

Haila Esko

Radiositeetti (Globaali valaistusmalli)



Insinööri (AMK),

tietotekniikka

Kevät 2017



KAJAANIN
AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tiivistelmä

Tekijä: Haila Esko

Työn nimi: Radiositeetti (Globaali valaistusmalli)

Tutkintonimike: Insinööri (AMK), tietotekniikka

Asiasanat: radiositeetti, globaali valaistusmalli

Opinnäytetyö kertoo radiositeettimenetelmän taustasta ja tutkimuksista, sen tilanteesta tällä hetkellä sekä tulevaisuuden näkymistä.

Radiositeettimenetelmän mahdollistavat yhtälöt ovat olleet jo pitkään johdettavissa, ja käytetty laskentamalli tuli lämpösäteilyn leviämisen fysiikasta. Tietokoneet kuitenkin tulivat käyttöön vasta 1950-luvun vaihteessa. Radiositeettimenetelmän ensimmäinen versio tietokonegrafiikan valaistusmallina julkaistiin 1984. Pian tämän jälkeen kehitettiin mm. hemicube-tekniikka, hierarkkinen radiositeetti ja välitön radiositeetti. Radiositeettimenetelmä ja sitä edistäneet menetelmät ovat vaikuttaneet suuresti grafiikan laskennan kehitykseen.

Puhtaan radiositeettimenetelmän kehitys on hiipunut kilpailevien menetelmien sekä menetelmien yhdistelemisen johdosta. Pelien puolella radiositeettimenetelmälle vaikeuksia tuottavat mm. liikkuvat dynaamiset kohteet ja peiliheijastukset, joten monesti tarvitaan muiden menetelmien apua dynaamisen valaistuksen laskennassa. Usein avuksi otetaan jonkinlainen säteenseurantamenetelmä, koska menetelmien heikkoudet ja vahvuudet menevät hyvin ristiin.

Tunnettuja radiositeettimenetelmää peleissä käyttäviä grafiikkamoottoreita löytyy vain yksi, Enlighten, ja sekin on mahdollisesti jäämässä pois isoista pelimoottoreista. Elokuvien animaatiopuolella vallassa on pitkälti Renderman ohjelma, jonka grafiikan laskennassa ei enää käytetä radiositeettimenetelmää. Radiositeettimenetelmää käytetään silti ajoittain ainakin joihinkin projekteihin sekä oppimistarkoituksessa. Tarkkaa tietoa menetelmän käytöstä ei löydy, sillä monet eivät julkisesti kerro valaistuksen laskentaan käytettyjä menetelmiä.

Radiositeettimenetelmällä on vielä ainakin muutamia kannattajia, jotka pyrkivät kehittämään ja optimoimaan sitä. Tällä hetkellä radiositeettimenetelmä on pelialalla vielä kohtuullisella jalansijalla Enlighten-väliohjelmiston takia, mutta uusia menetelmiä kehitetään koko ajan ja kilpailu alalla on kovaa. Radiositeettimenetelmän tulevaisuus ei ole taattu.

Abstract

Author(s): Haila Esko

Title of the Publication: Radiosity (Global Lighting model)

Degree Title: Bachelor of Engineering, Information Technology

Keywords: Radiosity, global lighting model

This thesis sheds light to the background of radiosity method as a global lighting model, the history, important research work, current state of the method and possible future view.

The equations used in the radiosity lighting method have been around for a long time since the method is derived from the physics of the heat radiation. However, computers were not utilized until the turn of the 1950's. The first version of the radiosity method as a computer graphics lighting model was released in 1984. In the years following, hemicube method, hierarchical radiosity and instant radiosity were introduced. The radiosity method and the supporting methods have contributed greatly to the advances in lighting methods.

The research and advances made in the field of pure radiosity method have been slowing down due to the introduction of competing methods and the use of multiple methods. In computer games, the radiosity method has difficulties working with dynamic moving objects and specular reflections. It is often required to introduce other methods to help calculating dynamic and specular lighting. Often a ray tracing method is chosen to aid in calculating the lighting since the strengths and weaknesses of the two methods are quite the opposites.

There is only one well known graphics engine used in widely used game engines. The graphics engine is called Enlighten. Even that engine may be left out from the game engines soon. In the field of animation and movie industry the Renderman software is widely used. Renderman graphics pipeline used to include radiosity method. Although the radiosity method is not famous at the time, the method is still used at least for some projects and for learning purposes. No accurate information on the use of the method can be found, as many developers do not publicly disclose the methods used to calculate the illumination in their systems.

The radiosity method still has some loyal supporters who seek to develop and optimize the method. At present, the radiosity method has a reasonably good foothold in the gaming industry due to the Enlighten middleware, but new methods are being developed all the time and the competition in the industry is rough. The future of the radiosity method is uncertain.

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Radiositeettimenetelmän perusteet ja historia	2
2.1	Radiositeettimenetelmän perusteet	2
2.2	Radiositeettimenetelmän ja tietokonegrafiikan varhais historia	6
2.3	Radiositeettimenetelmän kehitys	7
2.3.1	Radiositeettimenetelmässä tehdyt merkittävät tutkimukset ja julkaisut	8
2.3.2	Radiositeettimenetelmän ja sen tutkimusten vaikutukset muualla	10
3	Radiositeettimenetelmä nykypäivänä	12
3.1	Käyttökohteet	12
3.1.1	Dynaamisesti renderöidyt kohteet	12
3.1.2	Pre-rendered käyttökohteet	13
3.2	Kilpailevat tekniikat	14
3.2.1	Säteenseuranta	14
3.2.2	Rasterisaatio	15
3.2.3	Fotonikartoitus	16
3.3	Yhteistyössä toimivat tekniikat	17
4	Päätelmät	18

Liitteet

Symboliluettelo

Yleinen radiositeettiyhtälö on

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^n F_{ij} B_j$$

jossa

B_i on pintaelementin i sisältämä radiositeettienergia

E_i on pintaelementin i emissioenergia

ρ_i on pintaelementin i heijastuskertoimen

$\sum_{j=1}^n F_{ij} B_j$ on muiden pintaelementtien radiositeettien summa, jossa

F_{ij} on pintaelementtien i ja j välinen muotokerroin

B_j on pintaelementin j sisältämä radiositeettienergia

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tavoite on koota tietoa radiositeettimenetelmän historiasta menetelmän synnystä nykypäivään. Opinnäytetyössä pyritään käsittelemään menetelmän kannalta tärkeät tutkimukset, julkaisut sekä muita radiositeettimenetelmän kannalta merkittäviä tapahtumia. Lisäksi kerrotaan radiositeettimenetelmän tilanteesta nykypäivänä sekä mahdollisista tulevaisuuden näkymistä.

Työn tarve johtuu hyvän, historian kattavan, vapaasti tarjolla olevan koosteen puutteesta. Lisäksi työtä vie eteenpäin halu pohtia menetelmän kehitystä, suuntaa, mahdollista tulevaisuuden kehitystyötä sekä sen kannattavuutta.

Opinnäytetyössä ei paneuduta yksittäisiin tekniikoihin tarkasti, vaan tutkitaan menetelmän yleiskuvaa. Aiheesta enemmän kiinnostuneen kannattaa perehtyä menetelmiin paremmin, vaikkapa vapaasti luettavan Andrew Glassnerin kirjan pdf-version (Glassner A. S. 2011), SIGGRAPHin radiosity-sivujen (Scott 1998), taikka muiden lähteiden avulla.

