

Sami Hoppula

**Mukautuvat viipalointialgoritmit lisäävässä
valmistuksessa**

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

28. huhtikuuta 2017

Jyväskylän yliopisto

Tietotekniikka

Tekijä: Sami Hoppula

Yhteystiedot: sami.j.hoppula@student.jyu.fi

Työn nimi: Mukautuvat viipalointialgoritmit lisäävässä valmistuksessa

Title in English: Adaptive slicing algorithms in additive manufacturing

Työ: Kandidaatintutkielma

Sivumäärä: 20+0

Tiivistelmä: Lisäävä valmistus on kasvattanut nopeasti suosiotaan viime vuosina. Viipalointi on oleellinen osa lisäävää valmistusta, mikä vaikuttaa esimerkiksi valmistettavan esineen pinnan laatuun, valmistusnopeuteen sekä mekaanisiin ominaisuuksiin. Tämän tutkielman tarkoituksena on selvittää, minkälaisia ominaisuuksia viipalointialgoritmilta vaaditaan ja minkälaisia menetelmiä niiden toteuttamiseen on olemassa. Mukautuvaa viipalointialgoritmia käyttämällä voidaan nopeuttaa esineen valmistusaikaa ilman, että pinnan laatu heikentyy.

Avainsanat: lisäävä valmistus, 3D-tulostaminen, viipalointi, valmistusaika, mittatarkkuus

Abstract: Additive manufacturing has rapidly gained popularity in recent years. Slicing is an important part of additive manufacturing processes. It affects the manufactured part's surface quality, build time and mechanical properties. The purpose of this thesis is to determine what kind of features are required from slicing algorithms and what kind of methods there exists for solving them. Adaptive slicing algorithm can speed up part's build time without negatively impacting its surface quality.

Keywords: additive manufacturing, 3D-printing, slicing, build time, dimensional accuracy

Kuviot

Kuvio 1. CAD-mallin viipalointi	4
Kuvio 2. Kerroskorkeuden vaikutus pinnan karkeuteen	4
Kuvio 3. Esineen asennon vaikutus pinnan karkeuteen	5
Kuvio 4. Kärkikorkeus	8
Kuvio 5. Esine, jonka ulkopinta on viipaloitu mukautuvasti	8
Kuvio 6. Paikallisesti viipaloitu esine	9
Kuvio 7. Mallin viipaloiminen jakamalla se lohkoihin	10
Kuvio 8. CAD-mallin diskreetti viipalointi	12

Sisältö

1	JOHDANTO	1
2	CAD-MALLIN VIIPALOINTI	3
	2.1 Valmistustarkkuus	3
	2.2 Valmistusnopeus	5
3	MUKAUTUVAT VIIPALOINTIALGORITMIT	7
	3.1 Mukautuva kerroskorkeus.....	7
	3.2 Tarkka ulkopinta, nopea sisäosa	8
	3.3 Paikallinen mukautuva viipalointi	9
	3.4 Silmiinpistävät piirteet säilyttävä viipalointi	10
	3.5 Optimaalinen diskreetti viipalointi	11
4	YHTEENVETO	13
	LÄHTEET.....	14

1 Johdanto

Lisäävä valmistus, joka etenkin arkikielessä tunnetaan termillä 3D-tulostaminen, on joukko valmistusmenetelmiä, joilla esineitä valmistetaan kerroksittain lisäämällä kerros materiaalia edellisen päälle. Tällaisia valmistusmenetelmiä on useita erilaisia, ja ne on kehitetty ja mukautettu vastaamaan erilaisia käyttötarpeita (Weller, Kleer ja Piller 2015).

Ensimmäiset lisäävät valmistuslaitteet tulivat myyntiin 1980-luvulla. Lisäävää valmistusta käytettiin aluksi vain prototyyppien ja havainnollistavien mallien pikavalmistukseen (Turner ja Gold 2015), koska sillä on halvempaa, helpompaa ja nopeampaa valmistaa yksittäisiä esineitä, kuin muilla valmistusmenetelmillä (Wong ja Hernandez 2012; Turner ja Gold 2015). Lisäävän valmistuksen käyttö on laajentunut nopeasti ja nykyään sille löytyy sovelluskohteita laajalla skaalalla kotikäytöstä aina auto- ja ilmailuteollisuuteen sekä lääketieteeseen (Jong ja Bruijn 2014).

Lisäävää valmistusta käytettäessä valmistettava esine mallinnetaan ensin tietokoneavusteisella suunnitteluohjelmalla (CAD-ohjelma). CAD-ohjelmassa tehtyä 3D-mallia ei kuitenkaan voida suoraan valmistaa, koska esine valmistetaan lisäämällä useita ohuita kerroksia päällekkäin. 3D-malli täytyy siis muuttaa muotoon, jossa se muodostuu päällekkäisistä kerroksista. Tätä prosessia kutsutaan viipaloimiseksi.

