkeudella (kuva 16).

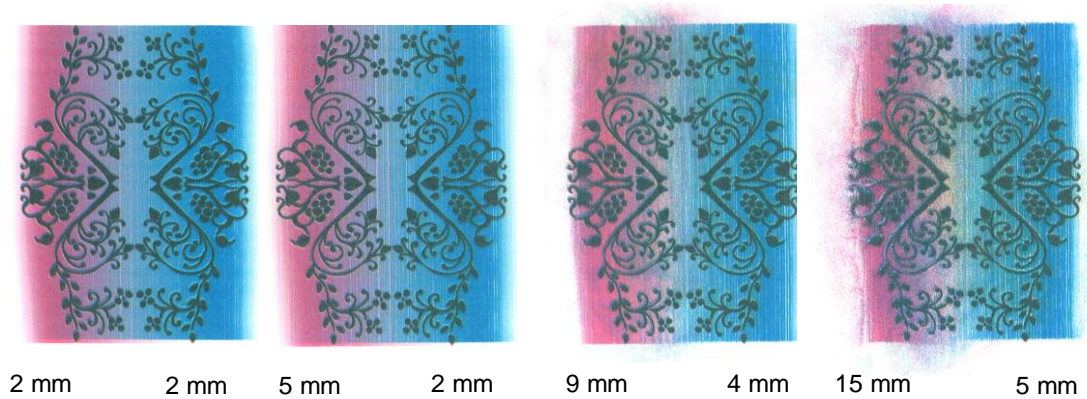


Kuva 16. Esimerkkejä ruutukuvioista, jotka on tulostettu tulostuspään toinen (kuvassa vasen) reuna ylempänä. Tulostuspään kulkusuunta kuvissa alaspäin.

Kun tulostuspään vasemman reunan etäisyys kuvioitavasta pinnasta on yli 4 mm, ovat poikkisuuntaisten viivojen vasemmat päät leveämpiä ja rosoisempia kuin viivojen pienemmältä etäisyydeltä tulostetut osat. Kun pään ja pinnan etäisyys kasvaa yli 7 mm:n,

alkavat kuvissa poikkisuuntaisten viivojen vasemmat päät kaartua tulostuspään kulkusuunnassa eteenpäin pisaroiden pidemmän lentoajan takia.

Toisessa integrointikoevaiheessa kuvioitavaa kappaletta liikutettiin kiinteästi asennettujen tulostuspäiden alla. Vaiheen yhdessä koesarjassa tulostettiin kuvio tasopinnalle, jota kallistettiin sivusuunnassa. Kuvasta 17 nähdään, että kuviointietäisyyden kasvaessa yli 5 mm:n osa pisaroista osuu suunnitellun kuva-alueen ulkopuolelle ja aiheuttaa kuvion värikenttien leviämistä.

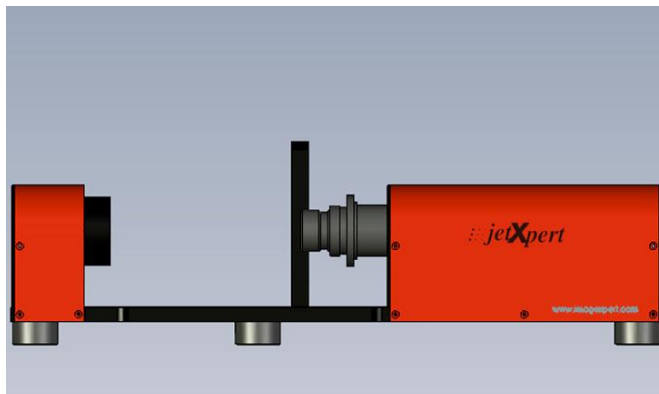


Kuva 17. Tulostettavan pinnan kallistamisen vaikutus tulostusjälkeen. Arvioitu tulostusetäisyys kuvion reunojen kohdalla on merkitty kuvioiden alapuolelle.