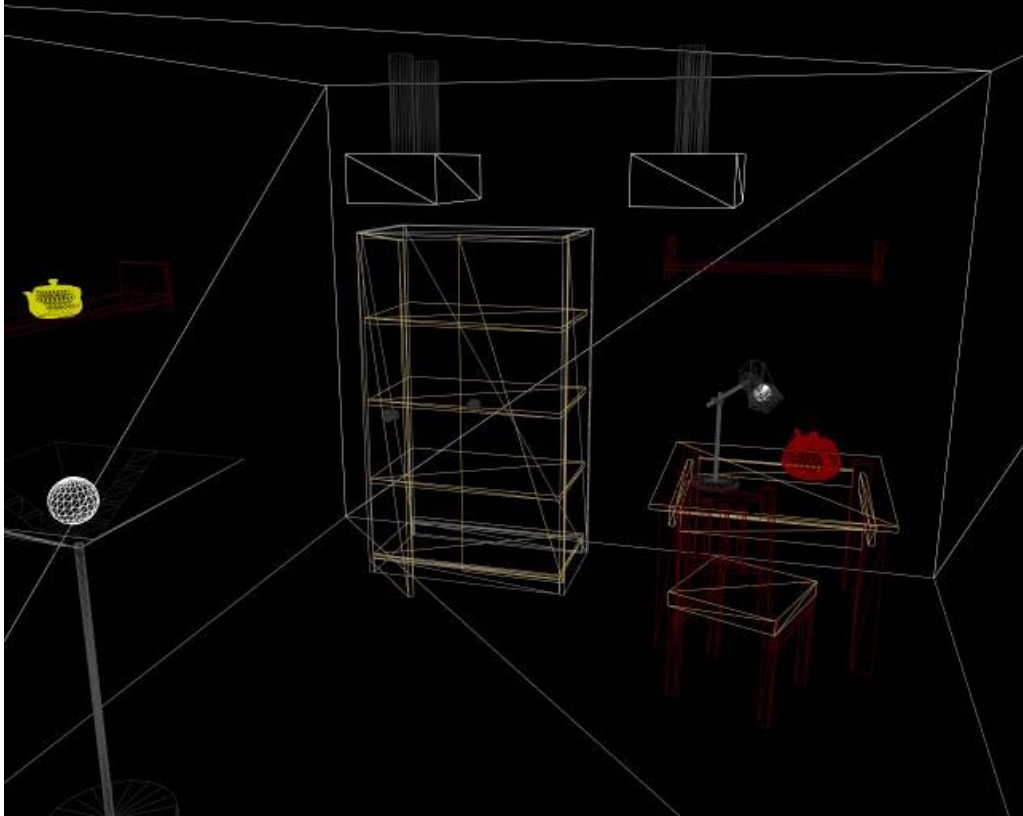
2 Radiositeettimenetelmän perusteet ja historia

Radiositeettimenetelmä on globaali valaistusmalli, jota käytetään kolmiulotteisten virtuaalisten tilojen ja esineiden valaisemiseen. Menetelmä mallintaa diffuusien pintojen valaistuksen keräten valaistustiedon kolmioihin, joista tila koostuu. Tarpeen mukaan kolmiulotteisten esineiden kolmioiden määrää voidaan muuttaa, tasoittaen kolmioiden jakautumista ja täten myös valaistuksen laadun tasoa. Radiositeettimenetelmässä näitä kolmioita kutsutaan pintaelementeiksi tai pintalapuiksi. Pintaelementtien keskinäiset suhteelliset näkyvyydet selvitetään, jotta tiedetään, minkä verran tietyn pintaelementin valaistus vaikuttaa toisten pintaelementtien valaistukseen. Valaistus lasketaan usein iteratiivisesti käymällä pintaelementit läpi useaan kertaan.

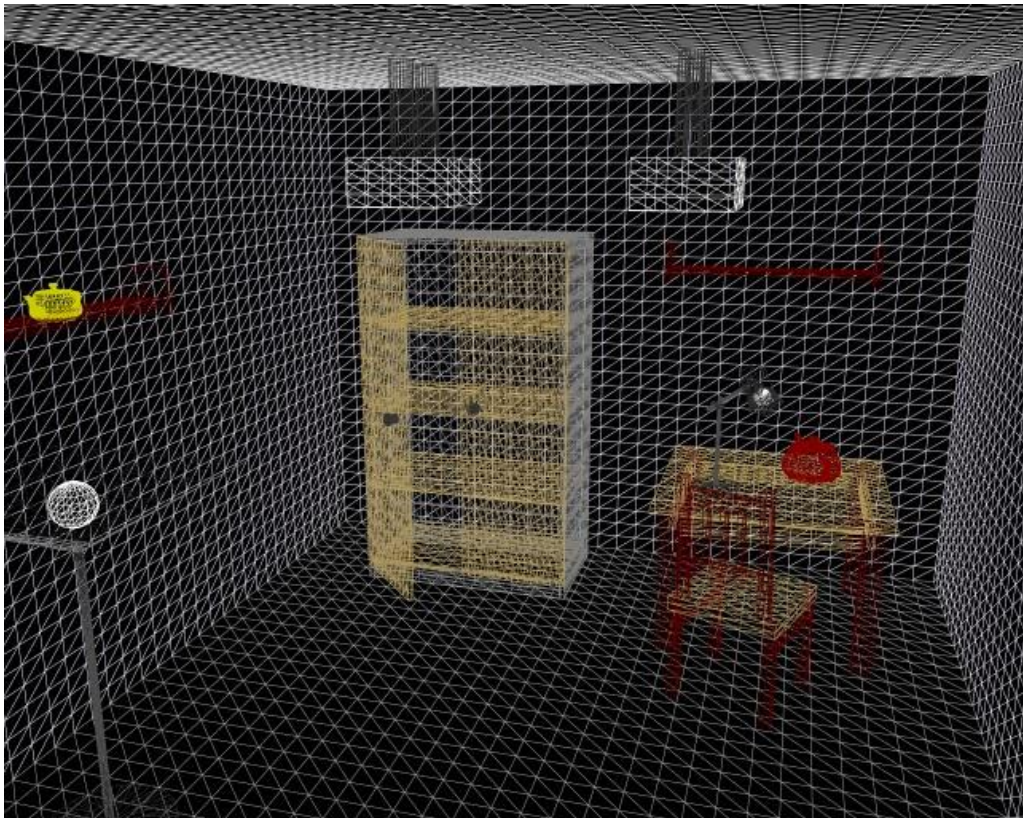
Radiositeettimenetelmä perustuu säteilyn leviämiseen liittyvään fysiikkaan. Radiositeettimenetelmän kaavojen johtaminen on suhteellisen helppoa, ja tarvittavat laskutoimitukset sekä tarvittava fysikaalisten ominaisuuksien pohtiminen ovat tuttuja asioita lämpösäteilyn leviämisen laskemiseen käytetyistä menetelmistä. Radiositeettimenetelmää sovellettiin grafiikan laskemiseen melko pian muiden menetelmien sekä tarpeellisten tekniikan kehitysaskelien jälkeen. Radiositeettimenetelmä on kehittynyt koko ajan 1980-luvulta nykypäivään, vaikka sen viimeaikainen kehitys onkin ollut paljon vähemmän esillä.

