

hyväksymispäivä

arvosana

arvostelija

Virtuaalitodellisuusavusteinen suunnittelu

Tatu Harviainen

Helsinki 6.5.2008

HELSINGIN YLIOPISTO

Tietojenkäsittelytieteen laitos

HELSINGIN YLIOPISTO – HELSINGFORS UNIVERSITET

Tiedekunta/Osasto		Laitos – Institution	
Matemaattis-luonnontieteellinen		Tietojenkäsittelytieteen laitos	
Tekijä – Författare			
Tatu Harviainen			
Työn nimi – Arbetets titel			
Virtuaalitodellisuusavusteinen suunnittelu			
Oppiaine – Läroämne			
Tietojenkäsittelytiede			
Työn laji – Arbetets art		Aika – Datum	Sivumäärä – Sidoantal
Pro gradu –tutkielma		6.5.2008	90 sivua
Tiivistelmä – Referat			
Tietokonetta on käytetty suunnittelun apuvälineenä pitkään monilla aloilla ja monissa tehtävissä. Huolimatta pitkäaikaisesta hyödyntämisestä ja kehityksestä, tietokoneavusteinen suunnittelu ja erityisesti kolmiulotteisten kappaleiden muotoilu koetaan usein vaikeaksi. Osittain käytön vaikeuden nähdään johtuvan hiiren, näppäimistön ja näytön varaan rakentuvan kaksiulotteisen käyttöliittymän rajoitteista. Virtuaalitodellisuusteknologian mahdollistamien kolmiulotteisten käyttöliittymien on uskottu voivan vähentää kyseisiä rajoitteita ja siten tehdä tietokoneavusteisesta muotoilusta luonnollisempaa ja helpompaa. Tämän tutkielman tavoitteena on selvittää voiko virtuaalitodellisuusteknologia parantaa tietokoneavusteisen muotoilun tehtäviä, ja mitkä ovat sen sovellettavuuteen vaikuttavat tekijät. Tutkielman johtopäätökset perustuvat aihealueen akateemisen kirjallisuuden kartoitukseen, jonka lopputuloksena esitellään osoitettavissa olevia virtuaalitodellisuusteknologian tarjoamia hyötyjä ja soveltavuuteen kokonaisuudessaan liittyviä, toistaiseksi avoimia kysymyksiä. ACM Computing Classification System (CCS) -luokitus: I.3 [Computer Graphics], I.3.6 [Methodology and Techniques]			
Avainsanat – Nyckelord			
Virtuaalitodellisuus, tietokoneavusteinen suunnittelu, muotoilu, kolmiulotteiset käyttöliittymät			
Säilytyspaikka – Förvaringställe			
Kumpulan tiedekirjasto, sarjanumero C-2008-			
Muita tietoja – Övriga uppgifter			

Sisältö

1 Johdanto	1
2 Taustaa	3
2.1 Tietokone suunnittelun apuvälineenä	3
2.1.1 CAD:in historia	4
2.1.2 Kolmiulotteisen geometrian esitysmuodot ja muokkaus.....	6
2.3 Virtuaalitodellisuus	8
2.3 Kolmiulotteiset käyttöliittymät.....	12
2.4 Virtuaalitodellisuusavusteinen suunnittelu	13
3 Prototyypilähtöinen tutkimus	15
3.1 Ensimmäinen virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyyppi.....	15
3.2 Tutkimuksen ensiaskeleita	17
3.2.1 Schmandin prototyyppijärjestelmä	17
3.2.2 3-Draw.....	19
3.3 Prototyypilähtöinen tutkimus 90-luvulla.....	20
3.3.1 3DM	20
3.3.2 JDCAD ja THREAD	21
3.3.3 HoloSketch	25
3.3.4 3DIVS.....	28
3.3.5 PolyShop ja InDex	30
3.3.6 COVIRDS.....	30
3.3.7 Jot.....	31
3.3.8 Uudet metaforat	33
3.4 Prototyypilähtöinen tutkimus 2000-luvulla.....	35
3.4.1 FreeDrawer	37
3.4.2 Ilmaan maalaus	39
3.4.3 Digitaalinen teippipiirtäminen	41
3.4.4 Muut prototyypilähtöiset tapaukset 2000-luvulla	44
3.5 Prototyyppijärjestelmän kehityksestä	47
3.6 Yhteenvedo prototyypilähtöisestä tutkimuksesta	49
4 Käytettävyystudkimus	54
4.1 Suorakäyttöisyys.....	54
4.2 Syötteen ja palautteen monimuotoisuus.....	59
4.3 Kaksikätkinen työskentely	63
4.4 Prototyyppijä vertaileva tutkimus	67
4.5 Kehitetty testiskenaario ja alustavia tuloksia	68
4.6 Yhteenvedo käytettävyystudkimuksesta.....	73
5 Tulokset.....	76
6 Yhteenvedo	78
Lähteet	80

1 Johdanto

Eri aloilla suunnittelijat ovat jo pitkään käyttäneet tietokonetta apuvälineenä monissa työtehtävissään. Nykyisin lähes poikkeuksetta teollisten tuotteiden jokin suunnittelun tai valmistuksen vaihe tapahtuu tietokoneavusteisesti. Tietokonepäätteellä käytettävät tietokoneavusteisen suunnittelun (engl. computer-aided design, CAD) ohjelmistot ovat kypsyneet luonteviksi ja vakiintuneiksi osiksi ammattilaisten työskentelyä.

CAD-ohjelmistojen laajasta hyödyntämisestä huolimatta niiden kolmiulotteisen geometrian ja erityisesti vapaamuotoisten pintojen muotoiluun tarjoamien työkalujen käytettävyydessä on puutteita [CBG02 ja IMT99]. Käytettävyyden puutteet ilmenevät tehokkaan käytön vaatiman harjoittelun suuressa määrässä ja käytön aloittamisen vaikeutena. Seuraavissa luvuissa esiteltyn tutkimuksen tapausten määrästä voidaan nähdä, että moni on uskonut virtuaalitodellisuuden voivan tarjota apua kyseisiin muotoilun ongelmiin.

Virtuaalitodellisuuteen liittyvän tutkimuksen piirissä on kauan odotettu virtuaalitodellisuusteknologian siirtymistä tutkimuskäytöstä käytännön tehtäviin ja osaksi yritysten liiketoimintaa. Virtuaalitodellisuuden ensimmäisten kehitysaskelten synnyttämän julkisen innostuksen laannuttua, sen soveltaminen todellisiin työtehtäviin on osoittautunut kuitenkin vaikeaksi. Virtuaalitodellisuuden hyödyntäminen todellisissa työtehtävissä onkin pääsääntöisesti rajoittunut vain muutamille teollisuuden aloille, lähinnä simulointi- ja visualisointitehtäviin [Bro99].

Akateemisen tutkimuksen piirissä erilaisia kokeiluja virtuaalimaailmassa tapahtuvasta suunnittelusta on esitelty jonkin verran. Virtuaalitodellisuusavusteiseksi suunnitteluksi nimetyn sovellusalan tutkimusta on motivoinut virtuaalitodellisuuden mahdollistama tietokonepääteen kaksiulotteista käyttöliittymää intuitiivisempi tapa työskennellä. Tietokoneavusteisen suunnittelun kontekstissa virtuaalitodellisuuden tarjoamia hyötyjä todentavaa näyttöä, esim. käytettävyydestutkimuksen tuloksia, on kuitenkin julkaistu melko suppeasti.

Tässä pro gradu –tutkielmassa selvitän mitkä ovat akateemisen tutkimuksen piirissä julkaistun kirjallisuuden perusteella odotettuja ja osoitettavissa olevia virtuaalitodellisuuden lisäarvoja tietokoneavusteisen suunnittelun saralla. Pyrin vastaamaan kysymyksiin, voiko virtuaalitodellisuusteknologian hyödyntäminen helpottaa tietokoneavusteisen suunnittelun

tehtäviä, ja mitkä ovat sen sovellettavuuteen vaikuttavat tekijät. Selvitys perustuu alan akateemisen tutkimuksen kautta saavutettujen ja julkaistujen tulosten kartoitukseen ja vertailuun.

Virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun liittyvät julkaisut olen jakanut kahteen pääluokkaan. Toisen pääluokan muodostaa prototyyppilähtöinen tutkimus ja toisen aiheeseen liittyvä käytettävyystudkimus. Molempien lähestymistapojen osalta esitellään merkittävimmät tulokset, sekä niiden väliset yhteydet. Virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyyppilähtöisen tutkimuksen puolelta pyritään käymään mahdollisimman kattavasti läpi kaikki kirjallisuudessa esitelty kolmiulotteisen geometrian muotoiluun tarkoitetut virtuaalitodellisuusteknologiaa hyödyntävät prototyyppijärjestelmät. Käytettävyystudkimuksen puolella suunnitteluun liittyvää virtuaalitodellisuuden tai kolmiulotteisten käyttöliittymien tutkimusta on tehty hyvin vähän. Käytettävyystudkimuksen osalta esitellään virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun parissa tehty vähäinen määrä tutkimusta, sekä yleisemmät, mutta aiheen kannalta olennaiset käytettävyystudkimuksen tapaukset. Lisäksi esittelen virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyyppijärjestelmän ja käytettävyydestauksen, joiden suunnitteluun ja toteutukseen olen osallistunut. Tutkielman taustana käytetty kirjallisuus koostuu alan tieteellisissä konferensseissa ja lehdissä julkaistusta materiaalista, sekä muutamista laajemmin alaa käsittelevistä kirjoista.

Rakenteeltaan tämä tutkielma jakautuu neljään päälukuun. Seuraavassa luvussa esitellään virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun liittyvän tutkimuksen taustaa, kehityshistoriaa ja nykytilaa. Luvussa kolme esitellään merkittävimmät virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyyppilähtöisen tutkimuksen tapaukset. Neljännessä luvussa käydään läpi aiheeseen liittyvää käytettävyystudkimusta. Viimeiset luvut sisältävät tulosten yhteenvedon ja johtopäätökset.

2 Taustaa

Virtuaalitodellisuus, ja etenkin virtuaalitodellisuusavusteinen suunnittelu, ovat sovellus- ja tutkimusalueina tietokoneavusteista suunnittelua nuorempia. Tietotekniikkaa sinänsä voidaan sanoa sovelletun suunnittelun apuvälineenä tietokoneiden kehityksen alkuaajoista lähtien. Aluksi tietokoneita käytettiin apuna suunnitteluun liittyvässä laskennassa, mutta jo 70-luvulta lähtien myös suunnitelmien laadintaan ja tarkasteluun soveltuvana graafisen käyttöliittymän tarjoavana apuvälineenä [Ker04]. Virtuaalitodellisuusteknologia puolestaan mahdollisti sille pohjautuvan sovelluskehityksen laajemmassa mitassa vasta 80-luvun alusta lähtien [BuC03]. Varhaisesta virtuaalitodellisuusteknologian kehityksestä saakka kolmiulotteisten kappaleiden suunnittelu on tiedostettu potentiaaliseksi alueeksi, jolla uusi teknologia voisi helpottaa työskentelyä. Usko virtuaalitodellisuuden avulla saavutettavaan lisäarvoon on synnyttänyt useita virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyyppijärjestelmiä sekä jonkin verran kyseiseen sovellusalaan keskittyntä käytettävyystudkimusta.

Tässä luvussa esitellään virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun liittyvät tietojenkäsittelyn osa-alueet ja kuvataan niiden kehityshistoriaa. Ensimmäisessä aliluvussa esitellään yleisesti kehitysvaiheet, jotka liittyvät tietokoneen soveltamiseen suunnittelun apuvälineenä. Mielenkiinnon kohteena ovat virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun menetelmät, jotka liittyvät kolmiulotteisen geometrian luontiin ja käsittelyyn, muut perinteisesti tietokoneavusteisen suunnittelun piiriin kuuluvat alueet, kuten esim. kokoonpanosekvenssien suunnittelu, rakenneanalyysit, tuotetiedon hallinta jne., rajautuvat tämän tutkielman ulkopuolelle. Toisessa aliluvussa esitelläänkin tarkemmin aihealueen kannalta olennaisia kolmiulotteisen geometrian esitysmalleja ja menetelmiä. Seuraava aliluku käsittelee virtuaalitodellisuutta ja sisältää tiiviin kuvauksen virtuaalitodellisuusteknologian kehityksestä. Neljännessä aliluvussa kuvataan virtuaalitodellisuuteen liittyvien kolmiulotteisten käyttöliittymien erityispiirteitä. Viides aliluku tarkentaa, mitä tämän tutkielman puitteissa tarkoitetaan virtuaalitodellisuusavusteisella suunnittelulla, sekä antaa tiiviin yleiskuvan kyseisestä tutkimusalasta.

2.1 Tietokone suunnittelun apuvälineenä

Tietokoneiden varhaisesta kehityksestä lähtien niitä on käytetty suunnittelun laskennallisena apuvälineenä. Ensimmäiset suunnittelun apuna hyödynnetyt sovellukset olivat

tietokoneavusteisen valmistuksen (engl. computer-aided manufacturing, CAM) järjestelmiä, joita käyttivät lähinnä suuret ajoneuvo- ja lentokonevalmistajat. Aluksi CAM järjestelmiä käytettiin erityisesti työstökoneiden numeeriseen ohjaukseen (engl. numerical control, NC). Myöhemmin tietokone tuli yhä tiiviimmin osaksi koko suunnittelun prosessia, ja työskentelyä ryhdyttiin kutsumaan tietokoneavusteiseksi suunnitteluksi eli CAD:ksi.

CAD on usein määritelty yksinkertaisesti tietokoneen avulla tapahtuvaksi piirtämiseksi tai tuotteen suunnitteluksi. Molemmat määrittelyt ovat epätäsmällisiä ja lisäksi merkittävästi toisistaan poikkeavia. CAD:ille eri lähteissä esitettyjen määritelmien kirjavuudesta onkin helppo nähdä CAD:in kattaman alueen laajuus ja monimuotoisuus. Täsmällisempää määrittelyä etsiessä osoittautuu, ettei sellaista ole helppo löytää jo yksistään suunnittelun ollessa termi, jolle on erittäin vaikea antaa yksikäsitteistä määrittelyä [Tay92]. Käytännössä CAD sisältää monia osa-alueita ja menetelmiä, jotka liittyvät suunnittelun eri vaiheisiin ja kohteisiin. Esimerkkejä CAD:in osa-alueista ovat kaksiulotteinen tekninen piirtäminen, kolmiulotteisten pintojen määrittely, kokoamissekvenssien suunnittelu jne. Menetelminä CAD:in piiriin kuuluu laaja valikoima esim. geometrian muokkaukseen, kappaleiden lujuuslaskentaan, virtauslaskentaan jne. tarkoitettuja menetelmiä.

Tässä tutkielmassa kiinnostuksen kohteena on kolmiulotteisen geometrian määrittely ja muokkaus. Painotuksesta johtuen käytän termiä CAD ensisijaisesti viittaamaan tietokoneavusteisen suunnittelun osa-alueeseen, joka käsittelee tietokoneavusteisesti tapahtuvaa kolmiulotteisten kappaleiden ja pintojen muotoilua. Kyseisestä CAD:in osa-alueesta ja siihen liittyvästä työskentelystä käytetään usein myös termejä mallintaminen tai muotoilu. Pyrin pääsääntöisesti kuvaamaan työskentelyä termillä muotoilu, aina tarpeen mukaan tarkentaen millaisesta muotoilusta on kysymys, mikäli se ei asiayhteydestä käy selväksi. Tietokoneen avulla muotoilua tekevistä henkilöstä taas käytän vaihtelevasti nimitystä suunnittelija tai käyttäjä, pyrkien pitämään tekstin mahdollisimman selkeänä.

2.1.1 CAD:in historia

Kolmiulotteisten kappaleiden ja pintojen muotoilu on aina visuaalista työtä. Suunnittelijan tulee nähdä työskentelynsä vaikutukset ja lopputulos jatkuvasti työtä tehdessään. Mikäli muotoilu tapahtuu tietokoneen avulla, tarkoittaa edellä mainittu sitä, että muotoiluun käytettävän

ohjelmiston tulee tarjota graafinen käyttöliittymä, jonka avulla suunnittelija voi vaikuttaa muotoiltavaan kappaleeseen vuorovaikutuksen ollessa reaaliaikaista.

1950 ja 60 -lukujen taitteessa Massachutes Institute of Technics (MIT) oli vuorovaikutteisen tietojenkäsittelyn kehityksen kärjessä. Ensimmäinen kuvaputkinäyttöä (engl. cathode ray tube, CRT), hyödyntävä tietokonelaitteisto oli 50-luvun puolivälissä MIT:ssä kehitetty, ja Yhdysvaltojen ilmavoimien käyttämä, SAGE (engl. lyhenne Semi Automatic Ground Environment) ilmavalvontajärjestelmä [Ker04]. Järjestelmä visualisoi ilmaliikennettä manner-Yhdysvaltojen alueella ja järjestelmän käyttäjän oli mahdollista saada lisäinformaatiota kuvaruudulla näkyvistä kohteista osoittamalla niitä osoitinlaitteena toimivalla valokynällä.

Ensimmäinen vuorovaikutteiseen piirtämiseen soveltuva CAD-ohjelmisto kehitettiin myös MIT:ssä. 1963 julkaisemassaan väitöskirjassaan Ivan Sutherland [Sut65a] esittelee kehittämänsä SKETCHPAD-ohjelman, joka sisälsi monia toiminnallisuuksia ja käyttöliittymäratkaisuja, joita modernit CAD-järjestelmät hyödyntävät nykyisinkin.

Lähdettyään liikkeelle, CAD-järjestelmien kehitys ja käyttö keskittyi pitkään suuriin teollisuusyrityksiin, joista erityisesti auto-, lentokone- ja elektroniikkateollisuus panostivat kehitystyöhön. Ennen henkilökohtaisten (engl. personal computer, PC) tietokoneiden yleistymistä kyseiset järjestelmät olivat korkeista kustannuksistaan johtuen vain harvojen hyödynnettävissä. 1970-luvulla tietokoneiden yleistyessä CAD-järjestelmät levisivät laajempaan käyttöön useammille teollisen valmistuksen ja muotoilun aloille. PC-laitteistojen yleistymisen ja niillä toimivien CAD-järjestelmien kehityksen myötä, tietokone on tullut osaksi lähes kaikkien nykyisin teollisesti valmistettavien tuotteiden suunnittelu- ja valmistusprosessia.

Kehityksen myötä monet CAD-ohjelmistot ovat erikoistuneet erilaisiin suunnittelun osa-alueisiin. Kolmiulotteisen geometrian muotoiluun, visualisointiin ja animointiin erikoistuneita ohjelmistoja on kehitetty pitkään, ja kyseiseen tarkoitukseen erikoistuneiden kaupallisten ohjelmistojen kirjo on mittava. Kyseisiä ohjelmistoja erotetaan usein monipuolisemmin suunnittelua tukevista CAD-ohjelmistoista kutsumalla niitä kolmiulotteiseksi (3D) mallinnus- ja animaatio-ohjelmistoiksi. Usein kuitenkin selkeää jakoa CAD ja 3D mallinnus- ja animaatio-ohjelmistojen välillä on vaikea tehdä, mistä johtuen puhun yleisesti CAD-ohjelmista, vaikka kiinnostus onkin etusijassa vain kolmiulotteisen geometrian muotoiluun tarkoitetuissa ohjelmistoissa ja toiminnallisuuksissa.

2.1.2 Kolmiulotteisen geometrian esitysmuodot ja muokkaus

Tietokonegrafiikan ja CAD-ohjelmien kehityksen myötä tietokoneella käsiteltävien pintojen ja kappaleiden geometrian esitysmuodot ovat monipuolistuneet. Usein geometrian esitystapa on kiinteästi yhteydessä sen muotoiluun tarkoitettujen menetelmien kanssa, joten geometrian ominaisuuksien erot ovat olennaisia myös virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun kannalta.

Geometrian esitysmuodot voidaan jakaa karkeasti kahteen pääluokkaan, geometrian pinnan määritteleviin (engl. boundary representaion, B-Rep) ja avaruuden jakoon perustuviin esitysmuotoihin [HeB94]. Avaruuden jakoon perustuvissa esitysmuodoissa muotoiluun käytetty avaruus on jaettu pienemmiksi alueiksi, yleensä kuutioiksi, joilla voi olla tilana ”tyhjä” tai ”täynnä”. Yksittäisten pienten kuutioiden tilat kuvaavat kokonaisuudessaan kappaleen muodon avaruudessa. Yksittäistä avaruuden tilaa kuvaavan kuution englanninkielinen nimi on *voxel*, mikä tulee sanojen tila (engl. volume) ja kuvapiste tai pikseli (engl. pixel) yhdistelmästä. Yleisimpiä avaruuden jakoon perustuvia geometrian esitysmuotoja ovat octree ja binaarinen avaruuden jako (engl. binary space partitioning, BSP). Avaruuden jakoon perustuvaa geometriaa käytetään muotoilun yhteydessä yleisimmin erilaisissa saven veistoa jäljittelevissä muotoilun menetelmissä.

Geometrian pinnan määrittelevät esitysmuodot ovat muotoiluun tarkoitettuina yleisempiä kuin avaruuden jakoon perustuvat esitysmuodot. Tämän työn kannalta olennaisimmat pinnan määrittelevät esitysmuodot käsittävät polygonimuotoisen geometrian, parametriset pinnat ja geometrysten perusprimitiivien yhdistelyn (engl. constructive solid geometry, CSG).

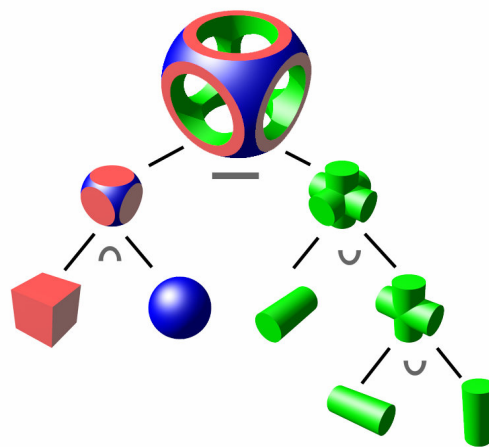
Polygonimuotoinen geometria on yleisin geometrian esitysmuoto reaaliaikaisessa tietokonegrafiikassa ja puhtaasti visualisointiin tähtäävässä muotoilussa. Polygonimuotoinen geometria muodostuu kolmiulotteisen avaruudessa määritellyistä kulmapisteistä, kulmapisteiden välisistä janoista ja kolmen tai useamman janan rajaamista kolmioista, suunnikkaista tai monikulmioista. Monikulmioita kutsutaan polygoneiksi. Rekursiivisesti polygoneista muodostuvia pintoja hienojakoisemmiksi, jatkuvasti kaareutuviksi pinnoiksi jakavat menetelmät (engl. sub-divison surfaces, SDS) tekevät polygoneista monipuolisen ja helposti käsiteltävän geometrian esitysmuodon [Ma05].

Parametrisissa pinnoissa geometria esitetään pinnat kuvaavina yhtälöinä ja yhtälöiden muuttujien, eli parametrien arvoina. Geometrysten perusprimitiivien kuvaavien yhtälöiden lisäksi käytetään jatkuvia käyriä kuvaavia yhtälöitä, jotka ovat laajennettavissa kolmiulotteisiksi pinnoiksi.

Tunnetuimpia pintojen parametrisia esitysmuotoja ovat erilaiset spline-käyriin perustuvat, esim. bezier ja nurbs (engl. Non-uniform rational b-splines) -esitysmuodot. Parametrisia pintoja käytetään erityisesti teolliseen valmistukseen tähtäävän suunnittelun yhteydessä, jolloin pintojen mittatarkat ominaisuudet ja jatkuvuus ovat tärkeitä.

Termiä ”vapaamuotoinen pinta” (engl. free-form surface) käytetään kuvaamaan yleisesti sekä SDS, että parametristen pintojen avulla kuvattuja jatkuvasti kaareutuvia pintoja. Tyypillisiä vapaamuotoisia pintoja ovat esimerkiksi autojen korien ja lentokoneiden pinnat, sekä lukuisat luonnosta löytyvät orgaanisten kappaleiden muodot.

Geometristen perusprimitiivien yhdistelyyn perustuvan CSG:n perusajatuksena on tarjota joukko loogisia operaatioita, joiden avulla yksittäisiä objekteja voidaan yhdistellä ja jakaa uusiksi objekteiksi. Loogiset operaatiot käsittävät unionin, leikkauksen ja yhdisteen. Kuvassa 1 esimerkki perusprimitiivien ja loogisten operaatioiden avulla tapahtuvasta uuden kappaleen muotoilusta. Kuvassa $\cap$ tarkoittaa leikkausta, U yhdistettä ja $-$ erotusta.



Kuva 1. CSG muotoinen objekti määritellään yhdistämällä kappaleita loogisilla operaatioilla.

Monipuolisuudestaan huolimatta nykyisin käytössä olevat geometrian muokkaukseen tarkoitetut käyttöliittymät kärsivät käytettävyyden puutteista. Erityisesti ongelmat näyttävät korostuvan vapaamuotoisten pintojen muotoilussa [IgM99]. Käytettävyyden ongelmat eivät johdu suoraan geometrian esitysmuodoista, vaan siitä, että käyttöliittymät eivät pysty eristämään geometrian dataa ja käsittelyä riittävän täydellisesti toisistaan. Suunnittelijan täytyy työskennellä nykyisillä ohjelmilla tuntee pinnan esitysmuotoon ja käsittelyyn liittyvät matemaattiset perusteet, jotka usein sanelevat miten pinta tulee rakentaa ja miten sitä voidaan

muokata jälkikäteen. Tämä aiheuttaa sen, että suunnittelijat käyttävät lähes poikkeuksetta muita välineitä luovaan työskentelyyn, yleisimmin kynää ja paperia tai savea, ja CAD-työkaluja lähinnä valmiiden ideoiden puhtaaksi piirtämiseen [CBF02]. Toisaalta CAD-työskentelyn ongelmana on usein pidetty nykyisin käytössä olevan kaksiulotteisen käyttöliittymän soveltumattomuutta kolmiulotteisten kappaleiden hahmottamiseen ja muotoiluun. Kaksiulotteinen, yleensä hiirellä, näppäimistöllä ja monitorilla toimiva käyttöliittymä vaatii käyttäjiltä kolmiulotteisessa avaruudessa useamman vapausasteen suhteen tapahtuvien operaatioiden muodostamista sarjasta kaksiulotteisia komentoja. Myös kolmiulotteisen geometrian esittäminen kaksiulotteisena projektiona tavallisella monitorilla heikentää kolmiulotteisuuden hahmotusta ja lisää käyttäjien kognitiivista kuormitusta. Ensisijaisesti virtuaalitodellisuusavusteinen suunnittelu on pyrkinyt korjaamaan jälkimmäisiä, kaksiulotteisen käyttöliittymän aiheuttamia ongelmia, mutta myös esimerkkejä pyrkimyksestä vähentää geometrian esitysmuodon ja työkalujen riippuvuutta toisistaan löytyy virtuaalitodellisuusteknologian tutkimuksen yhteydessä.

2.3 Virtuaalitodellisuus

1965 pitämässään luennossaan Ivan Sutherland esitti visionsa millaisen käyttöliittymän tietokoneiden tulisi tarjota niiden avulla luotuihin synteettisiin maailmoihin [Sut65b]. Vapaasti suomentaen visio oli seuraava:

”Älkää ajatelko [tietokonetta] vain näyttönä, ajatelkaa sitä ikkunana joka tarjoaa näkymän virtuaalimaailmaan. Haasteena on saada virtuaalimaailma näyttämään, kuulostamaan, liikkumaan ja toimimaan toden tuntuaisesti. Virtuaalimaailman tulee reagoida interaktioon reaaliaikaisesti ja siten, että se jopa tuntuu todelta.”

Kyseinen visio on toiminut ohjenuorana virtuaalitodellisuuden kehitykselle esittämisestään saakka ja se tarjoaa edelleen toistaiseksi saavuttamatta jääneet tavoitteet joihin virtuaalitodellisuusteknologian kehitys tähtää [Bro99].

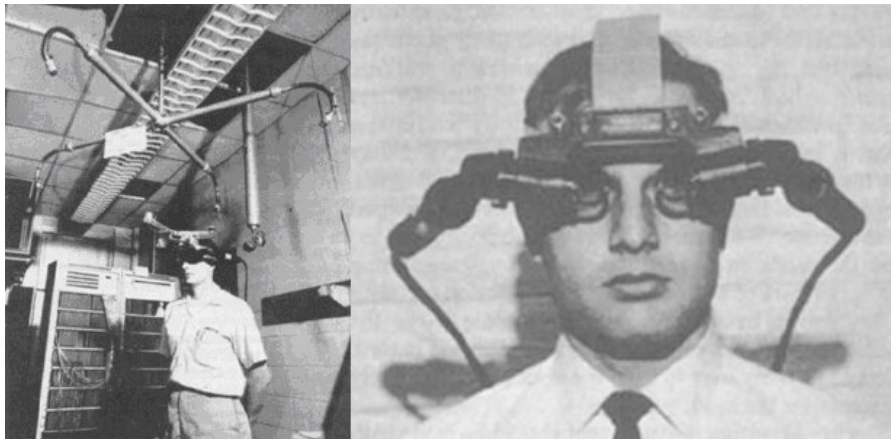
Jo ennen Sutherlandin esittämää visiota, Morton Heiling oli 50-luvulla rakentanut virtuaalitodellisuuden unelmaan tähtääviä installaatioita. Installaatiot käyttivät stereoskooppista elokuvaprojektiota, stereoääntä, tuntopalautetta ja jopa hajuja, luodakseen käyttäjän ympärille illuusion keinotekoisesta maailmasta. Kyseiset installaatiot eivät kuitenkaan hyödyntäneet tietotekniikkaa, vaan olivat puhtaasti mekaanisia laitteita. Esimerkki Heilingin Sensoramaksi

ristimästä laitteesta kuvassa 2. Mekaanisina kokoonpanoina Heilingin laitteilla oli vähän hyödyllisiä sovelluskohteita, ja virtuaalitodellisuuden kehityksen voidaankin nähdä alkaneen vasta kun tietokonetta ryhdyttiin käyttämään synnyttämään illuusioita kolmiulotteisista synteettisistä maailmoista.



Kuva 2. Morton Heilingin kehittämä elämysinstallaatio, "Sensorama".

Esittämänsä vision lisäksi Sutherland toimi myös virtuaalitodellisuusteknologian kehityksen pioneerina toteuttaen ensimmäisen stereoskooppisen näyttöjärjestelmän MIT:ssä opiskelevan Bob Sproullin kanssa vuonna 1968 [Sut68]. Näyttöjärjestelmä käytti kahta viivagrafiikkaa piirtävää CRT-monitoria, joiden kuvat heijastettiin käyttäjän silmien eteen silmikkonäytöksi (engl. head mounted display, HMD), kuva 3.



Kuva 3. Sutherlandin ja Sproullin kehittämä ensimmäinen silmikkonäyttö.

Termiä ”virtuaalitodellisuus” ryhdyttiin aktiivisesti käyttämään 80-luvulla. Huolimatta termin yleisestä käytöstä, sen yksiselitteinen määrittely on ollut pitkään kiistanalaista. Kirjassaan *Virtual Reality Technology*, sen kirjoittajat Burdea ja Coiffet esittävät muutamia lähtökohtia virtuaalitodellisuuden määrittelylle [BuC03]. Heitä mukaillen, virtuaalitodellisuus tarkoittaa tietokoneen avulla luotua synteettistä maailmaa, jossa käyttäjä kokee olevansa läsnä ja jonka kanssa käyttäjä on vuorovaikutuksessa. Olennaista on juuri käyttäjälle luotu illuusio läsnäolosta osana keinotekoisia maailmaa, mitä usein voidaan vahvistaa yhtäaikaaisesti käyttämällä useita aistikanavia keinotekoisien maailman esittämiseen: näköä, kuuloa, tuntoa ja jopa hajua ja makua. Uskottavan illuusion luominen ja esittäminen vaatii monien tekniikan osa-alueiden yhdistämistä. Käyttäjän paikan ja erityisesti pään sijainnin seuranta, stereoskooppisen kuvan muodostavia näyttöjä, kolmiulotteisissa tilassa toimivia syöttölaitteita, tilaääntä jne. käytetään usein osina virtuaalitodellisuusjärjestelmien teknistä kokoonpanoa.

