

MALLINNUS JA TEKSTUROINTI VIRTUAALITODELLISUUSOVELLUKSEEN

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Mediatekniikan koulutusohjelma
Teknisen visualisoinnin suuntautumisvaihtoehto
Opinnäytetyö
14.5.2007
Toni Kämppe

KÄMPPI, TONI: Mallinnus ja teksturointi virtuaalitodellisuussovellukseen

Teknisen visualisoinnin opinnäytetyö, 78 sivua

Kevät 2007

TIIVISTELMÄ

Tämä opinnäytetyö käsittelee reaaliaikaisia kolmiulotteista grafiikkaa hyödyntäviä sovelluksia sekä niihin luotavien 3D-mallien tekemiseen liittyviä prosesseja. Reaaliaikaisilla sovelluksilla tarkoitetaan pääasiassa virtuaalitodellisuussovelluksia, kuten simulaattoreita.

Virtuaalitodellisuus on nopeasti kasvava tietotekniikan ala, jota sovelletaan käytäntöön yhä useammilla aloilla. Tekniikka luo mahdollisuuksia, joita aikaisemmin ei ollut. Tästä johtuen mm. tutkimus, koulutus, lääketiede, kemia ja median eri osa-alueet käyttävät virtuaalitodellisuutta hyödykseen useilla eri tavoilla.

Lisääntynyt kiinnostus tekniikkaa kohtaan, tekniikan kehityksen mukanaan tuomat muutokset laitteistojen hinnoissa ja tietotaidon lisääntyminen alalla ovat luoneet markkinat virtuaalitodellisuussovelluksille, ja tämä taas on luonut tarpeen tutkimukselle virtuaalitodellisuuden tuotteiden – kolmiulotteisten objektien ja animaatioiden – luomiselle.

Työssä käsitellään alustavasti virtuaalitodellisuutta ja sen luomiseen tarvittavia laitteistoja. Opinnäytetyössä käydään läpi 3D-mallinnuksen perusteita sekä sitä, miten mallien rakentamiseen vaikuttaa niiden käyttötarkoitus reaaliaikaisissa sovelluksissa. Toinen pääpiste on valmiiden mallien teksturointi, joka on tärkeä osa realististen virtuaaliympäristöjen luomista.

Mallien tekeminen on täysin riippuvaista siitä, mihin käyttöön ne tehdään. Pienet kokonaisuudet voidaan toteuttaa yksityiskohtaisesti, mutta suuremmissa kokonaisuuksissa mallit tulee optimoida, koska tietokoneiden tehot asettavat rajat mallien tarkkuudelle.

Virtuaalitodellisuussovellukset tarjoavat yhä enemmän vaihtoehtoja perinteiselle visualisoinnille, mutta tällä hetkellä immerstiivinen virtuaalitodellisuustekniikka on liian kallista, ja käytännön toteutus vaatii liian paljon tietoa eri aloilta, jotta virtuaalitekniikka pärjäisi muille esitystavoille. Kevyemmät virtuaalitodellisuusratkaisut, kuten taustaprojektioseinät, voivat kuitenkin nousta valtavirran tuotteiksi jo lähitulevaisuudessa.

Avainsanat: virtuaalitodellisuus, mallinnus, 3d-mallit, teksturointi

KÄMPPI, TONI: 3D modeling and texturing for virtual reality applications

Bachelor's thesis in Visualization Engineering, 78 pages

Spring 2007

ABSTRACT

This thesis deals with 3D modeling and virtual reality applications. The main purpose is to describe the process of creating 3D models to be used in real-time applications.

Virtual reality is a fast growing area of technology, which has many uses. Virtual reality gives us new possibilities when compared to more traditional computer graphics, since we have a way to observe things in real-time 3D and immerse ourselves into the virtual scene. This has led to an increasing interest in virtual reality technology in areas such as medicine, research, training, chemistry and marketing. Nowadays many of these areas use virtual reality as a tool for different purposes.

Virtual reality can be achieved with different kinds of equipment, such as projection walls, head-mounted displays and with immersive Cave Automatic Virtual Environment systems. This thesis explains the history and basics of these systems. The most important part, however, deals with the modeling and texturing of 3D models for virtual reality applications.

The creation process for 3D models consists of modeling, texturing and material creation. When making these models one must consider the end use of the 3D model because virtual reality models must be optimized in order for them to work properly in real-time applications. If the purpose of a 3D model is to show a large environment with lots of objects, the amount of detail must be minimized because of the limited computing power of modern day PC workstations. Small items such as mobile phones can be modeled in full detail.

Virtual reality technology is still rapidly developing and it will be a fascinating area of technology in the future. At this time, fully immersive virtual reality applications are too expensive to be used in all areas, but smaller systems such as projection walls can provide us with a useful and cost effective tool in the near future.

Keywords: virtual reality, 3D modeling, 3D models, texturing,

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	KOLMIULOTTEINEN MAAILMA.....	3
2.1	Havaitseminen	3
2.2	Havaitsemisen keinot.....	4
2.3	Havaitseminen virtuaalitodellisuudessa.....	5
3	VIRTUAALITODELLISUUS.....	6
3.1	Historia ja kehitys.....	6
3.2	Laitteistot	10
3.2.1	Window on World	10
3.2.2	Datakypärät.....	11
3.2.3	BOOM	12
3.2.4	CAVE.....	13
3.2.5	Simulaattorit.....	15
3.3	Sovellukset.....	16
3.3.1	Koulutus	16
3.3.2	Arkkitehtuuri	19
3.3.3	Markkinointi	20
4	3D-MALLINNUS	23
4.1	3D-MALLIT.....	23
4.1.1	3D-mallit ja virtuaalitodellisuus	23
4.1.2	3D-mallien rakenne.....	24
4.1.3	3D-mallien rakentaminen ja muokkaus.....	26
4.1.4	Virtuaalitodellisuuden rajoitteet malleille	30
4.2	MATERIAALIT JA TEKSTUROIINTI	32
4.2.1	Materiaalien ja tekstuurien hyödyt.....	32
4.2.2	Materiaalit.....	34
4.2.3	Tekstuurit	39
4.2.4	Tekstuurien tekeminen.....	43
4.2.5	UVW-Mapping	45
4.2.6	UVW-Unwrap.....	49

4.2.7	Texture Baking.....	51
4.3	VALAISTUS	51
4.3.1	Valon ominaisuudet.....	51
4.3.2	3D-sovellusten valot.....	55
4.4	3D-MALLIEN SIIRTO TOISEEN SOVELLUKSEEN	57
5	CASE	58
5.1	KOHDEYRITYS.....	58
5.2	TUTKIMUSTYÖN TARKOITUS	59
5.3	SUUNNITTELU	61
5.4	MALLINNUS	62
5.5	MATERIAALIT JA TEKSTUURIT	65
5.6	SIIRTÄMINEN SOVELLUKSEEN	67
6	YHTEENVETO.....	69
	LÄHTEET	72
	LIITTEET	78

1 JOHDANTO

Kolmiulotteisuus on osa meidän kaikkien todellisuuttamme sillä elämme maailmassa, joka on ja jonka koemme kolmiulotteisena. Ihmisen aistit auttavat meitä havainnoimaan ympäristöämme ja tunnistamaan asioita.

Kaksiulotteinen esittäminen on tunnettu jo ihmisen varhaishistoriassa – kuten luolamaalaukset hyvin meille osoittavat – ja edelleen kaksiulotteinen grafiikka on vahva ja hyvin toimiva tapa esittää asiat. Kehityksen myötä tämän perinteisen esitystavan rinnalle on kuitenkin noussut kolmiulotteinen esitys. Tämä uudempi tapa esittää asiat on saanut vuosien varrella vahvan jalansijan mediassa, ja tänä päivänä lähes kaikkialla on mukana kolmiulotteista grafiikkaa, josta käytetään myös lyhennystä 3D-grafiikka.

3D-grafiikan teho perustuu pitkälti siihen faktaan, että koemme ympärillämme olevan maailman kolmiulotteisena ja täten ihmiselle on luontevaa seurata kolmiulotteista esitystä (Hintikka, Kojo & Metsämäki 1998, 5).

Kolmiulotteinen esittäminen tämän päivän mediassa on lisääntynyt suuresti, ja ihmisten erilaisia päätöksiä helpottamaan on luotu erilaisia 3d-grafiikkaa hyödyntäviä sovelluksia. Hyvänä esimerkkinä näistä ovat mm. arkkitehtitoimistojen luomat kuvat rakennuskohteista. Tavanomaisimpia käyttökohteita 3D-grafiikalle ovat tv-mainonta, internet-sivustot, pelit ja elokuvat. Täten kolmiulotteinen esitys koskettaa meistä useimpia.

Tietokoneella toteutettu kolmiulotteinen esitys koetaan normaalisti jonkin kaksiulotteisen näyttölaitteen, kuten monitorin tai tv:n välityksellä. Tällä tavalla menetämme osan kolmiulotteisuuden tunnusta, koska näyttö latistaa kuvan. Vaikka ruudulla esitetyt asiat, kuten peleihin tehdyt upeat maisemat, näyttävät kolmiulotteisilta, emme pysty uppoutumaan tähän keinotekoiseen maailmaan, mikä osaltaan heikentää muuten hienoa kokemusta.

Ihmisten kiinnostus yhä aidompien kokemusten luomiseen keinotekoisesti onkin osaltaan johtanut virtuaalitodellisuuden kehitykseen. Virtuaalitodellisuudessa on tarkoituksena tuottaa

elämyksiä, jotka jäljittelevät todellisuutta mahdollisimman tarkasti tuottaen meille keinotekoisesti tunteen todellisuudesta.

Virtuaalitodellisuus ei kuitenkaan rajoitu pelkästään todellisuuden mallintamiseen. Käyttäen tätä työkalua, voimme myös luoda ja esittää asioita, joita muuten ei olisi mahdollista esittää (Hintikka ym. 1998, 9.)

Jotta kokemus virtuaalitodellisuudesta välittyisi mahdollisimman todentuntuiseena, vaaditaan sisällöntuottajalta taitoa tehdä todentuntuisia ja sovelluksiin sopivia pintamalleja sekä kykyä luoda aidon näköisiä kuvia lisäämään realismia mallien pintoihin. Prosessiin liittyy toki olennaisena osana myös valaistuksen luominen sekä valmiin mallin siirto mallinnussovelluksesta virtuaalitodellisuussovellukseen. Kaiken kaikkiaan virtuaalitodellisuuteen sopivan ympäristön luominen on haastava ja pitkälinen prosessi, joka vaatii tekijältään huomattavan määrän tietoa eri aihealueilta.

Tämän opinnäytetyön keskeisenä tavoitteena onkin antaa lukijalle perusymmärrys virtuaalitodellisuudesta, sekä sen luomisesta 3D-mallintajan perspektiivistä. Työssä käsitellään muun muassa virtuaalitodellisuuden historiaa, laitteita ja sen käyttökohteita. Mallintamiseen liittyvissä osioissa selvennetään mallinnusprosessia sekä erilaisia keinoja tuottaa 3D-objekteja. Lisäksi käydään lävitse materiaalien luomista 3D-sovelluksissa ja sitä miten valmiit 3D-mallit siirretään virtuaalitodellisuussovellukseen.

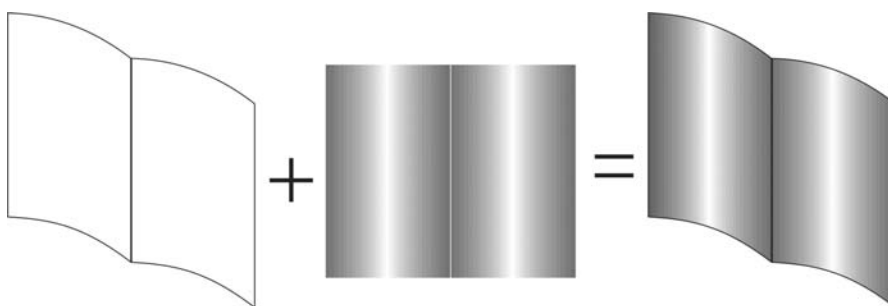
Case-osuudessa hyödynnetään teoriaa ja sovelletaan tietoa tarkoituksena luoda realistisen näköinen ja hyvin toimiva 3D-ympäristö virtuaalitodellisuussovellukseen.

2 KOLMIULOTTEINEN MAAILMA

2.1 Havaitseminen

Maailman kolmiulotteisuuden havaitsemisen tärkeimpänä tekijänä on tietenkin näköaisti, jonka avulla saamme tiedon ympäristöstämme valoinformaation välityksellä. Näkemisen tarkoituksena on tunnistaa erilaiset kohteet ja erotella ne ympäristössä olevista taustoista. Tästä hyvänä esimerkkinä toimii vaikkapa liikennetilanne, jossa taustan edessä on autoja, jalankulkijoita ja vaikkapa liikennemerkkejä. Kolmiulotteisen maailman myötä meillä onkin useita keinoja havaita nämä asiat ja erotella ne etäisyyden mukaan (Hintikka ym. 1998, 11.)

Koska virtuaalitodellisuus on myös kolmiulotteinen tila, ihmiset tunnistavat ja erottelevat asiat toisistaan samoilla periaatteilla kuin oikeassakin maailmassa. Usein virtuaalimaailmoissa meillä ei kuitenkaan ole käytettävissä aivan kaikkia keinoja asioiden havaitsemiseen. Tämä ei kuitenkaan muodostu ongelmaksi, sillä ihminen pystyy tunnistamaan ja erottelemaan kohteet vähemmälläkin määrällä keinoja. Esimerkiksi kaksiulotteisessa ja litteässä monitorin kuvassa esitettävä kolmiulotteinen esitys koetaan kolmiulotteiseksi, vaikka todellisuudessa kuva on kaksiulotteinen. Kun esitys siirretään vaikkapa pallopinnaksi katselijan ympärille, kuten Omnimax-teattereissa, kolmiulotteisuuden tuntu on paljon voimakkaampi kuin pelkästään kaksiulotteisella näyttölaitteella. Virtuaalitodellisuutta suunniteltaessa onkin siis erittäin tärkeää tietää, kuinka paljon kolmiulotteisuusvihjeitä (kuva 1) tarvitaan, jotta kokemus olisi mahdollisimman realistinen. (Hintikka ym. 1998, 11.)



KUVA 1. Kahden kolmiulotteisuusvihjeen yhdistäminen antaa meille paremman käsityksen kohteen muodosta (Hintikka ym. 1998, 11).

2.2 Havaitsemisen keinot

Kolmiulotteisen maailman havaitsemiseen on siis olemassa erilaisia keinoja. Keskeisimmäksi tekijäksi ihmisillä on muodostunut stereonäkökyky, joka perustuu siihen, että ihmisen vierekkäin sijaitseviin silmiin piirtyy samasta kohteesta kaksi hieman toisistaan poikkeavaa kuvaa. Nämä kuvat välittyvät aivoihimme, minkä jälkeen aivot muodostavat niiden eroavaisuuksista mallin, joka koetaan kolmiulotteisena kohteena. (Hintikka ym. 1998, 13.)

Stereonäkökyky on niin sanottu havaitsijaan sidoksissa oleva keino, jota täydentää liike. Ympäristössämme on lähes poikkeuksetta jotain liikettä, joka on joko ympärillämme tapahtuvaa tai sitten itsestämme johtuvaa liikettä. Kyseinen tila koostuu normaalisti havaitsijasta, taustasta ja välissä olevista kohteista. Kun jokin liikkuu, niin liikkuva objekti erottuu selkeästi taustasta kolmiulotteisena. Varsinkin kohteen reunat havaitaan tarkasti, koska niiden alueella tapahtuu suurimmat muutokset liikkeestä johtuen. Liike auttaa hahmottamaan kohteen kolmiulotteisen rakenteen paremmin, eli toisin sanoen kolmiulotteisuusvihjeet ovat selkeämpiä.

Stereonäkökyky ja kolmiulotteisuuden havaitseminen ovat niin sanottuja havaitsijaan sidoksissa olevia keinoja, joita täydentävät ulkoiset eli piktoriaaliset vihjeet. Nämä toisen asteen vihjeet kolmiulotteisuudesta liittyvät siihen, miten silmän sisäinen optiikka muodostaa kolmiulotteisesta maailmasta kaksiulotteisen kuvan silmän verkkokalvolle. Tutuimpia kaikille näistä vihjeistä lienee perspektiivi, koko ja kohteiden peittyminen. Muita vihjeitä ovat verkkokalvolle piirtyvän kuvan koko, ilmaperspektiivi ja kirkkausgradientti (Hintikka ym. 1998, 17.)

Perspektiivi on tuttu käsite, ja siitä puhutaan monissa yhteyksissä, kuten maalaustaiteessa. Perspektiivi on erittäin vahva vihje näköjärjestelmälle sen arvioidessa esineiden kokoa. Tästä hyvänä esimerkkinä toimii rivi samankokoisia laatikoita, jota katsottaessa edestäpäin näyttää siltä, että kauimmaisat laatikot olisivat pienempiä kuin etummaisat (kuva 2).



KUVA 2. Perspektiivin vaikutuksesta samankokoiset laatikot vaikuttavat havainnon perusteella olevan erikokoisia vaikka ne ovatkin täysin samankokoisia (Kämpfi 2007).

Perspektiivin lisäksi tärkeitä vihjeitä kolmiulotteisuuden hahmottamiselle ovat luonnollisissa ympäristöissä esiintyvät tutut asiat, kuten koko, muoto, varjostukset ja objektien peittyminen. Nämä auttavat meitä hahmottamaan paremmin kohteiden suhteen toisiinsa nähden ja täten vahvistavat kolmiulotteisuuden hahmottamista. Näiden vihjeiden lisääminen on olennainen osa virtuaalitodellisuuteen tehtävän mallin rakennusprosessia.

2.3 Havaitseminen virtuaalitodellisuudessa

Virtuaalitodellisuudessa näiden keinojen ja vihjeiden käyttö on tietenkin kiinni mallintajan valinnoista. Parhaaseen lopputulokseen realismin kannalta päästään, kun mallista rakennetaan mahdollisimman todenmukainen. Kuvatessa todellisia asioita, kuten suunnitteilla olevaa rakennusta tai ympäristöä, onkin syytä ottaa huomioon valaistus, tekstuurit, kohteiden koot ja sijainti. Nämä ovat peruselementtejä, jotka muodostavat realistisen 3D-toisinnon todellisesta kohteesta. Ongelmia virtuaalitodellisuudessa saattaa ilmetä, kun kyseessä on inhimillisen kokemusmaailman ulkopuolella oleva tilanne, jolloin keinomme tilanteen hahmottamiseen saattavat olla riittämättömiä. Kyseisen kaltainen tilanne voi olla esimerkiksi atomien ja alkeishiukkasten käyttäytymisen kuvaus virtuaalitodellisuussovelluksessa. Niiltä puuttuu ominaisuuksia, joiden avulla hahmotamme todellisuutta, joten tilanteiden ymmärtäminen ja

hahmottaminen voi helposti muodostua ylivoimaiseksi. Tällöin voidaan tuottaa malli, joka ei täydellisesti jäljittele atomien ja alkeishiukkasten ominaisuuksia, vaan ne korvataan enemmän inhimilliselle havaitsemiselle ominaisilla asioilla, kuten pingispallomalleilla. Näin saavutetaan tilanne, jossa pystymme helpommin hahmottamaan virtuaalimaailman tapahtumat (Hintikka ym. 1998, 23.)

Virtuaaliympäristöjen yhteydessä käytetään termiä immersio eli uppoutuminen. Keskittyessään vahvasti johonkin aiheeseen, ihminen tavallaan uppoutuu siihen. Virtuaaliympäristöissä tämä useimmiten johtuu ympäristön todenkaltaisuudesta, jolloin immersio on luontevaa. Kyseessä voi myös olla tekemisestä johtuvaa immersiota, jolloin ympäristöön sijoitettu tehtävä on laadultaan niin mielenkiintoinen, että ihminen uppoutuu sen tekemiseen. Todenkaltaisuuden merkitys korostuu myös tässä yhteydessä, sillä immersion voimakkuus riippuu pitkälti ympäristöstä virtuaalisovelluksissa.

3 VIRTUAALITODELLISUUS

3.1 Historia ja kehitys

Virtuaalitodellisuuden käsite ponnahti kaikkien huulille 1980- ja 1990-luvun vaihteessa, kun siitä povattiin vallankumouksellista tekniikkaa joka mullistaisi graafiset interaktiota sisältävät tietokonesovellukset. Todellisuudessa virtuaalitodellisuus kuitenkin juontaa juurensa paljon pidemmälle historiaan. Voidaan jopa sanoa, että sen historia on lähes yhtä pitkä kuin tietokonegrafiikan.

Ideana virtuaalitodellisuus sai alkunsa vuonna 1956, kun Morton Heilig suunnitteli ensimmäisen virtuaaliseen kokemukseen verrattavan laitteen, Sensoraman (kuva 3). Laite yhdisti filmin, äänen, tärinän, tuulen ja hajut, jotta katsojasta tuntuisi, kuin hän itse kokisi elokuvan sen sijaan, että vain katsoisi sitä. Sensorama ei siis sinänsä käyttänyt hyväksi tietokoneilla luotua grafiikkaa, vaan Heiligin kehittämää 3D-elokuvakameraa. Sensoraman lisäksi Heilig kehitti alkeellisen päähän asetettavan näytön eli Head-Mounted Displayn (Carlson 2003.)



KUVA 3. Sensorama oli ensimmäinen laite, jossa päästiin lähelle keinotekoista virtuaalista elämystä (Carlson 2003).

Heiligin laite ei kuitenkaan tullut ikinä taloudellisesti kannattavaksi, joten projekti lopetettiin. Sensorama avasi kuitenkin ovia uusille ajatuksille ja toimi näin tärkeänä virstanpylväänä virtuaalitodellisuuden historiassa.

Vuonna 1966 Ivan Sutherland jatkoi siitä, mihin Heiligin kehittämä HMD:n prototyyppi jäi. Hän loi näyttölaitteen, joka koostui kahdesta CRT-näytöstä, joilla pystyttiin toistamaan tietokoneella luotua kuvaa. Vaikka tämän ajan kehitys oli vielä kaukana tästä päivästä, niin Sutherlandin HMD-laite oli suuri edistysaskel kohti tämän päivän virtuaalitodellisuuslaitteistoja (kuva 4). Myöhemmin Sutherland oli mukana kehittämässä 3D-grafiikasta suoriutuvia näytönohjaimia, jotka ovat tärkeä osa moderneja virtuaalitodellisuuslaitteistoja (Carlson 2003.)



KUVA 4. Sutherlandin Head-Mounted Display koostui kahdesta CRT-näytöstä (Carlson 2003).

Sutherlandin työ herätti kiinnostusta Yhdysvaltojen armeijan keskuudessa, sillä hänen visionsa simulaatiosta ja näyttötekniikoista nähtiin asevoimissa seuraavana koulutuksen kehitysaskeleena. Armeijan suuri panostus simulaatioon onkin yksi virtuaalitodellisuuden kehityksen tärkeimpiä yksittäisiä tekijöitä, koska uuden tekniikan tutkinta oli taloudellisesti riskialtista ja valtion rahoittamana tutkimusta pystyttiin jatkamaan. Myöhemmin armeijan sekä siviilipuolen tutkimus ovat yhdistyneet monilta osin, ja täten mahdollistaneet virtuaalitodellisuuden kehittämisen vieläkin pidemmälle.

