

Petri Savolainen

FOTONIKARTAT GLOBAALIN VALAISTUKSEN TYÖKALUNA

Tietojärjestelmätieteen
kandidaatintutkielma
30.4.2002

Jyväskylän yliopisto
Tietojenkäsittelytieteiden laitos
Jyväskylä

TIIVISTELMÄ

Savolainen, Petri Taneli

Fotonikartat globaalin valaistuksen työkaluna / Petri Savolainen

Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2003.

35 s.

Tietojärjestelmätieteen kandidaatintutkielma

Tämä tutkielma on analyysi globaalin valaistuksen toiminnasta ja käytöstä tietokonegrafiikan luomisen yhteydessä. Globaalin valaistuksen osalta perehdytään erityisesti fotonikartat-nimisen menetelmän käyttöön ja luonteeseen.

Tutkielma on tehty perehtymällä alan tutkimuksiin ja ennen kaikkea fotonikarttojen kehittäjän, Henrik Wann Jensenin perusteokseen. Tutkielman sisältöön ja painotuksiin on myös vaikuttanut kirjoittajan henkilökohtainen kokemus kyseisten menetelmien saralla.

AVAINSANAT: global illumination, photon mapping

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	4
2 KESKEISET KÄSITTEET	6
3 GLOBAALI VALAISTUS	8
3.1 Periaate ja hyödyt.....	8
3.2 Ongelmat	9
3.3 Menetelmät.....	11
4 FOTONIKARTAT	15
4.1 Prosessi	15
4.2 Hyödyt	23
4.3 Ongelmat	24
4.4 Erikoistekniikat	27
5 YHTEENVETO.....	30
LÄHDELUETTELO	32
LIITE 1. KÄSITELUETTELO	34

1 JOHDANTO

Ei-reaaliaikaisesti laskettavassa tietokonegrafiikassa esiintyy paljon laadullista hajontaa tuotetun kuvan realistisuuden osalta. Tämä tarkoittaa sitä, että osa kuvista näyttää huomattavasti toisia aidommalta. Viime vuosina esimerkiksi elokuvissa käytetyssä animaatiossa on tapahtunut silminnähtävää kehitystä.

On olemassa monenlaisia tekniikoita, joilla laskettavan kuvan realistisuutta ja laatua voidaan lisätä ja eräs työläs mallinnettava osa-alue on valaistus. Valaistuksen realistinen simulointi on vaikeaa ja vaatii huomattavan paljon laskentatehoa. Monimutkaiset valaistusmallit tarjoavat kuitenkin selkeästi parempia tuloksia, ja ne ovatkin jatkuvan kehityksen kohteena.

Tämä tutkielma käsittelee ns. globaalia valaistusta ja erästä sen toteuttamistapaa, fotonikarttoja. Globaalia valaistusta käytettäessä valon käyttäytymistä mallinnetaan varsin edistyksellisesti verrattuna lokaaleihin valaistusmalleihin. Uutuudestaan johtuen fotonikartat ovat vasta tekemässä tietään tuotanto-käyttöön. Fotonikarttoja onkin käytetty vasta viime aikoina, esimerkiksi Square Picturesin elokuvassa 'Final Fantasy, The Spirits Within' (2001).

Luvussa 2 määritellään alalle tyypillisiä käsitteitä, jotka ovat loppututkielman ymmärtämisen kannalta keskeisiä.

Luku 3 tutkii globaalia valaistusta toteutumistavasta riippumatta. Ensin selvitetään, mikä on globaalin valaistuksen toimintaperiaate ja mitä hyötyä sen käytöstä on. Tämän jälkeen käsitellään globaaliin valaistukseen liittyviä keskeisiä ongelmia. Luvun lopussa käydään läpi oleellimmat toteutusvaihtoehdot globaalin valaistuksen aikaansaamiseksi.

Fotonikartat on lupaavin ja tuorein menetelmä globaalin valaistuksen aikaansaamiseksi. Luvussa 4 tutkitaan fotonikarttoja ja niiden ominaisuuksia. Luvun perimmäisenä tarkoituksena on luoda kattava käsitys fotonikarttojen vahvuuksista ja heikkouksista. Ensin tarkastellaan fotonikarttojen käyttöä prosessina. Kun fotonikarttojen peruseriaate on selvillä, pyritään selvittämään mitä nähtävää tai näkymätöntä hyötyä fotonikarttojen käytöstä on. Tämän jälkeen perehdytään fotonikarttoihin liittyviin keskeisiin ongelmiin ja lopuksi tarkastellaan vielä muutamia erikoismenettelyjä, joilla fotonikarttojen käyttöä voidaan monipuolistaa ja parantaa.

Viides luku tiivistää saadut tulokset yhteenvedon muodossa.

Tämä tutkielma on kohdistettu kolmiulotteisen mallintamisen valaisutekniikoista kiinnostuneille. Ennen kaikkea kohderyhmänä ovat alueeseen jo jonkin verran perehtyneet, jotka haluavat syventää käsitystään valaisumalleista.

2 KESKEISET KÄSITTEET

Tässä luvussa selvitetään tutkielman ymmärtämisen kannalta keskeisiä peruskäsitteitä. Tämä kappale käsittelee vain käsitteitä, jotka eivät suoraan liity fotonikartoitukseen tai globaaliin valaistukseen. Käsitteet, jotka ovat näihin menetelmiin läheisesti liittyviä, esitellään myöhemmin.

Säteenseuranta (engl. ray tracing) tarkoittaa mallinnetussa ympäristössä säteen lähettämistä halutusta pisteestä ja sen seuraamista, kunnes se osuu johonkin pintaan. Yleensä halutaan tietää, mihin koordinaatteihin säde osuu ja mitkä ovat osumakohdassa olevan pinnan parametrit, kuten materiaali. Vaikka säteenseurantaa voidaan hyödyntää myös reaaliaikagrafiikassa, käsitellään sitä tässä tutkimuksessa lähinnä ei-reaaliaikaisen grafiikan muodostukseen liittyen. Säteenseurantaa käytetään esimerkiksi kuvantamisen yhteydessä, mutta myös mallinnettaessa erilaisia ilmiöitä. Ns. etuperoisessa säteenseurannassa säteet lähetetään valonlähteistä, kun taas takaperoisessa säteenseurannassa säteet lähetetään katsojasta päin. Takaperoisessa säteenseurannassa jokaisen kuvapikselin läpi ammutaan säde tai säteitä, jotka osuessaan pintoihin määräävät pikselin värin. Säteenseuranta helpottaa erityisesti peilipintojen kuvantamista ja sitä käytetään myös varjojen luomiseen.

Mallinne (engl. scene) on maisema, malli tai ympäristö, joka on luotu tietokoneella. Mallinne käsittää geometrian ja pintamateriaalit, sekä usein myös animaatioon liittyviä tekijöitä. Mallinteen tekeminen on oleellisin osa kolmiulotteisen tietokonegrafiikan luomiseksi. Sama mallinne voidaan kuvantaa monin eri menetelmin.

Kuvantaminen (engl. rendering) on prosessi, jolla mallinne muutetaan kaksiulotteiseksi kuvaksi. Kuvantaminen on toteutustavasta irrallinen käsite, joten kuvantamista on sekä vuorokausia kestävä säteenseurannan käyttö että reaaliaikainen rasterointiin perustuva piirtäminen. Molemmissa tapauksissa

voidaan ajatella, että kamera katsoo edessään olevan kuvatason läpi, jolle maailma projisoidaan. Tässä yhteydessä lasketaan myös pintojen valaistus.

Näytteistäminen (engl. sampling) on näytteen ottamista. Tietokonegrafiikassa tällä tarkoitetaan esimerkiksi useiden säteiden lähettämistä saman pikselin läpi hieman eri kulmissa, jotta pikselin väri voitaisiin paremmin approksimoida.

Lokaali valaistus (engl. direct illumination) on ei-fysikaalista valaistuksen simulointia. Pinnan valoisuutta laskettaessa määritetään pinnan kulma ja etäisyys kaikkiin valonlähteisiin nähden vuorotellen ja näiden tietojen perusteella arvioidaan pinnan valoisuus. Tämä tekniikka ei yksinään ota huomioon toisten esineiden aiheuttamia varjoja tai mitään valon monimutkaisempia ilmiöitä. Lokaalia valaistusmallia sovelletaan laajalti sekä reaaliaikagrafiikassa että säteenseurantaa käytettäessä.

Liikkeenpehmennys (engl. motion blur) on ajallisen epätarkkuuden mallintamista. Koska tarkoituksena on luoda realistisen näköistä grafiikkaa, on voitava simuloida oikeaa kameraa. Oikean kameran ottama kuva valottuu hetken, eikä kuva siis esitä tiettyä ajanhetkeä, vaan tiettyä ajanjaksoa. Tällaisessa tapauksessa liikkuvat esineet näyttävät pehmeiltä ja hämyisiltä. Liikkeenpehmennys luo illuusion nimenomaan tästä ilmiöstä, ja se on ehdottoman oleellista, jos pyritään luomaan aidon näköinen kuva. Cammarano ja Wann Jensen (2002) esittävät neljä keinoa liikkeenpehmennyksen aikaansaamiseksi: *analyttiset menetelmät*, *ajallinen ylinäytteistys* (engl. temporal supersampling), *jälkipehmennys* (engl. postprocess blur) ja *geometrinen vaihdos* (engl. geometric substitution).