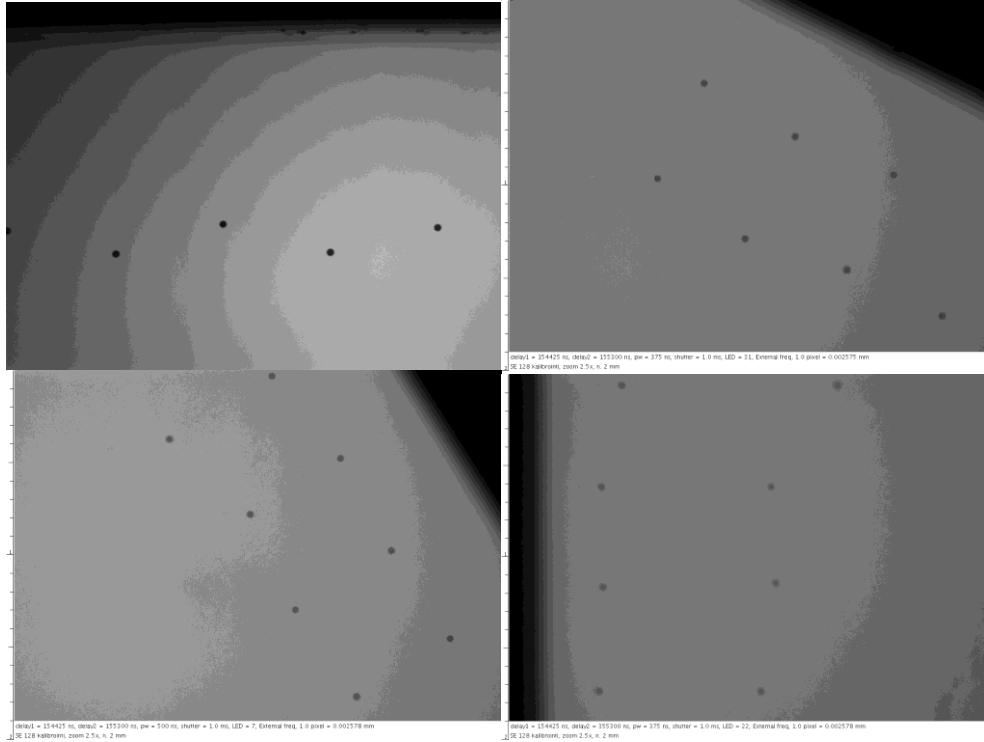
6.2.2 Tulostuspään toiminta haastavassa ympäristössä

Kolmiulotteisten kappaleiden kuvioiminen tuotantomittakaavassa asettaa erityisiä vaatimuksia tulostuspäälle ja värin syöttöjärjestelmälle. Tulostuspäätä saatetaan joutua käyttämään asennoissa, joissa väriä ei applikoida suoraan alaspäin vaan lähes mielivaltaisiin suuntiin. Mikäli tulostuspäätä liikutellaan, joutuvat myös siihen liittyvät muut komponentit sekä kaapelit ja letkut alttiiksi toistuvalla nopealiikkeiselle rasitukselle.

Tulostuspäiden toimintaa eri asennoissa tutkittiin ImageXpertin JetXpert-laitteistolla. Laitteessa tulostuspäätä asetetaan kameran ja valonlähteen väliin ja pisaran muodostumista tulostuspään suuttimista seurataan ottamalla pisarointiin tahdistettuja kuvasarjoja. Kokeissa käytettiin Dimatixin 128-suuttimisia päitä ja Xaar 1001-päitä. Päitä kallistettiin sivusuunnassa 25, 60 ja 90 astetta.