Viipaloointialgoritmi on oleellinen osa lisäävää valmistusta. Se vaikuttaa esimerkiksi esineen valmistusnopeuteen ja pinnan muotoon (Oropallo ja Piegl 2016). Lisäksi myös itse viipaloointiprosessin nopeus ja muistin käyttö riippuvat käytetystä algoritmista (Minetto ym. 2016).

Koska lisäävässä valmistuksessa esine valmistetaan kerroksittain johtaa se siihen, että pinnasta tulee porrasmainen. Mitä paksumpia kerrokset ovat, sitä enemmän porrasmaisuus tulee esille, ja samalla pinnan yksityiskohdat valmistuvat epätarkemmin (Gao ym. 2015). Vastaavasti ohuita kerroksia käytettäessä pinnasta tulee sileämpi ja yksityiskohdat näkyvät paremmin, mutta tällöin valmistaminen kestää kauemmin.

Tämän tutkielman tarkoituksena on kartoittaa kirjallisuutta viipalointialgoritmeihin liittyen. Tavoitteena on selvittää miten viipalointi vaikuttaa esineen valmistamiseen ja valmistetun esineen ominaisuuksiin. Erityisenä mielenkiinnon kohteena ovat mukautuvat viipalointialgoritmit.

Luvussa 2 käsitellään yleisesti CAD-mallin viipaloimista ja valmistetun esineen pinnan karkeutta. Luvussa 3 esitellään mukautuvia viipalointialgoritmeja. Luvussa 4 tehdään yhteenveto.

2 CAD-mallin viipalointi

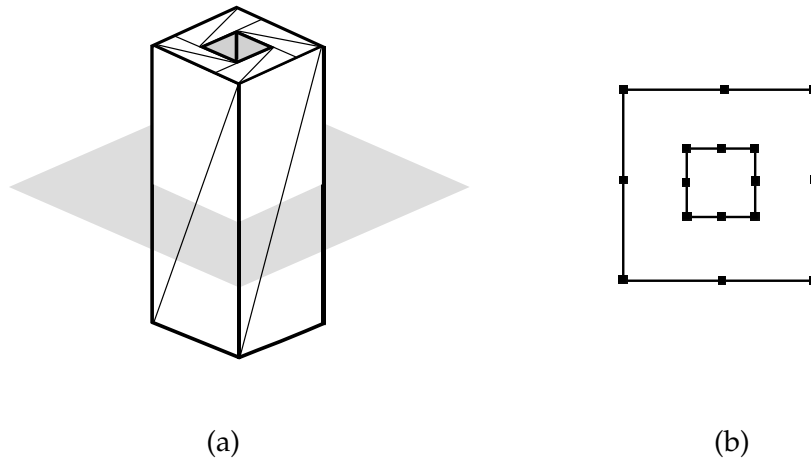
Erilaisia lisääviä valmistusmenetelmiä on useita, kuten materiaalin pursotus, valokovetus ja jauhepetisulatus. Eri menetelmissä valmistukseen käytetty materiaali on joko kiinteässä muodossa, jauheena tai nesteenä. Kiinteät aineet sulatetaan ja pursotetaan, nestemäiset materiaalit kovetetaan valolla, kuten laserilla, ja jauhe voidaan sitoa sideaineella tai kuumentamalla esimerkiksi laserilla (Wong ja Hernandez 2012). Kaikille lisääville valmistusmenetelmille on kuitenkin yhteistä se, että valmistettava esine valmistetaan kerroksittain.

Valmistettavasta esineestä tehdään 3D-malli, CAD-malli, joko mallintamalla se CAD-ohjelmassa tai käyttäen jotain kuvantamismenetelmää, kuten 3D-skanneria tai jotain lääketieteessä käytettävää kuvantamismenetelmää. Valmistamista varten CAD-malli täytyy viipaloida eli muodostaa yksittäiset valmistettavat kerrokset. Viipaloitusta varten CAD-mallin pinta usein kolmioidaan, koska kolmioista koostuvaa mallia on helppo käsitellä (Mohan Pandey, Venkata Reddy ja Dhande 2003). STL (STereoLithography) -tiedostomuoto on yleisimmin käytetty tiedostomuoto lisäävien valmistusmenetelmien yhteydessä. Siinä mallin geometria esitetään kolmioina ja niiden normaalivektoreina, eikä se sisällä muuta tietoa mallista.