3 GLOBAALI VALAISTUS

Tässä luvussa pyritään selvittämään globaalin valaistuksen toimintaperiaate. Menetelmästä selvitetään ensin kappaleessa 3.1 sen perusajatus ja siitä koituvat hyödyt. Kappale 3.2 tutkii globaalin valaistuksen keskeisiä ongelmia. Kappaleessa 3.3 esitellään tärkeimmät menetelmät globaalin valaistuksen simuloimiseksi.

3.1 Periaate ja hyödyt

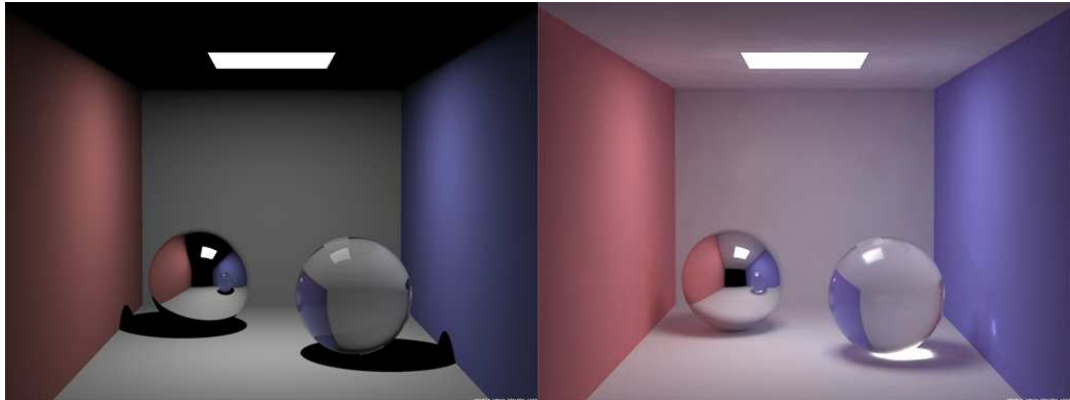
Wann Jensenin (2001, 3) mukaan globaali valaistus on fysiikkaan pohjautuvaa valon sironnan simulointia synteettisessä ympäristössä. Tavoitteena on siis yksinkertaisesti matkia oikean valon käyttäytymistä. Jotta yksittäisen pisteen valaistus voitaisiin määrittää, tulee kaikki heijastukset ja valon mahdolliset polut simuloida. Yksi globaalin valaistuksen oleellisimpia osia onkin epäsuoran valon mallintaminen. Epäsuoraa valoa on kaikki valo, joka ei ole lähtöisin suoraan valonlähteestä. Wann Jensen tuo esille, että ilman globaalia valaistusta kuva näyttää lattealta ja synteettiseltä.

Yksinkertainen esimerkki globaalin valaistuksen toiminnasta ja hyödyistä on kuutionmuotoinen huone, jonka katossa on alaspäin suunnattu lamppu. Lampun varjostin estää lampun valoa kulkeutumasta suoraan kattopinnalle. Käytettäessä lokaalia valaistusta varjojen kanssa, kattopinta on täysin varjostimen heittämissä varjossa. Piirrettäessä kattoa se ei saa mitään valoa, joten se on täysin musta, vaikka huone olisi väriltään valkoinen. Selvästikin lokaali valaistus on riittämätön tapa simuloida kyseistä yksinkertaista tilannetta. Käytettäessä globaalia valaistusta lattia- ja seinäpinnoista heijastuu valoa, joka valaisee katon luoden näin realistisemmän kuvan tilanteesta. Toinen valaiseva esimerkki on kappaleiden valaistuminen peilin kautta.

On monia tapauksia, joissa globaalista valaistuksesta on merkittävää hyötyä. Realistisille kuville on myös paljon sovelluskohteita. Dmitriev ym. (2002)

esittävät sovelluskohteiksi muun muassa tuotesuunnittelun, arkkitehtuuri- ja sisustussuunnittelun sekä valaistussuunnittelun. Globaalin valaistuksen käyttökohteita ovat myös erityyppiset erikoisefektit, mainos- ja elokuvateollisuus sekä tietokonepelit. Globaali valaistus parantaa suuresti kaikilla sovelluskohteillaan kuvantamisen ulkoasua ja uskottavuutta.

Muun muassa Jozwowski (2002) esittää globaalin valaistuksen keskeisiksi hyödyiksi *diffuusit heijastukset* ja *värien vuotamisen*. Wann Jensenin (2001, 21-22) mukaan diffuusit heijastukset ovat heijastuksia, missä valo heijastuu kaikkiin suuntiin osuessaan pintaan. Karkeat pinnat ovat tyypillisesti diffuuseita pintoja. Värien vuotaminen puolestaan on diffuusien pintojen aiheuttama värien siirtyminen pinnasta toiseen. Mainitunkaltainen tilanne esiintyy esimerkiksi sijoittamalla punainen esine valkoisen seinän viereen. Punainen väri heijastuu valkoiselle seinälle eli väri ikään kuin ”vuotaa” pinnalta toiselle.



Kuva 3.1: Wann Jensenin esimerkkikuvia globaalista valaistuksesta. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on käytetty pelkästään perinteistä säteenjäljitystä. Oikeanpuoleinen kuva on tehty fotonikarttoja käyttäen, ja siitä ilmenee kaikki globaalin valaistuksen keskeisimmät hyödyt.

3.2 Ongelmat

Kuten edellä esitettiin, globaali valaistus on varsin hyödyllinen tekniikka realististen kuvien tuotannossa. Vaikka globaali valaistus ratkaiseekin monia ongelmia, käsittää se myös itsessään muutamia huomionarvoisia hankaluuksia.

Tässä kappaleessa käsitellään näistä ongelmista keskeisimpiä. Ongelmat jakautuvat selvästi kahteen kategoriaan: suuret resurssivaatimukset ja laadulliset ongelmat.

Koska monet menetelmät, joilla globaali valaistus saavutetaan, vaativat paljon laskentatehoa, muodostuu ongelmaksi sekä laskentatehon että muistikapasiteetin kohtuuton tarve. Suykens ja Willems (2000) esittävät ongelman erääksi lähteeksi mallinnettujen ympäristöjen kompleksisuuden. Valaisunlaskentamenetelmästä riippuen mallien monimutkaisuus voi ratkaisevasti kasvattaa valaisuun tarvittavaa laskentamäärää. Suykens ja Willems tuovat esille myös materiaalien vaikutuksen valaistukseen. Jos materiaalilla on monimutkaisia heijastus- ja taittamisominaisuuksia, on sen laskeminen huomattavasti esimerkiksi peilipintaa raskaampaa.

Tawara ja Myszkowski (2002) tuovat esille nykyisten globaalia valaistusta simuloivien tekniikoiden kyvyttömyyden hyödyntää jo laskettua tietoa animaation yhteydessä. Jos jokaista kuvaa varten suoritetaan samankaltaisia laskutoimituksia uudestaan ja uudestaan, menee laskentatehoa merkittävästi hukkaan. Kuvannettavan tilanteen muuttuessa vain vähän perättäisten kuvien välillä, aiempien kuvien laskennassa saatuja tuloksia tulisi voida tehokkaasti hyödyntää. Animaatiossa keskeisessä osassa on yleensä se, että ympäristö on jollain tavalla dynaaminen eli ajan mukana muuttuva. Liikkeen aiheuttamien muutosten tehokas huomioiminen on varsin tärkeää. Benedek ja Szécsi (2002) pitävätkin dynaamisia ympäristöjä yhtenä säteenseurantaan perustuvan kuvantamisen suurimmista ongelmista.

Globaalia valaistusta simuloitaessa on tyypillistä, että hyvän kuvanlaadun saavuttaminen edellyttää korkeaa näytteistämismäärää. Kun kuvantamisvaiheessa yksittäisen pikselin läpi ammutaan säde, edustaa saatu väri vain häviävän pientä osaa kyseisen pikselin läpi näkyvästä maailmasta. Jotta pikseli todella edustaisi sen peittämää maailmaa, tulee sen läpi ampua useita säteitä.

Tätä käsitellään tarkemmin globaalien valaistuksen menetelmissä. Jos pikselin läpi ammutaan useita säteitä, vaatii kuvantaminen runsaasti laskenta-aikaa. Vaihtoehtoisesti kuvanlaatu on epätasaista, sillä tasaisellakin pinnalla voi esiintyä runsaasti kohinaa, mikä on silmälle epämiellyttävää. Etenkään animaatiossa kohinaa ei voida hyväksyä. Suykens (2002) pitääkin tärkeänä tutkimuskohteena tarkan virreehallinnan kehittämistä globaalien valaistuksen algoritmeille.

Globaali valaistus on tyypillinen ei-reaaliaikaiseksi suunnattu menetelmä. Dmitriev ym. (2002) tuovatkin esille sen, että nyky menetelmät edellyttävät animoitavien elementtien tuntemista etukäteen. Lisäksi laskentatehoa optimoitaessa keskitytään pääsääntöisesti koko laskenta-ajan lyhentämiseen – yksittäisten kuvien laskenta-aikojen välillä saa yleensä olla suuriakin eroja. Jos globaalia valaistusta halutaan soveltaa reaaliaikaisen interaktiivisen grafiikan luomiseen, on tehtävä vahva kompromissi kuvanlaadun ja laskentanopeuden välillä. On erityisen tärkeää, että kaikki kuvat voidaan laskea keskenään likipitään yhtä nopeasti.