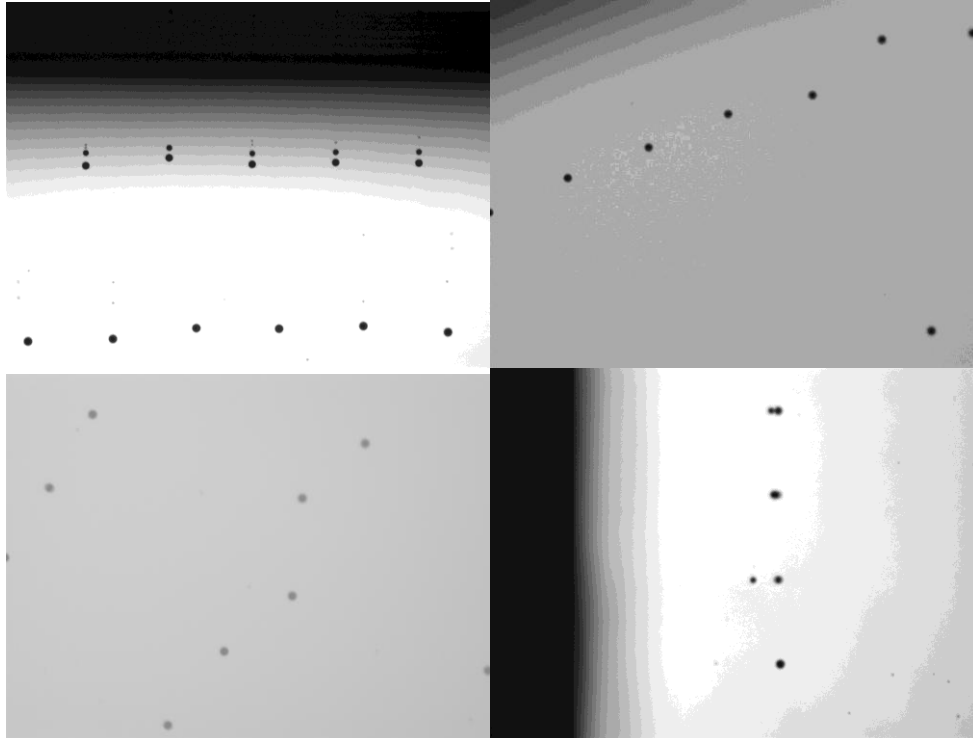


Kuva 18. JetXpert-laitteisto. Vasemmalla valonlähde (stroboskooppi) ja oikealla kamera. Tulostuspäätä voidaan kiinnittää kameran objektiivin etuosan vieressä olevaan telineeseen.



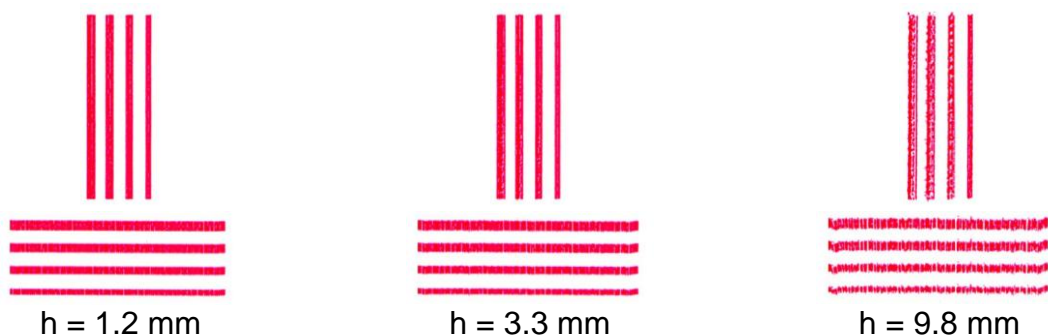
Kuva 19. Dimatix SE128-tulostuspään toiminta, kallistuskulma 0°, 25°, 60° ja 90°. Tulostuspää näkyy kuvassa tummana alueena

Dimatixin SE128-pään pisaroiden eteneminen ei ollut aivan tasaista. Kuvasta 19 nähdään, kuinka 90 astetta kallistetun pään ylin näkyvä pisarajono etenee huomattavasti nopeammin kuin muista näkyvistä suuttimista lähteneet pisarat. Myös 60 ja 25 astetta kallistetun ja kallistamattoman pään suuttimista lähteneet pisarat eivät muodosta aivan suoria rintamia. Tämä johtuu eroista joko pisaroiden lentonopeuksissa tai lähtöhetkissä. Erityisesti erot ajankohdissa, jolloin pisarat osuvat kuvioitavaan pintaan, aiheuttavat rosoisuutta ei-ajosuuntaisissa viivoissa ja kuvioiden reunoissa.



Kuva 20. Xaar 1001-pään toiminta eri asennoissa. Kallistuskulmat 0° , 25° , 60° ja 90° .