2.1 Radiositeettimenetelmän perusteet

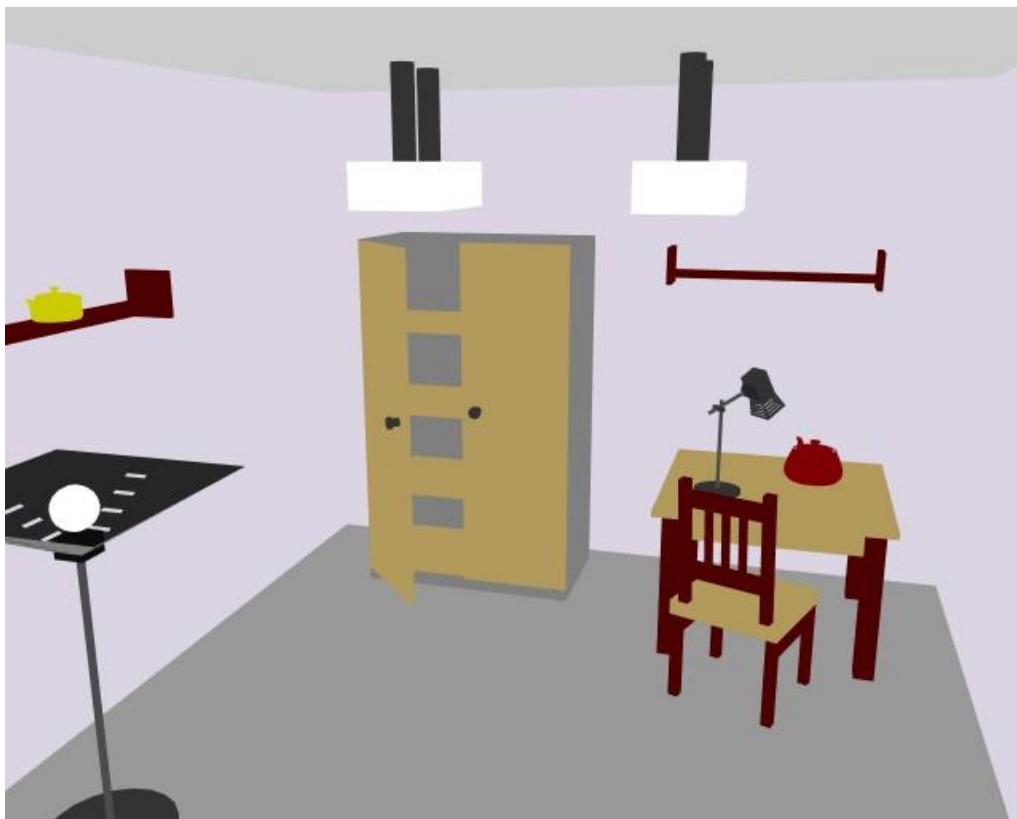
Radiositeettimenetelmä perustuu fysikaaliseen malliin, jonka mukaan säteily etenee diffuusien pintojen välillä suljetussa tilassa. Radiositeettimenetelmän yleiset perusaskleet ovat usein samankaltaisia. Kuvissa 1-6 näytetään mallin jakaminen pienempiin kolmioihin sekä valaistuksen laskennan vaiheita.



Kuva 1. Tilan kolmiot ennen jakamista. (Dudka 2015)



Kuva 2. Tilan kolmiot jakamisen jälkeen (Dudka 2015)



Kuva 3. Tilan pintojen värit ilman valaistuksen vaikutusta (Dudka 2015)



Kuva 4. Valaistus laskettu pintaelementeille (Dudka 2015)



Kuva 5. Valaistusta tasoitettu filtterillä (Dudka 2015)



Kuva 6. Valaistus interpoloitu ja laskenta valmis (Dudka 2015)

Radiositeettimenetelmän fysikaalisen mallin perusyhtälö on

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^n F_{ij} B_j \quad (1)$$

jonka mukaan pintaelementin radiositeettienergia koostuu sen emittoiman energian sekä muiden pintaelementtien heijastamien energiamäärien summista. Laskussa ovat mukana myös muotokertoimien ja heijastuskertoimien vaikutukset. Kaavojen johtamiset sekä tarkemmat selitykset löytyvät monesta lähteestä, esim. Andrew Glassnerin kirjasta (Glassner A. S. 2011), josta löytyy aiheesta paljon lisää luettavaa englanniksi.

Radiositeettimenetelmän pintaelementeistä, taikka joissain tapauksissa erillisistä valonlähteistä, emittoituva valo jaetaan kaikille pintaelementeille, jotka näkevät kyseisen valonlähteen. Emittoituva valo tuottaa kaiken valon, jota sitten heijastetaan ympäri tilaa tasoittaen valaistusta. Suljetun tilan energiamäärä pysyy siis vakiona ja riippuu vain emittoivien valonlähteiden energian määrästä. Energian jakautumisen tarkkuus paranee iteraatioiden määrän kasvaessa.

Eri pinnat heijastavat valoa eri määrän. Pinnan heijastuskerroin kertoo, kuinka paljon pinta heijastaa eteenpäin siihen heijastuvasta valosta taikka valon komponentista. Heijastuskerroin voi olla erilainen valon eri komponenteille, eli väreille, aiheuttaen värien vuotamista. Pinnat, jotka vuotavat väriä, värjäävät muita pintoja omalla värillään.

Kun lasketaan yhden pintaelementin vaikutus toiseen, on tärkeää tietää pintaelementtien välinen muotokerroin. Muotokerroin kertoo, kuinka suuren osan yksi pinta kattaa toisen pinnan näkemästä 180° puolipallonäkymästä. Tämä osuus voidaan laskea usealla tavalla, kuten säteensuuntauksella, kameran avulla tai puhtaasti matemaattisesti.

2.2 Radiositeettimenetelmän ja tietokonegrafiikan varhishistoria

Radiositeettimenetelmän historia alkoi samoihin aikoihin, kun tietokoneet yleistyivät ja tulivat ohjelmitaviksi, eli 1950-luvun vaihteessa. Tämä ei ole sattumaa, sillä ilman tietokoneita radiositeettimenetelmän yhtälöiden ratkaiseminen on hyvin työlästä laskea. Menetelmä perustuu suurehkon matriisin luontiin ja sen avulla säteilyn leviämisen laskemiseen. Yleisesti valaistusyhtälö ratkaistaan menetelmässä iteroimalla, vaikka se on ratkaistavissa muutenkin. Vuonna 1946 tehtiin ensimmäinen ohjelmitava tietokone, mutta vasta muutamaa vuotta myöhemmin niitä alkoi tulla yleisemmin käyttöön. Tietokoneiden avulla

useat laskutoimitukset tulivat paljon helpommiksi ja nopeammiksi laskea. (Computer Hope 2018)