Sutherland teki tutkimustaan ja kehitystyötään MIT:ssä (Massachusetts Institute of Technology), jossa myös hänen kollegansa Larry Roberts teki merkittävän läpimurron. Robertsin onnistui koodata algoritmi, joka poisti tietokoneelta tarpeen laskea piilossa olevia pintoja, ja näin päästiin eroon yhdestä suurimmasta 3D-grafiikan laskemiseen liittyvästä ongelmasta. Piilossa tai muuten peittyneinä olevat objektit aiheuttivat ylimääräistä laskemista, mikä oli haitallista varsinkin 70-luvun heikkotehoisille tietokoneille, jotka eivät pysyneet kehityksen perässä (Carlson 2003.)

Toinen merkittävä virtuaalitodellisuuden kehityskeskus oli Utahin yliopisto, jossa useat opiskelijat ja tutkijat kehittivät eteenpäin tietokonegrafiikkaa. 1970-luvulla keksittiin useita 3D-grafiikan mallinnukseen ja reaaliaikaiseen toistamiseen liittyviä tekniikoita, kuten renderöinti, z-buffer ja shading-tekniikat. Useat näistä 70-luvulla

kehitetystä tekniikoista on edelleen käytössä, tosin kehittyneempinä versioina (Carlson 2003.)

Virtuaalitodellisuuden vaatimat tietokonetehot ja tekniikka olivat kuitenkin pitkään saavuttamattomissa, ja käytännöllisesti katsoen virtuaalitodellisuus oli sovellettavissa ainoastaan Yhdysvaltojen armeijan pilottikoulutuksessa ja hävittäjälentokoneissa. Vasta 1980-luvun puoliväli toi mukanaan muutoksen, kun NASAlla alettiin kehittää virtuaaliin ympäristöihin tarkoitettuja työasemia. NASAn kehitystyö johti halvempien virtuaalisysteemien kehitykseen ja täten mahdollisti kaupallisten sovellusten kehittämisen. Samanaikaisesti kotitietokoneiden laskutehon kehityksen johdosta virtuaalitodellisuus alkoi olla jo pienempien yritystenkin ulottuvilla. Lisäksi elokuva- ja peliteollisuus kiinnostuivat entistä enemmän virtuaalitodellisuuden tuomista mahdollisuuksista, joka lisäsi entisestään virtuaalitodellisuuden vaatimien teknologioiden kehittämistä (NCSA 2004.)

Tekniset toteutukset virtuaalitodellisuuden takana tarvitsevat kuitenkin sopivan kanavan, jonka kautta ihmiset voivat vastaanottaa koodien ja laitteistojen tuottamat kuvat ihmisaivoilla ymmärrettävänä kuvallisena informaationa. Virtuaalitodellisuuden alkuaikoina käytössä oli niin kutsutut datakypärät (Head-Mounted Display:t eli HMD:t), joista ensimmäisen prototyypin - tämän luvun alussa mainittu - Ivan Sutherland kehitti. HMD luo immersion tunteen, koska käyttäjä ei näe todellista maailmaa vaan ainoastaan tietokoneella luodun virtuaalisen maailman. HMDtä kehittyneemmät sovellukset ovat heijastusnäyttöistä kootut CAVE:t (Cave Automatic Virtual Environment), joissa käyttäjä kokee täydellisen uppoutumisen tunteen, kun hänet suljetaan tilaan, jonka seinille heijastetaan kuvat taustaprojektioina. Lisäksi käyttäjällä on päässään stereolasit, jotka tehostavat kolmiulotteisuuden vaikutelmaa entisestään. CAVE-systeemiä yleisempi toteutustapa on lisätty todellisuus (Augmented reality), joka käyttää hyväkseen HMD tekniikkaa ja liikkeen seuranta. Lisätyssä todellisuudessa todellisen kuvan päälle asetetaan tietokoneella tuotettua materiaalia, jolloin oikeaan maailmaan saadaan mahdutettua lisäinformaatiota.

Virtuaalitodellisuutta käytetään pitkälti interaktiivisiin sovelluksiin, jolloin tarvitaan tietenkin tähän ympäristöön sopivia hallintalaitteita. Perinteiset tietokoneen hallintalaitteet eivät enää toimi ympäristössä,

joka vaatii kolmiulotteista hallintaa. Tähän käyttötarkoitukseen on kehitetty virtuaalitodellisuuden kehittyessä erilaisia laitteita, kuten 3D-hiiri, datahanskat, liikkeen seurantalaitteet ja datakypärät (Thalman 1991.)

Yhdessä erilaisten äänilaitteistojen ja tietokoneiden kanssa nämä laitteet muodostavat kokonaisuuden, jota voidaan kuvailla termillä virtuaalitodellisuus. Virtuaalitodellisuuden sovellukset ja tekniikat sen tuottamiseksi kehittyvät jatkuvasti, eikä sen tulevaisuutta voida varmasti ennustaa. Varmaa on kuitenkin, että tulevaisuudessa tulemme näkemään entistä realistisempia virtuaaliympäristöjä, joissa tapahtumat koetaan kaikilla aisteillamme. Tällä hetkellä tutkimustyö keskittyy kuitenkin kehittämään sovelluksia, jotka käyttävät hyödykseen näkö-, kuulo- ja tuntoaistia.

Nykypäivän virtuaalitodellisuus on siis pitkälti kehittynyt samoilla linjoilla 3D-grafiikan kanssa. Uusien grafiikkakorttien, tehokkaiden moni ydin prosessoreiden ja muiden teknologisten edistysaskeleiden myötä, virtuaalitodellisuus alkaa todellakin muistuttaa meidän omaa todellisuuttamme, ja immersio tähän keinotekoiseen maailmaan on yhä luonnollisempaa.

3.2 Laitteistot

3.2.1 Window on World

Window on World tai suomeksi ikkuna maailmaan, sovellukset ovat toimintaperiaatteeltaan yksinkertaisin tapa toteuttaa ns. virtuaalimaailma. Kaksiulotteisella näyttölaitteella – kuten monitorilla – pyöritetään kolmiulotteista sovellusta. Tämän tyyppisessä ratkaisussa ei vaadita mitään erikoisia virtuaalitodellisuuslaitteita, vaan laitteistoksi riittää kotitietokone. Nykypäivän tehokkaat kotitietokoneet suoriutuvat entistä upeammista ja realistisemman näköisistä sovelluksista. Käytännössä nämä sovellukset ovat erilaisia kolmiulotteista grafiikkaa hyödyntäviä pelejä. Pelien lisäksi on olemassa erilaisia virtuaalisovelluksia kuten interaktiiviset tuote-esittelyt. Window on World -tyyppiset sovellukset pyörivät siis pääasiallisesti kotitietokoneiden ruuduilla, ja niitä ohjailaan sovellukseen koodatuilla komennoilla. Fyysisellä tasolla ohjaus tapahtuu hiiren ja näppäimistön avulla.

3.2.2 Datakypärät

Tyypillisessä datakypärässä on yksi tai kaksi pientä CRT (Cathode Ray Tube)-, LCD (Liquid Crystal Display)-, LCoS (Liquid Crystal on Silicon)- tai OLED (Organic Light-Emitting Diode)-näyttöä kiinnitettynä kypärään (kuva 5), laseihin tai visiiriin. Lisäksi niihin on usein kytketty suurennuslasit, jotta vältyttäisiin silmien rasittumiselta. Näin saavutetaan vaikutelma, että kuva tulisi kauempaa. Kahden näytön versioissa pystytään luomaan stereokuva, kun kumpaakin näyttöön ohjataan hieman toisesta poikkeava kuva. Tämä noudattaa työn alussa esitetyn perspektiivin muodostamisen periaatetta. Aivot muodostavat kahdesta hieman toisistaan poikkeavasta kuvasta kolmiulotteisen kuvan.



KUVA 5. Head-Mounted Display jossa on kaksi näyttöä (Wikipedia 2007).

Datakypärissä on myös usein liikkeen seurantasysteemejä, joiden avulla käyttäjä voi katsella virtuaalimaailmaa aivan kuten oikeassakin maailmassa. Näin kokemus virtuaaliympäristöstä on luonnollisempi, koska ympäristön liikuttamiseen ei tarvita erillisiä ohjaimia. Tämän kaltainen ohjaustekniikka vaatii kuitenkin suuren määrän laskentatehoa tietokoneelta, koska kuvien pitää päivittyä tiheällä tahdilla. Kuvien päivittymisnopeus on olennainen osa realistista kokemusta virtuaalitodellisuudessa, koska mahdollinen viive kuvien päivityksessä näkyy tarkalle ihmissilmälle virheenä.

Myös lisätyn todellisuuden sovelluksissa käytetään datakypäriä. Tällöin kyseessä on puoliläpäisevä peilinäyttö, johon heijastetaan tietokoneella luotuja objekteja ja dataa. Näytön läpäisevien ominaisuuksien ansiosta tietokoneen kuvat piirtyvät oikean maailman päälle ja täten lisäävät näkökenttäämme virtuaalisia elementtejä (Azuma 2005.)

3.2.3 BOOM

BOOM, eli Binocular Omni-Orientation Monitor, vastaa idealtaan HMDta, mutta siihen on lisätty vielä mekaaninen käsivarsi. Käsivarsi on kiinnitetty joko kiinteään tai sitten liikkuvaan alustaan. BOOMin näyttö muistuttaa pitkälti kiikareita, ja sen käyttöperiaate on täysin vastaava. Käsivarren avulla saadaan tarkempi liikkeenseuranta, minkä aikaan saaminen datakypärissä on paljon vaikeampaa. Lisäksi käsivarren ansiosta katsojaa voidaan vaihtaa, jolloin seuraava katselija voi nähdä saman asian samasta kohtaa kuin edellinen katselija. Tämä on selkeä etu HMD-tyyppisiin näyttölaitteisiin verrattuna. Tämän lisäksi BOOMissa käytetään isompia näyttöjä, jolloin saavutetaan paremmat resoluutiot.



KUVA 6. Kaksi erilaista BOOMia. Jälkimmäinen jättää käyttäjän kätet vapaiksi (Hamish 2005).

Vaikka BOOMissa on tiettyjä etuja HMD-laitteisiin verrattuna, se ei varsinaisesti ole saavuttanut suosiota. BOOMia valmistanut Fakespace Inc on luopunut sen valmistuksesta ja keskittyy nykyään

lähinnä immersiiivisiin CAVE-systeemeihin ja toisen kaltaisiin HMD-laitteisiin. BOOMin suurimpia ongelmia olivat sen rajoittuneisuus ja käytössä ilmenevä fyysinen rasitus. Vaikka BOOMin avulla eri ihmiset pystyvät näkemään saman kuvan, sitä ei silti pysty käyttämään kuin yksi kerrallaan (Hamish 2005.)

3.2.4 CAVE

Kaikista tämän hetken virtuaalitodellisuuslaitteistoista CAVE eli Cave Automatic Virtual Environment tuottaa kaikkein immersiiivisimmän virtuaalitodellisuus kokemuksen. CAVE (kuva 7) koostuu pääasiallisesti kolmesta tai useammasta seinäkkeestä ja lattiasta, joihin heijastetaan tietokoneella luotu kuva. Kuvasta saadaan stereokuva, kun heijastukseen käytetään stereoprojektoreilta.

Syvyytsvaikutelman aikaansaamiseksi käyttäjillä on päässään suljinlasit, joiden avulla varmistetaan, että kumpikin silmä näkee ainoastaan sille tarkoitetun kuvan.



KUVA 7. CAVE rakentuu kolmesta seinästä, äänilaitteistosta, projektoreista sekä tehokkaista grafiikkatyöasemista (NCSA 2004).

CAVEN historia juontaa juurensa 1990-luvun alkupuolelle. Vuonna 1991 Illinoisin yliopiston elektronisen visualisoinnin laboratoriolle kehitettiin ensimmäinen CAVEN prototyyppi, joka esiteltiin maailmalle vuoden 1992 ACM SIGGRAPH-tapahtumassa.

CAVE on muihin virtuaalitodellisuuslaitteisiin nähden ylivoimainen puhuttaessa uppoutumisen tunteesta virtuaalitodellisuuteen. Läsnaolon tuntu on todella vahva, koska käyttäjä on sisällä virtuaaliympäristössä ja ympäristö reagoi hänen pään liikkeisiin liikkeenseurannan avulla. CAVEN avulla pystytään tuottamaan useita kolmiulotteisuusvihjeitä, mikä lisää entisestään realismin tuntua. Lisäksi käyttäjien ei tarvitse kantaa hankalia lisävarusteita, vaan hänelle riittää yksinkertaiset suljinlasit, jotka on synkronoitu projektorien kanssa (NCSA 2004.)

CAVEN teho perustuu suurelta osin käyttäjän paikantamiseen. Tämän avulla tietokoneet tietävät missä käyttäjä sijaitsee ja mihin hän katsoo. Tiedon koneet saavat kuudella eri vapausasteella, eli x/y/z-koordinaatteina ja kolmena eri kulmana (nousu/laskukulma, kierto ja kallistus). Tätä tietoa hyväksi käyttäen ne esittävät oikean kuvan katsojan näkymään nähden ja muuttavat näkymää katsojan liikkeiden mukaisesti (Hellman 2007.)

Pitkälle kehittynyt liikkeenseuranta ja kuvien tuottaminen useille seinille vaativat kuitenkin suuren määrän laskutehoa sekä tehokkaat näytönohjaimet. Tietokonelaitteisto mukaan lukien CAVE vaatii paljon tilaa, joten sen fyysinen sijoittaminenkin voi olla hankalaa (kuva 8). Käytännössä CAVE tarvitsee tilakseen ison huoneen, joka voidaan pimentää täysin CAVEN ollessa käytössä. Vaatimiensa laitteiden vuoksi CAVE-systeemi on myös todella kallis toteuttaa.



KUVA 8. Seinäjoen ammattikorkeakoulun viiden seinän CAVE. Projektorit ja

laitteistot vaativat huomattavan määrän tilaa (Hellman 2007).

Hinnasta ja tilantarpeesta huolimatta CAVEja on ympäri maailmaa ja niistä on luotu myös kaupallisia sovelluksia. Yleisin käyttökohte CAVE-systeemeille on eri alojen tutkimustyö. Esimerkiksi jotkin yritykset käyttävät CAVEa tehostamaan tuotesuunnittelua. Suunniteltuja komponentteja voidaan testata tehokkaasti virtuaaliympäristöissä ennen varsinaisen tuotannon alkua, jolloin säästetään kustannuksissa.

3.2.5 Simulaattorit

Simulaattorit voidaan lukea myös immersiiiviksi laitteistoiksi, vaikka ne koostuvatkin osin todellisista laitteista. Muita laitteistoja käytetään tutkimukseen ja markkinointiin, mutta simulaattorit ovat pääasiallisesti koulutuskäytössä. Käytetyin ja tunnetuin esimerkki simulaattorista on lentokonesimulaattori, jota käytetään lentäjien koulutuksessa. Lentokonesimulaattorit (kuva 9) ovat myös virtuaalitodellisuuden kehityshistoriassa merkittävässä osassa, sillä armeijan kehitystyö taistelulentäjille suunnatuissa simulaattoreissa on synnyttänyt useita innovaatioita virtuaalitodellisuuden tieteenalalla.



KUVA 9. Armeijan kehitystyö on vaikuttanut suuresti nykypäivän lentokonesimulaattoreihin (ACDSee 2005).

Simulaattorikoulutus on kehittynyt pitkälle, ja nykyään simulaattoreita on tehty myös muuhun kuin pelkästään lentäjäkoulutukseen. Hyvänä

esimerkkinä tästä toimii Suomessa liiketoimintaa harjoittava Simulator Training Centre. Kyseinen yritys on valmistanut bussikuskien koulutusta varten bussisimulaattorin (kuva 10), joka koostuu bussin etuosasta ja muutamasta matkustajapaikasta. Simulaattorissa on 180 asteen katselualue, joka kattaa koko ohjaamon. Näin saadaan luotua mahdollisimman immersiiivinen tilanne (STC Simulator Training 2007.)



KUVA 10. Simbus-simulaattorin virtuaalitodellisuusnäkyssä on otettu huomioon kaikki mitä kuski näkee todellisuudessaakin (STC Simulator Training 2007).

3.3 Sovellukset

3.3.1 Koulutus

Koulutus on yksi tärkeimmistä virtuaalitodellisuuden sovelluksista. Koulutusta voidaan järjestää useilla eri laitteistokokoonpanoilla, kuten datakypärällä, lisätyn todellisuuden sovelluksissa, CAVE:ssa tai simulaattorissa. Virtuaalitodellisuuden vahvuus koulutuksessa piilee sen luomassa turvallisessa harjoitteluympäristössä. Virtuaalisessa maailmassa vältetään oikean maailman vaaroilta, kuten loukkaantumisilta tai muilta onnettomuuksilta. Esimerkiksi erilaisia työtehtäviä voidaan harjoitella ilman paineita epäonnistumisesta johtuvista seuraamuksista. Jos harjoiteltava tehtävä sisältää harvinaisia vaaratilanteita, niitä varten voidaan harjoitella virtuaalisesti, mikä edesauttaa harjoittelijaa selviämään kyseisestä tilanteesta

todellisessa maailmassa (Weiss & Jessel 1998.)

Koulutuksessa tehtävät voidaan jakaa osiin, jolloin tehtävän yksittäistä osaa pystytään harjoittelemaan useaan kertaan. Tämä ei aina ole mahdollista oikeassa harjoitteluympäristössä. Osiin jaetussa koulutuksessa saavutetaan huomattavaa etua, kun tehtävän hankalia osuuksia voidaan harjoitella toistuvasti ilman, että koko harjoitus toistetaan alusta loppuun asti. Näin vaikeat tehtävät saadaan rutiininomaisemmiksi. (Weiss & Jessel 1998.)

Virtuaalitodellisuus on myös erinomainen työkalu erilaisten harjoitusympäristöjen luomiselle. Harjoittelijat voidaan sijoittaa vaikeisiin olosuhteisiin sen mukaan mitä koulutuksella halutaan saavuttaa. Esimerkiksi lentokonesimulaattoreissa on turvallista harjoitella myrskytilanteita varten tai vaikkapa yölentämistä. Taistelulentäjien koulutuksessa harjoitellaan lisäksi erilaisia taistelutilanteita varten, mikä muuten saattaisi olla hyvin kallista ja vaikeaa. Myös maajoukkojen taistelutilanteita (kuva 11) pystytään harjoittelemaan virtuaalitodellisuudessa (Atlantic Cyberspace 2004.)



Kuva 11. Virtuaalisissa taistelutilanteissa sotilaat eivät joudu oikeaan vaaratilanteeseen, vaan heidän reaktioitaan pystytään kehittämään turvallisessa ympäristössä (Atlantic Cyberspace 2004).

Näiden virtuaalisten sovellusten ansiosta kouluttajalla on mahdollisuus vaikuttaa harjoittelijan toimiiin muuttamalla ympäristöä tai pysäyttämällä harjoittelun mahdollisissa virhetilanteiden tai harjoittelijan tarvitsiessa neuvontaa, jolloin harjoittelija saa nopeasti

palautetta ja opastusta. Virtuaalitodellisuussovelluksessa harjoittelijan suorituksesta saadaan täydellinen suoritusraportti, jolloin on myös helppo selvittää, mitkä osa-alueet tarvitsevat lisää harjoitusta tai mistä mahdollinen virhe on aiheutunut (Weiss & Jessel 1998.)

Virtuaalitodellisuutta käytetään koulutukseen myös lääketieteessä. Kun on kyse ihmisten hoitamisesta, virheisiin on harvoin varaa. Lisätyn todellisuuden sovelluksien avulla lääkärit voivat harjoitella vaikeita leikkauksia ilman ihmishengen menetyksen riskiä. Useimmiten harjoittelu tapahtuu oikean keinotekoisien ihmisvartalon avulla, mihin lisätään virtuaalitodellisuustekniikalla esimerkiksi ihmisen sisäelimiä (kuva 12).



Kuva 12. Harjoittelija suorittaa lääketieteellistä harjoitusta lisätyn todellisuuden avustuksella (Hamza-Lup 2001).

Virtuaalitodellisuutta käytetään myös hoitokeinona, sillä esimerkiksi erilaisia fobioita, kuten korkeanpaikankammoa, on pystytty onnistuneesti hoitamaan virtuaalitodellisuussovelluksilla. Näissä sovelluksissa potilas joutuu kohtaamaan pelkonsa virtuaalitodellisuudessa, jossa olosuhteet ovat täysin lääkärin hallitsemia ja näin hoidossa voidaan edetä sitä mukaa kun potilas tuntee olonsa turvalliseksi (Virtual Reality Medical Center 2007.)

Pääasiallisesti virtuaalitodellisuutta käytetään kuitenkin juuri vaarallisten tilanteiden harjoittelemiseksi, koska nämä tilanteet ovat sellaisia, mitä oikeassa elämässä ei pystytä riskien takia harjoittelemaan. Vaikka virtuaalitodellisuus tarjoaa hyvän tavan toteuttaa koulutusta, niin siinä on myös rajoitteita. Täysin realistisia simulaatioita on lähes mahdotonta tehdä, jolloin puutteellinen simulaatio saattaa aiheuttaa sen, että luodaan väärä toimintamalleja. Tämäkin saattaa osaltaan johtaa vaaratilanteeseen todellisessa tilanteessa. Lisäksi käyttäjät tietävät kyseessä olevan jäljitelmä todellisuudesta, jolloin koulutukseen ei välttämättä suhtauduta oikein (Ranta 2003.)

Virtuaalitodellisuus koulutusympäristönä on siis hyödyllinen, mutta se vaatii vielä paljon kehitystä, sillä edellä mainitut rajoitteet ovat olemassa kaikissa virtuaalitodellisuuden koulutussovelluksissa. Näiden sovellusten kokonaisvaltainen hyödyntäminen vaatii suunnattomasti tietotaitoa, ja käytännön toteutukset ovat kalliita.

3.3.2 Arkkitehtuuri

Virtuaalitodellisuutta käytetään hyväksi myös arkkitehtuurissa. Arkkitehtuurin apuvälineenä ovat pitkään olleet visualisointi ja muut kolmiulotteiset mallit rakennuksista, mutta virtuaalitodellisuuden kehittyessä siitäkin on tullut varteenotettava vaihtoehto. Rakennukset on nopea mallintaa kehittyneillä 3D-sovelluksilla, jolloin virtuaalitodellisuuteen saadaan nopeasti materiaalia (kuva 13) tutkittavaksi. Näin ollen virtuaalitodellisuus toimii myös kehitysympäristönä arkkitehdeille.



KUVA 13. Arkkitehdin suunnittelema 3D-malli simulaattoriharjoitukseen (VSTEP 2007).