Dmitriev ym. (2002) tuovat myös esille satunnaisuuteen liittyvän ongelman interaktiivisissa ympäristöissä: Jos valoa lisätään alueille inkrementaalisesti esimerkiksi fotonien muodossa, on tarpeen pitää huolta siitä, että valoa lisätään tasaisesti pinnalle ilman keskittymiä. Keskittymät saattaisivat näkyä piirrettäessä, joten tasaisen peiton aikaansaamiseksi inkrementaalisesti on syytä käyttää ns. quasi-satunnaisuutta. Tämä on tärkeää globaalien valaistuksen yhteydessä menetelmästä riippumatta. Quasi-satunnaisuuden periaatetta käsitellään tarkemmin fotonikarttojen edellytysten yhteydessä.

3.3 Menetelmät

Globaalia valaistusta voidaan simuloida useilla eri menetelmillä. Kaikkein alkeellisin menetelmä on *taustavalon* (engl. ambient light) lisääminen kaikille pinnoille. Tällä tavalla luodaan vaikutelma epäsuorasta valosta, mutta saatu

approksimaatio on varsin virheellinen vaikkakin sitä käytetään laajalti. Tässä kappaleessa esitellään fotonikartoille vaihtoehtoisia keskeisimpiä menetelmiä globaalin valaistuksen simuloimiseksi.

Monte Carlo -säteenjäljitys

Normaalia säteenjäljitystä käytettäessä pystytään aikaansaamaan Wann Jensenin (2001, 34-36) mukaan vain peiliheijastukset, taitokset ja lokaali valaistus. Tätä voidaan parantaa huomattavasti käyttäen Monte Carlo -menetelmiä, jotka ovat normaalin säteenjäljityksen laajennoksia. Monte Carlo -menetelmien avulla voidaan simuloida kaikki tarvittavat efektit, sillä kaikki valon reitit pyritään ottamaan huomioon.

Polunjäljitys

Polunjäljitys (engl. path tracing) on yksinkertainen Monte Carlo -menetelmä. Perusajatuksena on, että pikseliä kuvannettaessa ammutaan sen läpi useita säteitä, jotka kukin lähettävät uuden säteen kohdatessaan pinnan. Kun pikselin läpi ammuttu säde siis kohtaa ensi kerran pinnan, lähetetään pinnan heijastusominaisuuksien mukaisesti siitä toinen säde keräämään pinnan epäsuoraa valaisua. Useita säteitä saman pikselin läpi ammuttaessa epäsuoraa valaisua keräävät säteet lähtevät suurella todennäköisyydellä keskenään eri suuntiin, ja keräävät siten sopivasti valoa ympäristöstä. Tällöin saadaan hyvä approksimaatio globaalista valaistuksesta.

Wann Jensenin (2001, 37-42) mukaan suhdetta kuvanlaadun ja laskentatehon tarpeen välillä voidaan säätää muuttamalla yksittäisen pikselin näytteistämismäärää. Näytteitä voidaan ottaa huomattavan suuria määriä - on mahdollista, että näytteitä otetaan jopa 10 000. Menetelmän ongelmana on kohina, jota esiintyy liian pienellä näytteistysmäärällä.

Polunjäljitys toimii yksinkertaisissa tapauksissa. Suykens (2002) mainitsee menetelmän toimivan erityisen hyvin peiliheijastusten yhteydessä. Wann

Jensen (2001, 41) tuo esille, että menetelmää on parannettu, jotta kohina vähenisi. Tätä on tehty esimerkiksi keskittämällä kimpoavien säteiden suunta alueille, joilla on merkittävä rooli pinnan värin muodostamisessa.

Kaksisuuntainen polunjäljitys

Polunjäljitysalgoritmia on kehitetty myös kaksisuuntaiseksi. Suykensen (2002) ja Wann Jensenin (2001, 43-47) mukaan *kaksisuuntaisessa polunjäljityksessä* (engl. *bi-directional path tracing*) säteitä ammutaan sekä kamerasta että valonlähteistä käsin. Tämä on hyödyllistä siksi, että eri efektit ovat helpompia mallintaa eri suunnasta lähdettäessä. Esimerkkinä valonlähteestä helpommin mallinnettavasta efektistä toimii kaustiikka, jota käsitellään myöhemmin. Katsojan näkökulmasta on helpompi mallintaa esimerkiksi peiliheijastuksia. Ammuttujen säteiden kimpoamispisteet yhdistetään ja lopullinen arvio saadaan laskemalla lukuisien eri polkujen painotettu keskiarvo. Menetelmän ongelmana on, kuten edeltäjälläänkin, kohina. Kaksisuuntainen polunjäljitys ei Wann Jensenin mukaan sovellu ulkoilmamallien laskemiseen.

Radiositeetti

Radiositeetti (engl. *radiosity*) valonvälittymismenetelmänä käyttää esikuvanaan lämmön siirtymistä pintojen välillä. Radiositeetti tekee sen oletuksen, että pinnat ovat luonteeltaan diffuuseja eli ne säteilevät valoa tasaisesti ympäristöönsä. Jozwowski (2002) esittää radiositeettimenetelmän kolmivaiheisena.

Ensimmäisessä vaiheessa pinnat jaetaan pieniin osasiin, jotta valaistus ja varjot voidaan esittää riittävän tarkasti. Esimerkiksi kokonainen seinä voi koostua vain yhdestä monikulmiosta, mutta se on yleensä valaistu eri lailla eri kohdista. Tämän jälkeen määritetään pinnoille kertoimia jokaista pintaa kohden, jotka ne näkevät. Pinnoille siis määritetään niiden keskinäinen valonsiirto.

Toisessa vaiheessa otetaan huomioon mallinnetun ympäristön kaikki ensimmäisessä vaiheessa määritetyt kertoimet sekä valonlähteet. Tavoitteena on

saavuttaa tasapaino valonlähteiden ja pintojen valoisuuden välillä. Tasapaino saavutetaan, kun valonsiirto pintojen välillä ei enää muuta yhdenkään pinnan valoisuutta. Tämä voidaan tehdä ratkaisemalla huomattavan monimutkainen yhtälö tai käyttämällä esimerkiksi iteratiivista lähestymistapaa nimeltä *progressiivinen jalostus* (engl. progressive refinement). Progressiivisessa jalostuksessa valoa lähetetään ensin valonlähteistä pinnoille, joista valoa edelleen lähetetään muille pinnoille. Tätä voidaan jatkaa, kunnes haluttu tarkkuus on saavutettu.

Kolmannessa vaiheessa pinnat piirretään käyttäen *Gouraud-sävytystä*, mikä on tyypillisin monikulmion sävytysmenetelmä. Tämä mahdollistaa myös generisen näytönohjainkiihdytyksen käyttämisen kuvantamisvaiheessa. OpenGL:n tyyppisille rajapinnoille voi antaa geometrian ja sävytyksen, joka vastaa määritettyä radiositeettilaskua. Valaistuksen laskeminen on siis piirrosta täysin irrallinen prosessi ja piirtäminen voidaan toteuttaa myös säteenjäljityksellä.

Radiositeettimenetelmät sopivat Wann Jensenin (2001, 6) mukaan yksinkertaisille malleille, joissa on lähinnä diffuuseja materiaaleja. Monimutkaisille malleille radiositeetin laskeminen on hitaampaa ja lukuisat pinnat tekevät tasapainon saavuttamisen hankalaksi. Karuimmillaan radiositeetti ei huomioi esimerkiksi peilipintoja, eikä se siten suoraan sovellu kaikkiin tapauksiin.

Hybridimenetelmät

Wann Jensenin (2001, 6-7) mukaan ensimmäiset hybridimallit lisäsivät peiliheijastukset radiositeetti-menetelmään säteenjäljityksen avulla. Myöhemmin myös varjoja ja kaustiikoita laskettiin säteenjäljitystä käyttäen, jolloin radiositeettiä käytettiin ainoastaan epäsuoran valon laskemiseen. Radiositeetin käyttäminen rajoittaa kuitenkin käytettävän geometrian monimutkaisuutta. Suykensin (2002) mukaan esimerkiksi ns. Monte Carlo -radiositeetti on varsin tehokas hybridimenetelmä.

4 FOTONIKARTAT

Fotonikarttojen (engl. photon maps) luojana pidetään Henrik Wann Jensenia (2001, Pat Hanrahanin esipuhe). Wann Jensen (2001, preface) kertoo fotonikarttojen käsitteen syntyneen vuonna 1994. Ajatus pohjautuu *valaisukarttoihin* (engl. illumination maps), jotka ovat tekstuurikarttojen kaltaisia pinta-kuviointeja. Fotonikarttoja käytettäessä ei varsinaisesti mallinneta fotoneita, sillä Wann Jensenin (2001, 13) mukaan fotonit liittyvät lähinnä valon ja materian interaktioon. Tässä tapauksessa fotonien mallinnuksessa mallinnetaan itse asiassa sädeoptiikkaa, joten efektit kuten diffraktio ja polarisaatio jäävät edelleen huomioimatta. Fotoni on siis tässä tapauksessa valopartikkeli, joka lähetetään valonlähteestä ja tallennetaan pinnalle.