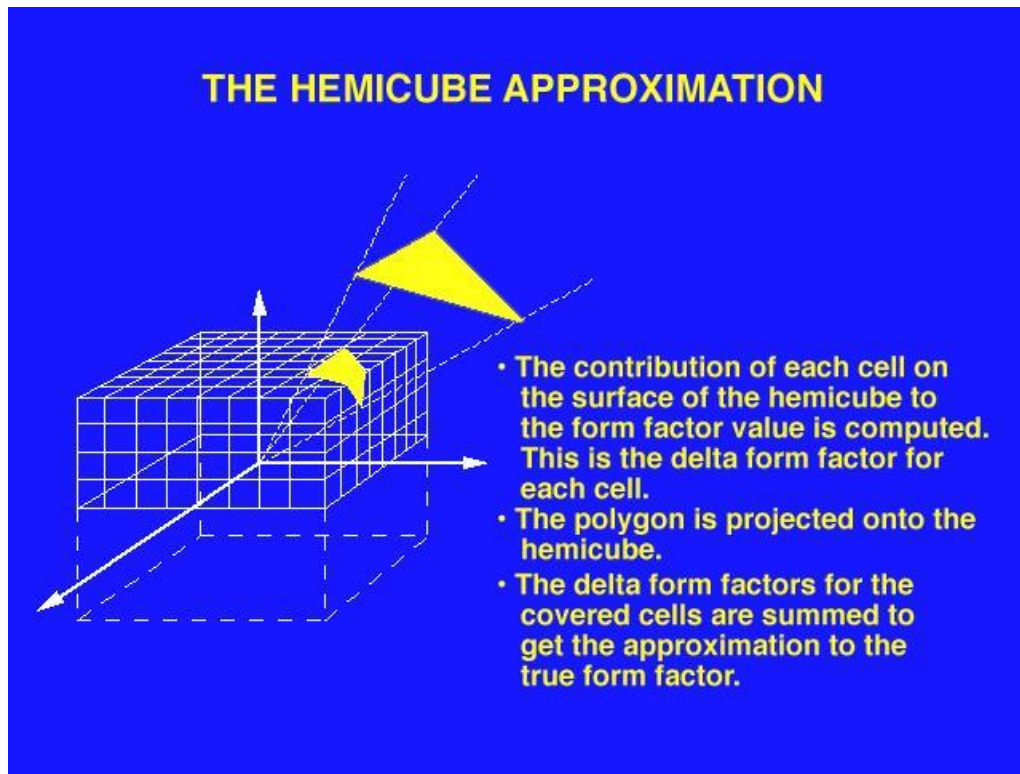
Ensimmäinen implementoitu tietokonepeli, "Bertie the Brain", tehtiin jo vuonna 1950 (Smith 2014). Tietokoneet otettiin käyttöön mm. autojen suunnittelussa ja muilla aloilla vasta 1960-luvulla. Vuonna 1966 alettiin myydä ensimmäisiä kuluttajakäyttöisiä graafisia tietokoneita. Ensimmäinen 3D-renderöintimenetelmä, säteensuuntaus, julkaistiin vuonna 1968. (Computer History Museum 2018)

1970-luvun aikana grafiikat kehittyivät paljonkin. Tuolloin julkaistiin monia lokaaleja valaistusmalleja sekä renderöintiä helpottavia tekniikoita, mm. Phong- (Phong 1973) ja Blinn- (Blinn 1977) varjostukset, "shadow mapping", sprite-grafiikka, vieritys ja z-bufferointi. Vuonna 1980 julkaistiin ensimmäisiä nykyäänkin käytössä olevia globaaleita valaistusmalleja, säteenseurantamenetelmä (Whitted 1980). Vain muutamaa vuotta myöhemmin, vuonna 1984, julkaistiin radiositeettimenetelmä (Goral, Torrance, Greenberg, & Battaile 1984).

2.3 Radiositeettimenetelmän kehitys

Vuoden 1984 jälkeen radiositeettimenetelmä sai paljonkin tuulta alleen. Seuraavan vuosikymmenen aikana julkaistiin useita menetelmää hyödyttäviä tutkimuksia, joiden avulla laskentaprosessi nopeutui huomattavasti. Kehitystä tapahtui mm. polygonien pilkkomisen, muotokertoimien laskemisen, iteroinnin optimoinnin sekä pintaelementtien priorisoinnin osalta.

Ensimmäisiä monista julkaisuista oli 1985 julkaistu "hemicube"-puolikuutiomenetelmä radiositeettimenetelmän muotokertoimien laskemiseen (Cohen & Greenberg, The hemicube: a radiosity solution for complex environments 1985). Puolikuutio näyttää pintaelementin 180° näkymän jaettuna viiteen kuvaan, yhteen neliöön ja neljään suorakulmioon jatkaen kuvaa puolet neliön sivun pituudesta jokaisen neliön sivun toiselle puolelle. Kuva 7 havainnollistaa puolikuution käyttöä.



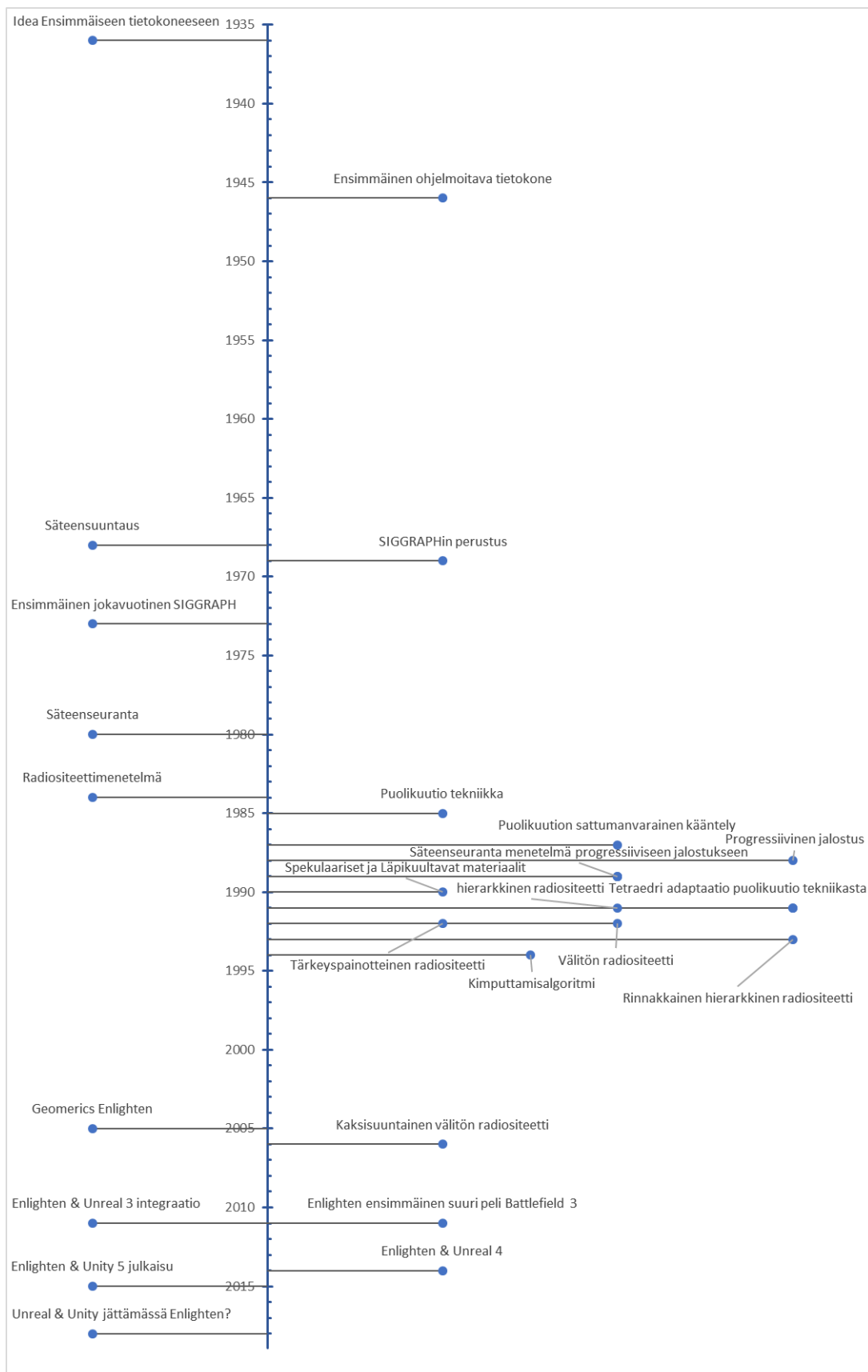
Kuva 7. Pintaelementin projektiio puolikuutiolle (Scott 1998)

Seuraavien kymmenen vuoden aikana tuli paljon muitakin hyvin tärkeitä tutkimuksia kuten puolikuution sattumanvarainen kääntely, kuvan progressiivinen radiositeetti (Cohen, Chen, Wallace, & Greenberg 1988), hierarkkinen radiositeetti, välitön radiositeetti (Keller 1997), rinnakkainen hierarkkinen radiositeetti sekä progressiivinen radiositeetti.