Virtuaalitodellisuudessa arkkitehdit pääsevät oikean kokoisessa ympäristössä tutkimaan ja tarkastelemaan suunnittelemaansa rakennuksia ennen kuin niiden rakentaminen aloitetaan. Tällä tavalla saavutetaan usein suurta taloudellista hyötyä, sillä virtuaalitodellisuudessa havaitut suunnitteluvirheet on helppo korjata piirustuksiin sen sijaan, että muutettaisiin jo valmiita rakenteita (Weiss & Jessel 1998.)

3.3.3 Markkinointi

Koulutuksen ja tutkimuksen lisäksi virtuaalitodellisuutta voidaan käyttää tehokkaana markkinoinnin työkaluna. Virtuaalitodellisuuden avulla saavutetaan useita tärkeitä etuja markkinoinnissa. Ostaja saa käytännöllisellä tasolla kokemusta tuotteesta, jota ollaan ostamassa. Tuotteiden tarkastelu immersivisessä ympäristössä (CAVE ja projektioseinät) antaa paremman käsityksen tuotteesta, jolloin ostopäätöksen tekeminen helpottuu. Tuotteita voidaan myös esitellä reaaliaikaisesti siten, että mallia muutetaan asiakkaan vaatimusten mukaisesti esityksen aikana. Tällöin asiakas saa konkreettisen käsityksen siitä, miten muutokset vaikuttavat tuotteeseen (Ryan 2001.)

Pelkästään jo Window in World -tyylisessä markkinoinnissa, jossa tuotetta myydään kaksiuulotteisella näytöllä, esimerkiksi Internetin välityksellä, saavutetaan merkittävää etua, koska asiakas voi tarkemmin perehtyä tuotteeseen. Tämän kaltainen tuotemarkkinointi kasvattaa myös asiakaspotentiaalia, sillä kuka hyvänsä pystyy

tutustumaan tuotteeseen Internetpohjaisessa virtuaalitodellisuussovelluksessa. Tämä tietenkin edellyttää sitä, että asiakkaalla on käytössä riittävät teknologiset valmiudet, kuten tehokas kotitietokone ja nopea internet-yhteys (Ryan 2001.)

Kun virtuaalitodellisuutta sovelletaan markkinointiin, on siinäkin huonot puolensa. Virtuaalitodellisuuslaitteistot ovat edelleen suhteellisen kalliita, vaikka halvempia ratkaisuja onkin jo tullut markkinoille. Tämä saattaa olla monelle pienemmälle yritykselle suuri kynnykskysymys. Lisäksi virtuaalitodellisuuden luomiseen menee aikaa ja monesti perinteisemmät markkinoinnin keinot, kuten televisio ja radio, pystyvät vastaamaan nopeammin markkinointitarpeisiin. Virtuaalitodellisuudella ei myöskään saavuteta suurta hyötyä sellaisten tuotteiden markkinoinnissa, joissa ei juurikaan ole interaktiota. Poikkeuksena tähän on luonnollisesti arkkitehtuuri, jossa staattisissa malleissa voidaan käyskennellä ympäriinsä tutkimassa suunniteltua rakennusta (Ryan 2001.)

Virtuaalitodellisuutta käytetään myös perinteisemmän mainonnan yhteydessä. Tällöin on kyse enemmänkin lisätyn todellisuuden sovelluksesta, jolloin digitaaliseen lähetykseen lisätään tietokoneella luotuja kuvia tai animaatioita, joita ei oikeasti olisi olemassa. Esimerkkinä tästä edellinen Grammy-palkintojen jakogaala, jossa sisääntuloon oli lisätty tv-katsojia varten digitaalista mainontaa, jota paikalla olevat ihmiset eivät voineet nähdä. Tällä tekniikalla pystytään luomaan mainontaa, joka on paikallista ja suunnattu juuri tietyille kohderyhmille.

Virtuaalitodellisuuden markkinointimateriaalin tuotannossa on tärkeää muistaa myös kohdeyleisön, eli ihmisten, rooli. Jotta sovelluksesta saataisiin suurin mahdollinen hyöty irti, tulee virtuaalitodellisuuden mallien olla realistisia siihen pisteeseen asti, jolloin ihmisen mielikuvitus pystyy luomaan loput tietokoneiden luomasta illuusiosta. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että markkinointimateriaalia tehdessä mallintajien tulee ottaa huomioon yksityiskohdat, jolloin kokemuksen vaikutus on vahvempi. Huonosti tehdyt virtuaalitodellisuusmallit saattavat aiheuttaa jopa negatiivisia miellejhtymiä myytävästä tuotteesta (Ryan 2001.)

Tällä hetkellä virtuaalitodellisuus markkinointivälineenä on vielä

hieman liian keskeneräinen, jotta se olisi vakavasti otettava myyntimedia. Tulevaisuudessa virtuaalinen markkinointi tulee varmasti yleistymään, sillä virtuaalitodellisuuden potentiaali on kuitenkin suuri. Systemien kehittyessä virtuaalitodellisuussovelluksista saadaan entistä paremman näköisiä, niissä on enemmän vaihtuvuutta ja realistinen äänimaailma. Tällöin tuotteista pystytään luomaan entistä haluttavampia ja hyöty virtuaalisesta markkinoinnista tulee kasvamaan entisestään (Ryan 2001.)

4 3D-MALLINNUS

4.1 3D-Mallinnus ja mallinnusohjelmat

4.1.1 3D-mallit ja virtuaalitodellisuus

Kuten jo työn alussa mainittiin, niin nykyään kolmiulotteinen esitystapa on saanut yhä enemmän jalansijaa tämänpäivän mediassa. 3D-animaatioita näkee yhä enemmän eri aloilla. Varsinkin elokuvissa ja mainonnassa kolmiulotteinen esittäminen on lisääntynyt suuresti. 3D-mallinnus antaa mahdollisuuden toteuttaa, mitä tahansa ihmiset pystyvätkin kuvittelemaan.

3D-mallien luominen on monimutkainen prosessi, joka vaatii tekijältään paljon tietotaitoa. Yleensä mallintajat keskittyvät yhteen tai kahteen 3D-mallinnusohjelmaan, sillä monimutkaisten ohjelmien oppiminen vaatii paljon aikaa. Edistyneemmät mallintajat hallitsevat useita erilaisia 3D-mallinnuksen osa-alueita, kuten itse mallinnuksen, teksturoinnin ja realistisen valaistuksen luomisen. Usein pelkkä mallinnusohjelmien tuntemus ei riitä, vaan tekijällä pitää olla myös visuaalista silmää ja ymmärrystä useista eri aloista, jotta saataisiin aikaiseksi mahdollisimman realistisen näköisiä 3D-ympäristöjä.

Virtuaalitodellisuus vaatii usein hyvin realistisia 3D-malleja. Tietokonetehot asettavat kuitenkin rajoitteita malleille, jolloin edistyneemmät mallintajat erottuvat aloittelijoista. Monimutkaisista malleista saadaan pienempiä, kun mallintajat osaavat optimoida oikein itse mallien geometrian ja tekstuurien välisen suhteen. Osittain tekstuurien avulla toteutetut mallit ovat kevyempiä sovelluksia kannalta, jolloin tietokoneet pystyvät tuottamaan useampia kuvia näytöille. Tällä on suuri merkitys virtuaalitodellisuussovellusten realismia ajatellen, sillä viiveet siirtymissä näkyvät helposti herkillä ihmissilmällä.

Jotta virtuaalitodellisuuden rakennuspalikoiden, eli 3d-mallien, rakenteen ymmärtäisi paremmin, on hyvä käydä läpi 3d-mallinnuksen perusteita ja sitä kuinka 3d-objektit rakentuvat. Mallit rakennetaan erilaisissa ohjelmistoissa, mutta on olemassa kuitenkin erinäisiä

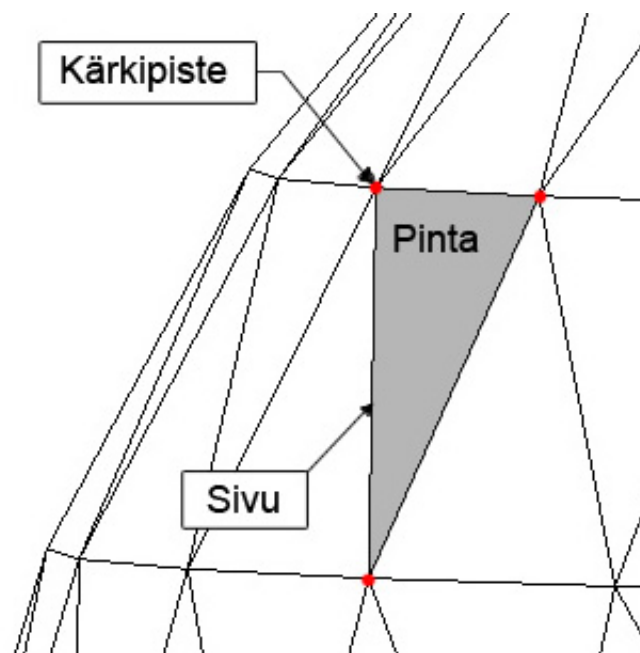
asioita, jotka periaatteiltaan toimivat samalla tavalla lähes kaikissa ohjelmissa. Seuraavassa luvussa esitellään 3D-mallien rakennetta.

4.1.2 3D-Mallien rakenne

Kolmiulotteinen malli – kuten muutkin tietokoneella esitettävät asiat – on pelkkää ykköstä ja nollaa, ja muotona ajatellen primitiivejä ja polygoneja. Digitaalisella mallilla tai kuvalla ei välttämättä ole tosielämässä olevaa esikuvaa. Tällöin malli voi olla mitä tahansa ja sijoittua mihin aikaan tahansa.

Näin ajateltuna mallien rakenteellisilla ominaisuuksilla ei sinänsä ole rajoituksia. Mallit voivat olla puhdasta jäljennöstä todellisuudesta tai sitten kokonaisuudessaan mielikuvituksen tuotetta. Oli asia kummin tahansa, mallien ruohonjuuritason puoli on sama kummassakin vaihtoehdossa. 3D-mallit voidaan rakentaa useilla eri tavoilla, eikä parasta tapaa suoranaisesti ole. Lähinnä kyse on mallintajan mieltymyksistä ja siitä, mitä tapaa on tottunut käyttämään. 3D-termien määrä on melkoinen ja joten on hyvä käydä läpi peruskäsitteitä ja termejä 3D-mallinnuksesta.

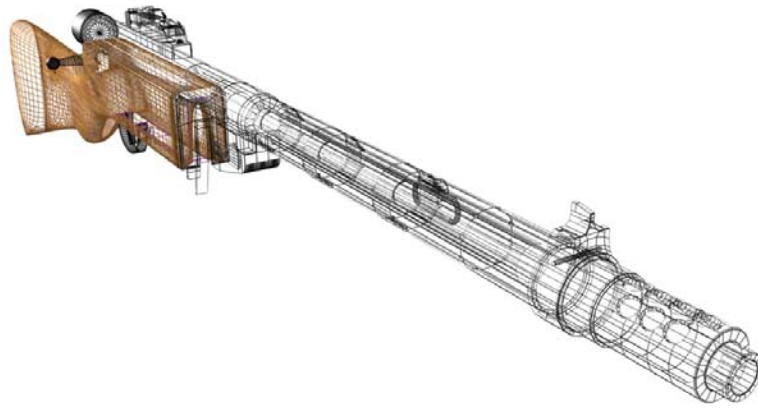
3D-mallit rakentuvat yleisesti mesh-verkosta (kuva 14), joka taas koostuu pinnoista (face), niiden kärkipisteistä (vertex) ja pintojen sivuista (edge). Pinta on käytännössä kolmio, jonka kärjissä kärkipisteet sijaitsevat. Itse mesh-verkko muodostuu näistä pinnoista, jotka jakavat naapuripintansa kanssa vähintään yhden kärkipisteen. Muodostunutta mesh-verkkoa voidaan muokata siirtelemällä kärkipisteitä yksittäin, ryhmänä tai jonkin 3D-sovelluksessa olevan muokkaustoiminnon kautta. Mitä tiheämpi tämä mesh-verkko on, sitä yksityiskohtaisemmaksi malli voidaan muotoilla (Lehtovirta & Nuutinen 2000, 21.)



KUVA 14. Mesh-verkko rakentuu pinnoista, sivuista ja kärkipisteistä (Lehtovirta & Nuutinen 2000, 21).

Mesh-verkon muokkaus ei ole kuitenkaan ainoa keino rakentaa 3D-malleja. NURBS-mallinnuksessa (Non-Uniform Rational B-Splines) objektit tehdään spline-käyrillä, joiden välille ohjelma muodostaa pinnat. Spline-käyrän muodot määritellään sen kärkipisteiden mukaan. Kärkipisteiden ominaisuudet voivat vaihdella sen mukaan, minkälainen pinta halutaan tehdä. Pisteet voivat olla joko teräviä kulmia, pisteiden kautta kulkevia kaaria tai muokattavissa olevia kaaria, joita säädellään Bézier-kahvoilla (Lehtovirta & Nuutinen 2000, 21.)

Mallintajan tulee ymmärtää, kuinka tarkkaan lopputulokseen ollaan pyrkimässä, koska malli on aina raskaampi, mitä enemmän siinä on pintoja. Pintojen tarve määrittyy pitkälti käyttökohteen mukaan. Esimerkiksi yleisessä talomallissa voidaan käyttää perusprimitiivejä, jotka ovat kevyitä. Jos luodaan mallia yksityiskohtaiseen tarkasteluun (kuva 15), kuten vaikkapa auton moottoria, niin tällöin on perusteltua käyttää paljon pintoja mallin rakentamiseen. Näin saavutetaan riittävän aidon näköinen lopputulos.



KUVA 15. Monimutkaisista mesh-verkoista rakennettu Suomi-konepistoolin 3D-malli, joka kestää lähemmäkin tarkastelun (Kämppi 2007).

4.1.3 3D-mallien rakentaminen ja muokkaus

Mallien rakenteellisella valinnalla ei sinänsä ole merkitystä lopputuloksen kannalta, mutta jatkokäsittelyssä tällä on isokin merkitys. Mallien muokattavuus saattaa kärsiä mallintajan valintojen seurauksena, mutta usein kokemuksen kautta oppii, millä työkaluilla pääsee haluttuun lopputulokseen. 3D-mallien perustana voidaan pitää sovelluksista löytyviä perusmuotoja eli niin sanottuja primitiivejä (primitives). Näitä perusmuotoja ovat mm. laatikot, pallot, sylinterit, kartiot ja pyramidit (kuva 16).



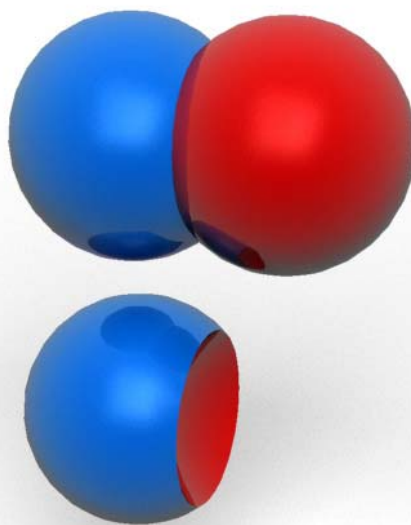
KUVA 16. Perusprimitiivejä, jotka löytyvät monista 3D-sovelluksista (Kämppi 2007).

Sovelluksesta riippuen primitiivejä saattaa olla vielä useampiakin, kuten torus-solmu ja reunoista viistetyt laatikot ja sylinterit. Primitiivit on tarkoitettu pohjiksi mallia luotaessa. Perusprimitiivit ovat sellaisia muotoja joita tarvitaan sellaisenaan tai apumuotona uutta muotoa luodessa (Lehtovirta & Nuutinen 2000, 21.)

Koska 3D-mallit ovat usein monimutkaisempia kuin mitä pelkillä perusmuodoilla pystytään luomaan, tarvitaan keinoja näiden muotojen muokkaamiseen. 3D-sovellukset tarjoavat useita eri vaihtoehtoja perusmuotojen muotoiluun. Orgaanisia muotoja tehdessä on usein lähdettävä tyhjästä pohjasta ja muokattava malli käyttäen sovelluksen siihen antamia mahdollisuuksia. Tapoja primitiivien muotoilemiseen on useita, joista seuraavaksi esitellään yleisimmät.

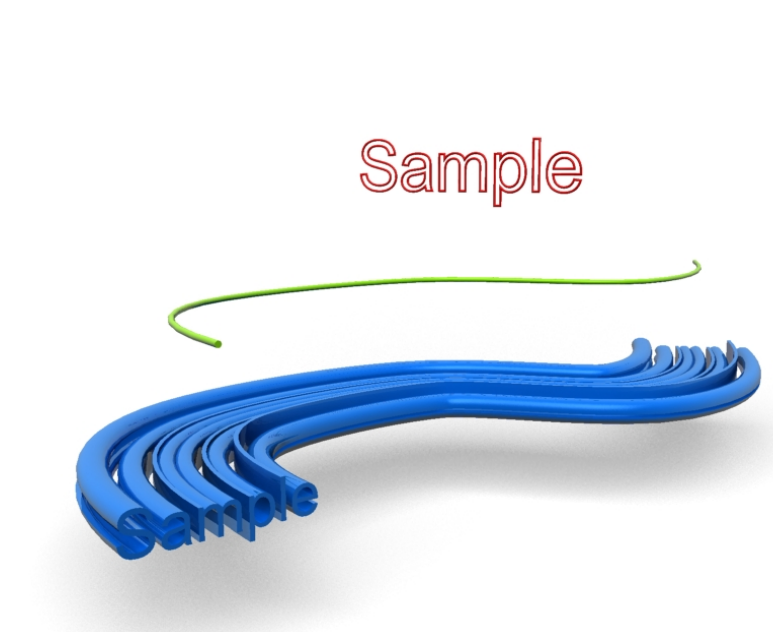
Kuten perusmuotoja, on myös olemassa perustyökaluja näiden muotojen muokkaamiseen. Näitä ovat mm. boolean-operaatiot, loftaus (lofting), pursotus (extrude) ja sorvaaminen (lathe). Muokkaamiseen kärkipiste tasolla on taas olemassa muutamia hieman toisistaan poikkeavia tapoja, kuten edit mesh- ja edit poly-toiminnot.

Boolean-operaatiossa kahdesta mesh-objektista vähennetään toistensa tilavuutta tai sitten liitetään ne toisiinsa. Objekteista voidaan jättää myös jäljelle niiden jakama tila. Näin pystytään luomaan esimerkiksi halutun muotoisia reikiä toisiin objekteihin (kuva 17).



KUVA 17. Yksinkertaisessa boolean-operaatiossa punainen pallo on määritelty sinistä palloa leikkaavaksi objektiksi, jolloin sen tilavuus on vähennetty sinisestä pallosta (Kämppe 2007).

Loftauksessa (kuva 18) muotoa kuljetetaan polkua pitkin, jolloin luodaan suljettu muoto. Polkuna voi toimia mikä tahansa kaksi- tai kolmiulotteinen spline-käyrä. Syntyneitä muotoja voidaan muuttaa luomalla polun varrelle profiilikäyriä, jotka vaikuttavat polulla kuljetettavaan muotoon. Yksinkertaisimmillaan loft-työkalua käytettäessä luodaan polku ja siinä kuljetettava muoto, tämän jälkeen sovellus luo muodon polun kumpaakin päähän ja luo näiden pisteiden välille geometrian muodon mukaisesti (Autodesk 2005 A.)



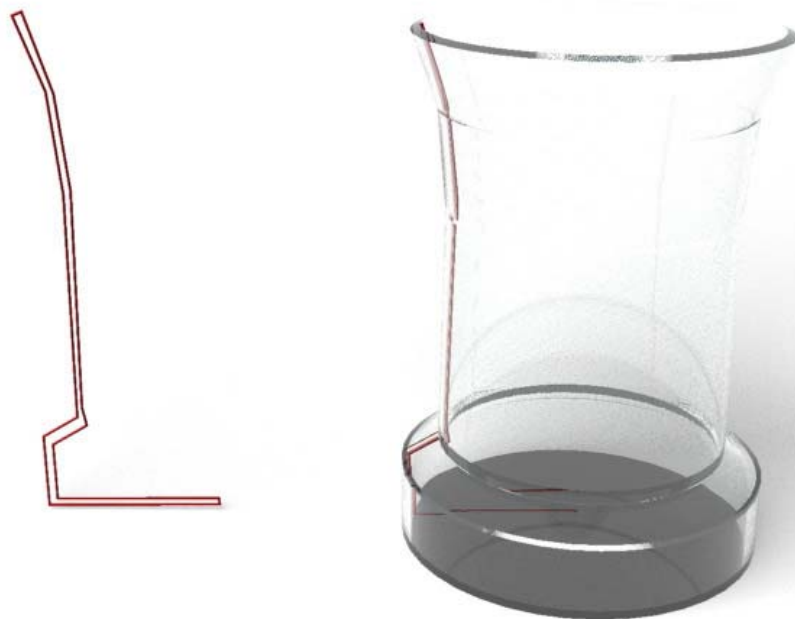
KUVA 18. Loft-objekti koostuu kuljetettavasta muodosta (punainen) ja polusta (vihreä). Sininen objekti on loftauksen lopputulos (Kämppe 2007).

Pursotus (extrude) on hyödyllinen työkalu, jonka avulla kaksiulotteiselle muodolle luodaan syvyys. Tämän jälkeen malli voidaan muuttaa joko mesh- tai poly-objektiksi, jolloin sitä pystytään muokkaamaan monella eri tavalla (kuva 19).



KUVA 19. Pursotuksella pystytään luomaan kolmiulotteisia malleja kaksiulotteisista muodoista. Tässä tekstiin on lisätty syvyyttä pursottamalla kolme sanaa eri voimilla (Kämppi 2007).

Sorvaaminen (lathe) muistuttaa peruseriaatteeltaan hieman loffausta, mutta siinä ei varsinaisesti kuljeteta muotoa minkään polun mukaisesti, vaan kaksiulotteista muotoa pyöräytetään valitun akselin mukaisesti, jolloin muodostuu yhtenäinen kolmiulotteinen objekti (kuva 20).



KUVA 20. Vasemmalla olevasta 2D-muodosta on tehty kolmiulotteinen sorvaamalla (Kämppi 2007).

3D-sovellusten kehittyessä edellä esiteltyjen kaltaisia muokkaustoimintoja tulee jatkuvasti lisää, jotta mallien muokkaaminen olisi mahdollisimman helppoa. Kuten on jo mainittu, niin näiden perustason muokkaustoimintojen lisäksi 3D-sovelluksissa pystytään muokkaamaan objekteja kärkipisteiden, sivujen ja pintojen kautta. Tällöin kyseessä ovat editable mesh ja editable poly, jotka poikkeavat hieman toisistaan. 3D-objekti voidaan muuttaa jompaankumpaan edellä mainituista muodoista, jolloin niiden muokattavuus lisääntyy huomattavasti.