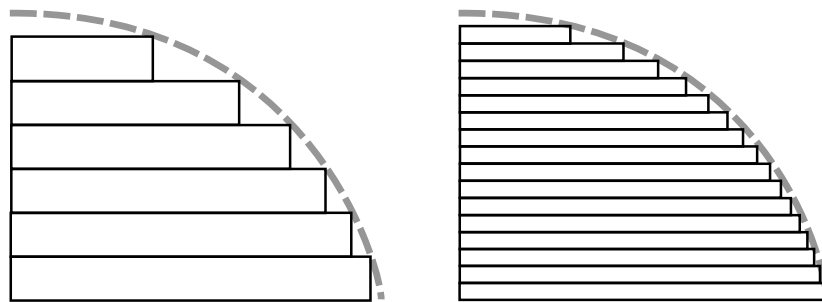
Mallia viipaloitaessa siitä muodostetaan valmistussuuntaan nähden kohtisuorassa tasossa olevia poikkileikkauksia (ks. kuvio 1). Poikkileikkaus muodostetaan etsimällä kaikki ne kolmiot, jotka viipaloititaso leikkaa, minkä jälkeen löydettyistä leikkauspisteistä muodostetaan suljettuja käyriä. Sama toistetaan kaikille viipaloititasoille. Lopuksi muodostetuista käyristä tehdään työstörata, mitä noudattaen valmistuslaite valmistaa esineen.

2.1 Valmistustarkkuus

Kerroksellinen valmistaminen johtaa siihen, että valmistetun esineen pinnasta tulee porrasmainen. Tällainen pinnan karkeus on yleinen ongelma lisäävissä valmistusmenetelmissä, ja se vaikuttaa valmistetun esineen ulkoasuun ja mekaanisiin omi-



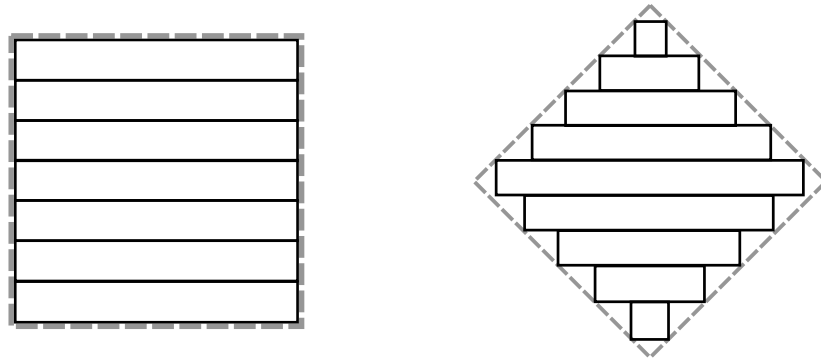
Kuvio 1: CAD-mallin viipalointi. (a) Viipalointitaso ja viipaloitava malli, jonka pinta on kolmioitu. (b) Viipalointitason ja kolmioiden väliset leikkauspisteet sekä niistä muodostetut käyrät.



Kuvio 2: Kerroskorkeuden vaikutus pinnan karkeuteen

naisuuksiin tilanteissa, joissa esineiden täytyy sopia yhteen (Ahn, Kim ja Lee 2009). Porrasmaisuutta voidaan vähentää käyttämällä ohuempia kerroksia (ks. kuvio 2), mutta sitä ei voi kuitenkaan täysin poistaa.

Esineen asento eli valmistussuunta vaikuttaa myös oleellisesti valmistetun esineen pinnan karkeuteen (ks. kuvio 3). Esinettä viipaloitaessa käyttäjä voi valita valmistettavan esineen asennon, mutta monimutkaisten esineiden asemointi silmämääräisesti on vaikeaa. Tästä syystä on kehitetty algoritmeja (Thrimurthulu, Pandey ja Reddy 2004; Kim ja Lee 2005; Ahn, Kim ja Lee 2007), jotka määrittävät esineelle optimaalisen valmistussuunnan.



Kuvio 3: Esineen asennon vaikutus pinnan karkeuteen

Pinnan karkeutta voidaan myös vähentää jälkikäsittelemällä valmistettu esine. Esine voidaan esimerkiksi hioa mekaanisesti tai pinnoittaa jollain aineella, mutta kuten Ahn, Kim ja Lee (2007) artikkelissaan toteavat, tällaiset menetelmät vaativat aikaa ja ne vaikuttavat esineen muotoon ja kokoon. Tästä syystä on tärkeää minimoida pinnan karkeus jo ennen esineen valmistamista.

Lisäksi kerroksellisuuden takia alkuperäinen CAD-malli ei välttämättä valmistu tarkasti, vaan valmistettuun esineeseen saattaa tulla erilaisia mittatarkkuusvirheitä (Turner ja Gold 2015). Esimerkiksi käytettäessä 0,20 mm kerroskorkeutta, ei ole mahdollista tehdä 0,50 mm paksua esinettä, vaan viipalointialgoritmi joutuu valitsemaan paksuudeksi joko 0,40 mm tai 0,60 mm. Mittatarkkuusvirheet ovat erityisen ongelmallisia mekaanisia esineitä valmistettaessa, koska niissä on erilaisia tarkkuutta vaativia kohtia, kuten liitoskohtia ja niveliä.