Radiositeettimenetelmän kehitys on selvää ensimmäisien kymmenen ja ehkä jopa 15 vuotensa aikana, mutta kehitys tuon jälkeen alkaa olla paljon hankalammin havaittavissa ja määriteltävissä suoraan radiositeettimenetelmäksi. Radiositeettimenetelmän suhteellinen puhtaus alkoi katoamaan, kun muita valaistusmalleja ja valaistusmallien sekoituksia alkoi tulla enemmän. SIGGRAPHin radiositeettimenetelmän yleiskatsaus vuodelta 1998 (Scott 1998) on vieläkin melko ajankohtainen.

2.3.1 Radiositeettimenetelmässä tehdyt merkittävät tutkimukset ja julkaisut

Aikajanalla (kuva 8) kuvataan merkittävimpien tutkimuksien ja tapahtumien sijoittumista radiositeettimenetelmän kehitykseen.



Kuva 8. Radiositeettimenetelmän aikajana

Hemikuutio (Cohen & Greenberg, The hemi-cube: a radiosity solution for complex environments 1985) -puolikuutiotekniikka ja tästä johdetut muut tekniikat kuten tetraedri- sekä tasoversiot pyrkivät optimoimaan muotokertoimen laskemista käyttäen hyödyksi tilan renderöintiä. Pintaelementin näkymä selvitetään asettamalla kameroita pintaelementin pinnalle ja tutkimalla siten saadusta kuvasta muiden pintaelementin kokoa. Näissä menetelmissä osa pintaelementeistä jää kuitenkin helposti huomaamatta, eikä pintojen muotokertoimia saada selvitettyä yhtä tarkasti, varsinkin tapauksissa joissa etäisyydet tai kolmiomäärät ovat suuria. Näitä ongelmia voidaan saada helpotettua esimerkiksi sattumanvaraisesti kääntelemällä kuutiota tai lisäämällä tarkkuutta.

1988 julkaistiin progressiivinen radiositeetti. Progressiivisessa radiositeetissa ei ratkaista kaikkia muotokertoimia. Tämä menetelmä käyttää vähemmän muistia eikä ratkaise muotokertoimia etukäteen. Muotokertoimia lasketaan jokaiselta pintaelementiltä yhteen pisteeseen taikka yhdelle pintaelementille kerrallaan. Valaistus saadaan näin iteratiivisesti ilman suurta alkutyötä, ja lopputulos paranee iteraatioiden määrän kasvaessa. (Cohen, Chen, Wallace, & Greenberg 1988)

1991 julkaistiin hierarkkinen radiositeetti. Hierarkia vähentää tarvittavia laskutoimituksia, koska kauempana olevien pintojen valon radiositeettiä voidaan laskea suuremman tason keskimääräisen radiositeetin mukaan. Tämä vähentää tarvittavaa laskemista huomattavasti, koska tarvittavien laskutoimitusten määrä nousee toisessa potenssissa laskettavien tasojen määrän suhteen, pintaelementtien määrän toisen potenssin sijaan. (Hanrahan, Salzman, & Aupperle 1991)

Radiositeettimenetelmässä on julkaistu monia muitakin tutkimuksia, joita ei aikajanalla taikka tässä mainita.

2.3.2 Radiositeettimenetelmän ja sen tutkimusten vaikutukset muualla

Valaistusmalleissa toisia menetelmiä ei tarvitse nähdä kilpailijoina alalla. Radiositeettimenetelmä ja muut menetelmät sekä valaistusmallit voivat hyvin usein tehdä yhteistyötä tai jakaa samoja edistysaskelia. Radiositeettimenetelmä on inspiroinutkin monia valaistusmalleja, ja siinä tehdyt tutkimukset ovat olleet tärkeitä nykypäivän grafiikan kannalta.

Fotonikartoitus on saanut paljon inspiraatiota radiositeettimenetelmästä. Vaikka fotonikartoitus käyttääkin pääasiassa säteenseurantaa, on fotonien ampuminen ja valon määrittämisen logiikka melko lähellä radiositeettimenetelmän perusajatusta.

Radiositeettimenetelmää on hyödynnetty myös äänen etenemisen mallintamisessa. Vaikka ääni ei etene miltei välittömästi väliaineessa, kuten valon voidaan laskea etenevän, voidaan sitä mallintaa pienillä muokkauksilla. (Panagiotis & Despina 2014) (Tsingos & Gascuel 1997)

3 Radiositeettimenetelmä nykypäivänä

Radiositeettimenetelmän näkyvyys peleissä on nykypäivänä hyvin pientä, vaikka se on osa Enlighten-väliohjelmiston renderöintimenetelmää, joka taas on melko laajasti käytössä useiden yritysten sekä indie-pelien kehittäjien käyttämissä pelimoottoreissa. Unreal Engine 4 (Stone 2016) sekä Unity 5 (Mortensen 2014) käyttävät Enlighten-väliohjelmistoa valaistuksen laskemiseen, vaikkakin Unreal Engine 4 tarjoaa muitakin vaihtoehtoja. Nämä pelimoottorit ovat hyvin laajasti käytössä pelialalla tarjoamiensa yleisesti helppokäyttöisten ominaisuuksien sekä helposti luotavan upean valaistuksen johdosta. Useat 3D-mallinsohjelmistot tarjoavat mahdollisuuden renderöidä valaistuksen käyttäen apuna radiositeettimenetelmää joko suoraan taikka käyttäjien tekemien laajennusten avulla.

3.1 Käyttökohteet

Radiositeettimenetelmä on hyvin hyödynnettävissä missä tahansa ympäristössä, missä haetaan yhteyttä todellisen maailman ja virtuaalimaailman välille. Radiositeetin käyttö on selkeästi ollut esillä virtuaalisen todellisuuden globaalien valaistuksen laskennassa, mutta myös muita käyttökohteita löytyy. Radiositeettimenetelmää on pyritty hyödyntämään valaistuksen lisäksi ainakin äänen (Tsingos & Gascuel 1997) ja lämmön etenemisen laskemiseen. Lisäksi menetelmää on pyritty käyttämään lisätyn todellisuuden käyttötapauksissa analysoimaan pintojen saamaa valoa, sekä tämän tiedon avulla luomaan samanlaista valaistusta todellisuuteen lisättäviin kohteisiin.

3.1.1 Dynaamisesti renderöidyt kohteet

Radiositeettimenetelmä on tehokas menetelmä laskemaan globaalia valaistusta. Se on riippumaton kuvakulmasta sekä kamerasta, ja se antaa hyviä tuloksia. Tästä huolimatta se on hyvin vähän käytössä yksinään nykypäivän peleissä. Ongelmaksi muodostuvat dynaamiset kohteet, jotka saattavat liikkua paljonkin. Radiositeettimenetelmän vaatima työ kasvaa lineaarisesti jokaisesta dynaamisesta kohteesta, joita peleissä on yleensä melko paljon. Toinen yleinen ongelma on valon peiliheijastuksellinen komponentti. Näihin ongel-

miin ratkaisuna toimii yhdistelmäratkaisut, joissa radiositeettimenetelmän lisäksi käytetään muita valaistusmalleja, kuten säteenseuranta-algoritmeja. Tämän lisäksi voidaan käyttää välitöntä radiositeettia.

