

Vuorovaikutteiset veisto-ohjelmat

Nina Sainio

Tampereen yliopisto
Tietojenkäsittelytieteiden laitos
Tietojenkäsittelyoppi
Pro gradu -tutkielma
Ohjaaja: Roope Raisamo
Joulukuu 2005

Tampereen yliopisto
Tietojenkäsittelytieteiden laitos
Tietojenkäsittelyoppi
Nina Sainio: Vuorovaikutteiset veisto-ohjelmat
Pro gradu -tutkielma, 81 sivua, 6 liitesivua
Joulukuu 2005

Tässä tutkielmassa perehdytään vuorovaikutteisiin kolmiulotteisiin veisto-ohjelmiin. Veisto-ohjelmilla voidaan luoda luonnollisella tavalla kolmiulotteisia kappaleita. Sana *veistäminen* jo kertoo, että veisto-ohjelmat ovat taiteellisia 3D-mallinnusohjelmia, joita käyttäekseen ei tarvitse osata ohjelmointia tai matemaatiikkaa. Tässä tutkimuksessa pohditaan sitä, millaisia veisto-ohjelmat pääpiirteittäin ovat, minkälaisia teorioita veisto-ohjelmien taustalla on, ja miten veisto-ohjelmat eroavat muista 3D-mallinnustavoista. Tämän lisäksi tutkimuksessani keskitytään erityisesti siihen, miten 3D-maailmassa käyttäjän hahmottamista voidaan parantaa erityisten hahmotustyökalujen tai tuntopalautteen avulla. Tätä varten Tampereen yliopiston tietojenkäsittelytieteiden laitoksella on toteutettu veistosovelluksille tyypillistä suorakäyttöisyyttä ja kaksikäisyyttä hyödyntävä prototyyppi 3D-veisto-ohjelmasta, jonka avulla voidaan tutkia kolmiulotteisen maailman hahmottamista ja sitä, miten käyttäjät toimivat, kun he saavat taktiilipalautteen työkalun koskiessa kappaleen pintaa.

Avainsanat ja -sanonnat: veisto-ohjelmat, kolmiulotteisuus, vuorovaikutteisuus, suorakäyttöisyys, kaksikäisyys, tuntopalaute, hahmottaminen.

Sisällysluettelo

1.	Johdanto	2
2.	Veisto-ohjelmiin vaikuttavia teorioita ja käytäntöjä.....	5
2.1.	Suorakäyttöisyys käyttöliittymässä.....	5
2.2.	Kaksikäisyys käyttöliittymässä.....	7
2.2.1.	Tutkimuksia kaksikäisyyden vaikutuksista.....	7
2.2.2.	Motoriikka	10
2.3.	Havaitsemisen ja tulkinnan teoriaa	11
2.3.1.	Aistiärsykkeestä tulkinnaksi.....	11
2.3.2.	3D-kappale kaksiulotteisessa ympäristössä	13
2.4.	Tuntopalaute osana veisto-ohjelmaa.....	14
2.4.1.	Yleistä tuntopalautteesta	15
2.4.2.	Tuntopalautteeseen vaikuttava päätekijä – tuntoaisti	16
2.4.3.	Aistipalautteiden sopivuus	19
2.5.	Metaforat ja niiden merkitys	22
2.6.	Lopuksi	23
3.	Kolmiulotteinen kappale tietokoneella	25
3.1.	Suorakäyttöisyyttä, valikoita ja komentoja - Maya.....	25
3.2.	3D-skannaus – XYZ RGB	28
3.3.	Koodilla kolmiulotteisuutta – Povray	30
3.4.	Veistään 3D-taiteilijaksi – Freeform.....	32
3.5.	Sovellusalueita.....	33
3.6.	Lopuksi	35
4.	Veisto-ohjelmiin sopivia syöttölaitteita.....	36
4.1.	Syöttölaitteiden lajittelua	36
4.2.	Kuudensuunnan ohjaimet	37
4.2.1.	Avaruushiiret - SpaceMouse ja SpaceBall	38
4.2.2.	Sensable PHANTOM.....	40
4.3.	3D-Ohjaussauvat	41
4.4.	Datahanska.....	42
4.5.	2D-Hiiret.....	44
4.6.	Pohdintoja syöttölaitteiden sopivuudesta veisto-ohjelmiin	44
4.7.	Lopuksi	47
5.	Veisto-ohjelmia	48
5.1.	Veisto-ohjelmat synnystä nykypäivään.....	48
5.2.	Veisto-ohjelmien yleisiä piirteitä.....	48
5.3.	Työkaluja	50

5.4.	Laskennallisten ja taiteellisten mallinnusohjelmien eroja	52
5.5.	Lopuksi	54
6.	Veisto-ohjelmien käytettävyys	55
6.1.	Tutkitun veisto-ohjelman kuvaus.....	55
6.2.	Testi 1 – Hahmotustyökalujen käyttäminen	57
6.2.1.	Ongelmanasettelu	57
6.2.2.	Testihenkilöt.....	57
6.2.3.	Valmistelut ennen testiä ja testitehtävät	58
6.2.4.	Testaustulokset	59
6.2.5.	Parannusehdotuksia	61
6.2.6.	Yhteenvedo.....	62
6.3.	Testi 2 – Taktiilipalaute osana veisto-ohjelmaa	63
6.3.1.	Ongelman asettelu	63
6.3.2.	Testihenkilöt.....	64
6.3.3.	Valmistelut ennen testiä ja testitehtävät	65
6.3.4.	Testaustulokset	66
6.3.5.	Yhteenvedo.....	68
6.4.	Tulevaisuuden näkymiä.....	69
7.	Pohdintaa.....	71
8.	Yhteenvedo.....	74
	Viiteluettelo.....	77
	Liitteet	

Kiitokset

Tämä työ olisi tuskin koskaan valmistunut, jollen olisi saanut opintovapaata työelämästä tätä työtä varten. Näin ollen tahdon erityisesti kiittää esimiehiäni Juhaa, Timoa ja Lauria, jotka suhtautuivat tähän projektiin koko ajan kannustavasti. Heidän lisäksi haluan kiittää rakkaita ystäviäni ja työkavereitani, jotka jaksoivat päivästä toiseen muistuttaa tämän työn keskeneräisyydestä! :)

Kiitokset myös työni ohjaajalle Roope Raisamolle asiantuntevasta ja pitkäkestoisesta ohjauksesta.

Kiitokset myös äidille, isälle ja Teemulle kaikista näistä vuosista ja kannustuksesta, jota teiltä olen saanut! Olette rakkaita!

Erityiskiitos Jyrkille tähän työhön liittyvästä asiantuntemuksesta, prototyypin toteutuksesta ja ennen kaikkea yhteisistä vuosista ja siitä, että olet jaksanut kannustaa ja olla tukena ja turvana!

1. Johdanto

Ajatus 3D-veistämisestä on peräisin jo 1970-luvun lopulta. 3D-mallit olivat tuolloin vielä vain hyvin yksinkertaisia rautalankamalleja [Parent, 1977]. Rautalankamalleista siirryttiin 1990-luvun alkupuolella varsinaiseen veistämiseen, kun Galyean ja Hughes [Galyean and Hughes, 1991] kehittivät pursottamiseen tarkoitetun työkalun. Pursotustyökalun avulla voitiin lisätä käsiteltävään kappaleeseen lisää massaa. Myöhemmin pursotustyökalu on saanut rinnalleen muun muassa työkalun, jolla kappaleesta voitiin kaivertaa materiaa pois sekä erilaisia leikkaus- ja maalaustyökaluja. Tämänhetkisin veisto-ohjelmilla pystyy tekemään jo lähes kaiken, mitä taiteilija pystyy verstaassaan omilla käsillään savimassalle veistäessään tekemään. Joissakin tapauksissa veistosovelluksissa on jopa enemmän mahdollisuuksia muotoilla kappaletta kuin reaalielämässä, kun työkaluista voi muovailta halutunlaisia – pajan työkalujen muotoilu halutunlaiseksi ei aina ole mahdollista.

Veisto-ohjelmat eroavat tavallisista 3D-mallinnusohjelmista siten, ettei käyttäjän tarvitse tuntea matematiikkaan tai ohjelmointiin perustuvaa mallinnusmenetelmää tai ohjelman syvällistä käyttöä, vaan hän voi toimia kuten taiteilija, luoden esineitä ja kappaleita vapaasti käsillään ja reaalielämän työkaluja vastaavilla, virtuaalisilla työkaluilla. Veisto-ohjelmien lopputuotokset ovat yleensä matemaattisesti epätarkempia kuin yleisimpien 3D-mallinnusohjelmien tuotokset [Galyean and Hughes, 1991], eivätkä ne siksi sinänsä kilpaile 3D-mallinnusohjelmien kanssa. Veisto-ohjelmat antavat mahdollisuuden 3D-kappaleiden tekemiseen suoraan tietokoneelle esimerkiksi elokuva-alalla työskenteleville kuvanveistäjille ja muille taiteilijoille, jotka suunnittelevat erilaisia kolmiulotteisia hahmoja, mutta jotka eivät ole tottuneita 3D-mallinnusohjelmien käyttäjiä. Ohjelman käyttämisen tulisi kuvata mahdollisimman hyvin todellista veistämistilannetta.

Veisto-ohjelmat ovat käyttötapsansa perusteella suorakäyttöisiä ohjelmia. Suorakäyttöisyydelle voidaan määritellä erilaisia tasoja sen mukaan, kuinka paljon sovelluksessa on hyödynnetty suorakäyttöisyyden periaatteita [Hutchins *et al.*, 1986]. Suorakäyttöisyyden periaatteen mukaan käyttäjän ei esimerkiksi tarvitse hakea komentoja tekstipohjaisista valikoista, vaan komennot suoritetaan fyysisinä toimintoina tai napinpainalluksina. Tavallinen graafinen käyttöliittymä voi siis myös olla suorakäyttöinen, sillä käyttäjä pystyy esimerkiksi osoittamaan ja valitsemaan hiiren cursorin avulla painikkeita ja nappuloita. Veistosovellusten kaltaiset ohjelmat menevät usein suorakäyttöisyydessään yksinkertaista graafista käyttöliittymää pidemmälle tuoden ohjelman toiminnot vielä helpommin saataville. Veisto-ohjelmassa voidaan silti käyttää esimerkiksi

erilaisia valikkoja ja paletteja toimintojen luokitteluun, mutta tekstipohjaisten valikoiden sijaan niissä voidaan käyttää toimintoja kuvaavia kuvakkeita.

Suorakäyttöisessä käyttöliittymässä toiminnot ovat nopeita, toisiaan täydentäviä ja helposti peruutettavissa sekä usein käyttäjällä on mahdollisuus tehdä haluamansa toiminnot missä järjestyksessä tahansa. Lisäksi suoritettujen toimintojen tulokset näytetään käyttäjälle reaaliaikaisesti [Shneiderman, 1982]. Hyvin toimivat toiminnot ja työkalut ovat sovelluksissa oleellisia miellyttävän käyttökokemuksen saamiseksi. Kolmiulotteiseen maailmaan siirryttäessä toimintojen, ohjaimien ja työkalujen käytettävyyttä ainoastaan korostuu, sillä 3D-maailma tuo uusia haasteita, joihin käyttäjän on keskityttävä.

Tietokoneruudulla on vaikea hahmottaa kolmiulotteista avaruutta näytön kaksikulotteisuudesta johtuen [Nielson and Olsen, 1987]. Kolmiulotteisen avaruuden ymmärtäminen vaatii tietoa siitä, miten päin maailmaa tai kappaletta käyttäjä tarkastelee. Ihminen havainnoi jokapäiväisessä elämässään hyvin kolmiulotteisuutta, mutta abstraktimpaan 3D-ympäristöön siirryttäessä ihmisen on vaikeampi ajatella etäisyyksiä ja varsinkin syvyyttä [Hinckley *et al.*, 1994]. Veisto-ohjelmassa pitäisi kuitenkin pystyä havainnoimaan jokaista kolmea suuntaa tarkasti, vaikka maailmaa pyöriteltäisiin koneen ruudulla alkutilanteen jälkeen.

Kolmiulotteisuuden hahmottamisen lisäksi käyttäjää saattaa joissakin veistosovelluksissa aluksi hämmentää mahdollinen kaksikäsinen käyttöliittymä. Maailmaa ja veistettävää kappaletta voidaan käänellä ja tutkia molempia käsiä luonnollisesti hyväksi käyttäen. Kappaleen pyörittely toisella kädellä ja itse veistotyökalun liikuttaminen toisella voi tuottaa käyttäjälle aluksi lievää hämmennystä, koska yleensä tietokonetta käytetään vain yksikäsinen. Loppujen lopuksi käsien rinnakkaiskäyttö ja yhteistyö tuntuneen kuitenkin luontevalta. William Buxton ja Brad A. Myers [Buxton and Myers, 1986] huomasivat tutkimuksissaan, että kahden käden yhteiskäyttö ja ohjaimien oppiminen mahdollistavat tehokkaamman työskentelyn, kuin jos sama työ tehtäisiin vain yhtä kättä käyttämällä. Tehokkuus kasvaa molempia käsiä käytettäessä, kun turhaa aikaa ei kulu siihen, että käyttäjä yrittää yhdellä kädellä tehdä kahden käden työmäärän.

Veisto-ohjelmat eivät ole vielä laajasti yleistyneet, eikä olemassa olevien sovellusten toiminnot ja ohjaimet ole yhtenäistyneet. Ohjaimina veisto-ohjelmissa käytetään niin tavallista hiirtä ja näppäimistöä kuin keskivertokäyttäjälle vieraampia välineitä, kuten esimerkiksi 3D-hiirtä tai tuntopalautteen antavaa PHANTOM-laitetta [Sensable 2005a]. Kolmiulotteisen kappaleen käsitteleminen tuntopalautelaitteen kanssa voi auttaa käyttäjää havainnoimaan huomattavasti paremmin, kun aistipalaute ei ole vain visuaalisten viestien varassa. Kaksikäsisuus ja ohjainvalinnat saattavat aiheuttaa tyypilliseen PC-työskentelyyn

tottuneelle aluksi kognitiivisia lisäponnisteluja, kun uudet työskentelytavat vaativat keskittymistä.

Tässä tutkielmassa perehdytään vuorovaikutteisiin 3D-veisto-ohjelmiin. Tutkimuksessani tulen tarkastelemaan, miten 3D-maailmassa käyttäjän hahmottamista voidaan parantaa erityisten hahmotustyökalujen tai tuntopalautteen avulla. Tutkimuksessani käytetään Tampereen yliopiston tietojenkäsittelytieteiden laitoksella suunniteltua ja toteutettua, veistosovelluksille tyypillistä suorakäyttöisyyttä ja kaksikäisyyttä hyödyntävää veisto-ohjelmaa [Parviainen, 2004].

Seuraavassa luvussa on tarkemmin esitelty yleisesti veisto-ohjelmien syntyyn ja kehitykseen vaikuttavia teorioita. Käsittelen erikseen suorakäyttöisyyden, kaksikäisyyden, tuntopalautteen ja metaforien merkityksen sovelluksille. Luvussa kolme on esitelty erilaisia tapoja mallintaa kolmiulotteisia kappaleita, taiteellisten ja laskennallisten mallinnussovellusten eroja ja sovellusalueita, joissa kolmiulotteista grafiikkaa voidaan käyttää. Neljännessä luvussa keskitytään veisto-ohjelmiin sopivien syöttölaitteiden esittelyyn ja viidennessä keskitytään yleisesti olemassa oleviin veisto-ohjelmiin. Luvussa kuusi esittelen tähän tutkimukseen tehtyjen testieni tuloksia hahmottamisesta ja taktiilipalautteen vaikutuksista. Tutkielman toiseksi viimeisessä, seitsemännessä luvussa kokoan yhteen tutkielmassani havaitut tulokset sekä pohdin veisto-ohjelmien tulevaisuutta. Luvussa kahdeksan teen yhteenvedon tästä tutkielmasta.

2. Veisto-ohjelmiin vaikuttavia teorioita ja käytäntöjä

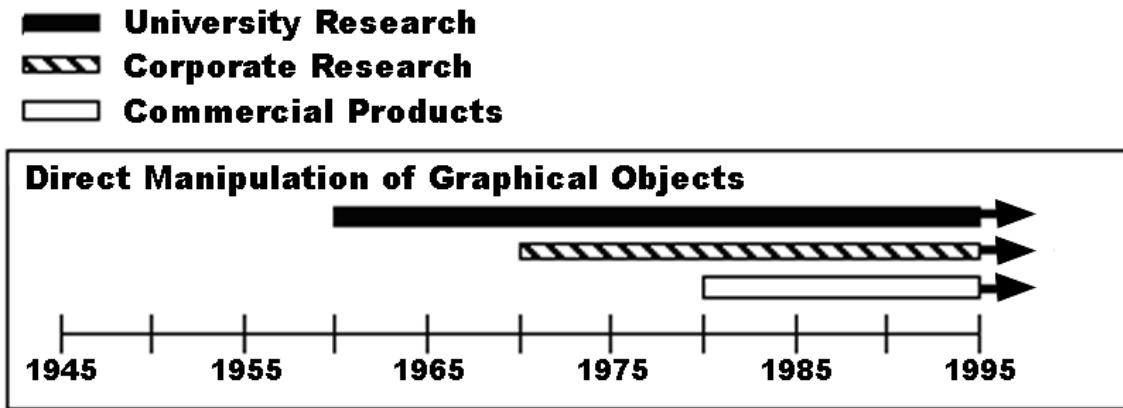
Veisto-ohjelmat voivat olla monella tapaa erilaisia kuin tietokoneen perussovellukset. Veisto-ohjelmilla on yleisesti ottaen taustalla muutamia peruspiirteitä, jotka ovat muokanneet niistä nykypäivän veisto-ohjelmien kaltaisia; veisto-ohjelmat ovat suorakäyttöisiä 3D-ohjelmia ja joissakin tapauksissa niihin on toteutettu tuntopalaute ja niitä voidaan käyttää yhtäaikaaisesti molempia käsiä käyttäen. Kolmiulotteisuuden havainnoiminen ja kappaleiden koskettelu on ihmisille arkipäiväistä. Kuitenkin kaksiulotteisessa maailmassa, kuten tietokoneruudulla, kolmiulotteisen kappaleen hahmottaminen on hyvin erilaista kuin mihin jokapäiväisessä elämässä ihminen on tottunut, eikä tuntopalaute välttämättä vastaa tarkalleen reaali maailmaa. Tämän luvun lopuksi käsitellään metaforia, joiden avulla voidaan luoda vertauskuvia todellisesta maailmasta tietokonesovelluksiin. Tässä luvussa keskitytään edellä mainittujen veisto-ohjelman piirteiden tuomiin mahdollisiin ongelmiin, vaikutuksiin ja etuihin.

2.1. Suorakäyttöisyys käyttöliittymässä

Suorakäyttöisyys on saanut aikanaan alkunsa tarpeesta määritellä uudenlainen käyttöliittymä. Käyttöliittymän kautta suoritetaan toimintoja, eikä se saa monimutkaisuutensa takia olla este tehtävän tekemiselle. Vanhat komentopohjaiset käyttöliittymät vaativat paljon tietoa järjestelmästä ja komennoista, ennen kuin halutun tehtävän pystyi suorittamaan. Ben Shneiderman [1982] otti suorakäyttöisyyden määritelmän ensimmäisen kerran esille, kun hän mietti tehokkaampia ja helpompia tapoja vaikeiden komentopohjaisten käyttöliittymien käyttämiseksi. Shneiderman määritteli suorakäyttöisyyden käyttöliittymässä seuraavasti:

- monimutkaisten komentokielisten käskyjen sijaan tehtävät suoritetaan napin painalluksin ja erilaisin fyysisin toiminnoin, kuten osoittaen,
- toimintojen tulokset näkyvät välittömästi käyttäjälle, ja
- toimintojen pitää olla nopeasti lisättävissä ja näkyvillä sekä tarpeen tullen ne voisi peruuttaa.

Useimmat käyttöliittymät ovat 1980-luvulta lähtien olleet Shneidermanin määritelmän mukaisia suorakäyttöisiä käyttöliittymiä (kuva 1). Vaikka käsite suorakäyttöisyys on peräisin vasta Shneidermanilta, ensimmäinen suorakäyttöinen käyttöliittymä oli Ivan Sutherlandin SketchPad [Sutherland, 1963], joka mullisti vuonna 1963 käyttöliittymäsuunnittelun ikkunoineen ja kursorineen.



Kuva 1: Suorakäyttöisten käyttöliittymien kehittyminen.

Nykykäyttöliittymissä komentoja ei enää tarvitse kirjoittaa tai muistaa ulkoa vaan usein graafisessa maailmassa painetaan painikkeita ja käyttäjälle näytetään heti toimintojen seuraukset. Zieglerin ja Fähnrichin [Ziegler and Fähnrich, 1988] mukaan suorakäyttöisyys vanhoihin käyttöliittymiin verrattuna lisää muun muassa käyttäjien tunnetta siitä, että he hallitsevat järjestelmää ja että he pystyvät oppimaan ohjelman uudet piirteet helposti. Käyttäjien ilon ja hallinnan tunnetta lisää se, että he pystyvät peruuttamaan mahdolliset virhetoiminnot helposti, jolloin heidän kokeilunhalunsa ohjelman käyttöön kasvaa. Veisto-ohjelmissa ei itse asiassa varsinaista peruutustoimintaa tarvitsisi edes olla, sillä jos käyttäjä on esimerkiksi veistänyt sovelluksessa kappaleesta liian suuren osan pois, hän voi pursottaa massaa kappaleeseen pursotustyökalun avulla ja näin korjata tilanteen missä vaiheessa tahansa.

Käyttöliittymän käyttö helpottuu ja nopeutuu, kun ohjelman toiminnot tuodaan näkyville, kuten Shneiderman suosittelee. Tällöin niitä ei aina tarvitse etsiä valikoista tai antaa käskyjä kirjoittamalla jokin monimutkainenkin komento – kognitiivinen kuorma pienenee. Shneidermanin [Shneiderman, 1982] mukaan aloittelevat käyttäjät oppivat nopeasti ohjelman käytön, kun heidän ei aluksi tarvitse opetella suurta joukkoa komentoja. Kuitenkin samalla kokeneiden käyttäjien työteho paranee toimintojen muuttuessa helpommiksi ja nopeammiksi.

Veisto-ohjelmien peruseriaatteeseen kuuluu vapaus tekemisen ja luovuuden suhteen, jolloin suorakäyttöisyys on erinomainen pohja veisto-ohjelmille. Yksinkertaisessa veisto-ohjelmassa suorakäyttöinen käyttöliittymä voi tarkoittaa sitä, että veistotyökalujen valinnat ja ohjelman perustoiminnot olisivat omina painikkeinaan ja kaiken muun käyttäjä voisi tehdä esimerkiksi ohjaimilla. Esimerkiksi rullahiiren rullalla voisi muuttaa työkalujen kokoa, eikä sitä varten tarvitsisi olla erillistä kenttää, johon työkalun koko tulisi kirjoittaa.

Kehittyneemmissä veisto-ohjelmissä voi joutua joitakin toimintoja piilottaamaan valikoiden taakse, mutta mielestäni perustoiminnallisuus pitäisi veistsovelluksissa olla välittömästi käytettävissä ilman, että toimintoja etsitään valikoista. Suorakäyttöisen käyttöliittymän suunnittelussa parhaaseen tulokseen päästään, kun jokaista sovellusta arvioidaan itsenäisesti ja mietitään ohjaimien ja käyttötarkoituksen sekä tilanteen pohjalta oikea käyttöliittymäratkaisu.

Nykypäivän tietokoneenkäyttäjälle tuskin tulee onnistumisen elämyksiä suorakäyttöisistä käyttöliittymistä samoissa määrin kuin ensimmäisten käyttäjien keskuudessa tuli, sillä suorakäyttöisten käyttöliittymien levittyä kaikkialle ne ovat jokaisen käyttäjän ulottuvilla ja niihin on jo totuttu. Suorakäyttöisen käyttöliittymän esiinmarssi ja tietokoneiden nopea yleistyminen todistaneen muun muassa sen, että komentopohjaisten käyttöliittymien käyttö on ollut hankalaa, eivätkä käyttäjät ole pystyneet tekemään asioita siten kuin olisivat kenties halunneet.

2.2. Kaksikäisyys käyttöliittymässä

Tietokoneiden työ- ja kotikäyttö on lisääntynyt nopeasti, mutta tietokoneen ohjausmenetelmät ovat kuitenkin pitkään pysyneet samoina. Jokapäiväisessä elämässä keskivertokäyttäjä käyttää ainoastaan näppäimistöä ja hiirtä ja näitäkin usein eri aikaan. Uudenlaiset laitteet ja työtavat, kuten molempien käsien yhtäaikainen ohjaus, voivat hämmentää aluksi käyttäjiä, jotka ovat vuosia tottuneet ajattelemaan hiiren ja näppäimistön olevan ainoita mahdollisia syöttölaitteita. Tulevaisuudessa ohjaimet muuttuvat ja niistä voidaan tehdä esimerkiksi sellaisia, jotka tukevat ihmisen luonnollista tapaa käyttää tehtävässään kahta kättä.

2.2.1. Tutkimuksia kaksikäisyyden vaikutuksista

Buxton ja Myers [Buxton and Myers, 1986] tutkivat ensimmäisinä, miten kaksikäisyys vaikuttaa käyttöliittymiin. He tutkivat, millaisia eroja kaksikäisyydellä on yksikäisyyteen verrattuna ja saavutetaanko kaksikäisyydellä mitään etuja. Heidän mukaansa kaksikäisyys lisää tehokkuutta, kun molempia käsiä voidaan käyttää samanaikaisesti. Tällöin turhaa aikaa ei kulu, kun yhdellä kädellä yritetään tehdä molempien käsien työmäärä. Buxton ja Myers osoittivat pienellä kokeella, että ihmisille on luonnollista käyttää kahta kättä yhtäaikaisesti, vaikka käsien toimintaedellytykset ovat hyvin erilaiset. Kaksikäisyyden tuoma mahdollinen lisäponnistelu liittyykin enemmän uudenlaisten ohjaimien oppimiseen kuin molempien käsien yhtäaikaiseen käyttöön.

Leganchuk *et al.* [1998] ovat päätyneet Buxtonin ja Myersin kanssa samansuuntaisiin tuloksiin. He toteavat, että kahden käden käyttö tuo kahdenlaisia etuja: kognitiivisia ja manuaalisia. Työn tekeminen nopeutuu, kun työmäärä jakautuu kahdelle kädelle yhden sijaan. Heidän mukaansa myös kognitiivinen

kuorma pienentyy, kun käyttäjän ei tarvitse mielessään hahmottaa asioita niin paljon, kuin jos tehtävä tehtäisiin vain yhtä kättä käyttämällä. Ihmiselle on tyyppillistä hahmottaa ja havainnoida avaruudellisia asioita myös muiden aistien kuin näköaistin avulla. Tutkimuksissaan muun muassa Hinckley *et al.* [1994] totesivatkin kahden käden käytön lisäävän käyttäjän kolmiulotteisen maailman ymmärrystä ja hahmottamista.

Monet arkipäiväiset asiat tehdään molempia käsiä käyttämällä. Yksinkertaisetkin asiat voidaan tehdä käyttäen käsiä vuorotellen, rinnakkain tai yhtäaikaisesti. Reaalielämästä tutut käsien käyttötavat voidaan siirtää myös tietokonesovelluksiin, kunhan ymmärretään, miten ihminen luonnostaan käyttää käsiään toimiessaan. Esimerkiksi taiteilija pitää veistettävää puupalaa heikommassa kädessään ja veistotyökalua hallitsevassa kädessään. Taiteilijan tapa toimia voidaan myös toteuttaa esimerkiksi veistosovelluksessa, mutta sitä ennen on pohdittava tarkasti, miten taiteilija käsittelisi puukappaletta normaalisti työpajallaan. Heikommalla kädellään hän kääntää puupalaa, jotta vahvempi käsi voisi kaivertaa helpommin ja tehdä tarkemman työn. Tällöin heikomman käden toiminta ikään kuin siirtyy vahvemmalle kädelle [Guiard, 1987].

Guiardin [Guiard, 1987] mukaan on olemassa myös muita tapoja käyttää käsiä; yleensä heikomman käden tehtävät ovat epätarkempia ja yksinkertaisempia, jolloin se toimii dominoivan käden tukena, apuna ja viitekehyksenä. Hallitsevan ja heikomman käden toimintaedellytykset ovat siis huomattavan erilaiset, mutta yhdessä ne pystyvät toimimaan luontevasti parina ja tekemään monimutkaisia asioita niin arkielämässä kuin hyvin toteutetulla tietokonesovelluksellakin. On silti syytä muistaa, ettei kahden käden käytön kopioiminen reaali maailmasta suoraan sellaisenaan tietokoneohjelmaan ole aina suotavaa ja järkevää, vaan jokaisessa sovelluksessa on syytä arvioida, millaisia syöttölaitteita käytetään missäkin tarkoituksessa. Esimerkiksi taiteilijan maalatessa hän pitää väripalettia vasemmassa kädessään, mutta ei ole tarkoituksen mukaista sitoa tietokonesovelluksessa käyttäjän vasenta kättä siihen, että hänen pitäisi kannatella kuvitteellista väripalettia.

Syitä siihen, miksi kädet toimivat keskenään erilailla on tutkittu jo pitkään. Käsien suorituseroista tilanteissa, joissa liikkeet tehdään nopeasti kohdistuen tiettyyn paikkaan, on olemassa kolme teoriaa. Teoriat eivät selitä tarkasti käsien eroja, mutta tutkimustuloksia apuna käyttäen on mahdollista kehittää käyttöliittymistä toimivampia, kun tunnistetaan dominoivan ja heikomman käden suorituskykyeroja erilaisissa tilanteissa.

Ensimmäisen teorian mukaan vahvempi käsi tekee asiat luonnostaan tarkemmin kuin heikompi ja käden liikkeet ja toiminnot ovat häiriöttömimpiä ja näin ollen virhetoiminnot vähentyvät. Erään tutkimuksen mukaan [Schmidt *et*

al., 1979] virheiden määrä kasvaa silloin, mitä laajemmin tai nopeammin liike tehdään, sillä liikkeeseen kohdistuu tällöin suurempi voima kuin jos sama liike tehtäisiin pienempänä ja hitaampana. Tämä johtaa taas siihen, että liikkeen suorittamiseen vaikuttaa useampi tekijä, jolloin on mahdollisuus tehdä enemmän virheitä ja olla epätarkempi aiotussa tehtävässä. Heikommalle kädelle ei tulisi-kaan tämän teorian mukaan antaa tehtäviä, jotka vaativat tarkkuutta.

Toisen teorian mukaan vahvemman ja heikomman käden eroja selittää se, että kädet hallitsevat erilailla aistipalautteen [Flowers, 1975]. Flowersin testit osoittivat muun muassa, että käsien erot syntyivät, kun koehenkilöiden tuli naputtaa käsillään kahta eri kohdetta. Hallitseva käsi suoriutui huomattavasti paremmin tehtävässä, jossa voitiin hyödyntää aistihavainnoilla saatua palautetta. Teoriaa on kuitenkin kritisoitu, koska ei ole voitu näyttää toteen, ettei paremman käden tuloksia selittäisi esimerkiksi harjoittelun määrä, tottuneisuus tai yleinen hallitsevan käden parempi taitotaso. Kuitenkin siitä huolimatta, mistä käsien erot johtuvat, on selvää, että heikommalle kädelle on luonnollisempaa antaa yksinkertaisempia ja hallittavampia tehtäviä.

Kolmannen teorian mukaan heikomman käden suoriutumista tietyistä tehtävistä vahvempaa kättä jopa paremmin voidaan ennustaa, kun kyseessä on laajemmat liikkeet ja suuremmat etäisyydet [Todor and Doane, 1978]. On siis mahdollista, että heikommallekin kädelle voidaan antaa vaativia tehtäviä, jos tehtävät vain sisältävät suuria kohteita ja pitkiä etäisyyksiä. Teorian mukaan kohdistettaessa etäällä oleviin kohteisiin pitää ensiksi liikkua kohteen luo ja sen jälkeen hakeutua tarkasti kohteeseen. Ensimmäinen vaihe voidaan suorittaa nopeasti, mutta tarkkuutta vaativa kohteeseen kohdentaminen on teorian mukaan hitaampi vaihe, koska kohdistaminen vaatii näköaistin tulkintaa ja hallintaa. Todor ja Doanen mukaan tehtävissä, joissa oli sama vaikeusaste ja joissa kohdistettiin kauemmas ja suurempiin kohteisiin, heikompi käsi suoriutui vahvempaa kättä paremmin tehtävissä.

