

Avaruusjakoon perustuvat tietorakenteet
tietokonegrafiikassa

Timo Heinonen
kandidaatintutkielma
marraskuu 2016

Informaatioteknologian laitos
tietojenkäsittelytiede
Turun yliopisto

Tiivistelmä

Sisältö

1	Johdanto	2
2	Kolmiulotteisen tietokonegrafikan peruskäsitteitä	4
2.1	Määritelmiä	4
2.2	Ray Tracing -tekniikka	5
3	Avaruusjakopuut	8
3.1	Binäärinen avaruusjako	8
3.2	kd-puu	12
3.3	Bounding Volume -hierarkia	12
4	Renderoinnin optimoiminen avaruusjakopuiden avulla	13
4.1	kd-puuta käyttävä Ray Tracing -algoritmi	13

1 Johdanto

Kolmiulotteisen tietokonegrafiikan tutkimuksella on ollut merkittävä vaikutus viihdeteollisuuteen, kuten animaatioelokuviin ja peleihin, sekä tietokoneavusteiseen suunnitteluun, esimerkiksi arkkitehtuurin ja teollisuuden alalla. Tietokonegrafiikka on osin jopa syrjäyttämässä perinteistä valokuvaustyötä: huonekalujätti Ikea on siirtynyt käyttämään myyntikuvastoissaan valtaosin tietokoneella generoituja kuvia valokuvien sijaan. [CGSociety, 2014] Tietokonegrafiikan sovelluskohteet lisääntyvät jatkuvasti. Eräs aktiivinen tutkimuskohde on esimerkiksi tietokonegrafiikan tekniikoiden soveltaminen konenäköön [Hughes et al., 2013]

Grafiikan piirtämistä kolmiulotteisista malleista kaksiulotteisiksi kuviksi kutsutaan renderoinniksi. Renderoinnin lähtökohtana on kuvattava maisema (engl. *scene*), joka sisältää objekteja ja valonlähteitä. Objektit ja valonlähteet on voitava mallintaa matemaattisesti, jotta niille voidaan määrittää sijainti ja suuntaus, ja jotta niiden välisiä etäisyyksiä ja suhteita voidaan laskea. Renderointi tapahtuu aina jostakin kuvakulmasta, ja tätä varten määritellään virtuaalinen kamera, jolla on oma sijaintinsa ja suuntauksensa maisemassa. Tämän jälkeen on selvitettävä, mitkä objektit kamera näkee, miten objekteihin osuvat valonsäteet vaikuttavat niiden väriin ja kuvan varjostukseen, ja lopuksi, mitkä värit projisoidaan kuvatason mihinkin pikseliin. [Janke, 2015]

1960-luvulla tietokonegrafiikkaa käytettiin lähinnä teollisuuden komponenttisuunnittelussa ja arkkitehtuurissa. Tietokoneella osattiin piirtää objektien ääriivivoja (engl. *wireframe*), mutta varjostustekniikoita ei tunnettu. IBM:n tutkija Arthur Appel esitteli algoritmin, joka mallinsi valonsäteitä laske-malla suoran yhtälöitä kuvasta maisemaan ja siitä valonlähteisiin. Tämän tekniikan avulla voitiin piirtää yksinkertaisia varjostuksia. [Appel, 1968] Myöhemmin tästä Ray Tracing:iksi kutsutusta tekniikasta tuli erittäin suosittu.

Jo Appel totesi Ray Tracing -tekniikan olevan erittäin aikaavievä. [Appel, 1968] Vaikka tietokoneiden, ja varsinkin grafiikkaprosessoreiden laskentateho kasvaa jatkuvasti, ei grafiikan tuottaminen ole vieläkään halpaa tai nopeaa. Kuvista halutaan jatkuvasti realistisempia, ja yksityiskohtaisemmat kuvattavat mallit ja monimutkaiset valaisutekniikat vaativat erittäin paljon laskentatehoa. Esimerkiksi elokuvastudio Pixarin Monsterit-yliopisto-animaatioelokuvan piirtäminen vaati yli sata miljoonaa prosessorituntia. [VentureBeat, 2013] Tämän takia tutkimuksen kohteena on ollut jo pitkään nopeampien renderointitekniikoiden kehittäminen.