Eräs väliohjelmisto, Geometricsin Enlighten, käyttää radiositeettimenetelmää osana grafiikan laskentaprosessia (Silicon Studio 2018). Enlighten on tällä hetkellä käytössä sekä Unity- että Unreal Engine 4 -pelimoottoreissa. Vaikkei Silicon Studiolta saatukaan vastausta radiositeettimenetelmän käytöstä Enlightenin grafiikan laskennassa, on hyvin todennäköistä, että se hyödyntää useaa eri radiositeettimenetelmän eri muotoa sekä monia muita tekniikoita.

Radiositeettimenetelmää pyritään hyödyntämään myös lisätyn todellisuuden tapauksissa. Näissä tilanteissa radiositeettimenetelmää käytetään havaitsemaan diffuusin valon leviämistä, luomaan niiden avulla valaisevia pintaelementtejä, joiden avulla voidaan valaista todentuntuisesti virtuaalisia maailmaan lisättyjä esineitä.

3.1.2 Pre-rendered käyttökohteet

Radiositeettimenetelmää voidaan käyttää monessa kohteessa, jossa valaistus on mahdollista laskea ajan kanssa. Tällaisia kohteita tarjoavat elokuvat, animaatiot, videot sekä muu viihdeteollisuus. Radiositeettimenetelmää voidaan myös käyttää liikkumattomien kuvien luomiseen 3D-ympäristöstä. Lisäksi radiositeettimenetelmää voidaan käyttää peleissä ja interaktiivisissa tarinoissa, eli pelien ja elokuvien välimuodoissa. Peleissä on yleisesti käytössä osan maailman valmiiksi leipominen, ”baking”, jota voidaan käyttää liikkumattomiin staattisiin kohteisiin. Valmiiksi leivottu valaistus voidaan laskea etukäteen, jolloin maailmaan saadaan laadukas valaistus tekemällä laskutoimitukset etukäteen. Tämä menetelmä vaatii kuitenkin paljon aikaa ja muistia laskutoimituksiin sekä levytilaa valmisvalaisukartan tallentamiseen.

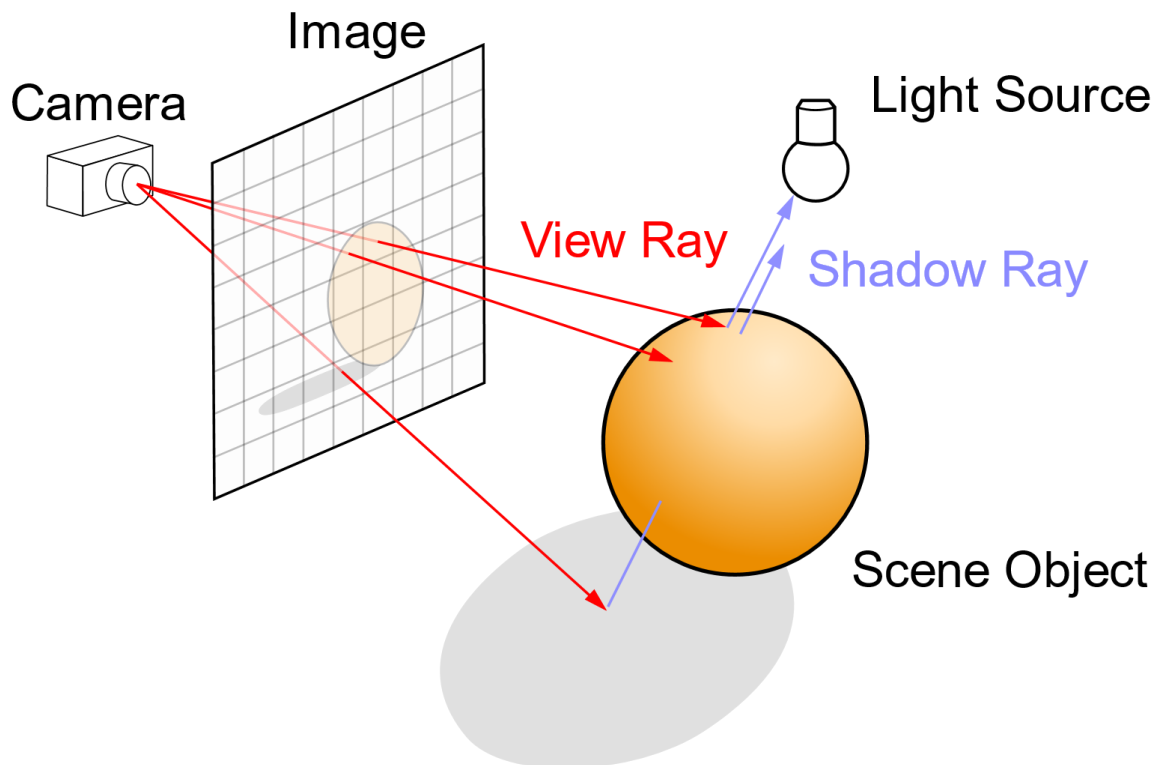
Radiositeettimenetelmää käytetään myös useissa 3D-mallinnusohjelmissa, joiden keskuudessa se on ollut laajassa käytössä jo jonkin aikaa. Useat ohjelmat tarjoavat erilaisia renderöintimetoja käyttäjän käyttöön. Usein toiset käyttäjät implementoivat omia radiositeettimenetelmää käyttäviä valaistusratkaisuja tällaisiin sovelluksiin mahdollisuuksien mukaan. Näillä ohjelmilla radiositeettimenetelmällä voidaan tuottaa animaatioita taikka nopeita suuntaa antavia kuvia progressiivisella radiositeetilla.

3.2 Kilpailevat tekniikat

Radiositeettimenetelmällä voidaan ajatella olevan useita kilpailijoita. Usein menetelmä valitaan vahvuuksien ja heikkouksien mukaan.

3.2.1 Säteenseuranta

Säteenseuranta perustuu säteiden lähettämiseen kamerasta ja niiden heijastamiseen pinoista, joihin ne osuvat (kuva 9). Jokaisesta osumakohdasta lähetetään säteitä valonlähteiden sekä peiliheijastuksen suuntaan ja sattumanvaraisesti ympäriinsä pinnan ominaisuuksien mukaan. Näistä kaikkia ominaisuuksia ei aina käytetä. (Glassner A. S. 1991)



Kuva 9. Säteenseurannassa säteet lähtevät kamerasta ja heijastuvat kohteista (Henrik 2008)

Säteenseuranta on melko nopea, riippuen peräkkäisten heijastuksien, valonlähteiden ja sattumanvaraisten heijastusten määrästä. Menetelmä hoitaa hyvin dynaamiset kohteet, peiliheijastukset ja terävät varjot.

Säteenseuranta ei ole hyvä luomaan umbra-varjoja eikä hyvää kaustiikkaa. Värien vuotaminen sekä heijastuksien kautta tuleva valo tulee nopeasti melko raskaaksi laskea.