Sen lisäksi, että yleensä ihmisillä on selvästi hallitsevampi ja heikompi käsi, vaikuttaa liikkeiden tarkkuuteen ja esimerkiksi osoittamisen onnistumiseen muutkin asiat. Fittsin [Fitts, 1954] julkaiseman teorian mukaan kohteen osoittamiseen kulutettavan ajan voi ennustaa, kun tunnetaan kohteen koko ja etäisyys. Fittsin lakia testattiin tilanteissa, joissa liukukytkimiä ja muita yhteen suuntaan kulkevia säätimiä kohdennettiin tiettyyn tarkkuuteen ja arvioitiin kohdistamiseen kuluva aika. Fittsin 50-luvulla johtama laki perustuu vain yksiulotteiseen osoittamiseen ja sitä onkin laajennettu myöhemmin. MacKenzie ja Buxton [MacKenzie and Buxton, 1992] totesivat, että tietokoneiden graafisten käyttöliittymien yleistyessä 1980-luvulla osoitettavat kohteet olivatkin enemmän kaksiulotteisia ikoneita kuin yksiulotteisia säätimiä. Heidän testeissään

osoittautui, että kohdistettavan kohteen muoto ja koko vaikuttivat huomattavasti siihen, kuinka nopeasti ja tarkasti käyttäjä pystyi kohdistamaan syöttölaitteensa kohteeseen. Mackenzien ja Buxtonin laajennettua lakia voi soveltaa myös kolmiulotteiseen maailmaan [McGee *et al.*, 1997]. McGee *et al.* mukaan lakia voidaan yleistää kahden käden käyttöliittymiin ja tapauksiin, joissa kohdetta pyritään osoittamaan molempien käsien yhteistyön tuloksena tai siten, että molemmat kursorit osoittavat samaan kohteeseen. Fittsin laajennettu laki on toimiva ja sillä on voitu suunnitella toimivampia käyttöliittymäosia veistohjelman kaltaisiin käyttöliittymiin.

2.2.2. Motoriikka

Motoriikka tarkoittaa kaikkea liikkeeseen, liike- ja lihastoimintoihin liittyvää toimintaa. Motoriikan voidaan ajatella olevan yksilön ruumiinliikkeiden järjestyntynyt kokonaisuus [Aikio, 1994]. Motoristen taitojen kehittyminen vaikuttaa ratkaisevasti ihmisen toiminnan tasoon ja suorituskyykyyn. Motorinen kehitys ja liikkuminen ovat synnynnäisiä, ja jokainen lapsi tutustuu ympäristöönsä liikehämällä ja perustaa maailmankuvansa havaintojensa ja liikkeidensä avulla. Tämän vuoksi lapsen motorisen kehityksen kannalta ovat erityisen tärkeitä erilaiset leikit ja pelit, joissa lapsi oppii kehon hallintaa ja hahmottaa maailmaa kokonaisvaltaisesti. Kehitys on lapsen ja ympäristön välistä vuorovaikutusta – aktiivista yhteispeliä monipuolisten perustaitojen hankkimisessa.

Liikunnallinen ja motorinen kehitys on kiinteä osa muuta kehitystä. Kehittyminen on kokonaisvaltaista; kypsyminen ja oppiminen ovat jatkuvassa vuorovaikutuksessa keskenään. Kehitykseen vaikuttavat hermoston, eri aistien ja liikunta- ja tukielimistön kehittyminen, lapsen tiedollinen ja tunne-elämän kehitystaso. Osa liikunnallisesta kehityksestä tapahtuu lähes pelkästään kypsymisen seurauksena. [Egidius, 1980]

Pienen lapsen fyysiset ja psyykkiset osa-alueet eivät ole eriytyneet toisistaan, vaan fyysinen toiminta on aina samalla psyykinen tapahtuma. Aivojen ydinosa on voiman keskus ja sen säätely lisääntyy aivojen ja hermoston kehityksen myötä ja siirtyy lopuksi aivojen kuorikerroksen eri toimintoja ohjaavalle alueelle. Psyykinen tieto ottaa vähitellen fyysisen liikkumisen ohjattavakseen. [Egidius, 1980]

Motoriikka voidaan jakaa seuraaviin osa-alueisiin [Suomi *et al.*, 2005]:

- **Puhe-elinten motoriikka:** Mahdollistaa puheen kehittymisen suunseudun lihasten kehittyessä.
- **Kehon tuntemus:** Lisää ymmärrystä omasta kehosta ja sen suhteesta ympäröivään maailmaan.
- **Avaruudelliset suhteet:** Luo käsityksen suunnasta, ajasta ja paikasta.

- **Tasapaino ja koordinaatio:** Mahdollistaa muun muassa kävelyn ja osoittamisen kehon kontrollin kasvaessa.
- **Karkea motoriikka:** Karkean motoriikan avulla laajojen liikealueiden motoriikan kehittyminen, tarkentuminen ja liikkumaan oppiminen ympäristön vuorovaikutuksessa mahdollistuu.
- **Silmän-käden/jalan koordinaatio:** Edellytys muun muassa tietyn kohteen koskettamiselle ja kohteeseen siirtymiselle silmän sekä käden/jalan koordinaation lisääntyessä ja parantuessa.
- **Kehon rytmi:** Kehon rytmien avulla on mahdollista tahdistaa liikkeet tiettyyn järjestykseen, tietyn ajan kuluessa tai aikana.
- **Kestävyys ja lihasvoima:** Peruskunnon ylläpitäminen mahdollistaa kestävyuden ja lihasvoiman.

Motoriikan avulla ihminen selviää arkipäiväisistä askareistaan rutiininomaisesti. Vaikeampia liikkeitä, esimerkiksi kärrynpyörää, meidän täytyy aktiivisesti harjoitella, kunnes olemme oppineet hallitsemaan kehoamme riittävästi liikkeen onnistumiseksi. Motoriikan kehittymisen ja harjoittelun avulla pystymme käyttämään molempia käsiä samanaikaisesti, vaikka teemmekin käsillä eri liikkeitä. Olemme tottuneet käyttämään tietokonetta ”yksikäätisesti” hiirellä, mutta kaksikäätisyyttä hyödyntävissä veisto-ohjelman kaltaisissa ohjelmissa voidaan käyttää molempia käsiä. Arkielämän kaksikäätisten askareiden opettamana käsien yhteiskäyttö tietokonesovelluksissa voi olla alusta alkaen luontevaa tai yleensä vähintäänkin helposti opittavaa.

2.3. Havaitsemisen ja tulkinnan teoriaa

Aiemmin tuli jo esille, että ihminen hahmottaa monin eri asioin kolmiulotteista maailmaa, eikä ainoastaan näköaistin avulla. Ihmisille kolmiulotteisen maailman havainnointi on helppoa ja jokapäiväistä [Hinckley *et al.*, 1994], eikä ihminen ilman kolmiulotteisuuden hahmottamisen kykyä edes selviäisi arkipäiväisistä asioista. Esimerkiksi jo kotona liikkuminen tai liikenteen seassa autoilu vaativat etäisyyksien havaitsemista.

2.3.1. Aistiärsykkeestä tulkinnaksi

Aistihavainnosta tulkinnan syntyyn vaikuttaa monet biologiset ja kognitiiviset tekijät. Tutkimuskenttä tältä alalta on suuri ja tähän on yritetty koota vain pääasiat, jotka vaikuttavat havaitsemisen ja tulkinnan muodostamiseen kohteena olevasta kappaleesta tai asiasta.

Tulkinnan syntyminen vaatii muodostuakseen aistiärsykkeen ja havainnon. Aistiärsyke voi olla minkä tahansa aistin, näkö-, kuulo-, maku-, tunto-, haju- tai tasapainoaistin aikaan saama. Veisto-ohjelmaa käytettäessä tärkein havainnoiva

aisti on näkö, sillä tietokoneen näytöllä kappale ei maistu, tuoksu, kuulosta tai tunnu yleensä miltään. Poikkeuksena ovat tuntopalautesyöttölaitteilla toimivat ohjelmat, joissa kappaleen muodon ja pinnan voi tuntea. Tällaisissa ohjelmissa tuntopalaute voi olla jopa tärkeämpi palautekanava kuin näkö, eikä siksi mitään aistia voi aliarvioida tulkintaa muodostettaessa. Arkielämässä ihminen havainnoi maailmaa monen aistin yhteisvaikutuksena. Ihminen kuulee kaupungilla kävellessään autojen äänet, haistaa kahvilasta tulevan pullantuoksun ja näkee töihin kiiruhtavat ihmiset.

Ihmisen näkö tarkkaavaisuudella ajatellaan olevan fokus eli valokeilan omainen keskus, jonka kokoon vaikuttaa se, kuinka kaukana katsottava kohde on ja kuinka vaativasta tehtävästä on kyse [Laarni *et al.*, 2001]. Katseluetäisyyden mittana käytetään näkökulmaa, joka on suoraan verrannollinen katseluetäisyyteen; mitä suurempi näkökulma, sitä suurempi verkkokalvokuva ja selkeämpi näköhavainto [Hatva, 1987].

Itse näköhavainto on sarja biologisia tapahtumia. Koska ihminen pystyy näkemään vain pienen alueen näkökentästään kerralla tarkasti, ihmisellä täytyy olla jokin tapa hallita visuaalista kenttää. Ihmisen verkkokalvon solut näkevät verkkokalvon laidoilla huonommin muotoja, mutta sen sijaan ulommat solut reagoivat liikkeeseen helposti. Liike aiheuttaa reaktion, että käännämme helposti pään liikkeen suuntaan ja pystymme tunnistamaan liikkeen aiheuttajan [Gregory, 1998]. Jotta ihminen pystyisi näkemään muotoja, pitää hänen pystyä erottamaan kappale taustasta ja muusta ympäröivästä materiasta. Ihminen erottaa kappaleita ja asioita toisistaan kontrastin avulla. Mitä pienempi kappale kooltaan on, sitä suurempi kontrastin täytyy olla, jotta kappaleen pystyy erottamaan [Hatva, 1987]. Näköhavaintoon vaikuttaa suuresti ympäristön ja sen luonnollinen kontrasti ja kirkkaus. Tämä on syytä ottaa huomioon, kun suunnitellaan veisto-ohjelman varjostuksia ja sitä miten etäisyyksiä voidaan simuloida värejä käyttäen.

Informaatiokäsittelyn näkökulmasta hermojärjestelmämme läpi virtaa tietoa, jota muokataan erilaisten vaiheiden kautta. Lisäksi ajatellaan, että järjestelmä kykenee käsittelemään vain rajatun määrän informaatiota kerrallaan. Ne ärsykkeet, jotka eivät ole käsillä olevan tehtävän kannalta olennaisia, jätetään huomioimatta. Siitä ei kuitenkaan olla täysin yhtä mieltä, miten hermojärjestelmä valikoi tietoa. Tarkkaavaisuudella on ilmeisesti keskeinen rooli tietoisien havaintokokemuksen tuottamisessa [Laarni *et al.*, 2001].

Kun hermojärjestelmä on valinnut kohteen käsittelyyn, se siirtyy muutamiksi sekunnin kymmenesosiksi järjestelmään, jota kutsutaan sensoriseksi muistiksi ja näköaistin yhteydessä ikonimuistiksi. Tämän jälkeen seuraa ensimmäinen tunnistus- ja luokitusvaihe, josta muodostunut ensimmäinen tul-

kinta havainnosta säilyy niin kutsutussa työmuistissa noin 20 sekuntia ja enimmillään muutamia minuutteja. Tunnistus ja luokitus perustuvat pitkälle katsojan historiaan, persoonallisuuteen ja opittuihin asioihin. Tässä vaiheessa havainnosta on jo pudonnut pois tulkitsijan kannalta epäolennaisia seikkoja [Hatva, 1987]. Tämän jälkeen kaikelle vastaanotetulle tiedolle annetaan jokin tulkinta, joka perustuu siihen, että pitkäaikaisesta muistista haetaan vertailukohtaa saadulle havainnolle. Ihmisen hahmottamiskyky on näön ansiosta hyvä, sillä reaalielämässä ihminen ymmärtää helposti etäisyyksiä ja muotoja. Kokonaistulkinta muodostuu kuitenkin aina kaikkien aistien yhteisvaikutuksesta.

2.3.2. 3D-kappale kaksiulotteisessa ympäristössä

Kaksiulotteinen tietokoneruutu muuttaa kolmiulotteisen kappaleen hahmottamisen täysin. Hinckley *et al.* [1994] mukaan ihminen on kokenut ja hyvä havainnoija, kun kyse on todellisen elämän hahmottamisesta. Ihminen kerää tietoa ympärillä olevasta maailmasta ja pystyy muodostamaan yhteyksiä kokemustensa perusteella. Hinckley *et al.* toteavat, että vaikeudet kolmiulotteisen maailman hahmottamisesta alkavat, kun kappaletta käsitellään abstraktissa 3D-ympäristössä, kuten tietokoneruudulla. Tietokoneruutu kaksiulotteisuudestaan johtuen ei näytä kappaletta oikein. Käyttäjä ei pysty kiertämään kappaleen taakse, eikä havainnoi sen syvyyssuuntaista pituutta yhtä helposti. Kappaletta voi toki kääntää ruudullakin ja siten tarkastella sen takapuolta, mutta käyttäjä ei pysty ottamaan sitä käteensä eikä esimerkiksi tuntoaistinsa perusteella pysty muodostamaan samanlaista kokonaiskuvaa kappaleen muodosta kuin reaalielämässä.

Ihminen tarvitsee siis jonkinlaista tukea havainnoidakseen kolmiulotteisuutta oikein. Tyhjä tietokoneen ruutu ei yksinään anna minkäänlaista tukea syvyyssuuntaiselle tarkastelulle. Hinckley *et al.* [1994] ovat tutkineet asioita, jotka helpottavat syvyysnäkemistä 3D-ohjelmissa. Heidän mukaansa syvyysnäkemistä voidaan parantaa viitteillä avaruudellisiin tiloihin, kaksikätsisyydellä, moniaistipalautteilla, ehdottomilla ja suhteellisilla toiminnoilla sekä fyysisillä rajoitteilla ja mahdollisuuksilla, joita käsitellään seuraavassa tarkemmin:

- **Viitteet avaruudellisiin tiloihin:** Kaksiulotteisella monitorilla voidaan esimerkiksi syvyyden havaitsemista parantaa lisäämällä ohjelman näyttöön kolmatta ulottuvuutta kuvaava perspektiivi.
- **Kaksikätsisyys:** Kaksikätsisessä käyttöliittymässä käyttäjä pystyy kokemaan itsensä paremmin osaksi 3D-maailmaa, jolloin hän oman kehonsa kautta pystyy tulkitsemaan avaruutta paremmin.

- **Moneen aistiin perustuva palaute:** Esimerkiksi tunto- tai äänipalaute näköaistipalautteen rinnalla antaa paremman ja luontevamman kokonaiskuvan maailmasta kuin pelkkä näköpalaute.
- **Ehdottomat tai suhteelliset toiminnot:** Ehdottomilla toiminnoilla tarkoitetaan esimerkiksi sitä, että työkalun ohjaimella on tietty kiinnitetty paikka reaali maailmassa, joka vastaa 3D-maailman työkalun paikkaa ohjelmassa. Näin ollen aina tiedetään, mitä kohtaa ohjelmassa muutetaan. Suhteellisilla he tarkoittivat esimerkiksi tilanteita, joissa käyttäjä voi ottaa veistettävän kappaleen virtuaaliseen käteensä ja pyöritellä sitä. Muokattavan kohdan paikka kappaleessa, eli samalla työkalun paikka, määritellään virtuaalisen kappaleen ja virtuaalisen työkalun välisen suhteen avulla. Tällöin reaali maailman työkalun ja kappaleen paikalla ei ole merkitystä. Paikka ei siis ole kiinteä, jolloin työstäminen on vapaampaa.
- **Fyysiset rajoitteet ja edut:** Fyysiset palautteet vähentävät kognitiivista kuormaa. Käyttäjän ei tarvitse tulkita rajoitteita ja palautteita, kun hän voi kokea ne fyysisinä tuntemuksina.

Kolmiulotteisen maailman kokeminen ja ymmärtäminen ovat kaksi eri asiaa. Havainnointiin vaikuttaa muun muassa kappaleiden päällekkäisyys, varjostukset, suhteellinen koko, perspektiivi ja pintakuvioidin väriliukumat [Haber and Hershenson, 1973]. 3D-maailmassa kappaleet sijaitsevat eri tasoissa ja voivat siis olla toistensa takana. Kun siirrytään toiseen paikkaan tai käännetään maailmaa, käyttäjä voi päätellä kappaleen olevan kauempana kuin toinen kappaleen ollessa etummaisena osittain peittämä. Etummaisesta kappaleesta muodostuu takana olevien päälle varjoja valon suunnasta riippuen. Käyttäjä voi päätellä myös etäisyyksiä esimerkiksi siitä, että normaalisti samankokoiset kappaleet ovatkin jossakin tilanteissa erikokoisia – pienempi on kauempana, kuten reaalielämässä kauempana oleva esine näyttää olevan pienempi kuin lähellä oleva. Kaikkien näiden asioiden tulisi olla kunnossa, jotta havainnointi olisi mahdollisimman luonnollista.

2.4. Tuntopalaute osana veisto-ohjelmaa

Tuntoaisti on yksi tärkeimmistä ihmisen aisteista. Sitä käytetään mielestäni hyötyensä nähden vielä aivan liian vähän tietotekniikassa. Veisto-ohjelmissa ei automaattisesti käytetä tuntopalautetta, mutta se sopii erinomaisesti veisto-ohjelmiin, jolloin käyttäjä saa näköaistinsa lisäksi tuntoaistinsa avulla tietoa kappaleen muodosta ja pinnasta [Dachille *et al.*, 1999]. Veisto-ohjelmissa syöttölaitteita käytetään käsin, joissa on sopivasti tuntopalautteen kannalta suuri osa ihmisen tuntoaistireseptoreista. Käden tuntoaisti on siitä syystä hyvin herkkä. Ihon,

sisäelinten, lihasten ja nivelten tuntoresseptorit viestivät kivusta, kosketuksesta, lämpötilasta, paineesta ja asennosta. Reseptorit välittävät tuntemukset aivoihin, jossa esimerkiksi tuntopalautteessa käytetyt palautteet, kuten kosketus, liike ja värähtelyt, varsinaisesti tunnetaan. Tämän luvun tarkoitus on tutustua tuntopalautteeseen. Aluksi tutkitaan ihmisen tuntoaistia ja sen toimintaa.

2.4.1. Yleistä tuntopalautteesta

Tuntopalautteella tarkoitetaan mekaanisesti tuotettua informaatiota, joka aistitaan ja vastaanotetaan tuntoaistin välityksellä. Tuntopalautteet voidaan jakaa taktiili-, värinä- ja voimapalautteisiin [Immersion, 2005a]. Värinäpalautteita käytetään lähinnä tietokonepeleissä, kuten autopeleissä tuntopalautteen antavalla ratilla ajettaessa. Värinäpalaute lisää todellisuuden tuntua, kun käyttäjä voi kokea pelin tapahtumat kokonaisvaltaisemmin – jarrutuksesta soratiellä johtuvat tärinät tai tienpinnan rösöisyyden. Joissain tapauksissa perinteiset näkö- ja kuuloaistin kautta saatavat palautteet eivät mahdollista havainnoimista tuntopalautteen tavoin.

Taktiilipalaute perustuu tuntoaistimukseen, jossa aistitaan pääasiassa todennukaista painetta ja aistimuksia pinnoista ja kosketuksesta ihon välityksellä. Taktiilipalautteet ovat usein pieniä näpytyksiä tai värinöitä. Voimapalaute puolestaan tuottaa voimia, joilla vastustetaan käyttäjän liikkeitä. Edellisen jaottelun lisäksi tuntopalaute voidaan jakaa aktiiviseen ja passiiviseen palautteeseen riippuen siitä, mikä palautteen saa aikaan [Rosenberg and Brave, 1996]. Aktiivinen palaute tarkoittaa palautetta, joka ei ole käyttäjästä lähtöisin. Se voi esimerkiksi kiinnittää käyttäjän huomion tai ohjata käyttäjä haluttuun tilanteeseen. Passiivisen palautteen avulla käyttäjä voi itse tuntea esimerkiksi kappaleen pinnan kovuuden ja karheuden sitä koskettaessaan.

Tuntopalaute voidaan tuottaa useilla eri menetelmillä. Youngblut *et al.* [1996] mukaan sähkökenttää vaihtelemalla pietsosähköiset kiteet saadaan värähtelemään, ja värähtelyä käytetään tuntopalautteen antamiseen. Pietsosähköinen materiaali laajenee tai supistuu, kun siihen johdetaan sähkövirta ja palaa entiseen muotoonsa, kun virta katkaistaan. Tuntopalaute voidaan toteuttaa myös pienillä paineilmapuhaltimilla, joilla voidaan muodostaa muun muassa painekuvioita. Kuvioita täyttämällä ja tyhjentämällä voidaan luoda tunne puristuksesta ja kosketuksesta. Tällaista tapaa toteuttaa tuntopalaute kutsutaan pneumatiikaksi. Youngblut *et al.* mukaan tuntopalaute voidaan toteuttaa myös Shape Memory Alloy (SMA) -tekniikalla. SMA on erityinen metalliseos, joka vaijeriksi muokattuna on normaalisti taipuisaa, mutta pyrkii palautumaan alkuperäiseen muotoonsa lämmitettäessä tiettyyn pisteeseen. Lisäksi tuntopalaute voidaan toteuttaa solenoidin, äänikelan ja lämpöpumpun avulla. Solenoidissa magneettinen kela aiheuttaa voiman rautamäntään, äänikela välittää

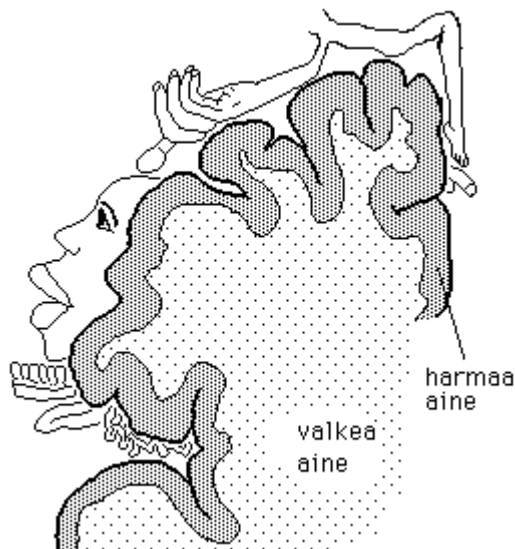
korkea taajuista ja matala-amplitudista värähtelyä iholla ja lämpöpumppu siirtää lämpöenergiaa ihon viilentämiseksi ja lämmittämiseksi [Youngblut *et al.*, 1996]. Taulukkoon 1 on kerätty eri tuntopalautemenetelmien hyviä ja huonoja puolia:

Tekniikka	Hyvää	Huonoa
Pietsosähkö	Korkea tilaerottelukyky	Vain yksi värähtelytaajuus
Pneumatiikka	Kevyt kädessä	Huono tila-aikaerottelukyky, rajoitettu kaistanleveys
SMA	Hyvä teho-massa-suhde	Huono hyötysuhde supistuessa
Solenoidi	Hyvä hyötysuhde, voima pysyvyytilassa	Painava, epälineaarinen
Äänikela	Korkea aikaerottelukyky, kooltaan pieni	Painava, epälineaarinen
Lämpöpumppu	Ei nesteitä	Huono aika-tilaerottelukyky, suuri koko, rajoitettu kaistanleveys

Taulukko 1: Tuntopalautetekniikoiden vertailua [Youngblut *et al.*, 1996].

2.4.2. Tuntopalautteeseen vaikuttava päätekijä – tuntoaisti

Tuntopalautteeseen vaikuttaa eniten tuntoaisti. Tuntoaistin avulla voidaan vuorovaikutuksen kestäessä kerätä tietoa esimerkiksi kappaleen pinnasta, painosta, kovuudesta ja lämpötilasta. Tuntoaistin herkkyyks vaihtelee ruumiinosittain. Erityisesti kämmenissä ja sormissa esiintyvä karvaton iho on hyvin tuntoherkkää aluetta, sillä paljaalla iholla esiintyy paljon hermopäätteitä [Burdea, 1996]. Suurin osa ihmisen ihosta on kuitenkin karvaista ihoa, jonka tuntoaisti ei ole niin herkkä kuin paljaan ihon.

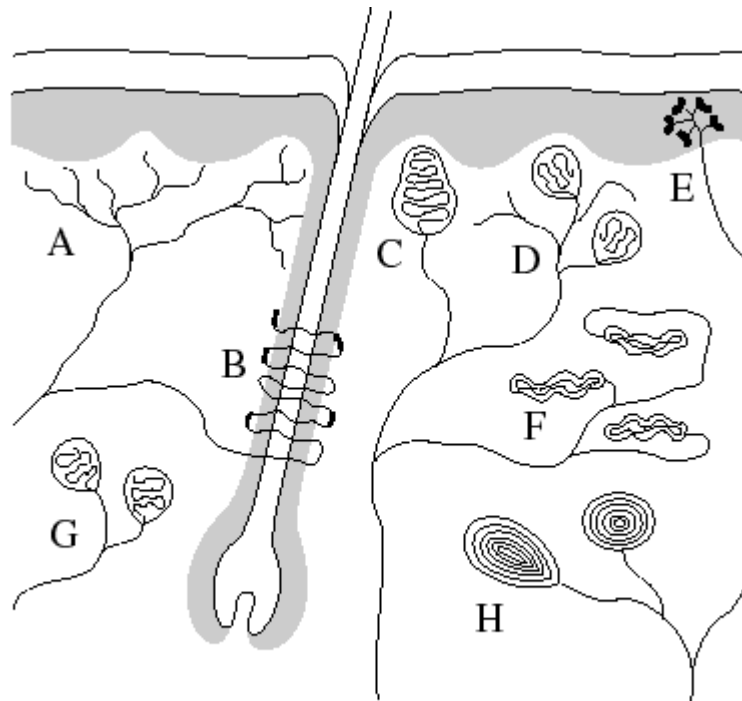


Kuva 2: Tuntoaivokuorella käden osuus on huomattavan suuri [Biomag, 2005].

Tuntoinformaatiota käsitellään aivoissa tuntoaivokuorella. Kuvassa 2 on esitetty, kuinka tärkeät kehon alueet ovat saaneet tuntoaivokuorelta suurem-

man osuuden kuin toisarvoisemmat kehon osat. Käden, kasvojen ja suun tuntoaistin osuus aivokuoresta on hyvin merkittävä. Kätet ja etenkin sormenpäät ovat käytännössä paljaan ihonsa ansiosta tarkimmin kosketusta aistiva ruumiinosamme.

Kuvassa 3 on esitetty paljaan ihon päähermotyypit: vapaat reseptorit, Merkelin kiekot sekä Meissnerin, Pacinin ja Ruffinin keräset. Vapaat reseptorit ovat hermosolujen haarautumia, jotka voivat ärtyä kosketuksen tai esimerkiksi lämmön seurauksena [Biomag, 2005]. Myös kipuaistimus välittyy vapaiden reseptorien kautta. Lihaksissa ja jänteissä ne viestivät nivelien ja lihasten asennosta, ihossa kosketuksesta ja sisäelimistössä muun muassa mahalaukun, suoliston ja virtsarakon täyttymisasteesta [Biomag, 2005]. Vapaat reseptorit esiintyvät lähellä ihon pintaa karvattomuudesta riippumatta [Burdea, 1996].



Kuva 3: Ihon päähermotyypit: a) Vapaat hermopäätteet, c) Meissnerin keräset, d) Merkelin kiekot, f) Ruffinin keräset, g) Pacinin keräsiä, [Biomag, 2005].

Erityisesti sormien päissä lähellä ihon pintaa sijaitsevat Merkelin kiekot ovat ihon kosketukselle herkkiä rakenteita ja ne reagoivat hyvin paineeseen ja värinänsä [Biomag, 2005]. Merkelin kiekot tuottavat ihmiselle yksityiskohtaista tietoa kappaleen rakenteesta ja pinnasta. Ne reagoivat vahvasti muotoihin, reunoihin ja kulmiin tasaisten pintojen sijaan [Johnson, 2001]. Merkelin kiekkojen avulla näkövammaiset pystyvät esimerkiksi lukemaan pistekirjoitusta sekä kohokuvioisia kuvia ja -karttoja.

Reseptoreista käsissä on eniten nopeita, kosketusta ja matalataajuisia värinää aistivia Meissnerin keräsiä. Erityisesti ihon nystyröistä löytyviä Meissnerin keräsiä on kaikista reseptoreista noin 40 prosenttia [Vanhala, 2005]. Sidekudosten kapseloimien Meissnerin kerästen avulla voidaan välittää käden liikesignaaleja. Näiden signaalien avulla aivot antavat tietoa muun muassa tartuntaotteiden pitävyydestä [Johnson, 2001; Biomag, 2005].

Meissnerin kerästen tapaan kapseloituneet Pacinin keräset sijaitsevat syvemmällä ihon alla, luiden ja jänteiden yhteydessä sekä suolistossa [Biomag, 2005]. Nämä hermopäätteet aistivat herkästi kosketusta ja varsinkin korkeataajuisia, yli 150 hertsistä värinää [Biomag, 2005]. Hyvin pieniäkin värähtelyjä tunnistavat keräset välittävät tietoa käsiin osuvista ja käsien pitelemistä kappaleista lähtevästä värinästä [Johnson, 2001]. Ruffinin keräset kertovat vastaavasti ihon venymisestä, minkä avulla aivot voivat tulkita sitä, mihin suuntaan iholla liikkuva kappale kulkee [Johnson, 2001]. Ruffinin kerästen avulla ihminen tuntee muun muassa vaatteiden liukuvan iholla niitä puettaessa ja riisuttaessa. Ihminen ei kuitenkaan loputtomiin tunne vaatteita päällensä, vaan hermopäätteet adaptoituvat ärsykkeeseen sen pitkittyessä ja aktivoituvat uudelleen, kun ihon pinnalla tapahtuu jokin muutos.

Jokaisella hermotyypillä on oma tehtävänsä ja ominaispiirteensä. Yhteenvetotaulukoon (taulukko 2) on koottu tärkeimpien hermopäätteiden ominaisuuksia.

	Merkel	Meissner	Pacinian	Ruffini
Ihotyyppi	Paljas iho	Paljas iho	Paljas ja karvainen iho	Paljas ja karvainen iho
Ärsykeobjektiivi	Ihon kaarevuus, paine, muoto, tekstuuri ja reunat	Nopeus, värähtely, luistaminen ja otteen hallinta	Värähtely, kiihdytys ja karkeus	Ihon venytys, sivuttainen voima, liikkeen suunta ja staattinen voima
Ärsyketyyppi	Ihon liike ja muutos ihossa	Ihon liike	Ihon liike	Ihon liike ja muutos ihossa
Avaruudellinen tarkkuus	Hyvä (0.5 mm)	Kohtalainen (3-5 mm)	Erittäin huono (2 cm)	Huono (1 cm)
Ärsyketaajuuden vaihteluväli (Hz)	0.4 – 10	2 – 40	100 – 1000	0.4 – 100
Ärsykkeiden välinen aikaväli	Erillisten ärsykkeiden havaitseminen vaatii 5 ms ja ärsykkeiden järjestyksen havaitseminen 20 ms.			
Osuus käden hermoista	25 %	40 %	13 %	19 %

Taulukko 2: Hermopäätteiden ominaisuuksia [Burdea, 1996; Johnson *et al.*, 2000; Johnson, 2001; Hale and Stanney, 2004; Kangas, 2004].

2.4.3. Aistipalautteiden sopivuus

Tietotekniikassa tuntopalautteen käyttö tukee usein näkö- ja kuuloaistia. Ihminen havainnoi ympäröivää maailmaa kokonaisvaltaisesti jokaista käytettävissä olevaa aistia hyväksikäyttäen. Tietotekniikkaan liittyvän tuntopalautteen avulla voidaan parantaa käyttökokemusta tai jopa mahdollistaa sellainen ihmisille, jotka muuten eivät pystyisi käyttämään tietotekniikkaa. Tuntopalautteen avulla esimerkiksi sokeat ihmiset voivat käyttää tietotekniikkaa aivan uudella tavalla, mihin heillä ei ennen ollut minkäänlaista mahdollisuutta. Heidän elämänlaatunsa voi parantua uuden maailman avautuessa heidän edessään.

ETSI-raportissa [ETSI, 2002] on listattu yleisellä tasolla multimodaalisissa käyttöliittymissä käytettyjen palautekanavien sopivuus eri käyttötarkoituksiin. Raportista voi huomata, miten oleellisesti palautekanavan valinta vaikuttaa siihen, mikä aistikanava kannattaa valita. Seuraavassa käsitellään raportissa esitetyt tilanteet näkö-, kuulo- ja tuntoaistin näkökulmasta. Lopuksi taulukossa 3 on esitetty, miten aistipalautteet sopivat käyttötarkoituksiinsa.