Tässä opinnäytetyössä 3D-sovelluksena käytetään Autodeskin 3ds Max 8-sovellusta. Kyseiseen sovellukseen editable mesh-ominaisuus tuli kokeiluna versio 3D Studio MAX R1:sen myötä ja on kehittynyt huomasti sitten ensiesiintymisensä. Versioiden kehityksen myötä editable meshistä tuli vakituinen osa ohjelmistoa.

Editable meshiksi muutettu objekti saa viisi ala-tasoa, joiden avulla objektia voidaan muokata: kärkipisteet, pinnat, reunat, pintaryhmät (polygon) ja elementit (element). Editable mesh käyttää kolmioita geometrian muokkauksessa, aikaisemmin esitetyn kolmiulotteisen mallin rakenteen mukaisesti. Meshin tuomat ominaisuudet mallien muokkaamiseen olivat toivottu lisä, mutta todellisen parannuksen mallien käsittelyyn toi vasta 3ds Max 4, jolloin editable poly-ominaisuus esiteltiin. Mesheissä käsitellään kolmioita, kun taas editable poly ei rajoitu kolmioihin, vaan pinnat voivat rakentua useampien kärkipisteiden välille, jolloin saavutetaan parempi muokattavuus. Lisäksi editable polyssä on mahdollista käyttää kehittyneempiä pintojen ja reunojen valinta työkaluja, kuin editable meshissä. Editable polyä käytetään yleensä ”kevyempään” mallinnukseen, joka käytännössä tarkoittaa mallinnusta peli- ja virtuaalitodellisuuskäyttöön. Tässä yhteydessä käytetään usein termiä polygon-mallinnus.

4.1.4 Virtuaalitodellisuuden rajoitteet malleille

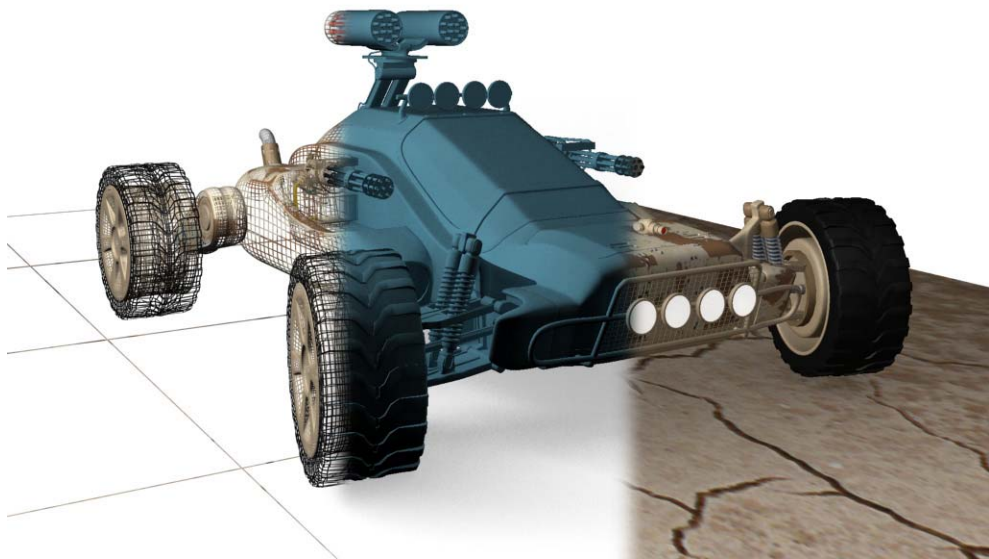
Virtuaalitodellisuus asettaa rajoitteita malleille lähinnä konetehtojen vuoksi. 3D-mallien liikuttaminen ja piirtäminen näyttölaitteille vaatii paljon laskutehoa tietokoneilta sekä näytönohjaimilta. Mallinnettaessa objekteja virtuaalitodellisuuteen, onkin syytä pitää ohjenuorana sitä,

että mallien tarkkuus määräytyy käytön mukaan. Tämä on muutenkin yleinen periaate 3D-mallinnuksessa. On turha tehdä pieniä yksityiskohtia, jos ne häviävät kuitenkin kokonaisuuteen. Yksityiskohdat lisäävät toki realismia, mutta realismi syntyy monista muistakin tekijöistä, kuin pelkästään mallien geometriasta.

Geometrian monimutkaisuus – polygonien määrä – on suurin yksittäinen tekijä, joka rajoittaa mallien tekemistä.

Virtuaalisovelluksesta riippuen myös objektien määrä saattaa aiheuttaa tietokoneelle ylivoimaisia laskennallisia esteitä. Tällöin on kuitenkin kyse lähinnä sovelluskohtaisesta ongelmasta, ei niinkään yleistettävästä rajoitteesta, joka pitäisi ottaa huomioon aina virtuaalitodellisuusmalleja luodessa.

Jotta välttyttäisiin raskaan geometrian mukanaan tuomilta ongelmilta, on hyvä muistaa muutkin realismiin vaikuttavat tekijät. Valaistus, teksturointi ja materiaalit (kuva 21) ovat mallien lisäksi tärkeitä tekijöitä mallien rakentamisessa ja niiden todenmukaisuudessa. Hyvällä valaistuksella pystytään piilottamaan paljon geometrian puutteita. Teksturointi taas pystyy korvaamaan kokonaisia malleja, josta hyvänä esimerkkinä toimivat ikkunan sälekaihtimet. Sälekaihtimien tekeminen vaatii suuren määrän polygoneja, kun taas yksi bittikartta läpinäkyvyyskartalla varustettuna vaatii ainoastaan kaksi pintaa. Vaikka lopputulos ei ole läheltä katseltuna läheskään yhtä realistisen näköinen kuin itse kokonaan mallinnettu geometria, niin tällä tavalla meneteltäessä saavutetaan huomattava etu laskentatehon tarpeessa.



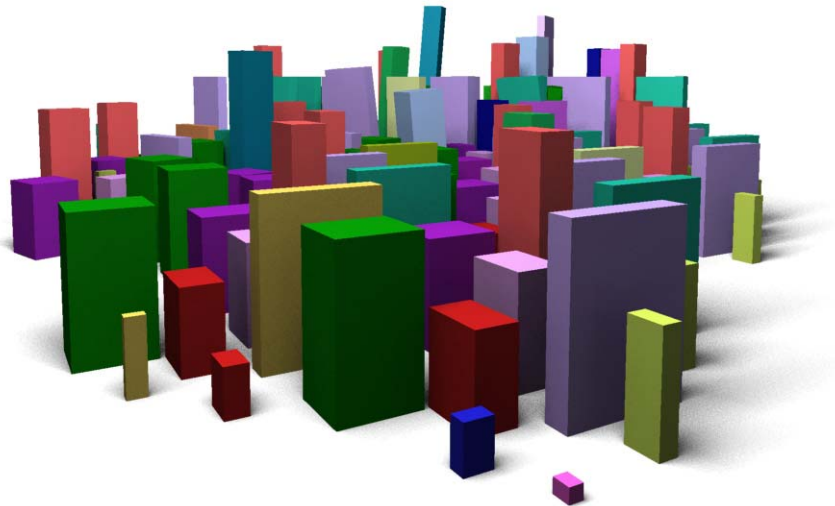
KUVA 21. Mallinnuksen eri asteet: geometria, valaistus, teksturointi sekä materiaalit
Kuva luetaan vasemmalta oikealle (Kämppe 2007).

Kuten yllä oleva kuva osoittaa, niin teksturoinnilla ja valaistuksella saavutetaan paljon. Virtuaalitodellisuussovellukset ovat kuitenkin usein rajoittuneita myös valaistuksen ja teksturoinnin osalta, mutta nämäkin ominaisuudet kehittyvät jatkuvasti.

4.2 MATERIAALIT JA TEKSTUROINTI

4.2.1 Materiaalien ja tekstuurien hyödyt

Kuten jo edellä on mainittu, 3D-mallien materiaalit ovat olennainen osa realismia visualisoinnissa ja virtuaalitodellisuudessa. Mesh-verkosta koostuva malli on toki renderöitävissä 3D-sovelluksessa, mutta se näyttää täysin epärealistiselta. Perusasetuksilla 3D-sovelluksessa malli on valaistu yleisvalolla, joka valaisee mallin pintoja samalla voimakkuudella joka puolelta. Mallin materiaalit ovat usein kytköksissä mesh-verkkojen perusväriin, jotka vaihtelevat hyvin paljon (kuva 22).



KUVA 22. Mallien hallinnointi voi muodostua ylivoimaiseksi, jos objekteja ei ryhmitellä (Kämppe 2007).

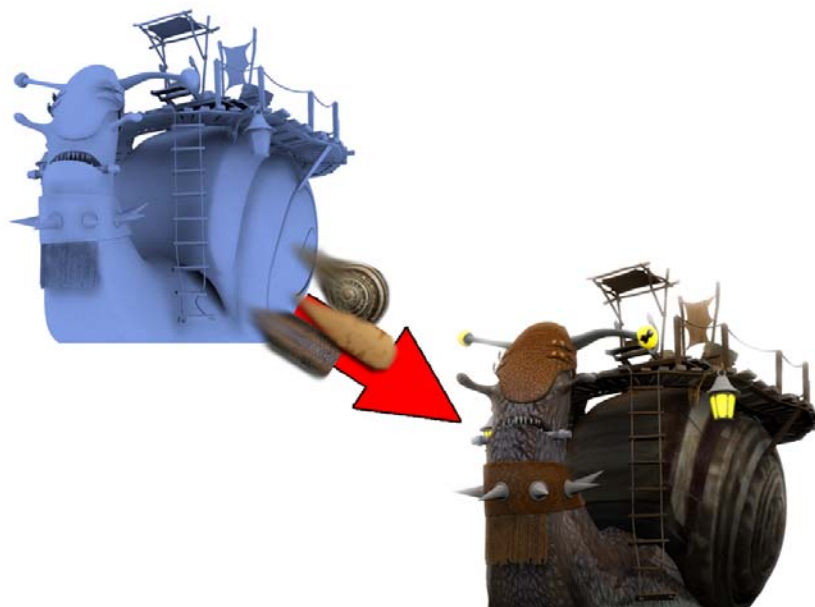
Usein monimutkaisissa malleissa on järkevää jakaa malli pienempiin osiin tekemällä useita eri objekteja, jotka sitten liitetään yhdeksi malliksi tai ryhmäksi. Mallista tulee melko kirjava, sillä ohjelma valitsee jokaiselle objektille oman värinsä. Värien kaaosta helpottaa, jos kokonaisuuden muodostaville malleille asetetaan sama väri. Yhtenevä väri auttaa hahmottamaan paremmin kokonaisuuksien sijoittelua 3D-ympäristössä, ennen kuin niihin lisätään materiaalit tai ne teksturoidaan (kuva 23).



KUVA 23. Värien yhtenäistäminen ja objektien ryhmittely auttavat hallitsemaan suuria määriä 3D-objekteja ja hahmottamaan kokonais kuvaa (Kämppe 2007).

Hyvin toteutettu geometria on täydellinen pohja näyttävän 3D-mallin luomiselle. Materiaalien ja tekstuurien avulla malliin saadaan viimeistely tuntu, oli kyseessä sitten luonnollinen tai keinotekoinen aine. Asiat saadaan näyttämään itseltään, kun materiaalit toteutetaan huolellisesti. Tämän vuoksi tekijällä on hyvä olla käytössään todellisia

referenssimateriaaleja, kuten metallin palasia. Yleisesti ottaen 3D-sovellukset antavat hyvät valmiudet tuottaa materiaalien avulla metallia, lasia, muovia, nahkaa ja ylipäätään mitä tahansa kuviteltavissa olevia aineita. Materiaalit ”herättävät” mallin eroon määrittelemällä sen mistä malli on tehty. Itse 3D-malli on vain muoto, joka määrittelee kappaleen fyysisen olemuksen (kuva 24).



KUVA 24. Teksturointi ja materiaalien lisääminen herättää hahmon henkiin määrittelemällä mallien koostumuksen ja pintojen ulkonäön (Kämpö 2007).

Materiaalit näyttävät siis tärkeää osaa mallinnuksessa, oli sen tarkoitus mikä hyvänsä. Seuraavissa osioissa esitellään materiaalien ja tekstuurien luomisprosessi, sekä selvitetään miten ne eroavat toisistaan.

4.2.2 Materiaalit

Materiaalit luodaan 3D-sovelluksissa materiaalieditoreissa, joissa niiden ominaisuudet määritellään yksityiskohtaisesti. Materiaalieditorit ovat täynnä vaihtoehtoja materiaalien luomiseksi ja 3D-sovelluksessa mahdollisesti olevat renderöinti plug-init – eli lisäosat kuvien tuottamisprosessiin – tuovat mukanaan lisävaihtoehtoja materiaalien luomiseen. Renderöinti plug-init eivät kuitenkaan ole välttämättömiä aitojen materiaalien luomiselle, sillä ohjelmien omatkin materiaalit riittävät hyvin pitkälle. Vakiomateriaalien säädettävät ominaisuudet riippuvat pitkälti käytettävästä 3D-ohjelmasta, mutta useista ohjelmista löytyvät ainakin seuraavat perusominaisuudet (Autodesk 2005 B):

- materiaalin pääväri
- materiaalin väri ilman suoraa valoa
- materiaalin väri kohdassa, johon valo osuu eniten
- läpinäkyvyys
- itsevalaisevuus
- kiiltävyys
- kiiltävyyden terävyys/pehmeys
- pintakartat, joilla parannetaan materiaalien ulkonäköä ja realismia

Vakiomateriaalien kanssa on tarjolla myös erilaisia shader vaihtoehtoja. Shader-ominaisuus tarjoaa materiaalin ulkonäköön liittyviä lisäoptioita, jotka pitkälti liittyvät siihen miten materiaali käyttäytyy valon heijastumisen suhteen. Shaderien valinnalla on suurikin merkitys kun pyritään fotorealismiin, sillä esimerkiksi mattapintainen objekti käyttäytyy valon suhteen eri tavalla kuin lasi (kuva 25).



KUVA 25. Säättämällä vakiomateriaalin asetuksia ja vaihtamalla shaderia saadaan aikaiseksi realistisen näköisiä materiaaleja, kuten muovia, metallia ja lasia (Kämpfi 2007).

Materiaalieditorit tarjoavat myös paljon muita vaihtoehtoja, mutta näillä perusominaisuuksilla pystytään luomaan jo huomattavan paljon erilaisia materiaaleja. Edellä listattuihin ominaisuuksiin voidaan liittää myös bittikarttoja, jolloin useiden materiaalien tekeminen helpottuu huomattavasti. Esimerkiksi puun syitä tai pintaa olisi hyvin vaikeaa yrittää luoda pelkästään materiaalien avulla. Tällöin bittikartta – eli

kaksiulotteinen kuva – auttaa todella paljon realistisen materiaalin luomisessa.

Materiaalityyppejä on useita erilaisia, joista jokaisella on hieman toisistaan poikkeavia ominaisuuksia. Mutta kuten edellä esitettiin, niin pelkästään jo vakiomateriaalilla on huomattava määrä muuttujia, joiden avulla materiaalia voidaan muokata. Esimerkkejä muista materiaalityypeistä ovat (Autodesk 2005 C):

- raytrace, jonka avulla luodaan realistisia heijastuksia ja valon taittumista.
- arkkitehtuurimateriaalit, jotka ovat fysikaalisesti tarkkoja materiaaleja mm. valon sirontaa pinnoista laskettaessa.
- matte/shadow, jonka tekee materiaalista läpinäkyvän mutta se voi silti vastaanottaa varjoja.
- shell, jota hyödynnetään myöhemmin esiteltävässä texture baking ominaisuudessa.
- ink'n'paint, jonka avulla luodaan sarjakuvamaisia materiaaleja.

Näiden lisäksi on olemassa yhdistelmäateriaaleja (compound materials), joiden avulla perusmateriaaleja voidaan yhdistellä toisiinsa eri tavoin. Näitä materiaaleja ovat muun muassa (Autodesk 2005 D):

- blend, jonka avulla kaksi materiaalia sekoitetaan toisiinsa geometrian pinnan samalla puolella.
- composite sekoittaa maksimissaan 10 materiaalia toisiinsa käyttäen hyväksi erilaisia tekniikoita.
- double-sided, joka mahdollistaa eri materiaalien asettamisen pinnan kummallekin puolelle.
- morpher, jonka avulla materiaalia voidaan muuttaa animaatioissa.
- multi/sub-object antaa mahdollisuuden asettaa useita materiaaleja samaan objektiin käyttäen materiaali tunnisteita.
- shellac asettaa materiaalin toisen päälle ja yhdistää niiden väriominaisuudet määritellyn voimakkuuden mukaan.
- top/bottom materiaalin avulla samaan pintaan voidaan asettaa eri materiaali ylä- ja alapäähän.

Käyttämällä näitä materiaalien tuottamiseen tarkoitettuja työkaluja voidaan luoda todella monipuolisia materiaaleja. Valitettavasti

virtuaalitodellisuussovellukset eivät aina tue kaikkia ohjelmien materiaaliratkaisuja, jolloin mallintajan ratkaistavaksi jää, miten puutteelliset materiaalit saadaan toteutettua. Vaikka perusmateriaalit eivät toimisikaan virtuaalitodellisuussovelluksessa, niin puutteita voidaan korjata tekstuureilla, joita esitellään tämän opinnäytetyön seuraavassa osuudessa tarkemmin.

Materiaaleja tehdessä tulee miettiä tarkoin niiden vastinetta oikeassa maailmassa. Materiaali lisää realismia 3D-ympäristöön ainoastaan, jos sen ominaisuudet on säädetty muistuttamaan sen esikuvaa oikeassa maailmassa. Luonnossa esiintyvillä materiaaleilla on harvoin kovin kiiltävää pintaa, vaan ne ovat useimmiten mattapintaisia (kuva 26). Luonnossakin esiintyy kiiltäviä materiaaleja, kuten vesi, jolloin asetuksia pitää muuttaa sen mukaisesti. Luonnonmateriaaleja tehdessä on olemassa muutamia ohjenuoria, joita on hyvä noudattaa ainakin pääpiirteittäin (Autodesk 2005 E.)



KUVA 26. Tekstuurien avulla toteutettu lehti näyttää realistiselta, koska materiaalin ominaisuudet on säädetty luonnosta löydetyin mallin mukaan (Kämppi 2007).

Materiaalin väri ilman suoraa valoa riippuu pitkälti siitä, sijaitseeko objekti ulkona vai sisällä. Normaaleissa valo-olosuhteissa ulkona kappaleen tummin väri on samaa sävyä kuin pääväri, mutta tummempi. Kirkkaimmassa kohdassa voidaan taasen käyttää lähes puhdasta valkoista. Päävärin valinnan tulisi kohdistua johonkin luonnolliseen väriin, joka on löydettävissä luonnosta. Aito esimerkki luonnosta auttaa värin luomisessa, koska tällöin nähdään, kuinka valo

käyttäytyy materiaalin pinnalla. Luonnossa on myös kiiltäviä pintoja, kuten joidenkin kasvien lehdet, lintujen sulat, kalojen suomut ja erinäiset hedelmät. Tällöin materiaalin kiiltävyyttä on lisättävä (Autodesk 2005 E.)

Myös ihmisten luomille materiaaleille on olemassa muutamia yleispäteviä nyrkkisääntöjä. Valmistetut materiaalit ovat väreiltään usein hyvin synteettisiä, jolloin väriksi ei välttämättä kannata valita luonnon sävyjä. Usein nämä materiaalit ovat hyvin kiiltäviä, ja täten ne poikkeavat paljon luonnossa esiintyvistä materiaaleista. Hyvinä esimerkkeinä näistä toimivat mm. muovit ja kiillotetut metallit sekä erilaiset lasipinnat (kuva 27). Ihmisten luomat materiaalit ovat usein hieman kylmempää yleissävyltään kuin luonnon paletista löytyvät sävyt.



KUVA 27. Lasipinnat ja metallit ovat erittäin kiiltäviä ja heijastavia, joten yleisvaikutelma niistä on kylmä ja eloton (Kämppe 2007).

Ilman suoraa valoa oleva väri on valmistetuissakin materiaaleissa riippuvainen ympäristön valaistusolosuhteista. Tähän pätevät samat säännöt kuin luonnostakin löytyvien materiaalien kohdalla. Kappaleen pääväri voi tietenkin olla mikä tahansa, mutta luonnolliset sävyt ovat oikeiden objektien kohdalla hieman harvinaisempia. Yleisesti ottaen värit ovat hieman kovempia, mutta tässäkin tapauksessa voidaan käyttää värin luomisessa mallina oikeaa esinettä. Kirkkaimmat värit

ovat usein valkoisia, varsinkin jos kyse on muovista (Autodesk 2005 E.)

Metallisia materiaaleja tehtäessä on muutamia erityissääntöjä, jotka on hyvä ottaa huomioon. Varsinkin kiillotetusta metallista tehdyt objektit ovat hyvin kiiltäviä ja kirkkaita. Metalleja varten onkin hyvä käyttää niiden luomiseen tehtyä Metal-shaderiä, sillä se luo itse kirkkaimman kohdan värin laskemalla sen kappaleen pääväristä sekä valonlähteen väristä (Autodesk 2005 F.)

Materiaalien ominaisuudet eivät rajoitu pelkästään näihin edellä esitettyihin ominaisuuksiin, vaan niitä pystytään muokkaamaan lähes loputtomasti. Mikä tahansa kuviteltavissa oleva materiaali on tehtävissä joko perusmateriaaleilla tai sitten yhdistelmä-materiaaleilla. Materiaalien lisäksi tarvitaan kuitenkin kaksiulotteisia pintakarttoja eli tekstureja, joiden avulla pystytään toteuttamaan lähes mikä tahansa pintaan liitettävä kuvio. Jos kyseessä ei ole homogeeninen materiaali kuten muovi, niin tarvitaan tekstureja, jotta pinta näyttäisi esikuvaltaan. Tekstuurien käyttöön perehdytään tarkemmin seuraavassa luvussa.

4.2.3 Tekstuurit

Kun tavoitellaan aidon näköistä pintaa, niin sen saa aikaan helpoiten käyttämällä alkuperäisen, eli aidon pinnan bittikarttakuvaa, eli tekstuuria. Tekstuurina voi käyttää monia eri kuvaformaatteja, joista yleisimpiä ovat JPEG (Joint Photographic Experts Group), bmp (Bit Map Picture), TIFF (Tagged Image File Format), PNG (Portable Network Graphics) ja GIF (Graphics Interchange/Image Format). Reaaliaikaisissa sovelluksissa käytetään myös DDS (DirectX DirectDraw Surface)-formaattia.