2.2 Valmistusnopeus

Valmistusnopeus on yksi lisäävän valmistuksen merkittäviä haasteita (Weller, Kleer ja Piller 2015; Oropallo ja Piegl 2016). Lisäävillä menetelmillä on nopeaa valmistaa yksittäisiä esineitä, kuten prototyypppejä, koska niillä esineen voi parhaimmillaan valmistaa yhtenä työvaiheena. Muita valmistusmenetelmiä käytettäessä esineen valmistaminen täytyy suunnitella, valmistaa tarvittavia esineitä, kuten valumuotteja, ja valmistaminen usein vaatii useita työvaiheita. Muilla menetelmillä on kuitenkin nopeampaa valmistaa suuria määriä esineitä, kuin lisäävillä menetelmil-

lä. (Weller, Kleer ja Piller 2015)

Kerroskorkeudella on merkittävä vaikutus esineen valmistusnopeuteen. Mitä paksumpia kerroksia käytetään, sitä nopeammin esine valmistuu. Samalla kuitenkin kerroksellisuudesta aiheutuvat ongelmat korostuvat. Esineen valmistumista voidaan nopeuttaa käyttämällä mukautuvaa kerroskorkeutta, josta lisää luvussa 3. Valmistumista voidaan nopeuttaa myös tekemällä esineestä joko kokonaan ontto tai osittain ontto täyttämällä se jonkinlaisella täyttökuviolla. Valmistusajan nopeutumisen lisäksi säästyy myös valmistusmateriaalia ja esineestä tulee kevyempi. Haittana on kuitenkin se, että esineen kestävyys huononee. Täyttökuviot ja niiden vaikutus esineen mekaanisiin ominaisuuksiin muodostavat laajan aihepiirin, eikä sen käsittely tässä tutkielmassa ole mielekäästä.

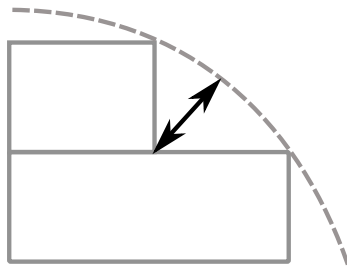
3 Mukautuvat viipalointialgoritmit

Mukautuvat viipalointialgoritmit viipaloivat mallin siten, että kerroskorkeus mukautuu sen mukaisesti, minkälaista tarkkuutta eri kohdat vaativat. Tällaisia algoritmeja käytettäessä kerroskorkeus vaihtelee asetetun minimin ja maksimin välillä. Minimi- ja maksimikerroskorkeuteen vaikuttaa käytetyn laitteen ominaisuudet, mutta käyttäjä voi myös halutessaan asettaa omat rajat. Tässä luvussa esitellään joitain mukautuvia viipalointialgoritmeja, joilla esineen valmistusaikaa saadaan lyhennettyä ja samalla minimoitua kerroksellisesta valmistuksesta aiheutuvia ongelmia.

3.1 Mukautuva kerroskorkeus

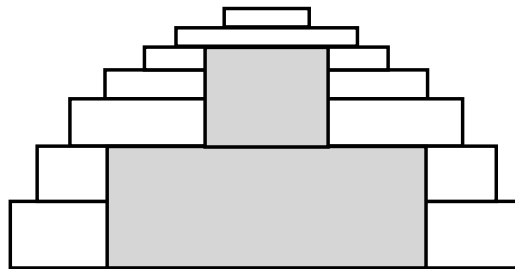
Yksinkertaisissa toteutuksissa (Kulkarni ja Dutta 1996; Sabourin, Houser ja Helge Bøhn 1996) malli viipaloidaan ensin käyttäen paksua kerroskorkeutta, ja sen jälkeen ne kerrokset, joiden kärkikorkeus (ks. kuvio 4) on haluttua raja-arvoa suurempi, jaetaan ohuemmiksi kerroksiksi. Toinen tapa toteuttaa samankaltainen mukautuva viipalointialgoritmi on viipaloida malli ensin käyttäen ohutta kerroskorkeutta (Hayasi ja Asiabanpour 2013). Tämän jälkeen kaikki kerrokset tutkitaan, ja jos kahden peräkkäisen kerroksen välillä on käyttäjän asettamaa arvoa pienempi kärkikorkeus, niin jälkimmäinen kerros poistetaan.

Kuten Alexa, Hildebrand ja Lefebvre (2017) artikkelissaan toteavat, tällaisissa toteutuksissa on kuitenkin se huono puoli, että jos kerroksen jakamisesta saadut kerrokset ovat ohuempia kuin ohuin mahdollinen kerros, niin jakoa ei voida tehdä. Tämä johtaa siihen että valmistettavan esineen tarkkuus ei ole tällaisissa kohdissa niin hyvä kuin se voisi olla. Vastaavasti, jos ohuita kerroksia yhdistettäessä saadaan kerros, joka on paksumpi kuin paksumin mahdollinen kerroskorkeus, ei yhdistämistä voida tehdä. Tällöin esineeseen jää ylimääräisiä kerroksia, eikä valmistaminen siten ole niin nopeaa kuin se voisi olla.