- **Ajoitettu informaatio:** Ajoitetulla informaatiolla tarkoitetaan informaatiota, johon liittyy kesto, tauko, tahdistus tai rytmi. Aistikanavista tehokkain on kuulo näön ollessa tehottomin, vaikkakaan ei huono vaihtoehto. Ääni on luonnollinen tapa ilmaista jaksollisuutta. Sen sijaan vilkkuva kuva voi ärsyttää käyttäjää, mutta samalla myös kiinnittää käyttäjän huomion ja kiinnostaa enemmän kuin staattinen kuva. Värinäpalautteiden kautta voidaan myös tuntopalautteen avulla viestittää luonnollisesti rytmejä tai jaksoja.
- **Kaksi- ja kolmiulotteisen kappaleen sijainti:** Luonnollisimmin ihminen havaitsee sijainteja näköaistinsa avulla. Näköpalaute kertoo tarkasti sijainnista. Äänipalautteella voidaan havainnoida kolmiulotteista ympäristöä sen perusteella, mistä ja minkälaisia ääniä ympäristöstä kuuluu. Tuntopalautteen avulla voidaan myös tutkia objektien sijaintia, mutta usein näkö- ja kuuloaistia huomattavasti rajoittuneemmalla alueella, sillä kappaleen tunteakseen sen tulee koskettaa jollakin tapaa sitä tarkastelevaa henkilöä. Tällaisia rajoituksia ei näkö- ja kuuloaistilla ole. Tietokonesovellusten tuntopalaute voi kuitenkin tukea huomattavasti kappaleen tai maailman sijainnin ymmärtämistä. Tämä korostuu, jos kolmiulotteista kappaletta pitäisi tutkia 2D-näytöllä.
- **Reaalimaailman vastine puuttuu:** Tuntopalaute perustuu ihmisen mielikuviin, miten hän kokee ja tuntee asiat. On vaikea kehittää jotakin sellaista, jota ei voida mieltää miksikään reaalimaailman vastineeksi. Kuvallisesti ja sanallisesti sen sijaan voidaan tuottaa helpostikin asioita, joille ei ole reaalimaailman vastinetta.

- **Yksityinen informaatio:** Jos ihminen haluaa viestiä yksityisesti, puhe tai ääni on huono vaihtoehto tiedon jakamiselle. Ulkopuolinen voi kuulla informaation haluamattaankin. Myös visuaalinen viesti voi joutua sivullisen silmiin, mutta se vaatii aktiivisempia toimia ulkopuoliselta itseltään. Tuntoaistiin perustuva yksityinen informaatio menee perille varmimmin, eikä tähän informaatioon päästä helposti väliin.
- **Huomion herättäminen:** Huomion herättämisessä äänipalaute on paras, kun käyttäjän huomio on herätettävä heti. Käyttäjillä harvoin kuulokanava on kokonaan suljettu, mutta tällaisiakin tilanteita voi olla, kuten kuuroilla tai kovassa metelissä. Tällöin tarvitsee ottaa käyttöön muita aisteja hyödyntävät huomionherättämiskeinot. Näköaistiin perustuva hälytys voi kuitenkin jäädä huomaamatta näkökentän ollessa täynnä muita kohteita. Käyttäjän pitäisi kääntää katseensa visuaalisen hälytyksen suuntaan, jotta se huomattaisiin. Tuntopalautteen avulla voidaan käyttäjän huomio herättää helposti, mutta käyttäjän on koskettava palautteen antavaan laitteeseen ja laitteen tulee toimia oikein.
- **Reaalimaailman kuvaaminen:** Graafisesti on helppo kuvata luonnollisen maailman objekti. Ääntä käyttäen se on raportin mukaan huomattavasti hankalampaa, vaikka mielestäni erilaisin äänin voidaan luonnollisesti kuvata objekteja, ilmiötä ja asioita. Tuntopalautteen avulla on mahdollista mallintaa luonnollisen tuntuinen kappale, mutta palautteen annossa saattaa olla mukana tunnistamista helpottavia piirteitä, jotka rikkovat fyysisiä lakeja.
- **Informaation jatkuvuus:** Visuaalinen viesti on helposti saatavilla myöhemmin. Tuntopalaute ei myöskään katoa ja tuntopalautteen antavaa kappaletta tai laitetta voi tarvittaessa kosketella uudelleen. Sen sijaan ääniviesti katoaa välittömästi sen soittamisen jälkeen, eikä viestin sisältöä voi tarkistaa, jollei viestiä ollut tallennettu etukäteen. Mielestäni ääntä ei tulisikaan käyttää ainoana aistikanavana, jos pitää varmistaa, että käyttäjä saa tarvittavan tiedon.
- **Taustatyöskentely:** Taustääännet ja -meteli eivät yleensä aiheuta käyttäjälle ongelmia niin, ettei hän voisi keskittyä muuhun toimintaan samanaikaisesti. Sen sijaan ETSI-raportin mukaan visuaalinen viesti varaa aistikanavan siten, ettei muu työskentely ole mahdollista. Mielestäni kuitenkin muun muassa viestin koko, rakenne, väri, muoto ja laajuus vaikuttavat siihen, kuinka paljon käyttäjän huomio kiinnittyy viestiin. Mielestäni on täysin mahdollista joissakin tilanteissa jatkaa työskentelyä, vaikka näkökenttä olisikin osittain varattu. Raportin mukaan myös tuntopalaute varaa vahvasti käyttäjän huomion.

Tiedon ominaisuus	Näkö	Kuulo	Tunto	Huomautukset
Ajoitettu informaatio (kestot, tauot, tahdistukset tai rytmit)	#	++	+	
2D ja 3D sijainti (absoluuttinen ja suhteellinen sijainti)	++ [1]	+	+	[1] 2D-näyttö vaatii yhden tai useamman suunnan supistamista 3D-kuvan näyttämiseen.
Tiedolla ei ole reaalimaailman vastinetta (sisältää abstraktit tai koodatut tiedot)	++	++ [2]	#	[2] Synteettinen puhe.
Yksityinen informaatio (tieto saavuttaa vain halutut henkilöt)	#	-	++	
Huomion herättäminen (informaatio ei ole päämielenkiinto tai käyttäjä ei keskity siihen)	- [3]	++	+ [4]	[3] Näkökenttä on rajattu. [4] Esimerkiksi värinätoiminnot.
Varoitus/hälytys (havainnon, ymmärtämisen ja toiminnan yhdistelmä)	- [5]	+	++ [6]	[5] Näkökenttä on rajattu. [6] Pitäisi olla puettava.
Informaatio kuvaa luonnollisen maailman objektia [7]	++	-	#	[7] Abstraktin tiedon kanssa melkein päinvastainen vaikutus.
Informaation jatkuvuus [8] (tieto on saatavilla myöhemminkin)	++	--	++	[8] Tulokset ovat päinvastaisia, jos esitysaika on rajoitettu.
Taustatyöskentely (käyttäjä voi keskittyä työhönsä taustamelusta huolimatta)	--	+	-	
Symbolien käyttö:				
++ Sopii hyvin kyseisenlaisen tiedon esittämiseen				
+ Tarpeeksi hyvä, muttei optimaalinen				
# Neutraali				
- Ei kovin hyvä, mutta mahdollinen				
-- Tuskin mahdollinen tai mahdoton				

Taulukko 3: Kankaan [Kangas, 2004] muokkaama taulukko ETSI-raportista [ETSI, 2002], jossa listattiin palautekanavien sopivuus eri käyttötarkoituksissa.

ETSI-raportissa ei esitetä, miten erilaiset palautteet tulisi toteuttaa. Erityisesti tuntopalautteen antaminen vaatii aina sen, että käyttäjä koskettaa palautteen antavaa laitetta – käyttäjän on myös nähtävä näköaistia hyödyntävä laite. Jokin aistikanava voi sopia määrättyyn tarkoitukseensa hyvin, mutta käytännön rajoitukset palautteen annossa voivat rajata aistikanavan käyttöä. Esimerkiksi ajoitetussa informaatiossa tuntopalautteen käyttäminen rytmien ja tahtien tunnistamiseen on täysin hyödytöntä, jos käyttäjä ei koske palautteen antavaan laitteeseen. Raporttia tutkittaessa onkin oletettava, että käyttäjän aistikanavan huomio on kiinnitetty haluttuun toimintaan ja että aistikanava ei ole suljettu. ETSI-raportissa ei olekaan tarpeeksi huomioitu sitä, miten palautekanavat sopivat erilaisten erityisryhmien, kuten esimerkiksi sokeiden ja kuurojen, käyttämiin käyttöliittymiin. Esimerkiksi kuurosokealle tuntopalaute voi olla ainoa mahdollinen palautemuoto, jolloin se käyttäjänsä näkökannasta on kolmesta edellä mainitusta palautekanavasta aina kaikkein suotuisin.

Tuntopalaute onkin varsin ristiriitainen aistipalautemuoto rajoituksiensa ja etujensa puolesta. Se vaatii yhteyden palautteen antavan laitteen ja käyttäjän välillä ja siksi se on käytettävissä vain käyttäjän lähiympäristössä ja näin häviää monessa tarkoituksessa näkö- tai kuulopalautteelle. Kuitenkin tuntopalautetta voi käyttää lähes kuka tahansa ja siksi sitä on hyvä hyödyntää monissa yhteyksissä vähintäänkin muiden aistien tukena. Mielestäni tuntopalaute ei kuitenkaan sovi ETSI-raportin väittämän mukaan erityisen hyvin yksityiseen informaatioon, sillä tuntopalautteen avulla on hyvin hankala viestittää tarkkoja asioita ja viestejä tuntopalautteen perustuessa siihen, miten ihmiset kokevat asioita. Tällöin väärinymmärryksen mahdollisuus kasvaa. Sen sijaan näkö- ja kuuloaistin avulla ihminen voi lähettää ja saada yksityiskohtaisia ja vähemmän tulkinnallisia viestejä. Tällöin kuitenkin riski viestin joutumisesta ulkopuolisten tietoon on suurempi kuin tuntopalautteen välityksellä. Toisaalta, jos henkilöillä on omanlainen kieli tai kommunikointitapa muuhun ympäristöön verrattuna, voi näkö- ja kuuloaistin avulla siirtää informaatiota riskittömämmin ja tehokkaasti.

2.5. Metaforat ja niiden merkitys

Shneiderman [1982] määritteli suorakäyttöisyyttä muun muassa niin, että tehtävien toiminnot suoritettiin esimerkiksi painamalla nappeja ja että näiden toimintojen on oltava helposti käytettävissä. Tällöin käyttöliittymäsuunnittelussa oli kiinnitettävä huomiota uudenaikaiseen tiedon esitystapaan.

Komentokieliset käskyt korvattiin metaforilla, vertauskuvilla. Metaforat ovat esimerkiksi nappeja ja käyttöliittymän osia, joilla on tietty tehtävä ohjelmassa ja jotka joko ulkoisesti tai toiminnallisesti muistuttavat reaalielämän aitoja tilanteita. Esimerkiksi tiedosto, jota ei enää tarvita voidaan heittää tietokoneella "roskakoriin", kuten tavallisessakin elämässä tai veisto-ohjelman puukappaletta voidaan veistää taltan näköisellä, virtuaalisella työkalulla. Carrol *et al.* [1988] mielestä metaforien yksi merkittävä etu on siinä, että niitä käyttämällä voidaan hyödyntää käyttäjien aikaisimpia tietoja ja kokemuksia asioiden yhteyksistä ja toiminnasta. Sen sijaan, että vähennettäisiin ohjelman monimutkaisia ja laajoja käyttötapoja, voitaisiin heidän mukaan ohjelmaan lisätä tuttuja elementtejä, toimintoja ja menetelmiä.

Metaforia on syytä pohtia huolellisesti ennen niiden käyttöönottoa, sillä väärin valittu vertauskuva voi aiheuttaa ongelmia sovelluksen käyttäjille. Metaforissa olisi syytä myös pitäytyä yleisissä lainalaisuuksissa ja mahdollisesti jo olemassa olevissa vertauskuvissa. Suunnittelussa ei voi myöskään lähteä vain siitä, miten suunnittelija itse on tottunut tekemään asioita elämässään. Myös kulttuurilliset erot tulisi ottaa huomioon metaforia valittaessa. Esimerkiksi suomalainen koululainen tulkitsee $\sqrt{\quad}$ -merkin vääräksi vastaukseksi koepaperis-

sa, kun taas yhdysvaltalainen lapsi riemuitsee onnistuneesta vastauksesta. Esimerkin pieni merkki voi olla tekijöilleen luonteva valinta, mutta jos sovellusta käytetään toisessa kulttuurissa, voi syntyä tarpeettomia, kiusallisia tilanteita.

Metafora-käsitettä voidaan laajentaa veisto-ohjelmissa ohjaimiin asti normaalien tietokoneen ruudulla tapahtuvien toimintojen lisäksi. Veisto-ohjelmissa voi olla esimerkiksi kaiverrus- ja pursotustikkuna tuntopalautteen antava PHANTOM [Sensable, 2005a], joka kuvaa hyvin realistisesti aitoa veistotyökälua. PHANTOMin tikkumainen ohjain voidaan lisäksi esittää tietokoneen ruudulla työkaluvalinnasta riippuen esimerkiksi joko talttana, maalisutina tai kaiverrustikkuna.

Veistettävää kappaletta voidaan ohjata myös esimerkiksi hiirellä ja jollakin 3D-ohjaimella. LeBlank *et al.* [1991] ovat tutkineet hiiren ja Spaceballin yhteiskäyttöä. Spaceball on kuudensuunnanohjain, jolla voidaan liikuttaa kappaletta myös syvyysuunnassa [3dconnexion, 2005]. Spaceballin avulla kappaleen pyörittäminen voidaan tehdä heikommalla kädellä, jolloin itse työkalun käyttäminen jää dominoivan käden tehtäväksi; käyttäjä voi ikään kuin pitää kappaletta heikommassa kädessään ja kääntää sitä tarvittaessa hallitsevan käden vapaututtua työstämään kappaletta. Tällainen kappaleen kädessä pitäminen on hyvä esimerkki metaforasta, jota voidaan käyttää veisto-ohjelmissa.

2.6. Lopuksi

Vaikka kaksikäisyys ja kolmiulotteisuuden havainnointi ovatkin ihmiselle luonnollisia asioita, on niiden käyttäminen keinotekoisessa ympäristössä usein erilaista ja vaikeampaa kuin mihin arkielämässä olemme tottuneet. Kaksiulotteisessa ympäristössä on vaikea havainnoida kolmiulotteista maailmaa, jollei minkäänlaista tukea havaitsemiseen saada esimerkiksi ohjelman näkymästä. Veisto-ohjelmaa suunniteltaessa ja toteutettaessa on muistettava muutamia perusasioita: ohjauksen tulisi olla helppo, syvyysnäkemistä on tuettava ja käyttöliittymän tulisi muutenkin olla kaikin osin toimiva.

Veisto-ohjelmiin vaikuttavat monet tekijät. Pääsääntöisesti kuitenkin kaikkien veistosovellusten tulisi olla suorakäyttöisiä, sillä muutoin veistämisen idea muuttuu matemaattiseksi syötteiden antamiseksi. Veisto-ohjelmien tarkoitus on antaa vapaasti ja luonnollisesti syötteitä. Käyttäjän virtuaalisia työkaluja vastaavat reaali maailman työkalut. Metaforisilla työkaluilla veistettäessä on luonnollista ottaa mukaan ohjaukseen molemmat kädet, jolloin hallitsevalla kädellä voidaan liikutella tarkkaa työtä vaativaa työkalua ja heikommalla veistettävää kappaletta. Kaksikäisyys ei ole välttämättömyys veisto-ohjelmalle, mutta parhaan veistokokemuksen aikaan saamiseksi se on luonnollinen lisä sovellukseen.

Kaikissa veisto-ohjelmissa ei myöskään ole tuntopalautetta, mutta sen esiintyminen veistosovelluksessa parantaa huomattavasti kolmiulotteisen kappala-

leen hahmottamista abstraktissa, kaksiulotteisessa maailmassa. Se myös vahvistaa tuntemusta oikeasta veistämisestä, kun käyttäjä voi tuntea kolmiulotteisen kappaleen. Hahmottamista voi parantaa myös erilaisin visuaalisin viestein. Ohjelman on sisällettävä avaruuden tiloja tukevia viittauksia ja toimintojen on oltava yksinkertaisia sekä helposti käyttäjän saatavilla. Mikäli sovelluksessa on toteutettu suoraikäyttöisyyden, kaksikäätisyyden, tuntepalautteen ja hahmottamisen periaatteita kaksiulotteisellakin näytöllä voidaan esittää realistisesti veistettävä kolmiulotteinen kappale ja luoda todenmukainen veistokokemus.

3. Kolmiulotteinen kappale tietokoneella

Kolmiulotteiselle mallinnukselle on nykyään tarvetta enenevässä määrin. Viihdeteollisuus, eritoten animaatio-, elokuva- ja peliteollisuus, on siirtynyt 2000-luvun alkupuolella jo lähes täysin 3D-aikaan. Kolmiulotteinen kuvitus esimerkiksi peleissä tuo lisäarvoa verrattuna 2D-peleihin, kun mukaan saadaan kolmas ulottuvuus. Monet strategia-, taistelu- ja autopelit ovat tällä hetkellä ehkä suositumpia kuin koskaan ennen ja varmasti osasyynä siihen on upeat 3D-maailmat, joissa pelitapahtumia käydään. Seuraavassa on esitelty muutamia 3D-mallinnusohjelmia ja -tapoja sekä niiden peruspiirteitä ja tapoja kuvata kolmiulotteisia kappaleita tietokoneen avulla. Tarkoituksena on saada yleiskuva siitä, miten kolmiulotteisia kappaleita voidaan tehdä ja miten veisto-ohjelmat eroavat muista mallinnusohjelmista. Markkinoilta löytyy ohjelmia, joissa on käytetty sekaisin useita esittelemiäni mallinnustapoja yhdessä ohjelmassa. Tässä käydään läpi esimerkkiohjelmin peruseriaatteet tavoista, joilla 3D-kappaleita ja -maailmoja voidaan tietokoneen avulla luoda.

3.1. Suorakäyttöisyyttä, valikoita ja komentoja - Maya

Yksi johtavista 3D-mallinnusohjelmista on 1980-luvun alkupuolella Torontossa perustetun Alias-ohjelmistotalon Maya [Alias, 2005]. Maya on saavuttanut aseman yhtenä maailman johtavana digitaalisen 3D-animaation ja visuaalisten tehosteiden tuottajana. Mayan kaltaisia ohjelmistoja on olemassa paljon. Muita tunnettuja ovat muun muassa 3D Studio Max ja Carrara. Samankaltaisuuksien takia tässä käsitellään esimerkkinä vain Maya.

Maya on monipuolinen sovellus, joka soveltuu niin harrastekäyttäjille kuin kovaan ammattikäyttöön. Maya-ohjelmistoa käyttävät muun muassa suuret elokuvastudiot, kuten Walt Disney, Warner Bros. Studios, Pixar, Weta digital ja Industrial Light & Magic (ILM) [Alias, 2005]. Yksin Industrial Light & Magic on ollut mukana 14:ssä Oscarin parhaista visuaalisista efekteistä saaneessa elokuvassa. Tämän lisäksi Academy of Motion Picture Arts and Sciences on palkinnut ILM:n 17 kertaa sen teknisistä saavutuksista [ILM, 2005].

Mayan avulla on mahdollista esimerkiksi mallintaa, muokata ja animoida kappaleita sekä luoda kuvan 4 tapaisia illuusioita, joissa olemassa oleviin fyysisiin kohteisiin voidaan liittää tietokoneella tehty 3D-ympäristö [Alias, 2005]. Kolmiulotteinen ympäristö saadaan upotettua luontevasti lavasteisiin Mayan monipuolisten maalaus- ja mallinnustoimintojen avulla.



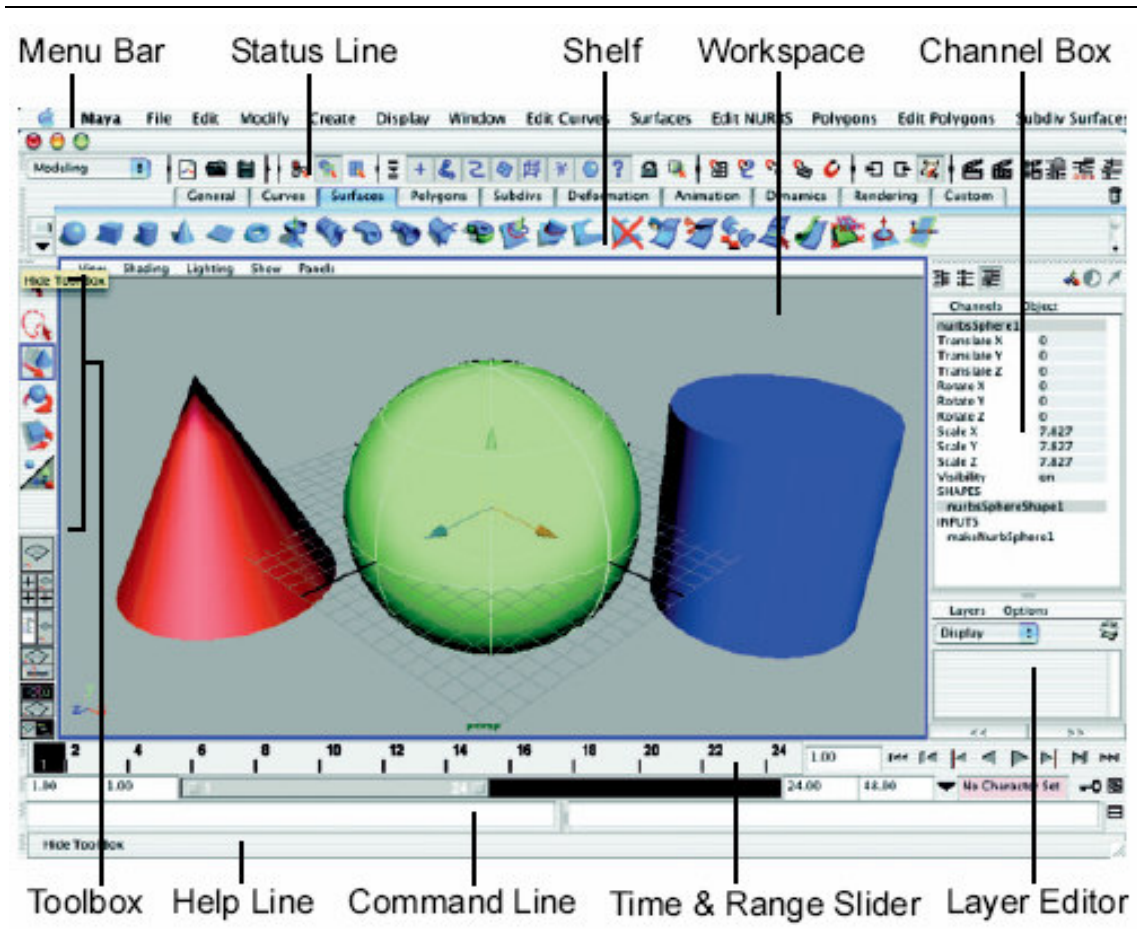
Kuva 4: Weta digitalin tunnetuimmat Mayalla tekemät 3D-mallinnukset löytyvät Taru Sormusten Herrasta -trilogiasta [Alias, 2005].

Mayan käyttöliittymä koostuu erilaisista valikoista, kuvakkeista, näkymistä, ikkunoista ja paleteista. Käyttöliittymä on helposti muokattavissa, jolloin jokainen käyttäjä saa näkymästään mieluisan saaden tärkeät toiminnot tarvittaessa esille. Käyttäjän on lisäksi mahdollista luoda omia skriptejä ja makroja sekä hyödyntää Mayan erilaisia funktioita ja ohjelmointirajapintoja, joiden avulla voidaan helpottaa, parantaa ja nopeuttaa käyttäjän työskentelyä [Alias, 2005].

Kuvassa 5 on esitelty Mayan käyttöliittymä. Käyttöliittymän oleellisin osa on sen työtila (*workspace*), jossa kappaleita käsitellään ja johon useimmat paletit tulevat näkyviin käytettäessä joitakin työkaluja. Hahmottamisen apuna Mayan työtilassa on verkko (*grid*) sekä suuntia kuvaavia akseleita. Akseleiden keskustaa kutsutaan origoksi (*origin*) ja tämän pisteen ympärillä on Mayan 3D-maailma [Alias, 2005]. Mayan kaltaisessa sovelluksessa kappaleen paikka 3D-maailmassa lasketaan kappaleen etäisyytenä origosta. Verkon ja akseliston avulla pyritään helpottamaan käyttäjän kognitiivista työtä, kun hän pystyy visualisoimaan kappaleiden muotoja, etäisyyksiä, suuntia sekä kokoja vaivattomasti. Sekä verkkoa että akselistoja voi muokata halutun näköiseksi.

Mayassa toiminnallisuus on sijoitettu pääasiassa ryhmiteltyihin, lukemattomiin valikoihin. Toimintojen määrää kuvaa muun muassa se, että käyttäjän on mahdollista valita tilarivin (*status line*) alavetovalikosta, mitä valikkoja sovelluksessa kullakin hetkellä näytetään. Valikoista löytyvän toiminnallisuuden lisäksi Mayassa on mahdollisuus antaa kappaleille tai tiloille numeerisia arvoja (*channel box*) ja erilaisia komentoja komentoriville (*command line*) [Alias, 2005]. Käyttäjä voi antaa kappaleelle arvoja, joiden avulla hän voi esimerkiksi pyörittää, siirtää tai skaalata kappaleita. Komentoriville käyttäjä voi antaa yksittäisiä

komentoja, jolla esimerkiksi hän voi poistaa yksittäisen kappaleen työtilasta, ajaa Mayan tarjoamia funktioita tai hyödyntää ohjelmointirajapintaa.



Kuva 5: Mayan käyttöliittymä [Alias, 2005].

Mayan ehdottomana hyvänä puolena voi pitää sen monipuolisuutta. Mayaasta hyötyvät varmasti eniten taitavat ammattilaiset, jotka osaavat kokemukseensa ansiosta käyttää Mayan lukuisia toimintoja. Aloittelevaa käyttäjää Mayan valikoiden ja toimintojen määrä voi hämmentää ja tuottaa ongelmia. Toisaalta Mayalla on helppo saada aikaan yksinkertaisia malleja primitiivikappaleiden avulla. Käyttäjä voi valita haluamansa kappalemallin "hyllyltä" (*shelf*) ja asettaa sen haluttuun kohtaan työpöydälle. Valmiita kappaleita yhdistelemällä käyttäjä voi helposti rakentaa karkeita 3D-malleja, mikä voi rohkaista aloittelevaa 3D-mallintajaa käyttämään Mayaa myöhemminkin ja oppimaan lisää Mayan käytöstä. Aliaksen verkkosivuilla on myös saatavilla opastusta ja paljon tutoriaaleja, joiden avulla Mayan käyttöä voi opetella.

Mayaan sekä eräisiin muihin 3D-mallinnusohjelmiin on mahdollista asentaa veisto-ohjelman laajennusosa (*plug-in*) [Alias, 2005]. Tällöin kappaletta voi esimerkiksi muotoilla venyttämällä jostakin pisteestä sen sijaan, että käyttäjän tarvitsisi antaa venytettävän kohdan arvoja moniin kenttiin. Toisiin sovelluksiin voi asentaa myös kehittyneempiä ohjaimia tavallisen hiiren lisäksi. Esimerkiksi

jonkin kuudensuunnanohjaimen käyttäminen 3D-mallinnusohjelmassa voi tehdä sovelluksen käytöstä helpompaa ja luontevampaa, kuin vain jos sovellusta käytettäisiin tavallisen hiiren avulla.

Aliaksen sivuilta on mahdollista saada kokeiluversio Mayasta ja syöttölaitteeksi kelpaa tavallinen hiiri. Maya toimii Windows, Mac OS X, IRIX ja Linux käyttöjärjestelmissä ja käyttöjärjestelmän suositusmuistimäärä riittää sovelluksen käyttämiseen [Alias, 2005]. Mikäli Mayan käyttäminen kiinnostaa on siitä mahdollista hankkia ohjelmisto-osia, jolloin käyttäjän ei tarvitse maksaa turhista osista. Esimerkiksi joillekin riittää vain 3D-kappaleen muotoilu, jolloin animoinnista ei ole tarpeen maksaa. Kokonainen Maya-paketti maksaa tavalliselle kuluttajalle paljon, sillä esimerkiksi Maya Complete 6.5 versio maksaa noin 2100 euroa ja Unlimited versio noin 7350 euroa.

3.2. 3D-skannaus – XYZ RGB

Kolmiulotteinen skannaus perustuu täysin erilaiseen tapaan kuvata 3D-kappale kuin muut mallinnusohjelmat, joissa käyttäjä tekee kappaleen itse. Skannauksessa käytetään apuna olemassa olevia kappaleita, jotka skannauksen avulla voidaan siirtää 3D-muotoon tietokoneelle. Kolmiulotteinen skannaus sopii erilaisiin tehtäviin kuin mihin kolmiulotteiset mallinnusohjelmat, vaikka monissa tapauksissa 3D-mallinnusta ja -skannausta käytetään rinnakkain samoissa tehtävissä. Kolmiulotteisen skannauksen avulla voidaan kuvata tietokoneelle esimerkiksi tarkasti ihmisvartalon tai -kasvojen piirteitä. Tällaista sovellusaluetta hyödynnetään muun muassa lääketieteessä [3dmd, 2005], mutta mikään ei estä tulevaisuudessa skannaamasta esimerkiksi rikospaikkaa tutkinnan avuksi. Kolmiulotteisen skannauksen avulla voidaan kuvata kolmiulotteisesti myös esimerkiksi historiallisia esineitä tai taiteilijoiden veistoksia.

Perustoimintatavaltaan skannerit ovat hyvin samanlaisia, vaikkakin komponentit ja jotkin toimintamallit vaihtelevat malleittain. Suurin ero lienee siinä, että toiset skannerit koskettavat kuvattavaa kappaletta, kun toiset skannaavat kappaleen etäämmältä siihen koskematta. Lisäksi toiset skannerit kuvaavat kappaleen sekunnin murto-osassa valokuvamaisesti, kun taas toiset kiertävät objektin tarkasti ja hitaasti joka suunnasta. Tavasta riippumatta skannerilla luetaan kolmiulotteisen kappaleen pinta ja siitä muodostetaan digitaalinen 3D-kuva.

Tällä hetkellä yksi johtavista 3D-skannereiden valmistajista on vuonna 2001 Kanadassa perustettu XYZ RGB inc. [XYZRGB, 2005]. Skannerissa on käytetty huippuunsa kehitettyä 3D-optiikkaa, jonka avulla voidaan skannata kappaleita todella suurella resoluutiolla; kuvista tulee lähes mikroskooppisen tarkkoja. Skannerin ytimessä XYZ RGB inc. käyttää National Research Council of Canadassa kehitettyä automaattisesti tahdistettua laserskannausta, joka pystyy ha-

vaitsemaan pinnan muodot kolmiulotteisesta kappaleesta +/-0.025 millimetrin tarkkuudella [XYZRGB, 2005]. Skannausjäljessä ei ole juuri lainkaan häiriöitä tai virheitä, vaan skannattava pinta tallennetaan hyvin tarkasti, kuten kuvan 6 skannausjäljestä voi huomata. Jokaiseen skannattuun pisteeseen lisätään myös 24-bittinen väritieto erillisen värinskannauksen avulla.



Kuva 6: XYZ RGB inc.:n skannausjälki on todella tarkkaa [XYZRGB, 2005].

Tällaista tarkkuutta ja värien määrää voidaan käyttää hyväksi elokuva- ja peliteollisuudessa, tehdastuotannossa sekä tietokoneavusteisessa suunnittelussa. XYZ RGB inc.:n skannerilla on muun muassa luotu erikoistehosteita sekä Matrix- että Taru Sormusten Herra: Kuninkaan paluu -elokuvaan (kuva 7). Kolmiulotteista skannausta käytetään useasti rinnakkain jonkin 3D-mallinnusohjelman kanssa. Skannattavat kappaleet voidaan esittää tietokoneella digitaalisesti esimerkiksi kolmioverkkoina tai parametrisoituina käyrinä, joita voidaan käsitellä myöhemmin jollakin muulla ohjelmalla. Esimerkiksi osa Taru Sormusten Herra -trilogian lukuisista visuaalisista efekteistä tehtiin ensiksi pienoismalleiksi, jonka jälkeen mallit skannattiin ja viimeistely tehtiin 3D-mallinnusohjelmalla. Weta Digitalin Digital Models Supervisorin Matt Aitkenin kommentti kertoo, kuinka tarkasti XYZ RGB inc.:n skanneri toimi:

”Ja kun siirsin (skannatun) mallin Mayaan, kollegani eivät varsinaisesti pudonneet tuoleiltaan, mutta he tulivat katsomaan mallia hyvin läheltä - Meidän oli mahdollista zoomata lähes keinotekoiselle tasolle; näimme veistäjän sormenjäljet savessa.” [XYZRGB, 2005]



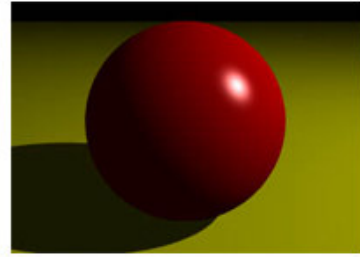
Kuva 7: Matrix-elokuvissa on käytetty XYZ RGB inc.:n skannausta ja 3D-mallinnusohjelmia erikoistehosteiden luonnissa [XYZRGB, 2005].