1980-luvulla kehitettiin menetelmiä, joilla voitiin vähentää valonsäteiden ja maiseman osumatarkasteluiden määrää. Steven Rubin ja Turner Whitted esittelivät tekniikan, jossa maisema jaetaan esiprosessointivaiheessa hierarkisesti suuntaissärmiöihin ihmisen toimesta. Säteiden ja suuntaissärmiöiden osumia tarkastelemalla voitiin vähentää operaatioiden kokonaismäärää. [Rubin ja Whitted, 1980] Henry Fuchs et al. kehittivät toisen metodin, johon kuului myös esiprosessointivaihe, tällä kertaa tietokoneen suorittamana. Maiseman objektit oli jaettu pienempiin osiin, polygoneihin, joista valittiin binääripuun juureksi mahdollisimman keskellä maisemaa oleva. Tämän jälkeen binääripuuhun lisättiin polygoneja sillä perusteella, ovatko ne maisemassa vanhempansa etu- vai takapuolella. Näillä tekniikoilla renderointia saatiin nopeutettua siirtämällä työtä esiprosessointivaiheeseen. [Fuchs et al., 1980]

Tässä tutkielmassa esitellään avaruuden jakamiseen perustuvia tietorakenteita, joilla kolmiulotteisten kuvien renderointia voidaan nopeuttaa. Luvussa 2 määritellään joitakin grafiikan peruskäsitteitä, sekä esitetään algoritmi Ray Tracing -tekniikalle. Luvussa 3 tutkitaan Binääristä avaruusjakoa, kd-puuta ja Bounding Volume -hierarkiaa, sekä niiden rakentamiseen ja läpikäyntiin liittyviä algoritmeja. Luvussa 4 selvitetään, miten kd-puuta voidaan käyttää Ray Tracing -algoritmin optimoimiseen.

2 Kolmiulotteisen tietokonegrafikan peruskäsitteitä

2.1 Määritelmiä

Kolmiulotteisten kuvien renderoinnin kohteena ovat *objektit*, jotka mallintavat jotakin esinettä tai muotoa avaruudessa \mathbb{R}^3 . Objektit voidaan esittää tietokoneen muistissa taulukkona pisteitä $P = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3$: esimerkiksi kolmiota voidaan kuvata kolmella pisteellä, ja palloa kahdella pisteellä, jotka esittävät sen keskipistettä ja yhtä pistettä sen pinnalla. [Angel ja Shreiner, 2014]

Objektit jaetaan lähes kaikissa ei-triviaaleissa tapauksissa *polygoneihin*. Polygoni, eli monikulmio $\gamma = \diamond P_1 P_2 \dots P_n$, $n > 2$, on samassa tasossa olevien kärkien P_1, \dots, P_n muodostaman murtoviivan rajaama alue, jonka kärkien muodostamat janat $P_i P_{i+1}$ eivät leikkaa toisiaan. [Harju, 2015] Useimmiten grafiikkasovelluksissa ja -rajapinnoissa valitaan polygonien muodoksi kolmiot, sillä niiden kolme kärkeä muodostavat aina tason, ja grafiikkaprosessorit osaavat operoida kolmioilla erittäin nopeasti. [Angel ja Shreiner, 2014]

Objektien sisäpuoli halutaan yleensä jättää huomioimatta, joten polygoneille on määriteltävä, kummalla puolella on niiden etupuoli. Kolmiot ovat tässäkin suhteessa hyvä valinta polygonien muodoksi, sillä kolmiolle $\triangle P_1 P_2 P_3$ voidaan helposti laskea etupuolen määrittävä normaali n ristitulolla $(P_2 - P_1) \times (P_3 - P_1)$. Huomioitavaa on, että normaalin suunta riippuu siitä, missä järjestyksessä kärjet P_1, P_2 ja P_3 on määritelty. [Hughes et al., 2013]

Jotta voitaisiin tarkastella objektien, valonlähteiden, ja kuvakulman, eli *kameran* välisiä suhteita ja suuntauksia avaruudessa, valitaan kolme koordinaatistoa, jotka on määritelty kolmella toisiinsa nähden kohtisuoralla kantavektorilla $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$. Jokaisella objektilla on *lokaalikoordinaatisto*, joka sisältää objektin geometrian. Useimmiten origo sijoitetaan objektin keskipisteeseen.