Virtuaalitodellisuuteen liittyvän tekniikan kehitys on ollut aktiivista 80-luvulta lähtien. Virtuaalitodellisuuden vaatimista tekniikoista kolmiulotteisen tietokonegrafiikan menetelmät ja tehokkuus ovat kehittyneet huimaavinta vauhtia ja tulleet osaksi jokaisen arkielämää. Harva meistä voi välttyä törmäämästä kyseisen teknologian avulla luotuihin mainoksiin, elokuvien erikoisefekteihin tai tietokonepeleihin päivittäin. Myös äänentoiston tekniikka on kehittynyt ja yhä useammasta kodista löytyy kaiutinjärjestelmiä, jotka voivat luoda kuuntelijan ympärille kolmiulotteisen äänimaiseman. Useamman vapausasteen syöttölaitteet ovat myös alkaneet aivan äskettäin yleistymään kulutuskäytössä esim. Nintendon Wii –pelikonsolin myötä.

Päälle puettaville silmikkonäytöille ja CRT-monitoreille vaihtoehtoisena stereoskooppisen esityksen mahdollistavana näyttölaitteistona esiteltiin vuonna 1993 CAVE-tila [CSD93]. CAVE-tilassa käyttäjää ympäröi useat suuret näyttöpinnat, joille kuva heijastetaan projektoreiden avulla, kuten kuvassa 4 nähdään. Käyttäjä voi liikkua vapaasti näyttöjen rajaamassa tilassa, ja hänen pään sijaintinsa perusteella näytön kuvia muokataan siten, että käyttäjä näkee tietokoneen esittämät virtuaaliset objektit kuin ne olisivat hänen kanssaan läsnä samassa tilassa. CRT-monitorilla ja CAVE-tilassa stereoskooppinen kuva muodostetaan käyttäjän pukemien suodatinlasien avulla. Suodatinlasit erottavat samalta näytöltä erilliset, hieman eri katselukulmista piirretyt kuvat käyttäjän vasemmalle ja oikealle silmälle. Silmikkonäytöissä on erilliset näyttöpinnat käyttäjän molemmille silmille. 2000-luvulla on esitelty myös autostereoskooppisia näyttöjä, jotka pystyvät muodostamaan stereoskooppisen kuvan ilman suodatinlaseja. Eräänä stereoskooppisena näyttötekniikkana suoraan käyttäjän verkkokalvolle piirtäviä laitteistoja on kehitetty 90-luvulta lähtien [Kol93], mutta sovelluskäyttöön kyseinen tekniikka ei ole vielä tullut. Yleisesti ottaen stereoskooppiset näytöt ovat edelleen varsinaisen laajalle levinneen kulutuskäytön ulkopuolelle, osittain korkeiden kustannusten ja osittain epätoivottavien sivuvaikutusten vuoksi [BKL05].



Kuva 4. CAVE-tilan kokoonpano

Visuaalisen palautteen lisäksi monissa virtuaalitodellisuuden sovelluksissa virtuaalimaailman kappaleita vastaavan tuntopalautteen tarjoaminen olisi käytettävyyden kannalta hyödyllistä. Haptiset, eli tuntopalautteen tarjoavat palautelaitteet pystyvät tällä hetkellä parhaimmillaankin tarjoamaan käytettävyyden ja toiminta-alueen puolesta hyvin rajoittuneita ratkaisuja. Yksittäisen pinnan pisteen törmäystarkasteluun perustuvat pienellä alueella toimivat varrelliset 3D osoitinlaitteet, kuten esimerkiksi esim. Sensable technologiesin valmistamat Phantom-laitteet ovat siirtyneet tutkimuskäytöstä kulutuskäyttöön. Laajemmalla alueella toimivat tai kattavamman

tuntopalautteen, kuten esim. koko käden, tarjoavat laitteet ovat pääsääntöisesti vielä liian kömpelöitä tarjotakseen sovelluskäyttöön kelvollisia ratkaisuja [JVG01 ja BKL05].

Nykyiset seurantajärjestelmät pystyvät tyydyttävästi seuraamaan yksittäisten pisteiden tai muutamien sormien sijaintia ja orientaatiota, mutta kaikilla nykyisesti yleisesti käytetyillä menetelmillä on omat rajoitteensa. Parhaissa tarjolla olevissa tuotteistetuissa ratkaisuissa myös niiden korkea hinta rajoittaa käyttöä.

Muutamien tekniikoiden yleistymisestä huolimatta virtuaalitodellisuus kokonaisuudessaan on jäänyt varsinaisen kulutuskäytön ulkopuolelle. Frederick Brooks toteaa 1999 julkaistussa virtuaalitodellisuuden tilaa laajasti kartoittaneessa artikkelissaan, että virtuaalitodellisuus toimii, mutta vain juuri ja juuri. Virtuaalitodellisuus ei artikkelin kirjoittamisen aikaan, vuonna 1999 ollut vielä osa arkitodellisuutta ja nykyinen tilanne on edelleen sama. Monien virtuaalitodellisuuden kannalta olennaisten tekniikoiden kehitys jatkuu edelleen, eikä läpimurtoa kulutuskäytön puolelle ole vielä saavutettu. Lisää tutkimusta ja kehitystyötä tarvitaan mm. tuntopalautteen tuottavien laitteiden, seurantajärjestelmien ja uusien näyttötekniikoiden saralla.

Virtuaalitodellisuuteen liittyvän tekniikan lisäksi myös sen soveltaminen sisältää monia toistaiseksi avoimia kysymyksiä. Virtuaalitodellisuustekniikka kyllä sovelletaan aktiivisesti simulaattoreissa ja visualisoinnissa, jotka olivat jo varhaisen kehityksen vauhdittajia, mutta näiden lisäksi muu hyödyntäminen on jäänyt ennemminkin yksittäisten tapausten varaan, kuin laaja-alaisesti [Bro99 ja BFK05].

2.3 Kolmiulotteiset käyttöliittymät

Nykyisin tietokoneen käyttäjille tutuimmat syöttö- ja palautelaitteet koostuvat hiirestä, näppäimistöstä ja kaksiulotteisen kuvan piirtävästä näytöstä. Virtuaalitodellisuuteen kiinteästi liittyvät kolmiulotteiset käyttöliittymät perustuvat syöttö- ja palautelaitteisiin, jotka tarjoavat aidosti kolmiulotteisen palautteen, sekä useamman vapausasteen mukaisen syötteen.

Kolmiulotteisten käyttöliittymien yhteydessä usein käytetty, muttei välttämätön, aidosti kolmiulotteinen näkymä perustuu hieman toisistaan poikkeavien kuvien esittämiseen käyttäjän eri silmille. Kolmiulotteisen, eli stereoskooppisen kuvan muodostuminen vaatii käyttäjän eri silmille esitettyjen kuvien poikkeaman vastaavan mahdollisimman hyvin käyttäjän silmien välistä

etäisyyttä. Edellisessä luvussa 2.2. käytiin lyhyesti läpi erilaisia stereoskooppisen kuvan mahdollistavia näyttötekniikoita.

Yleisesti syöttölaitteiden toimintaa kuvataan niiden tarjoamien vapausasteiden (engl. degrees of freedom, DOF) lukumäärällä. Perinteinen hiiri, jolla syöte annetaan kaksiulotteisen tason koordinaatteina, tarjoaa kaksi vapausastetta. Kolmiulotteisten käyttöliittymissä käytetyt syöttölaitteet tunnistavat usein joko syöttölaitteen sijainnin, tai sijainnin ja asennon. Pelkkä syöttölaitteen sijainnin tunnistus tarjoaa kolme vapausastetta, yhden kutakin kolmiulotteisen avaruuden akselia kohti, eli kyseessä on 3 DOF syöttölaite. Syöttölaitteilla, jotka tunnistavat paikan lisäksi myös syöttölaitteen asennon, saadaan kolme vapausastetta lisää, yksi vapausaste jokaista kolmiulotteisen akseliston mukaista rotaatiota kohden, jolloin laite on 6 DOF. Yleisesti useamman vapausasteen tarjoavilla syöttölaitteilla tarkoitetaan normaalin hiiren ja näppäimistön mahdollistamaa 2 DOF ja 1 DOF syötettä useamman vapausasteen tarjoavia kolmiulotteisesti toimivia syöttölaitteita.

Edellä kuvattujen useamman vapausasteen tarjoavien syöttölaitteiden ja stereoskooppisten näyttölaitteiden käytön myötä myös käyttöliittymien vuorovaikutusmalli muuttuu. Nykyisin vallalla oleva käyttöliittymämalli, joka perustuu ikkunoiden, kuvakkeiden, valikkojen ja osoittimen (engl. windows, icons, menus and pointers, WIMP) käyttöön, ei sovellu käyttöön kolmiulotteisessa toimintaympäristössä. Kolmiulotteisille käyttöliittymille on etsitty WIMP-mallin tavoin yleisiä käyttöliittymämalleja, ja tutkimuksen piirissä erilaisten mallien mukaisia prototyypppejä onkin esitetty ja testattu laajasti. WIMP-mallia vastaavaa yleisesti hyväksyttyä yksittäistä käyttöliittymämallia ei kolmiulotteisille käyttöliittymille ole kuitenkaan ainakaan vielä syntynyt.

2.4 Virtuaalitodellisuusavusteinen suunnittelu

Virtuaalitodellisuuden on useissa yhteyksissä uskottu voivan tehdä kolmiulotteisesta suunnittelutyöstä nopeampaa ja helpompaa. Usko on johtanut virtuaalitodellisuusteknologiaa soveltavaan tutkimukseen tietokoneavusteisen suunnittelun tehtävien parissa.

Termi ”virtuaalitodellisuusavusteinen suunnittelu” toimii yhteisenä nimittäjänä alalle, jossa virtuaalitodellisuusteknologiaa ja kolmiulotteisia käyttöliittymiä sovelletaan eri muodoissaan kolmiulotteisten kappaleiden ja pintojen muotoiluun. Tässä yhteydessä

virtuaalitodellisuusteknologian ajatellaan kattavan kaikki laitteistokokoonpanot ja käyttöliittymät, joissa käyttäjä näkee ja käsittelee kappaletta ainakin joiltain osin suoraan kolmiulotteisesti. Käyttöliittymä voi esimerkiksi hyödyntää CAVE-tyyppistä installaatiota ja olla varustettu monipuolisella optisella seurannalla, tai toisaalta, käyttöliittymä voi toimia tietokonepäätteellä, jossa käyttäjä näkee muotoiltavan kappaleen kaksiulotteisena tavallisella monitorilla, mutta muotoilu tapahtuu useamman vapausasteen tarjoavan syötelaitteen avulla. Yhteistä kaikille tämän alueen järjestelmille on se, että ne pyrkivät saamaan käyttäjän tuntemaan kuin hän käsittelee suoraan aidosti kolmiulotteista kappaletta. Järjestelmät pyrkivät tarjoamaan suuremman yhteyden muotoiltavaan kappaleeseen kuin työskenneltäessä perinteisen hiirestä, näppäimistöstä ja näytöstä koostuvan ja WIMP-mallia hyödyntävän käyttöliittymän ”lävitse”.

Suurin osa tällä alueella tapahtuvasta tutkimuksesta on keskittynyt prototyyppilähtöiseen tutkimukseen, jossa virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun tarkoitetun järjestelmän rakentamisen ratkaisut ovat niitä esittelevien julkaisujen merkittävintä antia. Näissä julkaisuissa käyttäjätestaukseen perustuva käytettävyyden mittaaminen ja analysointi ovat sivuroolissa. Prototyyppilähtöinen tutkimus on sinänsä arvokasta, mutta se ei yksistään riitä vastaamaan kysymyksiin ”voiko virtuaalitodellisuusteknologia helpottaa tietokoneavusteista suunnittelua?” tai ”mitä hyötyä virtuaalitodellisuusavusteinen suunnittelu voi tarjota?”. Näihin tutkimusalan kannalta perustavaa laatua oleviin kysymyksiin vastaaminen vaatii käytettävyydetutkimusta, jolla voidaan osoittaa uusien ratkaisujen paremmuus, sekä selvittää miten uudet käyttöliittymät vaikuttavat käytettävyyteen ja käyttökokemukseen, ja mitkä tekijät edellä mainittuihin seikkoihin vaikuttavat.

Seuraavassa luvussa esitellään tärkeimpiä virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyyppilähtöisen tutkimuksen tapauksia ja tuloksia. Luvussa 4 esitellään puolestaan alaan liittyvää käytettävyydetutkimusta.

3 Prototyyppilähtöinen tutkimus

Esiteltävä virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun liittyvä tutkimus on jaettu tutkimuksen painopisteen mukaan prototyyppilähtöiseen tutkimukseen ja käytettävyystudkimukseen. Tutkimuksen jakaminen näihin kahteen luokkaan ei ole kaikissa tapauksissa yksiselitteistä, raja prototyyppilähtöisen ja käytettävyystudkimuksen välillä on joissakin tapauksissa häilyvä. Prototyyppilähtöisenä tutkimuksena esitellään selkeästi konstruktiiivisen tutkimuksen piiriin kuuluvat tapaukset, joissa painotus on enemmän menetelmän tai järjestelmän rakenteellisten ratkaisuiden esittelyssä, kuin käytettävyyden mittaamisessa systemaattisin menetelmin. Konstruktiiivisessa tutkimuksessa tavoitteena on relevantin käytännön ongelman ratkaisu luomalla uusi konstruktio, ja konstruktion suunnittelua ja toteutusta pidetään mielenkiintoisina jo sinänsä.

Tässä luvussa esitellään virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyyppilähtöisen tutkimuksen tuloksia, sekä esitetään tulosten analyysia. Tutkimusalan kannalta merkittävät tapaukset esitellään kronologisessa järjestyksessä, jokaisen merkittävän tapauksen muodostaessa oman alilukunsa. Tapaukset on ryhmitelty aikakausien mukaan kolmeen lukuun. Aliluvussa 3.5 esitellään prototyyppijärjestelmää, jonka suunnitteluun ja toteutukseen tämän tutkielman kirjoittaja on osallistunut. Viimeisenä alilukuna on yhteenveto prototyyppilähtöisen tutkimuksen kautta saavutetuista tuloksista, sekä kirjoittajan huomioita ja pohdintaa niihin liittyen. Tulosten ja huomioiden perusteella viimeiseen alilukuun on koostettu lista huomioista ja tekijöistä, jotka prototyyppilähtöinen tutkimus on nostanut esiin, ja joihin uusia prototyyppijä suunniteltaessa kannattaa varautua.

3.1 Ensimmäinen virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyyppi

Ensimmäinen virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun tarkoitettu prototyyppijärjestelmä kehitettiin Utahin yliopistossa vuonna 1976. Prototyypin esittelevässä artikkelissaan James H. Clark kuvaa toteuttamansa kolmiulotteisten pintojen muotoiluun tarkoitetun järjestelmän [Cla76]. Kyseisellä järjestelmällä käyttäjä pystyi tarkastelemaan muotoiltavaa pintaa stereoskooppisesti Sutherlandin ja Sproullin kehittämän silmikkonäytön (ks. luku 2.2) avulla. Käyttäjä pystyi muotoilemaan yksinkertaisia vapaamuotoisia pintoja osoittamalla ja siirtelemällä pinnan osia mekaanisesti seuratus 3 DOF osoitinlaitteen avulla.

Prototyyppijärjestelmä soveltui yksistään vapaamuotoisten parametrinen pintojen muotoiluun. Käyttäjälle pinnat näkyivät sarjana jatkuvia spline-käyriä, joita käyttäjä pystyi muokkaamaan reaaliaikaisesti. Pintojen suoraikäyttöinen muotoilu kolmessa ulottuvuudessa toimivan syöttölaitteen avulla oli jo sinänsä merkittävä parannus sen aikaisiin suunnitteluohjelmistoihin. Raportin kirjoittamisen aikaiset pintojen muotoiluun tarkoitetut ohjelmistot vaativat käyttäjältä pintojen matemaattisten ominaisuuksien ymmärrystä, pinnan muotoilun tapahtuessa pintojen parametriarvoja numeerisesti syöttäen.

Clark vertasi kehitetyn kolmiulotteisen käyttöliittymän etuja kaksiulotteisia syöttölaitteita hyödyntäviin käyttöliittymiin ja näki erityisenä hyötynä sen, ettei kolmiulotteista käyttöliittymää käytettäessä tarvittu useampaa yhtäaikaista näkymää muotoiltavaan kohteeseen. Reaaliaikaisuus oli kova vaatimus piirrettävän grafiikan laskennalle, mistä johtuen järjestelmä soveltui vain hyvin yksinkertaisten pintojen käsittelyyn.

Prototyyppijärjestelmän avulla saavutetuista tuloksista Clark pitää uutta vuorovaikutusmallia tärkeimpänä. Huolimatta järjestelmän kömpelöstä näyttö- ja syöttölaitteistosta uusi vuorovaikutusmalli soveltui hänen mukaansa vapaamuotoisten pintojen muotoiluun huomattavasti paremmin kuin muut sen hetkisten CAD-ohjelmistojen menetelmät. Vaikkakaan tätä väitettä ei julkaisun puitteissa formaalisti verifioida, on helppo uskoa, että ajalla jolloin tietokoneiden tarjoamien käyttöliittymien kehitys kokonaisuudessaan oli vielä lasten kengissä, mahdollisuus nähdä ja muotoilla kolmiulotteisia kappaleita kuin osana ympäristöä ja toimien luonnollisesti kappaleita koskettaen on ollut vaikuttava kokemus. Clarkin prototyyppijärjestelmän voi nähdä samalla tavoin visionäärisenä ja aikaansa edellä kuin Sutherlandin esittämän SKETCHPAD-ohjelman (ks. luku 2.1). Clarkin prototyyppi sisälsi monia kolmiulotteiseen muotoiluun liittyviä uusia konsepteja, kuten suoraikäyttöisen muotoilun, stereoskooppisen piirron ja kolmiulotteisen syötteen.

Prototyypin puutteina ja merkittävimpänä jatkokehitystarpeina Clark nosti esille syöttö- ja näyttölaitteiden rajoitteet. Clarkin näkemyksen mukaan syöttö- ja näyttölaitteista tulee kehittää vähemmän toimintaa rajoittavia, ennen kuin esittelystä järjestelmästä voi tulla vartenotettava työkalu suunnittelijoille. Tähän päivään asti virtuaalitodellisuusjärjestelmien syöttö- ja näyttölaitteiden rajoitteet ovat pysyneet ongelmina, joita ei ole täysin pystytty ratkaisemaan, joten Clarkin väitettä ei ole voitu osoittaa täydellisesti oikeaksi tai vääräksi. Laitteistojen puutteiden lisäksi jatkokehitystarpeena mainitaan joustavampi pintojen esitysmuoto, joka sallisi

monimutkaisempien ja useammasta osasta koostuvien pintojen määrittelyn. Käyttöliittymän osalta suunnittelijalle tulisi olla mahdollista rajoittaa pinnan muokkausta ajoittain tapahtumaan vain yksittäisen avaruuden akselin suuntaisesti. Clark toteaa käytännön osoittaneen, ettei useamman vapausasteen suhteen täysin vapaa käsittely sovi kaikkiin tilanteisiin. Järjestelmän tarjoamien työkalujen osalta Clark toteaa niiden olevan liian rajoittuneita, ja ennakoii, että täysin uusi valikoima työkaluja on tarpeen. Puutteista huolimatta Clark uskoi järjestelmän olevan jopa sen laitteistokustannukset huomioiden tehokkaampi ja parempi tapa muotoilla kolmiulotteisia pintoja kuin käyttäen kaksiulotteista käyttöliittymää. Optimistisuudestaan huolimatta Clark ei ilmeisesti jatkanut järjestelmän kehittämistä pidemmälle, ainakaan siihen liittyen ei ole löydetty uudempiä julkaisuja.

3.2 Tutkimuksen ensiaskeleita

Huolimatta Clarkin näkemyksestä järjestelmänsä hyödynnettävyydestä, hänen kehittämänsä prototyyppijärjestelmää ei jatkokehitetty muidenkaan toimesta, eikä se synnyttänyt uutta tutkimusta muiden virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun työkalujen kehittämiseksi. Seuraavat kirjallisuudessa esitellyt prototyyppilähtöiset tapaukset löytyvät vasta 80-luvulta. Kokonaisuudessaan virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyyppilähtöinen tutkimus on ollut melko vähäistä aina 90-luvulle saakka. Virtuaalitodellisuuteen liittyvä tutkimus painottui 80-luvulla enemmän laitteistojen kehittelyyn kuin teknologian soveltamiseen. Kyseisellä jaksolla visualisointi ja simulaatiot olivat sovellusalueina merkittävimmät kiinnostuksen kohteet. Kyseiseltä ajanjaksolta löytyy vain muutama julkaisu virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun suunnatuista prototyyppijärjestelmistä.

3.2.1 Schmandin prototyyppijärjestelmä

Schmandt esittelee 1983 julkaistussa artikkelissaan [Sch83] kolmiulotteiseen piirtämiseen ja kappaleiden muotoiluun kehitetyn työpöytäympäristöön tarkoitetun kokoonpanon. Kyseisessä laitteistossa CRT-näytön kuva heijastettiin työpöydän yllä olevaan puolihopeoituun lasiin, joka peilasi monitorin kuvan käyttäjälle, ja samalla salli näkymän lasin läpi työpöydälle, kuvan 5 mukaisesti. Monitorin kuvasta muodostettiin stereoskooppinen aktiivisten suljinlasien avulla. Magneettiseurantalaitteen avulla käyttäjä ohjasi kolmiulotteista osoitinta pöydän ja puoliheijastavan pinnan välisessä tilassa. Prototyyppiä esiteltiin testatun kolmiulotteiseen

piirtämiseen, kappaleiden kulmapisteiden sijoitteluun ja datan visualisointiin tarkoitetuilla sovelluksilla.



Kuva 5. Schmandin prototyypilaitteiston kokoonpano

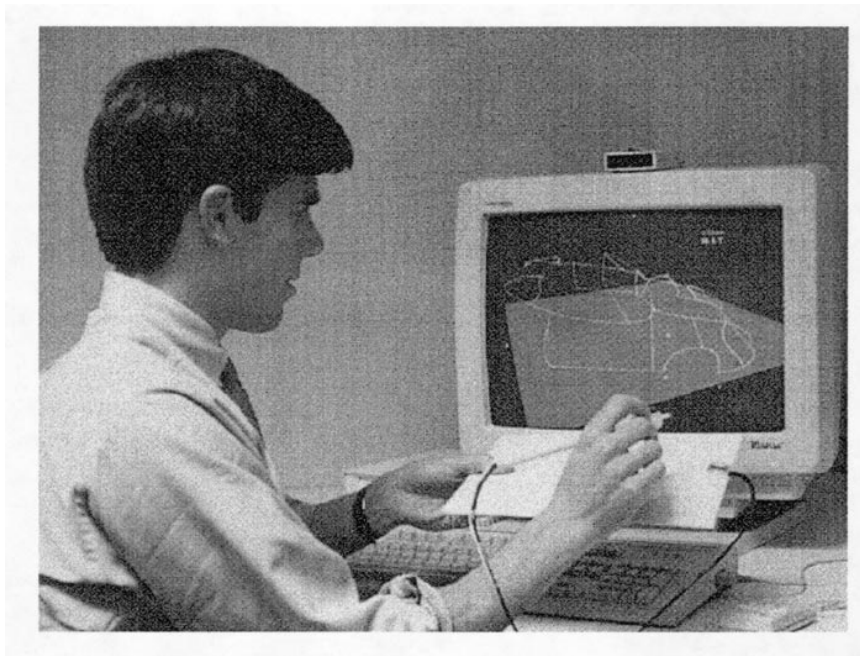
Prototyypin kehityksen tavoitteena oli ollut sen soveltaminen todellisiin käyttötarpeisiin. Schmandt nostaakin esille monia käytettävyyttä heikentäneitä tekijöitä, jotka kolmiulotteisen työskentelyn uutuuden viehätyksen jälkeen osoittautuvat merkittäviksi ongelmiksi. Selkeimpinä ongelmina hän luettelee kolmiulotteisen osoitinlaitteen paikantamiseen käytetyn magneettisen seurannan epätarkkuuden, syvyysulottuvuuden hahmottamisen vaikeuden ja yleisen työskentelyn hankaluuden.

Käytettävyyden kannalta merkittäviä tuloksia olivat syvyyden hahmottamiseen ja työskentelyn ongelmiin liittyvät huomiot. Syvyyden riittävän tarkan havainnoinnin todettiin olevan erittäin vaikeaa stereoskooppisesta näytöstä huolimatta, muiden tärkeiden syvyysvihjeiden, kuten esim. varjojen, tekstuureiden ja liikeparallaksin puuttuessa. Syvyyshahmottamisen puutteiden lisäksi käden epätarkkuus työskenneltäessä täysin vapaasti kolmessa ulottuvuudessa nousi merkittäväksi ongelmaksi. Ongelmien vähentämiseksi järjestelmän vapaasti kolmessa ulottuvuudessa toimiva syöttölaite vaihdettiin testauksen edetessä tavalliseen 2 DOF piirtoalustaan. Piirtoalustalla käyttäjä pystyi siirtämään muotoiltavan kappaleen sijoittelua suhteessa piirtotasoon ja pääsi näin käsittelemään kappaleen eri alueita.

3.2.2 3-Draw

Emanuel Sachs, David Stoop ja Andrew Roberts kehittivät 80-luvun lopussa 3-Draw nimellä esitellyn kolmiulotteista käyttöliittymää hyödyntävän piirtojärjestelmän [SSR89, SRS91]. Esitellyn järjestelmän avulla käyttäjä pystyi piirtämään kolmiulotteisista viivoista muodostavia rautalankamalleja. Piirtäminen tapahtui kynän ja piirtoalustan avulla, joiden paikkaa ja asentoa seurattiin 6 DOF magneettiseurannan avulla, kuten kuvasta 6 näkyy.

Käyttöliittymä sisälsi toiminnallisuuksia, joiden avulla käyttäjä pystyi tarkasti asettelemaan piirrettyjä viivoja ja määrittelemään tarpeellisia rajoitteita piirron aikana. Näiden toiminnallisuuksien avulla pystyttiin ilmeisesti minimoimaan käden epätarkkuuden ja syvyysulottuvuuden hahmotuksen aiheutumat ongelmat, ainakaan niitä ei julkaisuissa mainita. Sachsin ja kumppaneiden kehittämä prototyyppi oli ensimmäinen muotoilun tehtäviin tarkoitettu kaksikäsinen käyttöliittymä. Prototyypin esittelevässä julkaisussa tuloksina mainitaan järjestelmän olevan luonnollinen ja nopea käyttää. Verrattuna sen aikaisiin tietokoneavusteisiin kolmeulotteisiin piirto-ohjelmiin, todetaan, ettei mikään niistä tarjonnut vastaavaa käytön yksinkertaisuutta ja tehokkuutta. Järjestelmän toimivuutta ei ole kuitenkaan arvioitu minkään systemaattisen käyttäjätestauksen avulla.



Kuva 6. Käyttäjä piirtää rautalankamallia 3-Draw prototyypillä.

3.3 Prototyyppilähtöinen tutkimus 90-luvulla

Virtuaalitodellisuusavusteinen suunnittelu muuttui aktiiviseksi tutkimusalaksi 90-luvulla, PC- ja virtuaalitodellisuuslaitteistojen yleistyessä, sekä virtuaalitodellisuuden noustessa yleisen kiinnostuksen kohteeksi. Raportoidun tutkimuksen valossa näyttää, että 90-luku on ollut virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun saralla prototyyppilähtöisen tutkimuksen kulta-aikaa. Tältä ajanjaksolta löytyy monia raportoituja prototyyppijärjestelmiä, sekä prototyyppilähtöisen tutkimuksen myötä syntyneitä uusia vuorovaikutuksenmalleja ja käyttöliittymämetaforia.

90-luvulla tehdyn prototyyppilähtöisen tutkimuksen aikana voidaan nähdä kiinnostuksen painopisteen siirtyneen virtuaalitodellisuuden tekniikan kehityksestä sen soveltamiseen. Virtuaalitodellisuuden tutkimuksen yleistyessä myös kiinnostus sen soveltamiseen suunnittelun apuvälineenä kasvoi.

90-luvulla prototyyppijärjestelmien kehitystä tuki myös näyttö- ja syöttölaitevalikoiman monipuolistuminen. Kokonaisuudessaan tutkimuksessa kuvastuu usko kolmiulotteisten käyttöliittymien nopeaan yleistymiseen ja siihen, että ne tulevat pian kilpailemaan perinteisten 2D käyttöliittymien kanssa monissa tehtävissä. 90-luvun loppuun mennessä esim. monet isot autoteollisuuden yritykset olivat kiinnostuneita soveltamaan virtuaalitodellisuusteknologiaa tuotekehitysprosesseissaan, kuten muutamista tässä luvussa esittelyistä prototyypeistä nähdään.

3.3.1 3DM

Butterworthin ja kumppanit esittelevät 1992 julkaisemassaan artikkelissa [BDH92] 3DM prototyyppijärjestelmän. 3DM on ensimmäinen virtuaaliympäristössä tapahtuvaan suunnitteluun tarkoitettu prototyyppi, jossa pyrittiin vastaamaan kokonaisvaltaisesti suunnittelun tarpeisiin. Prototyypin tavoitteena oli tarjota monipuolisen työskentelyn mahdollistava, riittävän laaja työkaluvalikoima. Käyttöliittymän ja työkalujen suunnittelun innoittajana oli 2D piirto-ohjelmissa yleistynyt piirtämiseen ja maalaamiseen tarkoitettu suorakäyttöinen työskentelymalli. Prototyypissä pyrittiin kehittämään vastaavaa suorakäyttöisyyttä CAD-työskentelyyn. Suorakäyttöisyyden toivottiin korjaavan kaksiulotteisen syöttö- ja näyttölaitteiston aiheuttamia rajoitteita muotoilun tehtävissä. Kaksiulotteisen käyttöliittymän merkittävimpänä rajoitteena prototyypin kehittäjät näkivät ristiriidan kaksiulotteisen syötteen ja kolmiulotteisen työskentelyn kohteen välillä, ja lisäksi kaksiulotteisen näytön aiheuttaman kolmiulotteisten muotojen hahmottamisen vaikeuden. Edellä mainittujen rajoitteiden merkittävyyden tueksi kirjoittajat

viittaavat Frederick Brooks'n oivalliseen artikkeliin [Bro88], jossa hän hahmottelee virtuaalitodellisuuden tutkimuksen tulevaisuutta ja kuvaa kokemuksia Pohjois-Carolinan yliopistossa toteutettujen prototyyppien kehityksestä.

3DM prototyyppijärjestelmä käytti silmikkonäyttöä ja syöte annettiin 6 DOF osoitinlaitteella joka perustui magneettiseuranata. Järjestelmä tarjosi käyttäjälle mahdollisuuden muotoilla polygonigeometriaa siirtelemällä ja lisäämällä kulmapisteitä, sekä lisäämällä uusia polygoneja vetämällä niitä esille aiemmista polygoneista (engl. extrude). Käyttäjä pystyi myös luomaan geometrisia peruskappaleita, kuten palloja, kuutioita jne. ja siirtelemään ja skaalaamaan kokonaisia kappaleita tai osia niiden kulmapisteistä. Käyttäjä pystyi myös yhdistelemään ja erottelemaan kappaleita uusiksi kappaleiksi. Käyttäjän suorittamat muokkausoperaatiot tallennettiin, ja käyttäjän oli mahdollista perua ja suorittaa operaatioita uudelleen.

Erityisesti uutena käyttöliittymän ideana kirjoittajat ovat maininneet ennakoivan valintojen korostuksen, eli osoittimen ollessa jonkin valittavissa olevan kohteen lähellä, kyseinen kohde korostetaan vaihtamalla sen piirtotapaa. Kyseinen toiminto antoi vihjeen käyttäjälle, mihin valittava toiminto kohdistuu ja selkeytti kolmiulotteisuuden hahmotusta.

Tärkeimpinä tutkimuksen tuloksina esitellään huomioidut kolmiulotteisen työskentelyn eduista useamman mallinnustoiminnallisuuden yhdistämisen mahdollistavana tekniikkana. Esim. kappaleen sijoittelussa voi translaation ja rotaation yhdistää yhdeksi suoraan käden paikan ja asennon avulla annettavaksi komennoiksi. Artikkelin kirjoittajien mukaan operaatioiden yhdistäminen vähentää tarvittavien komentojen määrää, mikä puolestaan nopeuttaa työskentelyä. Toisena tuloksena artikkelissa esitetään huomio, jonka mukaan prototyypin vuorovaikutusmalli tekee työskentelyn ymmärtämisen kokemattomalle käyttäjälle helpommaksi. Huomioiden tueksi ei ole kuitenkaan tehty systemaattista testausta tai vertailua suoritukseen muilla järjestelmillä.

3.3.2 JDCAD ja THREAD

Albertan yliopistossa virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun liittyvää prototyyppilähtöistä tutkimusta tehtiin 90-luvulla useammankin tutkijan toimesta ja tuloksena syntyi useampia prototyyppijärjestelmiä. Näistä ensimmäinen oli Liangin ja Greenin 1993 esittelemä JDCAD prototyyppijärjestelmä [LiG93].