Fotonikarttojen käyttö on kaksivaiheinen prosessi. Ensin fotonit lähetetään valonlähteistä, kuten aurinko, lamput tai tuli, minkä jälkeen saadun fotonipiteen tiheyttä arvioidaan pintoja kuvannettaessa. Tässä luvussa käsitellään käytön edellytykset ja fotonikarttojen käytöstä saatavat hyödyt sekä ongelmat. Lisäksi käsitellään erikoistekniikoita, joilla fotonikarttojen käyttöä on monipuolistettu ja parannettu.

4.1 Prosessi

Tässä kappaleessa selvitetään fotonikarttojen käyttö. Kappaleen sisältö on jaettu siten, että tarvittavat toimenpiteet ja hyödylliset menetelmät esitellään fotonikartoitusprosessin mukaisessa järjestyksessä. Fotonikarttojen käyttö on *kaksivaiheinen* menetelmä, joista ensimmäinen on ripottelu ja toinen visualisointi.

Ensimmäinen vaihe eli ripottelu

Fotonikarttojen ensimmäisessä vaiheessa fotoneita lähetetään valonlähteistä, kimmotetaan pinnoista ja tallennetaan tietorakenteeseen. Painopiste on fotonikartan rakentamisessa siten, että siitä voidaan hakea tietoa mahdollisimman

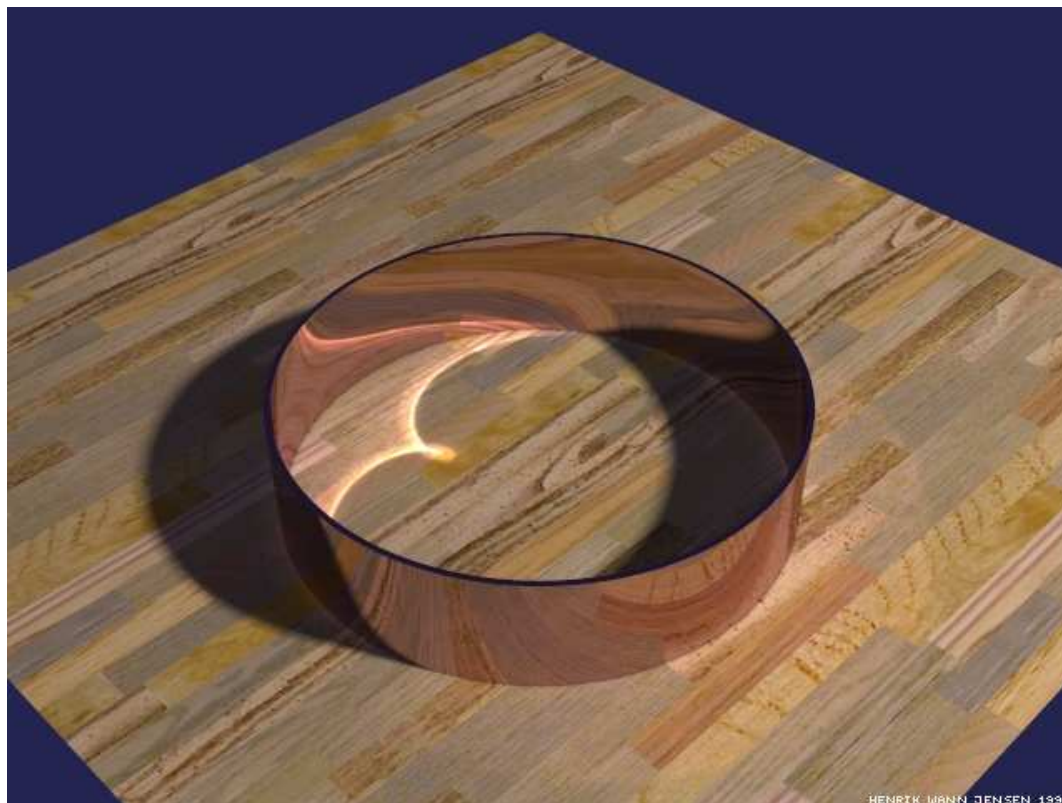
tehokkaasti. Ensimmäinen vaihe suoritetaan kuvantamisesta irrallisena prosessina, joten tässä vaiheessa ei tarvitse ottaa kantaa fotonikartan käyttötarkoitukseen tai menetelmään. On kuitenkin järkevää ottaa huomioon jatkoimenpiteet jo fotonikarttoja luotaessa.

Valot

Wann Jensenin (2001, 55-60) mukaan tyypillisiä valoja ovat pistemäinen valo, spottivalo ja aluevalo. Muunkinlaisia valonlähteitä on paljon, sillä jopa esineet voivat säteillä valoa. Fotonikarttoja käytettäessä valonlähteet lähettävät fotoneita tyyppinsä määräämään suuntaan. Wann Jensenin mallin mukaisesti valoilla on tietty intensiteetti, joka jaetaan lähetettävien fotonien kesken. Fotonien lähettäminen tarkoittaa säteenjäljittämisen aloittamista valonlähteestä, jossa säteen suuntavektori määritetään valonlähteen tyyppin mukaan.

Wann Jensen (2001, 98) painottaa, että kaustiikoita mallinnettaessa kannattaa fotonien ampuminen erikseen keskittää peiliheijastuksia aikaansaavia pintoja kohden. Tällä tavoin saavutetaan riittävä tarkkuus kuvannettaville kaustiikoille. Benedek ja Szécsi (2002) kuvaavat kaustiikan ilmiöksi, joka syntyy, kun valo välittyy tai heijastuu lukuisten heijastavien pintojen kautta ja kohtaa lopulta diffuusin pinnan. Merenpohjassa näkyvät valon aaltoilut ja konjakkilasien läpi pöytään heijastuva auringonvalo ovat hyviä esimerkkejä kaustiikasta.

Koska fotonit halutaan lähettää valoista mahdollisimman tasaisena massana kohinan minimoimiseksi, on syytä käyttää tilanteeseen sopivaa satunnaismenetelmää. Erityisesti jos fotonien lähettäminen suoritetaan inkrementaalisesti, on arpomisen suorittaminen mahdollisimman vähin kasaumin tärkeää. Tällaisessa tapauksessa Dmitriev ym. (2002) suosittelivat quasi-satunnaisuuden käyttöä.



Kuva 4.1: Wann Jensenin esimerkkikuva kaustiikasta. Valon heijastuminen metalliesineen sisäreunasta aiheuttaa puun pintaan fotonikeskittymän, joka nähdään kirkkaana ilmiönä.

Heinrich ja Keller (1994) kuvaavat quasi-satunnaisuuden prosessiksi, jossa arpominen perustuu matemaattisiin sekvensseihin. Arpominen ei ole satunnaista, vaan determinististä. Käytännössä quasi-satunnaisuutta käytettäessä uudet arvot ovat kyllä satunnaisia, mutta sijoittuvat sopivasti aiemmin arvottujen väliin. Koordinaatteja arvottaessa pinnalle uudet arvot ikäänkuin täyttävät edellisten arvojen jättämiä aukkoja, jolloin saavutetaan mahdollisimman tasainen jakauma.

Geometria ja materiaalit

Perusedellytyksenä fotonikarttojen käytölle ovat tietenkin geometriset mallit. Malleille on määritetty materiaali, joka kuvaa joukon pinnan ominaisuuksia, kuten heijastavuus, väri ja läpinäkyvyys. Wann Jensenin (2001, 60-64) mukaan kohdatessaan pinnan fotonit voi joko heijastua, välittyä tai absorboitua pintaan.

Useassa tapauksessa osa fotonin energiasta imeytyy pintaan jättäen valovoimaa pinnalle ja osa energiasta jatkaa kulkuaan ympäristöön pinnan ominaisuuksien määräämällä tavalla. Wann Jensen huomauttaa, että kohdattavien esteiden ei tarvitse olla luonteeltaan kiinteitä, vaan myös partikkeliluonteiset materiaalit, kuten savu, tulee huomioida.