Maailmakoordinaatisto kuvaa koko avaruutta, ja sisältää tietoa siitä, mihin objektien lokaalikoordinaatistojen origot on sijoitettu. Lopuksi tämä maisema kuvataan virtuaalisella kameralla, jolla on oma *kamerakoordinaatistonsa*. Koordinaatistosta toiseen siirtyminen, koordinaatistojen skaalaus ja rotaatio voidaan toteuttaa lineaarikuvauksilla. [Janke, 2015]

2.2 Ray Tracing -tekniikka

Ray Tracing on renderointitekniikka, jolla voidaan piirtää erittäin fotorealistisia kuvia. Ray Tracing -tekniikka pyrkii mallintamaan valonsäteitä, jotka saavat alkunsa valonlähteistä, kulkevat avaruudessa ja osuvat objekteihin valaisten niitä, kimmoten niistä toisiin objekteihin ja muodostaen varjoja. Jotkut valonsäteet löytävät lopulta tiensä katsojan silmiin, eli kameraan. Koska olisi mahdotonta selvittää jokaisen valonsäteen kulkua avaruudessa, Ray Tracing -algoritmi ottaa huomioon vain ne säteet, jotka todella osuvat kameraan. Valonsäteitä seurataan siis käänteisessä järjestyksessä, kamerasta objekteihin, ja niistä valonlähteisiin. [Janke, 2015]

Ray Tracing -algoritmi muodostaa sille syötteenä annetusta kolmiulotteisesta maisemasta kamerasijainnin perusteella kaksiulotteisen kuvan. Jokaisen kuvatason pikselin läpi ammutaan säde $\vec{R} = O + t\vec{D}$, missä $t \in \mathbb{R}$, O on kamerasijainti maailmakoordinaatistossa ja normalisoitu vektori \vec{D} kuvaa säteen kulkusuuntaa. Säteellä etsitään törmäyspistettä lähimmän objektin kanssa, eli sellaista mahdollisimman pientä arvoa t , että piste $P = O + t\vec{D}$ on jonkin objektin pinnalla. Tällöin osuman saaneen objektin piste P voi näkyä kameraan, mikäli siihen osuu valoa. Osumakohdasta ammutaan uusi, varjostussäteeksi kutsuttu säde. Jos varjostussäde osuu suoraan tai kimmoten muista objekteista valonlähteeseen, lankeaa objektin pinnalle valoa. [Janke, 2015] Tekniikan pseudokoodi on esitetty algoritmissa 1.

Algoritmin suoritusnopeutta rajoittaa se, että jokaista sädettä kohti on käytävä läpi kaikki maiseman polygonit ja testattava osuuko säde niihin. Säteiden ja polygonien leikkauksien määrittämiseen joudutaan joissain tapauk-

Input:

kuvataso: $x * y$ kokoinen taulukko pikseleitä

maisema: joukko valonlähteitä ja polygoneihin jaettuja objekteja

Output:

kolmiulotteinen maisema projisoituna kuvatasolle

RAY_TRACING(kuvataso, maisema):

```
1 foreach pikseli  $(x, y) \in$  kuvataso do
2   etaisyys  $\leftarrow \infty$ 
3   foreach polygoni  $\in$  maisema do
4     Ammu säde  $\vec{R} = O + t\vec{D}$  kamerasta pikselin läpi maisemaan
5     if säde  $R$  osui polygoniin pisteessä  $P$  and  $t < \text{etaisyys}$  then
6       etaisyys  $\leftarrow t$ 
7       Valon määrä  $V \leftarrow 0$ 
8       foreach valonlähde  $L$  do
9         Ammu varjostussäde  $\vec{R}_s = L - P$  valonlähdettä kohti
10        Kasvata valosummaa  $V$ 
11      end
12      Aseta pikselin  $(x, y)$  väri valosumman  $V$  mukaisesti
13    else
14      Aseta pikseli  $(x, y)$  taustan väriseksi
15    end
16  end
17 end
18 return kuvataso
```

Algoritmi 1: RAY_TRACING

sissa käyttämään jopa 95% koko laskenta-ajasta. [Whitted, 1980] Algoritmia saataisiin siis nopeutettua huomattavasti, jos testattavien polygonien määrää jokaista sädettä kohti saataisiin vähennettyä. Yleisesti käytetty tapa leikkaustestien vähentämiseksi on muodostaa maisemasta hierarkinen tietorakenne ennen varsinaista renderointia. Tätä tietorakennetta läpikäymällä löydetään nopeasti polygoni, jonka pinnalla säteen ja objektin leikkauspiste P on. [Rubin ja Whitted, 1980]