JDCAD:in perusajatuksena oli tarjota kolmiulotteinen käyttöliittymä geometrisista peruskappaleista koottavien CSG -mallien rakenteluun. Prototyypin fyysinen kokoonpano perustui normaalin tietokonepääteen ja Bat-syöttölaitteiston yhdistelmään. Bat-syöttölaite oli käytännössä magneettiseurantalaitteen anturi, johon oli yhdistetty kaksi painokytintä. Anturi toimi näin 6 DOF hiirenä.

Kyseisessä JDCAD:in esittelevässä julkaisussa painotus on fyysisen kokoonpanon ja laitteistoon liittyvien teknisten ratkaisujen esittelyssä. Yhtenä merkittävänä kokoonpanoon liittyvänä seikkana julkaisussa tuotiin esille, miten JDCAD työpöytäkokoonpanona mahdollisti käyttäjälle kyynärpäiden tukemisen pöytään työskentelyn aikana, mikä puolestaan vähensi työskentelyn aiheuttamaa fyysistä rasitusta. Toinen merkille pantava seikka kyseisessä kokoonpanossa on stereoskooppisen näyttötekniikan puuttuminen. Kokoonpanossa käytettiin magneettiseuraa käyttäjän pään seurantaan ja sen avulla CRT-näytön ruudulle piirrettävän kuvan perspektiiviä muutettiin katselukulmasta riippuen samoin kuin stereoskooppisessa immersiiivisessä piirroksessa, mutta tässä tapauksessa piirrettiin vain monoskooppinen kuva. Julkaisussa tuodaan esille, että jo pelkästään pään seurannan avulla toteutuva liikeparallaksi antoi käyttäjälle melko hyvän syvyysvaikutelman. Ottaen huomioon silmikkonäyttöjen ja suljinlasien rajoitteet ja ergonomiset ongelmat, niiden avulla saavutettavan stereoskooppisuuden katsottiin julkaisussa olevan pienempi lisäarvo kuin niiden aiheuttamat haitat pitkäaikaisessa työskentelyssä. Osittain samoista syistä kokoonpanon rakenteessa oli hylätty datahanskojen käyttö. Datahanskojen epävarmat tulokset ja niiden käytön yleinen hankaluus tekivät niistä julkaisun kirjoittajien mielestä tarkoitukseen soveltumattomia. Kirjoittajat myös toteavat hanskojen rajoittavan rotaatioiden määrittelyä johtuen käden luonnollisista rajoituksista, fyysisen irrallisen syöttölaitteen taas mahdollistaessa rotaatioiden määrittelyn joustavammin.

Esitellyssä käyttöliittymässä kappaleiden muokkaus ja valinnat tapahtuivat käyttäen säteenseuranta menetelmää, jossa käyttäjän käsi ohjaa äärettömän pitkää sädettä, jolla käyttäjä voi valita eri etäisyyksillä olevia virtuaalisia kappaleita. Käden ja magneettiseurannan epätarkkuudesta johtuen yksittäisen kapean säteen vaatima käytön tarkkuus osoittautui ongelmalliseksi. Ongelman korjaamiseksi seurattu säde muutettiin keilan muotoiseksi valinta-alueeksi. Näin valinta saatiin toimimaan laajemmalla alueella ilman epätarkkuuden aiheuttamia ongelmia.

Tuloksista merkittävimpanä mainitaan, että kyseisellä järjestelmällä käyttäjät pystyivät rakentamaan kappaleita 5 – 10 kertaa nopeammin kuin joillakin, tarkemmin määrittelemättömillä, CAD-ohjelmilla. Pelkkä CSG-mallintaminen todetaan yksistään melko rajoittuneeksi menetelmäksi, ja vapaamuotoisten pintojen mallintaminen esitetään kiinnostavana jatkokehityksen suuntana. Kyseistä jatkokehitystä tehtiinkin ja se johti THREAD nimisen prototyypijärjestelmän kehitykseen samassa tutkimuslaitoksessa.

THREAD-prototyypijärjestelmä, jonka Shawn ja Green esittelivät [ShG94], perustui JDCAD-järjestelmän tavoin normaalin tietokonepääteen ja Bat-syöttölaitteen yhdistelmään. THREAD-prototyyppi käytti yhden sijasta kahta Bat-syöttölaitetta, ja kuten jo edellä mainittiin, prototyyppi keskittyi vapaamuotoisten pintojen muotoiluun.

THREAD-järjestelmä ei tarjonnut stereoskooppista kuvan muodostusta, eikä JDCAD:istä poiketen edes päänsurannan avulla toteutettua liikeparallaksia. Oletettavasti tämä ero johtui tutkimukseen käytetyn magneettiseurantalaitteiston antureiden määrästä. JDCAD:issä päänsurantaan käytetty anturi oli ilmeisesti otettu THREAD:issä toiseksi syöttölaitteeksi. Päänsurannasta olisi kenties ollut apua, sillä artikkelissa todetaan järjestelmällä muotoiltujen vapaamuotoisten pintojen kolmiulotteisen muodon hahmottamisen olleen vaikeaa. Artikkelissa kuvataan miten ongelmaa oli ratkaistu lisäämällä kuviollisia tekstuureita muotoiltaville pinnoille. Kuviot lisäsivät syvyysvihjeitä ja selkeyttivät pinnan kaartumisen ja kokonaismuodon hahmotusta.

Järjestelmän kaksikäsinen vuorovaikutusmalli oli toteutettu jakamalla käsin tehtävät epäsymmetrisesti. Motorisesti heikompi käsi (eli tyypillisesti vasen käsi) vastasi käyttöliittymän tilojen vaihdoista, muokkauskomentojen rajoitteiden asettamisesta ja muotoiltavan pinnan asettelusta kokonaisuudessaan. Motorisesti vahvempi, eli dominoiva käsi, hoiti muokattavien elementtien valinnan, muokkauksen ja pinnan polygonien jakamisen pienemmiksi polygoneiksi. Paperissa ei tarkemmin perustella kyseistä käsien välistä työnjakoa, tai kuinka juuri kyseiseen malliin päädyttiin. Myöskään kyseisen ratkaisun toimivuutta tai järjestelmän käytettävyyttä ei tarkemmin analysoida. Prototyypin jatkokehitystä pohdittaessa mainitaan monipuolisempien geometrian muokkaukseen tarkoitettujen työkalujen tarve ja muotoiluun tarjottavien rajoitteiden lisäys.

Molempien edellä kuvattujen prototyyppien kehittäjät ovat raportoineet yhdessä prototyyppien kautta saatuja kokemuksia ja näkemyksiään virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelujärjestelmän vaatimuksista erillisessä artikkelissaan [GLS95]. Konkreettisten järjestelmän vaatimusten lisäksi artikkelissa esitellään suunnitteluprosessin analyysia ja kirjoittajien laatimien prototyyppijärjestelmien kautta saavutettuja käyttökokemuksia. Suunnitteluprosessin analyysin ja käytännön kokemusten tukemana todetaan kolmiulotteisten käyttöliittymien soveltuvat hyvin vain osaan suunnittelutehtävistä. Näkemyksen mukaan monissa suunnittelutehtävissä perinteinen kaksiulotteinen käyttöliittymä on toimivampi. Artikkelissa todetaan erityisesti suunnittelun luonnosteluvaiheen, jossa suunnittelija kokeilee ja hahmottelee muotoja, olevan se osa suunnitteluprosessia, jossa kolmiulotteiset käyttöliittymät voivat tarjota selkeimmin lisäarvoa. Artikkelin kirjoittajat uskovat tältä osin virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun voivan kilpailla nykyisten työskentelytapojen, eli paperin ja kynän tai saven avulla tapahtuvan luonnostelun kanssa. Luonnostelemaan vaiheen lisäksi kirjoittajat näkevät suunnitteluprosessin myöhemmässä vaiheessa, saavutetun muodon tarkastelussa, kolmiulotteinen näyttötekniikka tehostavan työskentelyä.

Suunnittelun vaihe, jossa siirrytään yleisen muodon ja suurten linjausten hahmottelun jälkeen tekemään tarkempaa mallin yksityiskohtien toteutusta, julkaisun kirjoittajien mukaan käyttäjät pitävät 1 DOF ja 2 DOF syöttölaitteita parempina. Kyseiset syöttölaitteet tarjoavat rajoittuneemman ja tarkemman syötteen ja soveltuvat näin paremmin tarkkaan ja mekaaniseen työvaiheeseen.

Yhteisessä artikkelissaan JDCAD ja THREAD –prototyyppien kehittäjät listaavat virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun järjestelmille koostamansa yleiset vaatimukset, joihin he listaavat seuraavat neljä kohtaa:

1. Järjestelmän tulee menestyksekkäästi kilpailla parhaiden muotoilun menetelmien kanssa. Tässä kirjoittajat haluavat verrata digitaalisen muotoilun välinettä perinteisiin suunnittelun menetelmiin, eli myös paperin ja kynän tai saven avulla tapahtuvaan muotoiluun. Ajatuksena on, että tietokoneavusteisen järjestelmän tulisi olla vähintään yhtä nopea käyttää ja tarjota vähintään yhtä hyvä kolmiulotteisen muodon hahmotus.
2. Järjestelmän tulee tarjota täydellinen mallinnusmenetelmien valikoima. Kirjoittajien näkemyksen mukaan kirjoituksen aikaiset geometrisen muotoilun järjestelmät eivät tarjoa hyvää vuorovaikutusmallia kaikkiin geometrian määrittelyyn ja muotoiluun käytettyihin

menetelmiin. Sanoma tässä lienee se, että prototyypin tulee tarjota riittävän monipuolinen ja tehokas työkaluvalikoima ollakseen käyttökelpoinen todellisiin muotoilun tehtäviin.

3. Suunnittelijan tulee oppia ja pystyä käyttämään järjestelmää helposti. Järjestelmän tulisi olla niin intuitiivinen, että käyttäjä pääsee kiinni työskentelyyn hyvin nopeasti. Myös uusien ominaisuuksien oppiminen ja käyttöönotto tulisi olla helppoa.
4. Järjestelmän tulee toimia työkaluna suunnitelman erilaisten mahdollisuuksien tutkimiseen. Järjestelmän tulee mahdollistaa mallin nopea ja helppo muuttaminen, jolloin se soveltuu tehokkaaseen erilaisten ratkaisuvaihtoehtojen läpikäymiseen. Mikäli mallin luominen on liian kömpelöä ja muutokset vaativat paljon työtä, tulee järjestelmä ohjaamaan suunnittelijaa sitoutumaan ensimmäiseen toteutettuun hahmotelmaan, eikä luovalle työskentelylle jää sijaa.

3.3.3 HoloSketch

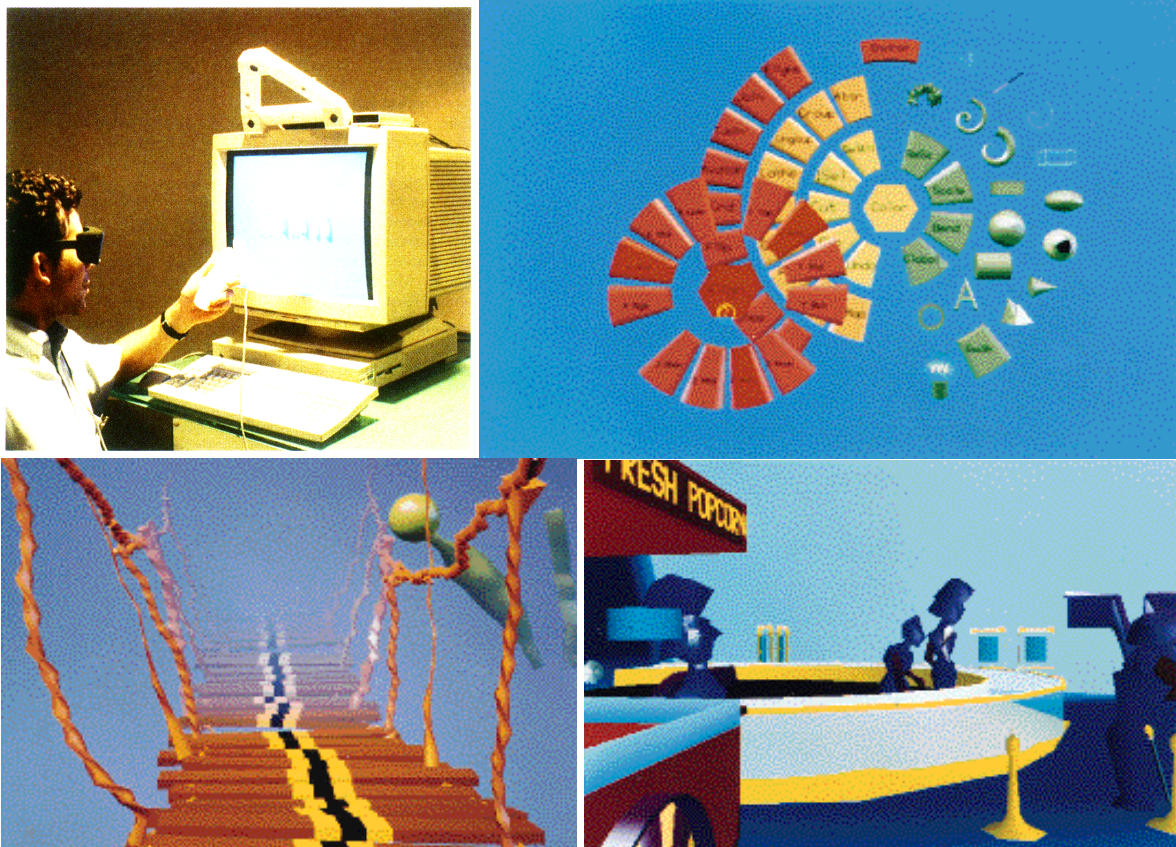
HoloSketch oli 90-luvulla yleisen virtuaalitodellisuushuuman vanavedessä syntynyt luovaan työskentelyyn tarkoitettu prototyyppi, jota kehitettiin ilmeisen suurella panostuksella Sun -yhtiön toimesta. Vaikkakaan suoranaisesti tavoitteena ei ollut kehittää tuotteistettavaa virtuaalitodellisuusavusteista suunnitteluohjelmaa, järjestelmän kehityksen eteen tehtiin paljon työtä ja sitä jatkettiin useita vuosia. HoloSketch pohjusti myös Sunin tekemää työtä tietokonegrafiikkaan tarkoitetun Java3D-ohjelmistorajapinnan kehityksessä [Dee08]. HoloSketch-prototyyppijärjestelmän yksityiskohtia on kuvattu Michael Deeringin kirjoittamissa artikkeleissa [Dee95 ja Dee96].

HoloSketch pohjautui stereoskooppisen kuvan muodostukseen tavalliselle CRT-näytölle aktiivisten suljinlasien avulla, sekä magneettiseurantaa käyttävään 6 DOF osoitinlaitteeseen. HoloSketch-prototyypin käyttämä laitteisto on nähtävissä kuvassa 7. Erityisesti järjestelmän teknisessä toteutuksessa stereoskooppisen kuvan muodostuksen tarkkuuteen oli kiinnitetty huomiota, mikä ilmenee Deeringin erillisestä artikkelista, joka käsittelee ainoastaan näyttöasetusten kalibrointia käytettäessä CRT-monitoria stereoskooppisen kuvan muodostukseen [Dee92]. HoloSketch-prototyyppiä esittelevissä julkaisuissa mainitaankin kirjoittajan kokemuksen mukaan saavutetulla tarkkuudella olevan suuri merkitys järjestelmän käytettävyyteen. Tarkkuus on saavutettu huomioimalla mahdollisimman kattavasti kaikki käyttäjän pään seurantaan ja stereoskooppisen kuvan muodostukseen vaikuttavat tekijät, kuten esim. näytön lasipinnan kaarevuus, sekä sen aiheuttama kuvapisteidien taittuminen riippuen katselukulmasta, silmien

katselupisteen siirtyminen pupillien liikkeen mukaan jne. Saavutetun tarkkuuden osoituksena mainitaan, että käyttäjän oli mahdollista mitata virtuaalisia kappaleita oikealla fyysisellä viivoittimella.

Kuten Butterworthin esittelemässä 3DM-ohjelmistossakin, oli myös HoloSketchissä käyttöliittymän ideana soveltaa piirto- ja maalausohjelmissa yleistyneen suorakäyttöisyyden mallia kolmiulotteisen geometrian muotoiluun. Toisin kuin 3DM, HoloSketch tähtäsi vielä enemmän työkaluihin, jotka pyrkivät jäljittelemään piirtämistä tai maalaamista kolmiulotteisessa avaruudessa.

Käyttöliittymän suunnittelu pohjautui huomiolle, jonka mukaan jotkin piirto- ja maalausohjelmien käyttöliittymien toiminnallisuudet olivat suoraan siirrettävissä myös kolmiulotteisiin käyttöliittymiin (esim. leikkaa - liimaa -toiminnallisuus) ja toisaalta jotkin käyttöliittymien ominaisuudet täytyi suunnitella kokonaan uudelleen (esim. valikot). Merkittävänä ongelmana nähtiin perinteinen käyttöliittymäelementtien sijoittelu näytölle. Käyttöliittymän valikot ja muut näytön reuna-alueille staattisesti sijoitetut elementit rajaavat aktiivisen työskentelyalueen kokoa. Deeringin mukaan työskentelyalueen pienuus muodostui entistä suuremmaksi ongelmaksi kun käytössä oli päänsurannan avulla toteutettu immersiiivinen stereoskooppinen kuvan muodostus. Ratkaisuna Deering esitti ”rengasvalikoiksi” nimeämänsä valikko rakenteen, joka oli työskentelyn aikana piilotettu ja ilmestyi ruudulle vain tarvittaessa. Esimerkki Deeringin kehittämästä rengasvalikosta kuvassa 7.



Kuva 7. HoloSketch prototyypin laitteistokokoonpano, ohjelmaan kehitetyt rengasvalikot ja muutama esimerkki ohjelmalla piirretyistä kolmiulotteisista maisemista.

Prototyypin käytön myötä osoittautui, että käyttäjät halusivat useampia vapausasteita hyödyntävän ohjauksen lisäksi usein myös rajoittaa käytössä olevia vapausasteita. Ratkaisuna ohjelmaan toteutettiin näppäinkomennot, joiden avulla käyttäjä pystyi määrittelemään vaikuttiko käyttäjän antama syötä esim. kappaletta liikuteltaessa kappaleen orientaatioon, lokaatioon vai molempiin yhtä aikaa.

Kappaleiden orientaation määrittelyyn liittyen tehtiin mielenkiintoinen havainto. Kappaleiden asentoa muutettaessa kääntopisteenä käytettiin aluksi kappaleessa kohtaa, josta käyttäjä oli kappaletta tarttunut. Käytännössä kuitenkin osoittautui, että käyttäjät odottivatkin kappaleiden pyörivän siten, että kappaleen keskipiste toimisi kääntymisen keskipisteenä. Tämä johti siihen, että prototyyppiä muutettiin siten, että kaikki kappaleiden orientaation muutokset tapahtuivat kappaleiden lasketun massan keskipisteen mukaisesti.

Deering mainitsee käytännön testauksen osoittaneen myös, että kolmiulotteisen syöttölaitteen pitkäaikainen käyttö rasitti kättä ja korosti käden luonnollista epätarkkuutta. Käytännön

kokemukset osoittivat, että osa epätarkkuudesta ja rasituksesta voitiin poistaa mahdollistamalla työskentelyasento, jossa käyttäjä pystyi pitämään kyynärpäitään tuettuna pöytätasolla. Rasitusta ja epätarkkuutta olisi Deeringin mukaan ollut edelleen mahdollista parantaa tarjoamalla tuki myös käyttäjän ranteille. Käytännössä toimivimmaksi ratkaisuksi osoittautui kuitenkin näppäinkomento, jonka avulla syötteen pystyi tilapäisesti skaalaamaan kymmenen kertaa todellista syöttölaitteen liikettä pienemmäksi. Deeringin mukaan ongelmat kolmiulotteisten muotojen piirrossa ja kappaleiden käsittelyssä saatiin syötteen skaalauksen avulla korjattua.

Julkaisussa esitellään myös käyttäjätestauksen kautta saatuja kokemuksia, vaikkei tulosten analysoinnissa käytetäkään mitään formaalia menetelmää. Deering huomauttaa käytännön osoittaneen, että toteutettaessa kolmiulotteinen käyttöliittymä todellisiin suunnittelutehtäviin vuorovaikutusmalli tulee kokonaisuudessaan muuttumaan niin paljon, että prototyypin käytön aloittaminen vaatii hieman opettelua. Deering ei pidä realistisena tavoitella niin intuitiivista käyttöliittymää, että käyttäjä voisi suoraan siirtyä tehokkaaseen työskentelyyn monimutkaisen kolmiulotteisten kappaleiden muotoilun ollessa kyseessä.

Kokonaisuudessaan pidemmän käyttäjätestauksen ja jatkokehityksen jälkeen suurimmiksi ja pysyviksi ongelmiksi osoittautuivat syöttö- ja näyttölaitteiden tekniset rajoitteet. Järjestelmän grafiikan piirron teho mahdollisti vain melko yksinkertaisten mallien reaaliaikaisen esityksen. Toisaalta myös seurantajärjestelmän puutteet muodostuivat ongelmaksi. Artikkelin kirjoittajan mukaan seurannan ajoittaiset virheet kuten hyppäykset ja muut häiriöt saivat jotkut käyttäjät kieltäytymään prototyypin pidempiaikaisesta testauksesta, ja seurannan puutteet vaikeuttivat myös käyttöliittymän arviointia kokonaisuudessaan.

3.3.4 3DIVS

Kuesterin ja kumppaneiden 1997 julkaisemassa artikkelissa [KDH99] esitellään 3DIVS niminen prototyyppijärjestelmä. Julkaisun kirjoittajien mukaan prototyypin nimi tulee sanoista ”3-dimensional immersive virtual sculpting”, mutta nimestään huolimatta prototyypin tarjoama vuorovaikutusmalli ei liity saven muotoiluun tai veistämiseen. Prototyypin kokoonpanossa stereoskooppinen näyttö oli sijoitettu vaakatasoon virtuaaliseksi työpöydäksi (engl. virtual workbench) ja järjestelmän avulla suunnittelija pystyi muotoilemaan vapaamuotoisia spline- ja nurbs-pintoja sekä CSG-kappaleita.

Motivaationa artikkelissa esitellylle työlle nähtiin tuotesuunnittelun esteettisen ja teknisen suunnittelun välinen kuilu. Julkaisun kirjoittajat käyttivät nimeä esteettinen suunnittelu kuvaamaan muotoilun ensimmäistä, hahmottelevaa vaihetta. Tekninen suunnittelu taas painottui lopullisen kappaleen ja sen yksityiskohtien muotoiluun. Kirjoittajat kiinnittivät erityisesti huomiota fyysisten suunnittelun apuvälineiden käytön yleisyyteen juuri esteettisen suunnittelun vaiheessa. Heidän rakentamansa prototyyppijärjestelmä pyrkikin jäljittelemään työskentelyä kyseisten fyysisten apuvälineiden avulla. Järjestelmän työkaluvalikoimasta löytyykin monia fyysiseen työskentelyyn liittyviä työkalumetaforia kuten esim. leikkauslanka, leimasin, magneetti jne.

Julkaisussaan kirjoittajat myös huomauttavat esteettisen ja teknisen suunnittelun tarpeiden olevan usein erilaisia, mistä johtuen virtuaalitodellisuusavusteisten suunnittelujärjestelmien tulisi tarjota erilaiset työkalut riippuen suunnittelutehtävästä tai -vaiheesta. Esteettisessä suunnittelussa pintojen muokkaus voisi tapahtua selkeiden työkalumetaforaa hyödyntävien toimintojen, kuten erilaisten magneetti- ja painetyökalumetaforaa hyödyntävien menetelmien avulla. Tällöin pystyttäisiin paremmin piilottamaan pintojen matemaattiset ominaisuuden ja sallia vapaampi työskentely. Tehtäessä teknistä suunnittelua järjestelmä taas antaisi suunnittelijalle mahdollisuuden muokata pintoja CAD-ohjelmista tuttuun tyyliin pinnan kontrollipisteiden ja parametrien avulla.

Julkaisussa prototyyppi on esitelty ilmeisen varhaisessa toteutusvaiheessa, ja käyttöliittymän kuvaus sinänsä ei sisällä juuri lainkaan yksityiskohtia tai käyttökokemuksia. Käyttöliittymän suunnittelun lähtökohdaksi on esitetty olettaus virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelujärjestelmän rakenteen peruselementeistä, jotka kirjoittajien mukaan koostuvat seuraavista osista:

- Virtuaaliset valikot
- Kappaleiden luonti
- Muokattavan kappaleen valinta
- Kappaleen muokkaus
- Näkymän tai kappaleen asettelu

Tämän mallin pohjalta julkaisussa on annettu melko paljon arvoa virtuaalisten valikkojen suunnitteluun. Kirjoittajat esittävätkin näppärän ajatuksen valikon kiinnittämisestä käyttäjän ranteeseen, eräänlaiseksi virtuaaliseksi ”rannekelloksi”, joka kulkee aina mukana ja on helppo löytää.

Muina esiteltyinä yksityiskohtina nousee esille tavoite suunnitella kaksikätille työskentelylle luonteva työnjako. Kaksikätilen työskentelyn suunnittelussa artikkelin kirjoittajat nojaavat monien muiden tavoin Guiardin esittämiin kaksikätilen työskentelyn periaatteisiin, joita esitellään tarkemmin luvussa 4.1. Julkaisun perustuessa keskeneräiseen toteutukseen, käytännön havainnot ja suunnitellun käyttöliittymän toimivuus jää tämän prototyypin osalta arvailujen varaan.

3.3.5 PolyShop ja InDex

Vuonna 1995 Daniel Mapes ja Michael Moshell ovat julkaisseet artikkelin, jossa he kuvaavat kehittämäänsä kaksikätilen muotoilun mahdollistavaa PolyShopiksi nimettyä prototyyppiä. Harmillisesti kyseistä artikkelia ei ollut mahdollista löytää. Kyseinen prototyyppi on ainoa virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun järjestelmä, joka on siirtynyt prototyypistä kaupalliseksi tuotteeksi, mikä tekee kyseistä tapauksesta erityisen mielenkiintoisen.

Ensimmäinen kaupallinen versio PolyShopista julkaistiin MultiGen -nimisen yrityksen toimesta 90-luvun lopulla. Tällöin tuotteen nimenä oli SmartScene. Myöhemmin MultiGen möi tuotteen edelleen Digital Art Forms -nimiselle yritykselle [Dig08], joka on jatkanut tuotteen jatkokehitystä ja myy sitä edelleen nimellä InDex. Yrityksen www-sivuilta löytyvien esitteiden perusteella vaikuttaa, että InDex-järjestelmä on kehittynyt melko monipuoliseksi tuotteeksi. Järjestelmä perustuu magneettiseurantaan ja tarjoaa kaksikätilen työskentelyn käyttäen kahta 6 DOF osoitinlaitetta. Järjestelmä näyttäisi tukevan myös monenlaisia stereoskooppisia näyttöjä tavallisten kaksiulotteisten näyttöjen lisäksi. Kaikesta huolimatta vaikutelma on, ettei kyseinen tuote ole osoittautunut valtavaksi myyntimenestykseksi.

3.3.6 COVIRDS

Chu, Dani ja Gadh esittelevät useammassakin julkaisussa [CDG97a, CDG97b ja DaG97] vuodelta 1997 virtuaalitodellisuusjärjestelmän vaatimusmäärittelyn koostamista ja suunnittelemansa prototyypin konseptia. Esittelemäänsä prototyyppiä, tai paremminkin prototyypin konseptia, he kutsuvat nimellä COVIRDS.

Heidän tavoitteenaan oli toteuttaa suunnittelujärjestelmä, joka hyödyntää mahdollisimman monipuolisesti eri syöte- ja palautekanavia vuorovaikutuksessa ihmisen ja tietokoneen välillä. He

halusivat tietokoneen avulla tapahtuvan työskentelyn mahdollistavan samanlaisen syötteiden antamisen kuin suunnittelijan keskustellessa toisen suunnittelijan kanssa. Normaalissa ihmisten välisessä kommunikaatiossa muotoja, kappaleiden keskinäisiä suhteita ja mittoja ilmaistaan usein käsien eleillä ja puheella. Käsien liikkeiden, eleiden ja puheen lisäksi julkaisujen kirjoittajat pohtivat myös silmien kohdistamista yhtenä syötteiden antamisen mahdollisuutena. Heidän esittämänsä eri syöte- ja palautekanavien ja niiden yhdistelmien toimivuuden arviointi muotoilun tehtäviin perustuu suunnittelijoiden haastatteluun. Suunnittelijoita oli pyydetty haastatteluissa pisteyttämään omien mielikuviansa mukaan eri syöte- ja palautekanavien hyödyllisyys suunnittelun eri osatehtävissä. Näin saadun pisteytyksen perusteella julkaisujen kirjoittajat vetivät melko pitkälle vietyjä johtopäätöksiä siitä, miten virtuaalitodellisuusavusteisen prototyypin käyttöliittymä tulisi suunnitella.

Kaikissa vuoden 1997 julkaistuissa tulee esille, että edellä kuvatus mukaisesti konseptoidun prototyypin toteutus on vasta alkamassa, ja artikkeleissa merkittävimmät tulokset ovatkin pelkkiin haastatteluihin perustuvat syöte- ja palautekanavien hyödyllisyyden arvioinnit. Käyttöliittymän toiminnallisuuden konseptissa on kyllä mielenkiintoisia ajatuksia, erityisesti äänisyötteen ja 6 DOF suorakäyttöisen ohjauksen yhdistämisen mahdollisuuksista, mutta esitettyjen ideoiden toimivuudesta on vaikea sanoa mitään. Itse prototyypin käytännön toteutuksesta, julkaisu [DaG97] tuo esille todellisuudessa monipuolisesti syöte- ja palautekanavia hyödyntävän käyttöliittymän käytännön toteutuksen osoittautuneen kirjoittajille vaikeaksi tehtäväksi. Julkaisu raportoi äänisyötteen käsittelyn ja käden paikkaa seuraavan magneettiseurannan yhdistämisen onnistuneen kehittämällä hajautettu usean PC:n muodostama alusta. Ilmeisesti vaikeuksista huolimatta julkaisujen kirjoittajat pystyivät kehittämään prototyyppinsä jollekin toimivuuden asteelle, ainakin hieman myöhemmin he julkaisivat tuloksia, joissa suunnittelun lähtökohtien toimivuutta pyrittiin perustelemaan prototyypin käytöstä saaduista kokemuksista. Näistä käyttökokemuksesta perustuvista tuloksista mainitaan tarkemmin luvussa 4.2.

3.3.7 Jot

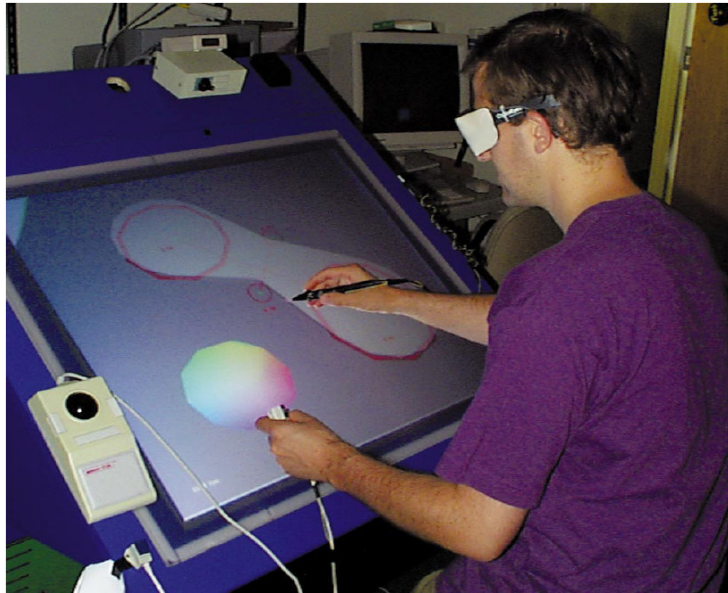
Forsbergin ja kumppaneiden esittelemä Jot niminen prototyyppijärjestelmä [FLM97] pohjautuu Robert Zeleznikin ja kumppaneiden kehittämään, alkujaan kaksiulotteiselle käyttöliittymälle tarkoitettuun, SKETCH -mallinnusohjelmaan [ZHH96]. SKETCH-ohjelman kehityksen lähtökohtana oli tarjota käyttöliittymä kolmiulotteisten kappaleiden muotoiluun, jossa vuorovaikutus jäljittelee kynällä piirtämistä, tarjoten alkuasetelmana tyhjää paperia vastaavan

näkymän. Tämän kynää ja paperia käyttöliittymän metaforana hyödyntävän toteutuksen motivaationa oli tarjota useimmille suunnittelijoille tuttu työskentelytapa. Kynä ja paperi tarjoavat perinteisiä CAD ohjelmia nopeamman ja helpomman tavan nopeasti hahmottaa idea, ilman tarkkaa parametrien tai yksityiskohtien määrittelyä. Tavoitteena SKETCH -ohjelmassa oli minimoida valikkojen käyttö ja käyttäjän eksplisiittisesti määrittelemien ohjelman tilojen muutokset tulkitsemalla käyttäjän kynällä tekemät eleet kontekstisidonnaisesti erilaisiksi muotoilukomennoiksi. Jot-prototyyppi laajensi SKETCH-ohjelmaa lisäämällä siihen kolmiulotteisia käyttöliittymän toimintoja. Jot-prototyypin kolmiulotteinen käyttöliittymä rakentui stereoskooppisen näytön ja kolmiulotteisen magneettiseurannan varaan.