Xaar 1001-pään tapauksessa on myös nähtävissä poikkeamia suorista pisarariveistä. Johtuivatpa erot vaihtelusta pisaroiden lähtönopeudessa tai lähtöhetkessä, erojen takia pisarat osuvat substraattiin hieman eri aikaan. Tämä aiheuttaa epätasaisuutta poikkisuuntaisissa viivoissa ja kuvioiden reunoissa. Tulostussuuntaisissa kuvioissa nämä ajoitusvirheet eivät yleensä näy, paitsi esimerkiksi viivojen päiden epätasaisuutena. Kun tulostusetäisyys on suurempi, myös erot pisaroiden lentonopeudessa korostuvat. Suurilla tulostusetäisyyksillä myös tulostussuuntaiset reunat voivat olla epätasaisia esimerkiksi pisaroihin kohdistuvien sivusuuntaisten ilmavirtauksien takia.



Kuva 21. Esimerkkejä Xaar 1001 -päällä tulostetuista tulostus- ja poikkisuuntaisista viivoista. Näyte on liikkunut alhaalta ylöspäin.

Tulostuspäiden ja värin syöttöjärjestelmän luotettavuus

Tulostuspäiden toimintavarmuutta arvioitiin n. työpäivän mittaisten käyttötestien avulla. Testattavilla tulostuspäillä tulostettiin yksinkertaista viivakuviota, johon tarvittiin pään kaikkia suuttimia. Määräajoin tulostettiin testikuva, jonka avulla arvioitiin pään kuntoa. Sekä Dimatix SE 128, että Xaar 1001 päiden tuottama tulostusjälki säilyi muuttumattomana kokeen ajan, Dimatixin päässä jopa aikaisemmin toimimaton suutin alkoi toimia testin aikana. koe

vahvasti käsitystä, jonka mukaan inkjet-tulostuspäät usein toimivat parhaiten jatkuvassa tulostuskäytössä.

Kuten aikaisemmin mainittiin, tulostuspään ohella myös värinsyöttöjärjestelmän toimintavarmuus on tärkeä asia ajateltaessa kolmiulotteisten kappaleiden kuviointia. Kokeiden aikana kriittiseksi tekijäksi osoittautui värin esteetön virtaus värisäiliöstä tulostuspäähän ja takaisin.

Xaarin Hydra-värijärjestelmässä väri kiertää jatkuvasti tulostuspään ja värisäiliön läpi. Yleensä väri johdetaan tulostuspäähän taipuisien letkujen avulla. Kokeiden aikana Hydra-järjestelmässä esiintyi kahden tyyppisiä värin virtaushäiriöitä

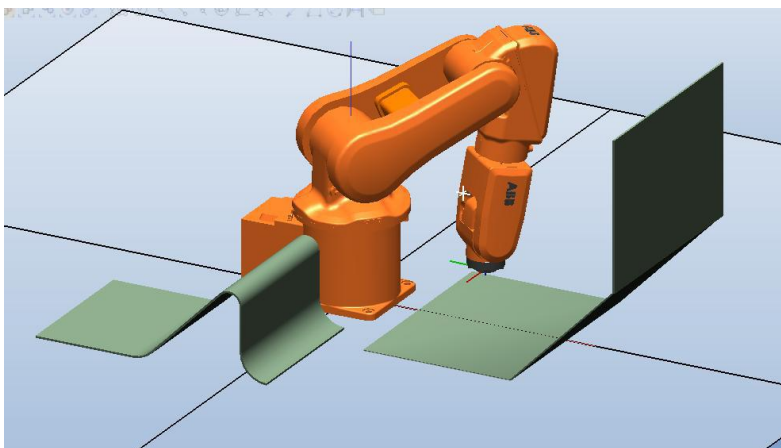
Kun robottiin kiinnitetty tulostuspää nostettiin ylös robotin ääriasentoon, värijärjestelmän pumppu pysähtyi, todennäköisesti tulostuspään ja värisäiliön liian suuren korkeuseron (n. 1,5 m) takia. Tilanteessa tulostuspää oli ylösalaisin ja värijärjestelmään kuuluva ns. anturilaatikko oli tulostuspään alapuolella, kun se tavallisesti on pään yläpuolella. Sama, n. 1,5 m:n korkeusero on osoittautunut liian suureksi myös paikallaan olevien tulostuspäiden tapauksessa.

Jos värin syöttöletkuun tulee virtaushäiriö esimerkiksi letkun taittumisen takia, on seurauksena yleensä pumpun pysähtyminen. Jos kuitenkin häiriö loppuu nopeasti, voi seurauksena olla painepulssi värijärjestelmässä, joka voi aiheuttaa hetkellisesti värin hallitsematonta suihkuamista tulostuspään suuttimista.