3 Avaruusjakopuut

3.1 Binäärinen avaruusjako

Eräs suosittu avaruusjakoon perustuva tietorakenne on binäärinen avaruusjakopuu, eli *BSP-puu* (engl. *Binary Space Partitioning*). BSP-puu luodaan valitsemalla kolmiulotteisen maiseman polygonijoukosta Γ yksi polygoni γ_k , joka asetetaan puun juureksi. Polygonin γ muodostama taso jakaa maiseman, ja siten polygonijoukon Γ , kahteen osaan $\Gamma_{k,+}$ ja $\Gamma_{k,-}$. Joukko $\Gamma_{k,+}$ sisältää polygonin γ_k positiivisella puolella olevat polygonit, ja siten ne asetetaan BSP-puuhun juuren oikeaksi lapseksi. Vastaavasti joukko $\Gamma_{k,-}$ sisältää negatiivisella puolella olevat polygonit, ja kuuluvat polygonin γ_k vasemmaksi lapseksi. Tämä jakavan polygonin valinta ja avaruuden jako suoritetaan rekursiivisesti BSP-puun lehdille, kunnes jokaisessa lehdessä on vain yksi polygoni. [Samet, 2005] BSP-puun rakentamisen pseudokoodi on esitelty algoritmissa 2.

BSP-puuta ja sen solmuja voidaan esittää grafiikkasovelluksessa seuraavasti:

```
class BSP_Tree
{
    BSP_Node juuri
}

class BSP_Node
{
    Polygon jakaja
    BSP_Node* oikea_lapsi
    BSP_Node* vasen_lapsi
    Polygon Polygonit[]    //joukko polygoneja, josta alipuut
                           muodostetaan
}
```

Input:

BSP_Node solmu: juurisolmu, josta puu rakennetaan

Polygon polygonit[]: polygonijoukko, josta alipuut rakennetaan

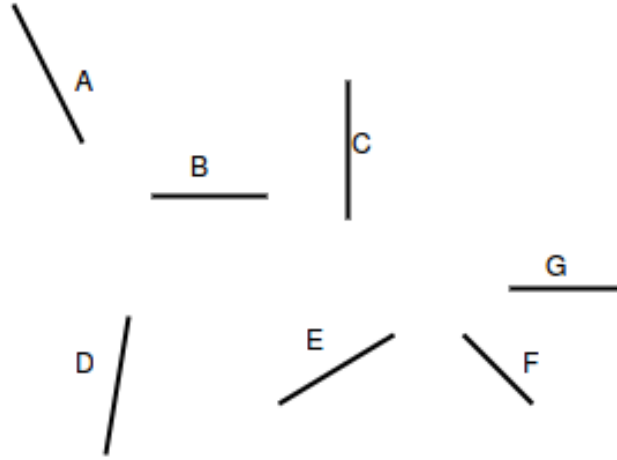
Output:

BSP-puu, jonka juurena on node

RAKENNA_BSP_PUU(solmu, polygonit):

```
1 jakaja ← VALITSE_JAKAVA_POLYGONI(polygonit)
2 positiivinen_joukko ← ∅
3 negatiivinen_joukko ← ∅
4 foreach polygoni  $\gamma \in$  polygonit do
5   sijainti ← VERTAA(jakaja,  $\gamma$ )
6   if sijainti = jakajan edessä then
7     positiivinen_joukko = positiivinen_joukko  $\cup \gamma$ 
8   else if sijainti = jakajan takana then
9     negatiivinen_joukko = negatiivinen_joukko  $\cup \gamma$ 
10  else if sijainti = leikkaa jakajan määrittämää tasoa then
11    JAA_POLYGONI( $\gamma$ , jakaja,  $\gamma_i$ ,  $\gamma_j$ )
12    positiivinen_joukko = positiivinen_joukko  $\cup \gamma_i$ 
13    negatiivinen_joukko = negatiivinen_joukko  $\cup \gamma_j$ 
14 end
15 RAKENNA_BSP_PUU(solmu.oikea_lapsi, positiivinen_joukko)
16 RAKENNA_BSP_PUU(solmu.vasen_lapsi, negatiivinen_joukko)
```