Lähtökohtana Jotin suunnittelussa oli hyödyntää kolmiulotteisen käyttöliittymän ja eleisiin perustuvan toiminnallisuuden avulla normaalia kaksiulotteista käyttöliittymää suorempaa työskentelyn mallia. Toisena käyttöliittymän suunnittelun lähtökohtana oli huomio, jonka mukaan monet kolmiulotteiseen muotoiluun liittyvät operaatiot on helpompi suorittaa 1 DOF ja 2 DOF syötteen avulla, kuin kolmiulotteisen useamman vapausasteen syötteen avulla. Käytännössä Jot laajentaa alkuperäistä SKETCH-ohjelman käyttöliittymää monipuolistamalla työkaluvalikoimaa ja tuomalla SKETCH:in elepohjaisten toimintojen rinnalle CAD käyttöliittymien useamman vapausasteen syötteeseen perustuvia toimintoja.

Mallien luominen ja muokkaus Jot:illa tapahtui kynää jäljittelevällä osoitinlaitteella piirtämällä ja erilaisilla merkkauseleillä. Monet mallin luomiseen tarvittavat komennot tunnistettiin käyttäjän tekemien kynän liikkeiden perusteella. Käyttöliittymässä pyritään välttämään valikkoja ja ohjelman tilojen vaihdoksia. Uutta geometriaa käyttäjä pystyi luomaan piirtämällä geometrisia perusprimitiivejä, kuten esim. ympyröitä ja neliöitä, jotka tulkittiin palloiksi ja kuutioiksi. Jot pyrkii tukemaan myös monimutkaisempien parametristen pintojen määrittelyä valmiin CAD-ohjelmointirajapinnan avulla. Tosin julkaisussa mainitaan CAD-ohjelmointirajapinnan käyttöönoton olevan vasta suunnitteilla.

Järjestelmän kokoonpano perustui stereoskooppiseen näyttöön, joka on sijoitettu piirtopöydän tyypisesti viistoon käyttäjän eteen. Syöttölaitteena järjestelmä käytti piirtoalustoista tuttua kynää, sekä joukkoa 6 DOF magneettiseurannalla varustettuja syöttölaitteita, kuten kuvassa 8 nähdään.



Kuva 8. Jot prototyyppi-installaatio.

Eleiden tunnistus perustui käyttäjän piirtämien viivojen pituuden, piirtonopeuden ja piirroksen sijainnin tunnistamiseen. Kynän ja piirtämisen lisäksi Jot tarjosi erillisiä työkaluja, kuten esim. 3 DOF hiiren katselupisteen ja -etäisyyden säätämiseen. Käytössä oli myös fyysisiä kappaleita, joihin oli kiinnitetty 6 DOF magneettiseurannan antureita. Käyttäjä pystyi tilapäisesti kiinnittämään virtuaalisia kappaleita fyysisiin kappaleisiin ja näin asettelemaan virtuaalisia kappaleita fyysisten kappaleiden avulla.

Järjestelmän rajoitteina julkaisussa nostetaan esille tuntopalautteen puute, mikä teki kirjoittajien mukaan välillä tarkasta työskentelystä vaikeaa. Muuten julkaisussa ei mainita käytännön kokemuksia järjestelmän testauksesta tai muuta käytettävyyden arviointia. Yhteenvedossa julkaisun kirjoittajat toteavat käyttöliittymän suunnittelun vaativan kolmen perusasian huomioimista: vuorovaikutusmallin tulee mahdollistaa käyttäjälle luonnollinen tapa kommunikoida tietokoneen kanssa, luonnollinen vuorovaikutus vaatii erikoistuneita laitteita ja viimeiseksi, käyttöliittymän toiminnallisuuden ja laitteistojen tulee toimia saumattomasti yhteen.

3.3.8 Uudet metaforat

90-luvulla virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyyppien kirjo laajeni myös uudenlaisten vuorovaikutusmallien puolelle, mistä edellä kuvattu Jot-prototyypin hyödyntämä kynä ja paperi –metafora oli yksi osoitus.

Merkittävimpana uutena metaforana syntyi saven muotoilua matkinut vuorovaikutuksen malli. Saven muotoilua jäljitelleet järjestelmät pyrkivät vähentämään käyttäjän tarvetta huomioida muokattavan kappaleen geometrian esitysmuoto ja pinnan matemaattiset ominaisuudet tarjoamalla arkielämästä mahdollisimman tutun tavan muotoilla. Saven muotoilu on metaforana helppo ymmärtää ja toisaalta sen puitteissa voidaan toteuttaa monia muotoiluun tarvittavia toimintoja. Esimerkiksi saven painaminen, venyttäminen, saven lisääminen ja tasaiseksi kaulitseminen tai hiominen ovat kaikki toimintoja, jotka soveltuvat hyvin toteutettaviksi kolmiulotteiselle käyttöliittymälle.

Ensimmäisen saven muotoilun metaforaa hyödyntävän prototyypin esittelivät Galyean ja Hughes vuonna 1991 [GaH91]. Heidän prototyypissään muotoiltavan kappaleen esitys perustui avaruuden jakoon perustuvaan geometrian esitysmuotoon. Avaruuden kuutioina kuvattu massa muunnettiin piirtämistä varten ”marching cubes” –algoritmilla polygoni muotoon.

Gaylean ja Hughesin prototyypissä syöttölaitteena toimi tutkijoiden itsensä rakentama kolmiulotteisen syötteen tarjoava osoitinlaite. Laite oli rakennettu kiinnittämällä magneettiseurantajärjestelmän anturi kuminauhoilla sitä ympäröivään kehikkoon. Käyttäjä pystyi liikuttelemaan anturia kuminauhojen sallimissa rajoissa ja joustavat kuminauhat tarjosivat myös alkeellisen tuntopalautteen.

LeBlancin ja kumppanit julkaisivat myös vuonna 1991 artikkelin [LKT91], jossa myös he esittelivät saven veiston metaforaa hyödyntävän prototyypin. Kyseisessä prototyyppijärjestelmässä pitäydttiin polygonimuotoisen geometrian muokkauksessa, mutta työkalut oli suunniteltu mukailemaan saven muotoilua kuten edellä esitellyssä Galyean ja Hughesin kehittämässä prototyypissä.

LeBlancin ja kumppaneiden prototyypillä työskentely tapahtui kaksikäsisesti, toisen käden liikutellessa koko kappaletta 6 DOF ohjaimen avulla ja toisen käden tehdessä muutoksia kappaleeseen tavallisen 2 DOF hiiren avulla. Raportissa nostetaan erityisesti esille koko kappaleen jatkuvan liikkeen avulla saavutetun liikeparallaksin tärkeys muodon kolmiulotteisessa hahmotuksessa. Lisäksi mainitaan yhden perspektiiviprojektiota käyttävän näkymän olevan julkaisun kirjoittajien mukaan ylivoimainen vapaamuotoisia pintoja muokattaessa verrattuna monien CAD-ohjelmien tapaan esittää kappale yhtä aikaa useiden erisuuntaisten orthograafisten näkymien avulla.

Edellä esiteltyjen ensimmäisten saven muotoilua vuorovaikutuksessaan jäljitelleiden prototyyppien jälkeen samaa metaforaa on ryhdytty hyödyntämään laajemminkin. Virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun puolella saven muotoilun metaforaa hyödyntäviä prototyyppejä on esitelty mm. seuraavissa julkaisuissa [KrL97, MQW01 ja LLN03].

Kaksiulotteisten käyttöliittymien parissa saven muotoilua jäljittelevien muotoilutyökalujen ja itsenäisten ohjelmistojen kehitys on ollut hyvin vilkasta. Nykyisin yhä useampi yleisesti käytetty CAD-ohjelmisto on yhdistänyt saven muotoilun metaforaan perustuvia toimintoja työkaluvalikoimaansa, ja pelkästään saven veiston jäljittelyyn keskittyviä kaupallisia mallinnusohjelmistoja on markkinoilla useampiakin.

Saven muotoilun lisäksi 90-luvulla esiteltiin myös muita uudenlaisia metaforia hyödyntäviä virtuaalitodellisuusavusteisen muotoilun prototyyppejä. Esitellyistä prototyypeistä eräs hausimmista jäljittelee Lego-rakennuspalikoilla rakentelua [KTK97]. VLEGO-ohjelmisto tarjoaa käyttäjälle immersiiivisen stereoskooppisen näkymän, jossa käyttäjä voi kaksikäsisesti valikoida ja yhdistellä rakennuspalikoita kolmiulotteisen käyttöliittymän avulla ja näin rakentaa uusia kappaleita.

Vielä eräs mielenkiintoinen uudenlainen lähestymistapa virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun on Murakamin ja kumppaneiden esittelemä prototyyppi, jossa käyttäjän kosketuksen ja puristuksen tunnistavaa fyysistä syöttölaitetta käytettiin kolmiulotteisten kappaleiden muotoiluun [MuN94]. Kyseisessä prototyypissä muotoilu tapahtui melko samoin kuin edellä esitellyissä saven muotoilun metaforaa hyödyntävissä prototyypeissä. 2000-luvulle siirryttäessä muita esimerkkejä erilaisia fyysisiä sijaiskappaleita hyödyntävistä prototyypeistä löytyy yhä enemmän.

3.4 Prototyyppilähtöinen tutkimus 2000-luvulla

2000-luvun alkupuolella esitellyssä prototyyppilähtöisessä tutkimuksessa nousee esille myös yrityspuolella herännyt usko virtuaalitodellisuuden tarjoamiin mahdollisuuksiin. 2000-luvulla julkaistuista artikkeleista esitellään puhtaan tutkimustyön lisäksi myös yrityksissä käytössä olevia virtuaalitodellisuussovelluksia. 2000-luvulta löytyy myös joitakin selvityksiä, joissa analysoidaan virtuaalitodellisuuden sovellettavuutta muotoiluun esim. autoteollisuuden näkökulmasta. 2000-

luvulla tapahtunut suuntautuminen käytännön soveltamiseen näkyy myös siinä, että prototyyppien soveltuvuus ja käytettävyys todellisissa käyttötilanteissa on aiempaa korostuneemmassa asemassa.

Ensimmäiset yritysmaailman puolelta tulleet julkaisut liittyen virtuaalitodellisuuden soveltamiseen suunnitteluprosessin osana löytyvät 90-luvun lopusta ja 2000-luvun alusta. Esimerkiksi [PSZ98 ja SaZ99] raportoivat käytännön kokemuksista virtuaalitodellisuusteknologian hyödyntämisestä autoteollisuuden suunnitteluprosessissa, lähinnä suunnittelun tarkasteluun ja arviointiin liittyvänä työkaluna. 2000-luvulta löytyy myös ensimmäisiä esimerkkejä työstä, jossa tavoitteena on ollut jo aiemmin olemassa olevan CAD-ohjelman yhdistäminen tai siirtäminen virtuaaliympäristöön [Ber99, CoB04 ja HST07].

Uudesta käytännön soveltamiseen painottuvasta suuntautumisesta hyvänä esimerkkinä voi pitää myös vuonna 2000 järjestettyä suunnittelijoiden ja tutkijoiden tapaamista, jonka tavoitteena oli tunnistaa virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun merkittävimmät puutteet, sekä loppukäyttäjien todelliset tarpeet [DBW00]. Puutteiden ja tarpeiden kartoitus tapahtui kolmen erilaisen virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun kehitetyn prototyypin testikäytön ja siihen liittyvien haastattelujen avulla. Tämä tutkimus esitellään tarkemmin käytettävyystutkimuksen yhteydessä luvussa 4.4. Toinen esimerkki soveltuvuutta painottavasta suuntautumisesta on Jayaramin ja kumppaneiden tekemä virtuaalitodellisuusteknologioiden ja suunnitteluun tarkoitettujen prototyyppien kartoitus [JVG01]. Heidän kartoituksessaan oli pyrkiä huomioimaan suunnitteluprosessin vaiheet mahdollisimman laajana kokonaisuutena. Heidän näkemyksensä mukaan CAD työskentelyn tehtävät tulevat hyödyntämään kolmiulotteisia käyttöliittymiä tulevaisuudessa, erityisesti visualisoinnissa, mutta siirtyminen tulee tapahtumaan hitaasti. Alan pitkät perinteet, usein jopa 20 vuoden kokemus CAD työskentelystä kaksiulotteisella käyttöliittymällä, tulee vääjäämättä hidastamaan uusien kolmiulotteisten käyttöliittymien tekniikoiden siirtymistä käytännön tehtäviin.

Muina merkittävimpinä prototyyppilähtöisen tutkimuksen piirteinä 2000-luvulla on uudenlaisten vuorovaikutusmallien rakentaminen fyysisten sijaiskappaleiden varaan, sekä painotus taiteellisen ilmaisun mahdollistamiseen prototyyppien kehityksen motivaationa. Seuraavissa aliluvuissa esitellään kirjallisuudesta löytyvät prototyyppilähtöisen tutkimuksen tapaukset 2000-luvulta.

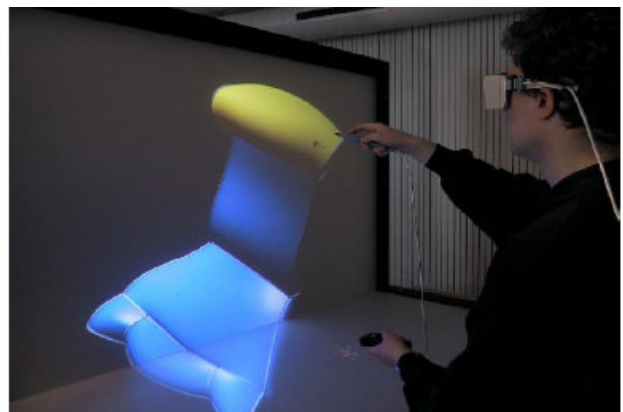
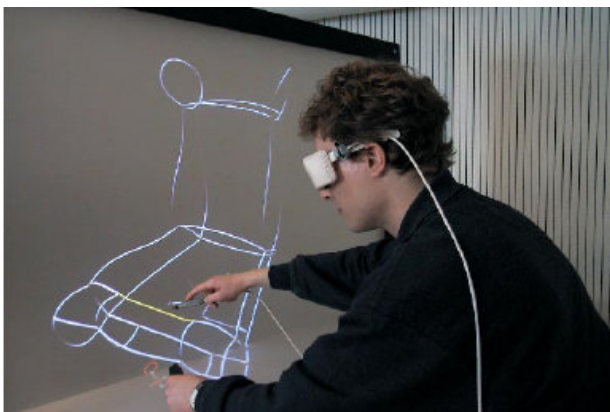
3.4.1 FreeDrawer

Weschen ja Seidelin esittelemä FreeDrawer prototyyppi [WeS01] pyrki tarjoamaan hahmottelevan työskentelytavan vapaamuotoisten pintojen muotoiluun. Prototyypin kehityksen motivaationa oli julkaisun kirjoittajien mukaan juuri CAD-työkalujen puutteellinen soveltuvuus suunnittelun ensimmäiseen ns. konseptointivaiheen työskentelyyn. Kuten kirjoittajat tuovat esille, nykyisin konseptointivaiheen yleisimmät työvälineet ovat paperi ja kynä, sekä erilaiset muotoilumassat, joiden avulla suunnittelijat pystyvät nopeasti kokeilemaan erilaisia karkeita muotojen. Nykyiset CAD-ohjelmat eivät vastaavaa työskentelyn joustavuutta ja intuitiivisuutta pysty tarjoamaan.

Julkaisussaan Wesche ja Seidel esittävät virtuaaliavusteisten suunnitteluohjelmistojen jaottelun tärkeimmäksi perusteeksi niiden käsittelemän kolmiulotteisen geometrian esitysmuotoa. He esittävät prototyyppien jaottelua seuraaviin pääluokkiin:

- Saven muotoilun metaforaa ja avaruuden jakoon perustuvaa geometrian esitysmuotoa käyttävät järjestelmät.
- CSG-muotoiluun perustuvat järjestelmät, joissa muotoilu painottuu geometrysten perusprimitiivien yhdistelyyn.
- Vapaamuotoisia pintoja, eli spline-, NURBS-, ja SDS -pintoja käsittelevät järjestelmät.

Julkaisun kirjoittajien oma prototyyppi kuului viimeiseen kategoriaan ja tukee B-spline –käyriin perustuvia parametrisia pintoja ja Catmull & Clark –algoritmiin perustuvia SDS -pintoja. Heidän prototyypillään suunnittelija muotoili vapaamuotoisen pinnan piirtämällä ilmaan pinnan perustana olevat kolmiulotteiset runkokäyrät, yksi kerrallaan, kuten kuvassa 9 nähdään. Järjestelmä muodosti automaattisesti ilmaan piirrettyjen viivojen mukaisesti vapaamuotoisen pinnan. Automaattisesti runkoviivojen mukaisesti muodostettu vapaamuotoinen pinta on nähtävissä kuvassa 10.



Kuvat 9 ja 10. Työskentelyä FreeDrawer –järjestelmällä.

FreeDrawerin käyttöliittymä pyrkii piilottamaan pinnan matemaattiset ominaisuudet käyttäjältä ja pintojen käsittely tapahtui työkaluilla, jotka pyrkivät jäljittelemään tunnettuja arkielämän ilmiöitä, esim. yksittäisten viivojen tasoittaminen tapahtui silittämällä niitä ikään kuin silitysraudalla. Julkaisussa ei tosin tämän yksittäisen esimerkin lisäksi esitellä työkaluja kovinkaan tarkkaan.

Pinnan määrittelyä yksittäisiä pinnan käyriä piirtämällä kirjoittajat perustelevat sillä, että monimutkaisen vapaamuotoisen pinnan kaikkia kaartumisen ominaisuuksia on vaikea määritellä riittävän tarkasti yhdellä yhtenäisellä käden liikkeellä. FreeDrawer poikkeaa juuri tässä suhteessa seuraavaksi esitellyistä prototyypeistä joissa jäljitellään ilmaan maalausta ja palaa vuorovaikutusmallinsa puolesta hyvin lähelle Sachsin ja kumppaneiden 3-Draw prototyyppiä, jossa käyttäjät piirsivät kolmiulotteisen mallin rautalankakehikon kynän ja piirtoalustan avulla, ks. luku 3.2.2. 3-Draw ei tosin FreeDrawerista poiketen pystynyt muodostamaan yhtenäistä vapaamuotoista pintaa piirretyn rautalankamallin päälle.

FreeDrawerin vuorovaikutusmallin perustana on oletus, että osa käyttäjistä voi oppia ilmaisemaan ideoitaan ilmaan piirtämällä, samoin kuin monet harjaantuvat piirtämään paperille esim. kynällä tai hiilellä. Julkaisun kirjoittajat huomauttavat, että virtuaalitodellisuusavusteisilta suunnittelujärjestelmiltä on usein odotettu niiden olevan helppoja käyttää kelle tahansa, mikä heidän mukaansa on epärealistista. Yleisen helppokäyttöisyyden sijaan he haluavat tukea nimenomaan kolmiulotteiseen muotoiluun erikoistuneiden suunnittelijoiden taiteellista työskentelyä. Heidän hypoteesinsa mukaan virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelu prototyyppi voi saavuttaa merkittäviä tuloksia erityisten käyttäjien taitojen ja virtuaalitodellisuusjärjestelmän tarjoamien toiminnallisuuksien yhdistelmästä. Sama ajatus on tuotu esille myös seuraavassa aliluvussa esiteltyjen ilmaan maalaukseen keskittyvien prototyyppien yhteydessä.

Prototyypin käyttöön liittyvissä kokemuksissa haptisen palautteen puutteen aiheuttamat ongelmat on nostettu esille. Artikkelissaan kirjoittajat pohtivat haptisten laitteiden aiheuttamia, usein merkittäviä ongelmia järjestelmän käytettävyydelle, ja toteavatkin käyttöliittymään toteutettujen työkalujen toimivan kohtuullisesti myös ilman haptista palautetta. Muuten prototyypin käytettävyyden arvioinnissa on hyvin vähän konkretiaa. Tulosten yhteenvedossa Wechse ja Seidel toteavat alan tutkimuksen tulevan saavuttamaan merkittävyyttä, muotoilun ollessa ala, joka on nousemassa entistä merkittävämpään asemaan.

3.4.2 Ilmaan maalaus

Scholnen ja kumppaneiden kehittämässä prototyypissä mielenkiinnon kohteena oli ilmaan maalauksen käyttäminen muotoilun metaforana [SPS01]. Poiketen useimmista esitellyistä prototyypeistä, kyseisen prototyypin vuorovaikutuksen pääpaino oli pelkässä yksittäisten viivojen piirtämisessä, jotka vastasivat ikään kuin yksittäisiä pensselin vetoja perinteisessä maalauksessa. Prototyypin avulla käyttäjä piirsi nauhamaisia pintoja, joiden leveys, kaarevuus ja asento määräytyivät viiva piirrettäessä käyttäjän käden asennon mukaisesti, ks. kuva 11. Järjestelmä mahdollisti myös jossain määrin laajempien yhtenäisten pintojen määrittelyn yhdistämällä yksittäisiä lähekkäin olevia nauhoja yhdeksi pinnaksi.

Ilmaan maalaukseen keskittyvän vuorovaikutusmallin valinnan motivaationa oli Scholnen ja kumppaneiden huomio, kuten monien muidenkin ennen heitä, miten suunnittelijat pääsääntöisesti suorittavat hahmottelevan suunnittelun ensimmäisen vaiheen kynän ja paperin avulla, ja miten tietokoneavusteisia menetelmiä käytetään pääsääntöisesti vasta seuraavassa vaiheessa, syntyneen idean siirtämiseksi digitaaliseen muotoon.



Kuva 11. Viivojen piirto Scholnen ja kumppaneiden prototyypillä tapahtui suoraan käden liikkeellä.

Suoran kädellä piirtämisen lisäksi prototyyppi sisälsi muutamia toiminnallisuuksia, joiden avulla käyttäjä pystyi muokkaamaan syntynyttä geometriaa. Muokkaus tapahtui kullekin toiminnoille rakennetulle erilliselle syöttölaitteelle. Ideana syöttölaitteiden kehityksessä oli löytää työkaluille sekä toiminnan metafora, että metaforaa vastaava fyysinen syöttölaite. Syöttölaitteina oli esimerkiksi pihdit joiden avulla käyttäjä pystyi tarttumaan ja siirtelemään kappaleita, tai käyttäen kaksia pihtejä, käyttäjä venyttämään kappaleita erikokoisiksi. Muita syöttölaitteita olivat

pyyhekumi geometrian poistoon ja magneetti, jonka avulla käyttäjä pystyi muokkaamaan piirrettyjen nauhojen osia.

Scholne ja kumppanit testasivat prototyyppiä melko laajasti esitellessään prototyyppiä yleisötapauksissa. Lisäksi joukko taiteilijoita osallistui sen koekäyttöön. Käyttökokemusten mukaan pihdit nousivat selkeästi parhaiten toimivaksi työkaluksi, jopa ohi itse kädellä ilmaan maalaamisen. Yleisesti artikkelin kirjoittajien mukaan järjestelmää testanneet käyttäjät suhtautuivat siihen positiivisesti ja järjestelmää testanneet taiteilijat uskoivat sen synnyttävä kokonaan uuden median taiteelliselle ilmaisulle.

Mielenkiintoisena havaintona mainitaan myös, että taiteellisen taustan omaavat henkilöt ottivat vastaan ja omaksuivat ilmaan maalauksen idean erityisen hyvin. Heidän kohdallaan tarve opetella täysin uudenlaista työskentelytapaa, joka vaatii pidempää harjoittelua, ei ollut vieras ajatus. Taiteellisen taustan omaavat henkilöt olivat ilmeisesti kokemuksensa kautta valmiimpia hyväksymään sen, että tyydyttävien tulosten saavuttaminen millä tahansa taiteelliseen ilmaisuun tarkoitetulla medially vaatii harjoittelua. Kirjoittajat toteavatkin järjestelmän vastaavan monia ilmaisuvoimaisia medioita siinä, miten järjestelmän käytön oppiminen vie vain minuutteja, mutta täydellinen hallinta ikuisuuksia.

Selkeimpinä prototyypin ongelmina kirjoittajat nostivat esille käden eleiden ja sijainnin tunnistamiseen liittyvät ongelmat. Lisäksi he mainitsevat kehitetyistä työkaluista magneetin osoittautuneen epäintuitiiviseksi ja vaikeakäyttöiseksi, kuitenkin tarkemmin syitä sen huonoon käytettävyyteen erittelemättä.

Scholnen tavoin myös Daniel Keefen esittelemä CavePaint –prototyyppi pyrki mahdollistamaan taiteellisen ilmaisun ilmaan maalauksen avulla [KFM01]. Keefen esittelemän prototyyppijärjestelmän merkittävin ero Scholnen ja kumppaneiden prototyyppiin oli CAVE-näyttölaitteiston käyttö. Keefen prototyyppissä käytettiin myös vielä selkeämmin juuri maalaukseen liittyviä metaforia työkalujen suunnittelussa. CavePaint –prototyyppissä fyysinen maalauspaletti ja erilaiset pensselit ja maalipurkit toimivat toimintoja ohjaavina fyysisinä syötelaitteina. Hieman Keefen ja Scholnen tekemää työtä myöhemmin Wille Mäkelä ja kumppanit Teknillisessä korkeakoulussa tekivät hyvin samansuuntaista tutkimusta [MRT04 ja MäT04] toteuttaessaan ilmaan maalaukseen tarkoitettua prototyyppiä. Mäkelän ja kumppaneiden toteuttamassa Helma -prototyyppissä ohjaus tapahtui kaksikäsisesti. Molempien käyttäjän käsiä

seurattiin 6 DOF mukaan ja lisäksi erillisellä seurannalla tunnistettiin käyttäjän sormien asentoja [RPI05]. Molemmilla CavePaint ja Helma –prototyypeilla on tehty vaikuttavan näköisiä taideteoksia. Muotoiluun, jossa taiteellisen ilmaisun ohella halutaan myös tarkemmin määritellä kokonaisrakenteita tai yhtenäisiä pintoja, ilmaan maalaus soveltuu kuitenkin heikommin.

3.4.3 Digitaalinen teippipiirtäminen

Yksi 2000-luvulla selkeästi virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun panostanut taho on ollut muotoiluun painottunutta Maya nimistä CAD-ohjelmistoa kehittänyt Alias, yhteistyössä Toronton yliopiston kanssa. Yhteistyön aikana erityisesti William Buxton, Ravin Balakrishnan ja Tovi Grossman ovat kehittäneet uusia prototyyppejä ja tehneet käytettävyydestä tutkimusta virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun saralla.

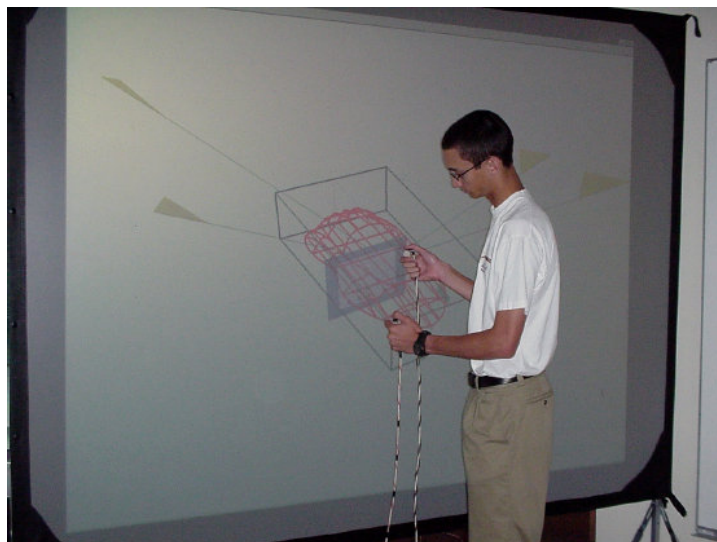
Kyseisten henkilöiden tutkimuksessa autojen muotoiluun liittyvä suunnittelutyö on ollut merkittävässä asemassa, mikä näkyy mm. autoteollisuuden suunnitteluprosessiin liittyvässä kartoituksessa [BFB00] ja autojen muotoiluun käytettyjen perinteisten menetelmien hyödyntämisessä käyttöliittymän ja työkalujen metaforana. Kaksikäätiset käyttöliittymät ovat myös olleet kyseisten tutkijoiden tekemässä työssä selkeänä teemana ja heidän kaksikäätisiin käyttöliittymiin liittyvän käytettävyydestä tutkimuksensa tuloksia esitellään tarkemmin luvussa 4.3. Prototyyppilähtöisen tutkimuksen osalta painotus on ollut voimakkaasti autojen muotoiluun erikoistuneiden suunnittelijoiden käyttämän teippipiirtämisen jäljitteleminen kaksikäätisissä kolmiulotteisissa käyttöliittymissä.

Perinteisesti teippipiirtäminen tapahtuu suurelle pystytasossa olevalle taululle, käyttäen rullalta levitettävää teippiä viivojen piirtoon. Suunnittelijan molempien käsien yhteistyönä tapahtuva teipin asettelu mahdollistaa pitkien ja tasaisesti kaartuvien viivojen piirtämiseen.

Käyttöliittymän vuorovaikutusmallin jäljitellessä suunnittelijoille tuttua työskentelytapaa, ensimmäinen Buxtonin ja kumppaneiden digitaalisen teippipiirtämisen mahdollistava prototyyppi toimi täysin kaksikulotteisesti, vaikka syöte annettiinkin useamman vapausasteen tunnistavan syöttölaitteen avulla [BFB00]. Järjestelmä tarjosi käyttäjälle vain kaksikulotteisen ortografisen näkymän piirrettävään kappaleeseen, eli järjestelmä toimi hyvin suoraan teippipiirtämisen digitaalisena vastineena.

Buxtonin ja kumppaneiden yllätykseksi loppukäyttäjät, jotka lähtökohtaisesti vieroksuivat CAD:in käyttöä luovaan työskentelyyn, toivoivatkin ensimmäistä prototyyppiä testattuaan sen toimivan enemmän perinteisen CAD:in tapaan. Käyttäjät toivoivat järjestelmän mahdollistavan vapaamman suunniteltavan kappaleen tarkastelun kolmiulotteisena, sekä mahdollisuuden vapaammin siirrellä tasoa, jolle piirtäminen tapahtuu. Toisessa prototyypin versiossa [GBK01] käyttäjien toiveita pyrittiin noudattamaan siten, että piirtäminen tapahtui käyttäjän määrittelemän kaksiulotteisen piirtotason mukaisesti järjestelmän tällöin piirtäessä näkymän käyttäen ortografista projektiota. Kokonaisuuden tarkastelua varten järjestelmä piirsi perspektiiviprojektiota käyttäen näkymän suunniteltavasta kappaleesta jota käyttäjä pystyi vapaasti kääntelemään, muuntaen katseluetäisyyttä ja valiten uusia piirtotasoja, kuten kuvassa 12 näkyy.

Työskentelyn ja tarkastelun tapahtuessa eri projektiotiloissa ja usein eri katselupisteistä, näkymä suunniteltavaan kappaleeseen vaihtui tiheästi työskentelyn aikana. Järjestelmän koekäytön kautta tuli ilmi, että tarvittiin mahdollisimman selkeä tapa osoittaa mitä tapahtui siirryttäessä katselukulmasta ja projektioista toiseen. Ratkaisuna jokainen siirtymä animoitiin jatkuvana projektion ja katselukulman vaihtumisen havainnollistavana animaationa. Käytännössä tämä havaittiin julkaisun kirjoittajien mukaan erittäin toimivaksi ratkaisuksi.



Kuva 12. Käyttäjä valitsee piirtotasoa digitaalisen teippipiirron prototyypissä

Toiseksi toimivaksi ratkaisuksi prototyypissä osoittautui itse vuorovaikutusmalli. Grossman ja kumppanit raportoivat toisen prototyypin alustavan testauksen osoittaneen, että teippipiirtäminen metaforana oli intuitiivinen ja helppo käyttää. Käyttäjät pystyivät kirjoittajien mukaan luomaan

vapaamuotoisia viivoja ja kaaria helpommin ja virheettömämmin kuin perinteisillä kaksiulotteista käyttöliittymää hyödyntävillä CAD-ohjelmilla.