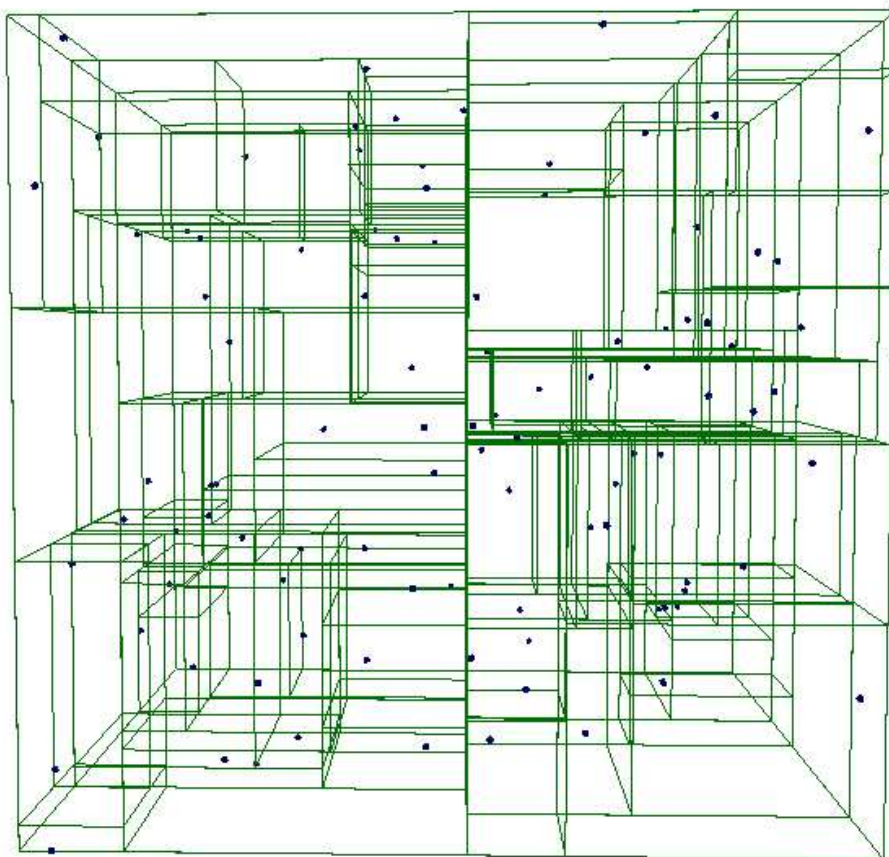
Valon heijastuessa materiaalin pinnasta, se noudattaa yhtä kolmesta heijastumistavasta. Heijastus voi olla tyypiltään diffuusi, jolloin valoa heijastuu kaikkiin suuntiin kimpoamispisteestä. Peiliheijastuksessa valo heijastuu melkein täydellisesti, yleensä kapeana kartiona. Valo voi myös tunkeutua pinnan alle, jolloin se heijastelee materiaalin sisälle ja mahdollisesti poistuu osumakohdan läheisyydessä. Pinnan alla heijastumista tapahtuu Wann Jensenin (2001, 127-129) mukaan lähinnä läpikuultavilla materiaaleilla kuten iho ja marmori, mutta myös jossain määrin kaikilla ei-metallisilla materiaaleilla. Heijastumismalleja yksinkertaistetaan usein olettamalla, että pinnat ovat luonteeltaan diffuuseja tai peilimäisiä.

Wann Jensen (2001, 61-64) suosittelee venäläinen ruletti -nimisen tekniikan käyttöä arvioitaessa sitä, monenako fotonina fotoni jatkaa matkaansa kohdattuaan pinnan. Selvästikään fotoni ei voi aina vain monistua esimerkiksi kahdeksi, sillä kahdeksan kimpoamisen jälkeen jäljitettäviä fotoneita olisi jo 256.

Fotonien varastointi

Kun fotoni ei enää kimpoa pinnasta tai osa sen energiasta jää kimpoamispisteeseen, se pitää tallentaa sopivaan tietorakenteeseen. Wann Jensenin (2001, 64-72) mukaan fotoneita varastoidaan ainoastaan silloin, kun ne kohtaavat diffuusin pinnan – peilipinnoilla fotonien varastointi on tarpeetonta. Fotonit varastoidaan erilliseen tietorakenteeseen, jonka tulee olla kompakti muistivaatimuksiltaan ja nopea lähimpien naapureiden haussa. Wann Jensenin mukaan tarkoitukseen soveltuu parhaiten niin sanottu kd-puu.

Bentleyn (1975) mukaan kd-puu on rakenteeltaan binääripuu, joka jakaa n -ulotteisen joukon n -ulotteisiin osajoukkoihin. Varsinainen tieto varastoidaan lehtisolmuihin ja ylemmän tason solmut jakavat n -ulotteisen alueen jonkin akselin määräämällä. Kaksiulotteisessa kd-puussa jako tapahtuu x - ja y -akselien mukaisilla suorilla, kun taas kolmiulotteisessa kd-puussa jako tehdään xy -, xz - ja yz -tasoilla.



Kuva 4.2: Esimerkki kolmiulotteisesta kd-puusta. Sata palloa on jaettu kukin omaan solmuunsa.

Suykensin (2002) mukaan fotonikarttojen yhteydessä jokainen lehtisolmu sisältää fotonin. Käyttämällä tehokasta koodausta fotonin tietojen esittämiseksi, on mahdollista pakata yksittäisen fotonin vaatima muistitila 20 tavuun. Wann Jensenin (2001, 69) mukaan yksittäisestä fotonista tulee tallentaa paikka, väri ja

tulosuunta. Tietorakenteessa tulee lisäksi olla tieto jakavan tason orientaatiosta, jotta haku onnistuu. Kd-puu voidaan rakentaa joko lisäämällä fotonit suoraan siihen ja tasapainottamalla lopuksi puu. Vaihtoehtoisesti puu voidaan rakentaa vasta sitten, kun kaikki fotonit on lähetetty.

Toinen vaihe eli visualisointi

Fotonikarttojen toisessa vaiheessa lähetettyjä fotoneita käytetään pintojen valaistuksen laskennassa. Fotoneita voidaan käyttää monella tavalla visualisoinnin yhteydessä, mutta oleellista on fotonien tiheyden tehokas arviointi.

Tiheyden arviointi

Fotonikartta edustaa pinnan saamaa valovoimaa. Yksittäisen fotonin perusteella ei voida kuitenkaan määrittää pinnan saamaa valoisuutta, joten on tarpeellista arvioida pinnalla olevien fotonien tiheys. Suykens (2002) toteaa, että tiheyden arviointiin on olemassa kolme tärkeää menetelmää: histogrammi-metodi, kernel-metodi ja lähimmän naapurin -metodi. Suykensin mukaan lähimmän naapurin metodia käytetään fotonikarttojen valoisuuden määrittämiseksi.

Valoisuutta arvioidaan siis hakemalla tietyn pisteen lähimmät N fotonia pallomaisella haulla. Fotonien määrän kasvaessa pienemmät yksityiskohdat otetaan paremmin huomioon, mutta toisaalta haku kestää tällöin kauemmin. Wann Jensen (2001, 73-78) tuo esille, että tiheyden arvioinnin ansiosta valoisuuden näkyvästä virheestä tulee matalataajuista kohinaa korkeataajuisten kohinan sijaan. Tämä saa aikaan sen, että menetelmän avulla saatu valoisuuden keskimääräinen odotusarvo ei välttämättä vastaa todellisuutta. Fotonien määrää kasvattamalla tulos kuitenkin lähenee oikeaa.

Visualisointi

Fotonikarttaa voidaan hyödyntää kahdella tavalla visualisoitaessa sitä. Sitä voidaan käyttää joko epäsuoran valon lähteenä tai määrittää sen avulla suoraan pinnan valoisuutta. Suora visualisointi toimii parhaiten kaustiikkaa kuvannettaessa. Kaustiikka-fotonit kannattaakin Wann Jensenin (2001, 97-99) mukaan tallentaa omaan fotonikarttaansa, jonka avulla lasketaan nimenomaan vain kaustiikkaefektit suoraan. Fotonikarttaa suoraan visualisoitaessa arvioidaan pistettä kuvannettaessa kyseisen pisteen ympäristössä olevaa fotonikarttaa, mikä määrää yhdessä pinnan värin kanssa kuvapisteen värin.

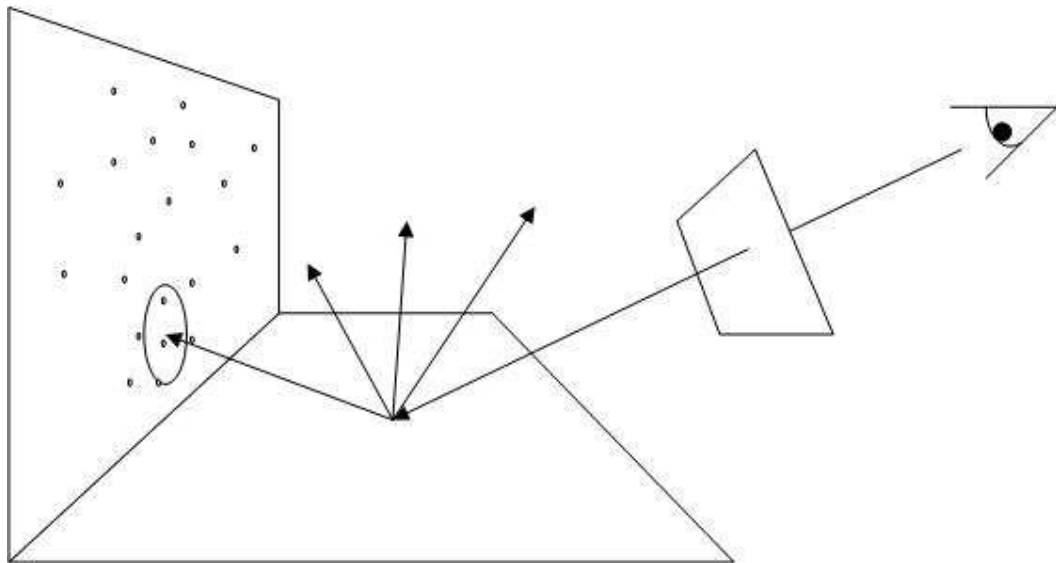


Kuva 4.3: Kun pinnan väri määritetään suoraan fotonikartan avulla, pinnalla esiintyy runsaasti matalataajuuksista kohinaa. Epäsuora valo ja värien vuotaminen voidaan silti havaita.