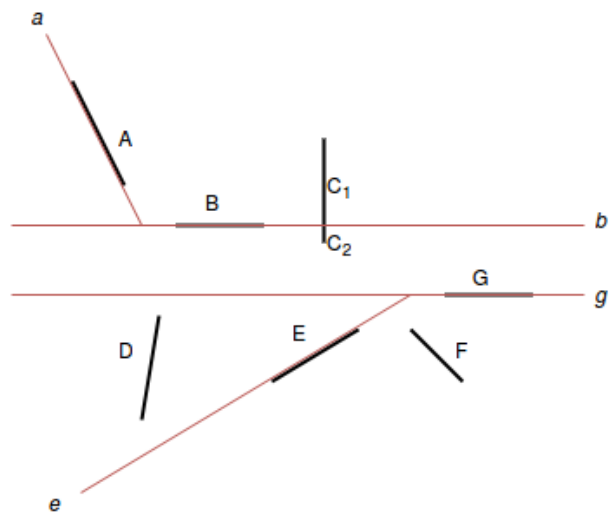
Algoritmi 2: RAKENNA_BSP_PUU



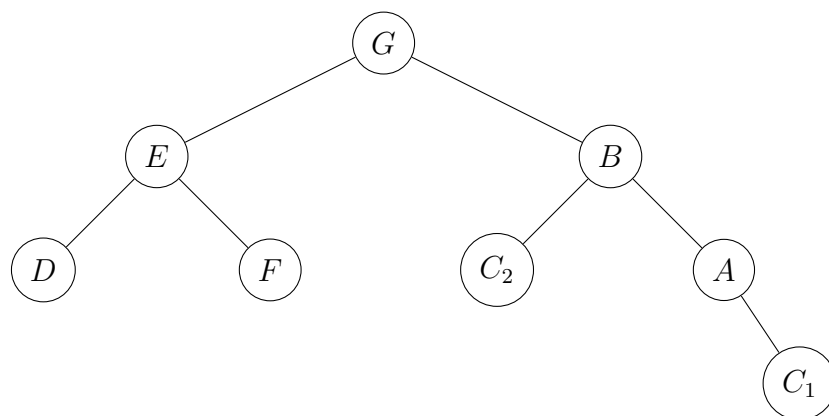
Kuva 1: Joukko polygoneja tasossa

Kuvissa 1-3 on esitetty esimerkki BSP-puun muodostamisesta. Kuvassa 1 on yksinkertaisuuden vuoksi esitetty polygonit $A - F$ sisältävä maisema kaksiulotteisena. Kuvassa 2 ensimmäiseksi jakopolygoniksi on valittu G , jonka positiiviselle puolelle $\Gamma_{g,+}$ jäävät polygonit A , B ja C , ja negatiiviselle puolelle $\Gamma_{g,-}$ polygonit D , E ja F . Jaon g negatiivinen puoli saadaan jaettua loppuun asti ongelmitta valitsemalla jakopolygoniksi E , mutta jos positiivisella puolella valitaan jakopolygoniksi B , joudutaan polygoni C jakamaan osiin C_1 ja C_2 . Jakolinjan b negatiiviselle puolelle jää vain yksi polygoni C_2 , joten jaettavaksi jää vain b :n positiivinen puoli. Valitsemalla viimeiseksi jakopolygoniksi A syntyy kuvan 3 mukainen BSP-puu.

BSP-puun kokoon ja muotoon vaikuttaa suuresti avaruuden jakavan polygonin valinta. Pahimmassa tapauksessa kaikki polygonit $\Gamma \setminus \gamma_k$ jäävät polygonin γ_k positiiviselle tai negatiiviselle puolelle jokaisella jaolla k . Tällöin puusta muodostuu pikemminkin ketjun muotoinen. Sama polygoni voi myös kuulua moneen BSP-puun alipuuhun, jos jonkun ylemmällä tasolla avaruuden jakavan polygonin γ_k muodostama jakolinja leikkaa tätä polygonia. [Samet, 2005] Toinen lähestymistapa jakolinjalla oleviin polygoneihin on halkaista ne kahtia. Tämäkin tapa on epäedullinen, sillä se lisää maisemassa olevien polygonien määrää. [Ranta-Eskola, 2001] Kun otetaan huomioon nämä



Kuva 2: Taso neljän jaon jälkeen



Kuva 3: Tasosta muodostettu BSP-puu

rajoitteet, ei BSP-puun koolle voida antaa tarkkaa ylärajaa. [Hughes et al., 2013]