Kärkikorkeus on etäisyys kahden kerroksen liitoskohdasta viipaloitavan mallin pintaan

Kuvio 4: Kärkikorkeus

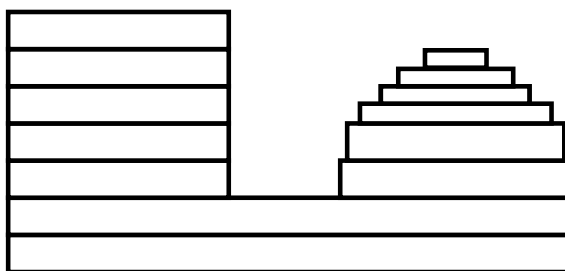


Kuvio 5: Esine, jonka ulkopinta on viipaloitu mukautuvasti

3.2 Tarkka ulkopinta, nopea sisäosa

Esineen ulkopinta ja sen muoto ovat usein lopputuloksen kannalta oleellisia, kun taas esineen sisäosa on vain täytettä. Sabourin, Houser ja Helge Bøhn (1997) kehittivät viipaloitinalgoritmin, joka viipaloi mallin ulkopinnan mukautuvasti ja sisäosan käyttäen paksua kerroskorkeutta (ks. kuvio 5). Heidän algoritminsa viipaloi mallin ensin paksuihin kerroksiin ja muodostaa sisäosan kutistamalla jokaista viipaletta. Koska sisäosan muodolla ei ole samalla lailla väliä kuin ulkopinnan muodolla, voidaan sisäosan muotoa muokata. Poistamalla sisäosan muodosta tarpeettomat yksityiskohdat nopeutuu esineen valmistus entisestään. Lopuksi algoritmi tarpeen mukaan pilkkoo ulkopintaan kuuluvat viipaleet ohuemmiksi.

Tällä tavoin valmistettuna esineen valmistusaika lyhenee 50% – 80% (Sabourin, Houser ja Helge Bøhn 1997) tavalliseen mukautuvaan viipalointiin verrattuna. Esine valmistuisi vieläkin nopeammin, jos sisäosa täytettäisiin harvalla täyttökuviolla, mutta kuten Sabourin, Houser ja Helge Bøhn (1997) artikkelissaan toteavat, se ei



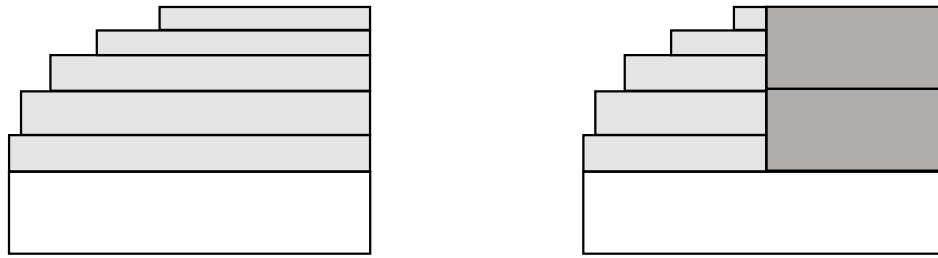
Kuvio 6: Paikallisesti viipaloitu esine

aina ole paras vaihtoehto. Osittain onnto esine on heikompi kuin täysin umpinainen esine, joten umpinainen esine on parempi tilanteissa, joissa esineen kestävyys on tärkeää.

3.3 Paikallinen mukautuva viipalointi

Joissain CAD-malleissa on samalla viipalointikorkeudella osia, jotka ovat toisistaan erillään. Tavalliset mukautuvat viipalointialgoritmit viipaloivat tällaiset osat käyttäen samaa kerroskorkeutta. Tyberg ja Helge Bøhn (1998) kehittämä algoritmi viipaloi esineen siten, että erilliset osat viipaloidaan käyttäen eri kerroskorkeutta (ks. kuvio 6).

Algoritmi viipaloi esineen ensin käyttäen paksua kerroskorkeutta. Tämän jälkeen kaikki viipaleet tutkitaan siten, että kahdesta peräkkäisestä viipaleesta alemman viipaleen käyrille etsitään ylemmstä viipaleesta vastineet. Jos huomataan, että alemmassa viipaleessa olevaa käyrää vastaa kaksi tai useampi käyrä ylemmässä viipaleessa, niin esine on tällöin haarautunut kahteen tai useampaan erilliseen osaan. Vastaavasti, jos huomataan, että kahdella tai useammalla alemmassa viipaleessa olevalla käyrällä on yksi vastine ylemmässä viipaleessa, niin kyseiset erilliset osat ovat yhdistyneet yhdeksi osaksi. Tällä tavoin löydettyjen samalla viipalointikorkeudella olevien erillisten osien viipaleet jaetaan tarpeen mukaan ohuemmiksi.



Kuvio 7: Mallin viipaloiminen jakamalla se lohkoihin. Mallin oikeassa reunassa ei ole tarkkuutta vaativia kohtia, joten se voidaan valmistaa käyttäen paksua kerroskorkeutta.

