

Meri-Sofia Vertainen

**KOGNITIIVISEN MALLINTAMISEN  
HYÖDYNTÄMINEN OSANA  
TUOTEKEHITYSPROSESSEJA**



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO  
INFORMAATIOTEKNOLOGIAN TIEDEKUNTA  
2024

# TIIVISTELMÄ

Vertainen, Meri-Sofia

Kognitiivisen mallintamisen hyödyntäminen osana tuotekehitysprosesseja

Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2024, 44s.

Kognitiotiede, pro gradu -tutkielma

Ohjaaja: Jokinen, Jussi

Teknologian jatkuva kehittyminen ja käyttäjäjoukkojen monimuotoistuminen ovat nostaneet entistä enemmän esiin käyttäjäystävällisten käyttöliittymien keskeisen merkityksen. Helppokäyttöinen käyttöliittymä on yrityksen kilpailuetu, mutta käyttäjätestaukset vievät paljon resursseja. Laskennallisen kognitiivisen mallintamisen on esitetty tarjoavan potentiaalia tuotekehityksessä vastaamaan näihin muuttuviin tarpeisiin, mutta sen käyttöönotto ja hyödyntäminen ovat toistaiseksi olleet rajallisia. Tämän tutkielman tavoitteena on syventää ymmärrystä kognitiivisen mallintamisen roolista ja mahdollisuuksista tuotekehitysprosessissa käyttöliittymien varhaisen vaiheen suunnitelmien osalta. Kognitiiviset mallit perustuvat psykologisiin hypoteeseihin käyttäjien päätöksenteosta ja toiminnasta. Taustalla niissä on tiedonkäsittelyn rationaalisuus, joka selittää miten ihmisen kognitiota käsitellään tiedonkäsittelyn näkökulmasta.

Tutkimus toteutetaan kokeellisina simulaatioina laskennallisen kognitiivisen mallintamisen avulla. Tutkimuksessa luodaan ennalta määritettyjen tehtävien pohjalta simulaatioita, jotka ennustavat käyttäjien suoriutumista tehtävissä suoritusajan, fiksaatioiden määrän, osumien ja virhepainalluksien osalta. Tutkimuksen tuloksien pohjalta käyttöliittymään tehdään muutoksia, jotta nähdään niiden vaikutukset mallin ennustamiin suorituksiin.

Tutkimuksen tarkoituksena on parantaa ymmärrystä käyttäjien eroavuuksista ja käyttöliittymän sopivuudesta eri käyttäjäpersoonille sekä arvioida mallin toimivuutta ja sen käytettävyyttä tuotekehitysprosessissa. On kuitenkin tärkeää huomioida, että kognitiivinen mallintaminen ei voi toimia ainoana käyttäjätestauksen menetelmänä. Tutkimuksen tulokset osoittavat, että mallin avulla voidaan saada hyödyllistä tietoa suunnitelmien parantamiseksi. Kuitenkin mallin jatkokehitystä tarvitaan, jotta siitä saadaan entistä kustannustehokkaampaa ja helpommin käytettävää tuotekehitystiimille. Kognitiivisella mallintamisella on potentiaalia parantaa tuotekehitystiimin ymmärrystä ihmisen psykologiasta ja kognitiivisista prosesseista, jotka ovat avainasemassa intuitiivisten ja käyttäjää palvelevien käyttöliittymien suunnittelussa.

Asiasanat: Kognitiivinen mallintaminen, tiedonkäsittelyn rationaalisuus, käytettävyyys, käyttäjätutkimus, tuotekehitys.

## ABSTRACT

Vertainen, Meri-Sofia

Utilizing cognitive modeling in product development processes

Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2024, 44 pp.

Cognitive Science, Master's Thesis

Supervisor: Jokinen, Jussi

The continuous advancement of technology and the increasing diversity of user groups emphasize the crucial importance of user-friendly interfaces. While an easy-to-use interface is a competitive advantage for companies, user testing consumes significant resources. Computational cognitive modeling has been suggested to offer potential in helping with these evolving needs in product development, but its adoption and utilization have been limited so far. This study aims to increase understanding of the role and potential of cognitive modeling in early interface design during product development. Cognitive models are based on psychological hypotheses about user decision-making and behavior, rooted in the computational rationality, which explains how human cognition is approached from the perspective of information processing.

The research is conducted through simulations using computational cognitive modeling. The simulations are created based on predefined tasks to predict user performance in terms of task completion time, number of fixations as well as hits and misses. Based on the research findings, adjustments are made to the interface to observe their impact on the model's predicted performances.