Edellä esitellyssä prototyypin kehityksen vaiheessa prototyypin puutteina mainitaan kolmiulotteisen hahmottamisen ajoittaisen vaikeuden ja näppäimistön puuttuminen, joka rajoitti syötteen antamista. Ratkaisuna kolmiulotteisen hahmottamisen vaikeuteen julkaisun kirjoittajat suunnittelivat reaaliaikaisten varjojen lisäämistä näytön piirtoon. Lisäksi prototyypin selkeänä puutteena oli sen kyky näyttää vain suunniteltavien pintojen rautalankamallit, yhtenäisiä pintoja kokonaisuudessaan järjestelmä ei pystynyt muodostamaan tai esittämään.

Grosmannin ja kumppaneiden prototyypinsä parissa tekemä jatkokehitys ei kuitenkaan juurikaan puutu edellä mainittuihin puutteisiin [GBK02]. Tärkeimpänä muutoksena prototyypin kolmas versio tukee viivojen tasomaisille pinnoille piirtämisen lisäksi useamman vapausasteen mukaisten viivojen piirtämistä. Nämä kolmiulotteiset viivat määritellään kahden tasossa tapahtuvan piirroksen yhdistelmänä. Tavoitteena kolmannen prototyypin suhteen oli ollut kehittää sen toiminnallisuuksia niin pitkälle, että sen avulla käyttäjän olisi ollut mahdollista määritellä auton korin suunnittelussa määriteltäviä päälinjoja vastaavat pinnan rakenneviivat. Prototyypin kolmannella versiolla oli suoritettu järjestelmällisempää käyttökokemusten kartoitusta todellisten loppukäyttäjien tekemää koekäytön yhteydessä. Kirjoittajien ilmeiseksi yllätykseksi koekäyttö osoitti, etteivät loppukäyttäjät pystyneet kolme tuntia kestävästä testauksesta suorittamaan koetehtävää, jossa käyttäjiä pyydettiin muotoilemaan heille annetun auton pienoismallia vastaavan auton korin pinnan määrittelevät rakenneviivat. Järjestelmän kehitykseen osallistunut henkilö, jolla oli enemmän kokemusta prototyypin käytöstä, pystyi kuitenkin piirtämään pienoismallia vastaavan korin pinnan parin tunnin työskentelyllä. Julkaisun kirjoittajat listaavat käyttäjätestauksen perusteella havaintojaan prototyypistä seuraavasti:

- Tarkka, luotettava ja käytettävä kolmiulotteinen seuranta on kriittinen järjestelmän käytettävyyden kannalta. Seurannan epätarkkuus ja muut puutteet, kuten antureiden ja johtojen aiheuttamat rajoitteet estävät järjestelmän tehokkaan käytön.
- Kaksikäsisesti toimiva navigointi osoittautui erittäin toimivaksi. Mahdollisuus siirrellä katselupistettä tarttuen avaruuteen kahdella kädellä oli nopeasti opittavissa ja käyttäjät kokivat sen selkeäksi ja tehokkaaksi.
- Koetehtävä osoittautui erittäin vaikeaksi. Käyttäjät käyttivät huomattavasti enemmän aikaa pohdiskellen, miten haluttu malli tulisi purkaa rakenneviivoiksi kuin varsinaiseen viivojen piirtoon. Kirjoittajat eivät tätä mainitse, mutta kenties ongelma tässä on se, ettei

monimutkaisen pinnan kokoaminen rakenneviivoista ole kovin luonnollista saati helppoa. Useissa muissa tutkimuksissa viitattu tarve piilottaa käyttäjältä pintojen matemaattinen luonne tarkoittaa juuri tarvetta vähentää käyttäjien tarvetta miettiä pinnan rakennetta esim. juuri useampien rakenneviivojen mukaisesti.

- Käyttäjät kokivat teippipiirron olevan toimiva ja selkeä metafora kolmiulotteisten viivojen piirtämiseen. Kirjoittajien mukaan käyttäjät myös kommentoivat pintojen piirron useiden viivojen yhdistelmänä olevan helposti ymmärrettävä, mikä tuntuu kuitenkin edellisen kommentin valossa jokseenkin ristiriitaiselta.

Myöhemmin kirjoittajat testasivat fyysisen taivutussensorin käyttöä digitaalisen teippipiirron ohjauslaitteena [GBS03]. Käyttäjätestauksen perusteella osoittautui, että kyseisen syöttölaitteen käyttö olisi vaatinut melko suuria muutoksia käyttöliittymään, jotta järjestelmän käytettävyyks olisi ollut tyydyttävä. Julkaisun tulokset painottuvatkin kyseisen syöttölaitteen käytön esittelyyn, vartenotettavan suunnittelun jäädessä prototyypin mahdollisuuksien ulkopuolelle.

3.4.4 Muut prototyyppilähtöiset tapaukset 2000-luvulla

Edellä kuvattujen tapausten lisäksi 2000-luvulla on esitelty joukko muitakin virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun tarkoitettuja prototyyppkejä. Tässä aliluvussa esitellään lyhyesti tämän tutkielman kannalta vähemmän merkittävät 2000-luvulla esitellyt prototyyppijärjestelmät. Pääosan tässä aliluvussa esitellyistä tapauksista muodostavat prototyyppijärjestelmät, joissa on joko yhdistetty jo aiemmin esiteltyjä ratkaisuja, tai kehitetty uusia menetelmiä vain hyvin kapea-alaisesti.

Tapauksia joissa esitellään uusien menetelmien kehitystä kapea-alaisesti, edustaa Perlesin ja Vancen esittelemä DN-Edit, jossa käyttäjä pystyi CAVE-ympäristössä muotoilemaan vapaamuotoisia pintoja yhden 3 DOF osoitinlaitteen avulla [PeV02]. Kyseisen järjestelmän raportoinnissa on painotettu esittelemään nurbs-pintojen käsittelyyn liittyviä matemaattisia menetelmiä, missä onkin julkaisun suurin uutuusarvo. Raportointi ei juuri esitele järjestelmän vuorovaikutusmalleja, käyttöliittymää tai kokemuksia sen käytöstä.

Convard ja Bourdot esittelevät myös kapea-alaista menetelmäkehitystä, liittyen virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyypin kehitykseen [CoB04]. Heidän prototyypin kehityksensä päämääränä oli ollut kehittää virtuaaliympäristössä toimiva CAD-ohjelma, joka

käyttäjän työskennellessä tallentaa muotoiltavien kappaleiden määrittelyyn käytetyt askeleet. Tarkoituksena oli, että käyttäjä voi CSG-mallin mukaisesti luoda uusia kappaleita ja tarkentaa jo pidemmälle muotoiltuja kappaleita muuttamalla muotoilun aiempien operaatioiden asetuksia, esim. leikkauskappaleen kokoa tai pituutta. Prototyyppi oli rakennettu olemassa olevan OpenCASCADE CAD-ohjelmointirajapinnan avulla. Raportti keskittyy esittelemään muotoilun historia-askelten tallentamista ja niiden muutoksiin tarvittavia operaatioita. Itse prototyypin käyttöliittymää esitellään suppeammin, eikä julkaisu kuvaa kokemuksia järjestelmän toimivuudesta tai käytettävyyden arviointia.

Kiyokawan ja kumppaneiden esittelemä prototyyppijärjestelmä [KTY00] puolestaan kuuluu tapauksiin, joissa yhdistellään jo aiemmin esiteltyjä ratkaisuja. Prototyyppissä toteutetaan useamman käyttäjän virtuaalitodellisuusavusteinen muotoilujärjestelmä, jossa käyttäjät voivat yhtäaikaaisesti muotoilla geometrisista perusprimitiiveistä kappaleita ja lisäksi määritellä kappaleille ominaisuuksia, kuten esim. sallittuja liikeratoja. Järjestelmän muotoilu tähtää lähinnä yksinkertaisten virtuaaliympäristöjen rakenteluun, ja käyttäjät voivat myös liikkua ja toimia rakennetussa virtuaalimaailmassa määriteltyjen kappaleiden ominaisuuksia noudattaen. Jokaisen käyttäjän näkymän muodostaa yksittäinen PC ja useamman käyttäjän yhteistyö tapahtuu yhdistämällä erilliset PC:t lähiverkon välityksellä. Näkymä virtuaalimaailmaan muodostetaan silmikkonäytölle, joka pystyy näyttämään myös käyttäjän ympäröivän fyysisen maailman. Virtuaalimaailman kappaleet voitiin näyttää käyttäjälle piirtämällä ne oikean näkymän päälle lisätyn todellisuuden tapaan tai esittämällä käyttäjälle yksistään virtuaalimaailma normaalin virtuaalitodellisuuden tapaan. Artikkelin kirjoittajat raportoivat vertailevan käyttäjätutkimuksen jossa he vertailivat edellä mainittujen kahden esitystavan eroja kahden käyttäjän toimiessa yhteistyössä.

Fiorentinon ja kumppaneiden esittelemä Spacedesign-prototyyppi [FAM02] kuuluu myös tapauksiin, joissa prototyypin uutuusarvo syntyy aiemmin esiteltyjen ratkaisujen yhdistelystä. Spacedesign, joka on syntynyt jatkokehityksenä 3DIVS-prototyyppijärjestelmälle (ks. luku 3.3.4), toimii muotoilun osalta hyvin samalla tavoin kuin alkuperäinenkin 3DIVS -prototyyppi. Spacedesign prototyypin esittelyssä uutuusarvona on virtuaalitodellisuuslaitteiston, jossa näyttö on asennettu työpöytätasoksi, yhdistäminen laajennetun todellisuuden (engl. augmented reality, AR) mahdollistavan silmikkonäytön kanssa. Kyseinen yhdistelmä mahdollistaa muotoiltujen pintojen visualisoinnin VR:n lisäksi myös siten, että virtuaalinen kappale on esitetty yhdistettynä fyysiseen ympäristöön. Monimutkaisen järjestelmän ei kuitenkaan kovin selkeästi osoiteta tuovan

aidosti merkittävää lisäarvoa suunnittelun tehtäviin. Fiorentino ja kumppanit ovat tehneet prototyyppikehityksen lisäksi myös virtuaaliodellisuusavusteiseen suunnitteluun liittyvää käytettävyytutkimusta, joka nousee tämän tutkielman kannalta mielenkiintoisemmaksi ja onkin esitelty tarkemmin luvussa 4.1.

Fleisch ja kumppanit esittelevät puolestaan prototyyppijärjestelmän [FBS04], joka jatkaa edelleen Spacedesign-järjestelmän parissa tehtyä työtä. Tällä kertaa kyseistä järjestelmää on laajennettu suppealla nurbs-pintojen muotoiluun tarkoitetulla toiminnallisuudella. Järjestelmällä suunnittelijan on mahdollista tarkentaa vapaamuotoisen pinnan runkoviivoja piirtämällä niitä uudestaan ja piirtämällä uusia viivoja pinnan läheisyyteen, näin asteittain muotoa tarkentaen. Toisena lisänä he raportoivat työkalun toteutuksesta, joka perustuu teippipiirtämisen vuorovaikutusmalliin. Toteutettu teippipiirtäminen vaikuttaa olevan lähellä Grossmanin ja kumppaneiden (ks. luku 3.15) aiempaa toteutusta.

Bruno ja kumppanit esittelevät nurbs-pintojen muotoiluun tarkoitetun prototyypin, jossa käyttäjä työskentelee 6 DOF syöttölaitteen ja Microscribe 3D-digitointilaitteen avulla [BLM02]. Kyseisten ohjainten avulla käyttäjä voi muotoilla vapaamuotoisia pintoja muutamien eri toimintojen avulla. Digitointilaitteen soveltamisen lisäksi prototyypissä on melko vähän mitään merkittävää uutta. Raportti jättää käyttöliittymän esittelyn ja käytettävyyden arvioinnin hyvin vähäisiksi.

Akgunduz ja Yu esittelevät virtuaaliodellisuusavusteisen suunnittelu järjestelmän joka yhdistää aikaisempia vuorovaikutusmalleja melko innovatiivisesti [AkY04]. Heidän esittämässään prototyyppijärjestelmässä muotoilu tapahtuu kahdessa vaiheessa. Ensin käyttäjä hahmottelee summittaisen muodon ilmaan piirtämällä. Käden liike muodostaa rykelmän avaruuteen sijoitettuja palloja. Toisessa vaiheessa käyttäjä valitsee pallorykelmistä muutamia pisteitä, joiden avulla muodostetaan lopullinen nurbs-pinta. Jälleen käytännön kokemukset ja käytettävyyden arviointi puuttuvat julkaisusta.

Neugebauerin ja kumppaneiden esittelemä prototyyppi taas yhdistää menetelmien sijasta useampia laitteita [NWZ07]. Heidän ideanaan on mahdollistaa CAVE-tilassa kolmiulotteisten virtuaalisten kappaleiden tarkastelu stereoskooppisesti suuressa koossa ja lisäksi tarjota kevyt kämmenmikro, joka toimii ikään kuin mallin tarkempaan tarkasteluun tarkoitettuna suurennuslasina. Kämmenmikron sijaintia ja asentoa CAVE-tilassa seurattiin, ja kämmenmikron piirtämää näkymää kappaleesta päivitettiin siten, että kappale nähtiin ikään kuin liikuteltavan,

kuvaa tarkentavan, ikkunan läpi. Kämmenmikron tarjoaman tarkemman kuvan lisäksi käyttäjä pystyi muotoilemaan malliin kämmenmikron tarjoaman perinteisen CAD käyttöliittymän avulla. Yhdistelmän lisäarvona nähtiin mahdollisuus tarkastella mallia suuressa mittakaavassa CAVE-näytöllä ja helppo yksityiskohtien löytäminen ja tarkastelu, eli mallin navigointi, kämmenmikron avulla.

3.5 Prototyyppijärjestelmän kehityksestä

Teknillisen korkeakoulun koordinoimassa, vuonna 2006 alkaneessa ja edelleen käynnissä olevassa Tekes-rahoitteisessa HandsOn-projektissa on kehitetty virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyyppijärjestelmiä, sekä tutkittu virtuaalitodellisuusteknologian vaikutuksia käytettävyyteen ja käytön tehokkuuteen muotoilun tehtävissä. Kyseisessä projektissa tämän tutkielman kirjoittaja on osallistunut virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyyppijärjestelmien suunnitteluun ja toteutukseen.

Projektissa lähtökohtana on ollut hyödyntää mahdollisimman paljon olemassa olevia ohjelmistoja. Tavoitteena on ollut toteuttaa kolmiulotteinen käyttöliittymä olemassa olevalle suunnitteluohjelmistolle siten, että kyseistä ohjelmaa voidaan käyttää CAVE-tyyppisessä virtuaaliympäristössä. Valmiiden ohjelmistojen hyödyntämisellä on haluttu varmistaa myös kehitetyn prototyypin monipuolinen toiminnallisuus. Lisäksi olemassa oleva ohjelma tarjoaa suunnittelijoille tutun toiminnan mallin ja mahdollistaa paremman vertailtavuuden eri käyttöliittymien välillä.

Harviainen, Svan ja Takala raportoivat prototyyppijärjestelmän ensimmäisen vaiheen kehitykseen liittyvistä teknisistä ratkaisuista, sekä kyseiselle järjestelmälle suunnittelusta käytettävyytutkimuksesta julkaisussaan [HST07]. Tässä luvussa esitellään prototyyppijärjestelmän kokoonpanoon liittyviä ratkaisuja. Käytettävyyteen liittyvä tutkimuksen osuus esitellään luvussa 4.5.

Esitellyssä prototyyppijärjestelmässä stereoskooppisen kuvan muodostus CAVE-tyyppiselle virtuaalitodellisuusjärjestelmälle oli eriytetty muotoiluun käytetystä ohjelmistosta. Stereoskooppisen kuvan muodostus perustui yleisen piirtokomentojen kaappauksen ja muokkauksen mahdollistavaan ohjelmistoon. Kyseinen ohjelmisto oli avoimen lähdekoodin kehityksenä toteutettu Chromium [HHN02]. Muotoiluun käytetyn Blender-ohjelman tuottamat

OpenGL-piirtokomennot kaapattiin korvaamalla ohjelmaa suorittavan tietokoneen grafiikka-ajuri Chromiumin ajurilla, joka siirsi piirtokomentovuon prosessoitavaksi alkuperäisen grafiikka-ajurin ulkopuolelle. Piirtokomentovuota käsittelevään ohjelmistoon toteutettiin kaksi lisämoduulia, joiden avulla päänsurantaan perustuva stereoskooppinen piirto CAVE-tyyppiselle näyttöjärjestelmälle saatiin toteutettua.

Ensimmäinen lisämoduuli vastaanottaa kamerapohjaisen seurantajärjestelmän lähettämiä käyttäjän pään sijainnin kertovia paikkakoordinaatteja. Moduuli laskee kyseisten koordinaattien avulla ohjelman alkuperäiset piirron näkymä- (engl. modelview) ja projektiomatriisit muokattuina käyttäjän pään sijainnin mukaisesti. Stereoskooppisessa kuvan muodostuksessa jokaista CAVE-tilan näyttöpintaa päivittää kaksi erillistä piirtoprosessia, ja kullekin piirtoprosessille lasketaan yksilölliset näkymä- ja projektiomatriisit.

Toinen toteutettu lisämoduuli kääntää kunkin piirtävän prosessin kuvan siten, että se saadaan näyttöpinnan mukaisesti korjattua. Laitteistossa projektorit on sijoitettu melko jyrkkään kulmaan heijastuspintojen yläpuolelle, jottei käyttäjä aiheuttaisi varjoja näyttöpinnoille. Projektoreiden sijoittelusta johtuen niiden heijastama kuva näyttöpinnoilla on vääristynyt ja vääristymä joudutaan korjaamaan ohjelmallisesti.

Myös muotoiluun käytetty Blender-ohjelmisto vaati muutoksia mahdollistaakseen muotoilun virtuaaliympäristössä. Virtuaaliympäristössä syöttölaitteena käytettiin led-valolla varustettua osoitinta, jossa oli yksi painokytin. Osoitinlaitteen avulla tapahtuva geometrian käsittely toteutettiin suunnitteluohjelmistoon lähdekoodin muutoksin. Käytettävyyystestausta varten ohjelmistoon rakennettiin myös automaattinen käyttäjän suorituksia tallentava instrumentointi, sekä testikäyttäjän suoritusta ohjaava testikappaleiden kulmapisteiden virheiden visualisointi.

Prototyypin ensimmäisessä vaiheessa muotoiluun liittyvistä virtuaaliympäristön toiminnallisuuksista toteutettiin vain kokonaisten kappaleiden ja yksittäisten kulmapisteiden siirtely. Muotoilun toiminnallisuuksien toteutuksen suppeus ensimmäisessä vaiheessa johtui siitä, että ensisijaisena tavoitteena oli varmistaa olemassa olevan ohjelman siirrettävyys virtuaaliympäristöön, ja toisaalta suunniteltu käytettävyyystestaus vaati vain nämä muotoilun kannalta olennaisimmat perustoiminnot. Järjestelmää jatkokehitetään parhaillaan monipuolisemmin muotoilun menetelmiä ja kaksikäätistä työskentelyä.

Lopputuloksina voidaan mainita stereoskooppisen piirron eriyttämisen osoittautuneen hyväksi ratkaisuksi. Yleinen alusta mahdollistaa laajemmankin olemassa olevien ohjelmistojen siirtämisen virtuaaliympäristöön. Myös olemassa olevan ohjelmiston hyödyntäminen muotoilun toiminnallisuuksien kehittämiseen on osoittautunut hedelmälliseksi lähestymistavaksi. Kun tarjolla olleen muotoiluun tarkoitetun ohjelman avoimen lähdekoodin rakenne ja yksityiskohdat ovat tulleet tutuiksi, mahdollistaa se suhteellisen nopean ja monipuolisen uusien toiminnallisuuksien toteutuksen virtuaaliympäristöön.

3.6 Yhteenveto prototyypilähtöisestä tutkimuksesta

Tässä luvussa esiteltiin virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun toteutettuja prototyypilähtöisen tutkimuksen tuloksia. Kuten esitellyistä tapauksista käy ilmi, suunnittelun alueella virtuaalitodellisuuteen liittyvää tutkimusta on tehty aktiivisesti jo useita vuosikymmeniä. Monista esitellyistä tapauksista huolimatta tutkimus kokonaisuudessaan muodostuu melko irrallisista yksittäistapauksista, selkeästi aikaisempaa tutkimusta jatkavan työn jäädessä vähemmistöön.

Prototyyppejä esiteltäessä teknisten ratkaisujen kuvaaminen on lähes poikkeuksetta pääosassa, käytettävyyden ja toimivuuden arvioinnin jäädessä jopa joissakin tapauksissa kokonaan puuttumaan. Virtuaalitodellisuusjärjestelmienkin ollessa edelleen hyvin yksilöllisiä kokoonpanoja, sovelluskohtaisten teknisten ratkaisuiden esittelystä on hyvin vaikea tehdä yleisemmin päteviä johtopäätöksiä tai suosituksia tulevaisuuden toteutuksille. Tältä osin tutkimusmateriaalia voi ensisijaisesti käyttää herättämään ideoita ja toisaalta listaamaan ongelmia ja esitettyjä ratkaisuja erillisiin yksityiskohtiin, mutta selkeämpää kokonaisnäkemyä on vaikea koostaa.

Toivottavasti jatkossa prototyypilähtöistä tutkimusta tehdään edelleen aktiivisesti ja tulosten raportoinnissa ryhdytään panostamaan teknisten ratkaisujen lisäksi prototyyppien saavuttaman käytettävyyden järjestelmällisempään arviointiin.

Prototyypilähtöisen tutkimuksen osalta virtuaalitodellisuusjärjestelmien yleiset rajoitteet ovat näyttäneet monissa tapauksissa estäneen selkeiden käytettävyyteen liittyvien tulosten saavuttamisen. Suurimmassa osassa prototyypilähtöisen tutkimuksen lopputuloksista mainitaan, että kolmiulotteiseen seurantaan ja stereoskooppisen kuvan muodostukseen liittyvät tekniset

ongelmat koettiin niin merkittävästi käytettävyyttä heikentäviksi tekijöiksi, että järjestelmän todelliset hyödyt jäivät niiden varjoon. Tämän myös kirjoittaja joutui toteamaan kehitetyn prototyyppijärjestelmän osalta. Käytössä ollut kamerapohjainen seurantalaitteisto tuotti ajoittain virheellisiä ja äkillisesti vaihtelevia tuloksia, ja välillä järjestelmä ei löytänyt seurattavia kohteita. Seuranta ja stereoskooppisia näyttötekniikoita kehitetään jatkuvasti eteenpäin, mutta tällä hetkellä näyttää, että todelliseen käyttöön kypsiä ratkaisuja joudutaan vielä odottamaan. Ennen näiden puutteiden korjaantumista, prototyyppijärjestelmiä kehitettäessä tulisi miettiä voidaanko teknisistä puutteista aiheutuvat ongelmat kiertää tai osoittaa virtuaalitodellisuuden tarjoamat lisäarvot todellisiksi niistä huolimatta.

Teknisten puutteiden lisäksi monia virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyyppijä tuntuu vaivanneen niiden toteutuksen jääminen kovin suppeiksi toiminnallisuuden puolesta. Useimmat esitellyistä prototyypeistä sisältävät vain muutamia muotoiluun tarkoitettuja toiminnallisuuksia ja pitäytyvät vain jossain tietyssä pinnan geometrian esitysmuodossa [DBW00]. Ajatellen työkalun soveltamista todelliseen suunnittelutyöhön, ei muutaman työkalun esittely riitä varsinaisten työtehtävien suorittamiseen, mistä johtuen monien prototyyppien osalta ei voidakaan paljon sanoa niiden soveltuvuudesta todelliseen työskentelyyn. Tämä näkyy myös siinä, että monissa julkaisuissa mainitaan jatkokehitystarpeena järjestelmän toimintojen monipuolistaminen.

Kokonaisuudessaan tuntuu, että virtuaalitodellisuusteknologian vahvoja käyttöliittymän uusia muotoja kuten kaksikäätistä työskentelyä ja monipuolisemmin eri syöte- ja palautekanavia hyödyntäviä mahdollisuuksia on tutkittu hämmästyttävän vähän. Näillä alueilla virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun parissa on varmasti monia vielä kartoittamattomia alueita. Myöskään prototyyppilähtöinen tutkimus ei ole kokonaisuudessaan pystynyt selkeästi osoittamaan omaa arvoaan. Tutkimus ei ole pystynyt antamaan yksiselitteistä vastausta kysymykseen virtuaalitodellisuuden tarjoamista lisäarvoista. Niin sanottua ”killer applicationia” ei tällä alueella ole vielä tutkimuksesta noussut esiin, tai siirtynyt valtavirran käyttöön. Tosin yhdessä tapauksessa tutkimustyönä kehitetty prototyyppi on siirtynyt kaupalliseksi tuotteeksi, jonka käytettävyydestä, toiminnallisuudesta tai edes suosiosta ei harmillisesti ole saatavissa tarkempaa tietoa.

Kaikesta huolimatta prototyyppilähtöisen tutkimuksen puolella näyttää edelleen uskoa virtuaalitodellisuuden mahdollisuuksiin riittävän, jopa teollisuudenkin puolelta. Pilkahduksia

virtuaalitodellisuuden hyödyistä voikin halutessaan nähdä monissa esitellyissä prototyypeissä, huolimatta siitä, että niissä järjestelmän hyöty kokonaisuudessaan jää epäselväksi. Seuraavaksi esitelläänkin lista edellä mainittujen seikkojen lisäksi prototyyppilähtöisen tutkimuksen tuloksista ja sen myötä esitellyistä kokemuksista ja irrallisemmista huomioista:

Prototyyppilähtöisen tutkimuksessa usein havaitut ongelmat:

- Syvyyshahmotuksen puutteet. Pelkkä stereoskooppinen näkymä ei riitä tarkkaan syvyyshahmotukseen. Päänseurannan avulla saavutettava liikeparallaksi parantaa syvyyshahmotusta, mutta edelleen kannattaa miettiä myös muita keinoja sen parantamiseen. Esimerkiksi syvyyshahmotusta voi parantaa ennakoivalla valintojen korostuksella, kuten 3DM prototyypissä [BDH92], käyttämällä selkeästi kuvioituja pintatekstuureita, kuten Shawn ja Green THREAD-prototyypissään [ShG94]. Lisäksi varjojen käyttö voi parantaa syvyyshahmotusta.
- Ilman tukea ihmisen käsi on luonnollisestikin epävaka, mikä ilmenee käden tärinänä ja huojuntana. Tämä vaikuttaa työskentelyyn syöttölaitteen toimiessa vapaasti kolmessa ulottuvuudessa. Ratkaisuina syötteen voi porrastaa tiettyjen askelten tai ruudukon mukaiseksi tai automatisoida kappaleiden asettelua suhteessa toisiinsa. Esim. 3DM ja JDCAD prototyypit esittelevät kyseisiä ratkaisuja [BDH92 ja LiG93]. HoloSketch prototyypissään ongelma ratkaistiin tarjoamalla käyttäjille pikanäppäin, jolla syöte voitiin tilapäisesti skaalata kymmenen kertaa fyysistä liikettä pienemmäksi [Dee95]. Edellä mainittujen ratkaisujen lisäksi järjestelmän tulee tarjota mahdollisuus tarvittaessa rajoittaa syötteen vapausasteiden lukumäärää. Monissa tapauksissa on nostettu esille, että hyvin usein käyttäjät haluavat rajata tietyt komennot tapahtumaan vain esimerkiksi yhden koordinaatiston akselin suuntaisesti.
- Ergonomia. Työskenneltäessä käsien liikkeiden avulla, pidempiaikainen työskentely aiheuttaa lihasten raskuutta. Helpoin ratkaisu käsien väsymiseen on tarjota työskentelyyn taso, johon käyttäjä voi tukea kyynärpäänsä. Deering mainitsee kyynärpäiden tukemisen myös vakauttavan käsiä, mikä osaltaan parantaa työskentelyn tarkkuutta [Dee95].
- Seurannan epätarkkuus. Monessa esitellyssä tutkimuksessa seurannan epätarkkuus nousee selkeäksi ongelmaksi, mutta hyviä ratkaisuja tähän ongelmaan ei ole löytynyt. Syötteen suodatuksella voidaan sen tärinää ja virheitä vähentää, mutta voimakas suodatus aiheuttaa syötteeseen viivettä, joka myös heikentää helposti järjestelmän käytettävyyttä.

Prototyyppilähtöisen tutkimuksen yhteydessä esitetyt edut:

- Kolmiulotteisen käyttöliittymän avulla voidaan perinteisesti useammasta kaksiulotteisesta operaatiosta muodostuneet muotoiluoperaatiot yhdistää yhdellä liikkeellä tapahtuviksi operaatioiksi. Esim. kappaleen sijainti ja asento voidaan muuttaa yhdellä liikkeellä. Butterworth ja kumppanit käyttivät ensimmäisten joukossa tätä perusteluna kolmiulotteisen käyttöliittymän tarjoamalle tehokkuudelle [BDH92].
- Kaksikäisyys. Ihmiselle on luonnollista työskennellä kaksikäisesti, ja kolmiulotteiset käyttöliittymät sopivat kaksikäiseen työskentelyyn erittäin hyvin. Kaksikäisyys lisää toiminnan luonnollisuutta ja voi hyvin toteutettuna lisätä tehokkuutta. Tarkemmin kaksikäisyyteen liittyvää tutkimusta on esitelty luvussa 4.3.
- Useiden virtuaalitodellisuusjärjestelmien näytöt mahdollistavat suunniteltavien kohteiden visualisoinnin niiden luonnollisessa koossa. Tästä on hyötyä monissa suunnittelutehtävissä, kuten esim. autojen muotoiluun liittyvässä suunnittelussa [BFB00].

Virtuaalitodellisuusavusteiselle suunnittelulle soveliaat työtehtävät:

- Monet, esim. Scholne ja kumppanit [SPS01] ja Weschen ja Seidel [WeS01], ovat painottaneet virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun mahdollisuuksia tukea luonnostelevaa ja luovaa työskentelyä. Useissa yhteyksissä on todettu suunnittelijoiden suosivan fyysisten suunnitteluvälineiden, kuten kynän ja paperin tai saven käyttöä suunnittelun ensimmäisessä, muotoa hahmottelevassa vaiheessa. Virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun uskotaan olevan erityisen vahvoilla juuri luonnostelevassa vaiheessa kun halutaan kokeilla ja leikitellä kokonaismuodolla.
- Yleisesti ottaen on huomattu, että kolmiulotteisilla käyttöliittymillä syöte on epätarkempaa. Tämän johdosta useampikin tutkija pitää vapaamuotoisten pintojen ja yleisesti ei mittatarkkojen orgaanisten kohteiden muotoilua virtuaalitodellisuusavusteiselle suunnittelulle sopivimpana sovellusalueena.

Huomioita prototyyppien toiminnallisuuksista:

- Rajoitteiden tarpeellisuus ja syötteiden vapausasteiden soveltuvuus eri operaatioille. Osa suunnitteluvaiheista on helpompi tehdä 1DOF / 2 DOF syötteen avulla ja osa useamman vapausasteen tarjoavilla syöttölaitteilla [GLS95]. Kannattaa miettiä miten hyvin kolmiulotteinen käyttöliittymä soveltuu kuhunkin prototyypille aiottuun tehtävään ja hyväksyä, että joissakin tapauksissa kaksiulotteinen käyttöliittymä on parempi. Monissa operaatioissa käyttäjä haluaa rajoittaa syötteen vapausasteiden määrää, eli työkalut

kannattaa toteuttaa siten että se on mahdollista. Rajoitteiden määrittelyyn voi käyttää myös kaksikäätistä ohjausta kuten esim. [ShG94].

- Tarjoa riittävä työkaluvalikoima. Todelliset suunnittelutehtävät vaativat monenlaisia työkaluja ja mallin esitysmuotoja [DBW00].
- Kappaleiden rotaatio. Kolmiulotteisessa käyttöliittymässä käyttäjät odottavat kappaleiden rotaation tapahtuvan niiden massakeskipisteen mukaisesti, riippumatta tarttumiskohdasta kappaleessa. Deering teki kyseisen huomion HoloSketch –prototyypin kehityksen yhteydessä [Dee95].
- Täysin suora syöte ei ole aina paras. Liangin ja kumppaneiden kokemusten mukaan fyysinen sijaiesine soveltuu esim. rotaatioiden määrittelyyn paremmin kuin suoraan käden orientaation käyttö [LiG93]. Fyysisen kappaleen avulla käyttäjä voi määritellä rotaation ilman käden luonnollisten vapausasteiden asettamia rajoituksia. Käyttötarkoituksesta riippuen fyysisten esineiden käyttö osana käyttöliittymää voi osoittautua hyväksi ratkaisuksi.