3.4 Silmiinpistävät piirteet säilyttävä viipalointi

Useimmat viipalointialgoritmit viipaloivat esineen siten, että samalla korkeudella olevat pinnat viipaloidaan samalla tarkkuudella. Joissain esineissä on kohtia, jotka vaativat ohutta viipalekorkeutta, mutta muut samalla korkeudella olevat kohdat voitaisiin viipaloida paksummalla viipalekorkeudella. Esineen muodosta riippuen tämä saattaa vaikuttaa merkittävästi esineen valmistusnopeuteen.

Wang ym. (2015) ovat kehittäneet viipalointialgoritmin, joka jakaa mallin erillisiin lohkoihin ja viipaloi ne mukautuvasti käyttäen eri kerroskorkeuksia (ks. kuvio 7). Heidän algoritminsa tunnistaa viipaloitavasta esineestä sellaiset kohdat, jotka ihminen kokee tärkeiksi. Tähän he käyttävät Song ym. (2014) kehittämää menetelmää. Kun kyseiset kohdat on määritetty, algoritmi jakaa mallin lohkoihin, jos joillain viipaloititasoilla kahden kohdan välillä on riittävän suuri ero visuaalisessa tärkeydessä. Muodostetut lohkot viipaloidaan mukautuvasti.

Tällaisessa algoritmissa on se ongelma, että lohkojen väliset saumat näkyvät valmistetussa esineessä. Saumakohdan näkyvyyttä vähennetään jakamalla malli lohkoihin ainoastaan pysty- ja vaakasuunnissa. Tällä vältetään se, ettei saumakohdissa kerrosten väliin jää tyhjiä kohtia. Lisäksi algoritmi pyrkii sijoittamaan saumakohdat huomaamattomiin kohtiin. Etuna on kuitenkin se, että esineen visuaalinen laatu on samankaltainen verrattuna yksinkertaiseen mukautuvaan viipalointialgoritmiin, mutta valmistusaika on 30% – 40% lyhyempi. (Wang ym. 2015)