Yleisin näistä kuvaformaateista on JPEG, jota käytetään mm. useimmissa digikameroissa pääasiallisena tallennusformaattina. JPEG ei alussa ollut varsinaisesti kuvaformaatti, vaan pakkausmenetelmä kuvien pakkaamiseen pienempään kokoon. Kehityksen myötä JPEGistä on kehittynyt häviöllistä pakkausta käyttävä kuvaformaatti, johon tallennettaessa kuvasta häviää aina informaatiota. JPEG kuvan pakkauksen määrää voidaan kuitenkin säädellä, jolloin kuvainformaation häviäminen on hallittavissa. Jos

kuva tallennetaan JPEG muotoon parhaalla tasolla, niin informaation hävikki on hyvin pientä, mutta pakkaus on silti hyvin tehokasta. Kuvan koko voidaan pakata JPEGin avulla suhteessa 1/100, jolloin kuvainformaation hävikki on suurempaa, mutta kuva vie tallennustilaa paljon vähemmän (kuva 28). Laadun huonontuminen näkyy pahiten tulostettaessa, jolloin tarvitaan parempaa laatua.



KUVA 28. Oikean puoleinen kuva on tallennettu 100%:lla kuvanlaadulla ja vasen 1%:lla. Täysilaatuinen kuva vie tilaa 827KB, pienempi vie vain 72KB (Kämppi 2005).

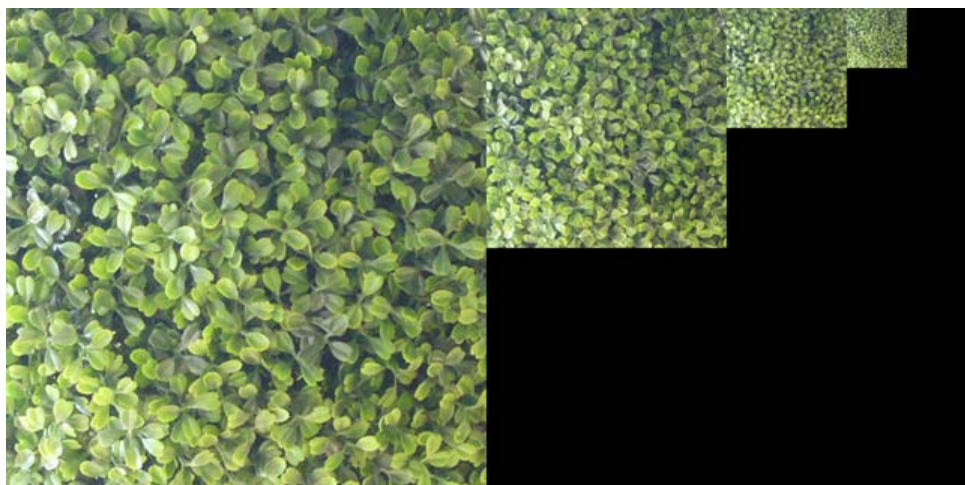
JPEG voidaan siis pakata hyvin pieneen tilaan, mikä auttaa varsinkin mallinnettaessa objekteja virtuaalitodellisuussovelluksiin, sillä pienemmät tekstuurit vievät vähemmän muistia näytönohjaimelta. Tämä mahdollistaa suuremman määrän tekstuureja. Tekstuurien käyttöön vaikuttaa fyysisen koon lisäksi myös resoluutio. Peleissä ja virtuaalitodellisuussovelluksissa käytetään yleensä suurimmillaan 1024x1024 pikselin suuruisia kuvia, koska tätä isommat kuvat saattavat aiheuttaa suuria viiveitä sovellusten toiminnassa.

Vaikka JPEG onkin yksi käytetyimpiä kuvaformaatteja, niin se ei ole paras mahdollinen vaihtoehto virtuaalitodellisuussovelluksiin. Liian suuret tekstuurit kuluttavat suuren osan näytönohjaimen tekstuurimuistista, jolloin sen toiminta alkaa hidastumaan. JPEG pakkaa kuvat tehokkaasti, mutta näytönohjainten pakatessa tekstuureja uudestaan, niiden laatu putoaa suuresti. Tämä ongelma pystytään välttämään DDS-tekstuurien avulla.

Microsoftin kehittämä DDS (DirectX DirectDraw Surface) tuli yleiseen käyttöön DirectX 7.0-version myötä. DDS-formaatti on kehittynyt edelleen uusien DirectX-versioiden myötä. Yksinkertaisesti sanottuna DirectX on rajapinta, tietokoneen komponenttien ja ohjelmien välillä, joka nopeuttaa graafisten sovellusten toimintaa (Microsoft 2007 A.)

DDS-formaatti käyttää hyväkseen DirectX:stä löytyvää DXTn:ksi kutsuttua kuvanpakkausmenetelmää, jonka alkuperäinen nimi on S3TC (S3 Texture Compression). Microsoftin lisättyä tämän pakkausmenetelmän DirectX:ään, se otettiin nopeasti käyttöön laitteisto- ja ohjelmistovalmistajien keskuudessa. DXTn sopii toimintansa ansiosta ideaalisesti tekstuurien pakkausmenetelmäksi näytönohjaimille. Koska useimmat näytönohjaimet tukevat DXTn pakkausta, niin DDS-formaattia käyttämällä säästetään näytönohjainten muistia, joka on tärkeää sovellusten sujuvaa toimintaa ajatellen (Microsoft 2007 B.)

DDS tarjoaa myös muita hyödyllisiä ominaisuuksia sen lisäksi, että se säästää näytönohjainten muistia. DDS tiedostot sisältävät useita eritasoisia kuvia eli mipmappeja (kuva 29). Tätä ominaisuutta tukevat sovellukset osaavat käyttää tekstuuriin tallennettuja pienempiä kuvia sen mukaan miltä etäisyydeltä ne nähdään. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että DDS-tekstuurilla teksturoidun objektin pintakartan koko muuttuu pienemmäksi sitä mukaa mitä kauemmas katsoja siirtyy siitä.



KUVA 29. DDS-tiedosto sisältää useita erikokoisia tekstuureja. Jokainen mipmap taso on kaksi kertaa pienempi kuin edellinen (Kämppi 2007).

JPEG ja DDS ovat siis monipuolisia ja toimivia formaatteja, kun puhutaan teksturoinnista. Tekstuureja voidaan tehdä myös monista muista kuvaformaateista, mutta tämän opinnäytetyön kannalta vain nämä kaksi ovat merkittäviä, joten muita formaatteja ei esitellä.

4.2.4 Tekstuurien tekeminen

Tekstuurien tekeminen vaatii kärsivällisyyttä ja visuaalista hahmottamiskykyä. Ne tehdään pitkälti kuvankäsittelyohjelmissa, kuten Adoben Photoshopissa, joiden kuvankäsittelyyn liittyvät ominaisuudet ovat hyvin kehittyneitä. Kuvankäsittelyohjelmien lisäksi tarvitaan myös digikameraa, jolla oikeista pinnoista saadaan valokuvattua pintakartaksi muokattavia kuvia.

Usein tekstuureilla pyritään toisintamaan oikeaa pintaa, jolloin työ on luonnollista aloittaa ottamalla valokuva tarvittavasta kohteesta. Esimerkiksi luonnonkivipintojen tekeminen pelkästään kuvankäsittelyohjelman tarjoamilla työkaluilla veisi liikaa aikaa, eikä lopputuloksesta tule välttämättä realistisen näköinen. Valokuvattu pinta antaa työlle hyvän pohjan, joka voidaan muokata käyttöön sopivaksi tekstuuriksi. Yleensä kuvaa tarvitsee säätää hieman, jotta siitä saataisiin paras mahdollinen. Käytännössä tämä tarkoittaa valoisuuden ja kontrastin säätämistä sekä kuvan rajaamista (kuva 30). Toki voidaan tarvita myös muitakin toimenpiteitä, mutta nämä ovat yleisempiä toimintoja kuvia muokatessa.



KUVA 30. Jopa heikkolaatuisesta kännykkäkameran kuvasta voidaan muokata tekstuuri hyvän kuvankäsittelyohjelman avulla (Kämpö 2007).

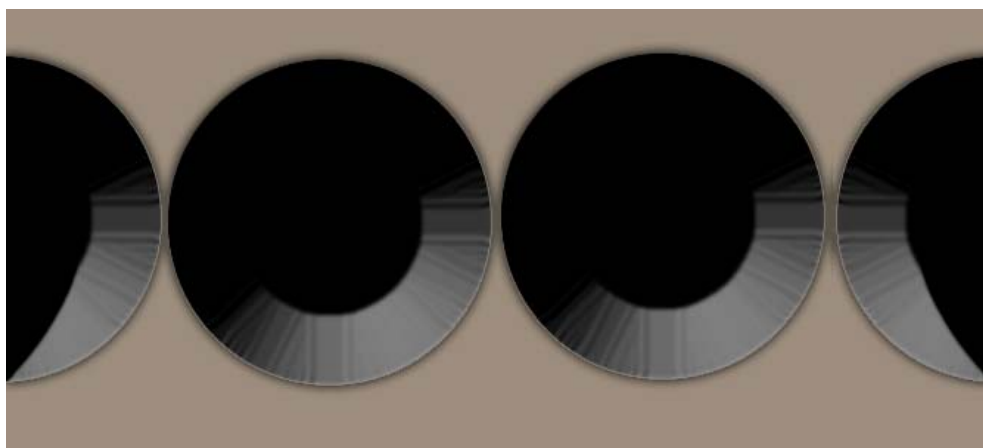
Valokuvatessa tekstuureja on hyvä muistaa että valaistuksen tulisi olla mahdollisimman neutraali. Salamavalon käyttö kamerassa tekee kuvasta yleensä hankalan käsitellä. Suuria kontrasteja on vaikeata korjata kuvankäsittelyllä, jolloin kuvan käyttäminen tekstuurina saattaa olla hyvin vaikeaa. Tekstuurin käyttöympäristössä ei välttämättä ole kirkasta valonlähdettä, joka aiheuttaisi salamavalon kaltaista valaistusta ja varjostusta. Tämä johtaa useimmiten siihen, että tekstuuri näyttää epärealistiselta.

Vaikka näytönohjaimet rajoittavatkin käytettävien tekstuurien kokoa, on syytä kuitenkin muistaa, että tekovaiheessa mahdollisimman tarkka kuva on paras mahdollinen lähtökohta. Suuri resoluutio ja hyvä tasainen valaistus ovat avainasemassa tekstuurien kuvauksessa. Tällöin kyse on lähinnä kuvauksessa käytettävän kameran ominaisuuksista, jotka ymmärrettävästi vaihtelevat paljon erilaisten kameroiden välillä. Nykyaikaiset kamerrat tarjoavat kuitenkin melko hyvää laatua jo suhteellisen halvalla hinnalla, joka osittain helpottaa tekstuurien tekemistä, koska paremmat lähdekuvat vaativat vähemmän käsittelyä. Hyvin kuvatuista materiaalikuvista saadaan tekstuurien lisäksi myös hyviä referenssikuvia (kuva 31) mallinnusvaiheeseen. Oikean esikuvansa näköinen malli on helpompi teksturoida aidon näköisesti, koska geometria itsessään antaa meille vihjeitä siitä, minkälainen materiaalin tai tekstuurin tulisi olla.



KUVA 31. Tarkalla resoluutiolla otettu kuva auttaa jokaisessa realistisen virtuaaliodellisuusmallin luomisvaiheessa (Kämppe 2006).

Tekstuureja voidaan tehdä monella tapaa, mutta on olemassa erinäisiä asioita, jotka tulisi ottaa huomioon. Pääasiallisesti tekstuuri tehdään yhteen tarkoitukseen, joka onkin tärkeää ottaa huomioon sitä tehdessä. Jos halutaan tehdä isoon pintaan – kuten lattiaan – liitettävä pintakartta, niin sen on oltava joko riittävän suuri tai saumaton. Saumattomuus tekstuurien kohdalla merkitsee sitä, että tekstuuri voidaan toistaa sitä isommalla pinnalla ilman venyttämistä. Saumattomat tekstuurit voidaan asettaa vierekkäin siten, että niiden välinen rajapinta häviää näkyvistä (kuva 32). Englanninkielinen termi tälle on tiling, jota käytetään yleisesti tekstuureista puhuttaessa.

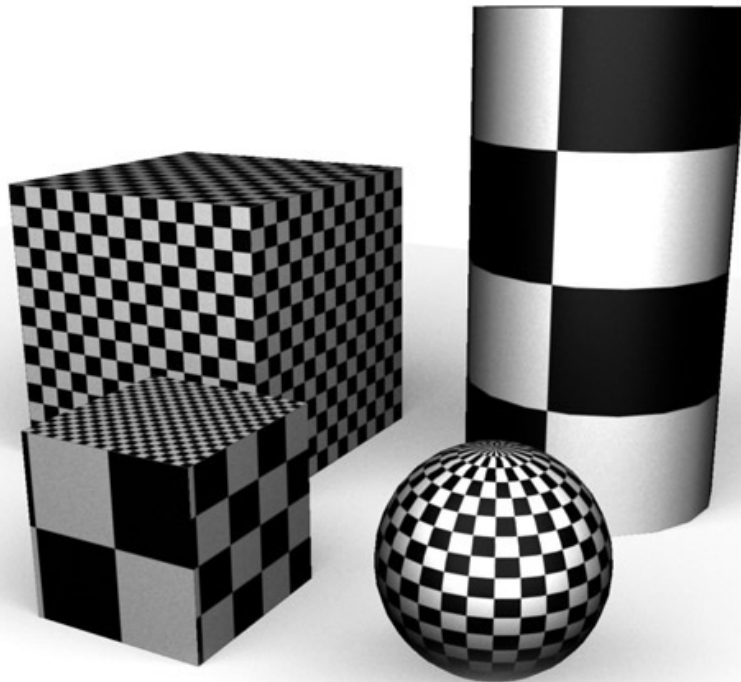


KUVA 32. Kuvan yksinkertaista reikätekstuuria yhdistelemällä voidaan luoda iso pinta, jossa on useita reikiä (Kämppi 2007).

Pintakartat ovat tärkeä osa mallien realismia, mutta pelkästään tieto siitä kuinka niitä tehdään, ei välttämättä riitä mallintajalle. Toisin kuin materiaalien kohdalla, tekstuureja ei voida vain yksinkertaisesti asettaa objektin pinnalle, vaan ne vaativat paikkatiedon. Tämän tiedon niille antaa mallinnusohjelmissa käytettävä UVW-map, jota käsitellään seuraavassa osiossa.

4.2.5 UVW-mapping

Tekstuurit vaativat toimiakseen paikkatiedon geometrian pinnalla. On haastavaa yrittää saada kaksiulotteinen pintakartta toimimaan oikein kolmiulotteisen objektin pinnalla, varsinkin jos kyseessä on orgaaninen muoto. Perusprimitiivit, kuten laatikko, ovat paljon yksinkertaisempia teksturoida, koska niillä on olemassa UVW-kartta vakiona. Yleensä objektit ovat kuitenkin monimutkaisempia kuin perusprimitiivit, jolloin vaaditaan monimutkaisempia UVW-karttoja. 3D-mallinnusohjelmat tarjoavat useita vaihtoehtoja näiden paikkatietokarttojen toteutukseen (kuva 33).



KUVA 33. UVW-karttojen avulla perusprimitiiveille voidaan toteuttaa erilaisia teksturointeja (Kämpö 2007).

UVW-koordinaatisto vastaa yleisemmin tunnettua XYZ-koordinaatistoa. U ja V vastaavat X- ja Y-koordinaatteja, ja W puolestaan vastaa Z-koordinaattia. Nämä koordinaatit määrittelevät kuinka kaksikulotteinen pintakartta projisoidaan 3D-objektin pinnalle. Käyttämällä UVW-karttoja, saavutetaan seuraavia etuja:

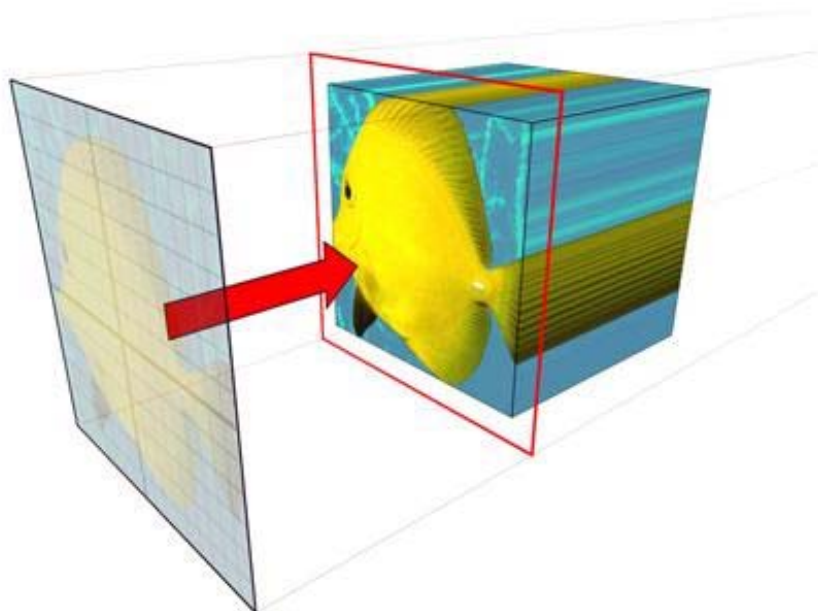
- voidaan asettaa yksi seitsemästä UVW-karttatyypistä määriteltyyn kanavaan (map channel). Normaalisti kartta on 1. kanavassa.
- UVW-apuobjektin (gizmo) avulla voidaan muuttaa kartan paikkaa ja ulkonäköä.
- voidaan määrittellä UVW-koordinaatit objekteille, joilla niitä ei ole vakiona.

Kanavien avulla yhdelle objektille voidaan asettaa useita pintakarttoja, ja käyttämällä UVW-karttoja jokaista pintakarttaa voidaan hallita erikseen apuobjektien avulla. Tämä on hyödyllistä varsinkin, jos halutaan muokata tekstuurien paikkoja ilman, että muutetaan kaikkien tekstuurien sijoittelua (Autodesk 2005 G.)

UVW-kartoitus antaa myös erinäisiä tärkeitä lisäoptioita. Yksi tärkeistä ominaisuuksista on saumattomien tekstuurien toistaminen, eli tiling. UVW-kartalla toteutettu tiling ei vaikuta itse materiaaliin vaan kyseisen objektin pintaan. Tämä mahdollistaa sen, että samaa tekstuuria voidaan käyttää samassa 3D-mallissa uudestaan ilman, että se toistuisi väärin. Tiling ominaisuus on hyödyllinen teksturoinnin apuväline, kuten edellisessä luvussa mainittiin.

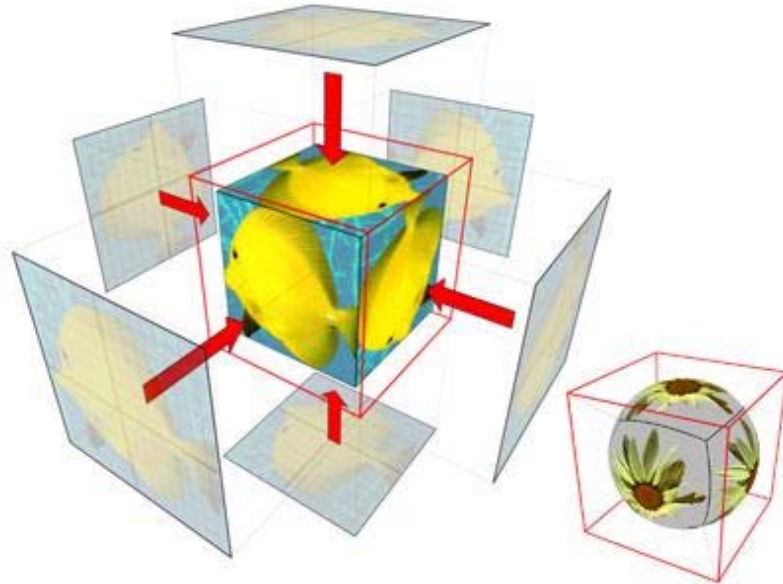
UVW-karttoja voidaan tarpeen mukaan joko liikuttaa, pyörittää tai skaalata. Tämän toiminnon avulla tekstuurimuutoksia voidaan myös animoida. Karttojen muoto ja toiminta ovat riippuvaisia siitä, mikä UVW-kartta on valittu. Perus UVW-karttoja ovat taso (planar), sylinteri (cylindrical), pallo (spherical), kutistus (shrink wrap), laatikko (box) ja taho (face). Näiden lisäksi on olemassa myös XYZ to UVW-kartta, jonka avulla matemaattiset materiaalit kartoitetaan objekteihin. Eri kartat sopivat erilaisiin tilanteisiin, joista esitellään seuraavaksi muutama.

Taso on UVW-kartoista yksinkertaisin (kuva 34). Se sopii parhaiten kohteisiin, jossa vain yksi sivu tarvitsee kartoittaa. Tällä UVW-kartalla kuva projisoidaan kaksiulotteisena tasona, aivan kuten diaesityksissä.



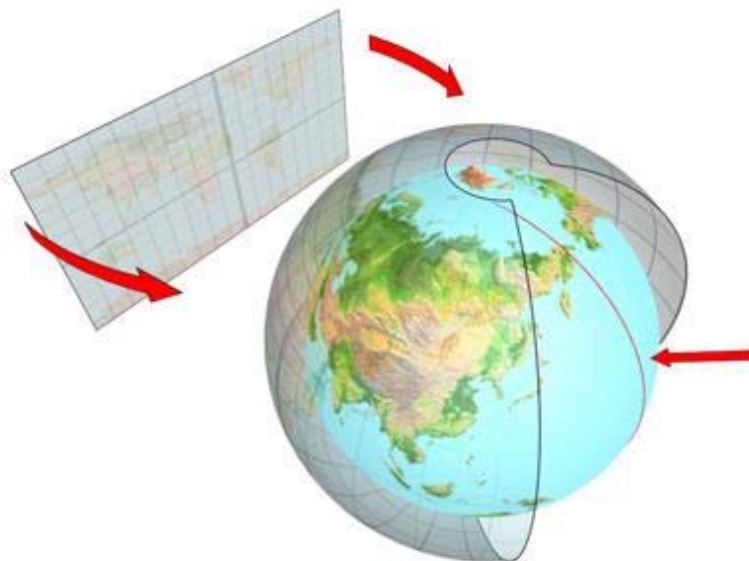
KUVA 34. Taso-kartta on heijastaa kuvan suoraan objektin pinnalle (Autodesk 2005 G).

Laatikko (kuva 35) on pitkälti tason kanssa melko samankaltainen, mutta laatikko-kartta projisoi tekstuurin laatikon kuudelle sivulle. Jokainen sen projektio on tasokartta (Autodesk 2005 G.)



KUVA 35. Laatikko-kartalla tekstuuri heijastetaan kuudelta sivulta (Autodesk 2005 G.).

Ympyrän muotoisten objektien kartoittaminen on usein hankalampaa kuin neliöiden tai tasojen. Ympyrä-kartta on tällöin paras vaihtoehto. Kartta pyrkii heijastamaan kuvan ympyrän mukaisesti, jolloin navoille muodostuu yhdistymäkohdat ja lisäksi kuvasta jää yksi sauma näkyviin (kuva 36). Tällöin tekstuurin olisi hyvä olla saumaton.