Yksi kokeiden aikana esiin tullut ongelmatilanne johtui värijärjestelmän ja anturikotelon välisen kaapelin vioittumisesta monipäiväisen robottikokeen aikana. Robotti liikutti tulostuspäätä ja anturikoteloa yhteensä n. 20 tuntia, minkä jälkeen väriä valui tulostuspään suuttimista aina, kun värijärjestelmä käynnistettiin. Vika paikallistettiin kaapelin anturikotelon puoleiseen liittimeen, josta oli yksi johdin irronnut. Liittimen vedonpoisto ei estänyt vian syntymistä.

6.2.3 Integrointiin liittyvät testit

Ensimmäisessä integrointikoesarjassa tulostuspää oli kiinnitetty robottiin. Kokeita varten rakennettiin kuvan 22 mukaiset tulostusalustat, joiden päälle kiinnitettiin paperiarkki tulostuksen ajaksi.



Kuva 22. Robotti ja ensimmäisen koesarjan tulostusalustat

Xaar 1001 -tulostuspään suuttimet on sijoitettu kahteen riviin, joiden välimatka on 3 mm. Suutinrivien etäisyys on otettava huomioon, kun tulostuspäiden ajosuuntaista kohdistusta säädetään ohjaussovelluksessa. Tulostuspäiden toimintaa ohjataan toisaalta matkapulsseilla, jotka saadaan muunnettua robotin työkalupisteen nopeustiedosta, ja toisaalta tulostuksen aloituspulssilla, jona käytettiin yhtä robotin digitaalista lähtösignaalia.

Robotin työkalupiste asetettiin n. 5 mm etäisyydelle tulostuspään suutinmatriisin keskikohdasta (rivien keskikohtien välisen janan keskipisteestä).

Ruutukuviota tulostettiin tasopinnoille jotka olivat vaakasuoria (0°), 45° kulmassa ja pystysuoria (90°). Pystysuoralle pinnalle tulostettaessa kuvion yläreunasta jäi kaksi ajosuuntaista viivaa tulostumatta. Viivojen puuttuminen on todennäköisesti johtunut suuttimien toimimattomuudesta joko tukoksen tai pään asennosta johtuvan värin virtaushäiriön takia.

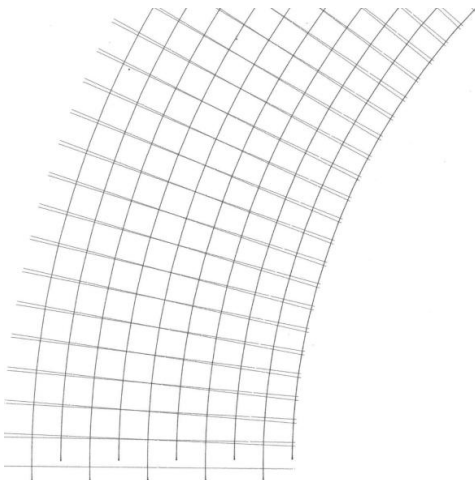
Kuperalle pinnalle tulostettaessa tulostettava kuvio venyi tulostussuunnassa n. 7 %. Vääristymä johtuu todennäköisesti erosta tulostusalustan todellisen muodon ja robotin ohjaukseen käytetyn työkalupisteen liikeradan välillä. Tulostetuista piirroskuvista vääristymien havaitseminen silmämääräisesti on vaikeaa.

Ruutukuvion tulostaminen 90 asteen särmän yli onnistui yhdistämällä kaksi pyyhkäisyä. Tulostuksen aloituspulssi ja robotin liike on synkronoitava tarkasti.

Tulostuspään kaksirivisyyden aiheuttamat ongelmat

Terävä särmän yli tulostaminen on yksi esimerkki kaksirivisen tulostuspään kannalta hankalasta kappaleen muodosta. Jos aivan särmän viereen halutaan tulostaa sen suuntainen viiva, saattavat suutinrivit olla pisarointihetkellä särmän eri puolilla.

Jos tulostuspään (ja työkalupisteen) liikesuunta poikkeaa suunnasta, jossa suutinrivien kohdistus on tehty, tulostuvat rivien pisarat eri kohtiin. Kuvassa XY ruutukuviota on tulostettu tulostuspään liikkeessä ympyrän muotoista rataa pitkin. Vain suutinrivien keskikohdat ovat liikkuneet samalla nopeudella kuin työkalupiste. Kuvion reunoilla suutinrivit ovat tulostaneet viivan eri kohtiin.