3.3. Koodilla kolmiulotteisuutta – Povray

Kolmiulotteisia kappaleita on mahdollista luoda myös ohjelmoiden. Tällöin kappale muodostetaan jonkin ohjelmointikielen ja kääntäjän avulla. Esimerkiksi OpenGL, java3D ja DirectX:n Direct3D ovat grafiikkarajapintoja ja VRML on rakenteinen määrittelykieli, jonka avulla voi tehdä 3D-grafiikkaa. Ohjelmointikieliä ja -rajapintoja on olemassa paljon ja usein myös kääntäjä on ilmainen, jolloin 3D-grafiikan tuottaminen on edullista. Tässä ei keskitytä puhtaaseen 3D-grafiikkaohjelmointiin, joka vaatii käyttäjältä suurta ohjelmointituntemusta ja erikoistaitoja, vaan esimerkkinä käsitellään Povray-sovellus [Povray, 2005], jossa käyttäjältä ei vaadita niin syvällistä ohjelmointituntemusta kuin mitä edellä mainitut kielet vaativat.

Povraylla mallintaminen perustuu siihen, että käyttäjä kirjoittaa tekstitiedostoon tarvittavat tiedot mallinnettavasta maailmasta ja kappaleesta, muun muassa kappaleeseen kohdistuvat valot, materiaalit ja pinnat. Sovellus generoi kuvan tekstitiedostoon syötettyjen arvojen perusteella, kuten kuvassa 8 on tehty. Povraylla on mahdollista tehdä kolmiulotteisia, fotorealistisia kuvia *ray-tracing*-, säteenäljitysmallinnustekniikan avulla [Povray, 2005]. Povrayn heikkous on siinä, että sovelluksella pystyy tekemään vain kolmiulotteisia kuvia – eikä esimerkiksi animaatioita – eikä kuvien muodostaminen ole nopeaa. Sen sijaan kuvat, joita Povraylla voidaan tehdä, ovat korkealaatuisia ja kuviin voidaan helposti luoda luonnollisia heijastuksia, varjostuksia ja perspektiivejä.

```
#include "colors.inc"
camera {location <0,2,-3>look_at <0,1,0>}
light_source {<6,6,-2> color White}
plane {<0,1,0>pigment {color Yellow}}
sphere {<0,1,0>pigment {color Red}finish {phong 1}}
```



Kuva 8: Yllä oleva koodi näytetään Povrayssa punaisena pallona taustoineen ja varjoineen [Povray, 2005].

On perusteltua sanoa joissakin tilanteissa, että Povrayssa ohjelmoidaan kolmiulotteisia kappaleita. Toisaalta Povray-kuvat ja -ohjelmointi eivät pidä sisällään toiminnallisuutta, mitä yleisesti voidaan ajatella ohjelmoinnin oleellisimpana osana. Tekstiedostossa joudutaan kuitenkin käyttämään Povrayn *Scene Description Language* kieltä, joka sisältää Povrayssa käytettävät komennot [Povray, 2005]. Povraylla 3D-kappaleita kuvattaessa voidaan käyttää myös esimerkiksi ohjelmoinnista tuttuja *for*- ja *while*-toistorakenteita sekä määrittellä objekteja.

Ray-tracing-tekniikan avulla simuloidaan reaali maailman valonsäteitä sekä niiden kulkua ja näin ollen on mahdollista kuvata fotorealistically kappaleita eri tiloissa ja avaruuksissa. Ray-tracing-tekniikassa on oleellista, miten eri valonlähteet ja kamera avaruuteen asetellaan, sillä niiden avulla kuva saa lopullisen ulkomuotonsa. Säteiden avulla tutkitaan, mitkä kappaleen kohdat osuvat säteelle ja mitkä eivät [Povray, 2005]. Kohdat, jotka leikkaavat säteen kanssa, esitetään lopullisessa kuvassa. Käyttäjän tulee määrittää tekstiedostossa kameroiden ja valojen lisäksi kuvaan tulevat objektit, niiden pinnat, sisustat ja muut kuvassa tai taustassa olevat elementit, kuten esimerkiksi tuli tai usva.

Kameran säteen kohdatessa kappaleen pinnan määritetään kappaleen pikselille väri. Väri määräytyy sen mukaan, kuinka paljon ja kuinka monesta valonlähteestä valoa pikselin määrittämään kohtaan tulee [Povray, 2005]. Varjot, heijastumat ja kappaleen läpinäkyvät osat sekä sisäpinnat määräytyvät myös erilaisten säteiden avulla.

Povrayhin on tarvittaessa saatavilla myös graafinen käyttöliittymä, joka voi helpottaa kokemattoman ohjelmoijan työtä. Pääsääntöisesti Povraylla on kuitenkin helppo aloittaa 3D-mallinnus, jos käyttäjä omaa yhtään ohjelmointitaita, sillä perusfunktiot eivät ole monimutkaisia, eikä älykkyyttä kuviin tarvitse tai voi tehdä. Vastaavasti kokenut ohjelmoija voi tehdä erittäin monimutkaisia ja vaativia mallinnuksia Povrayta käyttämällä, mutta tällöin konetehosta riippuen kuvan laskemiseen voi koneelta kestää jopa päiviä (kuva 9). Povrayta on

myös helppo kokeilla, sillä kääntäjän saa ilmaiseksi Povrayn verkkosivuilta ja kääntäjän voi asentaa tunnetuimpiin käyttöjärjestelmiin. [Povray, 2005]



Kuva 9: Povraylla pystyy tekemään valokuvamaisia kuvia [Povray, 2005].

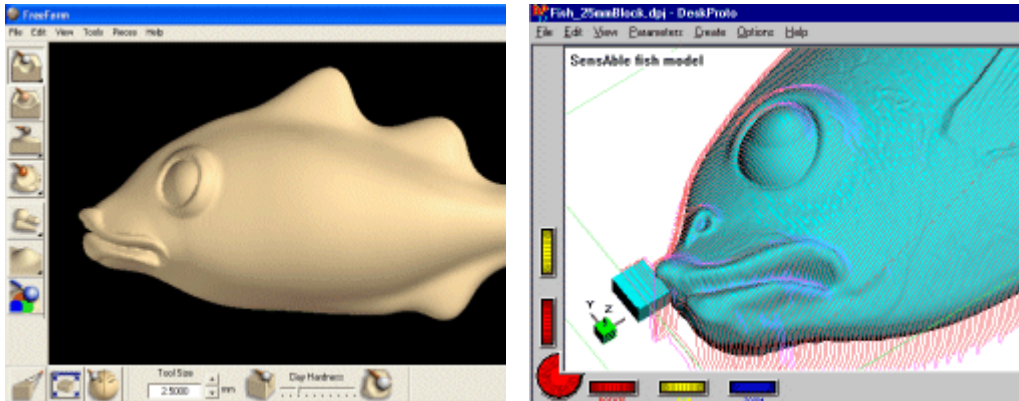
3.4. Veistään 3D-taiteilijaksi – Freeform

Sensable Technologiesin Freeform on toiminnaltaan puhdas veisto-ohjelma [Sensable, 2005b]. Freeformissa on käytetty hyväksi sekä tuntopalautetta että suorakäyttöisyyttä. Freeformilla on helppo luoda kolmiulotteisia kappaleita, vaikka käyttäjällä ei olisi lainkaan ohjelmointitaitausta. Sovellusta voi käyttää opettelematta ensin lukuisia komentoja.

Kolmiulotteisissa mallinnusohjelmissa toiminnot yleensä hukutetaan suureen valikkoviidaksoon, kun taas veisto-ohjelmassa tekstipohjaisista valikoista pyritään pääsemään eroon (kuva 10). Sovelluksen ei suinkaan tarvitse olla vähemmän monipuolisempi sen takia, että asioita ei listata monimutkaisiin ja syviin tekstivalikoihin. Toiminnot voidaan esittää erilaisin painikkein käyttäen erilaisia metaforia. Myös Freeformissa toiminnot ovat esillä ja käyttäjä pystyy valitsemaan helposti halutun toiminnon. Freeformin käyttöliittymässä on pyritty siihen, että se olisi mahdollisimman intuitiivinen [Sensable, 2005b].

Freeformin vahvimpia puolia on sen tuntopalaute. Tuntopalauteen avulla kaksiulotteisella näytöllä oleva kappale saa käyttäjän mielessä todellisen kolmiulotteisen muotonsa, kappaleen pinta on helppo tuntea ja veistotyökalua on mahdollista ohjata oikein 3D-maailmassa. Freeformia onkin kaikkein järkevintä käyttää tuntopalauteen antavan syöttölaitteen kanssa. Usein syötönantoon käytetään Freeformin yhteydessä PHANTOM-laitetta [Sensable, 2005a].

PHANTOMin avulla on helppo luoda illuusio digitaalisesta veistotyökalusta, jolla käyttäjä voi muovata veistettävää kappaletta näytöllään.



Kuva 10: Freeformin työkaluja ei käytetä käyttöliittymään upotettujen tekstipohjaisten valikoiden kautta.

Freeform mahdollistaa kappaleiden realistisen mallintamisen lisäksi esimerkiksi kappaleiden yhdistelyn, maalaustyökalun käytön, kuvien liittämisen ja yksityiskohtien hiomisen monin eri tavoin. Freeformilla on myös mahdollista muokata muissa sovelluksissa tuotettuja 3D-malleja.

Freeform voi helposti kuulostaa täydelliseltä 3D-mallinnussovellukselta, kun käyttäjän ei tarvitse osata ohjelmoida, olla hyvä matematiikassa ja veistäminen on luonnollisen veistämisen kaltaista. Todellisuudessa veisto-ohjelmat eivät kelpaa esimerkiksi sellaisiin tehtäviin, joissa on tarkoitus tehdä tarkkaa työtä, kuten esimerkiksi mallintaa jokin tehdastuotantoon tuleva tuote. Veistäen ei koskaan voida päästä matemaattisessa tarkkuudessa samaan tulokseen kuin esimerkiksi ohjelmilla, jotka perustuvat matemaattisiin funktioihin kappaleiden mallinnuksessa. Freeformin kaltainen ohjelma toimii kaikkein parhaiten tilanteissa, joissa tarvitaan luovia ratkaisuja matemaattinen tarkkuus unohtaen.

Toinen huono puoli Freeformin ja PHANTOMin yhteiskäytöllä on sen hinta. Mikäli Freeformia käytetään PHANTOMilla hinta nousee vähintään useisiin tuhansiin euroihin, jopa kymmeneen tuhansiin PHANTOMin mallista riippuen. Tavallinen harrastekäyttäjä ei tällaisia hintoja voi maksaa ja siitä syystä Freeformia käytetäänkin pääsääntöisesti tutkimus- tai muussa ammattikäytössä. Veisto-ohjelmia voi käyttää myös monilla muilla erilaisilla syöttölaitteilla, mutta toimivasta kokonaisuudesta tulee lähes aina hintava.

3.5. Sovellusalueita

Kolmiulotteista grafiikkaa voi soveltaa lähes jokaisella elämän osa-alueella. Se onkin vallannut ihmisten elämän. Siihen törmää väistämättä lähes jokaisessa työssä ja lähes yhtä varmasti vapaa-aikana. 3D-grafiikka kiehtoo niin taiteen ja

tieteen kuin viihdealalla toimivaakin. Kolmiulotteisen grafiikan käytöllä ei tunnu nykyisin olevan enää rajoja.

Foley *et al.* [2000], jaottelevat tietokonegrafiikan käyttökohteet käyttöliittymiin, esitysgrafiikkaan, kartografiaan, lääketieteen sovellusalueisiin, tietokoneavusteiseen suunnitteluun, simulointiin, multimediaan ja animointiin. Kolmiulotteista grafiikkaa voidaan käyttää niissä hyvin luontevasti:

- **Käyttöliittymät:** Useissa tietokoneissa on graafinen käyttöliittymä, jossa kuvakkeet, painikkeet ja ikkunat ovat yksinkertaista grafiikkaa. Tulevaisuudessa käyttöliittymät tulevat sisältämään yhä enemmän kolmiulotteisia elementtejä.
- **Esitysgrafiikka:** Tieteellisten, taloudellisten, matemaattisten ja fyysisten tulosten visualisointi 3D-kuvaajin, -diagrammein ja kolmiulotteisin histogrammein on parhaimmillaan hyvin havainnollistavaa.
- **Kartografia:** Kolmiulotteisen grafiikan avulla voidaan luoda tarkkoja 3D-karttamalleja, esimerkiksi merenpohjasta.
- **Lääketiede:** Lääketieteessä 3D-grafiikan käyttö yleistyy nopeasti suunniteltaessa toimenpiteitä ja diagnooseja tehtäessä. Kerrosteisella magneettikuvalla luodaan esimerkiksi potilaan aivoista 3D-kuva.
- **Tietokoneavusteinen suunnittelu (Computer Aided Design, CAD):** CAD:ssa käytetään apuna suunnitteluun tarkoitettua grafiikkaa, jonka avulla suunnitellaan laitteita ja järjestelmiä, kuten autoja ja rakennuksia. Arkkitehtuurissa ja rakennustekniikassa kartoitusten tai maastomallien hahmottamisessa voidaan hyödyntää CAD:n tarjoamia tarkkoja kolmiulotteisia malleja. Luultavasti ensimmäinen sovellus, jossa 3D-grafiikkaa on käytetty, on Timothy Johnsonin kolmiulotteinen CAD-ohjelma, SketchPad III [Johnson, 1963].
- **Multimedia:** 3D-grafiikka voi havainnollistaa ja tukea tekstiä ja ääntä.
- **Simulointi:** Simuloimalla reaalimaailmaa voidaan helposti oppia erilaisista ilmiöistä. Fyysisten asioiden simuloimista käytetään hyväksi esimerkiksi lentokoulutuksessa, kun oppilas voidaan viedä todentuntaiseen 3D-ympäristöön riskeeraamatta ihmishenkiä.
- **Animointi:** Animoimalla voidaan visualisoida tieteellisiä tapahtumia, reaktioita ja seurauksia. Animaatiota käytetään myös viihdeteollisuudessa.
- **Viihde:** Elokuva-, peli-, mainos- ja musiikkiteollisuuden sekä 3D-grafiikan riippuvuus on kiistämätön. Viestintä 3D-grafiikkaa hyväksi käyttäen on nykyisin osa arkipäivää. Erilaiset erikoistehosteet ja tehoilmalsukeinot ovat pysyvä osa 2000-luvun yhteiskuntaa.

Kolmiulotteinen grafiikka on tullut jäädäkseen osaksi ihmisten jokapäiväistä elämää. Riippumatta siitä, millä mallinnusmenetelmällä kolmiulotteinen grafiikka on tuotettu, sitä käytetään tällä hetkellä edellisten lisäksi myös esimerkiksi niin taide- ja graafisessa teollisuudessa kuin opetuksessa ja koulutuksessakin. Lista on loputon ja vain osoittaa, että kolmiulotteisen grafiikan käytölle vain mielikuvitus on rajana.

3.6. Lopuksi

Kolmiulotteisten mallinnusohjelmien oppiminen ja käyttö vaativat, että käyttäjällä on jonkinlainen peruskäsitys sovelluksen toiminnasta. Käyttäjän pitää ymmärtää, millainen sovelluksen sisäinen maailma on ja miten siinä maailmassa toimitaan. Käyttäjällä tarvitsee myös olla perustaidot, jotta hän kykenee toimimaan sovelluksen tarjoamassa kehyksessä. Erilaisia, karkeasti luokiteltavia mallinnustapoja on neljä: ohjelmointi, skannaus, veisto-ohjelmat ja näiden tapojen yhdistelmät, joissa on sekä suoraikäyttöisyyttä, valikoita että komentopohjaisia käskyjä. 3D-mallinnus yleistyy yhä tulevaisuudessa, vaikka se on nykyäänkin jo luonteva osa nyky-yhteiskuntaa. Sovellusalueet lisääntyvät ja mukautuvat kolmiulotteiseen maailmaan täyttäen ihmisten arjen.

4. Veisto-ohjelmiin sopivia syöttölaitteita

Markkinoilta löytyy monenlaisia laitteita syötteiden antamiseen. Valittavissa on muun muassa perinteisten syöttölaitteiden lisäksi laitteita, joissa on tuntopalaute tai paljon vapausasteita. Vapausasteilla tarkoitetaan tuettujen liikesuuntien määrää [Computer Desktop, 2005]. Tarpeesta, sovelluksesta ja sovellusalueesta riippuen on mahdollista valita eri hintaluokkaan kuuluvia erikokoisia laitteita. Joissakin 3D-veisto-ohjelmissa voidaan käyttää tavanomaisesti syötteiden antamiseen näppäimistöä ja tavallista hiirtä. Jotakin toista veisto-ohjelmaa taas käytetään kalliimmalla, suurempikokoisella, virtuaalista veistämistä luonnollisemmin kuvaavalla laitteella, kuten Sensable Technologiesin kehittämällä PHANTOMilla [Sensable, 2005a]. Tässä luvussa tarkastelen erilaisten syöttölaitteiden soveltuvuutta veisto-ohjelmiin. Valitsemiani laitteita on joko käytetty veisto-ohjelmissa tai ne sopisivat mielestäni veisto-ohjelmien käyttämiseen.

4.1. Syöttölaitteiden lajittelua

Core-järjestelmässä luokiteltiin laitteet niiden antaman syötteen perusteella loogisiin luokkiin: poiminta-, paikannus-, piirto- ja arvonvalintalaitteisiin, sekä näppäimistöihin ja painonappeihin [GSPC, 1979]. Hearn ja Baker [Hearn and Baker, 1994] jaottelevat syöttölaitteet luokkiin, joiden perusteella varsinaisen laitteen lähettämä tieto osataan tulkita järjestelmässä oikein. Informaation luokittelulla tähdätään siihen, että grafiikkasovellukset olisivat riippumattomia käytettävistä laitteistoista. Hearn ja Baker jaottelevat syöttölaitteet seuraavasti:

- **Paikannuslaitteet** määrittävät osoitettavan paikan koordinaatin. Esimerkiksi kursoria voidaan kuvaruudulla siirtää näppäimistöllä, hiirellä, ohjaussauvalla tai -pallolla.
- **Piirtolaitteet** määrittävät sarjan peräkkäisiä koordinaatteja, ei yksittäisiä koordinaatteja, kuten paikannuslaitteet.
- **Merkkijonolaitteilla** syötetään tekstiä. Usein merkkijonolaite on näppäimistö, mutta myös esimerkiksi äänellä ohjattavia laitteita tai ohjainsauvoja voidaan käyttää syöttämään tekstiä.
- **Arvolaitteet** määrittävät skalaariarvoja. Usein esimerkiksi parametreja on järkevä muuttella ohjauspyörällä. Myös näppäimistöllä voidaan syöttää arvoja, joten sekin voidaan luokitella arvolaitteeksi.
- **Valintalaitteilla** voidaan suorittaa valinta valikosta. Tähän käytetään usein hiirtä, näppäimistöä, paikannussauvaa tai -palloa. Suuremmissa valikoissa käytetään joskus kosketusnäyttöjä.
- **Poimintalaitteilla** valitaan kuvan osia jatkokäsittelyä varten. Yleensä poimintalaitteina käytetään samoja laitteita kuin valintalaitteina.

Usein tietokonegrafiikkaan soveltuvat tietokoneet sisältävät näppäimistön ja joitain muita syöttölaitteita kuten hiiren, paikannussauvan, ohjainpallon tai esimerkiksi kuvanlukijan. Harvinaisempia syöttölaitteita ovat digitointikamerat, datahanskat, valokynät, kosketuspaneelit, ääniohjauslaitteet ja tilapallo [Hearn and Baker, 1994].

Kolmiulotteisen kappaleen luomiseen sopii minkä tyyppinen syöttölaite tahansa; ohjelmoitaessa syöttölaitteena käytetään merkkijonolaitetta, skannattaessa voidaan ajatella käytettävän paikannuslaitetta luettaessa kappaleen pinnan muotoa ja piirtolaitetta, kun kappale mallinnetaan esimerkiksi kolmiverkkokuvaksi. Veisto-ohjelmaan syöttölaitteiksi sopivat niin paikannus-, piirto-, arvo-, valinta- kuin poimintalaittekin. Esimerkiksi paikannuslaitteella voidaan kohdentaa työkalu oikeaan kohtaan, piirtolaitteella muokata veistettävää kappaletta, arvolaitteella muuttaa työkalun kokoa, valintalaitteella valita uusi työkalu ja poimintalaitteella veistää kappaleesta osa irti. Vain merkkijonolaitteet eivät luonteensa vuoksi saisi kuulua suorakäyttöisen veisto-ohjelman syöttölaitteiksi, mutta joissakin veisto-ohjelmissa voi joitakin toimintoja olla toteutettu myös näppäimistön avulla. Valittava syöttölaite muotoutuu kunkin veisto-ohjelman ja veistäjän tarpeen mukaan. Veisto-ohjelmaan voidaan tehdä tuki useammallekin syöttölaitteelle, jolloin käyttäjä voi valita mieleisensä laitteen tai laitteet. Usein myös yksi syöttölaite voi kuulua useaan luokittelun luokkaan, eikä siksi käyttäjä todellisuudessa tarvitse montaa syöttölaitetta veistämiseen.

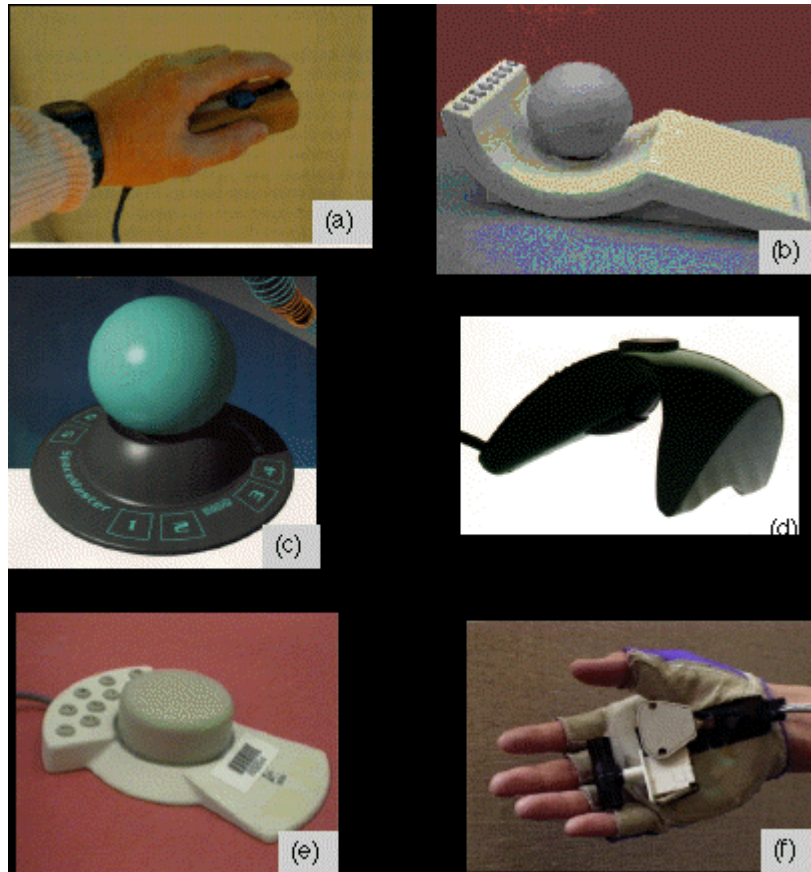
Erään jaottelun mukaan syöttölaitteet voidaan jakaa isometrisiin ja isotoniisiin laitteisiin [Zhai, 1995]. Isometrisiä laitteita kutsutaan usein paine- tai voimapalautelaitteiksi; syöttölaitteen ohjaamiseen on käytettävä voimaa, sillä laitetta ohjataan sen antaman voimapalautteen tai vääntömomentin mukaan. Veistosovelluksissa voidaan käyttää isometristä syöttölaitetta. Liikutettaessa työkalua kappaleella on hyvä tuntea kappaleen pinta. Isometrinen laite mahdollistaa pinnanmuotojen tarkastelun rajattoman vastuksensa avulla.

Isotonisilla laitteilla sen sijaan voi olla vakio vastus tai ei ollenkaan vastusta. Isotonisia laitteita käytetään voiman sijaan liikkeen kautta. Myös isotoniset laitteet sopivat veisto-ohjelmiin, vaikkakaan ei niin hyvin kuin tuntopalautteen antavat isometriset ohjaimet; työkalua voi ohjata myös hiirellä, joka on isotoninen laite. Isotonisten ja isometrinen laitteiden lisäksi on laitteita, joilla on vaihteleva resistanssi [Zhai, 1995]; esimerkiksi elastisten laitteiden palautteen antava vastustava voima voimistuu laitteen liikkeessä, kun taas toisten laitteiden vastustava voima kasvaa nopeuden kasvaessa tai vauhdin kiihtyessä.

4.2. Kuudensuunnan ohjaimet

Nimitys kuudensuunnan ohjaimesta tulee ohjaimen kuudesta vapausasteesta (*six degrees of freedom*, 6DOF). 6DOF mahdollistaa x-, y- ja z-akselien käytön.

Laitteella on kuuden suunnan vuoksi mahdollista liikkua horisontaalisesti, vertikaalisesti ja syvyys suunnassa sekä pyörittää kappaletta jokaisen akselinsa ympäri, kun 3DOF mahdollistaisi vain akseleita pitkin kulkemisen [Computer Desktop, 2005]. Tunnettuja kuudensuunnan ohjaimia ovat esimerkiksi erilaiset ohjaussauvat, 3dconnexionin valmistamat SpaceBall, SpaceTraveller ja Space-Mouse [3dconnexion, 2005], Sensable Technologiesin PHANTOM [Sensable, 2005a] sekä esimerkiksi Ascension 6D Mouse [Ascensio, 2005]. Kuvassa 11 on esitelty joitakin kuudensuunnan ohjaimia.



Kuva 11: 6DOF laitteita: a) ”Bat”, koostuu Polhemus paikantimesta ja kädessä pidettävästä ohjainkahvasta b) isometrinen Spaceball c) elastinen SpaceMaster d) isotonisen, vapaasti liikuteltavan Cricket-laitteen paikanninlaite on ohjainkahvan sisällä e) elastinen Space Mouse f) The MITS Glove.

4.2.1. Avaruushiiret - SpaceMouse ja SpaceBall

Kaksiulotteisten hiirten rajalliset käyttömahdollisuudet kolmiulotteisissa sovelluksissa on aiheuttanut sen, että 3D-sovellusten käyttöön on jouduttu kehittämään omia, erillisiä hiiriä, niin sanottuja 3D-hiiriä. Ne mahdollistavat luonnollisemman toimimisen avaruudellisissa ympäristöissä kuin perinteiset hiiret. 3D-hiiriä valmistetaan useita erilaisia malleja. Joskus jopa virtuaaliohjaussauvoja kutsutaan 3D-hiiriksi. 3D-hiirissä onkin eroja muun muassa siinä, käytetäänkö

hiirtä työtasolta vai ilmasta. Eroista huolimatta hiiret kuitenkin toimivat hyvin samalla tavalla kolmiulotteisessa ympäristössä ja siksi niitä voidaan kutsua yhteisnimellä avaruushiiret. [3dconnexion, 2005; Vrealities, 2005]. Tässä käsitellään esimerkkinä avaruushiiristä 3dconnexionin valmistamat SpaceMouse- ja SpaceBall-syöttölaitteet (kuva 12).



Kuva 12: SpaceMouse ja SpaceBall.

SpaceMouse ja SpaceBall ovat hyviä työvälineitä kolmiulotteisten kappaleiden käsittelyyn. Ne tukevat 3D-kappaleen liikuttamista, kohdistamista ja pyörittämistä helpottaen oleellisesti 3D-mallien käsittelyä näytöllä. SpaceMousen ja SpaceBallin varsinainen kolmiulotteinen ohjain on sen optinen ”ohjauspalikka” tai ”ohjauspallo”, jonka päälle sormet kevyesti lasketaan [3dconnexion, 2005]. Esimerkiksi SpaceBallin ohjauspalloa voi liikuttaa kahden akselin suuntaisesti kevyesti sormilla ohjaten. Ohjauspalloon kohdistuvan paineen myötä kappale liikkuu myös syvyysuunnassa. Kappaleen kääntäminen ja liikuttelu 3D-maailmassa on varsin luonnollisen tuntuista, kun mallinnettavan kappaleen voidaan ajatella olevan oikeasti kädessä ohjauspallon paikalla.

Moniin avaruushiiriin on lisätty pikavalintanäppäimiä yleisimmin käytetyille toiminnoille, kuten on tehty sekä SpaceMousessa että SpaceBallissa. SpaceMousessa on 11 ohjelmoitavaa nappia, jotka mahdollistavat toiminnot myös perinteisin keinoin nappia painamalla. Yhdeksän numeroitua nappia on sijoitettu SpaceMousen kärkeen ja kaksi numeroimatonta ohjauspallon sivuille. SpaceBallissa sen sijaan ohjelmoitavia nappeja on 12. [3dconnexion, 2005]

Avaruushiiriä käytetään usein 3D-mallinnussovelluksissa jonkun 2D- tai 3D-ohjaimen rinnalla. Tämä työskentelytapa sopii myös veisto-ohjelmiin. Usein on tarpeellista pyörittää kappaletta ja muokata sitä samalla. Eräs tapa on liikuttaa kappaletta avaruushiirellä ja työkalua tai kursoria jollakin muulla laitteella [LeBlank *et al.*, 1991; Raffin *et al.*, 2004]. Joka tapauksessa avaruushiiret mahdollistavat molempien käsien ottamisen tehokkaasti mukaan työskentelyyn, lisäten näin työn nopeutta ja tuottavuutta.

SpaceMouse- ja SpaceBall-avaruushiiret tukevat useimpia johtavia 3D-ohjelmistoja. SpaceMouselle on tehty tuki yli sataan 3D-ohjelmaan, joukossa lähes kaikki tunnetuimmat 3D-mallinnusohjelmat [3dconnexion, 2005]. Ergonomisista muotoiluista ja hyvästä käytettävyydestä huolimatta laitteet eivät välttämättä helposti löydä peruskäyttäjiä. Heille laitteet saattavat olla vielä suhteellisen kalliita. Tällä hetkellä SpaceMousen hinta vaihtelee nykyisin 340–410 euron välillä hieman mallista riippuen, SpaceBallin hinta on 240–490 euroa.

4.2.2. Sensable PHANTOM

Alkujaan Massachusetts Institute of Technologyssä kehitetty, SensAble Technologiesin PHANTOM-sarja [Sensable, 2005a] on eräänlainen voima- ja tuntopalautekniikan yhdistelmä. Siinä käyttäjä laittaa sormensa nivelletyn varren päässä olevaan ohjaustikun päälle ja voi tunnustella sen avulla keinomaailman kappaleiden muotoja.

PHANTOM on erinomainen syöttölaite veisto-ohjelmaan ja sitä käytetään laajasti veisto-ohjelmien syöttölaitteena [McDonnell *et al.*, 2001a; Raffin *et al.*, 2004; Sensable, 2005b]. Toisin kuin esimerkiksi SpaceMousea tai tavallista hiirtä PHANTOMia ei käytetä samaan tapaan pöydällä. PHANTOMin ohjaustikkua käsitellään ilmassa, ikään kuin taiteilija käsittelisi oikeaa työkalua tai maalaus-sivellintä työskennellessään (kuva 13).



Kuva 13: Veisto-ohjelmaa voidaan käyttää PHANTOM Omni -laitteella.

PHANTOM mahdollistaa luonnollisen työskentelyn. Käyttäjä liikuttaa ohjaustikkua ilmassa ja näkee tietokoneen ruudulla ohjaustikkua vastaavan työkalun. Ruudulla olevalla työkalulla käyttäjä voi esimerkiksi veisto-ohjelmassa kaivertaa kappaleeseen erilaisia uria. PHANTOM mahdollistaa kolmiulotteisen tunto- ja voimapalautteen yhden pisteen välityksellä. Tuntopalautteen ansiosta käyttäjä tuntee kappaleen pinnan ja jopa materiaalin, josta kappale on tehty [Sensable, 2005a]. Käyttäjälle saadaan helposti luotua mielikuva, että hän oikeasti koskettaa veistettävää kappaletta. Tunne veistämisestä on hyvin realistinen.