Wann Jensen (2001, 99-100) kehottaa käyttämään niin sanottua globaalia fotonikarttaa koko mallinteen fotonikarttana. Tähän fotonikarttaan tallennetaan normaalisti lähetetyt fotonit, eli kaustiikoita varten lähetetyt fotonit eivät kuulu tähän. Globaalia fotonikarttaa hyödynnettäessä otetaan huomioon sekä suora

että epäsuora valaistus pikseliä renderöitäessä. Suora valaistus lasketaan normaalisti riippumatta fotonikartasta valonlähteiden sijainnin perusteella. Peiliheijastukset puolestaan lasketaan perinteisesti käyttäen rekursiivista säteenjäljitystä.

Epäsuora valaistus lasketaan lähettämällä pisteestä useita säteitä, jotka keräävät pisteeseen tulevan epäsuoran valaistuksen. Tällainen keräämisprosessi on nimeltään *viimeistelevä keräys* (engl. Final gathering). Suykensin (2002) mukaan viimeistelevä keräys on kuvantamisen aikaavievin osa, sillä tyypillisesti yli 95% kuvantamisajasta kuluu tähän. Jotta tällä menetelmällä saataisiin aikaan kohinaton kuva, pitää kerääviä säteitä lähettää riittävän suuri määrä. Viimeistelevää keräystä on pyritty optimoimaan runsaasti, jotta kuvantamisaikaa voitaisiin lyhentää.



Kuva 4.4: Viimeistelevän keräyksen toimintaperiaate. Kuvatason läpi lähetetään säde, jonka osupispisteestä pinnan kanssa lähetetään kerääviä säteitä.

4.2 Hyödyt

Fotonikartta-menetelmän avulla saavutetaan Jozwowskin mukaan kaikki radiositeetti-menetelmän hyödyt, mutta sen ongelmat vältetään. Radiositeetin tapaan fotonikartoitus on kuvantamisesta irrallinen prosessi, joten valaistusta voidaan käsitellä täysin omana kokonaisuutenaan. Fotonikarttoja käytettäessä saadaan käyttöön myös säteenjäljityksen edut. Fotonikarttojen toteuttaminen on lisäksi yksinkertaista, sillä Suykensin mukaan fotonikatat on helppo toteuttaa laajennoksena standardeihin Monte Carlo -polunjäljittäjiin.

Suykens ja Willems (2000) sekä Wann Jensen (2001, 53) ilmoittavat fotonikarttojen eduksi sen riippumattomuuden geometrian monimutkaisuudesta ja kyvyn käsitellä kaikenlaiset geometriat. Geometria ei siis periaatteessa vaikuta fotonikartoilla mallinnettavan valaistuksen laskenta-aikaan. Suykensin (2002) kuvauksen mukaan tästä seuraa se, että fotonikartat skaalautuvat geometriselta kompleksisuudeltaan hyvin erilaisiin tilanteisiin. Jos geometrinen malli koostuu riittävän pienistä monikulmioista, riittää käyttää sen valaistuksen laskemiseen jopa vähemmän fotoneita kuin siinä on monikulmioita.

Fotonikarttojen käyttö soveltuu hyvin myös animaatioon. Tawaran ja Myszkowskin mukaan fotonikarttoja käytettäessä ei esiinny stokastista kohinaa, mikä on tyypillistä Monte Carlo -menetelmille. Fotonikarttoja käyttämällä tällainen korkeataajuuksinen kohina saadaan yleensä eliminoiduksi, joskin matalataajuuksista kohinaa saattaa silti esiintyä myös fotonikarttojen käytön yhteydessä. Jos käytetään liikkeenpehmennystä, voidaan Cammaranon ja Wann Jensenin (2002) mukaan fotonikarttojen laajennosta hyödyntää onnistuneesti liikepehmenetyn valaistuksen simuloinnissa.

Fotonikarttoja käytettäessä pystytään helposti simuloimaan efektejä, joiden aikaansaaminen muilla keinoin on hankalaa tai mahdotonta. Wann Jensen (2001, 53-54) ilmoittaa kaustiikan helpon mallintamisen yhdeksi fotonikarttojen

suunnittelussa huomioiduksi peruseriaatteenksi. Kaustiikka-efektejä onkin yksinkertaista aikaansaada fotonikarttojen avulla.

Globaalin valaistuksen perushyötyjä oleva värien vuotaminen mallintuu helposti fotonikarttojen avulla. Wann Jensen (2001, 113-137) kuvailee fotonikarttojen soveltuvan hyvin myös savun tai pölyn valaisemiseen. Fotonikartoilla pystytään käsittelemään kaikentyyppisiä heijastuksia - myös pintojen sisällä tapahtuvia. Tällaisia pinnansisäisiä heijastuksia tapahtuu muun muassa ihon ja marmorin pinnassa. Fotonikartat soveltuvat hyvinkin vaihtelevien valaisuolosuhteiden esittämiseen, vaikka vaihtelevat olosuhteet olisivat fyysisesti lähellä toisiaan. Muita Wann Jensenin (2001, 51-54) luettelemia hyötyjä ovat fotonikarttojen kompaktius, nopeus ja tehokkuus.

4.3 Ongelmat

Tässä kappaleessa selvitetään, mitkä ovat fotonikarttoihin liittyvät keskeisimmät ongelmat. Fotonikartoille pätevät luonnollisesti myös kappaleessa 3.2 esitetyt ongelmat. Fotonikartoille ominaiset ongelmat liittyvät pääasiassa edellisessä kappaleessa esiteltyihin vaiheisiin ja menetelmiin. Ongelmat pyritään käsittelemään fotonikartoitusprosessin mukaisessa järjestyksessä. Kaikkiin esitettyihin ongelmiin on olemassa menetelmiä, joilla ongelmien vaikutusta voidaan vähentää tai poistaa kokonaan.

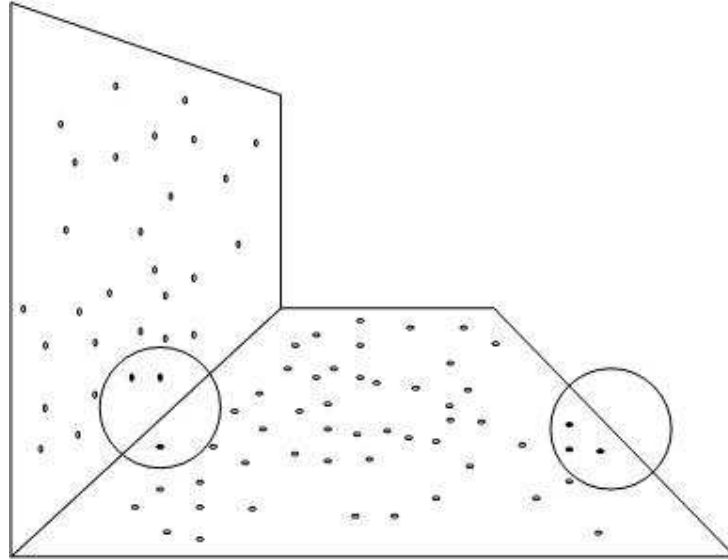
Keskeinen ongelma on fotonikartan tarkkuus. Suykensin ja Willemsin (2000) mukaan on vaikeaa tietää, kuinka paljon fotoneita kannattaa käyttää minkäkin mallinteen yhteydessä. Useissa sovelluksissa käyttäjä päättää tästä määrästä, jolloin hänen tietämyksensä on ratkaisevassa osassa. Jos fotoneita on liian vähän, on Wann Jensenin (2001, 80-82) mukaan niiden kuvaama valoisuus liian sameaa. Tämä on merkittävä ongelma kaustiikkaa laskettaessa, sillä siinä fotonikartta vaikuttaa suoraan lopputulokseen. Dmitriev ym. (2002) pitävät fotonien jakaumaa pinnoilla keskeisenä ongelmana, sillä usein liian paljon fotoneita lähetetään hyvin valaistuille pinnoille, ja etäiset alueet jäävät

vähemmälle huomiolle. Suykens ja Willems (2000) painottavat, että pimeät alueet saattavat tarvita suurenkin määrän fotoneita, jotta fotoneita on riittävän paljon.

Keller ja Wald (2000) tuovat esille kaustiikka-efekteihin liittyvän ongelman. Kaustiikka saadaan aikaan automaattisesti keskittämällä kaustiikkaa aikaansaavien pintojen suuntaan tavallista suurempi määrä fotoneita. Tämä ei kuitenkaan riitä, sillä epäsuoran valon aikaansaamat kaustiikka-efektit jäävät tällöin huomiotta. Käyttäjän pitää suorittaa manuaalisia toimenpiteitä, jotta epäsuorat kaustiikka-efektit saataisiin mukaan.