4 Käytettävyystudkimus

Prototyypilähtöisen tutkimuksen lisäksi virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun tutkimusalaan liittyy tiiviisti monia käytettävyyden osa-alueita. Käytettävyystudkimuksena esitellään virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun liittyvä tutkimus, jossa käytettävyyteen liittyvien tekijöiden mittausta ja analysointi ovat pääosassa. Puhtaasti suunnittelukontekstissa tehtyä virtuaalitodellisuuteen liittyvää käytettävyystudkimusta, jossa olisi suoritettu käytettävyyden mittausta, on raportoitu melko vähän. Kirjallisuudesta löytyy kuitenkin paljon raportoitua yleisempää käytettävyystudkimusta joka soveltuu myös virtuaalitodellisuusavusteisen suunnitteluun analysointiin. Tässä luvussa pyritään esittämään aihealueen kannalta keskeisimmät käytettävyystudkimuksen tulokset. Tässä luvussa tarkemmin esiteltävät käytettävyyden osa-alueet ovat suoraikäyttöisyys, syötteen ja palautteen monimuotoisuus ja kaksikäsinen työskentely. Näiden aihealueiden lisäksi omina alilukuinaan esitellään virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyyppijärjestelmien käytettävyyden vertailu ja käytettävyydentestaus, jonka suunnitteluun toteutukseen tämän tutkielman kirjoittaja on osallistunut. Viimeinen aliluku sisältää tiiviin yhteenvedon käytettävyystudkimuksen tuloksista.

4.1 Suoraikäyttöisyys

Kolmiulotteisen geometrian muotoilun ollessa luonteeltaan graafista ja vuorovaikutteista työtä, työskentely suunnitteluohjelmistoilla tapahtuu poikkeuksetta reaaliaikaisesti graafisen käyttöliittymän kautta. Nykyisten kaksiulotteista käyttöliittymää hyödyntävien CAD-ohjelmistojen vuorovaikutus perustuu suoraikäyttöisyyteen (engl. direct manipulation), valikkojen kautta tapahtuviin valintoihin ja tekstisyötteeseen. Erityisesti suoraikäyttöisyys on kolmiulotteisen geometrian muotoiluun tarkoitetuissa ohjelmissa keskeisessä osassa. Hyvin toteutettuna suoraikäyttöisyys mahdollistaa nopean ja tehokkaan työskentelyn, ja muotoilun tapahtuessa virtuaaliympäristössä, suoraikäyttöisyys on vähintäänkin yhtä tärkeässä roolissa kuin kaksiulotteisissa käyttöliittymissä.

Suoraikäyttöisyydellä tarkoitetaan toiminnan mallia, jossa käyttäjä valitsee käyttöliittymän työkaluja ja toiminnan kohteita niitä kuvaavia kuvakkeita tai muita graafisia elementtejä fyysisin liikkein osoittamalla, esim. hiiren avulla ja yksittäisiä nappeja painamalla. Esimerkiksi poistaakseen tiedoston graafisella käyttöliittymällä käyttäjä osoittaa tiedoston kuvaketta hiirellä

ohjaamallaan osoittimella, painaa hiiren nappia, jolloin tiedosto valitaan ja siirtää tiedostoa kuvaavan kuvakkeen roskakorina esitetyn poistamis-toiminnallisuuden kuvakkeen päälle. Vastaavasti geometrian muotoiluun tarkoitettussa ohjelmassa käyttäjä voi siirtää kappaleen kulmapistettä osoittamalla suoraan kappaleen kulmapistettä hiiren avulla, tarttumalla kulmapisteeseen painamalla hiiren nappia ja siirtämään sitä liikuttamalla hiirtä valinnan jälkeen. Shneiderman kuvaa artikkelissaan [Shn83] suoraikäyttöisyyden periaatteita ja listaa piirteitä, joita suoraikäyttöisen käyttöliittymän tulee toteuttaa:

- Jatkuva mielenkiinnon kohteena olevan objektin esitys
- Toiminta määräytyy fyysisillä suorituksilla (esim. valinta ja siirtely hiiren, peliohjaimen tai kosketusnäytön avulla.) tai nimettyjen näppäinten avulla monimutkaisen komentosyntaksin sijaan.
- Työskentely perustuu nopeisiin inkrementaalisiin operaatioihin. Operaatioiden vaikutus objektiin on välitön ja näkyvä. Suoritettu operaatio tulee olla mahdollista myös peruuttaa.
- Kerroksittainen tai spiraalinen oppimismalli. Ohjelman käyttö voidaan aloittaa lähes täysin ilman pohjatietoja. Ohjelman peruskäyttö on mahdollista pienellä harjoittelulla ja käytön myötä käyttäjä harjaantuu järjestelmän käytön ekspertiksi.

Shneiderman listaa myös edellä mainittujen suoraikäyttöisyyden piirteiden avulla saavutettavia hyötyjä:

- Aloittelijat oppivat perustoiminnot nopeasti, usein kokeneemman käyttäjän opastuksella
- Ekspertit voivat työskennellä äärimmäisen nopeasti ja suorittaa monipuolisesti toimintoja, jopa toteuttaen uusia toimintoja osaksi järjestelmää.
- Käyttäjät oppivat käytön kautta hahmottamaan järjestelmän toiminnan periaatteet
- Virheilmoituksia tarvitaan harvoin
- Käyttäjät havaitsevat toimintansa vaikutuksen välittömästi ja pystyvät päättämään edesauttaako se heidän kokonaistavoitettaan. Mikäli ei, toiminto voidaan perua
- Käyttäminen on miellyttävämpää koska toiminnot ovat selkeitä ja helposti peruttavia
- Käyttäjä toimii operaatioiden käynnistäjänä ja kokee hallitsevansa järjestelmää. Käyttäjä osaa ennakoida järjestelmän vasteen. Tämä lisää käyttäjän itseluottamusta ja edesauttaa järjestelmän tehokasta hallintaa.

1985 julkaistussa artikkelissaan Hutchins, Hollan ja Norman [HHN85] analysoivat suoraikäyttöisyyttä pintaa syvemmältä ja esittelevät myös suoraikäyttöisyyden rajoitteita ja

mahdollisia negatiivisia vaikutuksia käytettävyyteen. Hutchins ja kumppanit yksilöivät tekijöitä, jotka tekevät työskentelystä suorakäyttöistä. He pyrkivät selvittämään, mitkä ovat kognitiiviset tekijät, jotka synnyttävät tunteen käytön suoruudesta. He esittävät, että tunne syntyy kun itse käyttöliittymän ohjaus vaatii vähemmän kognitiivisia resursseja ja käyttäjä voi keskittyä paremmin itse tehtävään. Heidän mukaansa käytön suoruuden kokemuksen syntyyn vaikuttaa kaksi päätekijää. Ensimmäinen päätekijä on etäisyys käyttäjän aikomuksen ja järjestelmän vaatiman fyysisen toiminnan välillä. Toinen päätekijä on työkalujen ja toiminnan kytkeytyminen toisiinsa.

Edellä mainituista ensimmäinen, käyttäjän aikomuksen ja järjestelmän vaatiman fyysisen toiminnan välinen etäisyys on pieni, kun käyttäjä pääsee yhdellä liikkeellä tai napin painalluksella haluamaansa lopputulokseen. Etäisyyden ollessa suuri, käyttäjän tarvitsee hahmottaa pidempi osasuoritusten polku, joka johtaa lopputulokseen, esim. komentorivillä useasta sanasta muodostuvan komennon ja siihen liittyvien parametrien määrittely. Fyysisen toiminnan lisäksi myös etäisyys järjestelmän tarjoaman palautteen ja käyttäjän ajatteleman lopputuloksen välillä vaikuttaa suorakäyttöisyyden kokemiseen. Kun käyttäjä pystyy helposti tunnistamaan millaisen lopputuloksen hänen toimintansa on järjestelmässä aiheuttanut, sekä miten hyvin lopputulos vastaa haluttua tavoitetta, etäisyys on pieni. Käyttäjän joutuessa tulkitsemaan palautetta tai joutuessa tekemään monimutkaisempia vertailuja palautteen ja tavoitteen välillä, etäisyys on suuri. Pieni etäisyys vähentää käyttäjän kognitiivista kuormitusta ja saa käytön tuntumaan suoremalta.

Toinen päätekijä, toiminnan ja työkalujen kytkeytyminen, vaikuttaa siihen, miten suoraan käyttäjä kokee käsittelevänsä tietokoneen, ohjelman tai käyttöliittymän sijaan ohjelman esittämää tietoa. Muotoilun tapauksessa hyvin toteutetun suorakäyttöisyyden seurauksena käyttäjä kokee muotoilevansa välittömästi kappaletta, sen sijaan, että kokisi säätävänsä käyttöliittymän asetuksia, jotka puolestaan saavat aikaan lopputuloksen. Tähän kokemukseen vaikuttaa se, miten suoraan käyttäjä pääsee käsittelemään mielenkiinnon kohteena olevaa objektia, sekä toisaalta työkalujen metaforan realistisuus, eli miten hyvin työkalujen esitys vastaa sitä miten ne toimivat ja miten niitä käytetään. Työkalujen realistisuuteen liittyy sama ilmiö kuin esim. teatteriesitykseen, jolloin katsojan tulee pystyä uskottelemaan itselleen esityksen olevan todellisuutta uppoutuakseen ja nauttiakseen esityksestä. Käyttöliittymän ollessa kyseessä, käyttäjän tulee voida uskotella itselleen tarjottujen työkalujen olevan todellisia työkaluja, joiden toiminta vastaa niiden käyttämää

metaforaa. Kun virtuaalinen työkalu toimii kuten käyttäjä odottaa, käyttäjä voi uppoutua varsinaiseen työskentelyyn tarvitsematta miettiä työkalujen toiminnan logiikkaa tai tarkoitusta.

Hutchins ja kumppanit nostavat esille myös suorakäyttöisyyden rajoitteita. He huomioivat suorakäyttöisyyden soveltuvan huonosti esim. moniin toistuviin sarjaluontoisiin tehtäviin, joissa toiminnan automatisointi on tehokkaampaa kuin suorakäyttöisyys. Virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun kannalta olennaisena asiana he nostavat esille suorakäyttöisyyden epätarkkuuden. Usein tarkkojen parametrien syöttö tapahtuu helpommin tekstimuotoisena näppäimistöllä kuin suorakäyttöisesti. Epätarkkuudesta johtuvat ongelmat korostuvatkin entisestään siirryttäessä kaksiulotteisesta syötteestä kolmiulotteiseen. Kuten monissa aiemmin luvussa 3 esitellyissä prototyyppilähtöisen tutkimuksen tuloksissa tuotiin esille, suora kolmiulotteinen käyttö lisää syötteen epätarkkuutta ja vaatii joiden rajoitteiden säilyttämistä tai täysin uudenlaisten rajoitteiden toteutusta työskentelyn käytettävyyden parantamiseksi.

Toinen virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun kannalta olennainen Hutchinsin ja kumppaneiden huomio koskee työkalujen ja toiminnan kytkeytymistä. Yleisesti käyttäjän tunteman metaforan hyödyntäminen toiminnallisuuden tai työkalujen toteutuksessa mahdollistaa nopean ohjelmiston käytön oppimisen käyttäjän voidessa hahmottaa ohjelman toiminta todellisesta maailmasta saamansa kokemuksen mukaan. Toisaalta tunnettujen työskentelytapojen imitoiminen mahdollistaa vain jo käytössä olevien toimintatapojen siirtämiseen digitaaliseen muotoon. Liian rajoittunut käyttöliittymäsuunnittelu, jossa kaiken halutaan tukeutuvan aiempaan kokemukseen ja tunnettuihin työskentelytapoihin, jättää usein uuden teknologian mahdollisuudet huomiotta. Uuden teknologian potentiaali on mahdollisuudessa ajatella ja toimia sovellusalueen ongelmien ja työtehtävien parissa aivan uusin tavoin. Uudet mahdollisuudet tulisi huomioida, jottei käytettyjen metaforien realistisuudesta tule mahdollisuuksia rajoittava tekijä. Hutchins ja kumppanit mainitsevat käyttöliittymän käytettävyyteen liittyvän monia ristiriitaisiakin tekijöitä, ja he korostavat, ettei suorakäyttöisyys automaattisesti tee käyttöliittymästä hyvää.

Monessa virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyyppilähtöisen tutkimuksen tapauksessa suorakäyttöisyys on mainittu tärkeänä käyttökokemukseen liittyvänä tekijänä. Esim. Deering nostaa esille HoloSketch –prototyyppijärjestelmän raportoivassa julkaisussaan [Dee95] kolmiulotteinen käyttöliittymän tekevän käytöstä itsestään selvästi kolmiulotteisen geometrian muotoilusta suurempaa kuin vastaava työskentely kaksiulotteisen käyttöliittymän välityksellä.

Suoruutta voidaan virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun saralla edelleen lisätä, mikäli syöttölaitteet ja työkalujen metaforat suunnitellaan hyvin.

Poupyrev ja kumppanit esittelivät artikkelissaan [PWB97] kehittämänsä systemaattisen testausmenetelmän, jonka avulla kolmiulotteisten käyttöliittymien suorakäyttöisyyttä ja käytettävyyttä voidaan mitata yleisesti vertailukelpoisella asteikolla. Testausmenetelmän lähtökohtana on oletus, että mitattava suorakäyttöinen toiminta virtuaaliympäristössä perustuu seuraavan neljän perusaktiviteetin yhdistelmälle: osoittaminen, tarttuminen, siirtäminen, sekä kääntely. Menetelmän kuvauksessa luetellaan myös useita tekijöitä, jotka vaikuttavat kuhunkin osatoimintoon, kuten esim. käsiteltävän kappaleen etäisyys käyttäjästä, kappaleen koko jne. Mitattavien tekijöiden ja toimintojen lisäksi kirjoittajat esittävät listan tekijöistä, joita voidaan mitata ja jotka toimivat asteikkona arvioitaessa käyttöliittymän käytettävyyttä.

Poupyrevin ja kumppaneiden esittämän testausjärjestelyn ongelmana virtuaaliavusteisen suunnittelun kannalta on se, että tehtävät vaikuttavat merkittävästi suorakäyttöisten toimintojen käytettävyyteen. Poupyrev ja Ichikawa ovat suorittaneet esittämänsä testijärjestelyn mukaisesti kahden kolmiulotteiselle käyttöliittymälle suunnitellun valinta ja siirto menetelmän vertailun [PoI99]. Vertailunsa lopputuloksena hekin toteavat käytettävyyden riippuvan tehtävästä, joten geneerisen testauksen tuloksia ei voida suoraan soveltaa erikoistuneisiin tehtäviin. Saman lopputuloksen nostavat esille Bowman ja Hodges tekemässään vastaavassa virtuaaliympäristössä osoittamisen ja kappaleiden siirtelyn vertailussaan. Vertailun lopputuloksena he myös havaitsivat, että usein valintaan ja kappaleen sijoittamiseen soveltuvat toisistaan poikkeavat menetelmät [BoH97].

Rajoitteistaan huolimatta Poupyrevin testausmalli tarjoaa arvokkaan lähtökohdan virtuaalitodellisuusavusteiseen muotoiluun liittyvien perustoimintojen käytettävyyden arviointiin. Omassa tutkimuksessaan Fiorintinon ja kumppanit mittasivat kolmiulotteiseen osoittamiseen ja viivan piirtoon liittyvää tarkkuutta [FMR03]. Mittausten perusteella he suunnittelivat toteuttamaansa virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyyppijärjestelmään työskentelyä helpottavia toimintoja [FMU04]. Esiteltyt parannukset muotoilun menetelmiin koostuivat piirron pakottamisesta tapahtumaan kolmiulotteisen ruudukon mukaan, käyttäjän näkyvyyttä rajoittavien kappaleiden muuntamisesta automaattisesti läpinäkyviksi ja automaattisesta kappaleiden asettelusta. Edellä mainittuja menetelmiä on hyödynnetty jo aiemmin virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyypeissä ja harmittavasti tässä yhteydessä niiden

toimivuutta löydettyjen ongelmien ratkaisuna ei ole lopulta arvioitu millään formaalilla menetelmällä.

4.2 Syötteen ja palautteen monimuotoisuus

Virtuaaliympäristöt pyrkivät synnyttämään käyttäjälle tunteen uppoutumisesta tietokoneen avulla luotuun synteettiseen maailmaan. Uppoutumisen tunnetta voidaan tehostaa käyttämällä virtuaaliympäristön esittämiseen pelkän visuaalisen palautteen lisäksi muitakin palautekanavia, kuten esim. kuuloa ja tuntoa. Toisaalta virtuaalitodellisuudessa toimittaessa perinteiset syötelaitteet kuten näppäimistö ja hiiri, käyvät usein epäkäytännöllisiksi. Näppäimistön ja hiiren sijaan syötelaitteina käytetäänkin laajaa valikoimaa erilaisia laitteita ja mahdollisesti useampia syötekanavia. Edellä mainituista seikoista johtuen virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun yhteydessä monipuolinen syöte- ja palautekanavien huomioiminen on tärkeää.

Virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyypeissä palautekanavista näkö on ylivoimaisesti korostuneimmassa osassa. Usein kolmiulotteisten käyttöliittymien yhteydessä käytetään stereoskooppisen kuvan muodostavia näyttölaitteita, sekä päänsurannan avulla toteutettua immersiiivistä piirtoa siten, että käyttäjä saa aikaan päätään liikuttamalla jatkuvan liikeparallaksin. Virtuaalitodellisuussovelluksissa hyödynnetään usein myös ääntä virtuaalisen maailman esityksen tukena. Myös suunnittelun tarkoitetuissa järjestelmissä ääntä voidaan käyttää tukemaan työskentelyä, mutta tämän tutkielman osalta tarkempi äänen mahdollisuuksien tutkiminen on rajattu käsiteltävien aiheiden ulkopuolelle. Edellä mainittujen lisäksi erityisesti peli- ja virtuaalitodellisuussovelluksissa hyödynnetään joskus myös tuntoaistia, eli tarjotaan haptinen palaute.

Kolmiulotteisten käyttöliittymien tapauksessa stereoskooppisten näyttölaitteiden ja päänsurannan avulla on mahdollista parantaa kolmiulotteista hahmotusta. Erilaisten syvyysvihjeiden, kuten esim. valaistuksen, varjojen, pintatekstuureiden, stereoskooppisuuden ja liikeparallaksin, vaikutusta kolmiulotteiseen hahmottamiseen on tutkittu laajalti. Tutkimuksen myötä on pystytty osoittamaan kolmiulotteisten käyttöliittymien tarjoamien liikeparallaksin ja stereoskooppisen näkymän parantavan kolmiulotteisten muotojen hahmottamista [WaF96 ja HSF97]. Poritz ja Booth puolestaan osoittivat omassa tutkimuksessaan [BoB97] stereoskooppisuuden parantavan selkeästi 3 DOF osoitinlaitteella tapahtuvaa kolmiulotteisen pisteen osoitusta ja kolmiulotteisen

reitin seuranta. Mielenkiintoisena tuloksena heidän mukaansa päänsurannan mahdollistama liikeparallaksi taas ei kyseisissä tehtävissä juurikaan vaikuttanut käyttäjien suorituksiin.

Saavutettavien hyötyjen lisäksi stereoskooppisen kuvan muodostuksen yhteydessä tulee huomioda usein käytännön kokemusten kautta havaitut stereoskooppisiin näyttöihin ja päänsurantaan liittyvät tekniset rajoitteet. Stereoskooppisten näyttötekniikoiden rajoitteet osaltaan huonontavat järjestelmien käytettävyyttä kokonaisuudessaan, eli saavutettu kolmiulotteisen hahmottamisen paraneminen ei tule ilman kustannuksia. Stereoskooppisen kuvan muodostuksen ja päänsurannan puutteet ovat usein syinä virtuaalitodellisuuden joillekin käyttäjille aiheuttamaan pahoinvointiin. Stereoskooppisissa näytöissä käytettävät suljinlasit ja katseen tarkennuspisteen ja virtuaalisten kappaleiden sijainnin välinen ristiriita, yhdistettynä kuvan päivityksen viiveeseen ja virheisiin pään seurannassa, saattavat tehdä virtuaalitodellisuussovellusten käyttökokemuksesta erittäin epämiellyttävää.

Kompromissi käytettävyyden ja erikoislaitteistojen suoman rikkaamman palautteen välillä tulee visuaalisen palautteen lisäksi selkeästi esille myös tuntopalautteen tarjoavien laitteiden kohdalla. Tuntopalautteen puuttuminen on hyvin usein nostettu virtuaalitodellisuussovelluksissa merkittäväksi rajoitteeksi. Ratkaisuna on kehitetty erilaisia palautelaitteita kokeillen monia erilaisia tapoja synnyttää tuntopalautetta. Yrityksistä huolimatta realistisen ja käytettävän tuntopalautteen tarjoaminen käyttäjälle on osoittautunut toistaiseksi ratkeamattomaksi ongelmaksi. Nykyisellään tuntopalaute pystytään parhaimmillaankin tarjoamaan vain hyvin rajatulla alueella rajoittuen yksittäisten sormien tai käden tuntopalautteeseen [JVG01]. Tuntopalautelaitteistoista on saatavissa jonkin verran raportoituja kokemuksia, mutta pääosiltaan voidaan sanoa, että laitteiden kömpelyydestä johtuen niillä saavutettavat työskentelyn hyödyt jäävät usein pienemmiksi kuin niiden aiheuttamat negatiivinen vaikutus käytettävyyteen.

Virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun yhteydessä tuntopalautteen puuttuminen tulisi kuitenkin huomioda järjestelmää suunniteltaessa. Virtuaalitodellisuustutkimuksessa jossain määrin tutkittu ja käytetty ratkaisu puuttuvan tuntopalautteen korvaamiseksi on käyttää jotain toista palautekanavaa sen sijaan. Tuntopalautteen puuttumista voidaan paikata käyttämällä ääntä ja visuaalisia vihjeitä kuvaamaan kappaleiden törmäyksiä tai esim. pintojen karheutta. Joissakin tapauksissa on myös käytetty passiivisia fyysisiä kappaleita tuntopalautteen synnyttämiseen. Muotoilun tukena tämä ratkaisu toimii kuitenkin huonosti, sillä tarkoituksena on työskennellä muuttuvien pintojen ja kappaleiden parissa. Mine ja kumppanit esittelevät artikkelissaan [MFB97]

tapoja, joilla käyttäjän oman kehon tarjoamaa fyysistä tuntopalautetta ja kehon jäsenten asentojen tuntua voidaan käyttää virtuaalitodellisuusjärjestelmissä hyväksi. He esittävät lähinnä kehon käyttämistä työskentelyn viitekehysten selkeyttämiseen ja toisaalta toiminnallisuuden valintojen kiinnittämistä käyttäjän kehoon.

Syötteen osalta perinteisten suunnitteluohjelmistojen kaksiulotteisista käyttöliittymistä poiketen virtuaaliympäristöön tarkoitetut suunnitteluohjelmistot tukevat usein kaksikäätistä työskentelyä, mikä hiiri- ja näppäimistösyötteen käydessä epäkäytännölliseksi onkin luontevaa. Kaksikäätisen työskentelyn lisäksi perinteisten syötelaitteiden, erityisesti tekstuaaliseen syötteeseen tarkoitetun näppäimistön jäädessä pois käytöstä, virtuaaliympäristöissä tapahtuva työskentely saattaa vaatia vaihtoehtoisten syötekanavien hyödyntämistä. Vaihtoehtoisia syötekanavia tarvitaan usein erityisesti toimintojen, jotka eivät ole suorakäyttöisiä, tueksi. Muotoiluun tarkoitetuissa ohjelmistoissa kyseisiä toimintoja ovat esim. työkalujen valinta, työskentelytilan vaihto jne. Kirjallisuudesta löytyy esimerkkejä, joissa käden asentoja, eleitä, puhetta ja erilaisia sijaisesineitä on käytetty työskentelyä tukevan syötteen antamiseen.

COVIRDS-prototyypin konseptissa, joka esiteltiin luvussa 3.3.6, tavoitteena oli erityisesti äänisyötteen yhdistäminen tukemaan kolmiulotteista käyttöliittymää. Suunnitellulla prototyypillä käyttäjän oli tarkoitus pystyä muotoilemaan yksinkertaisia CSG-muotoisia kappaleita ja vapaamuotoisia pintoja. Tavoitteena prototyypin ideaa kuvanneissa julkaisuissa oli jäljitellä ihmisten välisen kommunikaation muotoja virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyypin käyttöliittymässä. Kuten prototyypilähtöistä tutkimusta esittelevän luvun puolella tuotiin esille, alkuperäisissä julkaisuissa tuloksista selkein oli prototyypin vaatimusmäärittely ja prototyyppiä visioiva konsepti. Ilmeisesti ainakin joitakin esitettyjä ideoita oli toteutettu ja myös jatkokehitetty, kuten käy esille myöhemmin julkaistuista prototyypin käytettävyyttä arvioimaan pyrkivistä julkaisuista. Käytettävyyden arvioita on esitelty kahdessa julkaisussa [CDG98 ja CMG02], joista ensimmäinen keskittyy toiminnallisuuden kvalitatiiviseen arviointiin ja toinen pyrkii todentamaan käyttöliittymän tehokkuutta. Ensimmäisessä, kvalitatiivisessa arvioinnissa, käyttäjiä pyydettiin arvostelemaan prototyypin toimintojen intuitiivisuutta arvosanoin. Lopputuloksista käy ilmi, että testiryhmän muodostivat ainoastaan kaksi tarkemmin määrittelemätöntä käyttäjää. Lähes olemattomasta testiryhmän koosta huolimatta julkaisun kirjoittajat esittävät niiden perusteella voitavan tunnistaa tehtäväkohtaisesti parhaimmat syötekanavien yhdistelmät. Toisessa suoritusarvoja mittaavassa tutkimuksessaan julkaisun kirjoittajat eivät määrittele testiryhmän kokoa tai mitään muutaakaan testaajiin liittyviä ominaisuuksia millään tavalla. Kyseisessä

julkaisussa virtuaalitodellisuusavusteisella prototyypillä mitattuja tehtävien suoritusarvoja ei vertailla mihinkään olemassa olevaan CAD-ohjelmaan, vaan alun perin virtuaalitodellisuusympäristössä käytettäväksi tarkoitettuun samaiseen COVIRDS-prototyyppiin, jota käytetään vertailun vuoksi perinteisen hiiren ja näppäimistön avulla. Alun perin virtuaalitodellisuudessa tarkoitettua prototyypin käyttö kaksikulotteisella käyttöliittymällä tuskin vastaa kovin hyvin työskentelyä olemassa olevilla CAD-ohjelmilla, mikä yhdessä epäselvän testikokoonpanon ja testiotoksen kanssa saavat tulokset vaikuttamaan melko epäluotettavilta. Tulosten tulkinnanvaraisuudesta huolimatta, julkaisun kirjoittajat esittivät heidän kehittämänsä virtuaalitodellisuusavusteisen prototyypin tehostavan muotoilun tehtäviä moninkertaisesti.

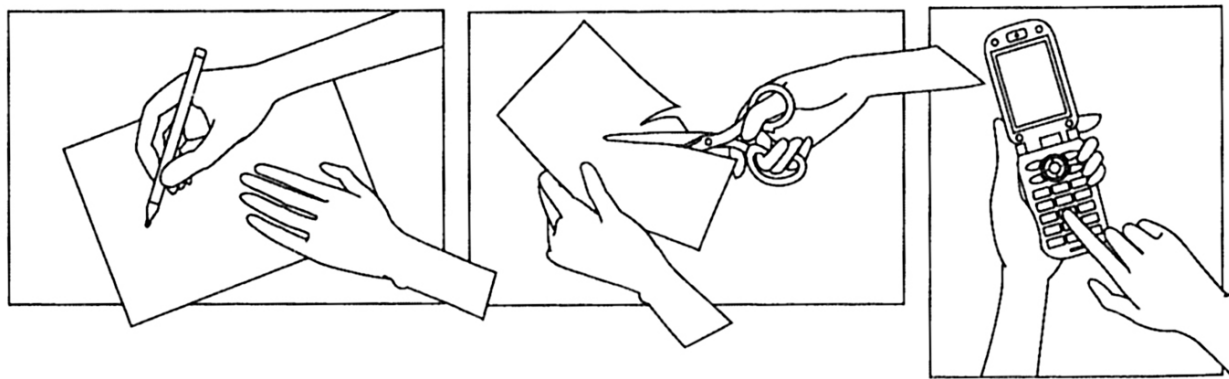
Yllättävää kyllä, kuten Bowman ja kumppanit tuovat kolmiulotteisia käyttöliittymiä laajasti käsittelevässä kirjassaan esille, monimuotoisesta syötteiden käytöstä kolmiulotteisten käyttöliittymien yhteydessä on löydettävissä erittäin vähän, jos lainkaan, edellä esitetyn COVIRDS-prototyypin testauksen lisäksi varteen otettavaa käytettävyytutkimusta [BKL05]. Kuten jo edellä mainittiin, esimerkkejä vaihtoehtoisten syötteiden käytöstä kyllä löytyy, jopa juuri virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelunkin prototyyppien yhteydessä, mutta tällä alueella kaivattaisiin kipeästi käytettävyytutkimusta, joka pystyisi antamaan konkreettisia osoituksia ratkaisujen toimivuudesta.

Yleisesti hyödynnettäessä monipuolisesti eri syöte- ja palautekanavia, tulee huomiota kiinnittää eri palautteiden ristiriidattomuuteen. Käyttäjillä on selkeitä odotuksia palautteiden vastaavuudesta heidän antamaansa syötteeseen. Erityisesti spatiaalisen ja temporaalisen vasteen kohdalla käyttäjillä on voimakkaat odotukset näiden välisistä yhteyksistä. Mikäli järjestelmän palautteen ja syötteen välillä on ristiriitaisuutta, esim. käyttäjän liikuttaessa kättään vasemmalle kappaleet virtuaaliympäristössä liikkuvatkin oikealle, käyttäjien suoritus heikkenee merkittävästi [SmS87]. Virtuaalitodellisuusjärjestelmien kolmiulotteisten käyttöliittymien ollessa normaaleja käyttöliittymiä kokonaisvaltaisempia, syötteen ja palautteen väliset virheet saattavat aiheuttaa erittäin voimakkaitakin epämiellyttäviä tuntemuksia tai jopa pahoinvointioireita. Yleisimpänä syynä pahoinvointiin VR-järjestelmiä käytettäessä pidetäänkin näköaistihavaintojen ja muiden aistien, erityisesti tasapainoelimistön havaintojen ristiriitaisuutta [LaV00].

4.3 Kaksikäätinen työskentely

Luonnollisessa ympäristössä ihmiset työskentelevät fyysisten työkalujen avulla suorittaen useimmat tehtävänsä kaksikäätisesti. Nykyisellään kaksikäätiset käyttöliittymät näyttävätkin olevan yleistymässä. Esimerkkinä yleistymisestä voidaan nähdä esim. Applen esittelemä iPhoneen käyttöliittymä ja Microsoftin panostus multitouch käyttöliittymien tutkimukseen. Virtuaalitodellisuuden myötä käyttöliittymän muuttuessa kehollisemmaksi ja tavoiteltaessa käytön luonnollisuutta ja tehokkuutta, käyttöliittymässä kaksikäätisyyden huomioiminen nousee merkittäväksi tekijäksi.

Usein kaksikäätisyyttä käsittelevän tutkimuksen teoreettisen pohjan muodostaa Guiardin tutkimus [Gui87] käsien välisen työnjaon malleista. Guiardin esittämä malli fyysisten tehtävien jakautumisesta yksikäätisiin, symmetrisesti kaksikäätisiin ja asymmetrisesti kaksikäätisiin tehtäviin muodostaakin selkeän perustan kaksikäätisten käyttöliittymien suunnittelulle ja analyysille [BKL05]. Yksikäätiset tehtävät suoritetaan luonnollisesti käyttäen vain yhtä kättä, usein motoristisesti vahvempaa, eli dominoivaa kättä. Käyttäjän ollessa oikeakätinen, sanotaan oikean käden olevan dominoiva. Esimerkkinä yksikäätisestä tehtävästä toimii vaikkapa tikan heitto. Symmetrisissä kaksikäätisissä tehtävissä käyttäjän molemmat kädet suorittavat identtistä toimea joko synkronisesti, kuten esim. nostettaessa suuria esineitä, tai asynkronisesti kuten esim. kirjoitettaessa näppäimistöllä. Symmetrisistä tehtävistä poiketen, asymmetrisissä kaksikäätisissä tehtävissä käsillä on toisistaan poikkeavat tehtävät, jotka kuitenkin tapahtuvat käsien välisessä tarkassa keskinäisessä koordinaatiossa. Hyvä esimerkki asymmetrisestä kaksikäätisestä työskentelystä on kynällä kirjoittaminen paperille. Motorisesti heikompi käsi kontrolloi paperin orientaatiota ja auttaa näin dominoivaa kättä suorittamaan motorisesti tarkempaa tehtävää eli kirjainten piirtämistä kynällä. Kuvassa 13 muutamia muitakin esimerkkejä asymmetrisistä kaksikäätisistä tehtävistä.