PHANTOMeita valmistetaan tällä hetkellä useita versioita. Pienimmät koneet mahtuvat kätevästi työpöydälle, kun taas isoimmille on varattava reilusti tilaa. Pienten PHANTOMien ongelmana on, että mahdollinen työalue jää varsin pieneksi. Suurien kohdalla vastaan tulee helposti taas tilan puute. Pienimpien laitteiden, PHANTOM Omnin, PHANTOM Desktopin ja PHANTOM Premium 1.0:n, työalueet ovat suuruudeltaan 16x12x7 cm, 16x12x12 cm ja 25x18x13 cm, jolloin ne mahdollistavat käden liikealueen rannetta liikuteltaessa [Sensable, 2005a]. Premium 1.5 ja 1.5/6DOF -laitteiden työalue on 19,5x27x37,5 cm [Sensable, 2005a]. Tällöin työalueeseen kuuluu myös kyynärvarren liikutusalue. Suurimman eli Premium 3.0 -mallin työalue on 41x59x84 cm, jolloin käyttäjä voi käyttää koko käsivartensa työskentelyaluetta [Sensable, 2005a].

PHANTOMin huonoin piirre on sen hinta. Tällä hetkellä hintahaitari on suuri, sillä pienimpien PHANTOMien hinnat liikkuvat 2000 euron luokassa, kun taas suurempien laitteiden hinta on jopa noin 65 000 euroa [Inition, 2005]. Pienenkin PHANTOMin hankintaan kuluu yksittäiseltä kuluttajalta paljon rahaa ja se voi olla liian suuri hinta perustietokoneen käyttäjälle tai 3D-mallinnuksen harrastajalle. Sen sijaan tutkimuslaitoksissa ja yritysmaailmassa PHANTOMit yleistyvät.

PHANTOMin luonnollisesta käyttötavasta johtuen sitä voisi käyttää monilla uusilla sovellusalueilla. Sovelluksissa tulee kuitenkin ottaa huomioon se, että pitkään käytettynä PHANTOMin ohjaintikun kannatteleminen voi väsyttää käyttäjän kättä. PHANTOMia ei tulisikaan käyttää sovelluksissa, jossa väsymisestä johtuva vapina häiritsee työn tekemistä oleellisesti. Esimerkiksi jos PHANTOMia käytettäisiin sovelluksessa, jonka avulla lääketieteenopiskelijat harjoittelevat erilaisia kirurgisia operaatioita, PHANTOM ei välttämättä kuvaa realistisesti leikkaustyökalua ja väsyminen pitkän operaation aikana voi johtaa ei-toivottuun oppimistulokseen.

4.3. 3D-Ohjaussauvat

3D-ohjaussauvat (*joystick*) muistuttavat ulkonäöltään tietokonepeleistä tutuksi tulleita 2D-ohjaussauvoja. Ohjaussauvat ovat alkuaan olleet 2DOF-ohjaimia, jolloin niiden avulla on voinut kulkea vain x- ja y-akseleiden suuntaisesti. Ny-

kyään markkinoilta löytyy kolmiulotteisiin sovelluksiin sopivampia laitteita, 3D-joystickeja, joiden avulla käyttäjä voi kulkea myös syvyysuunnassa. Joitakin 3D-ohjaussauvoja voidaan käyttää kuudensuunnanohjaimien tapaan laitteissa olevien ohjelmoitavien nappien avulla [Logitech, 2005]. Kuudensuunnanohjaimien tapaan ohjaussauvalla voi tällöin kulkea x-, y- ja z-akseleita pitkin sekä pyörittää, kääntää ja kallistaa ohjattavaa kappaletta ja laitteita voi käyttää muun muassa kappaleen tai maailman pyörittämiseen kolmiulotteisessa ympäristössä.

3D-ohjaussauvoja pidetään 2D-sauvojen tapaan työskentelyn aikana pöydällä. Lisäksi markkinoilta löytyy pöytämalleista poikkeavia virtuaaliohjaussauvoja (*virtual joystick*), jotka eivät enää ole sidottuja työtasoihin, vaan joita voidaan liikutella ilmassa [Vrealities, 2005]. Virtuaaliohjaussauvat eroavat hieman ulkonäöltään 3D-sauvoista (kuva 14). Virtuaaliohjaussauva tunnistaa käyttäjän käden liikkeitä ja ohjaa liikkeen mukaan kappaletta. Virtuaaliohjaussauva on suunniteltu pääasiassa peliohjaimeksi, mutta sitä voisi hyvin käyttää myös veisto-ohjelmissa. Virtuaaliohjaussauvan pyörittely ilmassa voi kuvata esimerkiksi käsiteltävän kappaleen pyörittämistä tai työkalun käyttöä. Virtuaaliohjaussauvan pitkäaikainen liikkuttelu ilmassa voi rasittaa käyttäjää, kun ohjaussauvan kannattelu väsyttää kättä.

Ohjaussauvoja valmistaa tällä hetkellä moni valmistaja ja useimmat niistä ovat asennettavissa helposti nykyisiin tietokoneisiin [Logitech, 2005]. Ohjaussauvojen etuna on niiden suhteellisen edullinen hinta ja 6DOF-ominaisuuksien kanssa ohjauksen luonnollisuus.



Kuva 14: 3D- ja virtuaaliohjaussauva [Logitech, 2005; Vrealities, 2005].

4.4. Datahanska

PHANTOMin ohella luonnollinen syöttölaite veisto-ohjelmaan on tuntopalautteen antava datahanska, jolla käyttäjä voisi tarttua kappaleeseen ja pyörittää sitä pitäen kappaletta virtuaalisessa kädessään [Wong *et al.*, 2000; Frederick *et*

al., 2001]. Datahanskan, tai toisinaan virtuaalihanskan, avulla käyttäjän on mahdollista kokea virtuaalimaailma luontevasti koskettelemalla kolmiulotteisia kappaleita.

Hanskoissa on vaihteleva määrä vapausasteita, edistyneimmät pystyvät tunnistamaan kaikki ihmiskäden 22 vapausastetta [Immersion, 2005b]. Datahanskoissa on anturi käden paikan mittaamiseen, minkä lisäksi sormien asento mitataan esimerkiksi venymäliuskoilla tai mekaanisilla nivelillä. Datahanskojen ulkonäössä saattaa olla huimia eroja ja samalla valmistajallakin voi olla useita eri malleja. Toiset malleista muistuttavat enemmän käteen asennettavaa rauta-kehikkoa, kun toiset taas muistuttavat puettavia hanskoja [Fifth Dimension, 2005; Immersion, 2005b].

Esimerkiksi Immersionin CyberGrasp [Immersion, 2005b] on voimaa tuottava luuranko, joka sopii CyberGlove-käsineen päälle ja mahdollistaa tarttumisen luotuihin 3D-kappaleisiin. Laitteen voimat tuotetaan luurangon nivelien avulla. Nivelet johtavat voiman sormenpäihin jokaiselle yksittäiselle sormelle erikseen [Immersion, 2005b]. Voimapalautteen avulla käyttäjät voivat tuntea kolmiulotteisten kappaleiden koon ja muodon. Veistettäessä tällaisen datahanskan avulla käyttäjä voi pidellä kappaletta kädessään ja tuntea sen muodon samalla kun toinen käsi muokkaa kappaletta.



Kuva 15: Fifth Dimensionin [Fifth Dimension, 2005] Data Glove 5 Ultra ja Immersionin CyberGrasp.

Immersionin CyberGrasp ei estä käden normaaleja liikkeitä ja se on suunniteltu niin, että se voidaan helposti muuttaa sopimaan erikokoisiin käsiin [Immersion, 2005b]. CyberGrasp voi näyttää aluksi jopa pelottavalta kehikkomaisuutensa vuoksi, kun taas esimerkiksi Fifth Dimensionin [Fifth Dimension, 2005] Data Glove 5 Ultran tapaiset, puettavat mallit ovat esteettisempiä ja luonnollisemman näköisiä (kuva 15). Uskoisin, että tulevaisuudessa puettavat hanskat valtaavat markkinat, kunhan datahanskojen korkea hinta alenee. Datahanskojen hinnat vaihtelevat malleittain jopa 800-45000 euron välillä [Inition, 2005].

4.5. 2D-Hiiret

Yksinkertaisimmissa veisto-ohjelmissa voidaan käyttää tavallista hiirtä syötteiden antamiseen. Kaksiulotteiseen maailmaan tarkoitettu hiiri ei ole paras ohjain kolmiulotteiseen veisto-ohjelmaan kaksiulotteisuudestaan johtuen [Dachille *et al.*, 1999; Wong *et al.*, 2000] ja siksi sen rinnalla olisi hyvä käyttää jotakin 3D-ohjainta. 2D-hiirten käyttöä puoltavat niiden helppo saatavuus, asennettavuus, tuttuus ja ennen kaikkea halpa hinta verrattuna varsinaisiin 3D-laitteisiin.

Rullahiirellä voi olla mahdollista toteuttaa joitakin yksittäisiä kolmannen ulottuvuuden toimintoja, mutta nämä toiminnot eivät ole kovinkaan luonnollisia hiiren kaksiulotteisuudesta johtuen. Työkalun liikuttaminen voidaan joissakin tapauksissa kuitenkin jättää hiiren tehtäväksi, jos esimerkiksi rullaa pyörittäessä työkalu liikkuu syvyys suunnassa [Parviainen *et al.*, 2004]. Hiirellä voidaan myös esimerkiksi ohjata käyttöliittymää, kun itse veistäminen tehdään 3D-ohjaimella [McDonnell *et al.*, 2001a]. Suorakäyttöisissä veisto-ohjelmissa, joiden tarkoituksena on luoda luonnollinen veisto-kokemus, ei tulisi käyttää näppäimistöä syöttölaitteena, mutta lähestulkoon minkä muun syöttölaitteen kanssa tahansa 2D-hiiren avulla voidaan toteuttaa pienimuotoinen veisto-ohjelma [Dachille *et al.*, 1999; McDonnell *et al.*, 2001a; Parviainen *et al.*, 2004].

Tavallisen hiiren ohella veistosovelluksissa voidaan käyttää taktiilihiirtä, joka mahdollistaa taktiilipalautteet. Palautteet, joita käyttäjä voi saada hiireltä, ovat värinä sekä sen mahdollisesti soittamat nuotit [Dansdata, 2005]. Veisto-ohjelmassa taktiilipalautteen avulla käyttäjälle voidaan kertoa muun muassa, koska työkalu koskettaa kappaletta tai kuinka syvällä työkalu kappaleessa on.

4.6. Pohdintoja syöttölaitteiden sopivuudesta veisto-ohjelmiin

Luonnollisimman käyttökokemuksen saamiseksi veistosovelluksen tulisi olla kaksikäsinen. Illuusio oikeasta veistämisestä pitäisi luoda reaali maailmaa mukaillen niin, että heikompi käsi voisi tukea vahvemman käden tarkempaa työtä ja olla viitekehystenä [Guiard, 1987]. Samalla kolmiulotteinen hahmottaminen paranee, kun käyttäjä voi molemmin käsin tutkia veistettävää kappaletta [Hinckley *et al.*, 1994]. Hahmottaminen paranee oleellisesti myös tuntopalautteen avulla ja tekee veistämisestä entistä realistisempää [Leganchuk *et al.*, 1998]. Onkin suositeltavaa, että veistosovelluksen syöttölaitteista vähintään toinen on tuntopalautelaite ja toinen tai jopa molemmat 3D-laitteita.

Heikommalle kädelle sopivin syöttölaite on laite, joka sopii hyvin kappaleen pyörittämiseen ja ”kädessä pitämiseen”. Luonnollisin laite tähän lienee datahanska, jonka avulla käyttäjä voi tuntea hyvin yksityiskohtaisesti kappaleen pinnan ja muodot [Wong *et al.*, 2000]. Myös avaruushiiret ja ohjaussauvat sopivat hyvin kappaleen pyörittämiseen [Raffin *et al.*, 2004]. Ne tukevat käyttäjän

tuntemusta siitä, kuinka hän voi hallita kappaletta ohjatessaan sitä kääntymään haluttuun suuntaan. Tuntopalautteen ja käden liikeratojen realistisen kuvaamisen ansiosta datahanska on kuitenkin luonnollisin laite ohjailtaessa kappaletta [Wong *et al.*, 2000]. Käyttäjä voi datahanskan avulla ottaa kappaleen virtuaaliseen käteensä ja käännellä sitä samoin kuin oikeassa veistotilanteessa [Frederick *et al.*, 2001]. Datahanska antaa paljon viitteitä kolmiulotteisuudesta ja helpottaa näin ollen havainnoimista.

Työkalun käyttö sen sijaan vaatii tarkkuutta ja huolellisuutta. Edellä mainituista syöttölaitteista mielestäni parhaiten tähän sopii virtuaaliohjaussauvat ja datahanska. Virtuaaliohjaussauvojen sekä datahanskan etu on niiden käyttötapana – niiden ei tarvitse olla yhteydessä kiinteään työtasoon. Virtuaaliohjaussauvan ja datahanskan avulla käyttäjä toimii ilmassa, kuten oikea taiteilija veistäessään. Lisäksi datahanskan tuntopalaute mahdollistaa käyttäjän tarkan työn koskettaessaan veistettävää kappaletta. Toisaalta voidaan miettiä, onko käyttäjälle vastaavaa hyötyä siitä, että hän tarkkaa työtä tehdessään koskettaa useammalla kuin yhdellä pisteellä veistettävää kappaletta. Mikäli virtuaaliohjaussauvoissa olisi tuntopalaute olisivat ne luultavasti tähän jopa luonnollisempia syöttölaitteita kuin datahanska.

Myös PHANTOM on käytännöllinen syöttölaite työkalun ohjaamiseen [McDonnell *et al.*, 2001a; Raffin *et al.*, 2004; Sensable, 2005a; Sensable, 2005b]. Tuntopalaute mahdollistaa hyvän havainnoinnin, kun kappaleen pinnan voi tuntea. PHANTOMin huono puoli on se, että se on sidottu enemmän paikkaan kuin datahanska ja virtuaaliohjaussauvat, mutta tarvittaessa kynämäisen ohjaustikun avulla käyttäjälle on helppo luoda illuusio realistisen veistotyökalun käytämisestä. PHANTOMin yhden pisteen kosketus voi kuvata luonnollisesti veistotyökalun kärjen kosketusta kappaleeseen.

Taulukkoon 4 on koottu laitteiden etuja ja puutteita veisto-ohjelman näkökulmasta. Yleisesti voitaneen sanoa, että kolmiulotteiseen ympäristöön kannattaa aina valita syöttölaitteiksi jokin 3D-ohjain. 2D-hiiriä ei ole kehitetty kolmiulotteiseen ympäristöön ja siksi veistokokemuskin voi jäädä vajavaiseksi, jos 3D-laitteiden sijaan on käytetty kaksiulotteiseen ympäristöön tarkoitettuja laitteita. 2D-hiiren avulla voidaan kuitenkin suorittaa joitakin veisto-ohjelman toimintoja, kunhan rinnalla on jokin 3D-laite [McDonnell *et al.*, 2001a; Parviainen *et al.*, 2004]. Myös 3D-näyttöjen ja/tai -lasien käyttö voi parantaa hahmottamista.

Laite	Hyvää	Huonoa	Hinta
3D-ohjaussauvat	Ulkoisesti tuttuja - muistuttavat tietokonepelien joystickteja, sopii kappaleen pyörittämiseen, kohtuullisen hintainen	Ei yleensä tuntopalautea, saattaa vaatia 6DOF-ominaisuuksien käyttöön saamiseksi ohjaimen nappien yhtäaikaista painamista	Noin 40 €
Virtuaaliohjaussauva	Ei sidottu kiinteään paikkaan, kuvaa realistisesti veistotyökalun liikuttelua ilmassa	Ei yleensä tuntopalautea	Halvimmat noin 80 €, kalleimmat jopa lähes 2000 €
Avaruushiiret	Ohjauspallon ansiosta veistäjä "voi ottaa veistettävän kappaleen käteensä", sopii erityisesti kappaleen pyörittämiseen, hyvä laite kaksikäätiseen sovellukseen	Ei yleensä tuntopalautea	Mallista riippuen 240-500 €
PHANTOM	Tuntopalaute, kynämäisen ohjaustikun avulla on helppo luoda käyttäjälle mielikuvava veistotyökalun liikuttamisesta	Kallis, sidottu paikkaan	Mallista riippuen 2000-65000 €
Datahanska	Voi olla tuntopalaute jokaiselle sormelle erikseen, vapausasteista riippuen mahdollistaa luontevan kappaleen tunnustelun, veistettävää kappaletta "voi pitää kädessä", mallista riippuen voi olla puettava käsine	Mallista riippuen voi olla hyvin hintava, luurankomainen datahanska voi olla epämiellyttävän näköinen	Mallista riippuen 800-45000 €
2D-rullahiiri	Halpa, joitakin toimintoja mahdollista toteuttaa syvyysuunnassa rullan avulla	Ei suunniteltu 3D-ympäristöön eikä sillä siksi ole luonnollista toimia kolmiulotteisessa maailmassa, ei tuntopalautea	Yleisesti 15-80 €
Taktiilahiiri	Taktiilipalautteen avulla voidaan kertoa, koska esimerkiksi työkalu koskettaa kappaleen pintaa tai kuinka syvällä työkalu kappaleessa on	Ei suunniteltu 3D-ympäristöön eikä sillä siksi ole luonnollista toimia kolmiulotteisessa maailmassa	Yleisesti 30-80 €

Taulukko 4: Syöttölaitteiden etuja, puutteita veisto-ohjelman kannalta [Epinions, 2005; Inition, 2005; Logitech, 2005; Vrealities, 2005].

Uudempien laitteiden yleisin ongelma on usein laitteiden kohtuullisen kallis hinta verrattuna esimerkiksi 2D-hiireen. Tavalliselle tietokoneen käyttäjälle esimerkiksi kuudensuunnan ohjainten hankinta saattaakin olla liian suuri investointi, mutta todellisen veistokokemuksen aikaansaamiseksi tarvitaan muuta kuin jokin kaksiulotteinen laite.

4.7. Lopuksi

Veisto-ohjelmassa on oleellista se, millaiset ohjaimet syöttölaitteiksi on valittu. Valittavissa on paljon ohjaimia, joilla lähes kaikilla pystyy ohjaamaan kappaletta kolmiulotteisessa maailmassa, mutta joista toisilla on mahdollisuus tehdä ohjaus luonnollisemmin kuin toisilla. Tämän hetken syöttölaitteista veisto-ohjelman luonnollinen ohjaus voidaan toteuttaa esimerkiksi siten, että heikommissa kädessä olisi datahanska ja vahvemmassa joko tuntopalautteen antava virtuaaliohjaussauva tai PHANTOM. Tällöin kappaleen pyörittäminen ja kädessä pitäminen voisi olla datahanskan tehtävä ja itse veistäminen suoritettaisiin tarkemmilla, yhden pisteen laitteilla. Datahanskan ja PHANTOMin yhteiskäyttö olisi kuitenkin kallista; halvimmillakin malleilla laitteet maksavat tuhansia euroja. Mikäli hinta on esteenä, voi toimivan veisto-ohjelman toteuttaa esimerkiksi tuntopalautteen antavalla virtuaaliohjaussauvalla sekä avaruushiirollä.

5. Veisto-ohjelmia

Tässä luvussa keskitytään veisto-ohjelmiin. Ensiksi käsitellään veisto-ohjelmien historiaa ja niiden yleisiä piirteitä. Lopuksi esitellään veisto-ohjelmiin soveltuvia työkaluja ja pohditaan veistosovellusten eroja laskennallisiin mallinnusohjelmiin verrattuna.

5.1. Veisto-ohjelmat synnystä nykypäivään

Veisto-ohjelmat ovat kehittyneet 1970-luvulta peräisin olevista rautalankamalleista näyttäväksi sovelluksiksi, joilla voidaan luoda luonnollisen näköisiä kappaleita. Nykyisin ja varsinkin tulevaisuudessa veisto-ohjelmaa käyttävän taiteilijan rajana on vain mielikuvitus. Ajatus 3D-veistämisestä on kuitenkin siis peräisin jo 1970-luvun lopulta. Tuolloin keskivertotietokoneet eivät olleet vielä riittävän tehokkaita pyörittämään monimutkaisia ja tarkkoja 3D-malleja reaaliaikaisesti. Kolmiulotteiset mallit olivat tuolloin hyvin yksinkertaisia rautalankamalleja [Parent, 1977]. Niissä ei ollut pinnoitteita, varjostuksia tai muitakaan grafiikan osa-alueita, jotka nykyisin ovat hyvin arkisia osia 3D-mallintamisessa. Rautalankamalleista siirryttiin 1990-luvun alkupuolella varsinaiseen veistämiseen, kun Galyean ja Hughes [Galyean and Hughes, 1991] kehittivät pursottamiseen tarkoitetun työkalun.

Galyeanin ja Hughesin pursotustyökalun avulla voitiin lisätä käsiteltävään kappaleeseen massaa. Myöhemmin pursotustyökalu sai rinnalleen muun muassa työkalun, jolla kappaleesta voitiin kaivertaa massaa pois sekä erilaisia leikkaus- ja maalaustyökaluja. Näillä perustyökaluilla oli mahdollista veistää ja muotoilla kappaletta, kuten taiteilijat ovat vuosisatojen ajan tehneet. Myöhemmin kehitetyillä työkaluilla voidaan tehdä aina vain tarkempaa, parempaa ja monipuolisempaa veistotaidetta.

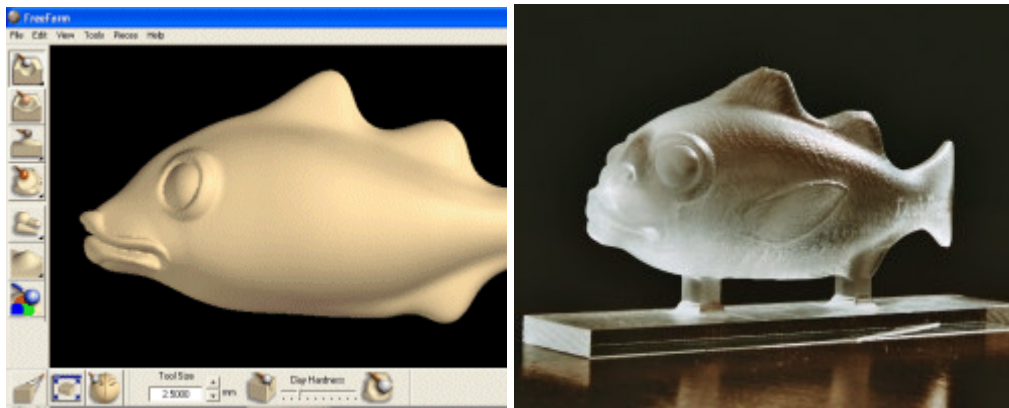
Veisto-ohjelmat eivät ole vielä laajasti yleistyneet, eikä olemassa olevien sovellusten toiminnot ja ohjaimet ole vielä yhtenäistyneet tai standardisoituneet. Myös syöttölaitteiden kirjo on laaja. Standardoimattomuus on aiheuttanut sen, että veisto-ohjelmat ovat hyvin erilaisia ja -tasoisia. Kaksikäisyys ja ohjainvalinnat saattavat aiheuttaa aloittelevalle veisto-ohjelman käyttäjälle aluksi kognitiivisia lisäponnisteluja, kun uudet ohjaimet ja työskentelytavat vaativat keskittymistä. Käytettävyys ja ohjainvalinnat kaikkienensa ovatkin huomattavan tärkeitä, eikä ohjelma saisi tuottaa käyttäjälle lisähuolta huonojen ohjaimien ja työkalujensa takia.

5.2. Veisto-ohjelmien yleisiä piirteitä

Veisto-ohjelmat eroavat tavallisista 3D-mallinnusohjelmista siten, ettei käyttäjän tarvitse tuntea matematiikkaan tai ohjelmointiin perustuvaa mallinnusme-

netelmää tai ohjelman syvällistä käyttöä. Käyttäjä voi toimia kuten taiteilija luoden esineitä ja kappaleita vapaasti käsillään ja reaalielämän työkaluja vastaavilla virtuaalityökaluilla. Kolmiulotteisten veistosten teko vaatii samanlaista ammattitaitoa kuin kuvien veistäminen kivistä tai savesta.

Mallinnus- ja veisto-ohjelmilla on pääasiassa omanlaiset käyttäjäryhmänsä, vaikka hyvä kuvanveistäjä voi olla myös 3D-mallinnusohjelman käytön ekspertti ja kokenut 3D-mallintaja luova, veisto-ohjelmaa luonnollisesti käyttävä kuvanveistäjä. Veisto-ohjelmat antavat kuitenkin mahdollisuuden kolmiulotteisten kappaleiden tekemiseen suoraan tietokoneelle esimerkiksi kuvanveistäjille ja muille taiteilijoille, jotka suunnittelevat erilaisia kolmiulotteisia hahmoja, mutta jotka eivät ole tottuneita 3D-mallinnusohjelmien käyttäjiä. Mallinnetuista virtuaaliobjekteista voidaan luoda myöhemmin fyysisiä malleja, kuten kuvassa 16.



Kuva 16: Veisto-ohjelman 3D-mallista voidaan luoda fyysinen malli.

Reaalimaailmaa simuloivan sovelluksen pitää olla käyttöliittymältään ja muulta toiminnaltaan mahdollisimman johdonmukainen ja todentuntuinen reaalielämän kanssa, jotta illuusio oikeasta toiminnasta voisi syntyä. Luonteva käyttö vaatii, että sovelluksen perustoiminnallisuus on kunnossa, toiminta loogista ja että se vastaa yleisiä ja opittuja käsityksiä. Jo opittuja asioita voidaan kuvata veisto-ohjelmissa metaforien avulla, kun virtuaalityökalut muistuttavat ulkonäöltään ja toiminnaltaan oikeita työvälineitä ja veistettävät kappaleet tuntuvat oikeilta. Varsinkin henkilöille, jotka eivät ole kovin tottuneita käyttämään tietokonetta, on tärkeää, että ohjelmat ovat mahdollisimman ymmärrettäviä. Toisaalta kokeneille käyttäjille on tärkeää, että he voivat toimia tehokkaasti esimerkiksi erilaisia oikopolkuja käyttäen [Nielsen and Molich, 1990].

Veisto-ohjelman periaatteisiin kuuluu suorakäyttöisyys, jolloin käytettävät toiminnot ovat esillä ja nopeasti löydettävissä. Kolmiulotteiseen maailmaan siirryttäessä toimintojen, ohjaimien ja työkalujen käytettävyyden ainoastaan korostuu, sillä 3D-maailma tuo uusia haasteita, joihin käyttäjän on keskityttävä.

Veisto-ohjelmissa tuleekin käyttää samoja lainalaisuuksia, kuin muissa 3D-mallinnusohjelmissa, joissa kolmiulotteisen vaikutelman syntymistä on tuettava erilaisin visuaalisin viestein. Joissakin tapauksissa realistista veistokokemusta voidaan parantaa kaksikätsyydellä ja tuntopalautteella.

Joihinkin veisto-ohjelmiin voidaan tuoda 2D-piirustuksista koottuja 3D-malleja; kaksiulotteisista kuvista voidaan luoda 2D-käyriä ja niiden avulla rakentaa kolmiulotteisia malleja [Sensable, 2005b]. Tällaisten kaksiulotteisista kuvista koottujen kolmiulotteisten mallien tulkitseminen saattaa joissakin tapauksissa mennä pieleen, sen sijaan yksittäinen, kolmiulotteinen malli ei jätä niin paljon käyttäjän arvailujen varaan. Tällöin myös mallin ylläpitäminen helpottuu, kun käyttäjän ei tarvitse päivittää useita 2D-kuvia, vaan hän voi tehdä muutoksen vain kerran yhteen kappaleeseen. Työteho parantuu ja vähentää samalla työhön kuluva aikaa ja kustannuksia [Dachille *et al.*, 1999; Sensable 2005b].

Veistosovelluksiin voi joskus myös kaksiulotteisten kuvien lisäksi tuoda jo valmiita, olemassa olevia kolmiulotteisia malleja sekä työkaluja [Raffin *et al.*, 2004; Sensable, 2005b]. Veisto-ohjelmien helpon käytön takia on mahdollista kokeilla vaivattomasti tuotuihin malleihin eri muotoiluvaihtoehtoja ennen kuin niistä tehdään esimerkiksi fyysisiä prototyyppisiä. Veistosovelluksissa voi myös veistämisen lisäksi kokeilla kappaleeseen erilaisia pintoja ja värityksiä.

5.3. Työkaluja

Veisto-ohjelman perustyökaluja ovat pursotus- ja kaiverrustyökalut. Veisto-ohjelmissa on näiden lisäksi käytetty lukuisia muitakin työkaluja [McDonnell *et al.*, 2001b; Parviainen, 2004; Raffin *et al.*, 2004; Sensable 2005b], mutta jo pursotus- ja kaiverrustyökalujen avulla voidaan toteuttaa yksinkertainen veistosovellus. Toisinaan veisto-ohjelmiin pystyy tuomaan omia työkaluja, mikä lisää käyttäjän vapautta veistämiseen [Raffin *et al.*, 2004].

Kaivertaminen on veistämisen perusedellytys. Kautta historian erilaisia materiaaleja on voitu muotoilla erilaisin kaiverrustyökaluin. Muun muassa kivi, marmori, metalli, muovi, paperimassa, puu ja savi ovat olleet veistäjien suosiossa. Kuten reaalielämässä kaivertaminen voidaan toteuttaa monilla erimallisilla ja kokoisilla työkaluilla. Työkalu voi olla pallon, kuution, kolmion tai käyttäjän itsensä määräämän muotoinen. Esimerkiksi Sensable Technologiesin Freeformissa käyttäjä voi muotoilla haluaman mallisen käyrän ja kaivertaa sen avulla veistettävästä kappaleesta palan pois [Sensable, 2005b].

Kaiverrustyökalua voi yhdistää muihin työkaluihin [GuiArt, 2005; Sensable, 2005b]. Käyttäjä voi esimerkiksi luoda 2D-luonnoksen perusteella S-kirjaimen muotoisen kaiverrustyökalun ja sen jälkeen *pyöräyttää* kaiverrettavaa kappalet-

ta akselinsa ympäri. Tuloksena yksinkertaisesta työstä voi olla kaunis ruukku, kuten kuvassa 17 on tehty.



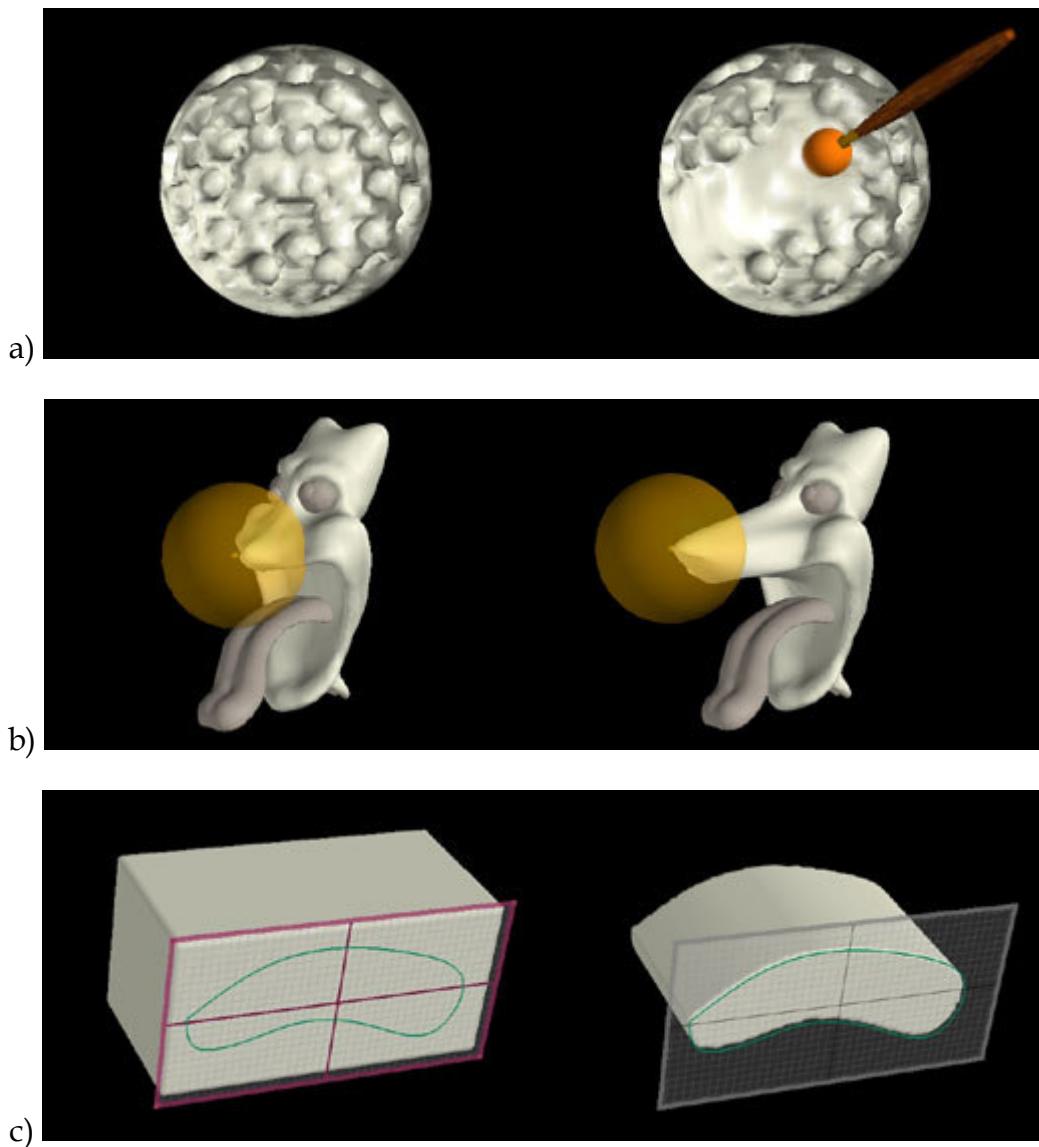
Kuva 17: Yksinkertaisella kaiverruksen ja pyörähdyksen yhteiskäytöllä voi tehdä helposti esimerkiksi ruukun [Sensable, 2005b].