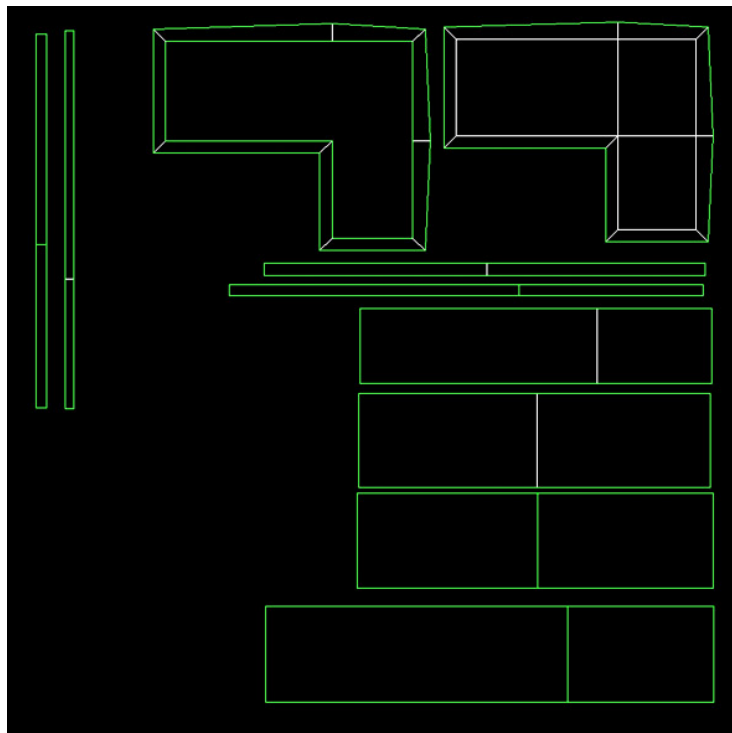


KUVA 36. Tekstuurin tulee olla saumaton, jotta ympyrä-kartalla päästäisiin parhaaseen mahdolliseen lopputulokseen (Autodesk 2005 G.).

Edellä esitetyt UVW-kartat ovat vain muutamia esimerkkejä käytettävissä olevista vaihtoehdoista. UVW-kartan valinta määräytyy pitkälti kartoitettavan kohteen ulkomuodosta. Esimerkiksi puun oksan voi nopeasti kartoittaa sylinterikartalla, kun taas seinäpinta voidaan kartoittaa joko tasolla tai laatikolla. Nämä peruskartat eivät kuitenkaan aina riitä, vaan silloin tarvitaan monimutkaisempaa UVW-Unwrap-toimintoa, jonka avulla 3D-objektin pintavalintoihin voidaan luoda tasokartta ja muokata, kuinka se näkyy pinnalla. Tätä ominaisuutta tarvitaan yleensä orgaanisien muotojen, kuten hahmojen ja huonekalujen teksturoinnissa. Tämän tyylistä UVW-kartoitusta löytyy usein peleistä. UVW-Unwrap tarjoaa ominaisuuden, jonka avulla kokonaisen mallin tekstuurit saadaan yhdistettyä yhdeksi kuvaksi, jota voidaan käyttää tekstuurina useiden pintakarttojen sijaan.

4.2.6 UVW-Unwrap

Kun normaalit UVW-kartat eivät enää riitä mallin monimutkaisuuden takia, tarvitaan UVW-Unwrap ominaisuutta. Yksinkertaisesti sanottuna tämän ominaisuuden avulla pystytään luomaan kaksiulotteinen bittikartta, joka sisältää mallin pintojen paikkatiedot (kuva 37).

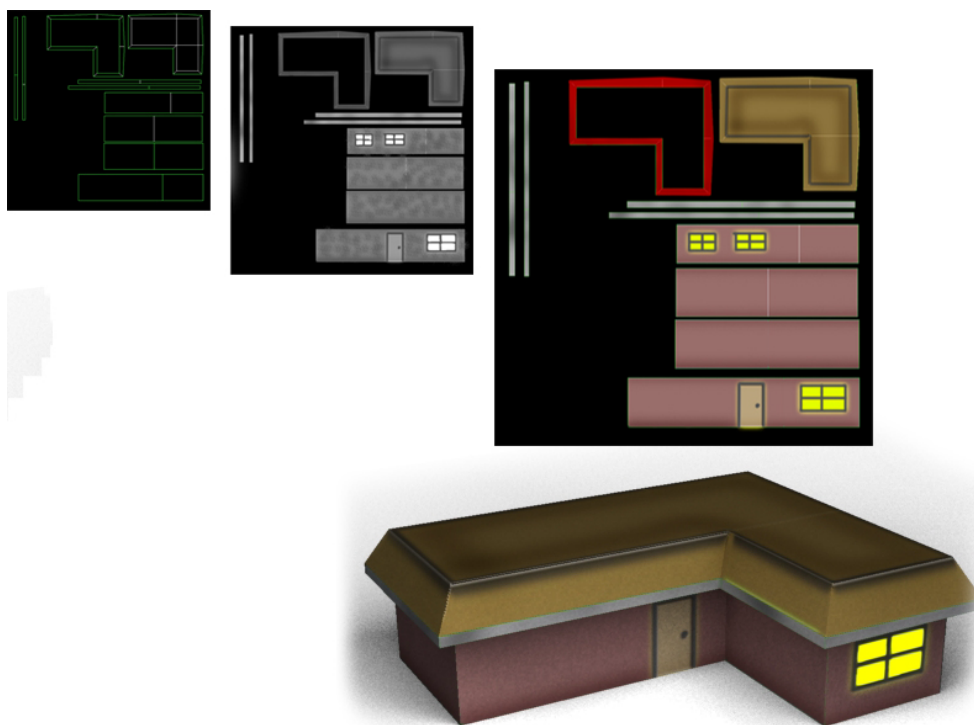


KUVA 37. UVW-Unwrapin avulla toteutettu tekstuuri. Vihreät viivat määrittelevät mallin pintojen rajat (Kämppi 2007).

UVW-Unwrapin voi toteuttaa kahdella tavalla: sen voi tehdä suoraan malliin, tai sitten voidaan käyttää hyväksi perus UVW-karttoja. UVW-unwrap toimii itsessään UVW-kartoittajana, jolloin muita UVW-karttoja ei tarvita. Tällöin käytetään hyödyksi unwrapista löytyviä pinnanvalintatyökaluja. Pinnat valitaan, ja niille asetetaan sopiva UVW-kartta ja tämä operaatio toistetaan, kunnes kaikki mallin pinnat on kartoitettu. Tämän jälkeen tekstuuri voidaan renderöidä, jolloin saadaan aikaiseksi pintakartta, joka voidaan käsitellä kuvankäsittelyohjelmissa halutun kaltaiseksi.

Jos mallissa on valmiina tehtyjä UVW-kartoituksia, niin UVW-unwrapin avulla niitä voidaan editoida ja tuottaa samanlainen tekstuuri, joka kiedotaan mallin ympärille. Tällöin on kyse lähinnä jo tehtyjen kartoitusten muokkauksesta, ei niinkään kartoituksen tekemisestä.

UVW-unwrap on tehokas työkalu, jonka avulla monimutkaisetkin mallit voidaan toteuttaa yhden tekstuurin avulla (kuva 38). Tästä on suuri hyöty varsinkin, kun ajatellaan pelien ja reaaliaikaisten sovellusten rajoituksia. Näytönohjainten muistia ei jouduta kuormittamaan useilla tekstuureilla, koska objektit on teksturoitu käyttäen yhtä kuvaa. Näin saavutetaan suuri säästö tekstuurien määrässä.



KUVA 38. UVW-unwrapin avulla on tuotettu tekstuuri yksinkertaiselle talomallille. Tekstuuri on kietoutunut automaattisesti taloon oikeille paikoilleen (Kämpö 2007).

4.2.7 Texture Baking

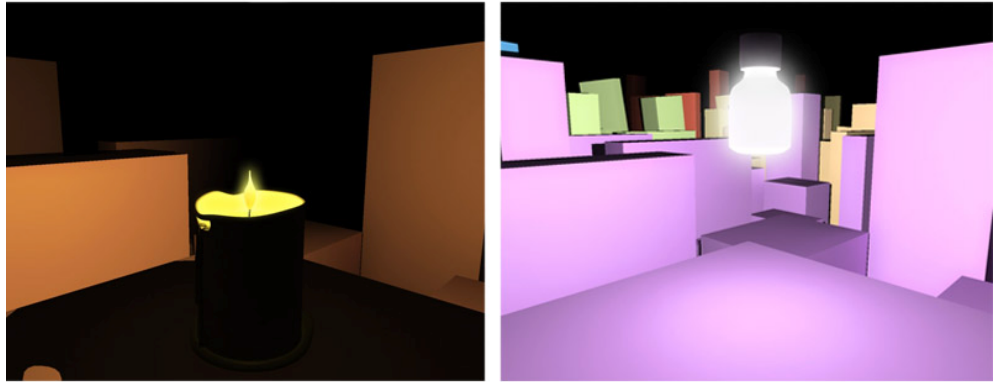
Yksittäisesti ajatellen valaistus on yksi suurimpia laskutehon tarpeen lisääjiä 3D-mallinnuksessa. Realistisen valaistuksen luomisessa tarvitaan useampia valoja ja monimutkaisia fysiikan kaavoja, joiden avulla lasketaan valon siroamista, heijastumista ja hajoamista sekä muita asiaan liittyviä tekijöitä. Monimutkaiset laskutoimitukset vaativat suuren määrän laskemista, mikä taas hidastaa sovelluksen toimintaa.

Tietokoneen tehtävää voidaan kuitenkin helpottaa tekemällä tekstuureihin tarvittavat valaistukset ja varjot valmiiksi. 3D-sovellukset tarjoavat tähän tarkoitukseen työkalun, jonka avulla malleihin asetettuihin tekstuureihin lasketaan valaistus ja varjot, jonka jälkeen ohjelma tuottaa niistä renderöityjä tekstuureja. Tämän jälkeen uudet valaistustiedoilla varustetut tekstuurit asettuvat malleihin edellä esitettyjen UVW-karttojen avulla. Tätä prosessia kutsutaan nimellä texture baking tai render to texture. Valmista mallia voidaan käyttää peleissä tai virtuaaliodellisuussovelluksissa ilman laskentatehoa vaativien valojen tarvetta. Texture baking ei rajoitu pelkästään valaistukseen, vaan myös heijastukset voidaan laskea tekstuureihin.

4.3 VALAISTUS

4.3.1 Valon ominaisuudet

Kuten jo edellä onkin mainittu, niin 3D-ympäristöissä yksi suurimmista realismiin vaikuttavista tekijöistä ovat valot. Valaistuksen avulla pystytään luomaan erilaisia tunnelmia varjojen ja värien kautta. Pehmeä oranssinhohtoinen valo antaa useimmille vaikutelman lämmöstä, jolloin on helpompi luoda vaikutelma esimerkiksi lämpimästä kesäillasta. Kylmällä sinertävällä valolla voidaan taas luoda vaikutelma yöstä (kuva 39).



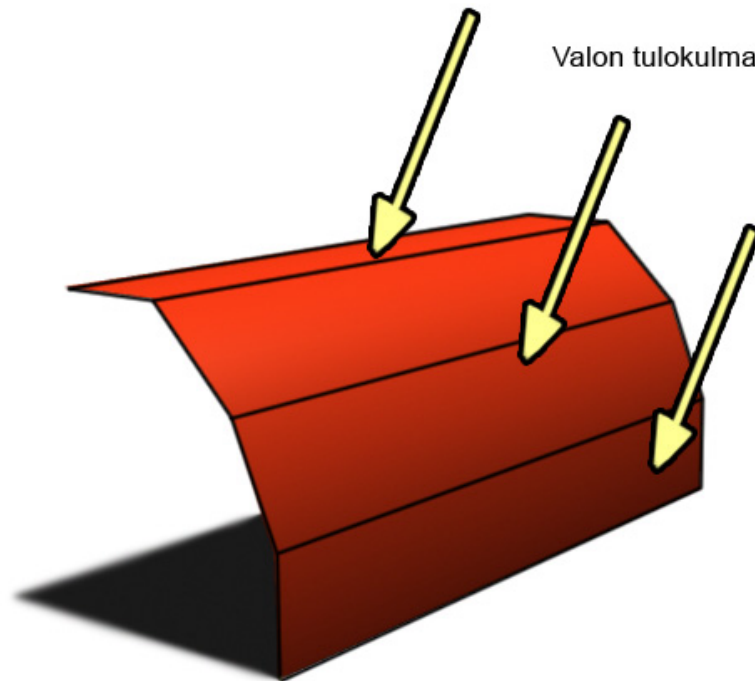
KUVA 39. Erilaiset valonlähteet luovat samaan ympäristöön täysin erilaisen tunnelman (Kämppi 2007).

3D-sovellukset antavat mallintajille useita eri vaihtoehtoja valaistuksen toteuttamiseen. Monista sovelluksista löytyvät samat perusvalot, jotka simuloivat erilaisia valonlähteitä. Valaistusta tehdessä on tärkeää miettiä valonlähteiden sijoittelua ja sitä, minkälaisia valoja tarvitaan. Pelkkä pistemäinen valonlähde ei useimmiten riitä valaisemaan monimutkaista 3D-ympäristöä, vaan tarvitaan useita erilaisia valoja.

3D-ympäristön valaistuksen ymmärtää hieman paremmin, jos tietää miten valo käyttäytyy oikeasti. Kun valonsäde osuu pintaan, niin ainakin osa siitä heijastuu, jolloin pystymme näkemään pinnan. Se miltä pinta sitten näyttää, riippuu pitkälti pinnan ja siihen osuneen valon ominaisuuksista. Valon ja pintojen ominaisuudet yhdistyvät ja näemme lopputuloksen sellaisena kuin se on. Pinnan ulkonäköön vaikuttavat muun muassa väri, tasaisuus ja läpinäkyvyys. Valon ominaisuuksia ovat intensiteetti, valon tulokulma, vaimentuminen, heijastuminen, väri ja värilämpötila (Autodesk, 2005 H.)

Intensiteetti on yksi selkeimmin havaittavista vaikuttajista, sillä mitä heikompi valonlähde on kyseessä, sitä pimeämmältä ympäristö vaikuttaa. Esimerkiksi kynttilä ei valaise kovin suurta aluetta, jos sitä verrataan tehokkaaseen hehkulamppuun. Intensiteettiä valittaessa onkin syytä olla tarkkana sillä epätavallisen kirkkaat valonlähteet polttavat helposti kuvat puhki ja antavat epärealistisen näköisen lopputuloksen. Lisäksi ihmisten kokemukset erilaisista valonlähteistä vaikuttavat siihen, miten niiden oletetaan valaisevan. Jos valaistus tutuista valonlähteistä on liian kaukana sisäisestä mallista, niin se koetaan hyvin helposti epärealistisena ja vääränä.

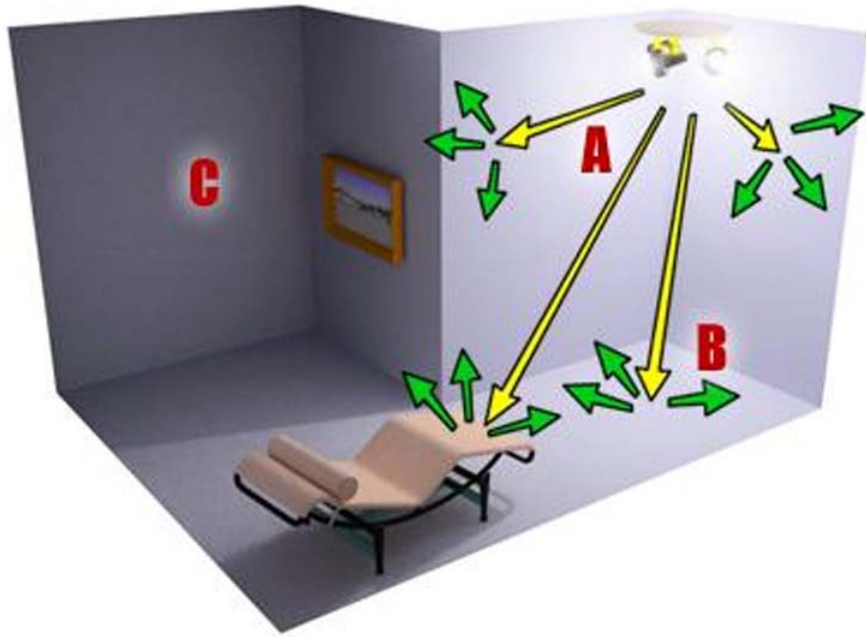
Valon tulokulma vaikuttaa siihen miten pinta valaistuu. Jos valo osuu pintaan kohtisuorasti, se valaisee sitä täydellä teholla, eli toisin sanoen täydellä intensiteetillä. Mitä suurempi kulma valonsäteillä on pintaan nähden, niin sitä vähemmän ne valaisevat sitä (kuva 40).



KUVA 40. Kohtisuoraan pintaan osuva valonsäde valaisee pintaa täydellä intensiteetillä. Suuremmassa kulmassa intensiteetti vähenee (Autodesk 2005 H.).

Valon vaimeneminen on fyysikaalinen ilmiö, jonka vuoksi valo heikkenee etäisyyden kasvaessa. Kun objekti on kauempana valonlähteestä, se näyttää tummemmalta kuin objektit jotka ovat sen lähellä. Vaimeneminen on voimakkaampaa, kun valo hajoaa esimerkiksi ilmakehässä olevien partikkeleiden takia (Autodesk 2005 H.)

Heijastuessaan pinnasta valonsäde jatkaa matkaansa ja valaisee lisää kohteita. Pinnan ominaisuudet vaikuttavat siihen, kuinka paljon tätä heijastumista tapahtuu. Mitä heijastavampi pinta on kyseessä, sitä enemmän se valaisee ympäristöään. Heijastuessaan valo aiheuttaa hajavaloa (ambient), jolla on yhtenäinen intensiteetti. Hajavalolla ei ole yhtä lähdettä eikä varsinaisesti suuntaakaan (Autodesk 2005 H.)



KUVA 41. Valon heijastumista. A osoittaa valon suunnan, B heijastuneen valon ja C on hajavaloa (Autodesk 2005 H).

Valon väri vaihtelee paljon, koska se riippuu hyvin pitkälti lähteestä. Keinotekoisilla valoilla voidaan luoda useita värejä ja eri polttimot tuottavat erilaista valoa. Auringonvalo on väriltään valko-keltaista, mutta se voi muuttua paljonkin riippuen siitä, minkälaisen väliaineiden lävitse se kulkee. Valon väri on additiivista, eli lisäävää. Päävärit ovat vihreä, sininen ja punainen, jotka yhdessä muodostavat eri värit. Yhdistyessään värit vaalenevat ja kun niitä lisätään toisiinsa useammin, ne muodostavat valkoisen (kuva 42) (Autodesk 2005 H.)



KUVA 42. Kun päävärejä yhdistellään, ne muodostavat muut värit (Kämpfi 2007).

Värin lämpötila on keino määrittellä väri Kelvineinä. Tätä hyödynnetään usein, kun puhutaan väreistä jotka ovat hyvin lähellä valkoista. Lisäksi tällä tavalla pystytään määrittelemään valonlähteen väri. Esimerkiksi päivänvalon arvo on 6000K ja vertailun vuoksi kynttilän arvo on 1750K (Autodesk 2005 H.)

4.3.2 3D-sovellusten valot

Kuten aikaisemmin on jo mainittu, 3D-sovellukset tarjoavat käyttäjilleen useita vaihtoehtoja valaistuksen toteutukseen. Valaistuksen luominen 3D-ympäristöön vaatii useita valoja, koska yhdellä valolla päästään hyvin harvoin haluttuun lopputulokseen.

Valojen valinta riippuu pitkälti siitä, minkä tyyppistä ympäristöä ollaan valaisemassa. Tämä tarkoittaa sitä, että onko kyseessä keinotekoisesti vai luonnonvalolla valaistu ympäristö. Luonnonvalolla valaistut ympäristöt saavat valonsa useimmiten yhdestä valonlähteestä, eli auringosta. Tämä riippuu tietenkin siitä, mihin vuorokauden aikaan ympäristöä sijoitetaan, koska öisin kuu tuottaa valon. Keinotekoisesti valaistuissa ympäristöissä on monesti useampia valoja, jotka yhdessä tuottavat valaistuksen (Autodesk 2005 I.)

3D-sovelluksen valot simuloivat oikeasta maailmasta löytyviä valonlähteitä hehkulampusta auringonvaloon asti. 3D-ympäristöissä valojen käyttö ei rajoitu pelkästään valaisuun, vaan valojen avulla voidaan projisoida myös kuvia. Sovelluksista löytyvät valot voidaan jakaa kahteen eri luokkaan: standardeihin ja fotometriisiin.

Standardit valot ovat yksinkertaisempia valo-objekteja, jotka simuloivat erityyppisiä valoja. Näitä valoja on useaa eri tyyppiä, joista jokainen valaisee hieman eritavalla. Yleisimpiä standardi valoja ovat erilaiset kohdevalot kuten spotit (spot light) ja suorasuuntausvalot (direct light) sekä pistevalot (omni light). Hieman erikoisempi valo on taivasvalo (skylight), joka simuloi päivänvaloa luomalla 3D-ympäristön päälle puolipallon muotoisen valo-objektin. Standardeja valoja monimutkaisempia ovat luonnollista valoa simuloivat fotometriset valot.

Fotometriset valot käyttävät hyödykseen fotometrisiä arvoja, joiden ansiosta mallintaja pystyy määrittelemään valojen toimintaa tarkemmin. Käytännössä fotometriset valot omaavat valon fysiikkaan liittyviä ominaisuuksia, joita pystytään säätämään numeerisilla arvoilla. Fotometriset valot käyttävät hyödykseen edellä esitettyjä oikeiden valojen ominaisuuksia, kuten valon vähentymistä (Autodesk 2005 J.)

Erilaisten valojen lisäksi tarvitaan fysiikkaan perustuvia laskentakeinoja, jotta valaistuksesta saataisiin mahdollisimman realistinen. Erilaiset lisäosat (plug-init) mallinnusohjelmiin, mahdollistavat todella näyttävien valaistusten luomisen, mutta nykyään monista ohjelmista löytyy omia ratkaisuja paremman valaistuksen toteuttamiseen. Yksi näistä on radiositeetilaskenta, joka on realistisesti valon vaikutusta ympäristöön simuloiva renderöintitekniikka. Radiositeetti laskee epäsuoran valaistuksen, joka syntyy 3D-ympäristöön asetetuista valoista ja niiden heijastumisista. Radiositeettiä käyttämällä saavutetaan entistä realistisempia ympäristöjä, koska se mahdollistaa muun muassa epäsuoran valaistuksen ja pehmeämmät varjot.