Kuva 23 . Tulostuskoe, jossa tulostuspää on kulkenut ympyrärataa. Ruudukon poikkiviivat ovat jakautuneet kahtia.

Myös suoraviivaisessa kiihtyvässä liikkeessä suutinrivit saattoivat tulostaa eri kohtiin. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että robotin nopeussignaalin muuntaminen ei tapahdu aivan reaaliaikaisesti.

Toisessa koesarjassa kuvioitavaa kappaletta liikutettiin robotilla paikallaan olevien tulostuspäiden alla.

Neliväritulostus suoraviivaisesti liikkuvalla tasopinnalla sujui ongelmitta. Värien kohdistus voidaan tehdä ajosuunnassa ohjelmallisesti tulostuspäiden ohjausyksikön kautta. Jos jokainen väri tulostetaan omana pyyhkäisynään, ts. kullekin värille annetaan oma aloituspulssi, kohdistuksen voi tehdä robotin ohjausohjelman kautta.

Kuvioitaessa ei-tasomaisia kappaleita kukin väri tulostettiin omana pyyhkäisynään ja kappaletta pyöritettiin tulostuspään alla niin, että tulostuspään ja kuvioitavan pinnan etäisyys pysyi muuttumattomana. Tulostuskokeita tehtiin lieriömäiselle pinnalle, katkaistulle kartiopinnalle ja lievästi kuperalle pinnalle. Kartiomaiselle pinnalle tulostettu kuvio vääristyy kappaleen muuttuvan säteen takia.



Kuva 24. Kartiomaiselle pinnalle tulostettu kuvio.

7 Tulosten tarkastelu

Johtuen tutkimuksen tutkimusympäristökehitys-tyyppisestä luonteesta, ovat tulokset suurelta osin lähinnä kvalitatiivisia. Kun projektin keskeisimpiä tavoitteita oli tutkimusympäristön kehittäminen, ei kvantitatiivisia tuloksia synny samoissa määrin kuin perinteisissä, ongelmanratkaisuun keskittyvissä projekteissa. On myös syytä huomata, että esimerkiksi eri UV-kovettuvat värit käyttäytyivät samallakin materiaalilla melko eri tavoin. Tuloksiin tulee suhtautuakin tämän vuoksi suuntaa antavina, välttämättä liian suurina yleistyksiä.

8 Johtopäätökset

Projektin tavoitteena oli selvittää inkjet- eli mustesuihkumenetelmän soveltuvuus kolmiulotteisten kappaleiden kuviointiin. Soveltuvuutta selvitettiin sekä laboratoriomittaisten kokeiden että projektissa kehitetyn tutkimusympäristön avulla.

Tutkimusympäristön avulla tehdyt testit osoittivat, että yleisellä tasolla tarkasteltuna mustesuihkumenetelmä soveltuu kolmiulotteisten kappaleiden kuviointiin. Tavanomaisia kappaleita kyetään kuvioimaan tekniikalla moneen sovellukseen riittävällä laadulla. Tulostuspäiden toiminta ei merkittävästi häiriintynyt myöskään poikkeavasta käytöstä, jossa niitä liikuteltiin eri asennoissa. Systeemin suunnittelussa tulee kuitenkin kiinnittää erityistä huomiota muun muassa letkuihin ja johtoihin mahdollisesti kohdistuviin liikkeestä johtuviin rasituksiin.