Pursotus on kaiverruksen vastakohta. Siinä kappaleeseen lisätään massaa pursotustyökalun avulla. Pursotustyökalu voi kaiverrustyökalun tavoin olla pallon, kuution, kolmion tai käyttäjän itsensä määräämän muotoinen. Yksityiskohtaisempaan pursottamiseen voidaan käyttää pienempää työkalua, sillä työkalujen kokoa voi yleensä helposti muuttaa.

Pursotuksen ja kaiverruksen lisäksi kehittyneemmissä veisto-ohjelmissä käyttäjä voi hyvin yksinkertaisilla toiminnoilla muuttaa veistettävän kappaleen ulkonäköä ja -muotoa. Kaiverrus- ja pursotusjälki voidaan *pehmentää* erilaisten algoritmien avulla tai tarvittaessa erityisellä pehmennystyökalulla (kuva 18 a). Käyttäjällä voi myös esimerkiksi ottaa kappaleesta kiinni ja *venyttää* sitä haluttuun suuntaan (kuva 18 b) tai *poistaa kappaleesta halutun käyrän muotoisen palan* (kuva 18 c). Muotoilutyökaluja on näiden lisäksi lukuisia ja ne vaihtelevat veistosovelluksesta toiseen.

Kappaleen muotoilutoimintojen lisäksi veisto-ohjelmassa on usein erilaisia työkaluja pinnoitteiden ja värien käyttämiseen. Erilaisilla *maalau-* tai *pinnoite-* *työkaluilla* voidaan elävöittää veistettävää kappaletta ja esimerkiksi ihotekstuurilla voidaan mallintaa luonnollisen näköiset kasvot. Irrallisia kappaleita voidaan myös *liittää* toisiinsa tai vastaavasti kappaleesta voidaan *leikata* osia pois.

Joissakin veisto-ohjelmissä voi olla hahmottamisen apuna käytetty erilaisia *hahmotustyökaluja*: verkkoja, tasoja ja koordinaatistoja. Hahmotustyökalujen avulla käyttäjä voi kohdentaa maailmaa ja ymmärtää paremmin etäisyyksiä ja suuntia. Esimerkiksi Sensablen Freeformissa [Sensable, 2005b] käytetään usein apuna kuvan 18 c-kohdan tapaisia verkkoja, erilaisia tuntopalautteen antavia akseleita ja viivoittimia helpottamaan käyttäjän kolmiulotteista hahmottamista. Parviaisen [Parviainen, 2004] veistosovelluksessa käytetään taas hahmotusta-soa, -laatikkoa ja origo- sekä työkalukeskeistä koordinaatistoa.



Kuva 18: a) Pehmennys- b) Kappaleen venytys – ja c) Käyräpoistotyökalu [Sensable, 2005b].

5.4. Laskennallisten ja taiteellisten mallinnusohjelmien eroja

Veisto-ohjelmat eroavat monella tapaa perinteisistä mallinnusohjelmista (taulukko 5). Veisto-ohjelmia ohjataan usein kaksikätesesti [McDonnell *et al.*, 2001b; Parviainen, 2004; Raffin *et al.*, 2004; Sensable, 2005b], mutta muita mallinnusohjelmia yksikätesesti. Yksikätesissä mallinnusohjelmissä käytetään yleensä hiirtä ja näppäimistöä vuorotellen, kun taas veisto-ohjelmissä käytetään molempien käsien syöttölaitteita samanaikaisesti. Syöttölaitteet eroavat muutenkin hieman toisistaan, sillä veisto-ohjelmia voidaan käyttää muun muassa PHANTOMin, datahanskan tai avaruushiiren kanssa, kun taas tavalliset mallinnusohjelmat pitäytyvät enemmän perussyöttölaitteissa. Joihinkin mallinnusohjelmiin on

tosin mahdollista hankkia veisto-ohjelman laajennuksia, jolloin esimerkiksi avaruushiirten käyttö on mahdollista.

	Laskennalliset mallinnusohjelmat	Veistosovellukset
Ohjaus	Yleensä yksikätkinen	Yleensä kaksikätkinen
Syöttölaitteet	Yleensä 2D- tai 3D-hiiri ja näppäimistö, saatavilla plug-ineja esimerkiksi kuuden-suunnan ohjaimille	Käytetään yleensä joko molemmissa käsissä 3D-ohjainta tai toisessa kädessä 2D- ja toisessa 3D-ohjainta
Käyttöliittymä	Valikoita, komentoja, suorakäyttöisiä osia	Suorakäyttöisiä, tuntopalaute
Käyttäjärühmä	Vaatii mallinnusohjelman tuntemista, matematiikkaa tai ohjelmointia	Kuka tahansa
Tunnetuimmat sovellukset	3D Studio Max ja Maya	Freeform
Lopputuotos	Matemaattisen tarkka, sopii esimerkiksi tavaroiden ja tuotteiden suunnitteluun	Summittainen, taiteellinen, ei sovellu tilanteisiin, joissa tarvitaan matemaattisesti tarkka malli
Hinta	Syöttölaitteet tarvittaessa edullisia, sovellukset ilmaisista jopa tuhansiin euroihin [Alias, 2005]	Syöttölaitteet hintavia, jopa kymmeniätuhansia euroja, sovellukset ilmaisista kymmeniin tuhansiin euroihin [Inition, 2005]

Taulukko 5: Veisto-ohjelmien ja laskennallisten mallinnusohjelmien eroja.

Veisto-ohjelmien suorakäyttöisyyden periaatteen mukaisesti käyttöliittymissä asiat esitetään selvästi ja toimintoja on helppo käyttää, kun taas esimerkiksi Maya-mallinnusohjelmassa tekstipohjaiset valikot ovat hyvin monimutkaisia ja syvärakenteisia. Suorakäyttöisyys johtaakin siihen, ettei käyttäjän tarvitse tuntea ohjelman toimintoja paljoa alkaakseen käyttää veisto-ohjelmaa. Käyttäjän ei tarvitse myöskään osata monimutkaisia komentoja, ohjelmointia tai matematiikkaa luodakseen kolmiulotteisen kappaleen. Käyttö vaatii vain luovaa mieltä.

Veistosovellusten lopputuotokset ovat mielikuvituksellisia ja matemaattisesti epätarkkoja. Muut mallinnusohjelmat sopivatkin paremmin erilaisiin suunnittelutehtäviin, kun tarvitaan esimerkiksi tehdastuotantoon tarkka malli. Veistosovellusten kohderyhmä sen sijaan selvemmin ovat taiteelliset ihmiset, joita matemaattisen tarkkuuden puuttuminen ei häiritse tai tarkkuuden puuttuminen ei ole minkäänlainen ongelma.

Veisto-ohjelmat eivät ole vielä niin yleistyneet kuin Mayan kaltaiset mallinnusohjelmat. Maya ja 3D Studio Max ovat hyvin suosittuja 3D-mallinnuksen harrastajien keskuudessa, mutta veisto-ohjelmia käytetään pääsääntöisesti vielä tieteellisissä yhteisöissä sekä muualla yritys-elämässä. Syynä tähän saattaa olla vielä veisto-ohjelmien vähittäinen tarjonta markkinoilla. Lisäksi suorakäyttöisyydestä, kolmiulotteisuudesta ja kaksikätkisyydestä johtuvat ohjaustavat johtavat siihen, ettei veisto-ohjelmia voi juuri käyttää keskivertotietokoneenkäyttäjän kotoa löytyvillä ohjaimilla, näppäimistöllä ja 2D-hiirellä. Veistosovelluksissa

käytettävien ohjainlaitteiden hinnat ovat huomattavasti laskennallisten mallinnusohjelmien syöttölaitteita kalliimpia.

5.5. Lopuksi

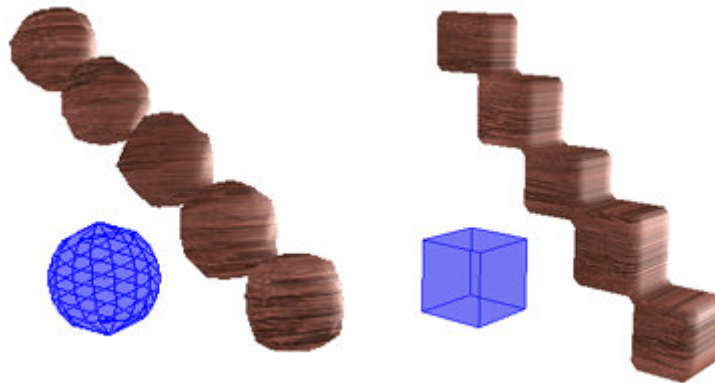
Idea veisto-ohjelmiin on peräisin jo 1970-luvulta [Parent, 1977], jolloin rautalankamalleista kuitenkin oli vielä pitkä matka nykypäivän veistämiseen. Nykyään veistäminen on helppoa ja monipuolista erilaisten työkalujen ansiosta. Hyvin toteutettu veisto-ohjelma kuvaa oikeaa veistämistä tarkasti, mikä antaa mahdollisuuden sellaistenkin käyttäjien mallintaa kolmiulotteisesti, jotka eivät hallitse laskennallisempien mallinnusohjelmien käyttöä. Kaksikäsinen käyttöta-
pa, tuntopalaute ja esillä olevat toiminnot voivat tehdä veistosovelluksista tehokkaita ja luonnollisia käyttää. Käytännöllisyydestään huolimatta veisto-ohjelmia käytetään kuitenkin pääsääntöisesti ammattikäytössä, sillä sovellusten ja veistosovelluksiin sopivien laitteiden hinnat ovat vielä korkealla.

6. Veisto-ohjelmien käytettävyys

Tässä tutkimuksessa tutkitaan veisto-ohjelmiin kehitettyjen hahmotustyökalujen käyttöä (Testi 1) ja taktiilihiiren antaman palautteen vaikutusta käyttäjän veistokokemukseen (Testi 2). Hahmotustyökalujen eduista ja hyödyistä saadut tutkimustulokset [Parviainen *et al.*, 2004] on jo julkaistu APCHI 2004 -konferenssissa. Tutkimuksessa käytetään Tampereen yliopiston tietojenkäsittelytieteiden laitoksella tehtyä ja kehityksen alla olevaa kolmiulotteista veisto-ohjelmaprototyyppiä [Parviainen, 2004]. Sovellus perustuu kaksikäsisyyteen ja ohjelmassa on noudatettu suorakäyttöisyyden perusteita. Prototyyppiä käytetään tavallisella hiirellä ja SpaceMouse-avaruushiirellä.

6.1. Tutkitun veisto-ohjelman kuvaus

Suorakäyttöisyyttä hyödyntävässä prototyypissä tieto on esitetty selvästi ja näkyvästi. Ohjelmaan on toteutettu veisto-ohjelmien perustyökaluista pursotus- ja kaiverrustyökalut. Näitä testejä varten ohjelmaa on muokattu niin, että molempia työkaluja voi käyttää sekä pallo- että laatikkotilassa, eli lisättävä tai poistettava osa on joko pallon tai laatikon muotoinen alue (kuva 19). Työkalujen kokoa voi muuttaa ja niiden avulla käyttäjä pystyy veistämään ja pursottamaan realistisen näköisiä kappaleita.



Kuva 19: Pursotuksessa käytetty pallo- ja laatikkotyökalu.

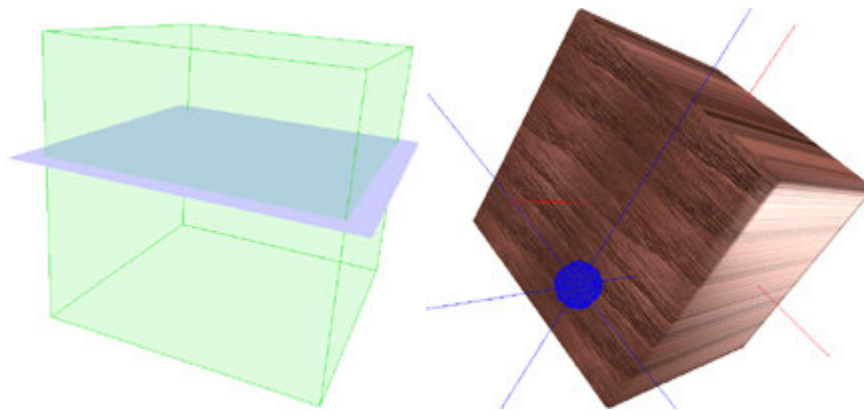
Veistämisen voi aloittaa joko pursottamalla materiaa ohjelman tyhjälle veistoalueelle tai valitsemalla aloituskappaleen, jota voi veistää edellä mainituilla työkaluilla. Aloituskappaleen muodon voi valita halutun malliseksi riippuen siitä, mitä on tekemässä. Pohjaksi on myös mahdollista hakea valmis malli.

Ohjelmaan on kehitetty 3D-maailman havaitsemista auttavia työkaluja (kuva 20). 2D-maailmassa, kuten esimerkiksi paperilla, kolmiulotteista avaruutta on totuttu kuvaamaan xyz-koordinaatistolla. Tätä menetelmää on käytetty ohjelmassa hyväksi kahdella eri tavalla. Tarvittaessa käyttäjä voi asettaa työpöy-

dälle koordinaatiston, joka kääntyy maailmaa käännettäessä. Tämä koordinaatisto pysyy aina kiinteästi kiinni origossa, joka on veistoalueen keskipisteessä. Toinen koordinaatisto voidaan kiinnittää työkaluun, jolloin käyttäjä pystyy hahmottamaan, milloin työkalu koskettaa muokattavaa osaa kappaleessa ja missä kohtaa kappaletta työkalu kulkee sen ollessa kappaleen sisällä.

Havainnointia helpottamaan ohjelmaan on luotu rajauslaatikko. Rajauslaatikko on 3D-kappale, jonka avulla käyttäjä voi havainnoida etäisyyksiä ja syvyyksiä. Koordinaatisto näyttää vain suoria, kun rajauslaatikko tasoja. Samalla se näyttää veistoalueen rajat.

Rajauslaatikosta ja koordinaatistosta on syntynyt ajatus hahmotustasosta. Tason avulla käyttäjä pystyy paremmin hahmottamaan sen, mitkä osat kappaleesta ovat samassa tasossa. Työkalun avulla uuden materian pursottaminen tai vanhan poistaminen käy helpommin etäisyyksien ja syvyyksien selkeytyessä. Myöhemmin tätä työkalua voidaan kehittää niin, että tasoa vasten voi asettaa pursotettavia osia ja tasata erillisiä kappaleita samaan tasoon.



Kuva 20: Hahmottamista helpottavia työkaluja: hahmotuslaatikko ja -taso sekä origokeskeinen koordinaatisto ja työkaluun liitettävä koordinaatisto.

Veisto-ohjelmaa ohjataan kahdella kädellä yhtäaikaisesti. Sovellusta voi käyttää niin, että heikommalla kädellä kappaletta pyöritetään avaruushiirellä ja dominoivassa kädessä on joko tavallinen hiiri tai taktiilihiiri. Taktiilihiirtä käytettäessä hiiri antaa palautteen, kun työkalu koskettaa veistettävän kappaleen pintaa, työkalu kulkee kappaleen sisällä ja kun työkalu irtoaa veistettävästä kappaleesta. Näin käyttäjälle annetaan palautetta kolmiulotteisen kappaleen pinnoista, joita kaksiulotteisella näytöllä on vain näköpalautetta käytettäessä vaikeampi havaita.

Prototyypissä on vielä tiedostettuja puutteita, joita tullaan myöhemmin korjaamaan ja muuttamaan. Puutteistaan huolimatta se on toimiva, itsenäinen ohjelma, jolla pystyy veistämään yksinkertaisia asioita ja jolla voidaan testata käyttäjien toimia ja 3D-maailman hahmottamista.

6.2. Testi 1 – Hahmotustyökalujen käyttäminen

Prototyyppeihin luotiin kolmiulotteisen maailman hahmottamiseen kehitettyjä työkaluja. Tarkoitukseni oli tutkia hahmotustyökalujen toimintaa ja kolmiulotteisuuden hahmottamista. Tässä hahmotustyökalut olivat origokeskeinen koordinaatisto, työkaluun liitettävä koordinaatisto, rajauslaatikko ja hahmotustasot (kuva 20). Testitehtävät on esitetty liitteessä 1.

6.2.1. Ongelmanasettelu

Voidaan olettaa, että kolmiulotteisuuden hahmottamista helpottavat työkalut parantavat työn laatua ja lisäävät käyttäjän työssä onnistumista. Työkalujen käyttö ei välttämättä nopeuta työtä, sillä työkalujen avulla käyttäjät voivat tehdä työnsä tarkemmin ja paremmin ja näin kuluttaa tehtävään jopa enemmän aikaa. Oletin, että käyttäjän olisi helpompi veistää ohjelmalla, kun hänellä oli apunaan hahmotustyökalut.

Testien tarkoitus oli tutkia, miten hahmotustyökalut toimivat ja auttavatko ne käyttäjää hahmottamaan paremmin 3D-maailmaa ja tehtävää, jota hänen piti tehdä. Mitattavien tulosten lisäksi suurin mielenkiinto kohdistui käyttäjien ajatuksiin, joita he kertoivat testin aikana ja joita keräsin testin jälkeen haastattelussa.

Käyttäjien mieltymystä työkaluihin ja niiden tarpeellisuutta tutkittiin niin, että käyttäjälle annettiin vapaus viimeisissä tehtävissä valita, käyttikö hän aputyökaluja vai ei veisto-ohjelmaa käyttäessään. Mikäli testihenkilö vapaaehtoisesti käytti työkaluja, voidaan hänen olettaa mieltyneen käyttämään niitä, tuntevan tarvitsevansa hahmottamiseen tukea ohjelmalta ja uskovan työkalujen auttavan hahmottamisessa.

Käyttäjän työn nopeutta, laatua ja yrityskertojen määrää tarkkailtiin ohjelmaan tehdyn lokin ja käyttäjille tehdyn haastattelun ja kyselyn avulla. Lokiin kirjattiin kaikki käyttäjän toiminnot ja se, kuinka kauan kuhunkin vaiheeseen kului aikaa. Oletin, että hahmotustyökalut parantaisivat testitehtävissä vaadittavaa osoitustarkkuutta ja näin parantaisivat työn laatua. Testeissä seurasin, miten käyttäjät suhtautuivat veistämiseen kokonaisuutena. Oletin tuloksien parantuvan, kun käyttäjien kognitiivista kuormaa vähennettiin visuaalisin vihjein siitä, miten 3D-maailma tietokoneruudulla käyttäytyy.

6.2.2. Testihenkilöt

Tutkimukseeni osallistui 12 henkilöä. Koehenkilöt olivat kaikki tottuneita tietokoneen käyttäjiä ja kaikki kuuluivat veisto-ohjelman mahdolliseen käyttäjäryhmään. Veisto-ohjelman kaltaisia ohjelmia käyttävät henkilöt luultavimmin harvoin ovat täysin vasta-alkajia tai esimerkiksi lapsia, sillä maailmaa on aluksi

vaikea hahmottaa. Vaikka kaikki olivatkin käyttäneet säännöllisesti tietokonetta, testihenkilöistä saattoi tehdä selvän jaon kokeneisiin ja normaalikäyttäjiin.

Koehenkilöt olivat nuoria, alle 30-vuotiaita, jotka yleensäkin ovat innokkaita kokeilemaan uusia asioita ja ohjelmia. Testihenkilöiden keski-ikä oli 24 vuotta. Testihenkilöistä kaksi oli naisia ja loput miehiä. Koehenkilöiden ryhmässä oli kaksi graafikkoa, jotka ainakin voisivat käyttää veisto-ohjelmaa myös työelämässään. He olivat käyttäneet aiemmin esimerkiksi muita 3D-mallinnusohjelmia, kuten 3D Studio MAXia.

Koehenkilöt jaettiin kahteen eri testiryhmään. Ryhmät pyrittiin jakamaan testihenkilöistä tiedettyjen ennakkotietojen ja heidän 3D-käyttökokemusten perusteella mahdollisimman tasaisesti. Molemmissa ryhmissä oli siis kuusi testihenkilöä.

6.2.3. Valmistelut ennen testiä ja testitehtävät

Ennen testiä käyttäjiä opastettiin ohjelman käyttöön. Heille esiteltiin vieraat ohjaimet ja kerrottiin veisto-ohjelman pääperiaatteet. Ennen varsinaista testiä testihenkilöt saivat kokeilla vapaasti ohjelman toimintoja hetken ajan tottuakseen ohjaukseen.

Testihenkilöt jaettiin kahteen ryhmään. Ensimmäisessä ryhmässä tehtävät aloitettiin niin, että käyttäjillä oli hahmotustyökalut käytössään testin alussa. Testin puolesta välissä heiltä otettiin työkalut pois ja he tekivät samat tehtävät uudelleen. Toinen ryhmä aloitti testin päinvastoin: he aloittivat ilman hahmotustyökaluja. Tällaisella testiryhmiin jakamisella voitiin välttyä oppimisen aiheuttamalta tulosten vääristymiseltä. Seuraavassa käydään testitehtävät läpi.

Testit jaettiin kahteen eri osioon. Ensimmäiseen osioon kuului kuusi ensimmäistä tehtävää, joilla kontrolloitiin työkalujen tarpeellisuutta ja toimivuutta. Tehtävästä seitsemän eteenpäin testattiin käyttäjien innokkuutta käyttää työkaluja ja heidän kykyä hahmottaa maailmaa ja ohjelmaa. Testit aloitettiin helpolla tehtävällä, jossa kuution muotoista kappaletta käsiteltiin niin, että jokaisen sivun keskipisteeseen käyttäjä kaiversi suorakulmion muotoisen jäljen. Tarkoituksena heillä oli tehdä mahdollisimman säännöllinen kappale, jossa joka sivulla oleva kuoppa olisi yhtä syvä ja yhtä kaukana kappaleen särmistä. Apuvälineiden kanssa tehtävä olisi yksinkertainen, kun koordinaattiakselit kulkivat suoraan sivujen keskipisteiden kautta ja työkalun koordinaatistosta käyttäjä näki, missä kohtaa työkalu oli puoliksi tasoon upotettuna.

Toisessa tehtävässä työkalua täytyi liikuttaa, eikä vain painaa kerran. Käyttäjällä oli tässä tehtävässä apunaan koordinaatistot. Tehtävällä testattiin, miten käyttäjä oli oppinut käyttämään 3D-ohjaimia ja hahmottamaan ohjelmaa.

Kolmannessa tehtävässä käyttäjän piti tehdä mahdollisimman säännöllinen noppa. Apuna hänellä oli koordinaatistojen lisäksi hahmotustaso. Tason avulla

pystyisi asettamaan nopan pisteet samoihin kohtiin eri puolilla noppaa. Koor-dinaatistot taas auttaisivat muun muassa syvyyksien hahmottamisessa.

Viimeiset tehtävät olivat yleisluontoisempia, eikä niillä voitu sinänsä mitata yhtä ja ainutta asiaa. Molemmat ryhmät tekivät tästä eteenpäin samat tehtävät. Testihenkilöille annettiin ennen testiä vain kuva lopputilanteesta. Näin ollen he saivat päättää, lähtivätkö he pursottamaan vai kaivertamaan loppukuvan kal-taista kappaletta. Käyttäjät saivat itse valita, käyttivätkö he hahmotustyökaluja vai eivät.

Viimeinen tehtävä, testitehtävä kymmenen, oli tarkoitettu testaamaan sitä, mitä ohjelmalla jo pystyisi tekemään. Käyttäjä sai veistää, mitä hän halusi. Ai-kaa, alkutilannetta tai työkaluja ei oltu määrätty ennalta. Viimeisten tehtävien suurin mielenkiinto oli suurimmaksi osaksi siinä, minkä työkalun käyttäjä va-litsi apuvälineeksi, jos hän koki tarvitsevansa hahmottamiseen apua ja valitsiko hän pursottamisen vai kaiverruksen eri tilanteissa.

6.2.4. Testaustulokset

Mitattavia tuloksia tärkeämpää tässä tutkimuksessa oli saada mielipiteitä käyt-täjiltä ja nähdä tuotoksia, joita he sovelluksella tekivät. Lähes kaikille testihenki-löille 3D-veistäminen oli uusi asia. Henkilöille, jotka olivat aiemmin käyttäneet mallinnusohjelmia, ohjelman käyttö oli alusta asti helppoa. Muutkin käyttäjät oppivat nopeasti ohjelman käytön, mutta tehtävien suorittamisissa oli selvästi nähtävissä se, kuinka hahmottamisen oppimista tapahtui koko ajan. Pääsään-töisesti kaikki testihenkilöt tulkitsivat testin loputtua 3D-maailmaa paljon pa-remmin kuin ensimmäisten tehtävien aikana.

Hahmottaminen parani testin myötä kaikilla testihenkilöillä, joille kolmi-ulotteinen sovellus oli uusi asia. Kokeneet käyttäjät ymmärsivät heti testin alus-ta alkaen, miten kappale pyörii ja miten maailman tila muuttuu sitä käännelles-sä. Loput testihenkilöistä oppivat tämän testin aikana. Kaikki henkilöt käyttivät kahta kättä luontevasti ja vain yhdellä testihenkilöllä oli aluksi ongelmia työka-lun ohjaamisen kanssa. Käyttäjät totesivat lopuksi usein, että heille täysin uu-denlainen sovellus ja käyttötapa johtivat siihen, että he eivät niinkään keskitty-neet hahmotustyökalujen täysipainoiseen käyttämiseen, vaan he joutuivat kes-kittymään ohjelman käyttöön.

Ensimmäisessä ryhmässä, jossa käyttäjille aluksi annettiin hahmotustyöka-lut käyttöön, ei ollut suuria eroja kappaleiden säännöllisyydessä ja siinä, miten he ensimmäiset kuusi tehtävää suorittivat. Ilmeisestikin he ensimmäisten kol-men tehtävän aikana kiinnittivät yleisesti huomiota ohjelman käyttöön, eivätkä siksi juuri huomioineet työkaluja. Toinen testiryhmä taas paransi tuloksiaan osion jälkimmäisissä tehtävissä huomattavasti. Alussa heillä ei ollut käytössään

työkaluja, mutta oppimisen ja työkalujen käyttöönoton jälkeen jälki oli selvästi parempaa kuin kolmen ensimmäisen tehtävän aikana.

Ensimmäisessä tehtäväsarjassa ryhmien välillä ensimmäisten tehtävien osalta tuloksissa ei ollut kovastikaan eroa. Tämä selittynee sillä, että tässä vaiheessa käyttäjät totuttelivat ohjelman käyttöä. Toinen ryhmä suoritti kuitenkin tehtävät neljä, viisi ja kuusi selvästi tarkemmin ja paremmin kuin ensimmäinen ryhmä, kun heillä oli hahmotustyökalut käytössään.

Yleisesti tärkein hahmotusväline oli työkaluun kiinnitettävä koordinaatisto, jonka avulla käyttäjät pystyivät havainnoimaan esimerkiksi sitä, kuinka syvällä kappaleessa työkalu kulloinkin oli. Toisaalta myös origokeskeinen koordinaatisto oli monelle erittäin tärkeä apu, kun he halusivat asettaa kappaleen kohtisuorasti itseään kohden.

Yleisesti ottaen tasosta ei ollut juuri apua. Sen huono ohjaustapa ja vajavaisten toiminnallisuus selittänevät suurimman osan siitä, miksi testihenkilöt eivät innostuneet sen käytöstä. Toisaalta heillä oli hyvin vähän kokemusta tämän kaltaisesta ohjelmasta. Kuten jotkut testihenkilöistä sanoivat, he ”eivät oikeastaan tienneet mahdollisuuksista”, joita ohjelma tarjoaa. Toiset testihenkilöistä taas käyttivät erittäin luovasti tasoa suorittaessaan viimeisiä tehtäviä.

Hahmotusvälineistä hahmotuslaatikko oli käytössä järjestäen kaikilla viimeisiä tehtäviä tehtäessä. Tämä johtui yleensä siitä, että tehtäviä lähdettiin ennemmin pursottamaan kuin kaivertamaan, jolloin piirtoalueen rajat oli syytä tietää.

Viimeisissä tehtävissä, joissa loppukuva oli annettu, pääosin jokainen testiin osallistunut valitsi työtavakseen pursottamisen. Kuvassa 21 on esitetty erilaisia tuoleja, joita käyttäjät ovat prototyypillä pursottaen tehneet. Esimerkiksi tehtävässä, jossa piti tehdä malja, maljan lähes 40 % testihenkilöistä aloitti tekemisen kaivertamalla, mutta päätyivät lopulta pursottamiseen. Käyttäjiltä saatujen kommenttien perusteella osasyynä kaiverruksen muuttuminen pursottamiseen oli kaiverrustyökalujen rajoittavat muodot. Työkalujen käytettävyyden parantua olisi mielenkiintoista tutkia laajemmalti, valitsevatko käyttäjät mieluummin veistämisen vai pursottamisen.

Kaikin puolin testit onnistuivat hyvin. Ainoastaan neljä tehtävää jäi suorittamatta. Syynä näihin keskeytyksiin oli testitilanteeseen varatun ajan loppuminen kesken. Käyttäjät pitivät hahmotusvälineitä tarpeellisina, mutta osittain vielä keskeneräisinä.



Kuva 21: Testihenkilöiden luomia tuoleja.

6.2.5. Parannusehdotuksia

Saimme testin aikana ja sen jälkeen käydyissä keskusteluissa käyttäjiltä paljon parannusehdotuksia. Monet kaipasivat jonkinlaista tukea sille, koska työkalu osuu kappaleeseen. Työkalun ulkonäön muuttaminen ei useimpien mielestä riittänyt, vaan käyttäjät kaipasivat muunkinlaista palautetta. Kuten Hinckley *et al.* [1994] ovat todenneet, olisi sovelluksessa hyvä olla muidenkin aistien kuin vain näköaistin antamaa palautetta. Käyttäjät ehdottivat, että ohjelmaan lisätäisiin tuntopalaute, joka kertoo, missä kappaleen kulloisetkin rajat ovat. Näin olisi paljon helpompi kulkea pintaa pitkin työkalulla.

Heidän mielestään työkalua pitäisi viedä tasoa pitkin, eli lukita se jollakin tapaa kappaleen pinnalle. Näin ollen kappaletta käännettäessä työkalu pysyisi pinnalla riippumatta siitä, miten päin kappale on. Heidän mielestään myöskään 2D-hiiri ei ole paras vaihtoehto kolmiulotteista sovellusta käytettäessä, sillä hiiressä ei pysty kulkemaan luontevasti välisuuntia. Pinnalla kulkemista on lähes mahdoton toteuttaa luontevasti ilman tuntupalautetta ja oikeanlaista 3D-ohjainta.

Käyttäjät olisivat kaivanneet mahdollisuutta lisätä hahmotustasoja rajattomasti ja että tason olisi voinut lukita jollekin kohtaa kappaleessa. He olisivat toivoneet, että taso ei ainoastaan olisi ollut viitteellinen apu, vaan että tasoon olisi esimerkiksi voinut asettaa työkalun kiinni. Tason toivottiin reagoivan jotenkin, kun työkalu osuisi siihen. Taso voisi esimerkiksi vaihtaa väriä.

Koordinaatistoista käyttäjät kaipasivat mahdollisuutta lisätä niitä oman mielensä mukaan muuallekin kuin vain origoon. He myös toivoivat, että alkuperäistä koordinaatistoa olisi mahdollista kääntää. Jotkut testihenkilöistä kaipasivat koordinaatistoihin koordinaattien piirtämistä. Lisäksi yksi testihenkilö ehdotti, että työkalun ja sen koordinaattiakseleiden väri voisi muuttua, kun työpöydältä poistuttaisiin.

Työkalun koordinaatisto luotiin sen takia, että sen avulla voitaisiin hahmottaa työkalun kulkua. Eräs testattava ehdotti kuitenkin, että työkalun ääriviivat voisivat näkyä koko ajan, jolloin työkalun hahmottaminen olisi vielä helpompaa.