The purpose of the study is to improve understanding of user differences and the suitability of the interface for different user personas, while evaluating the functionality and usability of the model in the product development process. However, it is important to note that cognitive modeling cannot serve as the sole method of user testing. The results of the study indicate that the model can provide valuable insights for improving designs. Nevertheless, further development and refinement of the model are necessary to make it more cost-effective and user-friendly for product development teams. Cognitive modeling has the potential to enhance product development teams' understanding of human psychology and cognitive processes, which is crucial in designing intuitive and user-centric interfaces.

Keywords: cognitive modeling, computational rationality, usability, user research, product development.

## KUVIOT

Kuva 1 - Käyttöliittymä valikosta .....	23
Kuva 2 - Käyttöliittymä viestin lähettämisestä .....	23
Kuva 3 - Käyttöliittymä ajanvarauksien valikosta.....	24
Kuva 4 - Käyttöliittymä videopuheluun liittymisestä.....	24
Kuva 5 - Noviisin ja kokeneen käyttäjien suoritusajat viestien lähetyksessä .....	27
Kuva 6 - Noviisin ja kokeneen käyttäjän suoritukset valikon variaatioissa .....	29
Kuva 7 - Osoitinkyvyn vaikutus viestin lähettämisen variaatioihin .....	32

## TAULUKOT

Taulukko 1 - Kokemuksen vaikutus viestien valikon tuloksiin.....	26
Taulukko 2 - Kokemuksen vaikutus viestien eri variaatioiden tuloksiin.....	27
Taulukko 3 - Kokemuksen vaikutus ajanvarauksen tehtävän tuloksiin.....	29
Taulukko 4 - Kohinan vaikutus viestin lähettämisen tuloksiin.....	31
Taulukko 5 - Kohinan vaikutus ajanvarauksien tuloksiin.....	33

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVIOT JA TAULUKOT

1	JOHDANTO.....	6
2	LASKENNALLINEN KOGNITIIVINEN MALLINTAMINEN.....	8
2.1	Kognitiivinen mallintaminen.....	8
2.2	Vuorovaikutuksen kognitiivinen mallinnus.....	10
2.2.1	Motorinen liike.....	10
2.2.2	Muisti.....	11
2.2.3	Silmän liike.....	12
2.2.4	Ihmisen havaintokyky.....	13
2.2.5	Vahvistusoppiminen.....	14
2.3	Kognitiivinen mallintaminen tuotekehityksessä.....	15
2.4	Tiedonkäsittelyn rationaalisuus.....	17
3	MENETELMÄT.....	21
3.1	Tutkimusmenetelmä.....	21
3.2	Tehtävät ja aineistot.....	22
3.2.1	Tehtävä 1.....	22
3.2.2	Tehtävä 2.....	23
4	TULOKSET.....	25
4.1	Simulaatio 1.....	25
4.1.1	Viestit.....	25
4.1.2	Ajanvaraukset.....	28
4.2	Simulaatio 2.....	30
4.2.1	Viestit.....	30
4.2.2	Ajanvaraukset.....	32
5	POHDINTA.....	34
5.1	Tutkimuksen tulokset.....	34
5.2	Luotettavuus ja rajoitukset.....	38
5.3	Jatkotutkimushaasteet.....	39
	LÄHTEET.....	41

# 1 JOHDANTO

Teknologian käyttö on mukautunut vahvasti osaksi arkipäivän toimintoja. Jatkuvasti kehittyvän teknologian maailmassa käyttäjien tarpeet sekä vaatimukset muuttuvat. Tämän myötä ihmisen ja tietokoneen vuorovaikutuksen (*HCI*) merkitys kasvaa entisestään, jotta käytettävät tuotteet pystyvät vastaamaan nykypäivän käytettävyyksivaatimukseen kuormittamatta käyttäjää. Käyttäjäystävälliset käyttöliittymät ovat myös yrityksen kilpailuetu. ISO-standardin 9241 mukaisesti käytettävyyttä määritellään vaikuttavuudeksi, tehokkuudeksi ja tyytyväisyydeksi, jolla käyttäjät saavuttavat tavoitteensa käyttöliittymässä (ISO, 2021). Käytettävyyttä voidaan tutkia eri tavoin, kuten loppukäyttäjien käytettävyydestestauksilla, heuristisella arvioinnilla, tutkimisella tai kognitiivisella mallintamisella. Tutkimuksessa käytetään termiä kognitiivinen mallinnus, mutta sillä viitataan laskennalliseen kognitiiviseen mallintamiseen.