Merkittävin tulostuslaatuun vaikuttava tekijä oli tulostuspään etäisyys kuvioitavasta pinnasta eli pisaran lentomatka. Tulostusetäisyys kuvioitavasta pinnasta vaikutti kuvanlaatuun siten, että hyväksyttävissä oleva laatu saavutettiin tyypillisesti vielä noin 5–8 millimetrin etäisyydellä, tulostusparametrejä säätämällä tätäkin pidemmällä etäisyydellä. Hyväksyttävissä olevaan tulostuslaatuun vaikuttivat pisaran koko, pisaran lentonopeus ja toisaalta tuotteeseen liittyvä laatuodotus. On todettava, että pienimittaista laadun heikkenemistä erityisesti tulostuspään suhteen poikkisuuntaisissa viivakuvioissa voitiin havaita välittömästi tulostusetäisyyden kasvettua optimaalisesta 1–2 millimetristä. Useimmissa sovelluksissa laatu on kuitenkin vielä täysin hyväksyttävää, vaikka etäisyys olisikin tätä suurempi. Koska vaadittu laatu on aina tapauskohtaista, ei ole mielekäs ilmoittaa suurinta etäisyyttä, jolta kuviointia voidaan tehdä, vaan maksimaalinen tulostusetäisyys tulisi selvittää tapauskohtaisesti. On myös mahdollista, että tulostusetäisyyttä voidaan parantaa painoväriin ominaisuuksia optimoimalla, mutta tätä ei projektissa tutkittu.

Johtuen tulostusetäisyyden aiheuttamista rajoituksista, ei suoratulostus ole yleensä mielekäs ratkaisu, jos halutaan tulostaa laajoja kuvapintoja kappaleille, joilla on pienen kaarevuussäteen kaksoiskaarevia kohtia. Tällaisia pintoja voidaan toki kuvioda, mutta kerrallaan kuvioitavan alueen koko tulisi olla silloin hyvin pieni, mikä vähentää menetelmän nopeutta ja tuottaa useita kuvallimityksiä, joissa on omat haasteensa.

Vuorovaikutuskokeet eri värien ja substraattien välillä toivat selvästi esiin, että samankin värityypin eri värisarjojen välillä on merkittäviä eroja. Projektissa testatut 3 eri UV värisarjaa erosivat toisistaan niin värin tarttumisen kuin leviämisenkin suhteen. Vielä suuremmat erot havaittiin eri substraattien välillä. Väri, joka tarttui ja levisi hallitusti yhdellä pinnalla, käyttäytyi hyvin eri tavoin toisella pinnalla. Sinällään tämä ei ollut yllättävä havainto, sillä käytetyt materiaalit poikkesivat hyvin voimakkaasti toisistaan. Yllättävää sen sijaan oli, että esimerkiksi eri PET-muovilaadut poikkesivat varsin selvästi toisistaan. Materiaalien välillä havaittuja eroja painokäyttäytymisessä ei kyetty selittämään materiaaleille tehdyillä pintaenergia ja karheusmäärittämisillä. Voidaankin todeta, että kyky ennustaa hyvin eri tyyppisten materiaalien käyttäytymistä prosessissa on heikko ja vaatisi parantuakseen tutkimuspanostusta. Käytännössä voidaan toki testata mahdollisesti lukuisiakin materiaali-väri kombinaatioita, kunnes yhteensopiva pari löytyy, mutta lähestymistapa on työläs ja aikaa vievä.

Projektissa ei kyetty löytämään kaikille substraateille toimivia väriratkaisuja, osalla substraateista toimivuus ei ollut riittävää joko väriadheesion tai visuaalisen laadun näkökulmasta. Osalle näytteistä toimivat substraatti-väri kombinaatiot taas löytyivät. On kuitenkin oletettavaa, että valtaosalle substraateista on löydettävissä toimiva väriratkaisu sekä adheesion että visuaalisen laadun suhteen, jos testausta tehdään laajasti.

Tuotteiden loppukäyttö asettaa käytetyille väriille omat vaatimuksensa. Tällaisia vaatimuksia voivat olla muun muassa määrättyjen kemikaalien kesto tai vedenkesto. Elintarvikkeiden kanssa tekemisissä olevien värien suhteen on omat säädöksensä. Näitä vaatimuksia projektissa sivuttiin hyvin pinnallisesti, mutta on tärkeää huomioida, että tällaiset tekijät ovat merkittäviä

jos suorakuviointitekniikkaa halutaan soveltaa tuotannossa. Jos vaatimukset ovat hyvin kriittisiä, on mahdollista että käytettävissä olevat värit eivät kykene näitä kaikkia vaatimuksia täyttämään.

Digitaalinen suoratulostus tarjoaa monia etuja, joita on vaikea tai jopa mahdoton saavuttaa muilla menetelmillä. Voidaankin olettaa, että suoratulostuksen käyttö kappaleiden kuvioinnissa tulee merkittävästi lisääntymään tulevaisuudessa. Projektissa kehitetty ympäristö tarjoaa hyvät puitteet sekä yksittäiseen tuotetestaukseen että laajempien tutkimuskokonaisuuksien läpiviemiseen.