Kuva 22: Testeissä tehtyjä kappaleita.

6.2.6. Yhteenvetoa

Yleisesti testihenkilöt olivat innoissaan tavasta, miten veisto-ohjelmalla luodaan 3D-kappaleita. He käyttivät luovasti ohjelmaa ja saivat testin aikana tehtyä monia erilaisia kappaleita nalleista, maljoihin ja karhun päihin (kuvat 22 ja 23). Testattavia häiritsi hiukan ohjelman keskeneräisyys, mutta monet totesivat kuitenkin testin jälkeen, että ohjelma on parannusten jälkeen varmasti miellyttävämpi käyttää.



Kuva 23: Karhunpäähahmotelma.

Käyttäjien mielestä ohjaaminen oli nopeasti opittavissa, eikä häirinyt käyttöä. Kokeneilla käyttäjillä ei ollut hahmotusongelmia ja aloittelevatkin käyttäjät oppivat nopeasti ymmärtämään suuntia, syvyyksiä ja kappaleiden suhteita. Testihenkilöt, jotka olivat aiemmin käyttäneet 3D-mallinnusohjelmia, olivat innoissaan ja sitä mieltä, että ohjelmalla tarkkuuden ja työkalujen lisääntyessä voi tehdä hyvää 3D-grafiikkaa. Testihenkilöt innostuivat ajatuksesta, että veisto-

ohjelmaa voisi käyttää esimerkiksi vielä luonnollisemmin datahanskalla ja PHANTOMilla.

Testit antoivat paljon tietoa prototyypin jatkokehitykseen, mitä voi pitää testien ehdottomasti tärkeimpänä antina. Tulevaisuudessa prototyyppiin voitaisiin ajatella lisättävän tuntopalaute ja mahdollisesti uusia ohjaustapoja. Kaikista ihanteellisoin tapa toteuttaa 3D-veisto-ohjelma olisi sellainen, joka kuvaisi mahdollisimman realistisesti oikeata veistämistä.

6.3. Testi 2 – Taktiilipalaute osana veisto-ohjelmaa

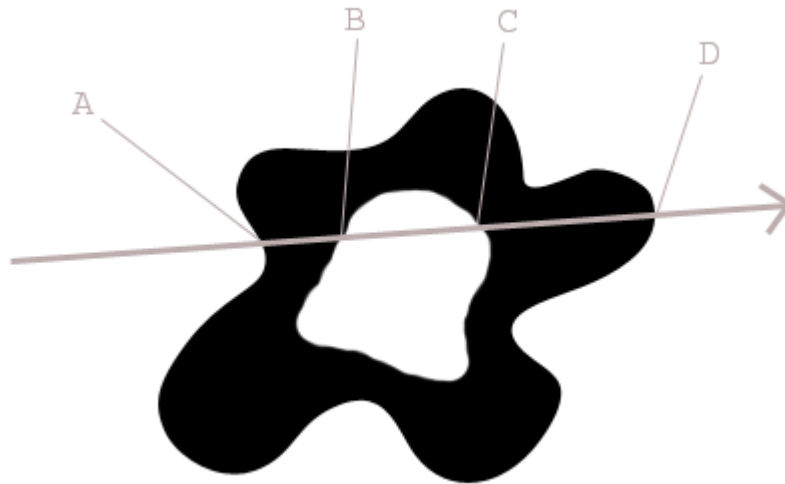
Prototyyppiä käytetään kaksikäsisesti SpaceMouse-avaruushiirellä ja tavallisella hiirellä. SpaceMousella pyöritetään kappaletta ja hiirellä ohjataan veistotyökalua. Ohjelmaan on toteutettu sekä optisen rullahiiren että taktiilishiiren toiminnallisuus. Tässä testissä pyrin selvittämään, millaista vaikutusta käyttäjälle taktiilishiiren ja -palautteen käytöstä seuraa. Testitehtävät on esitetty liitteessä 2.

6.3.1. Ongelman asettelu

Käyttäjän toiminnan voidaan olettaa paranevan, kun taktiilipalaute on käytössä. Taktiilipalautteen avulla voidaan antaa näköaistia tukevaa tuntopalautetta [Hinckley *et al.*, 1994]. Useamman kuin yhden aistikanavan käyttö palautteen annossa helpottaa yleensä hahmottamista. Kuvassa 24 on kuvattu prototyyppiin toteutettu taktiilipalaute, nuoli kertoo työkalun liikuttamissuunnan veistettävässä kappaleessa. Taulukossa 6 on esitetty Immersion Studio -sovelluksen avulla tehtyjen taktiilipalautteiden ominaisuuksia, kun työkalu koskettaa ja poistuu kappaleesta sekä kun työkalua liikutetaan kappaleen sisällä. Käyttäjä tuntee voimakkaan värähdyksen, kun työkalu koskettaa veistettävän kappaleen pintaa (kohdassa A) ja hieman voimakkaamman värähdyksen työkalun irrotessa kokonaan kappaleesta (kohta B). Lisäksi käyttäjälle annetaan heikompi palaute, kun työkalu kulkee osittain kappaletta koskettaen tai sen sisällä (kohtien A ja B sekä C ja D välissä). Työkalun ollessa sellaisessa kohdassa, jossa se ei kosketa veistettävää kappaletta (kohtien B ja C välissä) taktiilipalautetta ei luonnollisestikaan anneta. Käyttäjien mieltymystä taktiilipalautteeseen ja sen tarpeellisuutta kappaleen pintojen tulkitsemisessa selvitettiin tässä tutkimuksessa kyselyiden ja haastatteluiden avulla.

Työn nopeutta, laatua ja yrityskertojen määrää tarkkailtiin ohjelmaan tehdyn lokin avulla. Lokiin kirjattiin käyttäjän toiminnot ja kuhunkin tehtävään kulunut aika. Oletin taktiilipalautteen parantavan testitehtävissä vaadittavaa kohdistustarkkuutta ja näin parantavan työn laatua. Tuloksen voitiin olettaa parantuvan taktiilitehtävissä kognitiivisen kuorman vähentyessä. Oletin myös, että useamman aistipalauttekanavan käyttö nopeuttaa yleisesti työn suorittamis-

ta. Seurasin lisäksi testeissä yleisesti, miten käyttäjät suhtautuivat veistämiseen kokonaisuutena.



Kuva 24. Taktiilipalautteen toteutus prototyypissä.

Työkalu	Voimakkuus	Sykäysten määrä	Kesto
Koskettaa kappaletta	8500	2	0,01
Kulkee kappaleessa	6000	15	0,01
Poistuu kappaleesta	9000	1	0,15

Taulukko 6: Tutkimuksessa käytetyn taktiilipalautteen ominaisuuksia.

Testini perustuivat olettamukseen, että käyttäjän on helpompaa veistää, kun hänelle tarjotaan visuaalisen palautteen rinnalla jokin toinen aistipalaute. Testien tarkoitus oli tutkia, miten taktiilipalaute toimii kolmiulotteisessa ympäristössä ja auttaako se käyttäjää hahmottamaan paremmin veistettävän 3D-kappaleen pintaa ja muotoa. Suurin mielenkiintoni kohdistui käyttäjien mielipiteisiin ja palautteisiin, joita he antoivat testin aikana ja joita keräsin testin jälkeen loppuhaastattelussa.

Tarkoituksena oli myös tarkkailla testihenkilöiden mielipiteitä taktiilipalautteen käytöstä; käyttäisivätkö he sitä monimuotoisemmin tai erilailla kuin mitä testitehtävissä taktiilipalautetta oli käytetty. Näitä asioita selvitettiin testien aikana tapahtuvissa keskusteluissa.

6.3.2. Testihenkilöt

Tutkimukseeni osallistui 12 henkilöä. Koehenkilöt olivat kaikki kokeneita tietokoneen käyttäjiä ja kuuluivat veisto-ohjelmien kohderyhmään. Koehenkilöt olivat alle 30-vuotiaita, jotka yleensäkin ovat innokkaita kokeilemaan uusia asioita ja sovelluksia. Testihenkilöiden keski-ikä oli 25 vuotta. Testihenkilöistä neljä oli

naisia ja loput miehiä. Tämän testin koehenkilöiden ryhmästä kuusi testihenkilöä osallistui jo Testiin 1, jolloin heillä oli hieman kokemusta veisto-ohjelmasta ennen testiä. Muuten testihenkilöiden käyttökokemukset 3D-grafiikasta olivat muodostuneet tietokonepeleistä tai vähäisestä muiden 3D-mallinnusohjelmien kokeilusta. Testihenkilöistä kaksi kertoi kuitenkin, ettei ole käyttänyt sovelluksia, joissa olisi käytetty kolmiulotteista grafiikkaa.

Koehenkilöt jaettiin kahteen eri testiryhmään. Ryhmät pyrittiin jakamaan testihenkilöistä tiedettyjen ennakkotietojen ja heidän 3D-käyttökokemusten perusteella mahdollisimman tasaisesti. Molemmissa ryhmissä oli siis kuusi testihenkilöä.

6.3.3. Valmistelut ennen testiä ja testitehtävät

Ennen testiä käyttäjiä opastettiin lyhyesti ohjelman käyttöön. Heille esiteltiin mahdollisesti vieraat ohjaimet ja kerrottiin veisto-ohjelman pääperiaatteet. Ennen varsinaista testiä testihenkilöt saivat kokeilla vapaasti ohjelman toimintoja totutellakseen ohjaukseen ja ohjelman käyttöön.

Testihenkilöt jaettiin kahteen kuuden hengen ryhmään. Testitehtävät jaettiin kolmeen tehtäväpariin: pursotus- ja kaiverrustehtäviin sekä tehtäviin, joissa käytettiin sekä pursotusta että kaiverrusta. Testitehtäväryhmien lopuksi pidettiin haastattelu. Testitehtäviä oli kuusi, kolme taktiilitehtävää ja kolme vastavaa tehtävää ilman taktiilipalautetta. Ensimmäisessä ryhmässä käyttäjillä ei alussa ollut käytössään taktiilipalautetta. Toinen ryhmä sen sijaan aloitti taktiilitehtävillä. Ensimmäisen ryhmän testit etenivät seuraavassa järjestyksessä:

1. Aloitustoimet: esittely, harjoittelu
2. Tehtävä 1: Pursotustehtävä ilman taktiilipalautetta
3. Tehtävä 2: Pursotustehtävä taktiilipalautteen kanssa
4. Keskustelu/haastattelu pursotustehtävästä
5. Tehtävä 3: Kaiverrustehtävä ilman taktiilipalautetta
6. Tehtävä 4: Kaiverrustehtävä taktiilipalautteen kanssa
7. Keskustelu/haastattelu kaiverrustehtävästä
8. Tehtävä 5: Pursotus/kaiverrustehtävä ilman taktiilipalautetta
9. Tehtävä 6: Pursotus/kaiverrustehtävä taktiilipalautteen kanssa
10. Keskustelu/haastattelu Pursotus/kaiverrustehtävästä
11. Loppuhaastattelu ja yhteenveto

Ennen jokaista tehtävää testihenkilöille annettiin kuva lopputilanteesta, johon heidän piti pyrkiä käyttäen tehtävässä annettuja työkaluja. Testit aloitettiin helpolla tehtävällä (Tehtävä 1), jossa testihenkilön tuli tehdä esimerkkikuvan mallinen nalle. Käyttäjällä oli käytössä vain pursottamiseen tarkoitettu pallotyökalu. Tätä tehtävää ensimmäisen kerran suorittaessa ensimmäisen ryhmän jäsenillä ei ollut taktiilipalautetta käytössä ja he joutuivat toimimaan vain näkö-

aistinsa varassa. Toisessa tehtävässä (Tehtävä 2) käyttäjä loi samaisen nallen taktiilipalautetta käyttäen. Tämän jälkeen käyttäjän kanssa keskusteltiin pursotuksessa käytettävän taktiilipalautteen vaikutuksista.

Kolmannessa tehtävässä (Tehtävä 3) pursotustyökalun sijaan käytettiin kai-verrustyökalua. Tehtävänä oli kaivertaa pallon muotoisesta aloituskappaleesta mallin mukaiset kuvitteelliset kasvot käyttäen ainoastaan pallotyökalua. Tehtävä 4 suoritettiin samalla tavalla kuin tehtävä kolme, mutta käyttäen taktiilipalautetta. Käyttäjän kanssa keskusteltiin myös tehtävien jälkeen ja kerättiin mielipiteitä taktiilipalautteesta.

Tehtävät 5 ja 6 noudattavat edellä ollutta kaavaa, jossa aluksi käyttäjällä ei ollut taktiilipalautetta käytössä ja jossa lopuksi kerättiin yhteenvedoa taktiilipalautteen vaikutuksista veistämiseen. Näissä tehtävissä käyttäjät käyttivät kuutiotyökalua. Käyttäjät saivat päättää tehtävän aluksi, lähtivätkö he pursottamaan vai kaivertamaan loppukuvan kaltaista kappaletta. Tehtävänä oli luoda esimerkin mukainen tuoli. Viimeisen testitehtäväryhmän tehtävät kiinnostivat myös muun muassa siksi, että pystyin seuraamaan, kuinka paljon käyttäjät käyttivät pursotus- ja kaiverrustyökaluja veistäessään. Testitehtävän tuoli olikin valittu siksi malliksi, että se on mahdollista tehdä kummalla tahansa menetelmällä varsin helposti. Mielenkiintoista oli myös seurata, missä järjestyksessä ja kuinka kauan kaiverrus- tai veistotyökalua käytettiin.

Toinen ryhmä suoritti samat tehtävät, mutta tehtävien järjestys muuttui ryhmissä päinvastaisiksi. He suorittavat ensiksi ryhmistä tehtävät, jossa oli käytetty taktiilipalautetta ja vasta sen jälkeen tekivät tehtävät ilman palautetta. Tällaisella testiryhmän jakamisella voitiin välttyä oppimisen aiheuttamalta tulosten vääristymiseltä.

6.3.4. Testaustulokset

Testit osoittivat oikeaksi olettamukseni siitä, että kolmiulotteisen kappaleen hahmottaminen parani, kun näköaistia tuettiin taktiilipalautteen avulla. Yhdeksän testihenkilöä mainitsi useasti testin aikana, kuinka taktiilipalautteen avulla heidän oli helpompaa havaita, koska työkalu kosketti kappaletta ja että syvyshavainnointi parani huomattavasti (taulukko 7). Osa testihenkilöistä intoutui jopa työskentelemään niin, että he eivät nähneet, missä kohtaa kappaletta työkalu oli; taktiilipalautteen avulla pystyi työskentelemään siinäkin tilanteessa, kun käyttäjä ei nähnyt työkalua.

Huomattavan usein varsinkin ensimmäisen testiryhmän henkilöt valittelivat, kun he eivät pystyneet ensimmäisissä tehtävissä hahmottamaan, koska työkalu kosketti kappaleen pintaa. Testihenkilöt käyttivät taktiilipalautetta erityisesti hyväkseen pohtiessaan, koska työkalu on kiinni kappaleessa.

%	”Taktiilipalautteesta hyötyä”
75	Syvyysnäkeminen parani
58	Käyttäjä tuntee, että työkalu koskettaa kappaletta
50	Taktiilipalautteesta hyötyä, kun työkalua ei näe
42	Käyttäjä tuntee, että työkalu kulkee kappaleessa

Taulukko 7: Käyttäjien mielipiteitä taktiilipalautteiden hyödyistä.

Testiryhmien välillä ei ollut suurta eroa siinä, miten he kokivat taktiilipalautteen hyödyllisyyden. Ensimmäiselle ryhmälle ilman taktiilipalautetta tehtävät olivat hieman hankalampia, mikä saattaa viitata siihen, että toinen ryhmä oli hieman oppinut ohjelman käyttöä ja hahmottamista. Mistään suuresta ja huomattavasta erosta ei kuitenkaan ollut kysymys.

Mielenkiintoista oli myös huomata, että käyttäjistä viisi totesi ensimmäisen tehtäväparin kohdalla, että taktiilista ei ollut merkittävää hyötyä. He eivät kuitenkaan osanneet arvioida, johtuiko taktiilipalautteen huomaamattomuus siitä, että he keskittyivät tehtävien suorittamiseen vai siitä, että taktiilipalaute ei ollut sopiva pursotustehtävään. Kuitenkin heistä kaikki totesivat testien jatkuessa taktiilin helpottaneen heidän työskentelyä. Olisikin mielenkiintoista jatkossa tutkia, miten käyttäjät reagoisivat, jos heille ensiksi olisi annettu kaiverrustehäväpari pursotuksen sijaan.

Testihenkilöt suoriutuivat lähes joka kerta paremmin ja nopeammin taktiilitehtävistään. Lisäksi näissä tehtävissä testihenkilöt käyttivät harvemmin peruustustoimintoa, mikä kertoo siitä, että taktiilitehtävissä he onnistuivat kohdistamaan työkalun kappaleeseen selvästi paremmin ja useammin oikein kuin tehtävissä, joissa taktiilipalaute ei ollut käytössä. Viimeisissä tehtävissä testihenkilöistä 55 prosenttia valitsi pursottamisen kaivertamisen sijaan.

Käyttäjät esittivät testin aikana ja vapaamuotoisessa loppukeskustelussa parannusehdotuksia taktiilipalautteen toteutukseeni. Heidän mielestään veisto-ohjelman taktiilipalaute olisi toimivampi muun muassa jos:

- taktiilipalautteen erilaisilla värinöillä voisi kuvata sitä, kuinka syvään veistettävään kappaleeseen käyttäjä on milläkin hetkellä kaivertanut,
- taktiilipalaute voisi vahvistua, mitä syvemmällä kappaleessa työkalu on,
- taktiilipalautteella annettaisiin erilainen palaute, jos työkalu on osittain läpi kappaleesta kuin että jos työkalu kulkee kokonaan kappaleen sisällä,
- työkaluun koon muutoksessa olisi taktiilipalaute,
- taktiilipalautteen voimakkuus olisi säädettävissä,

- taktilipalautteen antava alue olisi tämän hetkistä toteutusta tarkempi, ja
- taktilipalautteen avulla annettaisiin käyttäjälle informaatiota, jos hän olisi poistumassa piirtoalueelta.

Mielestäni varsinkin taktilipalautteen avulla toteutetun syvyyshahmottamisen ja -tuntemisen kehittäminen ja tutkiminen voisi olla mielenkiintoinen aihe. Työkalun kulkiessa syvemmillä kappaleessa värinä voisi voimistua ja ikään kuin lisätä työkalun vastusta. Tällöin käyttäjä voisi ymmärtää kappaleen muotoja paremmin ja hahmottaa kolmiulotteisessa maailmassa syvyyksiä helpommin.

Lisäksi testihenkilöt toivoivat prototyyppiin veisto-ohjelmille tyypillisiä toimintoja, kuten osien kopiointi ja pyörähdys -toimintoja. Varsinkin kopioiminen olisi muutamien testihenkilöiden mielestä ollut tarpeen tehtävissä.

Tällä hetkellä laatikon koon muutos ei ole toteutettu toimivimmalla tavalla. Laatikon särmien pituutta pitää tällä hetkellä muuttaa jokaista erikseen ja yksi testihenkilöistä ehdottikin, että tarvittaessa laatikon sivuja voisi muuttaa samanaikaisesti, jolloin laatikko olisi koko ajan kuution muotoinen.

6.3.5. Yhteenvetoa

Testihenkilöt kokivat taktilipalautteen hyödylliseksi, kolmiulotteisuuden hahmottamista parantavaksi lisäksi. Taktilipalautte tuki huomattavasti näköpalautetta syvyyshahmottamisessa. Syvyyshahmottamisen lisäksi taktilipalautteesta oli huomattavaa etua, kun testihenkilöt miettivät, koska työkalu kosketti veistettävän kappaleen pintaa. He pystyivät jopa työstämään kolmiulotteista kappaletta näkemättä sitä ja esimerkiksi pursottamaan nallelle hännän sekä kaivertamaan testitehtävässä olleen pään ontoksi kääntämättä kappaletta ensin (kuva 25).

Kokemattomimmat käyttäjät kokivat taktilipalautteen tarpeettomampana kuin käyttäjät, jotka olivat tottuneet kolmiulotteisten kappaleiden käsittelyyn. Saattaakin olla niin, että taktilipalautteen hyöty tulee esiin vasta siinä vaiheessa, kun käyttäjä on tullut tutuksi käytettävän sovelluksen kanssa. Sovelluksen käytön oppimisen jälkeen käyttäjä voi keskittyä erikoisempiin palautteisiin, kuten taktilipalautteeseen. Tätä olettamusta tukee myös se, että ensimmäisiä tehtäviä tehdessä taktilipalautte koettiin keskimäärin huomattavasti tarpeettomammaksi kuin viimeisissä testeissä. Oppimisen vaikutusta taktilipalautteen hyödyntämiseen tulisikin tutkia tarkemmin myöhemmissä tutkimuksissa.



Kuva 25: Testihenkilön tekemä pää ja nalle.

6.4. Tulevaisuuden näkymiä

Hahmotustyökalu- ja taktilitestiä perusteella prototyypin kehittämiseen on saatu paljon uusia ideoita jatkokehitystä ja -tutkimusta varten. Mielestäni tulevaisuudessa olisi tärkeä kehittää hahmotustyökalujen toimintaa ja monipuolistaa taktilipalautteen käyttöä. Varsinkin testihenkilöiden edellä kerrottuihin parannusehdotuksiin olisi syytä paneutua huolellisesti ja kehittää uusia menetelmiä veisto-ohjelmien toimivuuden parantamiseksi.

Taktilipalautteella voidaan tulevaisuudessa toteuttaa monia toimintoja, jotka parantaisivat veisto-ohjelmien käytettävyyttä. Taktilipalaute on lisäksi toteutettavissa varsin edullisesti, verrattuna esimerkiksi PHANTOM-laitteella toteutettuun tuntopalautteen antavaan veisto-ohjelmaan, jolloin taktilipalaute-tutkimus voisi antaa huimia mahdollisuuksia edullisten veisto-ohjelmien tekemiseen ja veisto-ohjelmien yleistymiseen kotikäytössä. Taktilipalautteen mahdollisuuksia veisto-ohjelmissa ei varmasti ole tutkittu niin paljon kuin muiden voimapalautteiden ja siksi taktilipalautteen kehittäminen veisto-ohjelmassa voisi olla mielenkiintoinen jatkokehityskohde.

Tässä tutkimuksessa tehtyjen testien perusteella uskallan sanoa, että veisto-ohjelmat ovat tulevaisuudessa kenelle tahansa loistava tapa luoda 3D-grafiikkaa. Veisto-ohjelmat tulevat yleistymään niiden helppokäyttöisyyden takia. Mielenkiintoista on nähdä, millaisiksi veisto-ohjelmat muuntuvat tulevaisuudessa; standardisoituuko jokin syöttölaite veisto-ohjelman syöttölaitteeksi, vakioituuko tuntopalaute osaksi veisto-ohjelmaa ja pitääkö kaksikäätisyys pintansa veisto-ohjelmissa.

Itse haluaisin tulevaisuudessa nähdä, miten varsinkin tuntopalautteen antava datahanska toimisi veisto-ohjelmassa syöttölaitteena. Muutenkin monet syöttölaitteet, kuten virtuaaliohjaussauvat ja erilaiset kuudensuunnanohjaimet, voisivat sopia uusilla tavoilla käytettynä veisto-ohjelmaan. Valitettavan usein kuitenkin useimpien syöttölaitteiden hinnat ovat vielä niin korkeat, että niitä hyödyntävät veisto-ohjelmat tuskin yleistyvät nopeasti koteihin, vaikka veisto-ohjelmien käytettävyys ja toiminnallisuus olisikin erinomaista. Juuri tästä syystä mielestäni vaihtoehtoinen taktiilipalautetutkimus olisikin oiva lisä veisto-ohjelmien kehitykseen.

7. Pohdintaa

Veisto-ohjelmien kehitys 1970-luvulta tämän päivän veisto-ohjelmiksi on ollut huimaa. Vasta kehittyneen teknologian ja kasvaneiden konetehtojen myötä algoritmeista on voitu saada irti niiden todellinen hyöty 3D-kappaleiden käsittelyssä. Tulevaisuudessa onkin mahdollista tehdä entistä monimutkaisempia kappaleita tietokoneella veistäen. Tätä tutkimusta tehdessäni en voinut välttää ajatukselta, millaisia veisto-ohjelmat voivat olla kymmenen vuoden päästä. Kun katson elämää kymmenen vuotta sitten, on tekniikan kehitys niistä päiväistä nykypäiviin ollut huimaa. Seuraavien vuosikymmenien ajan uskon tekniikan ja erilaisten sovellusten kehittyvän yhä kiihtyvämmällä vauhdilla. Siksi usein ajatuksissani loppujen lopuksi turhaudun ja kieltäydyn ajattelemasta veisto-ohjelmia vuosien päästä, sillä vilskeimmät arvaukseni menevät kuitenkin täysin pieleen.

Olen kuitenkin varma, että tulevaisuudessa veisto-ohjelmat ja niiden käyttötavat sekä yleistyvät että monipuolistuvat ja syöttölaitteet halpenevat. Se, kuinka nopeasti yleistyminen ja halpeneminen tapahtuvat, jää tulevaisuudessa nähtäväksi. Uskon, että kuitenkin pian voidaan päästä eroon 2D-näyttöjen tuomasta vääristymästä 3D-kappaletta veistettäessä. Syvyyssuunnan lisääminen tekee hahmottamisesta huomattavasti luonnollisempaa ja sitä kautta veistämisestä realistisempaa. Lähes realistisesta veistokokemuksesta voidaan puhua kuitenkin oikeastaan vasta, kun kappale voidaan heijastaa 3D-kuvana käyttäjän eteen ja hän voi tuntopalautelaitteen avulla koskettaa heijastettavaa kappaletta ja tuntea kappaleen pinnan.

En tiedä, kuinka pitkällä heijastavien, toiminnallisuuteen reagoivien lähinnä tieteiselokuvista tuttujen ”hologramminäyttöjen” kehitystyö on tai onko sellaisia vielä edes aloitettu kehittää. Jo pelkästään kolmiulotteinen hologramminäyttö mullistaisi monia sovellusaloja, kuten erilaisten tuotteiden suunnittelun. Silloin valmiin tuotteen voisi nähdä kolmiulotteisena ennen tuotantoon lähettämistä. Toiminnallisuuden tai tuntopalautteen lisääminen heijastettuun kappaleeseen tuntuu mielestäni tällä hetkellä mahdottomalta ajatukselta, mutta kuten jo edellä totesin tekniikan kehittyessä uskon tällaistenkin toimintojen olevan pitkällä tähtäimellä mahdollisia. Toisaalta ilmaan heijastetun kappaleen toiminnallisuuteen ei välttämättä ole pitkä matka, sillä esimerkiksi SIGGRAPH 2005 -konferenssissa esitettiin Tampereen Teknillisessä yliopistossa kehitetty sumuverho, johon oli jo liitetty yksinkertaista toiminnallisuutta. Mikäli tällaiseen sumuverhoon voidaan saada toiminnallisuutta, niin tuntopalautteen lisääminen sumuverhoon ei tunnu mahdottomalta ajatukselta esimerkiksi jonkinlaisen paineilman tai ilmavirtausten avulla. Ja mikäli sumuverhoon olisi

mahdollista lisätä tuntopalaute, niin miksi sitä ei olisi mahdollista myös hologrammeihin. Moni nyt uskomattomalta tuntuva asia on varmasti mahdollista jonakin päivänä, tänään voimme vain pohtia, mihin tekniikka meidät jonakin päivänä vie.

Vaikka lähitulevaisuudessa veisto-ohjelmia ei käytettäisikään hologramminäyttöjä käyttämällä, voi veistäminen tulevaisuudessa muistuttaa yhä enemmän oikeaa veistämistä. Syöttölaitteiden kirjosta varmasti nousevat esiin muutammat laitteet, jotka sopivat muita paremmin veisto-ohjelmiin. Uskoisin, että puettavat, tuntopalautteen antavat datahanskat yleistyvät veisto-ohjelmien syöttölaitteena tulevaisuudessa niiden luonnollisen käyttötavan takia. Syöttölaitteita myös kehitetään varmasti entisestään, jolloin on mahdollista, että ne erikoistuvat enemmän tiettyyn, yksittäiseen tehtävään. Mikään ei tällöin estä veisto-ohjelmien yleistyessä laitevalmistajia kehittämästä erityistä veisto-ohjelmatyökalua, joka muistuttaisi esimerkiksi PHANTOMin ohjaustikkua, mutta joka ei olisi sidottu mihinkään kiinteään paikkaan. Kevyt, kynämäinen, tuntopalautteen antava syöttölaite voisi toimia metaforana veistotyökalulle. Mahdollisesta keveydestä johtuen työkalua voisi käyttää pidempään käden raskittumatta.

Riippumatta siitä, mitä syöttö- tai tulostuslaitetta veisto-ohjelmissä tulevaisuudessa käytetään, ne tulevat toiminnaltaan muistuttamaan yhä enemmän luonnollista veistämistä. Luonnolliset käyttötavat mahdollistavat myös ohjelmoinnista kiinnostumattomien ihmisten 3D-grafiikan luomisen. Tulevaisuudessa 3D-grafiikan tuottamiseen osallistuu varmasti yhä enemmän taiteellisia ihmisiä sen sijaan, että grafiikkaa tekisivät ainoastaan ohjelmoijat ja monimutkaisten mallinnusohjelmien ekspertit. Veisto-ohjelmien avulla muun muassa lapset voivat luoda erilaisia kolmiulotteisia kappaleita helposti tietokoneen avulla.

Kaksiulotteinen grafiikka onkin jo suurelta osin saanut väistyä 3D-grafiikan tieltä. Kolmiulotteisen tietokonegrafiikan voittokulkua veisto-ohjelmat eivät tulevaisuudessa ainakaan hidasta, kun grafiikkaa voi luoda helposti kuka tahansa. En usko, että veisto-ohjelmat koskaan tulevat syrjäyttämään muut kolmiulotteisen grafiikkaan tarkoitetut sovellukset. Ne tulevat kävelemään aina rinta rinnan veisto-ohjelmien kanssa, toisiaan pois sulkematta. Tässä tutkielmassani esittelemäni mallinnusmenetelmät tarjoavat erilaisille kohderyhmille tavan luoda 3D-grafiikkaa ja veisto-ohjelmat ovat vain yksi menetelmä.

Kolmiulotteinen grafiikka on levinnyt hyvin laajoille aloille ja leviäminen vain jatkuu tulevaisuudessa. Veisto-ohjelmia voidaan hyödyntää niin mainos-, elokuva- ja peliteollisuudessa kuin opetuksessa ja erilaisissa suunnittelutehtävissä. Viihdeteollisuudessa 3D-grafiikan tuottamisella on selkeä päämäärä; fiktiivisten hahmojen ja maailmojen tulee näyttää käyttötarkoituksessaan mahdol-

lisimman näyttäviltä ja toimivilta sekä tarpeen mukaan realistisilta. Opetuksessa sen sijaan veisto-ohjelmaa voidaan käyttää esimerkiksi muotoilualalla.

Lähitulevaisuudessa veisto-ohjelmat varmasti yhtenäistyvät ja vakiintuvat nykyisestä kirjostaan. Onkin mielenkiintoista nähdä, millaisiksi veisto-ohjelmat standardisoituvat vuosien saatossa syöttölaitteiden ja toimintojensa puolesta. Suorakäyttöisyyden periaatetta tulisi mielestäni noudattaa kuitenkin jokaisessa veistosovelluksessa, sillä muuten veisto-ohjelmat menettävät paljon tärkeimmistä ominaisuudestaan, helppokäyttöisyydestä. Uskoisin myös, että kaksikäyttöä hyödyntävät veistosovellukset tulevat yleistymään, sen sijaan yksikäsitset veisto-ohjelmat katoavat hiljalleen.

Kaksikäyttöisyyden puolesta puhuu niin vahvasti työskentelyn luonnollisuus ja nopeutuminen, etten näe yksikäsitisten veistosovellusten elinkaaren olevan kovin pitkä. Ainoa kaksikäyttöisyyden yleistymistä vastaan puhuva seikka on se, että käyttäjän tarvitsee hankkia kaksi syöttölaitetta ja vähintään toisen olisi hyvä olla 3D-ohjain. Käyttäjälle voi olla kynnys lähteä kauppaan ostamaan erityisesti veisto-ohjelmaa varten ohjainta, jos veistosovelluksen käyttöön ei ole pakottavaa tarvetta. Kynnystä madaltamaan olisi hyvä, jos ohjainten hinnat olisivat nykyistä alhaisempia mikäli mahdollista.