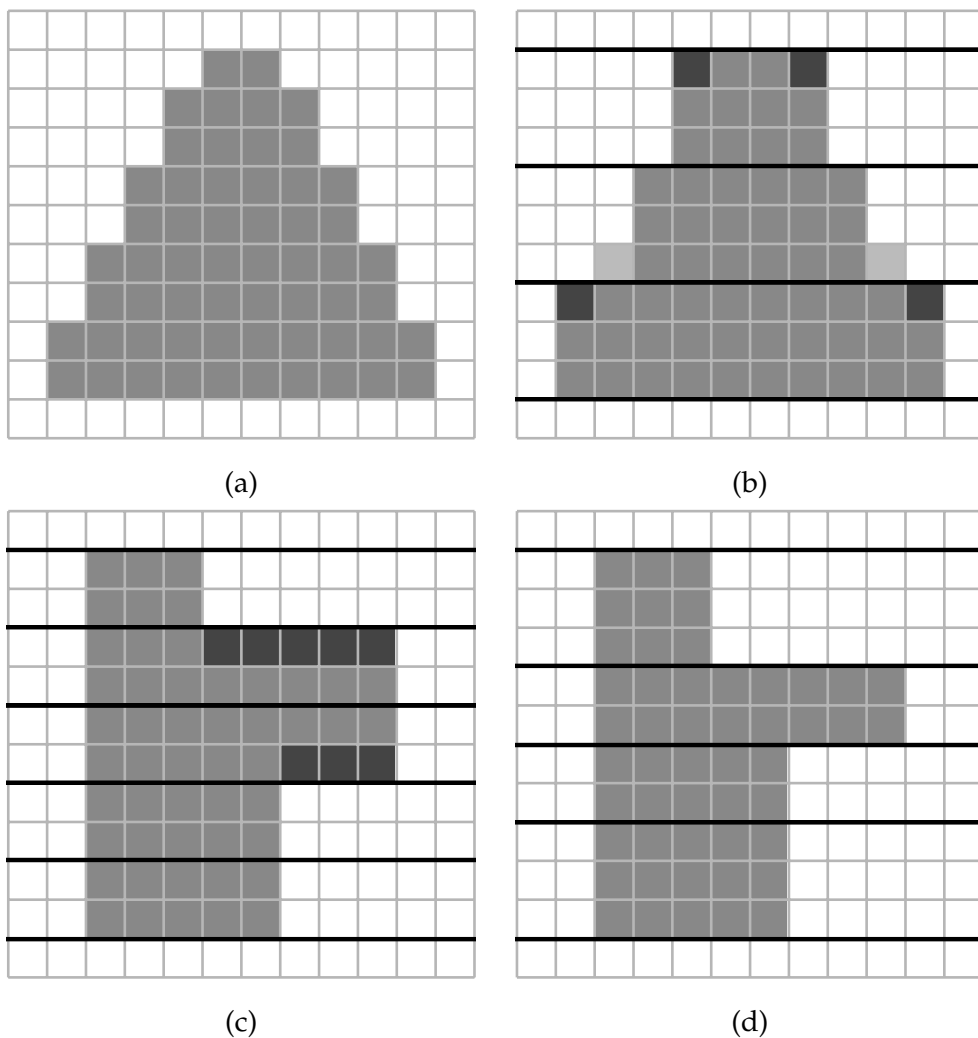
3.5 Optimaalinen diskreetti viipalointi

Tähän asti esitellyt algoritmit käsittelevät kolmioituja CAD-malleja käyttäen kärki- korkeutta virheen mallintamiseen. Alexa, Hildebrand ja Lefebvre (2017) kehittämä algoritmi viipaloi diskreetissä esitysmuodossa olevan CAD-mallin. Diskreetillä esitysmuodolla tarkoitetaan sitä, että CAD-mallista muodostetaan 3-ulotteinen taulukko. Ne kentät, joiden arvo on 1, muodostavat kyseiseen esineeseen (ks. kuvio 8a). Taulukon tarkkuus voidaan valita esimerkiksi käytettävän valmistuslaitteen ominaisuuksien mukaisesti.

Mallia viipaloitaessa algoritmi luo useita mahdollisia viipaleita jokaiselle kerroskorkeudelle. Jokaisen mahdollisen viipaleen sisältämä virhe lasketaan ja tallennetaan tietorakenteeseen. Virhe lasketaan yksinkertaisesti laskemalla virheellisten kenttien määrä. Virheellisiä kenttiä ovat kentät, jotka joko kuuluvat viipaleeseen, mutta eivät malliin tai kuuluvat malliin, mutta eivät viipaleeseen (ks. kuvio 8b).

Mahdollisista viipaleista algoritmi luo erilaisia vaihtoehtoja viipaloida esine. Jos kaksi tai useampi vaihtoehto sisältää yhtä monta viipaletta, näistä valitaan optimaalinen, eli vähiten virhettä sisältävä vaihtoehto. Lopuksi eri vaihtoehdot esitetään käyttäjälle. Käyttäjä voi valita lopullisen viipalointitavan valmistettavan esineen vaatimusten mukaisesti esimerkiksi tarkkuuden tai valmistusajan perusteella.

Tässä viipalointialgoritmissa on myös se merkittävä ominaisuus, että samalla kun se minimoi viipaloitavan mallin sisältämän virheen, se minimoi myös mittatarkkuusvirheet (ks. kuvat 8c ja 8d). Mittatarkkuusvirheet aiheuttavat virhettä viipaloituun malliin. Algoritmi minimoi virheen määrää aggressiivisesti, joten se hylkää sellaiset tavat viipaloida esine, joissa on paljon mittatarkkuusvirhettä.



Kuvio 8: CAD-mallin diskreetti viipalointi (a) Diskreetti esitysmuoto havainnollistettuna 2-ulotteisena taulukkona. (b) Malli viipaloituna kolmeen viipaleeseen. Mustat neliöt kuuluvat viipaleeseen, mutta eivät esineeseen. Vaaleat neliöt kuuluvat malliin, mutta eivät viipaleeseen. (c) Kiinteällä kerroskorkeudella viipaloitu malli ja siitä aiheutuva mittatarkkuusvirhe. (d) Optimaalisesti viipaloitu malli.

4 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa on esitelty erilaisia julkaistuja lisäävään valmistukseen tarkoitettuja mukautuvia viipalointialgoritmeja. Algoritmeissa käytetään erilaisia menetelmiä, joilla esineen valmistusta voidaan nopeuttaa ilman, että esineen pinnan laatu heikkenee. Lisäksi algoritmi, jonka Alexa, Hildebrand ja Lefebvre (2017) kehittivät, minimoi myös mittatarkkuusvirhettä.

Viipalointialgoritmi kannattaa valita käyttötärpeen mukaan, esimerkiksi käytettävän valmistuslaitteen ominaisuuksien tai valmistettavan esineen vaatimusten perusteella. Mittatarkkuus ei välttämättä ole oleellinen esineissä, joiden ulkonäkö on tärkeä. Vastaavasti mekaanisissa esineissä mittatarkkuus on tärkeää, mutta ulkonäöllä ei välttämättä ole merkitystä. Tässä tutkielmassa esiteltyjen algoritmien käyttämiä menetelmiä yhdistelemällä voidaan esimerkiksi tehdä algoritmeja eri käyttötärpeita varten.

Valmistettavan esineen pinnan laadun ja mittatarkkuuden lisäksi myös esineen kestävyys on tärkeää. Täyttökuvio vaikuttaa merkittävästi sekä esineen kestävyteen, että painoon. Siksi olisi tärkeää kehittää menetelmiä, joilla täyttökuvio voidaan optimoida siten, että valmistettu esine on mahdollisimman kevyt, mutta samalla myös kestävä.