Laskennallinen kognitiivinen mallintaminen on tällä hetkellä tuotekehityksessä vähäisesti käytetty menetelmä. Kognitiiviset mallit voivat ennustaa eri näkökulmien ja muuttujien vuorovaikutusta ja tuottaa käyttäytymisen havainnoita empiirisessä tutkimuksessa. Psykologinen tieto käyttäjästä on hyvin moninaista teoreettisesti ja empiirisesti. Mallien avulla tämä tieto pystytään muodostamaan työkaluksi, jonka avulla suunnittelija voi oppia konkreettisesti käyttöliittymäsuunnittelun näkökulmia. Tämän avulla voidaan auttaa ymmärtämään mitkä toisiinsa liittyvät kognitiiviset prosessit johtavat havaittuun käyttäytymiseen. Mallit pystyvät toistamaan samoja tehtäviä simuloimalla useita käynnissä olevia kognitiivisia prosesseja kuin ihmiset. Simuloinnin avulla mallit pystyvät antamaan suunnitelmista käsityksen käyttäjän suoriutumisen tehtävistä, myös niistä tehtävistä, jotka ovat liian monimutkaisia analysoida kontrolloiduilla kokeilla. Mallintamista tehtäessä on huomioitava, että tulokset ovat vain oletuksia. Kognitiivinen mallintaminen ei poissulje käyttäjätestauksien tarpeellisuutta, mutta järjestelmien kehittyessä entistä monimutkaisimmiksi ja käyttäjien joukko monimuotoisemmaksi, käyttäjätestaukseen tulee lisää haasteita monimutkaisuutta ja eettisiä haasteita. Näissä tapauksissa mallintamisen avulla tehtävissä simulaatioissa voidaan testata laajempaa käyttäjäjoukkoa.

Tuotekehityksen suunnitteluprosesseissa käytännöt käytettävyydestestauksiin vaihtelee eri organisaatioiden välillä. Käyttäjätestaukset saatetaan ajoittaa

ainoastaan suunnitteluprosessin loppuvaiheeseen, jolloin suuremmat muutokset voivat viivästyttää projektin aikataulua ja budjettia. Tässä tutkielmassa pyritään selvittämään kuinka laskennallinen kognitiivinen mallintaminen tuottaa dataa käyttäjien eroavaisuuksista ja käyttöliittymän sopivuudesta tutkimukseen valituille käyttäjäpersoonille. Tutkimuksessa pyritään myös saamaan käyttökoke-musta mallin käytöstä ja sen sopivuudesta tuotekehitystiimin käyttöön.

Tutkielman kirjallisuuskatsauksessa käydään lävitse laskennallisen kognitiivisen mallintamisen nykytilannetta, käyttötapoja ja käytössä olevan mallin komponenttien mallinnettavia prosesseja tiedonkäsittelyn rationaalisuuden kannalta. Tutkimuksen empiirisen osan menetelmäksi on valittu kokeellinen simulointi laskennallisen kognitiivisen mallintamisen menetelmällä, joka luodaan ennalta määritettyjen tehtävien mukaisesti. Tehtävistä muodostetaan mallin konfiguraatiolla useampia simulaatioita eri muuttujilla. Tutkittavan käyttöliittymän suunnitelmat ovat tehty terveydenalan asiakasportaaliin ja tehtäviksi on valittu tuotedatan perusteella kaksi yleisintä käyttötapaa. Mallintamisessa selvitetään miten käyttäjä, jolla ei ole käyttöliittymästä yhtään kokemusta, suoriutuu tehtävästä ja miten tulokset vertaantuvat kokeneeseen käyttäjään. Tuloksista käy myös ilmi, miten kohina vaikuttaa käyttöliittymän tehtävistä suoriutumiseen. Tuloksien pohjalta tutkimuksessa tehdään uusia variaatiota käyttöliittymästä, jotta sitä saataisiin optimoitua eri käyttäjäpersoonille sopivaksi.