Kuva 13. Esimerkkejä asymmetrisistä kaksikäsisistä tehtävistä.

Guiard tunnisti kolme periaatetta, jotka määrittelevät käsien roolit asymmetrisessä kaksikäsisessä työskentelyssä:

1. Motoristisesti heikompi käsi asemoi jatkuvasti tehtävän aikana spatiaalista viitekehystä, eli tehtävän toiminta-aluetta kokonaisuudessaan, asetellen sen sopivaksi dominoivan käden toiminnalle. Esim. kirjoittaessa motoristisesti heikompi käsi asettelee jatkuvasti paperia otolliseen asentoon kirjoittamiselle.
2. Dominoiva käsi tuottaa hienojakoisia tarkkuusliikkeitä, motoristisesti heikomman käden suorittaessa karkean luokan manipulaatiota.
3. Motoristisesti heikomman käden toiminta aloittaa asymmetrisen kaksikäsisen tehtävän suorittamisen.

Erityisen tärkeää kaksikäisiä kolmiulotteisia käyttöliittymiä suunnitellessa on huomioida, että normaalisti toimiessaan käsien välinen työnjako on dynaamisesti vaihtuva. Normaalisti monimutkaisissa tehtävissä käsien työnjako vaihtelee nopeastikin asymmetrisen ja symmetrisen työskentelyn välillä. Tehokkaan kaksikäisen käyttöliittymän tulisi tukea joustavasti erilaisia tapoja työskennellä ja mahdollistaa sulava siirtyminen niiden välillä [BKL05].

Guiardin tutkimuksen jälkeen on julkaistu paljon käytettävyystudkimusta, jossa analysoidaan kaksikäistä työskentelyä ja sen etuja kolmiulotteisten käyttöliittymien osalta. Jo ennen Guiardin artikkelin julkaisua, Buxton ja Myers osoittivat symmetriseen kaksikäiseen työnjakoon painottuvassa tutkimuksessaan [BuM86], jossa vertailtiin virtuaalisten objektien sijoittelua ja sanojen etsimistä dokumentista, kaksikäisen työskentelyn olevan tehokkaampaa kuin yksikäisen. He osoittivat, että erityisesti tehokkuutta saavutetaan, mikäli käyttäjät suorittivat molemmilla

käsillä tehtäviä rinnakkain, molemman käden ohjatessa omaa osaansa toiminnasta. Heidän kokeessaan käyttäjien oli mahdollista suorittaa kappaleen kohdistaminen dominoivalla kädellä ja samaan aikaan muuttaa sijoitettavan kappaleen skaalaa liukukytkimellä toisella kädellä. He osoittivat, ettei edellä mainittujen kahden tehtävän suorittaminen rinnakkain kaksikäsisesti juurikaan lisännyt käyttäjien kognitiivista kuormitusta verrattuna tehtävien sarjalliseen suoritukseen. Lisäksi kaksikäsinen työskentely ei vaikeuttanut käytön opetteluun, noviisikäyttäjät oppivat käyttämään kaksikästistä käyttöliittymää yhtä nopeasti kuin yksikästistäkin. Heidän tekemänsä suoritusten vertailu perustui testikäyttäjien suoritusten instrumentointiin ja suorituservojen tilastolliseen vertailuun.

Läheisemmin kaksikäsiiseen työskentelyyn juuri virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnittelun kontekstissa liittyvä tutkimus on Cutlerin, Fröhlichin ja Hanrahanin esittelemä kaksikäsiiseen suorakäyttöisyyteen keskittyvä prototyyppijärjestelmä vuodelta 1997 [CFH97]. Kyseisessä prototyyppijärjestelmässä kehitettiin Guiardin esittämän mallin mukaisesti suppea kolmiulotteinen käyttöliittymä, jossa testattiin sovelluksina lääketieteellisen toimenpiteen harjoittelua ja auton kokoonpanon tarkastelua. Heidän prototyyppinsä ei toteuttanut varsinaisesti mallin muokkaukseen toimintoja, vaan kokonaisten kappaleiden valintaan, siirtelyyn ja skaalaukseen liittyviä toiminnallisuuksia. Vaikkakaan prototyyppin avulla ei suoritettu formaalia käytettävyydestä tutkimusta, erittäin mielenkiintoisena tuloksena kirjoittajat nostavat esille huomion, miten jo pelkästään molempien käsien itsenäinen yhtäaikainen työskentely osoittautui merkittäväksi työskentelyä muuttaneeksi tekijäksi. Prototyyppin kehittäjien yllätykseksi käyttäjät ryhtyivät käyttämään yksikästisiksi tarkoitettujen toiminnallisuuksia yhdistelminä, näin luovasti mahdollistaen kaksikäsinen työskentely. Käyttäjät esimerkiksi yhdistivät koko näkymän siirtelyn motoristisesti heikommalla kädellä yhtäaikaaisesti kappaleen sijoitteluun dominoivalla kädellä, eli toimien juuri Guiardin asymmetrisen käsien välisen työnjaon mukaisesti.

Omalla neurokirurgiseen työskentelyyn tarkoitetulla prototyyppillään Hinkley ja kumppanit suorittivat käytettävyydestä tutkimusta [HPP98], joka myös verifioi Guiardin asymmetrisen kaksikäsinen työskentelyn mallin soveltuvuutta kolmiulotteisiin käyttöliittymiin. Heidän toteuttamallaan prototyyppillä kirurgit pystyivät tarkastelemaan aivojen läpileikkausta, käyttäen kolmiulotteisesti seurattua nukun päätä ja leikkaustasoa kuvaavaa pleksilevyä suorakäyttöisinä leikkaustason määrittelevinä syöttölaitteina. Vaikkei vuorovaikutusmallin käytettävyyttä mitattu formaalilla menetelmällä, laajan todellisilla loppukäyttäjillä suoritettua koekäytön perusteella käytettävyyden todetaan olleen hyvä. Lisäksi he raportoivat huomion, jonka mukaan kaksikäsinen

työskentely myös auttaa virtuaalisen ympäristön kolmiulotteista avaruudellista hahmotusta. Heidän mukaansa käyttäjän avaruudellisten suhteiden hahmotus paranee kun käyttäjän käsien väliset suhteet antavat lisävihjeitä kolmiulotteisen tilan rakenteesta.

Balakrishnan ja Kurtenbach raportoivat koesarjasta [BaK99], jossa he testasivat kaksikäätistä työskentelyä kolmiulotteisten virtuaalisten kappaleiden osoittamisen, kappaleiden sijoittelun ja kappaleiden maalaamisen yhteydessä. Heidän kokeessaan motorisesti heikompi käsi ohjasi tavallisella hiirellä virtuaalista kameraa ja dominoiva käsi suoritti varsinaisen tehtävän toisella normaalilla hiirellä tai piirtoalustalla. Sekä valinta, että kappaleiden sijoitustehtävistä, kaksikäätisen ja yksikäätisen käyttöliittymän vertailu perustui mitattuihin suoritusarvoihin. Vertailu osoitti käyttäjien suorittavan tehtävät jopa 20 % nopeammin kaksikäätisen käyttöliittymän avulla verrattuna yksikäätiseen käyttöliittymään, jossa katselupisteen asettelu ja valinta tai kappaleen sijoittelu tapahtuivat sarjallisesti dominoivan käden ohjaamina. Kolmannessa, kolmiulotteisten kappaleiden maalaustehtävässä, kerättiin käyttäjiltä vain kvalitatiivista palautetta käyttökokemuksesta. Palautteen mukaan käyttäjät suosivat selkeästi kaksikäätistä käyttöliittymää, vaikkei se välttämättä osoittautunut aina tehokkaammaksi. Tulos antaa ymmärtää, että kaksikäätisen käyttöliittymän myötä työskentely vastaa paremmin ihmisten normaalia tapaa työskennellä, mikä saa käyttöliittymän tuntumaan luonnollisemmalta ja mukavammalta. Käyttäjän kannalta usein käytön miellyttävyys onkin yhtä tärkeää kuin vain mitattavissa oleva tehokkuus.

Uusimpina kaksikäätisten käyttöliittymien käytettävyyttä mittaavina tutkimuksina Latulipe ja kumppanit [LKM06] vertailivat erilaisia kaksikäätisen työskentelyn malleja ja yksikäätistä työskentelyä spline-käyrien muokkauksessa. Heidän testaamansa kaksikäätinen käyttöliittymä perustui kahden hiiren käyttöön. Heidän testauksessaan kaksikäätinen symmetrinen työnjako oli tehokkain ja käyttäjien eniten suosima. Ulinski ja kumppanit [UZW07] taas testasivat kolmiulotteisten partikkelijoukkojen valintaan tarkoitetun kuution käsittelyä 6DOF syötelaitteilla ja erilaisilla kaksikäätisen työnjaon malleilla, verraten niitä myös yksikäätisen työskentelyyn. Heidän testinsä osoittivat asymmetrisen kaksikäätisen työskentelyn olevan vähiten fyysisesti rasittava ja symmetrisen kaksikäätisen työskentelyn olevan tarkin ja eniten käyttäjien suosima. Yleisesti kaksikäätinen työskentely näyttää tarjoavan etuja yksikäätiseen verrattuna, mutta soveliaain kaksikäätisen työskentelyn malli näyttäisi riippuvan tehtävästä ja toiminnallisuuden toteutuksesta.

4.4 Prototyyppejä vertaileva tutkimus

Yksi tapa arvioida kehitettyjen uusien kolmiulotteisten käyttöliittymien käytettävyyttä ja soveltuvuutta muotoilun tehtäviin on prototyyppien vertailu keskenään todellisessa koekäytössä. Kirjallisuudesta löytyy yksi esimerkki tällaisesta vertailevasta tutkimuksesta. Kyseessä on Deisingerin ja kumppaneiden tutkimus [DBW00], jossa käyttäjätestauksen avulla vertaillaan kolmea Fraunhofer-instituutin ja Saksan teknillisen tutkimuskeskuksen kehittämää virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun prototyyppiä. Tutkimuksessa testikäyttäjinä oli 36 suunnittelun ammattilaista ja opiskelijaa.

Testattuna oli kaksi melko yksinkertaista prototyyppiä, ja yksi monipuolisemmin muotoilun toiminnallisuuksia sisältänyt VE-CAD –niminen järjestelmä. Yksinkertaisista prototyypeistä ensimmäinen, Naegeli RT, tarjoaa käyttäjille mahdollisuuden muotoilla kappaleita pursottamalla virtuaalista vaahtoa 3 DOF ohjaimella ja poistamalla aiemmin pursotettua materiaalia. Toinen yksinkertainen prototyyppi, Lotus, rakentuu paperin leikkaus ja liimaus metaforan varaan, jonka mukaisesti käyttäjä voi muodostaa tasomaisia polygoneja ja yhdistellä niitä aiemmin luotuihin polygoneihin. Kolmas, monipuolisemmin vapaamuotoisten pintojen muotoiluun tarkoitettu, tässä artikkelissa nimellä VE-CAD kulkeva, prototyyppi vaikuttaisi olevan sama, tai ainakin hyvin samanlainen, kuin prototyyppilähtöisen tutkimuksen puolella luvussa 3.4.1 esitelty FreeDrawer -järjestelmä.

Testauksessa käyttäjät saivat vapaasti kokeilla kutakin CAVE-laitteistolla toimivaa prototyyppiä tunnin ajan ilman ennalta määrättyä tehtävää tai muotoilun aihetta. Testauksen aikana ja sen jälkeen käyttäjien käyttökokemuksista kerättiin kvalitatiivista dataa haastatteluilla ja pyytäen käyttäjiä pisteyttämään järjestelmien ominaisuuksia. Pisteytyksen lopputuloksena käyttäjät pitivät Naegeli RT ja VE-CAD –prototyyppejä yhtä hyvinä huolimatta niiden hyvin erilaisista vuorovaikutusmalleista. Naegeli RT ja VE-CAD saivat kokonaisarvosanoiksi 2,4 asteikolla 1-3, Lotuksen kokonaisarvosanan ollessa sen sijaan vain 1,5. Mielenkiintoisesti kokeneimmat CAD-työskentelyn ammattilaiset arvostivat materiaalin pursotukseen keskittyneen Naegeli RT –prototyypin muita käyttäjäryhmiä selkeästi korkeammalle. Kokonaisuudessaan prototyyppien vertailusta ei tarjota kuitenkaan kovin paljon selkeitä johtopäätöksiä. Tärkeimpinä käytettävyyteen liittyvinä huomioina artikkelin kirjoittavat nostavat esille tarpeen rajoittaa syötteen vapausasteita työskenneltäessä useamman vapausasteen sallivilla syöttölaitteilla ja tarpeen pystyä tukemaan käsiä esim. työpöytään hienomotorisen tarkkuuden parantamiseksi. Artikkelin kirjoittajien huomioissa korostetaan myös langattomien syöttölaitteiden välttämättömyyttä, jotta käytöstä

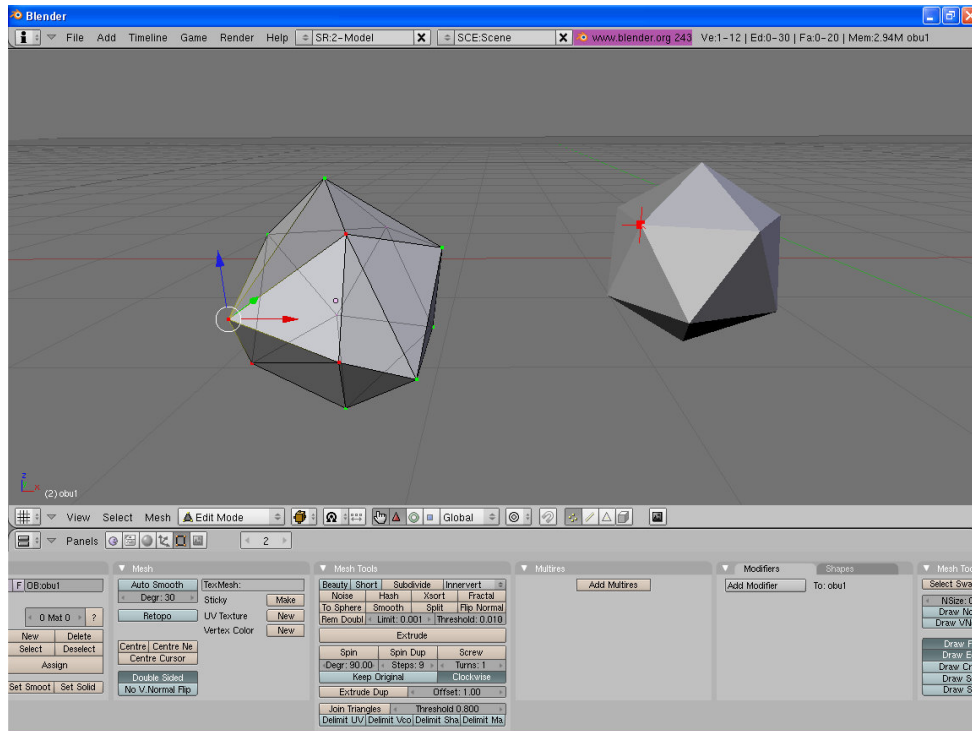
saataisiin riittävän sujuvaa. Lisäksi he nostivat esille tarpeen riittävän monipuolisten työkalujen ja toiminnallisuuden sisällyttämisestä prototyyppeihin, jotta ne kattavat todellisten työtehtävien asettamat toiminnallisuuden tarpeet.

4.5 Kehitetty testiskenaario ja alustavia tuloksia

Luvussa 3.5. esitellyn prototyyppijärjestelmän avulla suunniteltiin myös käytettävyystestaus, jossa tavoitteena oli päästä vertailemaan perinteistä kaksiulotteista käyttöliittymää ja kolmiulotteista virtuaaliympäristöön toteutettua käyttöliittymää muotoilun tehtävissä. Kyseisessä käytettävyystestauksessa tavoitteena oli kerätä vertailukelpoista kvalitatiivista ja kvantitatiivista dataa liittyen työskentelyn tehokkuuteen ja käyttökokemukseen molemmilla käyttöliittymän malleilla. Tässä luvussa esitellään käytettävyysskokeen koeasettelu, järjestelyt ja alustavan testauksen tulokset. Kyseinen testiasetelma ja alustavat tulokset on esitelty artikkelissa [HST07], jonka pääkirjoittajana tämän tutkielman kirjoittaja toimi.

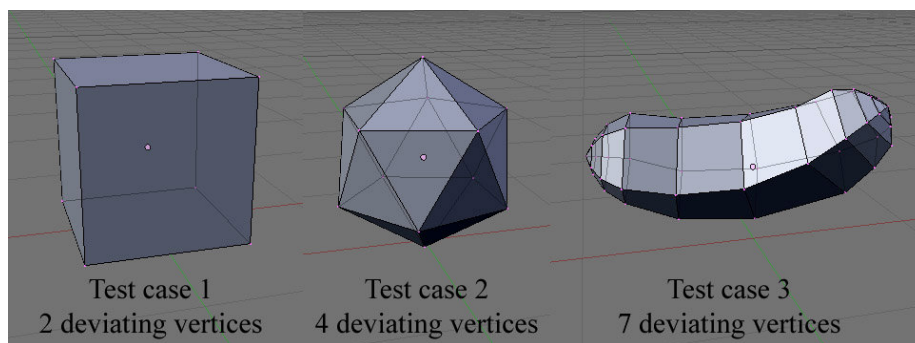
Testaus perustui avoimen lähdekoodin projektina kehitetyn Blender- mallinnus- ja animaatio-ohjelman siirtoon toimimaan myös virtuaaliympäristössä. Virtuaaliympäristössä tapahtuvaa käyttöä varten ohjelman näkymä piirrettiin stereoskooppisesti CAVE -tyyppiseen virtuaaliympäristöön siten, että päänseurannan avulla suunniteltavat kappaleet vaikuttavat olevan osa käyttäjän fyysistä ympäristöä. Käyttäjä pystyi tutkimaan suunniteltavia kappaleita liikkumalla vapaasti niiden ympärillä. Virtuaaliympäristössä tapahtuvan tarkastelun lisäksi virtuaalitodellisuudessa toimiva versio ohjelmasta tarjosi mahdollisuuden muotoilla kappaleita siirrellen kappaleen yksittäisiä kulmapisteitä kolmiulotteisesti seuratus osoitinlaitteen avulla. Testauksessa haluttiin vertailla mahdollisimman perustavanlaatuista ja rajattua muotoiluun liittyvää toimintaa, mistä johtuen toteutuksessa keskityttiin muotoiluun vain yksittäisiä kulmapisteitä siirrellen. Immersiivisen stereoskooppisen piirron ja kolmiulotteisen syötteen lisäksi virtuaaliympäristön kolmiulotteinen käyttöliittymä haluttiin pitää identtisenä kaksiulotteisen hiirin, näppäimistön ja monitorin käytölle tarkoitetun ohjelman alkuperäiseen käyttöliittymään verrattuna. Tällä valinnalla haluttiin varmistaa näiden kahden käyttöliittymän vertailukelpoisuutta.

Testiskenaariossa ohjelmassa oli nähtävissä kaksi kappaletta. Käyttäjien haluttiin muokkaavan toisesta kappaleesta toista, referenssiksi annettua kappaletta vastaava. Kuvassa 14 on ohjelman käyttöliittymän lisäksi nähtävissä vasemmalla kappale, jota käyttäjän on tarkoitus muotoilla ja oikealla referenssikappale.



Kuva 14. Testiskenaariossa näkyvät kaksi kappaletta. Vasemmalla muotoiltava kappale ja oikealla referenssikappale.

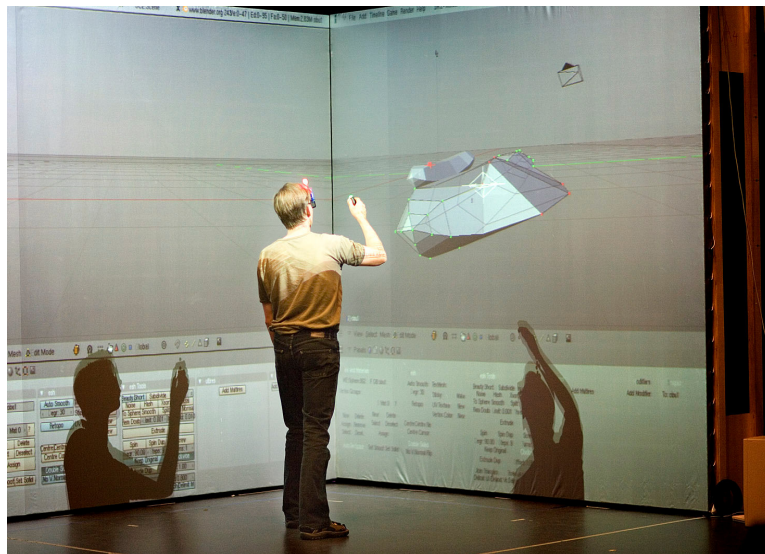
Käyttäjän muotoileman kappaleen kaikki kulmapisteet oli värikoodattu sen mukaan, vastasiko niiden sijainti kulmapisteiden sijaintia referenssikappaleessa. Punainen väri osoitti kyseisen kulmapisteiden sijainnin poikkeavan referenssikappaleesta ja vihreä väri kertoi kulmapisteiden olevan sijoitettu oikein. Kuten kuvassa 14 näkyy, referenssikappaleessa korostettiin käyttäjän valitsema kulmapiste käyttäen samaa, edellä kuvattua värikoodausta. Testissä käyttäjiä pyydettiin suorittamaan kolme erillistä muotoilutehtävää molemmilla käyttöliittymillä. Kuvassa 15 näkyy kolmessa eri testitapauksessa käytetyt referenssikappaleiden muodot, sekä muotoiltavassa kappaleessa poikkeavien kulmapisteiden lukumäärä.



Kuva 15. Kolmessa testitapauksessa käytetyt kappaleet, sekä poikkeavien kulmapisteiden lukumäärät

Tulosten vertailtavuuden vuoksi kaikki testikäyttäjät suorittivat samojen kappaleiden muotoilun molemmilla käyttöliittymillä. Oppimisen vaikutus toisesta käyttöliittymästä toiseen pyrittiin tasoittamaan vaihtelemalla ensimmäisenä testattavaa käyttöliittymää käyttäjäkohtaisesti.

Kaksiulotteista käyttöliittymää testatessaan käyttäjät työskentelivät normaalilla PC-kokoonpanolla. Heidän käytössään oli kolminappinen hiiri, jonka vasemmalla napilla kulmapisteet valittiin, oikealla napilla siirrettiin valittuja kulmapisteitä ja keskinapilla siirrettiin katselupistettä. Käyttäjien oli mahdollista käyttää myös ohjelmassa normaalisti tarjolla olevia pikanäppäimiä katselupisteen siirtelyyn. Ohjelman normaalista toiminnasta poiketen käyttäjiä pyydettiin tekemään muotoilu siirtäen vain yhtä kulmapistettä kerrallaan. Virtuaaliympäristössä käyttäjä osoitti, tarttui ja ohjasi kulmapisteitä 3 DOF kamerapohjaisesti seuratulla osoitinlaitteella, kuten kuvassa 16 näkyy. Luvussa 3.5 on kuvattu virtuaaliympäristön ja kolmiulotteisen käyttöliittymän rakennetta tarkemmin.

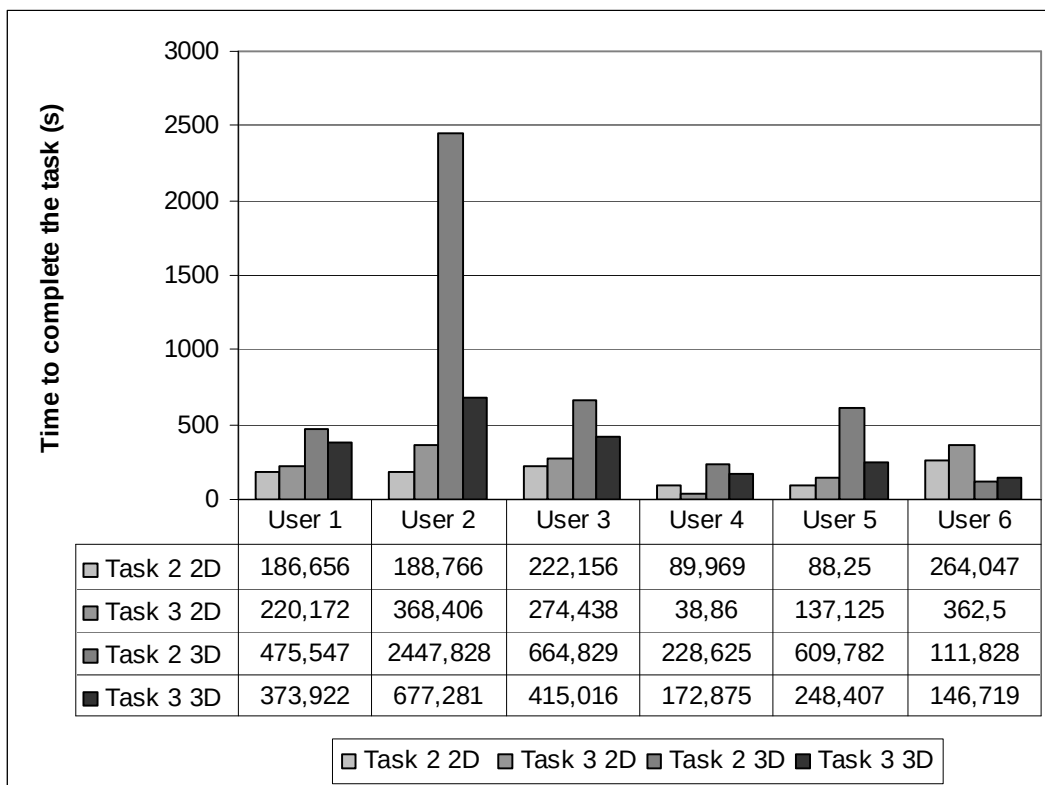


Kuva 16. Käyttäjä suorittaa koetehtävää virtuaaliympäristössä.

Testauksen aikana käyttäjien toimintaa seurattiin automaattisen instrumentoinnin avulla. Kaikki käyttäjien operaatiot ja niiden kestot kirjattiin ylös. Tallennetuista suorituksista voitiin näin koostaa mm. katselupisteen liikkeitä kuvaavia visualisointeja ja suoritusten kestoja. Automaattisen suorituksen kirjauksen lisäksi käyttökokemukseen ja käytettävyyteen liittyvää kvalitatiivista dataa kerättiin käyttäjien haastattelun ja kyselylomakkeiden avulla. Kyselylomakkeissa käyttäjiä pyydettiin arvioimaan mm. käyttöliittymien miellyttävyyttä, tehokkuutta ja tarkkuutta käyttäen Likertin asteikkoa.

Suunnitellulla testiasetelmalla suoritettiin pienimuotoinen testaus. Kyseiseen testaukseen osallistui kuusi testihenkilöä, joista kaikilla oli jonkin verran kokemusta CAD-työskentelystä. Kuvan 17 taulukossa on nähtävissä kyseisten käyttäjien kokonaissuoritusten kestot testitapauksilla 2 ja 3 molemmilla käyttöliittymillä. Kuvassa 15 näkyvä testitapaus 1 oli varattu käyttäjien opastamiseen, eikä sitä suoritettaessa käyttäjiä pyydetty suorittamaan tehtävää mahdollisimman nopeasti, kuten tapauksissa 2 ja 3.

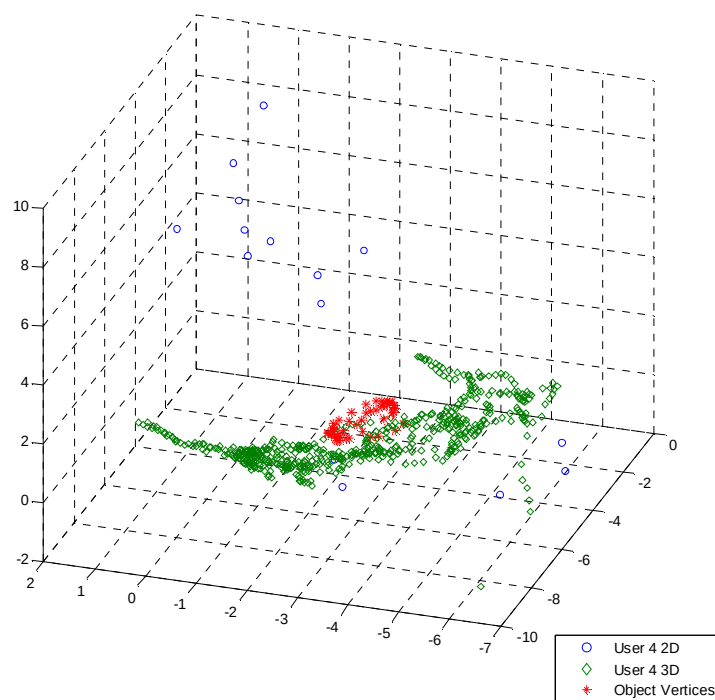
Testauksen tuloksista voidaan todeta kolmiulotteisen käyttöliittymällä tapahtuvien suoritusten olevan lähes poikkeuksetta hitaampia. Vain yksi koehenkilö suoritti tehtävät nopeammin käyttäen kolmiulotteista käyttöliittymää. Poiketen alustavista odotuksista, suorituksiin tarvittu kokonaisaika kolmiulotteisella käyttöliittymällä ei ollut suoraan suhteessa kappaleen monimutkaisuuteen. Tehtävän 2, jossa tarvittiin pienempi määrä kulmapisteiden korjauksia, suorittamiseen kului kaikilta testikäyttäjiltä yhtä lukuun ottamatta enemmän aikaa kuin tehtävän 3. Tähän sinänsä mielenkiintoiseen tulokseen ei löydetty selkeää selitystä. Vaikuttava tekijä saattoi olla tehtävässä 3 käytetyn kappaleen pinnan jatkuvampi luonne verrattuna tehtävän 2 kappaleeseen. Jatkuvassa pinnassa yksittäisten pisteiden oikea paikka saattaa olla helpompi havaita pinnan jatkuvuuden perusteella.



Kuva 17. Testikäyttäjien kokonaissuoritusten kestot.

Käyttäjien haastattelulla ja strukturoiduilla lomakkeilla kerätty kvalitatiivinen data osoitti, että yleisesti käyttäjät kokivat kaksiulotteisen käyttöliittymän soveltuvan paremmin pisteiden valintaan ja siirtelyyn, ja he kokivat kaksiulotteisen käyttöliittymän tehokkaammaksi ja tarkemmaksi. Käyttäjien oma yleisen käytettävyyden arvio antoi kaksiulotteiselle käyttöliittymälle myös paremman tuloksen. Käyttäjien asettaessa käyttöliittymät vastakkain neljä käyttäjää piti kaksiulotteista käyttöliittymää parempana, yksi piti käyttöliittymiä tasavertaisina ja yksi käyttäjä piti kolmiulotteista käyttöliittymää parempana. Muiden kysymysten osalta tilastollisen vaihtelun vuoksi näin pienellä käyttäjämäärällä ei voida antaa pitäviä tuloksia.

Käyttäjien suoritusten aikana tekemistä katselupisteen siirroista koostettiin myös graafinen esitys, jonka perusteella todettiin käyttäjien tarkastelevan kappaleita selkeästi eri tavoin eri käyttöliittymillä. Kuvassa 18 nähdään yhden koekäyttäjän katselukulman liikkeitä testitapauksen 3 suorituksen aikana molemmilla käyttöliittymillä. Kaksiulotteisella käyttöliittymällä käyttäjä tarkasteli kappaletta karkeasti kahdesta katselusuunnasta, edestä ja sivulta. Kolmiulotteisella käyttöliittymällä kappaleen tarkastelu tapahtui melko jatkuvana liikkeenä kappaleen ympärillä. Kokonaisuudessaan kaksiulotteisella käyttöliittymällä käyttäjät pitivät katselupisteen siirtelyn mahdollisimman vähäisenä, kun taas kolmiulotteisessa käyttöliittymässä kappaleen tarkastelu vaihtelevista katselupisteistä oli melko jatkuvaa.