BSP-puuta rakennettaessa tavoitteena on muodostaa mahdollisimman tasapainoinen binääripuu valitsemalla jokaisella jakokerralla jakajaksi sellainen polygoni γ_k , jonka positiivisella ja negatiivisella puolella on likimain yhtä paljon polygoneja, eli $|\Gamma_{k,+}| \approx |\Gamma_{k,-}|$. Tällöin n :n polygonin joukosta muodostetun BSP-puun syvyys olisi $O(\log n)$. Koska puun solmuja syntyy lisää, kun jakolinjan leikkaavat polygonit jaetaan kahtia, tai jakolinjalla oleva polygoni sisällytetään useaan alipuuhun, voidaan puun logaritmista tavoitesyvyyttä pitää vain alarajana. [Hughes et al., 2013] n polygonia sisältävästä maisemasta rakennetun BSP-puun syvyys on siis $\Omega(\log n)$

BSP-puu voidaan rakentaa ennen renderointia esiprosessointivaiheessa. Renderointivaiheessa sitä voidaan käyttää vähentämään säde-polygoni leikkaustestien määrää. Kamerasta ammuttua sädettä verrataan ensin BSP-puun juurena toimivaan polygoniin. Jos säde leikkaa polygonin γ_k muodostaman avaruuden jakavan tason, säde voi osua johonkin polygoniin molemmissa joukoissa $\Gamma_{k,+}$ ja $\Gamma_{k,-}$, eli joudutaan tarkastelemaan molempia alipuita. Jos säde ei leikkaa jakolinjaa, siirrytään tarkastelemaan vain toista alipuuta. Toistamalla säteiden ja avaruuden jakavien tasojen leikkauksia rekursiivisesti, päädytään lopulta BSP-puun juureen ja voidaan testata, osuuko säde polygoneihin. [Ranta-Eskola, 2001]

3.2 kd-puu

3.3 Bounding Volume -hierarkia

4 Renderoinnin optimoiminen avaruusjakopuiden avulla

4.1 kd-puuta käyttävä Ray Tracing -algoritmi

[Havran, 2000]

Viitteet

- [Angel ja Shreiner, 2014] Angel, E. ja Shreiner, D. (2014). *Interactive Computer Graphics with WebGL*. Addison-Wesley Professional, 7th edition.
- [Appel, 1968] Appel, A. (1968). Some techniques for shading machine renderings of solids. In *Proceedings of the April 30–May 2, 1968, Spring Joint Computer Conference*, AFIPS '68 (Spring), sivut 37–45, New York, NY, USA. ACM.
- [CGSociety, 2014] CGSociety (2014). Building 3d with ikea. http://www.cgsociety.org/index.php/cgsfeatures/cgsfeaturespecial/building_3d_with_ikea. Luettu: 28.10.2016.
- [Fuchs et al., 1980] Fuchs, H., Kedem, Z. M., ja Naylor, B. F. (1980). On visible surface generation by a priori tree structures. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 14(3):124–133.
- [Harju, 2015] Harju, T. (1989–2015). Geometria, lyhyt kurssi.
- [Havran, 2000] Havran, V. (2000). *Heuristic Ray Shooting Algorithms*. väitöskirja, Czech Technical University, Praha, Tšekki.
- [Hughes et al., 2013] Hughes, J. F., van Dam, A., McGuire, M., Sklar, D. F., Foley, J. D., Feiner, S. K., ja Akeley, K. (2013). *Computer graphics: principles and practice (3rd ed.)*. Addison-Wesley Professional, Boston, MA, USA.
- [Janke, 2015] Janke, S. J. (2015). *Mathematical Structures for Computer Graphics*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA.
- [Ranta-Eskola, 2001] Ranta-Eskola, S. (2001). Binary space partitioning trees and polygon removal in real time 3d rendering. pro gradu -työ, Uppsalan yliopisto, Uppsala, Ruotsi.
- [Rubin ja Whitted, 1980] Rubin, S. M. ja Whitted, T. (1980). A 3-dimensional representation for fast rendering of complex scenes. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 14(3):110–116.

- [Samet, 2005] Samet, H. (2005). *Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics and Geometric Modeling)*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.
- [VentureBeat, 2013] VentureBeat (2013). How pixar made monsters university, its latest technological marvel. <http://venturebeat.com/2013/04/24/the-making-of-pixars-latest-technological-marvel-monsters-university/view-all/>. Luettu 30.10.2016.
- [Whitted, 1980] Whitted, T. (1980). An improved illumination model for shaded display. *Commun. ACM*, 23(6):343–349.

Lista algoritmeista

1	RAY_TRACING	6
2	RAKENNA_BSP_PUU	9