3.2.2 Rasterisaatio

Rasterisaatio on täysin dynaaminen globaali valaistusmalli. Maailma voidaan rasterisoida joka kuvalla uudestaan rasteroinnin ollessa kevyttä. Maailma usein ensin vokseloidaan ruudukkoon, jonka jälkeen ruudukon vokselit valaistaan jokaisesta valonlähteestä. Valoista luodaan virtuaaliset valot, joilla maailma valaistaan. Kuten kuvassa 10, väritetyt vokselivalot tuottavat värien vuotamisefektiä. (Doghramachi 2018)



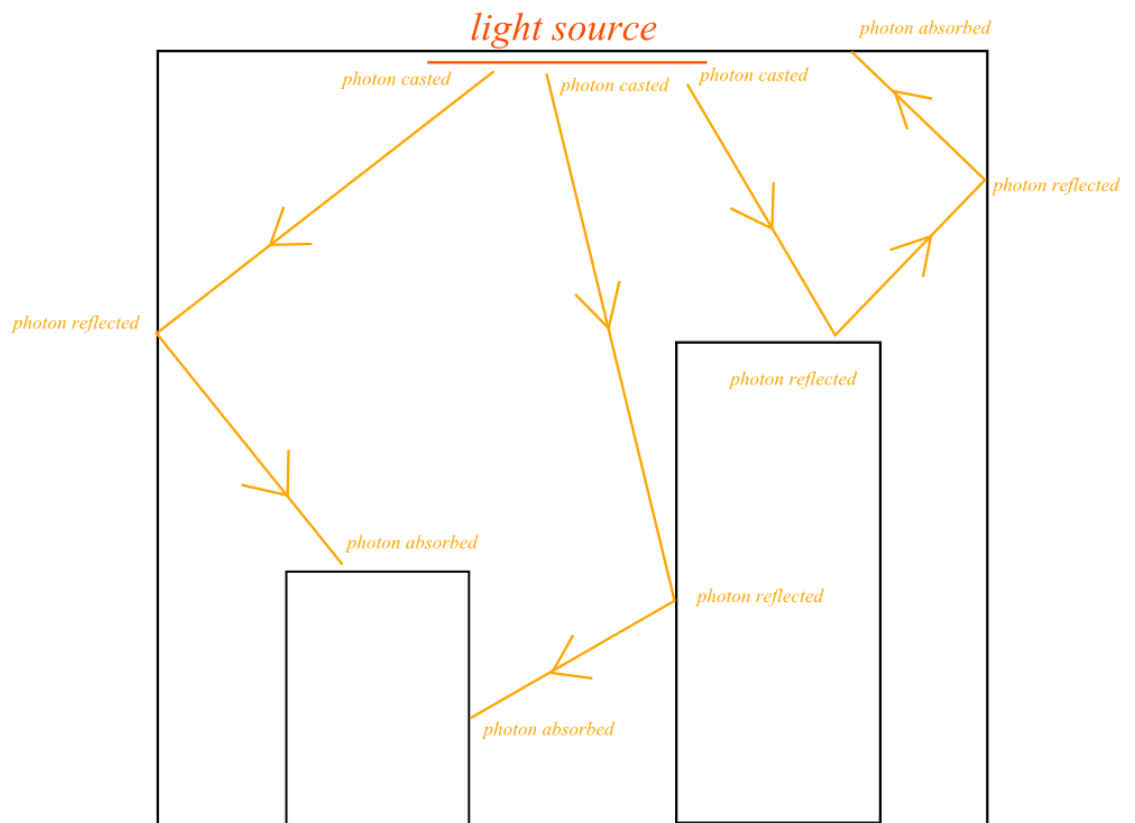
Kuva 10. Rasterisoinnissa vokseleihin jaetut alueet (Doghramachi 2018)

Rasterisaatio on nopea ja tehokas. Rasterisaatio saadaan helposti hyödyntämään grafiikkakortin rasterisaatiofunktioita, jolloin laskennasta tulee kevyttä. Lopputulos on melko näyttävää verrattuna tarvittavaan työhön.

Rasterisaatiolla on hankaluuksia tuottaa täysin realistista globaalia valaistusta, sillä lopputulos perustuu hyviin arvioihin. Rasterisaatiossa ilmenee helposti visuaalisia artefakteja, jos esine on näköalueen reunalla. (Doghrumachi 2018)

3.2.3 Fotonikartoitus

Fotonikartoitus on hienostunut säteenseurantamenetelmä, mutta ehkä nykypäivän kovimpia kilpailijoita alalla. Se kehitettiin vuosina 1993–1994. Sen edut ovat nopeassa laskemisessa suurissa ja monimutkaisissakin maailmoissa. Menetelmässä valonlähteistä emittoidaan fotoneja maailmaan, talletetaan fotonit fotonikarttaan, kun ne osuvat ei-peilaaviin kohteisiin (kuva 11). Toisella renderöintikierröksellä statistisia menetelmiä hyödyntäen lasketaan valon määrä ja heijastunut valo. (Jensen & Christensen 2000)



Kuva 11. Fotonikartoituksen fotonit lähtevät valonlähteestä ja kimpoilevat maailmassa. (Simon 2012)

Fotonikartoitus tarjoaa värien vuotamisen, kaustiikan sekä heijastukset. Fotonikartoitus ei ole rajoitettu polygoneista tehtyihin malleihin. Kaiken lisäksi menetelmää ei ole patentoitu.

Fotonikartoituksen lopputulos paranee fotonien määrän mukaan, mutta samalla nousee tarvittavan laskennan määrä. Suuri määrä valonlähteitä saattaa myös kuormittaa menetelmää. (Jensen & Christensen 2000)

3.3 Yhteistyössä toimivat tekniikat

Radiositeettimenetelmä ei tue kuin diffuuseja pintoja ilman heijastuksia. Tästä syystä välillä avuksi kaivataan erilaisia tekniikoita, joilla voidaan tukea radiositeettimenetelmän puutteita. Toisaalta aina ei tarvitse tehdä tiukkaa valintaa menetelmien välillä; radiositeettimenetelmää voidaan myös käyttää vain osana grafiikan laskentaa.

Koska radiositeettimenetelmästä puuttuvat kaustiikka, peiliheijastukset sekä dynaamisten liikkuvien kohteiden tuki, vierelle voidaan valita säteenseurantatekniikka korvaamaan radiositeettimenetelmän puutteita.

Radiositeettimenetelmästä on kehitettykin versio, "instant radiosity" – 'välitön radiositeetti' (Keller 1997), joka yhdistää näitä tekniikoita. Se perustuu radiositeetin valon leviämiseen, luoden virtuaalisia valoja valaistuksen kannalta tärkeisiin, paljon vaikuttaviin kohtiin.

Blinn-Phong-varjostuksella saa myös osaltaan peiliheijastuksia radiositeettimenetelmään, mikäli kirkkaimmat pinnat lasketaan valoiksi menetelmän kannalta.

4 Päätelmät

Radiositeetti on kehittynyt paljon alkuvuosistaan, vaikka puhtaan radiositeetin osalta kehitys tuntuu olevan hidastunut. Nykyään radiositeettimenetelmään sovelletaan helposti myös muiden menetelmien osia, ja hybridimenetelmät toimivatkin melko vakuuttavasti. Varmaa tietoa viimeaikaisista ja nykyisistä tutkimuksista on hyvin hankalaa löytää taikka saada. Vastausta mm. radiositeettimenetelmän merkityksestä tai käytöstä Enlighten-pelimoottorissa ei saatu, vaan vastauksessa ohjeistettiin tutkimaan foorumeita.