Wann Jensenin (2001, 79) mukaan pallon muotoinen haku aiheuttaa ongelmia etenkin nurkissa ja terävissä kulmissa. Tällaiset erikoistapaukset on tärkeää ottaa huomioon. Keskeinen ongelma on kuitenkin se, että fotonit voivat helposti "vuotaa" alueille, joille ne eivät kuulu. Tämä tarkoittaa sitä, että fotonit huomioidaan pintoja laskettaessa siten, että väärätkin fotonit vaikuttavat jonkun alueen valoisuuteen. Wann Jensen esittää, että pakottamalla haku ellipsoidin muotoiseksi saadaan monissa kohdin parempia tuloksia. Suykens (2002) tuo esille, että ellipsoidin muotoinen haku hidastaa hakualgoritmia, mikä ei yleensä ole toivottavaa.

Keskeinen ongelma tiheyttä arvioitaessa esiintyy pintojen reunoja käsiteltäessä. Suykensin (2002) mukaan ripoteltaessa fotonit pinnalle tasaisesti, reuna-alueilla esiintyy ongelmia. Pinta näyttää reunoiltaan muuta osaa tummemmalta, sillä haettaessa reunoilla lähimpiä fotoneita, löytyy niitä muita pinnan osia vähemmän. Tiheyden arviontiin liittyy myös toinen Suykensin mainitsema ongelma. Käyttäjä joutuu usein säätämään käsin, montako fonia lähimmän naapurin haussa otetaan mukaan. Sopivan määrän löytäminen voi olla vaikeaa etenkin, jos mallinteen eri osat edellyttävät erilaisia hakumääriä.



Kuva 4.5: Ongelmallisia tilanteita fotonien tiheyttä arvioitaessa. Kulmissa ja reunoilla on vaikeaa arvioida fotonien tiheyttä, sillä mukaan laskettavien fotonien määrä ei esimerkiksi alueen reunalla vastaa keskialueilta saatua arvoa, vaikka kirkkauden tulisi olla sama.

Suykens (2002) esittää myös tilanteen, jossa valoisuuden epäjatkuvuus on ongelmallista. Suurimman ongelman aiheuttaa tilanne, jossa fotonien määrä tippuu nolnaan. Haettaessa lähimpiä fotoneita pimeillä alueilla, saadaan hakuun mukaan valoisian alueen fotoneita, vaikka haluttaisiin pinnan olevan pimeä. Ongelmia esiintyy etenkin pimeiden ja valoisien alueiden rajoilla.

Fotonien tehokas varastointi on oleellista. Suykens ja Willems (2000) huomauttavat, että fotonikartan tarvitsema muistimäärä voi kasvaa varsin suureksi. Jotta haku olisi nopeaa, tulee fotonikartta pitää keskusmuistissa eikä sitä siten voi varastoida osin esimerkiksi kovalevyille. Pienillä fotonimäärillä ongelmia muistinkulutuksen kanssa ei esiinny, mutta kun mallinteeseen on ripoteltu miljoonia fotoneita, vaativat ne varsin paljon varastokapasiteettia.

Suykens (2002) mainitsee viimeistelevän keräyksen olevan varsin aikaavievä. Fotonikarttoja käytettäessä partikkelit eivät tyypillisesti luovuta suoraan valoa pinnoille, jolloin valoisuuden laskemiseen menee huomattavan paljon aikaa. Viimeistelevän keräyksen yhteydessä voi myös esiintyä laadullisia ongelmia.

Suykens tuo esille, että jos pinta, johon keräävät säteet osuvat, on lähellä keräyspistettä, saattaa fotonikartan matalataajuuksinen kohina näkyä viimeistelevän keräyksen tuloksessa.

Fotonikarttojen käyttö perusmuodossaan liikkeenpehmennyksen yhteydessä on vaikeaa. Cammarano ja Wann Jensen (2002) huomauttavat, että jos fotonikarttoihin ei liitetä mitään aikatietoa, saadaan niitä käyttämällä virheellinen arvio valaistuksesta. Bendekin ja Szécsin mukaan fotonikartat eivät myöskään sovellu perusmuodossaan reaaliaikaisiin sovelluksiin. Puun uudelleenrakentaminen ja lähimpien fotonien hakemien on liian hidasta tehtäväksi useita kertoja sekunnissa.

4.4 Erikoistekniikat

Tässä kappaleessa esitellään joitakin keskeisiä menetelmiä, joilla fotonikartoilla saatavien kuvien laatua voidaan parantaa ja niiden käyttöä helpottaa, monipuolistaa tai nopeuttaa.

Wann Jensen (2001) on esittänyt optimointi- ja parannusmenetelmiä moniin kappaleessa 4.3 esitetyistä ongelmista. Hän muun muassa suosittaa erilaisten filttäreiden käyttö, jotta fotonikartan liian harvat osat aiheuttaisivat vähemmän ongelmia. Wann Jensen myös esittelee varjofotonit, joita ammutaan esineiden läpi ikäänkuin negatiivisena valona. Nämä toimivat monissa tapauksissa, mutta voivat helposti jättää huomioimatta pienten esineiden muodostamat varjot.

Suykens ja Willems (2000) ehdottavat tasaisen fotonipeiton luomiseksi hallittua fotonien lähettämistä. Rajoittamalla lähetettyjen fotonien määrää säästetään myös merkittävästi muistia. Fotonien kontrollointi voidaan esimerkiksi tehdä siten, että fotonia tallennettaessa tarkastellaan ensin sen ympäristöä ja tarvittaessa fotoni jätetään tallentamatta ja jaetaan sen energia ympäröiville fotoneille. Jos fotonikartoista voidaan tehdä riippuvaisia kameran sijainnista, jolloin samaa fotonikarttaa käytetään ainoastaan yhdestä kuvakulmasta,

voidaan Suykensin (2002) mukaan luoda ensin ns. *tärkeyskartta* (engl. importance map), jonka avulla voidaan selvittää, kuinka tärkeä mikäkin alue on katsojan näkökulmasta. Tämän avulla voidaan määrittää, mille alueille fotoneita kannattaa lähettää. Myös mm. Keller ja Wald (2000) ovat esittäneet fotonien suuntaamista lopullisen kuvan kannalta tärkeille alueille. Tätä tekniikkaa laajentamalla he esittävät myös kaustiikoiden automaattiseen luontiin tarkoitettun mallin.

Cammarano ja Wann Jensen (2002) esittävät tavan käyttää fotonikarttoja liikkeenpehmennyksen yhteydessä. Perusajatuksena on arvioida fotonien tiheyttä tilan lisäksi myös ajassa. Ensimmäinen pyritään löytämään koordinaattien osalta mahdollisimman lähellä olevat fotonit, minkä jälkeen rajataan ajan puolesta sopimattomat fotonit pois. Tämä on helppo toteuttaa jo olemassa olevien järjestelmien laajennokseksi. Vaihtoehtona tälle Cammarano ja Wann Jensen esittävät varsin mielenkiintoisen ajatuksen kd-puun neliulotteisesta käytöstä, mikä kuitenkin osoittautui erinäisten komplikaatioiden takia huonoksi vaihtoehdoksi.

Jozwowski (2002) kuvailee fotonikarttojen käyttöä reaaliaikaisessa ympäristössä perusajatukseltaan yksinkertaiseksi. Sen sijaan että jokaisen kuvan yhteydessä ammuttaisiin valtavasti fotoneita, ammutaan jokaisen kuvan yhteydessä muutama sata. Tällä tavoin ampumisprosessi ei kestä kovin kauaa ja kuvan laskenta-aika pysyy lyhyenä. Seuraavien kuvien yhteydessä voidaan aiempia jo ammuttuja fotoneita käyttää hyväksi. Kun fotonit vanhentuvat tarpeeksi, ne voidaan korvata uusilla fotoneilla ja näin fotonikartta pysyy ajan tasalla.

Benedek ja Szécsi (2002) ottavat myös kantaa fotonien uudelleenkäytettävyyteen. Esineet voidaan luokitella staattisiin ja dynaamisiin esineisiin. Staattiset esineet ovat sellaisia, jotka eivät liiku animaation aikana, joten niiden osalta fotoneita ei tarvitse ripotella joka kuvan yhteydessä. Kuvakohtaiset muutokset riittää siis huomioida dynaamisten esineiden osalta, ja näin voidaan

merkittävästi lyhentää sekä ripotteluvaihetta että viimeistelevää keräystä. Myös Tawara ja Myszkowski (2002) esittävät dynaamisten esineiden käsittelemistä irrallaan staattisista esineistä. He esittävät menetelmän hyödyksi laskenta-ajan lyhentymisen lisäksi ajasta johtuvan kohinan vähenemisen. Ajasta johtuva kohina ilmenee kahden peräkkäisen kuvan välillä seurauksena muuttuneista laskennallisista olosuhteista.

5 YHTEENVETO

Globaali valaistus on fysiikkaan pohjautuvaa valon sironnan simulointia synteettisessä ympäristössä. Ajatuksena on siis yksinkertaisesti matkia oikean valon käyttäytymistä. Keskeisin hyöty, mikä globaalin valaistuksen avulla saavutetaan, on epäsuoran valon huomioiminen. Tämä aikaansaa monien efektien synnyn, kuten esimerkiksi värien vuotamisen.