Ilman radiositeettiä ympäristön valaistus tuotetaan niin kutsutulla säteenseuranta menetelmällä (ray-tracing), joka on varsin monipuolinen ja tarkka systeemi valojen ja varjojen sekä heijastusten että läpinäkyvyyksien laskemiseen. Säteenseurannassa on kuitenkin erinäisiä puutteita, joiden takia se ei välttämättä riitä realistisen valaistuksen luomiseen. Se ei osaa nimittäin ottaa huomioon pinnoista heijastuvaa valoa, joten sillä ei saavuteta epäsuoraa valaistusta. Lisäksi säteenseuranta on varsin vaativa tietokonetehon suhteen, varsinkin jos 3D-ympäristössä on useampia valonlähteitä.

Säteenseurannassa on puutteita, mutta radiositeettikään ei yksinään tuota parasta mahdollista tulosta. Radiositeetti ei osaa ottaa huomioon teräviä heijastuksia, eikä läpinäkyvyys efektejä. Parhaaseen lopputulokseen päästäänkin, kun yhdistetään kummankin ratkaisun parhaat puolet.

3D-sovellukset tarjoavat siis valaistukseen useita erilaisia ratkaisuja, joiden avulla taitava tekijä pystyy tuottamaan aitoa valaistusta vastaavan ratkaisun. Jos ohjelmiston perusvalot eivät riitä, niin tarjolla on useita erilaisia valaisuun ja renderöintiin liittyviä lisäosia, joiden

avulla realistisen valaistuksen toteuttaminen on nopeampaa. Oli kyse sitten ulko- tai sisätilasta, niin 3D-sovellukset tarjoavat ratkaisut niiden valaisuun. Virtuaalitodellisuussovellukset ja pelit ovat useimmiten rajoittuneempia valojen suhteen kuin itse sovellukset, joten silloin joudutaan turvautumaan erilaisiin ratkaisuihin. Näistä esiteltiin aikaisemmin jo texture baking, joka on varsin tehokas työkalu tuottaessa kevyempiä malleja reaaliaikaiseen käyttöön.

4.4 3D-MALLIEN SIIRTO TOISEEN SOVELLUKSEEN

Jokaisella 3D-sovelluksella on erilaisia tallennusformaatteja, joihin sovelluksessa tuotettu 3D-malli tallentuu. Yleisimpiä ongelmia 3D-sovellusten välisessä toiminnassa onkin juuri se, että malleja ei pystytä siirtämään sovelluksesta toiseen ilman ongelmia. Eri formaattien väliset yhteensopivuusongelmat voivat aiheuttaa pahojakin vaikeuksia tiedostojensiirrossa. Yleisimpiä näistä ovat pintojen vääristymät, tekstuurien ja materiaalien häviäminen ja animaatioiden muuttuminen tai siirtymättömyys.

3D-mallien siirtoon on useita eri formaatteja, joista suoranaisesti parasta ei voida rajata, koska vain harvat formaatit toimivat moitteettomasti jokaisessa sovelluksessa. Sovelluksissakin on toki eroja tämän suhteen, varsinkin jos puhutaan saman valmistajan sovelluksista. Esimerkiksi AutoDeskin valmistamat sovellukset tarjoavat hyvän yhteensopivuuden toistensa välillä.

Koska tiedostojensiirto sovellusten välillä on yleinen ongelma, niin siihen on pyritty kehittämään ratkaisua niin sanotuilla siirto-ohjelmilla. Yksi suosituimmista siirto-ohjelmista on PolyTrans, jonka avulla tiedostoja pystytään muuntamaan hyvin tuloksin. PolyTrans osaa kääntää tiedostoja useista formateista toiseen ilman mainittavia ongelmia. Lisäksi PolyTrans on kehittänyt AutoDeskille PolyTrans-for-MAX lisäosan, jonka avulla 3ds Maxiin ja VIZiin saadaan tuotua kaikki PolyTransin tukemat tiedostomuodot.

Tiedostosiirtojen piiriin kuuluvat myös valmiiden mallien siirto reaaliaikaisiin sovelluksiin, kuten virtuaalitodellisuussovelluksiin. 3D-ohjelmista löytyy tosin usein tuki VRML:lle ja sen eri versioille, jota käytetään usein reaaliaikaisissa sovelluksissa. VRML eli Virtual Reality Modeling Language on tiedostoformaatti joka julkaistiin vuonna

1995. Alkujaan sillä ei pystytty toteuttamaan kuin staattisia malleja, joissa ei ollut animaatioita tai muuta toiminnallisuutta, mutta myöhempien versioiden myötä tämäkin muuttui. VRML 2.0:lla tai VRML97:llä voidaan toteuttaa jo hyvinkin monimutkaisia ympäristöjä, joihin voidaan lisätä erilaista toiminnallisuutta JAVA-yhteensopivuuden ansiosta. Nykyinen versio eli VRML 3.0 toi vuorostaan lisää ominaisuuksia objektien animointiin.

VRML:än lisäksi käytetään X3D:tä, joka käyttää samaa systeemiä 3D-mallien lukemiseksi, mutta luku tapahtuu tekstitiedoston sijaan xml-tiedostoista. X3D on käytettävyydeltään VRML:ää hieman parempi, koska xml-tiedostoja pystytään luomaan useista eri sovelluksista.

Tässä opinnäytetyössä käytetään virtuaalitodellisuussovelluksesta johtuen AutoDeskin 3ds Max 8 3D-mallinnusohjelmaa, josta tiedostot siirretään erillisen oFusion-lisäohjelman avulla. Näin ohjelmasta saadaan ulos OSM-tiedostoja, jotka toimivat virtuaalitodellisuussovelluksen hyödyntämässä Ogre-grafiikkamoottorissa. Näin saavutetaan huomattavaa etua verrattuna normaaleihin tiedostoformaatteihin, jotka ovat usein ominaisuuksiltaan rajoittuneempia kuin suoraan 3D-sovellukselle tehdystä lisäohjelmasta ulos tulevat tiedostot.

5 CASE

5.1 KOHDEYRITYS

Opinnäytetyön kohdeyritys oli SenseTrix Oy, joka aloitti toimintansa virtuaalitodellisuuden parissa vuonna 1998. Aluksi yrityksen toimenkuvaan ei varsinaisesti kuulunut markkinointi, vaan kyse oli lähinnä tutkimuksesta ja kehitystyöstä. Myöhemmin virtuaalitodellisuusratkaisujen myynti tuli osaksi yrityksen toimintaa, mutta varsinainen myynti on ollut hidasta, koska ala on vielä varsin tuntematon suuren yleisön parissa. Virtuaalitodellisuus käsitteenä on useimmille asiakkaille lähes tuntematon, joten myyntityö on vaatinut paljon käytännön esittelyjä (Laukkanen 2007.)

Vaikka innostus tuotetta kohtaan onkin ollut suhteellisen suurta, ja asiakkaat ovat havainneet tuotteessa olevan paljon hyödyllistä potentiaalia heidän yrityksilleen, niin myyntisyklit ovat edelleen pitkiä.

SenseTrix on saanut myös paljon mainetta ulkomailla, jossa se on vähintäänkin yhtä tunnettu kuin kotimaassaan Suomessa. SenseTrixin tuotteet on määritelty ”high-tech”-tuotteiksi Suomen ulkomaankauppaa edistävän FinPro:n taholta. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että tuotetta voidaan käyttää vastakaupoissa joissa vaaditaan vastineeksi korkeatasoista teknologiaa (Laukkanen 2007.)

SenseTrixin käyttämä virtuaaliodellisuussovellus on vuosien varrella nähnyt kolme eri versiota, joiden kehitystyössä on osittain jouduttu palaamaan vanhempiin versioihin. Ensimmäinen versio sovelluksesta toimi monilta osilta hyvin, mutta mallien tuominen kyseiseen versioon oli niin hankalaa, että siirryttiin kehittämään uutta versiota. Toinen versio pohjautui osittain Nvidian kehittämään koodiin, mutta tästä muodostui myöhemmin toisen version kompastuskivi. Tämä johtui siitä, että sovellukseen oli lähes mahdotonta lisätä uusia ominaisuuksia tai korjata siinä olevia ongelmia ilman Nvidian tekemiä päivityksiä. Tämä johti kolmannen ja viimeisimmän version kehitykseen. Uusimman version kehitystyö jatkuu vielä tämän opinnäytetyön loppumetreilläkin. Ohjelman uusimmasta versiosta puuttuu vielä monia ominaisuuksia, mutta niitä ilmestyy lisää päivitysten muodossa. Tällä hetkellä sovellus on palannut juurilleen, sillä se hyödyntää ensimmäisen version tapaa tuoda malleja sisälle sovellukseen. Käytännössä mallit tuodaan sovellukseen 3D-ohjelmistoon sisällytettävän erillisen lisäosan kautta, kuten jo edellisen luvun lopussa mainittiin (Laukkanen 2007.)

5.2 TUTKIMUSTYÖN TARKOITUS

Tämän opinnäytetyön esimerkkinä oli tarkoitus toteuttaa monipuolinen 3D-malli, josta tehdään kaksi eri tarkkuudella toteutettua kokonaisuutta. Tarkkuudella tarkoitetaan tässä yhteydessä mallien geometrian pintamäärää. Aluksi tuotettiin todella korkeasta pintamäärästä koostuva yksityiskohtainen 3D-malli, jonka jälkeen siitä muokattiin optimoitu malli, jotta vertailuun saatiin kaksi eritasoista 3D-ympäristöä. Tämän jälkeen mallit teksturoitiin toiminnallista testausta varten kahdella eri kuvaformaattilla, JPEG:illä ja DDS:llä.

Mallien toimintaa ja realismia oli tarkoitus vertailla valitussa virtuaaliodellisuussovelluksessa. Tarkoituksena oli löytää optimaalinen suhde realismiin ja toiminnallisuuden välillä, eli mallin tuli

sekä näyttää hyvältä että toimia sovelluksessa ilman näkyvää hidastumista. Lähinnä kyse oli siitä, kuinka paljon pintoja vaaditaan, jotta mallit näyttäisivät uskottavilta käytettyjen tekstuurien kanssa.

Jos kaikki kohteen objektit olisi mallinnettu äärimmäisen tarkasti, olisi saatu aikaiseksi realistisen näköinen yksityiskohtainen 3D-malli, mutta sen toiminta olisi ollut äärettömän epävarmaa jopa nykyisillä tehokkailla PC-työasemilla. Täten oli tärkeää löytää kultainen keskitie realismin vaatimien pintojen ja koneiden asettamien rajoitusten välille.

Valitettavasti esimerkissä käytettävä virtuaaliodellisuussovellus oli vielä niin keskeneräinen, että mallien testaaminen käytettävällä laitteistolla ei onnistunut. Tästä johtuen seuraavat kappaleet mallinnusta ja suunnittelua lukuun ottamatta ovat teoriaa, eikä niitä pystytty testaamaan käytännössä.

5.3 SUUNNITTELU

Mallin suunnittelu aloitettiin edellä esitetyn pohjalta. Koska tavoitteena oli luoda kaksi eritasoista mallia, niin oli selkeintä aloittaa tarkimmasta mallista, jonka luomisen jälkeen malleja voitaisiin optimoida. Tosiasiassa tällä järjestyksellä ei ole varsinaista käytännön merkitystä, mutta kun tarkemmat mallit ovat valmiita, niin optimoidut mallit on nopeampaa toteuttaa käyttäen tarkempia malleja esimerkkeinä. Näin meneteltäessä on myös helpompi hahmottaa mitkä osuudet geometriasta voidaan toteuttaa teksturoimalla.

Itse 3D-mallia ei sinänsä tarvinnut suunnitella, koska mallinnuskohteena oli olemassaoleva asunto, josta on olemassa pohjapiirustukset sekä runsaasti referenssikuvia mallinnuksen tueksi. Suunniteltavaksi jäikin lähinnä se, kuinka eritasoiset mallit kannattaa toteuttaa. Lisäksi tuli miettiä tarkasti minkälaiset objektit otettiin mukaan malliin. Esimerkiksi kaikkia koriste-esineitä ei kannattanut lähteä mallintamaan. Niiden lisääminen olisi tuottanut liikaa pintoja, joka puolestaan olisi aiheuttanut sen, että käytettävät tietokoneet eivät olisi enää jaksaneet pyörittää malleja.

Jotta 3D-malleista tulisi mahdollisimman aitoja, niin ne mitoitettiin ja mallinnettiin käyttäen yksikköinä millimetrejä. Tästä on hyötyä myös myöhemmin, sillä käytettävä virtuaaliodellisuussovellus näyttää mallin parhaiten, kun sillä on käytettävissä oikeassa mittakaavassa oleva 3D-malli.

Testitarkoituksessa tarkimpaan malliin tehtiin valitut komponentit niin tarkkaan kuin oli järkevää. Pintoja ei säästetty, mutta mallit tehtiin kuitenkin niin, että niihin ei syntynyt pintoja joista ei ole mitään käytännön hyötyä mallin ulkonäköä ajatellen. Optimoidussa ympäristössä, objektien pintamäärää pyrittiin vähentämään siten, että malleista poistettiin pintoja tekstuurien avulla. Tällaisesta optimoinnista toimii hyvänä esimerkkinä luonnonkiviseinä, joka voitiin toteuttaa geometrian tai pelkästään tekstuurin avulla. Eroa kahden toteutustavan välillä ei huomannut kuin tarkasteltaessa mallia erittäin läheltä. Kauempaa lopputulos oli lähes identtinen.

Mallinnuksessa käytettiin polygon-malleja, jotka toimivat reaaliaikaisissa sovelluksissa mesh-malleja paremmin. Polygon-mallinnus on nopeaa, koska 3ds Max 8 tarjoaa monipuoliset ja kehittyneet työkalut polygon-mallinnukseen.

Teksturointi toteutettiin kulloiseenkin tilanteeseen sopivalla tavalla. Mallien teksturointi nimittäin riippuu pitkälti siitä, minkälainen geometria on kyseessä, joten teksturointia on hankala suunnitella etukäteen. Suunnitteluun voidaan kuitenkin laskea se, että mietitään valmiiksi mitä kaikkia kohteita tarvitsee valokuvata, jotta todellisuudesta saataisiin aikaan tarkka toisinto.

5.4 MALLINNUS

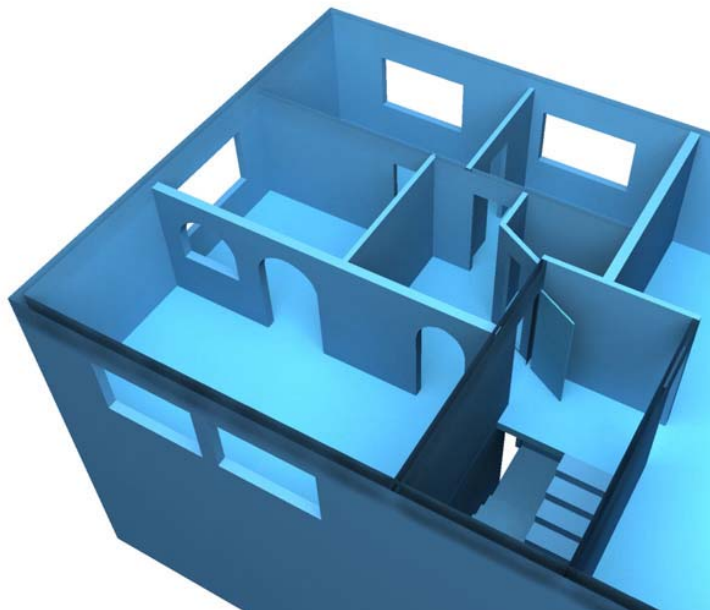
Mallinnuksen työkaluina toimivat perusprimitiivit, polygon-mallinnus ja kaikki muut 3D-sovelluksen tarjoamat muokkaustoiminnot. Kappaleita luotaessa lähdettiin liikkeelle perusprimitiiveistä, jotka sitten muutettiin polygon-malleiksi ja muokattiin lopulliseen muotoonsa.

Polygonien avulla toteutettavilla malleilla ei oikeastaan ole mitään rajaa, vaan kaikki on toteutettavissa. Koneiden tehot asettavat toki rajat pintojen määrille. 3D-mallien luomisessa on syytä alkaa ensin suuremmista objekteista. Tällä tarkoitetaan sitä, että esimerkiksi autoa mallinnettaessa aloitetaan rungon perusmuodosta, jonka jälkeen siirrytään yksityiskohtiin.

Työn esimerkkinä toimi pienkerrostalo, josta mallinnettiin ensin ulkoseinät, ja huoneistoja erottavat seinät. Talossa on vain neljä huoneistoa, joten erottavia seiniä ei sinänsä ole kovin paljon. Koska

muihin asuntoihin ei ole mahdollista päästä, niin ne jätettiin pois mallista ja keskitytään käytettävissä olevaan asuntoon.

Ulkoseinien ja kantavien rakenteiden mallintamisen jälkeen siirryttiin varsinaiseen asunnon tekemiseen. Väliseinät, oviaukot ja muut ulokkeet oli hyvä mallintaa ensin, sillä ne voitiin lähes poikkeuksetta luoda perusprimitiiveistä, ja niiden avulla oli helpompaa jakaa kokonaisuus osiin (kuva 43).



KUVA 43. Kiinteät rakenteet auttavat hahmottamaan kokonaisuuden paremmin (Kämppi 2007).

Väliseinien valmistumisen jälkeen oli loogista siirtyä seuraaviin kiinteisiin kohteisiin, kuten lämpöpattereihin ja ikkunoihin. Nämä olivat jo hieman monimutkaisempia objekteja ja vaativat pintatason muokkaustoimenpiteitä. Näiden objektien toteuttaminen oli kuitenkin varsin yksinkertaista polygonien tarjoamien muokausvaihtoehtojen avulla.

Kun kaikki asunnosta löytyvät kiinteät objektit olivat valmiita, niin voitiin siirtyä mallintamaan asunnosta löytyvää irtaimistoa. Irtaimiston kohdalla oli syytä päättää mitä mallinetaan ja mitä ei. Vaikka 3D-mallinnussovellukset tarjoavat työkalut minkä tahansa mallin luomiselle, ei ollut kuitenkaan järkevää lähteä toteuttamaan aivan kaikkea asunnosta löytyvää.

Esimerkiksi koriste-esineiden tekeminen olisi vienyt liikaa aikaa, ja niistä olisi syntynyt kohtuuton määrä pintoja saavutettuun realismiin nähden (kuva 45). Realistiseen vaikutelmaan päästään ilman pieniä koriste-esineitäkin.



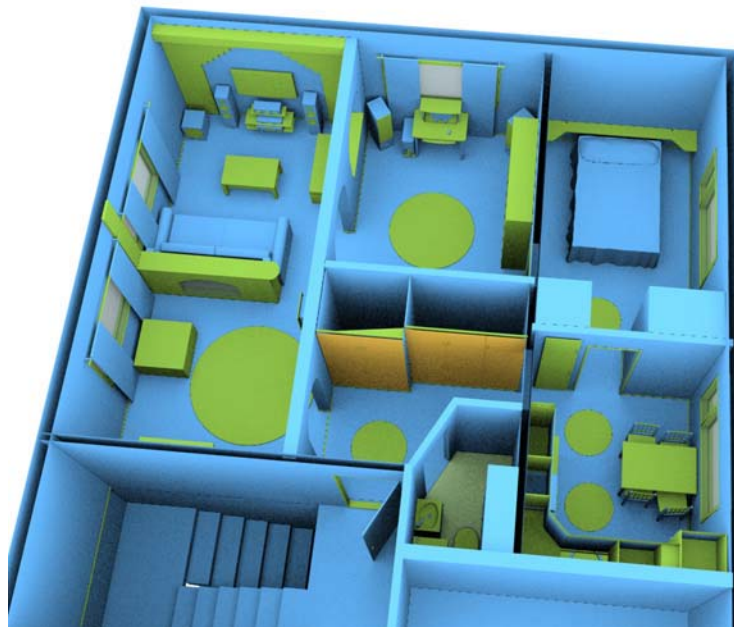
KUVA 45. Äärimmäisen tarkasti toteutetut koriste-esineet vievät liikaa pintoja ja niiden toteuttaminen tekstuuriin avulla vaatisi liikaa aikaa (Kämpö 2007).

Muu irtaimisto, kuten sohvut, hyllyt, pöydät ja kodinkoneet oli mahdollista toteuttaa, koska ne eivät vaadi kohtuuttomia määriä pintoja. Mallien tekeminen huone kerrallaan oli järkevää, koska tällöin kokonaisuus rakentui selkeässä järjestyksessä.

Mallinnusvaiheessa oli myös syytä muistaa objektien järkevä ryhmittely ja nimeäminen. Suurissa kokonaisuuksissa kappaleiden looginen nimeäminen on entistä tärkeämpää. Jos kappaleille ei anneta niitä kuvaavia nimiä, niin niiden löytäminen myöhemmin saattaa olla äärimmäisen aikaa vievää. Nimeämisen lisäksi on hyvä muistaa, että ryhmien luominen auttaa monimutkaisten mallien hallinnoimisessa. Selkeästi ryhmitellyt objektit voidaan piilottaa ja tuoda esiin nopeasti.

Kun tarkempi malli oli valmis (kuva 46), niin voitiin siirtyä tuottamaan kevyempää versiota. Kevyemmässä versiossa käytettiin hyödyksi tarkemman mallin seiniä ja muita kiinteitä rakenteita, sillä ne oli toteutettu

kevyesti käyttäen perusprimitiivejä hyödyksi. Kevyempi malli toteutettiin samoilla polygon-mallinnus tekniikoilla kuin tarkempikin malli, mutta tällä kertaa oli syytä pitää mallien pintamäärät optimaalisina.



Kuva 46. Yksityiskohtainen malli lähes valmiina (Kämpfi. 2007).

Kevyemmät mallit ovat usein haastavampia toteuttaa kuin tarkat pintamallit, koska vähillä pintamäärillä pitää pystyä luomaan realistinen vaikutelma. Tästä on hyviä esimerkkejä tämän päivän 3D-grafiikkaa hyödyntävissä peleissä, joissa tekstuureilla korvataan todella paljon pintoja.

Pinnat pyrittiin toteuttamaan mahdollisimman yksinkertaisesti. Malleista jätettiin pois viisteitä, kulmia, reikiä ja kaikkea muuta, jotka aiheuttivat ylimääräisten pintojen muodostumista.

Optimoimalla pintamäärää voidaan vähentää dramaattisesti, mutta tällä on haitallinen vaikutus realismiin varsinkin yksityiskohtien kannalta. Kevyemmät mallit eivät usein kestäkään lähempää tarkastelua, vaan niistä löytyy lähes poikkeuksetta puutteita.