Laskennallisen kognitiivisen mallintamisen hyödyntäminen on tänä päivänä vähäistä. Teknologian kehittyessä ja tekoälyn uudistaessa päivittäisi työtapoja ihmisen mielen mallintaminen nousee ajankohtaisemmaksi aiheeksi. Tekoälyn merkittävimmät kehitysaskeleet ovat perustuneet mielen laskennallisiin kaavoihin. Mielen laskennallisten kaavojen hyödyntämiselle ei ole vielä muodostunut selkeitä rajoja, jolloin sen hyödyntäminen testauksen yhteydessä voisi mahdollisesti olla tuotekehitysprosessissa resursseja säästävää sekä ihmisen ja teknologian vuorovaikutuksen kannalta käytettävyyteen erinomainen lisä.

## 2 LASKENNALLINEN KOGNITIIVINEN MALLINTAMINEN

Tässä osassa tutkielmaa kuvataan kognitiivisen mallintamisen yhteyttä käytettävyyteen ja käyttäjätutkimuksiin, mitä kognitiivinen mallintaminen tarkoittaa ja miten sitä voidaan hyödyntää tuotekehityksessä tieteellisten tutkimusten näkökulmasta. Luvussa kuvataan mallintamisen käytön koetut hyödyt ja haasteet.

### 2.1 Kognitiivinen mallintaminen

Ihmisen ja teknologian vuorovaikutuksessa käytettävyydellä on merkittävä rooli. Termiä käytettävyys voi nähdä käytettävän monessa eri kontekstissa. Sitä voidaan käyttää viittaamaan testaukseen, jossa arvioidaan tuotteen käytettävyyttä käyttäjien avulla tai tietyn kehitysmetologian omaksumiseen. Päämäärä näissä kummassakin lähestymistavassa on sama, eli molemmissa on tavoitteena tehdä tuotteista helpot käyttää. (Garret, 2011.)

ISO 9241 standardissa käytettävyys nähdään tehokkuudeksi, tyytyväisyydeksi ja vaikuttavuudeksi, jolla käyttäjät pystyvät saavuttamaan määritetyn käyttöympäristön tavoitteet (Hornbæk, 2006). Krugin (2006) määritelmässä käytettävyys tarkoittaa varmistamista, että palvelu tai tuote vastaa sille suunnattua käyttötarkoitusta, eikä käyttäjän tarvitsisi tuntea turhautumisen tunnetta. Määritelmän mukaisesti palvelun tai tuotteen tulisi ohjata käyttäjää niin ettei käyttäjän tarvitse tehdä erityisiä ponnisteluja. (Krug, 2006.) Shackelin (1991) mukaan käytettävyys määritellään palvelun tai tuotteen helppoudeksi ja tehokkuudeksi käytön osalta. Bevanin (1995) määrittelee käytettävyyden käyttölaaduksi (Hornbæk, 2006). Mainituissa käytettävyyden määrittelyissä on yhtenäisyyksiä sen osalta, että kaikki liittyvät loppukäyttäjän kokemukseen järjestelmän laadun tai tavoitteiden saavuttamisen osalta.

Järjestelmän käytettävyyttä voidaan testata erilaisilla käytettävyydestestauksilla. Käytettävyydestaus antaa suunnittelijalle arvokasta tietoa siitä, miten käyttäjät käyttävät suunniteltua tuotetta tai palvelua. Testaustulokset auttavat suunnittelijaa havaitsemaan käyttäjien kohtaamia ongelmia ja esteitä, joiden avulla suunnittelija voi parantaa tuotteen tai palvelun käytettävyyttä ja käyttäjäkokemusta. Testaaminen auttaa myös suunnittelijaa varmistamaan, että suunniteltu tuote tai palvelu vastaa käyttäjien tarpeita ja odotuksia. Käytettävyydestestauksien analysointityökalujen erot muodostuvat lähestymistavoista, tuloksista,



käytetystä ajasta ja kustannuksista (Nielsen, 2008) ja siitä, missä vaiheessa niitä tulisi käyttää. Loppukäyttäjien käytettävyydestä keskeisimmät hyödyt ovat, että tutkimuksen data saadaan palvelun aidoilta käyttäjiltä (Nielsen, 2012), sen avulla voidaan tunnistaa haastavampia ongelmia ja määrittelemään lukuisia ongelmia (Karat, Campbell & Fiegel, 1992). Heikkouksiksi niissä muodostuvat, että ne ovat aikaa vieviä (Nielsen, 1998) ja kalliita (Jeffries ym., 1993). Hornbæk (2006) nostaa artikkelissa esiin, ettei käytettävyyden mittaamiseen ei ole yhtä oikeaa tapaa, vaan menetelmät vaihtelevat riippuen siitä, mitä tietoa halutaan saada käytettävyydestä. Tämä voi johtaa siihen, että tutkimustulokset eivät ole vertailukelpoisia keskenään, mikä hankaloittaa tulosten yhdistämistä ja tulkintaa. Hornbækin (2006) mukaan käytettävyydestä aiheuttaa haastetta, kun käytettävyyden mittaamiseen liittyvien standardit puuttuvat ja testaaminen voi vaatia monimutkaisia menetelmiä ja kalliita laitteistoja. Erilaiset testausmenetelmät tuovat eri näkökulmia käyttöliittymän käytettävyyteen, ja niiden yhdistäminen auttaa tunnistamaan laajemmin käyttöliittymän vahvuudet ja heikkoudet.