9 Yhteenveto

Projektissa tutkittiin inkjet- eli mustesuihkutulostamisen soveltumista kolmiulotteisten kappaleiden kuviointiin. Keskeisimpänä tavoitteena oli rakentaa tutkimus- ja demonstraatioympäristö palvelemaan asiakastarpeita ja avaamaan uusia näkökulmia inkjetin teknologisen potentiaalin hyödyntämiseen.

Tutkimusympäristöstä rakennettiin kaksi eri versiota kattamaan yleisimmät nähtävissä olevat tarpeet. Molemmissa ympäristöissä hyödynnetään teollisuusrobottia liikutusratkaisuna. Ensimmäisessä perusratkaisussa yksi mustesuihkupää on kiinnitetty robotin työkalulaippaan, ja kappaleen kuviointi tapahtuu liikuttamalla tulostuspäätä kappaleen ympärillä. Toisessa perusratkaisussa kappaletta liikutetaan paikallaan olevien tulostuspäiden alapuolella.

Tulostusmusteina käytettiin kolmea eri UV-kuivuvaan sekä yhtä vesipohjaista väriä. Tulostusalustoina käytettiin seitsemää eri tavoin päällystettyä kartonkia, kahdella eri metallilla päällystettyä ja lakattua kuparilevyä (esihopea, hopea) sekä lakattua kuparilevyä ja lakattua messinkilevyä, paksumpaa PET-materiaalia sekä PET-kalvoa, ABS-muovia, polykarbonaattimuovia sekä polyuretaania. Näistä valittiin esikokeiden jälkeen kiinnostavimmat vaihtoehdot, jotka testattiin kaikilla musteilla.

Vuorovaikutuskokeet eri värien ja substraattien välillä toivat selvästi esiin, että samankin värityypin eri värisarjojen välillä on merkittäviä eroja. Vielä suuremmat erot havaittiin eri substraattien välillä. Väri, joka tarttui ja levisi hallitusti yhdellä pinnalla, käyttäytyi hyvin eri tavoin toisella pinnalla. Vaikka projektissa ei kyetty löytämään kaikille substraateille toimivia väriratkaisuja, on kuitenkin oletettavaa, että valtaosalle substraateista ratkaisut on löydettävissä sekä adheesion että visuaalisen laadun suhteen, jos testausta tehdään laajasti.

Tulostuspään ja kuvioitavan pinnan etäisyyden vaikutusta kuviointitulokseen selvitettiin neljällä eri tulostuspäällä kokeissa, joissa muutettiin kuviointietäisyyttä, tulostusnopeutta ja tulostuspään ohjausjännitettä. Useimmissa tapauksissa kuvan laatu heikkenee etäisyyden kasvaessa 5 mm:stä 10 mm:iin. Tulostusetäisyyttä voidaan jossain määrin kasvattaa nostamalla tulostusjännitettä eli lisäämällä pisanan lentonopeutta. Tulostusetäisyyden kasvaessa parempi tulostusjälki saavutetaan myös kasvattamalla pisanan kokoa.

Tulostuspäiden toimintaa eri asennoissa tutkittiin kallistamalla päitä sivusuunnassa 25, 60 ja 90 astetta ja ottamalla pisarointiin tahdistettuja kuvasarjoja. Kuvasarjoista todettiin, että erot pisaroiden nopeuksissa tai lähtöhetkissä ja erityisesti ajankohdissa, jolloin pisarat osuvat kuvioitavaan pintaan, aiheuttavat rosoisuutta ei-ajosuunnaisissa viivoissa ja kuvioiden reunoissa. Tilanne ei kuitenkaan olennaisesti riippunut tulostuspään asennosta, vaan ilmiö havaittiin kaikissa tilanteissa. Tulostuspäiden toimintavarmuutta arvioitiin työpäivän mittaisten käyttötestien avulla. Päiden tuottama tulostusjälki säilyi ennallaan kokeen ajan,

jopa aikaisemmin toimimaton suutin alkoi toimia testin aikana. Koe vahvisti käsitystä, jonka mukaan inkjet-tulostuspäät usein toimivat parhaiten jatkuvassa tulostuskäytössä.