Kuva 18. Käyttäjän katselupisteen paikat testitapauksessa 3 eri käyttöliittymillä

Suoritetun testauksen päätavoite oli varmistaa koeasetelman toimivuus ja saatujen tulosten luotettavuus. Kokonaisuudessaan testauksen koettiin tuovan hyvin esille kaksiulotteisen ja kolmiulotteisen käyttöliittymän eroja, sekä käyttökokemuksia. Toisaalta testaus toi esille kolmiulotteisen käyttöliittymän käyttämän virtuaalitodellisuusteknologian puutteita, jotka selvästi vaikuttavat vertailun tuloksiin. Kolmiulotteisten käyttöliittymien osalta tekniset ongelmat heijastuivat käytettävyyden arvioihin ja vaikuttivat myös käyttäjien suorituksen tehokkuuteen. Kolmiulotteisen seurannan epätarkkuus ja stereoskooppisen näytön piirron viive ja tärinä nousivat erityisesti esille käytettävyyttä haittaavina tekijöinä. Testauksen merkittävimpänä saavutuksena voidaan kuitenkin pitää muotoilun alueella ensimmäistä askelta kaksiulotteisen käyttöliittymän vertailuun kolmiulotteiseen käyttöliittymään. Kirjoittajien tiedon mukaan vastaavaa tutkimusta ei ole aiemmin virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun alalla tehty.

4.6 Yhteenveto käytettävyystudkimuksesta

Kuten läpikäydystä käytettävyystudkimuksesta nähdään, pystyy se tarjoamaan arvokasta tietoa liittyen osaan virtuaaliavusteiseen suunnittelun osa-alueista. Käytettävyystudkimus on pystynyt useiden osatekijöiden kohdalla osoittamaan kolmiulotteisten käyttöliittymien hyötyjä ja vaikutusta käytettävyyteen. Esimerkiksi kaksikätesen työskentelyn osalta on pystytty osoittamaan, että tietyissä tilanteissa kaksikäsinen käyttöliittymä lisää työskentelyn tehoa ja mukavuutta. Lisäksi kaksikätesien käyttöliittymien suunnittelun tueksi on tarjolla toimivaksi osoittautunut käsien välisen työnjaon malli. Toisaalta virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun liittyy monia alueita, joilla lisää tutkimusta kaivattaisiin. Esimerkiksi syöteen ja palautteen monimuotoisuuden mahdollisuuksia ja vaikutusta käytettävyyteen on tutkittu melko vähän.

Juuri virtuaalitodellisuusavusteista suunnittelua tutkivaa käytettävyystudkimusta on myös tehty vähän. Sovelluskohtainen toteutus vaikuttaa lähes poikkeuksetta ratkaisujen käytettävyyteen, ja tästä johtuen aikaisemmista positiivisista tuloksista, jotka on saavutettu yleisemmissä tapauksissa, on vaikea vetää täysin varmoja johtopäätöksiä juuri suunnittelun sovellusalueeseen liittyen. Kuitenkin monien käytettävyyden osatekijöiden kohdalla aikaisemman laajemmankin tutkimuksen valossa voidaan odottaa tiettyjen yleisemmissä tapauksissa todettujen hyötyjen olevan saavutettavissa myös virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun alueella. Näin ollen käytettävyystudkimus voi osittain vastata toiseen tämän tutkielman pääkysymyksistä, eli mitkä tekijät vaikuttavat virtuaalitodellisuusteknologian sovellettavuuteen muotoilun tehtävissä. Edellä

kuvatun käytettävyytutkimuksen kautta on osoitettu ainakin seuraavien tekijöiden tarjoamia etuja:

- Kaksikälinen työskentely on tietyissä tehtävissä tehokkaampaa. Suunnittelutehtävät sisältävät monia vaiheita, joissa tehokkuutta voidaan saavuttaa.
- Vaikkei työskentely mitattavissa oleva tehokkuus paranekaan, kaksikälinen työskentely voi hyvin toteutettuna parantaa työskentelyn miellyttävyyttä.
- Stereoskooppinen näyttö ja päänsurannan avulla saavutettu liikeparallaksi parantavat tietotekoneen avulla luotujen virtuaalisten kappaleiden ja maailmojen kolmiulotteista avaruudellista hahmotusta.
- Stereoskooppisuus parantaa 3 DOF syötteen tarkkuutta esim. kappaleiden asettelussa.

Toisaalta käytettävyytutkimus puolelta on myös nostettu esiin ja vahvistettu muutamia kolmiulotteisten käyttöliittymien ongelmia.

- Suorakäyttöisyys lisää syötteen epätarkkuutta. Kolmiulotteisten käyttöliittymien yhteydessä suorakäyttöisyys lisää syötteen epätarkkuutta verrattuna perinteisiin kaksiulotteisiin käyttöliittymiin. Syötteen epätarkkuus tulisi huomioida muotoilu- ja tukevien toiminnallisuuksien ja myös sovelluskohteen suunnittelussa.
- Kolmiulotteisissa käyttöliittymissä usein hyödynnetyt, kaksikälinen työskentelyn ja useamman vapausasteen syötteen mahdollistavat seurantamenetelmät aiheuttavat usein myös ongelmia käytettävyydessä. Nykyisten seurantalaitteistojen epätarkkuudet, sekä mahdolliset johdot tekevät usein työskentelystä kömpelöä.
- Kolmiulotteisissa käyttöliittymissä usein myös hyödynnetyt stereoskooppiset näytöt kärsivät puutteista. Käyttäjän silmien tarkennuspisteen ja virtuaalisten kappaleiden sijainnin, sekä visualisoidun liikkeen ja tasapainoelimistön väliset ristiriidat voivat tehdä käyttötilanteesta epämiellyttävän ja jopa aiheuttaa pahoinvointia.

Varsinaisten tulosten lisäksi käytettävyytutkimus tarjoaa myös hyviä malleja, kuinka joitakin käytettävyyden tekijöitä kannattaa mitata ja arvioida. Toisaalta yksittäisten toiminnallisuuksien mittaamisen lisäksi olisi tärkeää pystyä laajemminkin vertailemaan erilaisia lähestymistapoja keskenään. Kokonaisten prototyyppien vertailu keskenään, sekä vertailu nykyisiin yleisesti muotoiluun käytettyihin ohjelmistoihin olisi omiaan tarjoamaan edelleen syvällisempää näkemystä virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun käytettävyyteen liittyvistä tekijöistä. Kuitenkaan toistaiseksi tällaista laajempaa vertailua on tehty hyvin vähän. Lisäksi tulevaisuudessa prototyyppien laajempimittainen pitkittäistutkimus olisi erittäin arvokasta. Pidempi aikainen

testikäyttö tasoittaisi käyttäjien aikaisemman kokemuksen antamaa etua kaksiulotteisille käyttöliittymille ja lisäksi toisi esille käytettävyyden ja ergonomia tekijöitä, jotka eivät lyhyessä testauksessa paljastu.

5 Tulokset

Luvuissa 3 ja 4 on esitelty yksityiskohtaisesti sekä prototyypilähtöisen, että käytettävyydestutkimuksen puolella tehtyä työtä, jossa on tarkasteltu virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun liittyviä kysymyksiä. Tutkimuksen kartoituksen tavoitteena on ollut selvittää voiko virtuaalitodellisuusteknologia helpottaa tietokoneavusteisen suunnittelun tehtäviä, ja mitkä ovat sen soveltuvuuteen vaikuttavat tekijät.

Kuten tutkimuksen kartoituksesta nähdään, on virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun liittyvää tutkimusta tehty melko laajasti, tarkastellen monia alaan liittyviä alueita ja lähestymistapoja. Prototyypilähtöinen tutkimus on esitelty monia virtuaalitodellisuusteknologian mahdollistamia kolmiulotteisia käyttöliittymiä muotoilun tehtäviin, mutta yksikään esitellyistä prototyypeistä ei ole osoittautunut vielä suoraan todelliseen käyttöön siirtyneeksi menestykseksi. Myöskään virtuaalitodellisuuteen liittyvä käytettävyydestutkimus ei ole pystynyt osoittamaan virtuaalitodellisuusteknologian kokonaisvaltaisia hyötyjä muotoiluun sovellettuna. Huolimatta siitä, ettei kiistattomia todisteita uusien käyttöliittymien paremmuudesta verrattuna nykyisiin kaksiulotteisiin käyttöliittymiin ole pystytty osoittamaan, on virtuaalitodellisuusteknologian hyötyjä monilla osa-alueilla pystytty näyttämään toteen.

Prototyypilähtöinen tutkimus ja käytettävyydestutkimus ovat molemmat pystyneet osoittamaan osa-alueita, joilla virtuaalitodellisuusteknologia voi parantaa nykyistä CAD-työskentelyä. Erityisesti käytettävyydestutkimuksen puolella kyseiset hyödyt on pystytty tuoman konkreettisesti esiin systemaattisesti mitattujen suoritusarvojen tukemana. Käytettävyydestauksella saavutetut tulokset tukevat esim. kaksikätesen työskentelyn ja stereoskooppisen näytön avulla olevan mahdollista saavuttaa lisää tehokkuutta. Vastaavasti prototyypilähtöisen tutkimuksen piiristä löytyy suuri määrä hyviä ideoita, miten kolmiulotteisia käyttöliittymiä voi toteuttaa ja esimerkkejä tekijöistä, joihin virtuaalitodellisuusteknologiaa sovellettaessa kannattaa kiinnittää huomiota. Molempien tutkimusten puolelta löytyneet tulokset ja huomiot on koostettu omiin alilukuihinsa, luvuiksi 3.6 ja 4.6. Huolimatta näistä lukuisista hyvistä osatuloksista, kokonaisuudessaan muotoilun tehostumisesta ei ole yksiselitteisiä todisteita.

Ongelmana kokonaisten uusien käyttöliittymien kohdalla on se, että kokonaista käyttöliittymää on mahdotonta arvostella niiden yksittäisten osien tarkastelulla. Käyttöliittymän lopullisen

toimivuuden ja käytettävyyden arviointi vaatii koko käyttöliittymän toteutusta ja sen lisäksi myös systemaattista menetelmää jolla käyttöliittymän käytettävyyttä voidaan arvioida. Käytännössä kartoitettu aiempi tutkimus on osoittanut molempien edellä mainittujen tehtävien olevan erittäin haastavia. Prototyypilähtöistä tutkimusta on tehty paljon, mutta suurin osa toteutetuista järjestelmistä on ollut hyvin suppeita kokeiluja, joita on ollut mahdoton käyttää tai testata todellisissa suunnittelutehtävissä. Niissä harvoissa prototyypilähtöisen tutkimuksen tapauksissa, joissa on toteutettu monipuolisia käyttöliittymiä, käyttöliittymien systemaattinen arviointi ja vertailu on jätetty vähäisemmälle huomiolle tai kokonaan tekemättä. Merkittävästi toisistaan poikkeavien käyttöliittymien keskinäinen vertailu on vaikeaa, ja luotettavasti käytettävyyteen vaikuttavien tekijöiden erottelu niistä vielä vaikeampaa. Yllättävää kyllä kaikesta virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun parissa tehdystä tutkimuksesta huolimatta uusien käyttöliittymien vertailua nykyisiin kaksiulotteista käyttöliittymää hyödyntäviin CAD-ohjelmiin on tehty hämmästyttävän vähän.

Tulevaisuudessa käytettävyydestutkimusta tulisi laajentaa kokonaisempien muotoiluun tarkoitettujen käyttöliittymien arviointiin ja vertailuun nykyisiin CAD-ohjelmiin. Tästä näkökulmasta olisi erittäin hyödyllistä saada prototyypilähtöinen tutkimus paremmin käytettävyydestutkimusta tukevaksi. Prototyypilähtöisessä tutkimuksessa tulisi järjestelmän kehityksen alusta lähtien pyrkiä miettimään sen testausta todellisilla käyttäjillä todellisissa tehtävissä. Prototyyppien keskinäisen vertailun mahdollistavat menetelmät olisivat myös tulevan tutkimuksen kannalta erittäin hyödyllisiä.

6 Yhteenveto

Edeltävissä luvuissa on esitelty virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun parissa tehtyä prototyyppilähtöistä tutkimusta sekä aiheeseen liittyvästä käytettävyystudkimusta. Tutkimuksen kartoituksessa on pyritty erityisesti selvittämään virtuaalitodellisuusteknologian tarjoamia lisäarvoja kolmiulotteisen geometrian muotoilun tehtävissä. Kartoituksen lopputuloksena voidaan todeta virtuaalitodellisuusteknologian tarjoavan osoitettavissa olevia hyötyjä erinäisillä suunnittelun osa-alueilla, mutta kokonaisuutena virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun vielä odottavan läpimurtoaan. Virtuaalitodellisuus kokonaisuudessaan kärsii vielä monista teknisistä puutteista, jotka rajoittavat sen soveltamista myös muotoilun tehtävissä.

Tämä tutkielma tarjoaa kokonaiskuvan virtuaalitodellisuusavusteiseen suunnitteluun liittyvän tutkimuksen tilasta, alalla saavutetuista tuloksista sekä edelleen avoimista kysymyksistä. Näin työ tarjoaa hyvän lähtökohdan aihealueeseen perehtymiselle ja virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun jatkotutkimukselle. Alan tutkimuksen läpileikkauksen lisäksi tutkielmassa on esitelty virtuaalitodellisuusteknologian ja kolmiulotteisten käyttöliittymien osatekijöitä ja roolia käytettävyyden ja sovellettavuuden näkökulmasta.

Kolmiulotteiset käyttöliittymät tulevat tulevaisuudessa yleistymään ja niihin liittyvä tutkimus lisäämään merkitystään tietokoneiden sulautuessa entistä monimuotoisemmin ympäristöömme ja käyttöliittymien saadessa yhä uusia muotoja. Virtuaalitodellisuusteknologian kehittyessä ja sen käyttöönottoa hidastavien teknisten ongelmien vähentyessä kolmiulotteiset käyttöliittymät ja virtuaalitodellisuusteknologia tulevat vääjäämättä osaksi tietokoneella tapahtuvia muotoilun tehtäviä. Muutos tulee todennäköisesti olemaan hidasta sen mahdollistavan tekniikan yleistyessä hitaasti, ja toisaalta käyttäjien ollessa harjaantuneita ja tottuneita käyttämään nykyisiä kaksiulotteisia käyttöliittymiä hyödyntäviä CAD-ohjelmia usein hyvinkin pitkäaikaisen käytön myötä. Teknisten rajoitteiden vähentyessä ja kolmiulotteisten käyttöliittymien löytäessä vakiintuneemman muotonsa, niiden tarjoama tehokkuus ja työskentelyn mukavuus saadaan todelliseen käyttöön.

Tulevaisuudessa virtuaalitodellisuusteknologian rajoitteiden poistaminen ja kiertäminen, kokonaisvaltaisten käyttöliittymä- ja vuorovaikutusmallien kehittäminen, sekä uusilla

käyttöliittymillä kokonaisuudessaan saavutettujen hyötyjen todentaminen ovat tärkeimpiä virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun tutkimuksen tavoitteita.

Lähteet

- AkY04 Akgunduz, A. ja Yu, H., Two-step 3-dimensional sketching tool for new product development. *WSC '04: Proceedings of the 36th conference on Winter simulation*, Winter Simulation Conference, 2004, sivut 1728-1733.
- BaK99 Balakrishnan, R. ja Kurtenbach, G., Exploring bimanual camera control and object manipulation in 3D graphics interfaces. *CHI '99: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, ACM Press, 1999, sivut 56-62.
- Ber9 Berta, J., Integrating VR and CAD. *Computer Graphics and Applications*, IEEE, 1999, 19, sivut 14-19.
- BoB97 Boritz, J. ja Booth, K. S., A study of interactive 3D point location in a computer simulated virtual environment. *VRST '97: Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, ACM, 1997, sivut 181-187.
- BoH97 Bowman, D. A. ja Hodges, L. F., An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments. *SI3D '97: Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics*, ACM, 1997, sivut 35-43.
- BFK05 Bowman, D. A., Frohlich, B., Kitamura, Y. ja Stuerzlinger, W., New Directions in 3D User Interfaces. (*Toimitettu arvioitavaksi*) vr, IEEE Computer Society, 2005, 00, 312.
- BKL05 Bowman, D. A., Kruijff, E., LaViola, J. J. ja Poupyrev, I., 3D User Interfaces: Theory and Practice. *Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc.*, 2005.
- Bro88 Brooks, F. P., Grasping reality through illusioninteractive graphics serving science. *CHI '88: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, ACM, 1988, sivut 1-11.

- Bro99 Brooks, F. P., What's real about virtual reality? *Computer Graphics and Applications*, IEEE, 1999, 19, sivut 16-27.
- BLM02 Bruno, F., Luchi, M. L., Muzzupappa, M. ja Rizzuti, S., A Virtual Reality desktop configuration for free-form surface sketching. *XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*, 2002.
- BuC03 Burdea, G. C. ja Coiffet, P., Virtual Reality Technology. *John Wiley & Sons, Inc.*, 2003.
- BDH92 Butterworth, J., Davidson, A., Hensch, S. ja Olano, M. T., 3DM: a three dimensional modeler using a head-mounted display. *SI3D '92: Proceedings of the 1992 symposium on Interactive 3D graphics*, ACM Press, 1992, sivut 135-138.
- BFB00 Buxton, W., Fitzmaurice, G., Balakrishnan, R. ja Kurtenbach, G., Large displays in automotive design. *Computer Graphics and Applications*, IEEE, Jul/Aug 2000, 20, sivut 68-75.
- BuM86 Buxton, W. ja Myers, B., A study in two-handed input. *CHI '86: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, ACM Press, 1986, sivut 321-326.
- CBG02 Catalano, C. E., Falcidieno, B., Giannini, F. ja Monti, M., A Survey of Computer-Aided Modeling Tools for Aesthetic Design. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, ASME, 2002, 2, sivut 11-20.
- CDG97a Chu, C.-C.P., Dani, T.H. ja Gadh R., Multi-sensory user interface for a virtual-reality-based computer-aided design system. *Computer-Aided Design*, 1997, 29, sivut 709-725.
- CDG97b Chu, C., Dani, T. ja Gadh, R., Multimodal interface for a virtual reality based computer aided design system. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1997, 2, sivut 1329-1334.

- CDG98 Chu, C.P., Dani, T.H. ja Gadh, R., Evaluation of virtual reality interface for product shape designs. *IIE Transactions*, 1998, 30, sivut 629-643.
- CMG02 Chu, C., Mo, J. ja Gadh, R., A quantitative analysis of virtual reality based computer aided design system interfaces. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 2002, 2, sivut 216-23.
- Cla76 Clark, J. H., Designing surfaces in 3-D. *Commun. ACM*, ACM Press, 1976, 19, sivut 454-460.
- CoB04 Convard, T. ja Bourdot, P., History based reactive objects for immersive CAD. *SM '04: Proceedings of the ninth ACM symposium on Solid modeling and applications*, Eurographics Association, 2004, sivut 291-296.
- CSD93 Cruz-Neira, C., Sandin, D. J. ja DeFanti, T. A., Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the CAVE. *SIGGRAPH '93: Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press, 1993, sivut 135-142.
- CFH97 Cutler, L. D., Fröhlich, B. ja Hanrahan, P., Two-handed direct manipulation on the responsive workbench. *SI3D '97: Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics*, ACM, 1997, sivut 107-114.
- DaG97 Dani, T. ja Gadh, R., Creation of concept shape designs via a virtual reality interface. *Computer-Aided Design*, 1997, 29, sivut 555-563.
- Dee92 Deering, M., High resolution virtual reality. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, ACM, 1992, 26, sivut 195-202.
- Dee95 Deering, M. F., HoloSketch: a virtual reality sketching/animation tool. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, ACM Press, 1995, 2, sivut 220-238.
- Dee96 Deering, M. F., The HoloSketch VR sketching system. *Commun. ACM*, ACM Press, 1996, 39, sivut 54-61.

- Dee08 Deering, M. F., henkilökohtainen HoloSketch –ohjelman kehityshistoriaa kuvaava
www-sivu.
<http://www.michaelfrankdeering.com/Projects/SoftWare/HoloSketch/HoloSketch.html>, tarkastettu 11.3.2008.
- DBW00 Deisinger, J., Blach, R., Wesche, G., Breining, R. ja Simon, A.. Towards immersive modeling – challenges and recommendations: A workshop analysing the needs of designers. *In Eurographics Workshop on Virtual Environments 2000*, 2000, sivut 145–156,.
- Dig08 Digital Art Forms –yrityksen kotisivut, joilla lisää tietoa InDex –nimellä markkinoidusta virtuaalitodellisuusavusteisen suunnittelun järjestelmästä.
<http://www.digitalartforms.com/home.htm>, tarkastettu 8.4.2008.
- FAM02 Fiorentino, M., de Amicis, R., Monno, G. ja Stork, A., Spacedesign: a mixed reality workspace for aesthetic industrial design. *ISMAR 2002 Proceedings of International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2002*, 2002, sivut 86-318.
- FMR03 Fiorentino M., Monno G., Renzulli P. A. ja Uva A. E., 3D pointing in virtual reality: experimental study. *XIII ADM - XV INGEGRAF International Conference on Tools and Methods Evolution in Engineering Design*, Napoli, 2003.
- FMU04 Fiorentino, M., Monno, G. ja Uva, A. E., Smart tools for Virtual Reality based CAD. *ADMAIAS04 International conference. In proceedings*, 2004.
- FBS04 Fleisch, T., Brunetti, G., Santos, P. ja Stork, A., Stroke-input methods for immersive styling environments. *Shape Modeling Applications, 2004*. Proceedings, 2004, sivut 275-283.
- FLM97 Forsberg, A., LaViola, J., Markosian, L. ja Zeleznik, R., Seamless interaction in virtual reality. *Computer Graphics and Applications*, IEEE, 1997, 17, sivut 6-9.

- GaH91 Galyean, T. A. ja Hughes, J. F., Sculpting: an interactive volumetric modeling technique. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, ACM Press, 1991, 25, sivut 267-274.
- GBK01 Grossman, T., Balakrishnan, R., Kurtenbach, G., Fitzmaurice, G., Khan, A. ja Buxton, B., Creating principal 3D curves with digital tape drawing *CHI '02: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, ACM Press, 2002, sivut 121-128.
- GBK02 Grossman, T., Balakrishnan, R., Kurtenbach, G., Fitzmaurice, G., Khan, A. ja Buxton, B., Creating principal 3D curves with digital tape drawing. *CHI '02: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, ACM Press, 2002, sivut 121-128.
- GBS02 Grossman, T., Balakrishnan, R. ja Singh, K., An interface for creating and manipulating curves using a high degree-of-freedom curve input device. *CHI '03: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, ACM, 2003, sivut 185-192.
- GLS95 Green, M., Liang, J. ja Shaw, C., Interactive 3D Geometrical Modelers for Virtual Reality and Design International. *Conference on Virtual Systems and Multimedia '95*, 1995, sivut 29-36.
- Gui87 Guiard, Y., Asymmetric Division of Labor in Human Skilled Bimanual Action: The Kinematic Chain as a Model. *Journal of Motor Behavior*, 1987, 19, 486-517.
- HST07 Harviainen, T., Svan, L., Takala, T., Usability Testing of Virtual Reality Aided Design: Framework for Prototype Development and a Test Scenario. *4th INTUITION international conference and workshop on virtual reality and virtual environments*, Athens, Greece, 2007, sivut 172-181.
- HeB94 Hearn, D. ja Baker, M. P., Computer graphics (2nd ed.) *Prentice-Hall, Inc.*, 1994.
- HPP98 Hinckley, K., Pausch, R., Proffitt, D. ja Kassell, N. F., Two-handed virtual manipulation. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, ACM, 1998, 5, sivut 260-302.

- HSF97 Hubona, G. S., Shirah, G. W. ja Fout, D. G., The effects of motion and stereopsis on three-dimensional visualization. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, Academic Press, Inc., 1997, 47, sivut 609-627.
- HHN02 Humphreys, G., Houston, M., Ng, R., Frank, R., Ahern, S., Kirchner, P. D. ja Klosowski, J. T., Chromium: a stream-processing framework for interactive rendering on clusters. *ACM Trans. Graph.*, ACM Press, 2002, 21, sivut 693-702.
- HHN95 Hutchins, E. L., Hollan, J. D. ja Norman, D. A., Direct manipulation interfaces. *Human-Comput. Interact.* 1995, 1, 4, sivut 311-338.
- IMT99 Igarashi, T., Matsuoka, S. ja Tanaka, H., Teddy: a sketching interface for 3D freeform design. *SIGGRAPH '99: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999, sivut 409-416.
- JVG01 Jayaram, S., Vance, J., Gadh, R., Jayaram, U. ja Srinivasan, H., Assessment of VR Technology and its Applications to Engineering Problems. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, ASME, 2001, 1, sivut 72-83.
- KFM01 Keefe, D. F., Feliz, D. A., Moscovich, T., Laidlaw, D. H., Joseph J., LaViola, J., CavePainting: a fully immersive 3D artistic medium and interactive experience. *I3D '01: Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics*, ACM, 2001, sivut 85-93.
- Ker04 Kerlow I., The Art of 3D Computer Animation and Effects. *John Wiley and Sons*, 2004.
- KTK97 Kiyokawa, K., Takemura, H., Katayama, Y., Iwasa, H. ja Yokoya, N., VLEGO: A Simple Two-handed Modeling Environment Based On Toy Block. *Proceedings of VRST '97*, ASM, 1997, sivut 27-34.

- KTY00 Kiyokawa, K., Takemura, H. ja Yokoya, N., SeamlessDesign for 3D object creation. *IEEE Multimedia*, 2000, 7, sivut 22-33.
- Kol93 Kollin, J., A Retinal Display For Virtual-Environment Applications. In *Proceedings of SID International Symposium, Digest Of Technical Papers*, 1993, sivu 827.
- KrL97 Krause, F. ja Lüddemann, J., Virtual clay modelling. *GMCAD '96: Proceedings of the fifth IFIP TC5/WG5.2 international workshop on geometric modeling in computer aided design on Product modeling for computer integrated design and manufacture*, Chapman & Hall, Ltd., 1997, sivut 162-175.
- KDH99 Kuester, F., Duchaineau, M. A., Hamann, B., Joy, K. I. ja Uva, A. E., 3DIVS: 3-dimensional immersive virtual sculpting. *NPIVM '99: Proceedings of the 1999 workshop on new paradigms in information visualization and manipulation in conjunction with the eighth ACM international conference on Information and knowledge management*, ACM, 1999, sivut 92-96.
- LaV00 Joseph J. LaViola, J., A discussion of cybersickness in virtual environments. *SIGCHI Bull.*, ACM, 2000, 32, sivut 47-56.
- LMK06 Latulipe, C., Mann, S., Kaplan, C.S. ja Clarke, C.L.A., symSpline: symmetric two-handed spline manipulation. *CHI '06: Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in computing systems*, ACM, 2006, sivut 349-358.
- LKT91 LeBlanc, A., Kalra, P., Thalmann, N. M., Thalmann, D., Sculpting with the "ball and mouse" metaphor. *Graphics Interface '91*, Calgary; Alberta (Canada), 1991, sivut 152-159.
- LLN03 Li, F., Lau, R. ja Ng, F., VSculpt : a distributed virtual sculpting environment for collaborative design. *Multimedia*, IEEE Transactions on, 2003, 5, sivut 570-580.
- LiG93 Liang, J. ja Green, M., Geometric modeling using six degrees of freedom input devices. In *Proc. of the 3rd International Conference on CAD & Computer Graphics (CAD/Graphics '93)*, Beijing, China, 1993.

- Ma05 Ma, W., Subdivision surfaces for CAD--an overview. *Computer-Aided Design*, 2005, 37, sivut 693-709.
- MQW01 McDonnell, K. T., Qin, H. ja Wlodarczyk, R. A., Virtual clay: a real-time sculpting system with haptic toolkits. *I3D '01: Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics*, ACM, 2001, sivut 179-190.
- MFB97 Mine, M. R., Frederick P. Brooks, J. ja Sequin, C. H., Moving objects in space: exploiting proprioception in virtual-environment interaction. *SIGGRAPH '97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997, sivut 19-26.
- Mun94 Murakami, T. ja Nakajima, N., Direct and intuitive input device for 3-D shape deformation. *CHI '94: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, ACM Press, 1994, sivut 465-470.
- Mät04 Wille Mäkelä ja Tommi Ilmonen, Drawing, Painting and Sculpting in the Air. Development Studies about an Immersive Free-Hand Interface for Artists. *In IEEE VR 2004 Workshop Proceedings*, 2004, sivut 89-92.
- MRT04 Mäkelä, W., Reunanen, M. ja Takala, T., Possibilities and limitations of immersive free-hand expression: a case study with professional artists. *MULTIMEDIA '04: Proceedings of the 12th annual ACM international conference on Multimedia*, ACM, 2004, sivut 504-507.
- NWZ07 Neugebauer, R., Weidlich, D., Zickner, H. ja Polzin, T., Virtual reality aided design of parts and assemblies. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2007, 1, sivut 15-20.
- PeV02 Perles, B. P. ja Vance, J. M., Interactive Virtual Tools for Manipulating NURBS Surfaces in a Virtual Environment. *Journal of Mechanical Design*, ASME, 2002, 124, sivut 158-163.

- PWB97 Poupyrev, I., Weghorst, S., Billinghurst, M. ja Ichikawa, T., A framework and testbed for studying manipulation techniques for immersive VR. *VRST '97: Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, ACM, 1997, sivut 21-28.
- PSZ98 Purschke, F., Schulze, M. ja Zimmermann, P., Virtual Reality - New Methods for Improving and Accelerating the Development Process in Vehicle Styling and Design. *cgi, IEEE Computer Society*, 1998, 00, sivut 789-798.
- RPI05 Reunanen, M., Palovuori, K., Ilmonen, T. ja Mäkelä W., Näprä - Affordable Fingertip Tracking with Ultrasound. *In Virtual Environments 2005, Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium Proceedings*, 2005, sivut 51-58.
- SaZ99 de Sa, A. G. ja Zachmann, G., Virtual reality as a tool for verification of assembly and maintenance processes. *Computers & Graphics*, 23(3), 1999, sivut 389 –403.
- SSR89 Sachs, E., Stoops, D. ja Roberts, A., 3-Draw: a three dimensional computer aided design tool Systems. *In Proc. IEEE International Conference on Man and Cybernetics*, 1989, 3, sivut 1194-1196.
- SRS91 Sachs, E., Roberts, A. ja Stoops, D., 3-Draw: a tool for designing 3D shapes. *Computer Graphics and Applications*, IEEE, 1991, 11, sivut 18-26.
- Sch83 Schmandt, C., Spatial input/display correspondence in a stereoscopic computer graphic work station. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, ACM Press, 1983, 17, sivut 253-261.
- SBS06 Sheng, J., Balakrishnan, R. ja Singh K., An interface for 3D sculpting via physical proxy. *Proceedings of GRAPHITE 2006 – International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and Southeast Asia*, 2006, sivut 213-220.

- ShG94 Shaw, C. ja Green, M. Two-handed polygonal surface design. *UIST '94: Proceedings of the 7th annual ACM symposium on User interface software and technology*, ACM Press, 1994, sivut 205-212.
- Shn83 Shneiderman, B., Direct manipulation: A step beyond programming languages. *Computer*, 1883, 16, sivut 57-69.
- SPS01 Schkolne, S., Pruett, M. ja Schröder, P., Surface drawing: creating organic 3D shapes with the hand and tangible tools. *CHI '01: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, ACM Press, 2001, sivut 261-268.
- SmS87 Smith, T., ja Smith, K., Feedback-Control Mechanisms of Human Behavior. *Handbook of Human Factors*. John Wiley & Sons, sivut 251-293.
- Sut65a Sutherland, I.E., Sketchpad: A manmachine graphical communication system. *MIT Lincoln Laboratory Tech. Rep. 296*, 1965.
- Sut65b Sutherland, I.E., The Ultimate Display, *invited lecture, IFIP Congress 65. An abstract appears in Information Processing 1965: Proc. IFIP Congress 65, Vol. 2*, W.A. Kalenich, ed., Spartan Books, Washington, D.C., and Macmillan, New York, sivut 506-508.
- Sut68 Sutherland, I.E., A head-mounted three-dimensional display. *AFIPS Conf. Proc., Vol. 33, 1968 FJCC*, AFIPS Press, Montvale, N.J. 1968, sivut 757-764.
- Tay92 Taylor, D. L., Computer Aided Design, *Addison-Wesley*, Reading, MA, 1992.
- UZW07 Ulinski, A., Zambaka, C., Wartell, Z., Goolkasian, P. ja Hodges, L., Two Handed Selection Techniques for Volumetric Data. *3dvi, IEEE Computer Society*, 2007.
- WaF96 Ware, C. ja Franck, G., Evaluating stereo and motion cues for visualizing information nets in three dimensions. *ACM Trans. Graph.*, ACM, 1996, 15, sivut 121-140.

- WeS01 Wesche, G. ja Seidel, H., FreeDrawer: a free-form sketching system on the responsive workbench. *VRST '01: Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, ACM Press, 2001, sivut 167-174.
- ZHH96 Zeleznik, R. C., Herndon, K. P. ja Hughes, J. F., SKETCH: an interface for sketching 3D scenes. *SIGGRAPH '96: Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press, 1996, sivut 163-170.