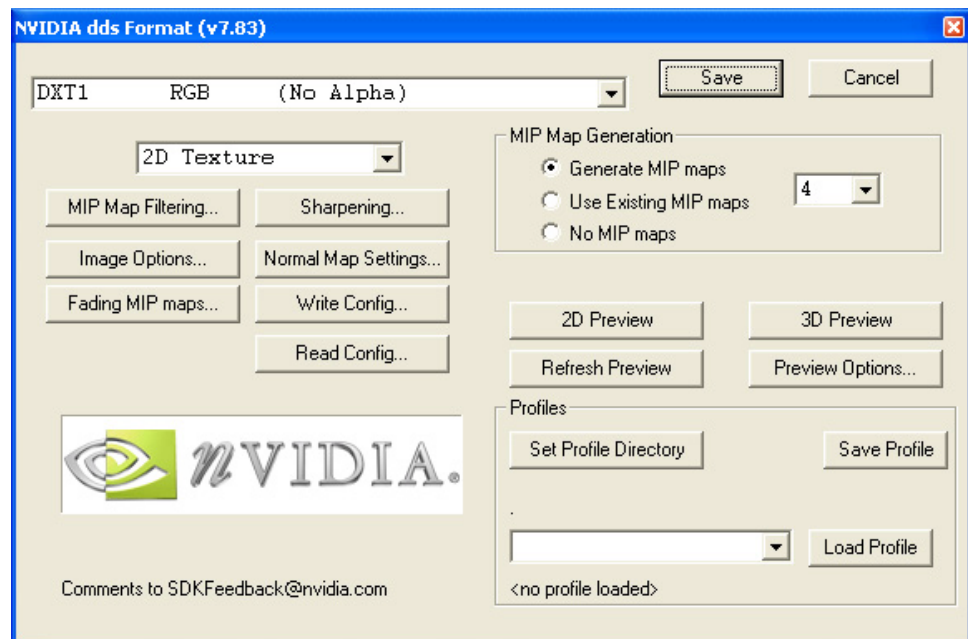
5.5 MATERIAALIT JA TEKSTUURIT

Valmiin mallin teksturointi on työläs prosessi, joka vaatii paljon referenssikuvien ottamista sekä niiden muokkausta kuvankäsittelyohjelmassa.

Koska kyseessä oli malli, jossa oli paljon objekteja, pyrittiin käyttämään mahdollisimman paljon samoja materiaaleja ja tekstuureja hyödyksi. Esimerkiksi huoneiston listoja teksturoidessa, ei ollut syytä tehdä useita tekstuureita, sillä yksi puupinnan kuva riitti kaikille listoille mainiosti.

Tekstuurien luominen aloitettiin ottamalla valokuvat tarvittavista kohteista. Valokuvia tuli paljon, koska erilaisia pintoja löytyi useita. Kuvien ottamisen jälkeen ne käsiteltiin siten, että niistä tekstuureiksi sopivia.

Kun kuvat oli leikattu ja säädetty valaistukseltaan sopivaksi, niin niistä tallennettiin JPEG- ja DDS-muotoiset kuvatiedostot. JPEG-tallennuksessa ei sinänsä ollut mitään erikoista, vaan kyse oli lähinnä siitä kuinka paljon kuviin tuli pakkausta. DDS-formaattiin tallennettaessa oli paljon enemmän vaihtoehtoja säädettäväksi (kuva 47).



KUVA 47. Nvidian DDS-työkalussa on paljon optioita pintakarttojen luomiseen (Kämppi 2007).

Huomionarvoiset kohdat tässä vaiheessa olivat pakkausmenetelmän ja MIP Mappien luominen. DXT1 on oletusarvoinen pakkausmenetelmä ja tätä käytetään esimerkissä. MIP Mapit luotiin, jotta sovelluksella olisi eritasoisia bittikarttoja etäisyyden mukaisesti vaihdettavaksi.

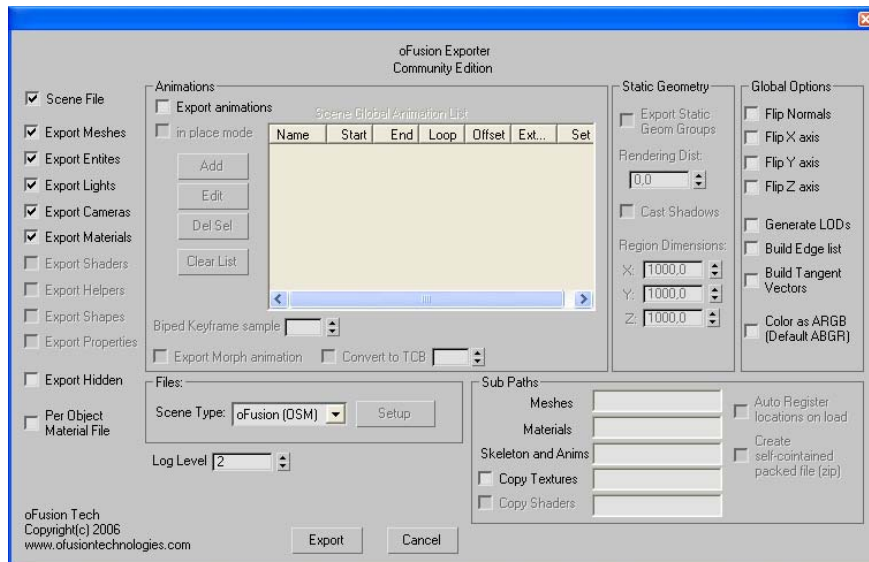
Tämä nopeuttaa renderöintiäaikoja reaaliaikaisissa sovelluksissa, koska koneiden ei tarvitse aina laskea suurimpia ja tarkimpia tekstuureja, vaan se vaihtaa tekstuurin kokoa etäisyyden mukaan. Käytetyn 3D-sovelluksen omat materiaalit eivät suoraan toimineet käytettävässä virtuaalitodellisuussovelluksessa, vaan ne piti muuttaa sovelluksen ymmärtämään muotoon. 3ds Max 8:n lisäohjelma oFusion-exporter antoi mahdollisuuden luoda oFusion-materiaaleja, joiden ominaisuuksien piti toimia sovelluksissa, jotka käyttävät hyväkseen Ogre 3D-moottoria.

Nämä materiaalit luotiin samoilla prosesseilla kuin 3ds Max:n omat materiaalit. Materiaalien luomisessa oli todella paljon samoja mahdollisuuksia kuin normaalien materiaalienkin luomisessa, mutta käytännön toteutus oli paljon hankalampaa. Sovellus kaatui silloin tällöin, kun materiaalin tyyppiä vaihdettiin oFusion-materiaaliksi ja ohjeet olivat epäselviä tai puutteellisia.

Ofusionin avulla 3ds Maxin perusnäkyvien lisäksi saadaan oFusion-näkymä, jonka avulla materiaalit näkyvät mallissa siten kuin ne näkyisivät kohdesovelluksessa. Tämän avulla nähtiin, että normaalien materiaalien luominen onnistui suhteellisen hyvin, mutta tekstuurien tekeminen oli paljon hankalampaa, sillä niitä ei saatu toimimaan oFusion-virtuaalinäkymässä.

5.6 SIIRTÄMINEN SOVELLUKSEEN

Valmiin mallin siirto sovellukseen tapahtui 3ds Max 8:sta aikaisemmin mainitun oFusion-exporterin avulla (kuva 48). Tämän avulla pystyttiin siirtämään mallit, tekstuurit, valot ja kamerat. Jos mallissa olisi ollut mukana animaatioita, niin nekin olisi pystytty siirtämään.



KUVA 48. Ofusion-lisäohjelman tarjoama mallien siirtoikkuna (Kämpö 2007).

Mallien siirtoyritykset päättyivät poikkeuksetta virheilmoitukseen tai mustaan näkymään sovelluksessa, joten niiden tarkastelu halutussa ympäristössä oli valitettavasti mahdotonta. Malli oli saatu rakennusvaiheessa kahdesti auki onnistuneesti sovelluksessa, mutta sen toiminta oli lakannut tuntemattomasta syystä. Käytännön testaaminen jäi siis mahdottomaksi ajanpuutteen vuoksi, sillä useimmat yritykset päättyivät sovellusvirheeseen ja käyttöjärjestelmän virheeseen.

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli esitellä virtuaalitodellisuutta, sekä kolmiulotteisten mallien luomiseen liittyviä prosesseja.

Virtuaalitodellisuus on varsin monipuolinen ympäristö erilaisiin käyttötarkoituksiin. Sovelluksista on hyötyä useilla aloilla, ja tulevaisuudessa teknologian kehittyessä virtuaalitodellisuuden käyttö tulee varmasti lisääntymään. Virtuaalitodellisuudessa on kiistattomia etuja, kuten vaarattomat koulutustilanteet, perinteisiin ratkaisuihin nähden.

Kevyemmät virtuaalitodellisuus ratkaisut, kuten erilaiset seinäkkeet, ovat tekniikan kehittyessä halventuneet, ja niistä on tullut varteenotettava vaihtoehto perinteisten markkinointikeinojen rinnalle. Pienille yrityksille systeemien hinnat ovat kuitenkin vieläkin liian suuria, jotta niihin uskallettaisiin sijoittaa.

Tällä hetkellä vaikuttaisi kuitenkin siltä, että varsinkin immersiiiviset virtuaalitodellisuusratkaisut ovat vielä liian kalliita ja hankalia toteuttaa, jotta niistä voisi tulla käytännön ratkaisu muihin kuin valtion rahoittamiin tutkimus- ja koulutustarkoituksiin.

Esimerkkityössä loppuvaihetta varjosti pitkälti epätietoisuus uuden virtuaalitodellisuussovelluksen toimivuudesta. Kohdeyritys vaihtoi kolmannesta osapuolesta johtuen sovelluksensa uuteen kehitteillä olevaan kuukautta ennen opinnäytetyön määrättyä valmistumispäivää ja täten muutti pitkälti casen tekemistä. Sovellus ei kuitenkaan vielä tässäkään vaiheessa ollut lopullisessa vaiheessaan, ja vaikka siihen olikin onnistuneesti viety malleja, niin tämä ei onnistunut käytetyllä laitteistolla ja sovellusversioilla. Lisäksi uusi sovellus muutti eräitä kriittisiä asioita, kuten materiaalien ja tekstuurien tekemistä, niin merkittävästi, että aika ei enää riittänyt uusien toimintatapojen omaksumiseen edes riittävällä tasolla.

Edellä esitetyistä seikoista johtuen varsinaista esimerkkityön testaamista ei saatu suoritettua, joten käytännön tuloksia ei ole, mutta teoriassa mallien ja tekstuurien eroja voidaan miettiä.

Kahden merkittävästi eritasoisen mallin toimivuudessa on selkeä ero

ainakin 3D-mallinnussovelluksessa. Lähes 500 000 pintaa sisältävä tarkempi malli aiheuttaa ongelmia virtuaalinäkymissä, ja sen latautuminen sovellukseen vie huomattavasti enemmän aikaa kuin kevyemmän mallin.

Teoriassa tämä ero siirtyy melko varmasti myös virtuaalitodellisuussovelluksen puolelle, jossa kevyemmän mallin pitäisi toimia ilman viiveitä. Mallin pintamäärä vaikuttaa siis hyvin paljon siihen, kuinka se toimii sovelluksessa. Objektien määrää mallissa ei pystytä vertailemaan tarkasti, sillä kummassakin mallissa on lähes yhtä paljon objekteja.

Tekstuurien osaltakin vertailua on mahdotonta suorittaa, sillä tekstuurien toimintaa ei pysty testaamaan ilman varsinaista sovellusta. JPEG ja DDS ovat samalla viivalla tämän tutkimuksen kannalta, mutta aiemmat tutkimustyöt tukevat DDS-tekstuureja reaaliaikaisten sovellusten tekstuuriformaattina. Lisäksi DDS-formaatti tarjoaa ominaisuuksia, joita JPEG:stä ei löydy. DDS:n yhteensopivuus näytönohjainten kuvanpakkausmenetelmien kanssa tukee edelleen DDS-formaattia. Teoriassa DDS-formaatti on siis huomattavasti JPEG:iä edistyneempi ja parempi vaihtoehto virtuaalitodellisuusmallien teksturointiin. Valitettavasti käytännön testit jäivät tästäkin suorittamatta.

Optimaalisesti toimivien mallien luominen on pitkälti kiinni siitä, mihin tarkoitukseen ja minkä kokoista ympäristöä ollaan luomassa. Jos on kyse pienestä kokonaisuudesta, niin pintoja voidaan käyttää suhteellisen paljon yksityiskohtien luomiseen, mutta suuremmassa ympäristössä on tärkeää pitää mielessä pintojen määrän kasvun hallinta. Jos jokainen objekti tehdään äärimmäisen yksityiskohtaisesti, niin pintamäärä kasvaa liian suureksi ja mallien toimivuus sovelluksissa heikkenee huomattavasti. Täten tehtäessä malleja reaaliaikaiseen käyttöön, on syytä kiinnittää huomiota pintojen määrään, mikä vaikuttaa todella paljon mallien toimintaan.

Tulevaisuudessa koneiden tehot tulevat varmasti kasvamaan, joka osaltaan vaikuttaa myös virtuaalitodellisuussovellusten toimintaan. Mitä tehokkaammat tietokoneet on käytössä, niin sitä tarkempia malleja pystytään toteuttamaan.

Virtuaalitodellisuussovellusten kehittäminen on kuitenkin jatkuvaa, ja entistä kehittyneemmät sovellukset tarjoavat mallintajille lisää mahdollisuuksia. Jatkuva kehitys luo tarvetta jatkotutkimuksille, ja virtuaalitodellisuusmallien luominen tuokin varmasti haasteita tuleville sukupolville vielä pitkiksi ajoiksi.

LÄHTEET

Haastattelut

Laukkanen, Seppo. 2007 Sensetrix Oy. Haastattelu 8.3.2007.

Painetut lähteet

Hintikka, Kari, Kojo, Ilpo & Metsämäki, Markku. 1998.
Virtuaaliympäristöjen suunnitteluopas. Helsinki: Edita.

Lehtovirta, Pekka & Nuutinen, Kari. 2000. 3D: 3D-sisältötuotannon peruskirja. Jyväskylä: Gummerus

Sähköiset lähteet

ACDSee. 2005. Flight safety [verkkojulkaisu] [viitattu 20.2.2007].

Saatavissa:

<http://www.acdsee.com/community/articles/softwaretips/article?id=2005-08-16>

Atlantic Cyberspace. 2004. Immersive Group Simulation [verkkojulkaisu] [viitattu 20.2.2007].

Saatavissa: <http://atlantiscyberspace.com/company.html>

Autodesk, 2005 A. 3ds Max 8. User Reference [käyttöohjetiedosto]
Lofting [viitattu 22.2.2007]

Autodesk, 2005 B. 3ds Max 8. User Reference [käyttöohjetiedosto],
Material Editor [viitattu 25.2.2007]

Autodesk, 2005 C. 3ds Max 8. User Reference [käyttöohjetiedosto],
Types of Materials [viitattu 25.2.2007]

Autodesk, 2005 D. 3ds Max 8. User Reference [käyttöohjetiedosto],
Kinds of Compound Materials [viitattu 25.2.2007]

Autodesk, 2005 E. 3ds Max 8. User Reference [käyttöohjetiedosto],
Choosing Colors for Realism [viitattu 25.2.2007]

Autodesk, 2005 F. 3ds Max 8. User Reference [käyttöohjetiedosto], Metal Shader [viitattu 25.2.2007]

Autodesk, 2005 G. 3ds Max 8. User Reference [käyttöohjetiedosto], UVW Map Modifier [viitattu 26.2.2007]

Autodesk, 2005 H. 3ds Max 8. User Reference [käyttöohjetiedosto], Properties of Light [viitattu 27.2.2007]

Autodesk, 2005 I. 3ds Max 8. User Reference [käyttöohjetiedosto], Guidelines for Lighting [viitattu 27.2.2007]

Autodesk, 2005 J. 3ds Max 8. User Reference [käyttöohjetiedosto], Photometric Lights [viitattu 27.2.2007]

Azuma, Ronald T. 2005. Augmented Reality [verkkojulkaisu] University of North Carolina [viitattu 18.2.2007] Saatavissa: http://www.cs.unc.edu/~azuma/azuma_AR.html

Carlson, Wayne. 2003. Critical History of Computer Graphics and Animation, Virtual Reality [verkkojulkaisu]. The Ohio State University [viitattu 14.2.2007] Saatavissa: <http://accad.osu.edu/~waynec/history/lesson17.html>

Hamish, Taylor. 2005. Virtual Environments, BOOM Display [verkkojulkaisu] Heriot-Watt University [viitattu 18.2.2007] Saatavissa: <http://www.macs.hw.ac.uk/~hamish/9ig2/topic22.html>

Hamza-Lup, Felix G. 2001. A Distributed Augmented Reality System for Medical Training and Simulation [verkkojulkaisu]. [viitattu 20.2.2007]. Saatavissa: <http://www.cs.ucf.edu/~ceh/Publications/Papers/Content/Link04Hamza-LupRollandHughes.pdf>

Hellman, Tapio. 2007. VR-Laboratorio [verkkojulkaisu]. Seinäjoen Ammattikorkeakoulu [viitattu 18.2.2007]. Saatavissa: <http://www.seamk.fi/?Deptid=618>

Microsoft. 2007 A. Microsoft DirectX Technology Overview [verkkójulkaisu]. Microsoft Corporation [viitattu 26.2.2007]. Saatavissa: <http://www.microsoft.com/windows/directx/productinfo/overview/default.msp>

Microsoft. 2007 B. DDS File Layout for Textures [verkkójulkaisu]. Microsoft Corporation [viitattu 26.2.2007]. Saatavissa: http://msdn.microsoft.com/archive/default.asp?url=/archive/en-us/directx9_c_summer_03/directx/graphics/reference/ddsfilereference/ddstextures.asp

NCSA, National Center for Supercomputing Applications 2004. The CAVE™ at NCSA [verkkójulkaisu] [viitattu 18.2.2007] Saatavissa: <http://cave.ncsa.uiuc.edu/about.html>

Ranta, Pekka. 2003. Virtuaalitodellisuus opiskeluympäristönä [verkkójulkaisu] Hypermedialaboratorio. Tampereen teknillinen yliopisto. [viitattu 21.2.2007] Saatavissa: http://www.uta.fi/laitokset/ISI/julkaisut/Virtuaalitodellisuus_opiskeluyp_loppuraportti.pdf

Ryan, Christopher. 1.4.2001 Virtual Reality in Marketing [verkkójulkaisu] AllBusiness [viitattu 21.2.2007] Saatavissa rekisteröitymällä palveluun: <http://www.allbusiness.com/technology/internet-technology/788154-2.html>

STC Simulator Training. 2007. SimBus driving simulator [verkkójulkaisu]. STC Simulator Training Centre [viitattu 19.2.2007] Saatavissa: <http://www.simulatortraining.fi/>

Thalmann, Nadia Magnenat. 1991. 3D-devices and Virtual Reality in human animation [verkkójulkaisu] University of Geneva [viitattu 16.2.2007] Saatavissa: http://vrlab.epfl.ch/Publications/pdf/Magnenat_Thalmann_Thalmann_EGAS_91.pdf

Virtual Reality Medical Center. 2007 Virtual Reality Therapy [verkkójulkaisu]. [viitattu 20.2.2007] Saatavissa:

<http://www.vrphobia.com/therapy.htm>

VSTEP, Virtual Safety Training & Education Platform. 2007. Scenario Training [verkkojulkaisu] [viitattu 21.2.2007] Saatavissa:

<http://www.vstep.nl/>

Weiss, Patrice & Jessel, Adam S. 1998 Virtual Reality Applications to Work [verkkojulkaisu]. Adaptive Technology Resource Centre, University of Toronto [viitattu 19.2.2007].

Saatavissa: <http://www.utoronto.ca/atrc/rd/library/papers/weiss.html>

Wikipedia. 2007. Head-mounted display [verkkojulkaisu]. Wikipedia, the free encyclopedia [viitattu 20.2.2007]. Saatavissa:

http://en.wikipedia.org/wiki/Head-mounted_display

KUVALÄHTEET

ACDSee. 2005. Flight safety [verkkojulkaisu] [viitattu 20.2.2007].

Saatavissa:

<http://www.acdsee.com/community/articles/softwaretips/article?id=2005-08-16>

Atlantic Cyberspace. 2004. Immersive Group Simulation [verkkojulkaisu] [viitattu 20.2.2007].

Saatavissa: <http://atlantiscyberspace.com/company.html>

Autodesk, 2005 G. 3ds Max 8. User Reference [käyttöohjetiedosto], UVW Map Modifier [viitattu 26.2.2007]

Autodesk, 2005 H. 3ds Max 8. User Reference [käyttöohjetiedosto], Properties of Light [viitattu 27.2.2007]

Autodesk, 2005 J. 3ds Max 8. User Reference [käyttöohjetiedosto], Photometric Lights [viitattu 27.2.2007]

Carlson, Wayne. 2003. Critical History of Computer Graphics and Animation, Virtual Reality [verkkojulkaisu]. The Ohio State University [viitattu 14.2.2007] Saatavissa:

<http://accad.osu.edu/~waynec/history/lesson17.html>

Hamish, Taylor. 2005. Virtual Environments, BOOM Display [verkkojulkaisu] Heriot-Watt University [viitattu 18.2.2007] Saatavissa: <http://www.macs.hw.ac.uk/~hamish/9ig2/topic22.html>

Hamza-Lup, Felix G. 2001. A Distributed Augmented Reality System for Medical Training and Simulation [verkkojulkaisu]. [viitattu 20.2.2007]. Saatavissa: <http://www.cs.ucf.edu/~ceh/Publications/Papers/Content/Link04Hamza-LupRollandHughes.pdf>

Hellman, Tapio. 2007. VR-Laboratorio [verkkojulkaisu]. Seinäjoen Ammattikorkeakoulu [viitattu 18.2.2007]. Saatavissa: <http://www.seamk.fi/?Deptid=618>

Hintikka, Kari. Kojo, Ilpo & Metsämäki, Markku. 1998. Virtuaaliympäristöjen suunnitteluopas. Helsinki: Edita.

Kämppe, Toni. 2005. Lahden Ammattikorkeakoulu.

Kämppe, Toni. 2007. Lahden Ammattikorkeakoulu.

Lehtovirta, Pekka & Nuutinen, Kari. 2000. 3D: 3D-sisältötuotannon peruskirja. Jyväskylä: Gummerus

NCSA, National Center for Supercomputing Applications 2004. The CAVE™ at NCSA [verkkojulkaisu] [viitattu 18.2.2007] Saatavissa: <http://cave.ncsa.uiuc.edu/about.html>

Ranta, Pekka. 2003. Virtuaalitodellisuus opiskeluympäristönä [verkkojulkaisu] Hypermedialaboratorio. Tampereen teknillinen yliopisto. [viitattu 21.2.2007] Saatavissa: http://www.uta.fi/laitokset/ISI/julkaisut/Virtuaalitodellisuus_opiskeluyp_loppuraportti.pdf

STC Simulator Training. 2007. SimBus driving simulator [verkkojulkaisu]. STC Simulator Training Centre [viitattu 19.2.2007] Saatavissa: <http://www.simulatortraining.fi/>

VSTEP, Virtual Safety Training & Education Platform. 2007. Scenario Training [verkkojulkaisu] [viitattu 21.2.2007] Saatavissa:

<http://www.vstep.nl/>

Wikipedia. 2007. Head-mounted display [verkkojulkaisu]. Wikipedia, the free encyclopedia [viitattu 20.2.2007]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Head-mounted_display

LIITTEET

Liite-CD, sisältö:

Opinnäytetyö (PDF-tiedosto)

Sähköiset lähteet