Tuntopalautetta pidän tässä tutkimuksessa esitellyistä pääperiaatteista sellaisena, jonka useimmiten jätetään veisto-ohjelmasta pois. Ammatti- ja kovassa harrastekäytössä olevassa veisto-ohjelmassa tuntopalaute on tärkeä tuki, mutta yksinkertaisimmissa sovelluksissa todennäköisesti tulevaisuudessakin tuntopalaute jätetään valitettavan usein pois. Näitä ohjelmia varten olisi mielenkiintoista kehittää tutkimuksessanikin käytettyä taktiilipalautetta, jolloin käyttäjällä olisi havaitsemisessa näkönsä tukena jokin muu aistikanava. Mielestäni tuntopalautteen periaatteesta on mahdollista luopua, jos havainnointia kaksiulotteisessa maailmassa tuetaan jollakin muulla tavalla, kuten erilaisilla väreillä ja ohjelman tiloilla työkalun koskettaessa veistettävää kappaletta.

Kolmiulotteisuuden havainnoimisen tukeminen kaksiulotteisella näytöllä on lähes kaikkien 3D-ohjelmien elinehto. Mikäli syvyysnäkemistä tukeva tuntopalaute jätetään toteuttamatta, pitää esimerkiksi visuaalisin viestein korvata tuntopalautekanavalta saatava tuki. Ilman syvyyshavaitsemisen tukemista veisto-ohjelman käyttäminen on hankalaa, kenties jollakin tasolla kuitenkin mahdollista. Tärkeintä kuitenkin on muistaa, että mikäli toteutetaan 3D-ohjelma, käyttäjän on pystyttävä havaitsemaan kappaleen kolmiulotteisuus – jos käyttäjä kokee kappaleen vain kaksiulotteisena, kyse on lähes piirtämisestä, jolloin kolmannen ulottuvuuden huomiotta jättäminen voi johtaa veistettäessä karkeisiin etäisyysvirheisiin.

8. Yhteenveto

Idea veisto-ohjelmista on peräisin 1970-luvulta, jolloin veistosovellusten varhaisimpien versioiden tuotokset olivat vain karkeita rautalankamalleja. Nykyään kuitenkin veistosovellus voi olla parhaimmillaan joustava, monipuolinen ja helppo tapa luoda kolmiulotteisia kappaleita tietokoneen avulla. Veistosovellukset ovat varmasti osittain syntyneet siksi, että 3D-kappaleiden tuottamisesta on haluttu tehdä helpompaa kuin mitä se useimmilla kolmiulotteista grafiikkaa tuottavilla sovelluksilla on.

Usein 3D-kappaleita luodaan joko ohjelmoiden, käyttäen monimutkaisia 3D-mallinnusohjelmia tai skannaamalla olemassa oleva esine 3D-kuvaksi tietokoneelle. Skannaamisessa ei voida puhua varsinaisesti 3D-kuvan tekemisestä tietokoneella, sillä itse kappale tehdään reaali maailmassa ja siitä tehdään vain digitaalinen kopio tietokoneelle. Veisto-ohjelmien etuna edellä mainittuihin sovelluksiin on se, että yleensä veisto-ohjelmaa voi käyttää kuka tahansa opettelematta ensin ohjelmointia, erilaisia käskyjä, matematiikkaa tai ohjelmien monimutkaista toimintaa.

Veisto-ohjelmien käyttäminen on siis parhaillaan hyvin luonnollista. Luonnollisuustaso riippuu pitkälle siitä, kuinka veisto-ohjelma on toteutettu. Veisto-ohjelmia on vielä markkinoilla vähän, eikä varsinaista standarditapaa toteuttaa veistosovellus ole olemassa. Standardoimattomuudesta riippumatta virtuaaliseen veistämiseen tarkoitetuilla sovelluksilla on yleensä muutamia yhteisiä piirteitä ja piirteitä, joita ei ole kaikissa veisto-ohjelmissa, mutta jotka sopivat erinomaisesti veisto-ohjelmien luonteeseen. Tärkein ominaisuus veisto-ohjelmissa on niiden suorakäyttöisyys. Suorakäyttöisyyden käsitteen avulla mahdollistetaan ohjelman helppokäyttöisyys, sillä asiat ovat käyttäjän nähtävillä, eikä toimintoja ole hukutettu syviin ja monimutkaiseen valikkorakenteisiin.

Valikkojen sijaan käyttäjä voi valita halutun toiminnan painonappuloilla, joissa käytetään erilaisia metaforia kuvaamaan nappulan toimintaa. Metaforien avulla voidaan myös helpottaa ohjelman käyttöä, kun erilaisten asioiden ja toimintojen mallit haetaan reaali maailmasta. Veisto-ohjelman työkalut voivat muistuttaa sekä ulkonäöltään, että toiminnaltaan oikeaa toimintaa. Perustyökaluista tärkeimpiä ovatkin kaivertaminen ja pursottaminen, jossa ensimmäisessä poistetaan ja jälkimmäisessä lisätään veistettävään kappaleeseen massaa. Nämä tilanteet vastaavat taiteilijan toimia, kun hän muotoilee savimöykkyä verstaasaan. Työkaluja ja metaforia voidaan kehittää jatkuvasti tulevaisuudessa ja virtuaaliveistämisessä voi olla jopa mahdollista tuottaa nopeasti työkaluja, joiden tekemiseen verstaassa menisi hyvin kauan. Veistosovellus itsessään on parhaimmillaan suuri metafora oikeassa elämässä tapahtuvalle veistämislle.

Helppouden ja luonnollisuuden lisäämiseksi veisto-ohjelmia voidaan käyttää kaksikäteisesti. Kahden käden käyttö on luonnollinen ohjaustapa veistosovellukseen, sillä yleensä taiteilija reaali maailmassakin käyttää molempia käsiään työskennellessään. Kaksikäisyys mahdollistaa myös työn nopeutumisen, kun työmäärä voidaan jakaa molemmille käsille. Toinen tällainen piirre, jota ei suinkaan joka veisto-ohjelmassa ole, on tuntopalautte. Tuntopalautteen avulla voidaan parantaa kolmiulotteista hahmottamista sovelluksissa, joissa käsitellään kolmiulotteista maailmaa tai kappaletta kaksiulotteisella näytöllä. Useamman aistikanavan käyttö voi parantaa ihmisen hahmottamiskykyä veistosovelluksen kaltaisissa ohjelmissa huomattavasti. Mikäli sovellukseen ei ole toteutettu tuntopalautetta, pitää kolmiulotteista hahmottamista tukea silloin muilla tavoin, kuten erilaisin visuaalisin viestein. Muutenkin mahdollisimman realistisesti esitettävä kappale edesauttaa käyttäjää hahmottamaan kappale oikein.

Riippumatta siitä, käytetäänkö veistosovellusta yhdellä vai kahdella kädellä, on syöttölaitteiden valinta ratkaiseva sovelluksen luonnollisen ja helpon käytön takaamiseksi. Kolmiulotteisia kappaleita käsitellessä olisi hyvä käyttää myös kolmiulotteiseen maailmaan tarkoitettuja välineitä, kuten avaruushiiriä, PHANTOM-laitetta tai datahanskoja. Joissakin tapauksissa näkisin, että on mahdollista toteuttaa veisto-ohjelma, jossa toinen syöttölaite on 2D-ohjain, mutta silloinkin rinnalla on hyvä olla jokin 3D-syöttölaite. Syöttölaitteiden kirjo on laaja ja on ymmärrettävää, ettei jokaisessa veistosovelluksessa voida käyttää vain kalliita laitteita, kuten tuntopalautteen antavaa datahanskaa tai PHANTOM-laitetta. Tällaisten kalliiden laitteiden käyttö ammattikäyttöön tarkoitetuissa sovelluksissa on kuitenkin järkevää niiden käytön mukana tuoman hyödyn takia; työ muistuttaa tuntopalautteen antavien 3D-laitteiden laitteiden myötä mahdollisimman paljon luonnollista veistämistä.

Tässä tutkimuksessa tutkin, miten veisto-ohjelman käyttäjän kolmiulotteisuuden hahmottamista voidaan parantaa erilaisilla hahmotustyökaluilla sekä toisaalta taktiilipalautteilla, kun sovelluksessa ei ole tuntopalautetta. Olettamukseni molempien hyödyllisyydestä osoittautui oikeaksi, sillä käyttäjien toiminta parani sekä silmämääräisesti, että heidän omien kokemustensa perusteella. Varsinkin taktiilipalautteen kehittäminen voisi olla tulevaisuudessa merkittävä lisä veisto-ohjelmiin, sillä taktiililaitteiden edullisuus verrattuna moniin muihin tuntopalautteen antaviin laitteisiin voisi olla avain, jolla veisto-ohjelmat voitaisiin tuoda myös tavallisiin perheisiin sen sijaan, että veisto-ohjelmat jäisivät vain ammattilaiskäyttöön.

Tulevaisuus muuttaa varmasti veisto-ohjelmia vielä suuresti niiden nyky-suunnasta. Joka tapauksessa nykyisillä veisto-ohjelmilla voidaan jo tuottaa huikeaa grafiikkaa ja lisääntyvien konetehtojen mahdollistaessa monimutkaisten

operaatioiden tekemisen uskon veistosovellusten yleistyvän lähitulevaisuudessa. Veisto-ohjelmat tuskin koskaan kilpailevat asemastaan muiden mallinnussovellustyyppien kanssa, vaan tuovat 3D-grafiikan piiriin uusia tahoja, jotka tuskin muuten koskaan olisivat kiinnostuneet 3D-kappaleiden tuottamisesta tietokoneella. Kolmiulotteisen grafiikan yleistyminen tulevaisuudessa ei enää tulevaisuudessa jää vain kokeneiden ohjelmoijien ja taitavien sovellusohjelmien käyttäjille, vaan siitä tulee kenen tahansa huvia.

Viiteluettelo

- [3dconnexion, 2005] 3dconnexion, <http://www.3dconnexion.com/>, 2005, Tarkistettu 11.12.2005.
- [3dmd, 2005] 3dMD, <http://www.3dmd.com/>, 2005, Tarkistettu 11.12.2005.
- [Aikio, 1994] Annukka Aikio (toim.), *Uusi Sivistyssanakirja*. Kustannusosakeyhtiö Otavan painolaitokset, Keuruu, 1994.
- [Alias, 2005] Alias, <http://www.alias.com/eng/index.shtml>, 2005, Tarkistettu 11.12.2005.
- [Ascensio, 2005] Virtual realities, <http://www.vrealities.com/6dmouse.html>, 2005, Tarkistettu 11.12.2005.
- [Biomag, 2005] BioMag Laboratory, <http://www.biomag.hus.fi/braincourse/L6.html>, 2004, Tarkistettu 11.12.2005.
- [Burdea, 1996] Grigore C. Burdea, *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*. John Wiley & Sons, 1996.
- [Buxton and Myers, 1986] William Buxton and Brad A. Myers, A study in two-handed input. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM Press, 1986, 321-326.
- [Carrol *et al.*, 1988] John M. Carrol, Robert L. Mack, and Wendy A. Kellogg, Interface metaphors and user interface design. M. Helander (ed.), *Handbook of Human-Computer Interaction*. Elsevier Science Publishers, 1988, 283-307.
- [Computer Desktop, 2005] Computer Desktop Encyclopedia, <http://www.computerlanguage.com/index.htm>, Tarkistettu 11.12.2005.
- [Dachille *et al.*, 1999] Frank Dachille IX, Hong Qin, Arie Kaufman, and Jihad El-Sanat, Haptic sculpting of dynamic surfaces. *Proceedings of the 1999 Symposium on Interactive 3D Graphics*, ACM Press, 1999, 103-110.
- [Dansdata, 2005] Logitech iFeel mouse, <http://www.dansdata.com/ifeel.htm>, Tarkistettu 11.12.2005.
- [Egidius, 1980] Henry Egidius, *Johdatus Kehityopsykologiaan*. Weilin-Göös, 1980.
- [Epinions, 2005] Epinions netstore, <http://www.epinions.com/>, 2005, Tarkistettu 11.12.2005.
- [ETSI, 2002] ETSI, Human Factors (HF); Guidelines on the multimodality of icons, symbols and pictograms. EG 202 048 V1.1.1 2002. Also available as: http://docbox.etsi.org/EC_Files/EC_Files/eg_202048v010101p.pdf, Tarkistettu 11.12.2005.
- [Fifth Dimension, 2005] 5DT, Fifth Dimension Technologies, <http://www.5dt.com/products/pdataglove5u.html>, 2005, Tarkistettu 11.12.2005.

- [Fitts, 1954] P. M. Fitts, The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, **47**, 1954, 381-391.
- [Flowers, 1975] K. Flowers, Handedness and controlled movement. *British Journal of Psychology*, **66** (1), 1975, 39-52.
- [Foley *et al.*, 2000] James D. Foley, Andries van Dam, Steven K. Feiner, John F. Hughes, Richard L. Phillips, *Introduction to Computer Graphics*. Addison-Wesley, 2000.
- [Frederick *et al.*, 2001] Frederick W. B., Li Rynson W. H. Lau, Frederick F. C. Ng, Collaborative distributed virtual sculpting. *Proceedings of the Virtual Reality 2001 Conference (VR'01)*, IEEE Computer Society, 2001, 217.
- [Galyean and Hughes, 1991] Tinsley A. Galyean and John F. Hughes, Sculpting: an interactive volumetric modeling technique. *Computer Graphics*, **25** (4), 1991, 267-274.
- [Gregory, 1998] Richard L. Gregory, *Eye and Brain: The Psychology of Seeing*. Oxford University Press, 1998, 46-48, 98.
- [GSPC, 1979] Status report of the graphics standard planning committee. *Computer Graphics*, **13** (3), ACM Press, 1979.
- [Guiard, 1987] Yves Guiard, Asymmetric division of labor in human skilled bimanual action: the kinematic chain model. *Journal of Motor Behaviour*, **19** (7), 1987, 486-517.
- [GuiArt, 2005] GUIART, <http://www.guiart.fi/vsg/vsg4.htm>, 2005, Tarkistettu 11.12.2005.
- [Haber and Hershenson, 1973] R. N. Haber and M. Hershenson, *The Psychology of Visual Perception*. Holt, Rinehart and Winston, New York, 1973.
- [Hale and Stanney, 2004] Hale Kally S. and Stanney Kay M., Deriving haptic design guidelines from human physiological, and neurological foundations. *IEEE Computer Graphics and Applications*, **24** (2), 2004, 33 – 39.
- [Hatva, 1987] Anja Hatva, *Kuva – Hyvä Renki, Huono Isäntä*. Oy Urex., Porvoo, 1987, 13-19, 26.
- [Hearn and Baker, 1994] D. Hearn and M.P Baker, *Computer Graphics 2/E*. Prentice Hall, 1994, 276 – 280.
- [Hinckley *et al.*, 1994] Ken Hinckley, Randy Pausch, John Goble, and Neal Kassel, A survey of design issues in spatial input. *Proceedings of the 7th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, ACM Press, 1994, 213-222.
- [ILM, 2005] Industrial Light & Magic, http://www.ilm.com/ilm_services.html, 2005, Tarkistettu 11.12.2005.

- [Immersion, 2005a] Immersion, Devices with that special touch... <http://www.immersion.com/developer/technology/devices/index.php>, 2003, Tarkistettu 11.12.2005.
- [Immersion, 2005b] Immersion, Cyberforce, http://www.immersion.com/3d/products/cyber_force.php, 2005, Tarkistettu 9.7.2005.
- [Inition, 2005] Inition, innovative graphics solution, http://www.inition.co.uk/inition/products.php?CatID_=13, 2005, Tarkistettu 11.12.2005.
- [Johnson, 1963] Timothy Johnson, Sketchpad III: three dimensional graphical communication with a digital computer. *Proceedings of the AFIPS Spring Joint Computer Conference*, **23**, AFIPS Press, 1963, 347-353.
- [Johnson *et al.*, 2000] Kenneth O. Johnson, Takashi Yoshioka, and Francisco Vega-Bermudez, Tactile functions of mechanoreceptive afferents innervating the hand. *Journal of Clinical Neurophysiology*, **17** (6), 2000, 539-558.
- [Johnson, 2001] Kenneth O. Johnson, The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors. *Neurobiology*, **11**, 2001, 455-461.
- [Kangas, 2004] Katri Kangas, Ohjeistuksia tuntopalautteen suunnitteluun tietotekniikassa. Pro gradu -tutkielma, Tietojenkäsittelytieteiden laitos, Tampereen yliopisto, 2004.
- [Laarni *et al.*, 2001] Jari Laarni, Virpi Kalakoski ja Pertti Saariluoma, Ihmisen tiedonkäsittely. Pentti Saariluoma, Matti Kamppinen ja Antti Hautamäki (toim.), *Moderni Kognitiotiede*. Helsinki, Yliopistokustannus, 2001, 85-127.
- [Leganchuk *et al.*, 1998] Andrea Leganchuk, Shumin Zhai, and William Buxton, Manual and cognitive benefits of two-handed input: an experimental study. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, **15** (4), ACM Press, 1998, 326-359.
- [Logitech, 2005] Logitech® Extreme™ 3D Pro, <http://www.logitech.com/index.cfm/products/details/US/EN,crid=12,contid=6954,detail=2>, 2005, Tarkistettu 11.12.2005.
- [MacKenzie and Buxton, 1992] I. Scott MacKenzie and William Buxton, Extending Fitts' law to two-dimensional tasks. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM Press, 1992, 219-226.
- [McDonnell *et al.*, 2001a] Kevin T. McDonnell, Hong Qin and Robert A. Woldarczyk, Virtual clay: a real-time sculpting system with haptic toolkits. *Proceedings of the 2001 Symposium on Interactive 3D Graphic*, ACM Press, 2001, 179-190.
- [McDonnell *et al.*, 2001b] Kevin T. McDonnell, Hong Qin and Robert A. Woldarczyk, Virtual Clay: A Real-time, Haptics-based Sculpting System. *Pro-*

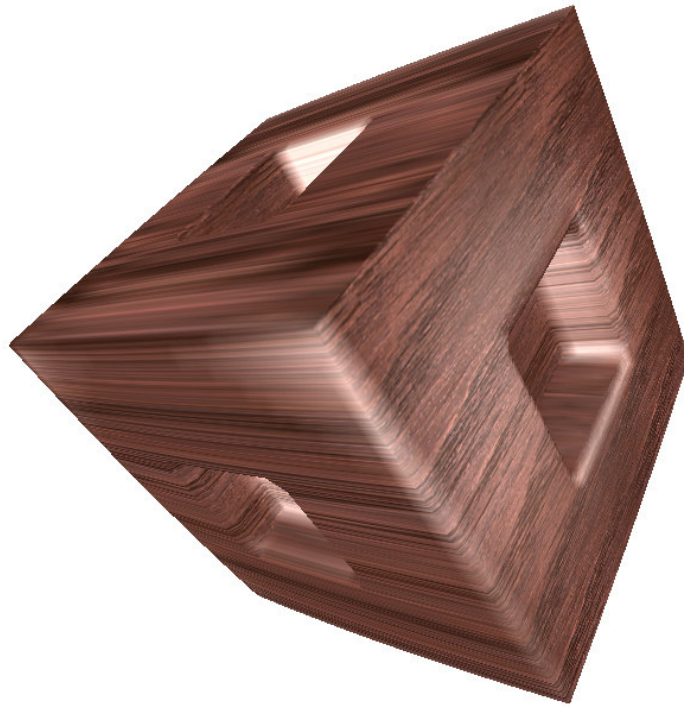
ceedings of Graduate Research Conference 2001, Department of Computer Science, Stony Brook University, Stony Brook, NY, 2001.

- [McGee *et al.*, 1997] Mike K. McGee, Brian Amento, Patrick Brooks, Hope D. Harley, Fitts and Virtual Reality: Evaluating Display and Input Devices with Fitts' Law. *Proceedings of the 41st Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, Santa Monica, CA, HFES, 1997. Also available as: <http://ei.cs.vt.edu/~cs5724/g1/expfitts.html>, Tarkistettu 11.12.2005.
- [Nielsen and Olsen, 1987] Gregory M. Nielsen and Dan R. Olsen Jr., Direct manipulation techniques for 3D objects using 2D locator devices. *Proceedings of the 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics*, ACM Press, 1987, 175-182.
- [Parent, 1977] Richard E. Parent, A system for sculpting 3-D data. *Computer Graphics*, **11** (2), 1977, 138-147.
- [Parviainen, 2004] Jyrki Parviainen, Suorakäyttöisyys kolmiulotteisessa veisto-ohjelmassa. Raportti **B-2004-3**, Tietojenkäsittelytieteiden laitos, Tampereen yliopisto, 2004.
- [Parviainen *et al.*, 2004] Jyrki Parviainen, Nina Sainio, Roope Raisamo, Perceiving tools in 3d sculpting. *APCHI 2004, the 6th Asia-Pacific Conference on Computer-Human Interaction: Lecture Notes in Computer Science*, **3101**, Springer-Verlag, 2004, 328-357.
- [Povray, 2005] POV-Ray, <http://www.povray.org>, 2005, Tarkistettu 11.12.2005.
- [Raffin *et al.*, 2004] Romain Raffin, Gilles Gesquière, Eric Remy, Sébastien Thon, VirSculpt: a virtual sculpting environment. *GraphiCon 2004*, Moscow State University, 2004. Also available as: [http://www.graphicon.ru/2004/Proceedings/Technical/s3\[4\].pdf](http://www.graphicon.ru/2004/Proceedings/Technical/s3[4].pdf), Tarkistettu 11.12.2005.
- [Rosenberg and Brave, 1996] Louis Rosenberg and Scott Brave, Using force feedback to enhance human performance in graphical user interfaces. *Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM Press, 1996, 291-292.
- [Schmidt *et al.*, 1979] R. A. Schmidt, H. Zelaznik, B. Hawkins, J. S. Frank and J. T. Quinn, Motor-output variability: A theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychological Review*, **86**, 1979, 415-451.
- [Sensable, 2005a] Sensable Technologies, PHANTOM haptic interface, http://www.sensable.com/products/PHANTOM_ghost/papers.asp, 2005, Tarkistettu 11.12.2005.
- [Sensable, 2005b] Sensable Technologies, FreeForm Modeling Plus system, <http://www.sensable.com/products/3ddesign/freeform/index.asp>, 2005, Tarkistettu 11.12.2005.

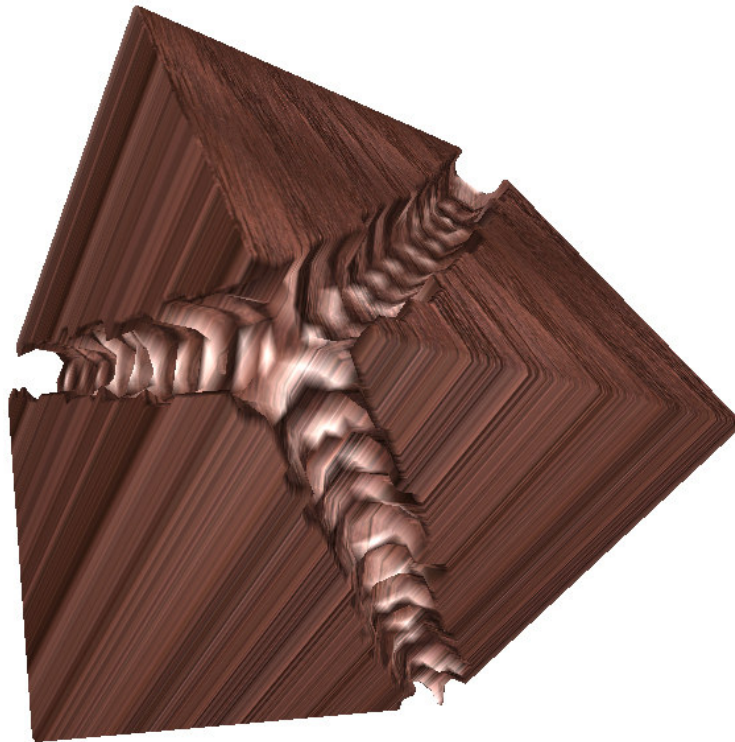
- [Shneiderman, 1982] Ben Shneiderman, The future of interactive systems and the emergence of direct manipulation. *Behaviour and Information Technology*, **1**, 1982, 237-256.
- [Suomi *et al.*, 2005] Alpo Suomi, Sirkka Hintikka, Pirjo Kääriäinen, Mailis Rihto, Raija Rissanen ja Vesa Vävilä, Päiväharjun vaikeavammaisten koulun opetusmateriaali, <http://www.cygnet.jkl.fi/koulut/paivaharju/motorisettaidot.htm>, 2005, Tarkistettu 11.12.2005.
- [Sutherland, 1963] Ivan Edward Sutherland, Sketchpad: a man-machine graphical communication system. *Proceedings of the AFIPS Spring Joint Computer Conference*, **23**, AFIPS Press, 1963, 329-346.
- [Vanhala, 2005] Jukka Vanhala, Moderni käyttöliittymäelektronikka -luennot. Tampereen teknillinen yliopisto, <http://www.ele.tut.fi/teaching/74490/vuosi05/haptiikka.pdf>, 2005, Tarkistettu 11.12.2005.
- [Todor and Doane, 1978] I. Todor and T. Doane, Handedness and hemispheric asymmetry in the control movements. *Journal of Motor Behaviour*, **10**, 1978 295-300.
- [Vrealities, 2005] Virtual realities, <http://www.vrealities.com/cyberstik.html>, 2005, Tarkistettu 11.12.2005.
- [Wong *et al.*, 2000] Janis P.Y. Wong, Rynson W.H. Lau, Lizhuang Ma, Virtual 3D sculpting. *Journal of Visualization and Computer Animation*, **11** (3), John Wiley & Sons, 2000, 155-166.
- [XYZRGB, 2005] XYZ RGB inc., <http://www.xyzrgb.com/>, 2005, Tarkistettu 11.12.2005.
- [Youngblut *et al.*, 1996] Christine Youngblut, Rob E. Johnson, Sarah H. Nash, Ruth A. Wienclaw, Craig A. Will, Review of Virtual Environment Technology. IDA Paper **P-3186**, Institute of Defense Analysis, Virginia, USA, 1996.
- [Zhai, 1995] Shumin Zhai, Human performance in six degree of freedom input control. Ph.D. Thesis, University of Toronto, 1995.
- [Ziegler and Fährnich, 1988] Jürgen E. Ziegler and Klaus-Peter Fährnich, Direct manipulation. M. Helander (ed.), *Handbook of Human-Computer Interaction*. North-Holland, Amsterdam, 1988, 123-133.
- Yhteensä 66 lähdetä.

Liite 1: Hahmotustyökalujen käyttäminen

Tehtävät 1 ja 4

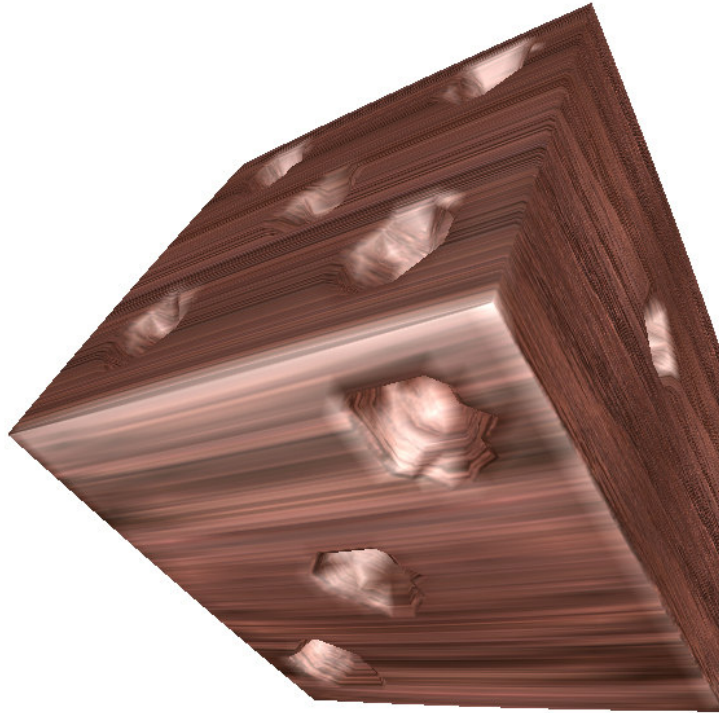


Tehtävät 2 ja 5



Liite 1

Tehtävät 3 ja 6



Tehtävä 7



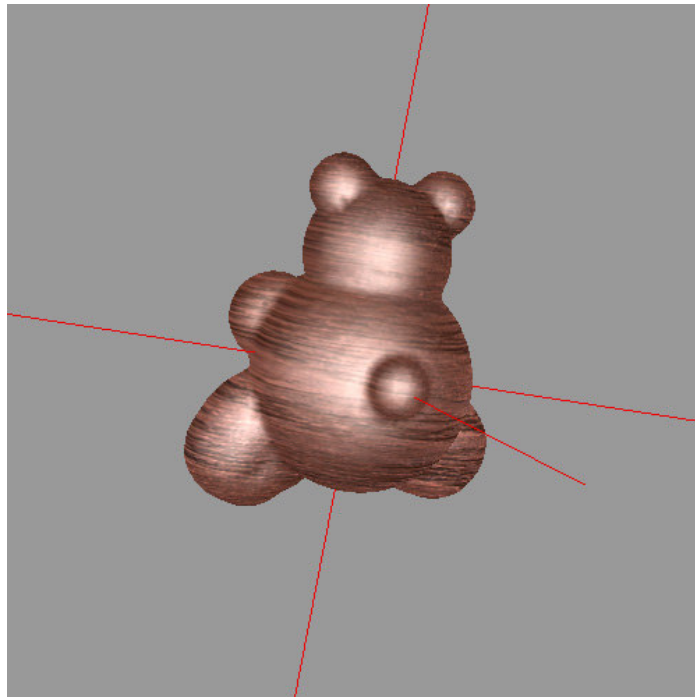
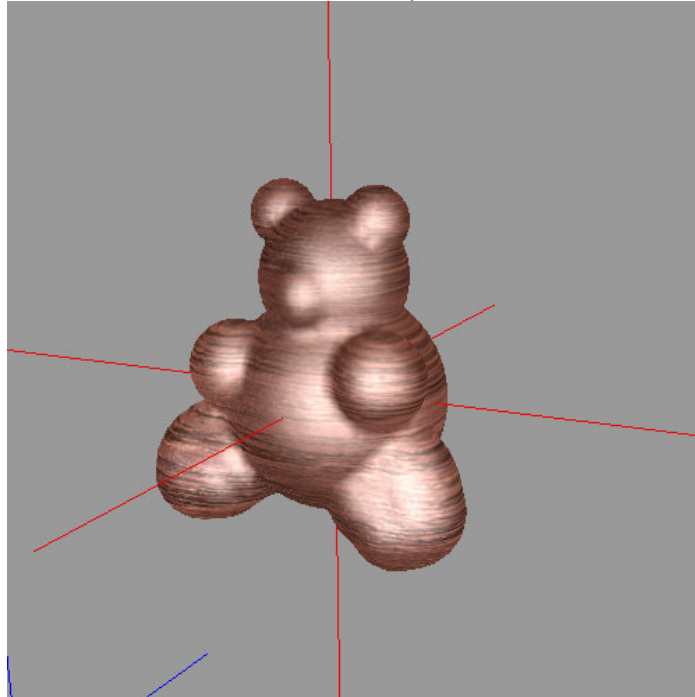
Liite 1

Tehtävä 8



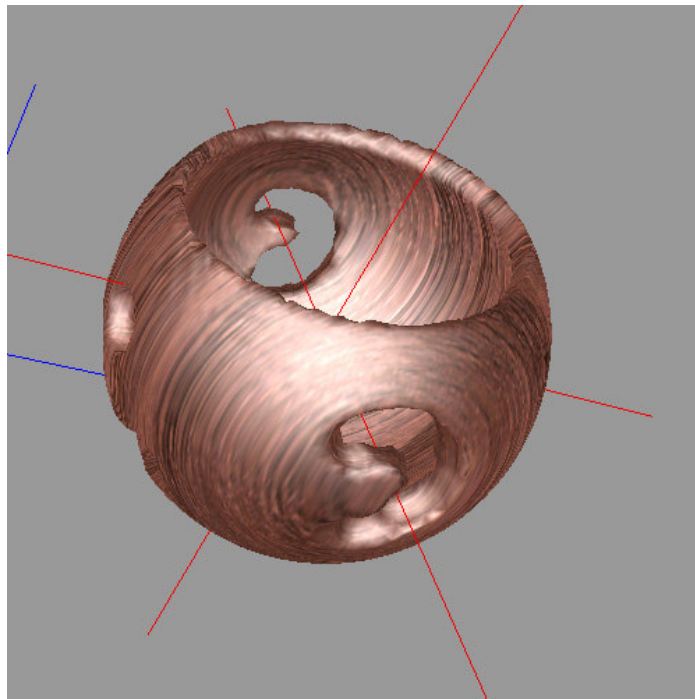
Tehtävä 9



Liite 2: Taktiilipalaute osana veisto-ohjelmaa**Tehtävät 1 ja 2**

Liite 2

Tehtävät 3 ja 4



Liite 2

Tehtävät 5 ja 6