Suurimpia ongelmia globaalin valaistuksen yhteydessä ovat laskennan suuret resurssivaatimukset ja laadulliset ongelmat. Monet menetelmistä, joilla epäsuora valo voidaan huomioida, ovat varsin monimutkaisia ja vaativat paljon laskenta-aikaa. Kuvan laatua voidaan yleensä parantaa laskenta-aikaa lisäämällä, mutta kohinaton kuva edellyttää yleensä suurta näytteistämismäärää.

Globaalin valaistuksen toteuttamiseksi on olemassa monia tekniikoita, joista oleellisimpia ovat Monte Carlo -menetelmät kuten polunjäljitys, kaksisuuntainen polunjäljitys, radiositeetti ja hybridimenetelmät. Kaikkein lupaavin menetelmä ovat fotonikartat, joka on myös menetelmistä tuorein. Fotonikarttojen käytön keskeisin hyöty on tehokas ja laadukas kaustiikoiden mallintaminen. Edullista fotonikartoille on myös valoisuustiedon irrallisuus geometriasta ja sitä kautta menetelmän hyvä skaalautuvuus. Fotonikartat ovat myös suhteellisen nopea menetelmä epäsuoran valon mallintamiseen, ja niiden avulla saadaan mallinnettua kaikki globaalin valaistuksen efektit.

Fotonikarttojen käyttö on kaksivaiheinen prosessi. Ensimmäisessä vaiheessa fotonit ammutaan valonlähteistä esineiden pinnoille ja ne varastoidaan kd-puu -nimiseen tietorakenteeseen. Tämän jälkeen kuva voidaan visualisoida joko käyttämällä fotonikarttaa suoraan, kuten esimerkiksi kaustiikoita visualisoidaessa, tai epäsuorasti viimeistelevän keräyksen avulla.

Fotonikarttoihin liittyy monia ongelmia. Fotonimäärän kasvaessa myös muistintarve kasvaa ja haku fotonitietorakenteesta hidastuu. Fotonikarttojen yhteydessä esiintyy joissain tapauksissa myös matalataajuuksista kohinaa, mikä on ongelmallista etenkin animaation yhteydessä. Fotonikartan tiheyttä arvioitaessa kohdataan monenlaisia ongelmia etenkin erilaisten reuna-alueiden yhteydessä sekä pimeillä varjo-alueilla. Fotonikarttoihin liittyvä viimeistelevä keräys on myös varsin aikaavievä prosessi.

Fotonikarttojen rakentamiseksi ja tiheyden määrittämiseksi on olemassa lukuisia keinoja. Yksi näistä on hallittu fotonien lähettäminen, jossa fotonien lisäystä tietorakenteeseen tarkkaillaan joka fotonin yhteydessä. Fotonikarttaa voidaan myös muokata kameran sijainnin perusteella ja ongelmallisia reuna-alueita voidaan huomioida erilaisin menetelmin. Fotonikartat soveltuvat myös liikkeenpehmennyksen yhteydessä laskettavaan valoisuuteen sekä dynaamisten tilanteiden yhteyteen. Dynaamisissa tilanteissa kysymys voi olla joko animaatiosta, jossa esineet liikkuvat, tai jopa reaaliaikaisesta grafiikasta, jolloin fotoneiden elinkaarta valvotaan tarkasti.

LÄHDELUETTELO

Wann Jensen Henrik, 2001. Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping.

Heinrich Stefan, Keller Alexander, 1994. Quasi-Monte Carlo Methods in Computer Graphics, Part II: The Radiance Equation [viitattu 2.4.2003]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa) <<http://www.uni-kl.de/AG-Heinrich/REQ.pdf>>.

Keller Alexander, Wald Ingo 2000. Efficient Importance Sampling Techniques for the Photon Map [viitattu 1.4.2003]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa) <http://graphics.cs.uni-sb.de/~wald/Publications/VMV2000_EISTPM/PMapImportanceSampling.pdf>.

Tawara Takehiro, Myszkowski Karol, Seidel Hans-Peter 2002. Localizing the Final Gathering for Dynamic Scenes using the Photon Map [viitattu 1.4.2003]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa) <<http://www.mpi-sb.mpg.de/~tawara/papers/vmv2002-Tawara-LocalizingFG.pdf>>.

Benedek Balázs, Szécsi László 2002. Performance Improvements of Rendering Caustics using Photon Maps in Interactive Ray Tracing [viitattu 1.4.2003]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa) <<http://www.fsz.bme.hu/~szirmay/katt/Benedek.pdf>>.

Cammarano Mike, Wann Jensen Henrik 2002, Time Dependent Photon Mapping (Thirteenth Eurographics Workshop on Rendering) [viitattu 2.4.2003]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa) <<http://graphics.stanford.edu/papers/timephoton/motion.pdf>>.

Suykens Frank 2002, ON ROBUST MONTE CARLO ALGORITHMS FOR MULTI-PASS GLOBAL ILLUMINATION. (Ph.D. Thesis) [viitattu 1.4.2003]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa) <<http://www.cs.kuleuven.ac.be/~graphics/CGRG.PUBLICATIONS/FRANKPHD/>>.

Suykens Frank, Willems Yves D. 2000. Density Control for Photon Maps. (11th Eurographics Workshop on Rendering Brno, Czech Republic, June 26--28, 2000) [viitattu 3.4.2003]. Saatavilla [www-muodossa <http://www.cs.kuleuven.ac.be/cwis/research/graphics/CGRG.PUBLICATIONS/PHOTONDC/photondc.pdf>](http://www.cs.kuleuven.ac.be/cwis/research/graphics/CGRG.PUBLICATIONS/PHOTONDC/photondc.pdf).

Jozwowski Timothy R. 2002, Real Time Photon Mapping (MS Thesis) [viitattu 5.4.2003]. Saatavilla [www-muodossa <http://www.cs.mtu.edu/~shene/NSF-2/Tim-Jozwowski.pdf>](http://www.cs.mtu.edu/~shene/NSF-2/Tim-Jozwowski.pdf).

Dmitriev Kirill, Brabec Stefan, Myszkowski Karol, Seidel Hans-Peter 2002. Interactive Global Illumination Using Selective Photon Tracing. (Thirteenth Eurographics Workshop on Rendering) [viitattu 4.4.2003]. Saatavilla [www-muodossa <http://graphics.cs.msu.su/en/publications/text/spt.pdf>](http://graphics.cs.msu.su/en/publications/text/spt.pdf).

Bentley Jon Louis 1975. Multidimensional Search Trees Used for Associative Searching. [viitattu 18.4.2003]. Saatavilla [www-muodossa <http://www.math.iastate.edu/reu/2001/nearest_neighbor/p509-bentley.pdf>](http://www.math.iastate.edu/reu/2001/nearest_neighbor/p509-bentley.pdf).

LIITE 1. KÄSITELUETTELO

Diffuusi heijastus on heijastustyyppi, jossa valo kimpoaa tasaisesti kaikkiin suuntiin pinnasta.

Epäsuora valo on valoa, joka ei ole peräisin suoraan valonlähteestä.

Fotonikartta on tapa mallintaa globaalia valaistusta.

Globaali valaistus on periaate, jolla pyritään simuloimaan valon todellista käyttäytymistä synteettisessä ympäristössä.

Hybridimenetelmät ovat radiositeetin ja säteenseurannan yhdistäviä menetelmiä.

Kaksisuuntainen polunjäljitys on polunjäljityksen laajennos, jossa säteitä lähetetään sekä valonlähteistä että katselupisteestä.

Kaustiikka on valonsäteiden keskittymisen aiheuttama kirkas valoilmio.

Kd-puu on binääripuuhun pohjautuva tietorakenne.

Kuvantaminen on kaksiulotteisen kuvan muodostamista kolmiulotteisesta maailmasta.

Liikkeenpehmennys on kuvien interpolointia animaatiossa siten, että liike näyttää hämyiseltä.

Lokaali valaistus on pelkästään valonlähteiden avulla laskettua valaistusta.

Mallinne on tietokoneella mallinnettu ympäristö.

Monte Carlo -säteenjäljitys on säteenjäljitystekniikka, jossa lähetetään huomattavan monia säteitä, jotta pikselin värin approksimaatiosta saataisiin tarkka.

Näytteistäminen on useiden näytteiden ottamista. Tämä tarkoittaa esimerkiksi useiden säteiden lähettämistä säteenseurannassa.

Polunjäljitys on säteenjäljityksen laajennos, jossa pinnan kohtaava säde lähettää uuden säteen, joka kerää epäsuoraa valoa ympäristöstä.

Quasi-satunnaisuus on tapa arpoa satunnaislukuja siten, että niiden keskinäiset välit ovat mahdollisimman yhdenmukaiset.

Radiositeetti on menetelmä, jossa pinnat jaetaan pieniin osiin ja määritetään niiden keskinäinen valonsiirto.

Säteenseuranta on tapa kuvantaa mallinne lähettämällä katselupisteestä säde kuvapikselin läpi, jonka kohdatessa pinnan määritetään kohdatun pinnan väri ja valaistus.

Viimeistelevä keräys on tapa vähentää kohinaa ja kerätä epäsuoraa valaistusta fotonikarttoja käytettäessä.

Värien vuotamisen on epäsuorasta valosta johtuva ilmiö, jossa valo siirtyy pinnalta toiselle.