Lähteet

Ahn, Daekeon, Hochan Kim ja Seokhee Lee. 2007. "Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing". *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47 (3–4): 593–606. ISSN: 0890-6955. doi:10.1016/j.ijmachtools.2006.05.004.

———. 2009. "Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing". *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2): 664–671. ISSN: 0924-0136. doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.02.050.

Alexa, Marc, Kristian Hildebrand ja Sylvain Lefebvre. 2017. "Optimal Discrete Slicing". *ACM Trans. Graph.* (New York, NY, USA) 36, numero 1 (tammikuu): 12:1–12:16. ISSN: 0730-0301. doi:10.1145/2999536.

Gao, Wei, Yunbo Zhang, Devarajan Ramanujan, Karthik Ramani, Yong Chen, Christopher B. Williams, Charlie C.L. Wang, Yung C. Shin, Song Zhang ja Pablo D. Zavattieri. 2015. "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering". *Computer-Aided Design* 69:65–89. ISSN: 0010-4485. doi:10.1016/j.cad.2015.04.001.

Hayasi, Mohammad T., ja Bahram Asiabanpour. 2013. "A new adaptive slicing approach for the fully dense freeform fabrication (FDFF) process". *Journal of Intelligent Manufacturing* 24 (4): 683–694. ISSN: 1572-8145. doi:10.1007/s10845-011-0615-4.

Jong, J. P. J. de, ja E. de Bruijn. 2014. "Innovation lessons from 3-D printing". *IEEE Engineering Management Review* 42, numero 4 (huhtikuu): 86–94. ISSN: 0360-8581. doi:10.1109/EMR.2014.6966948.

Kim, Ho-Chan, ja Seok-Hee Lee. 2005. "Reduction of post-processing for stereolithography systems by fabrication-direction optimization". *Computer-Aided Design* 37 (7): 711–725. ISSN: 0010-4485. doi:10.1016/j.cad.2004.08.009.

- Kulkarni, Prashant, ja Debasish Dutta. 1996. "An accurate slicing procedure for layered manufacturing". *Computer-Aided Design* 28 (9): 683–697. ISSN: 0010-4485. doi:10.1016/0010-4485(95)00083-6.
- Minetto, Rodrigo, Neri Volpato, Jorge Stolfi, Rodrigo MMH Gregori ja Murilo VG Da Silva. 2016. "An Optimal Algorithm for 3D Triangle Mesh Slicing".
- Mohan Pandey, Pulak, N. Venkata Reddy ja Sanjay G. Dhande. 2003. "Slicing procedures in layered manufacturing: a review". *Rapid Prototyping Journal* 9 (5): 274–288. doi:10.1108/13552540310502185.
- Oropallo, William, ja Les A. Piegl. 2016. "Ten challenges in 3D printing". *Engineering with Computers* 32 (1): 135–148. ISSN: 1435-5663. doi:10.1007/s00366-015-0407-0.
- Sabourin, Emmanuel, Scott A. Houser ja Jan Helge Bøhn. 1996. "Adaptive slicing using stepwise uniform refinement". *Rapid Prototyping Journal* 2 (4): 20–26. doi:10.1108/13552549610153370.
- . 1997. "Accurate exterior, fast interior layered manufacturing". *Rapid Prototyping Journal* 3 (2): 44–52. doi:10.1108/13552549710176662.
- Song, Ran, Yonghuai Liu, Ralph R. Martin ja Paul L. Rosin. 2014. "Mesh Saliency via Spectral Processing". *ACM Trans. Graph.* (New York, NY, USA) 33, numero 1 (helmikuu): 6:1–6:17. ISSN: 0730-0301. doi:10.1145/2530691.
- Thrimurthulu, K, Pulak M Pandey ja N Venkata Reddy. 2004. "Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling". *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44 (6): 585–594. ISSN: 0890-6955. doi:10.1016/j.ijmachtools.2003.12.004.
- Turner, Brian N., ja Scott A Gold. 2015. "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness". *Rapid Prototyping Journal* 21 (3): 250–261. doi:10.1108/RPJ-02-2013-0017.
- Tyberg, Justin, ja Jan Helge Bøhn. 1998. "Local adaptive slicing". *Rapid Prototyping Journal* 4 (3): 118–127. doi:10.1108/13552549810222993.

Wang, Weiming, Haiyuan Chao, Jing Tong, Zhouwang Yang, Xin Tong, Hang Li, Xiuping Liu ja Ligang Liu. 2015. "Saliency-Preserving Slicing Optimization for Effective 3D Printing". *Computer Graphics Forum* 34 (6): 148–160. ISSN: 1467-8659. doi:10.1111/cgf.12527.

Weller, Christian, Robin Kleer ja Frank T. Piller. 2015. "Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited". *International Journal of Production Economics* 164:43–56. ISSN: 0925-5273. doi:10.1016/j.ijpe.2015.02.020.

Wong, Kaufui V., ja Aldo Hernandez. 2012. "A Review of Additive Manufacturing". *ISRN Mechanical Engineering* 2012. <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/208760/>.