Internetin yleistymisen myötä tutkimustuloksia ja uusia innovaatioita on hankalampi käydä kaikkia läpi. Erilaisia tutkimusraportteja, dokumentteja ja muita innovaatioita tulee entistä useammassa muodossa. Vain osa dokumenteista ja uusista ideoista päätyy hallinnoituihin tietokantoihin. Osa uusista ideoista jää dokumentoimatta kunnolla, lähteet ja tekijät ovat merkitsemättä ja julkaisu saattaa jäädä vain pieneksi blogijulkaisuksi.

Nykyajan vapaan tiedon ja lähdekoodin malli ei ole vielä juurtunut tietokantoihin, vaan suuri osa tietokannoista ja niiden artikkeleista on maksullisia. Päästäkseen lukemaan kaikkia lähteitä täytyy hankkia useita maksullisia jäsenyyksiä sekä kirjoja. Artikkeleiden ja kirjojen tärkeyttä radiositeettimenetelmän kannalta on hankalaa arvioida pelkän nimen tai lyhyen abstraktin perusteella.

Koulun kautta käytössä olevista tietokannoista vain IEEE Xplore ja muutama muu antoi käyttökelpoisia tuloksia, vaikka nekin olivat hankalia löytää. Parhaiten tuloksia löytyi ACM tietokannasta, SIGGRAPHin sivuilta, CiteSeerx- sekä Google Scholar -hauilla ja tutkimalla muiden artikkeleiden lähteitä. Parhaita hakusanoja olivat SIGGRAPH, sekä lisäksi kuten radiosity, taikka jokin tarkempi termi tai menetelmä, josta haluaa lisätietoa. Näin löytyvä tieto tuntui olevan paljon tarkempaa ja relevantimpaa kuin muuten saatu tieto.

Opinnäytetyössä myös tuli huomattua, miten helposti lähteitä voi kadottaa taikka olla löytämättä alun perinkään. Pitkistä listoista hyvien, oikeiden tai relevanttien lähteiden löytäminen on hyvin työlästä, mikä on haitannut monella tavalla. Tietoa nykyajan tutkimuksista on siitä syystä hyvin vähän, koska lähteiden liian suuri määrä on hyvin hankalaa käsitellä. Nykyajan tieto on useassa paikassa hieman epävarmaa, koska lähteitä ei internetsivuille ja blogeille merkata läheskään yhtä paljon.

Lähdeluettelo

- Blinn, J. F. (1977). Models of light reflection for computer synthesized pictures. *SIGGRAPH '77 Proceedings of the 4th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, (ss. 192-198).
- Cohen, M. F.; & Greenberg, D. P. (1985). The hemi-cube: a radiosity solution for complex environments. *'85 Proceedings of the 12th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (ss. 31-40). SIGGRAPH.
- Cohen, M. F.; Chen, S. E.; Wallace, J. R.; & Greenberg, D. P. (1988). A progressive refinement approach to fast radiosity image generation. *SIGGRAPH '88 Proceedings of the 15th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ss. 75-84.
- Computer History Museum. (2018). *Computers | Timeline of Computer History | Computer History Museum*. Noudettu osoitteesta Timeline of Computer History: <http://www.computerhistory.org/timeline/computers/>
- Computer Hope. (2018). *When was the first computer invented*. Noudettu osoitteesta Computerhope Web site: <https://www.computerhope.com/issues/ch000984.htm>
- Doghrumachi, H. (2018). *Rasterized Voxel-Based Dynamic Global Illumination - GPU Pro4: Advanced Rendering Techniques - page 157*. Noudettu osoitteesta Nerdilad: <http://nedrilad.com/Tutorial/topic-58/GPU-Pro-Advanced-Rendering-Techniques-172.html>
- Dudka, K. (2015). *Dudka.cz: RRV - Gallery*. Noudettu osoitteesta Dudka.cz: <http://dudka.cz/rrv/gallery>
- Glassner, A. S. (1991). *An Introduction to Ray Tracing*. San Diego: Academic Press Inc.
- Glassner, A. S. (2011). Principles of Digital Image Synthesis Andrew Glassner. Teoksessa A. S. Glassner, *Principles of Digital Image Synthesis* (ss. 887-984). San Francisco, California: Morgan Kaufmann Publishers, INC. Noudettu osoitteesta Glassner Web site: <http://www.glassner.com/portfolio/principles-of-digital-image-synthesis/>
- Goral, C. M.; Torrance, K. E.; Greenberg, D. P.; & Battaile, B. (1984). Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. *SIGGRAPH '84 Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ss. 213-222.
- Hanrahan, P.; Salzman, D.; & Aupperle, L. (1991). A rapid hierarchical radiosity algorithm. *SIGGRAPH '91 Proceedings of the 18th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (ss. 197-206). New York: ACM.
- Henrik. (2008). *Ray trace diagram*. Noudettu osoitteesta Wikipedia: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ray_tracing_\(graphics\)#/media/File:Ray_trace_diagram.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Ray_tracing_(graphics)#/media/File:Ray_trace_diagram.svg)

- Jensen, H. W.; & Christensen, N. J. (2000). *A Practical Guide to Global Illumination using Photon Maps*. Noudettu osoitteesta Computer Graphics at Stanford University: <https://graphics.stanford.edu/courses/cs348b-00/course8.pdf>
- Keller, A. (1997). Instant Radiosity. *SIGGRAPH '97 Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ss. 49-56.
- Mortensen, J. (18. September 2014). *Global Illumination in Unity 5*. Noudettu osoitteesta Unity Blog: <https://blogs.unity3d.com/2014/09/18/global-illumination-in-unity-5/>
- Panagiotis, C.; & Despina, M. (2014). *SoundPropagationSurvey_VSMM_2014_camera_Ready*. Noudettu osoitteesta Getlab: http://getlab.org/wp-content/uploads/2012/10/SoundPropagationSurvey_VSMM_2014_cameraReady.pdf
- Phong, B. T. (1973). Illumination for computer-generated images. *UTEC-CS*, 73-129.
- Scott, O. (3. 8 1998). *Radiosity*. Noudettu osoitteesta SIGGRAPH: <https://www.siggraph.org/education/materials/HyperGraph/radiosity/radiosity.htm>
5
- Silicon Studio. (26. toukokuu 2018). *Features | Enlighten - Real Time Global Illumination Solution | Silicon Studio*. Noudettu osoitteesta Silicon Studio Web site: <https://www.siliconstudio.co.jp/middleware/enlighten/en/features/>
- Simon. (14. 06 2012). *Simon's Tech Blog: Photon Mapping Part 1*. Noudettu osoitteesta Simon's Tech Blog: <http://simonstechblog.blogspot.com/2012/06/photon-mapping-part-1.html>
- Smith, A. (2014). *The Priesthood at Play: Computer Games in the 1950s | They Create Worlds*. Noudettu osoitteesta Videogamehistorian: <https://videogamehistorian.wordpress.com/2014/01/22/the-priesthood-at-play-computer-games-in-the-1950s/>
- Stone, E. (9. September 2016). *Enlighten: Real-Time Global Illumination in Unreal Engine 4*. Noudettu osoitteesta Unreal Engine: <https://www.unrealengine.com/en-US/blog/enlighten-real-time-global-illumination-in-unreal-engine-4>
- Tsingos, N.; & Gascuel, J.-D. (1997). *sig98*. Noudettu osoitteesta Citeseerx: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.153.9990&rep=rep1&type=pdf>
- Whitted, T. (1980). An improved illumination model for shaded display. *An improved illumination model for shaded display*, 343-349.