Kognitiivisella mallintamisella, eli ennustavalla ihmisen käytöksen mallintamisella, on yksi pisimmistä tutkimushistoriasta ihmisen ja teknologian välisen vuorovaikutuksen (*HCI*) suhteen (John ym., 2004). Kognitiiviset mallit perustuvat psykologisiin hypoteeseihin siitä, kuinka agentit, eli käyttäjät, tekevät päätöksiä. Usein nämä mallit toteutetaan laajemmassa teoreettisessa rakenteessa, eli arkkitehtuurissa, joka koostuu ajattelun ja käyttäytymisen eri komponenttien integraatiosta yhdeksi kognitioksi. (Jokinen ym., 2020.) Kognitiivisen mallintamisen simulaatiot voivat auttaa luomaan ja validoimaan uutta ihmisen ja teknologian välistä teoriaa, mikä voi tehdä suunnittelusta ja päätöksien teosta ennakoitavampaa ja parantaa jopa järjestelmän turvallisuutta ja saavutettavuutta. Mallintamisessa käytettävä simulaatio määritetään järjestelmän, esineen tai ympäristön malliksi, joka on yksinkertainen esitys haluttuun tarkoitukseen tarvittavista ominaisuuksista. Simulaatio on mallin operaatio, jossa tarkoitus on tehdä laadullisia tai määrällisiä johtopäätöksiä käyttäytymisestä tai mallintaa todellisia tilanteita. (Murray-Smith, Oulasvirta, Howes, Müller, Ikkala, Bachinski & Klar, 2022.) Simulaatioita voidaan käyttää ennustamaan tehtävässä suoriutumista, kuten tehtävään annettua ajankäyttöä tai onnistumisprosenttia. Ne voivat olla myös biomekaanisia malleja, joilla ennustetaan liikettä ja sen fyysisiä ergonomiaa, kuten myös psykologisia ja terveystaustaisia vaikutuksia. Simulaatioissa voidaan käyttää eri komponentteja ennustamassa havaittua käytössä eri konteksteissa ja ne voivat sisältää kognitiivisia elementtejä (Murray-Smith ym., 2022).

Mallintamista voidaan hyödyntää ymmärtämään ja ennustamaan ihmisten käyttäytymistä. Kognitiiviset arkkitehtuurit sisältävät psykologisia teorioita ja empiirisiä esityksiä ihmisten kognitiosta, jotka ovat jatkuvia ja tehtävästä riippumattomia. Tämän pohjalta siis mallintaminen edustaa proseduraalista ja selittävää tietoa, joka oletetaan olevan vaadittua tietyn tehtävän suorittamiseen. Mallin luominen vaatii, että kognitiiviset mekanismit ovat kuvattu erittäin yksityiskohtaisesti sekä samalla tapaa kuin ihmisellä. (Heinath & Urbas, 2007.)

## 2.2 Vuorovaikutuksen kognitiivinen mallinnus

On olemassa useita eri kognitiivisen mallintamisen menetelmiä, joita hyödynnetään käytettävyyden analysointiin arvioimalla tehtävän suorittamiseen tarvittavia kognitiivisia prosesseja (Cagiltay & Ocak, 2016). Näitä käytössä olevia menetelmiä mallintamiseen ovat muun muassa Fittsin laki, The Power Law Of Practice, KLM, GOMS, EPIC, SOAR, ja ACT-R (Leino ym., 2019), jotka eroavat toisistaan käyttötarkoituksen ja lähestymistavan osalta. EPIC-mallin lähestymistapa on, että tärkeimmät ihmisen suorituskykyä rajoittavat tekijät ovat tehtävän havainto- ja motoriset aspektit. SOAR mallissa lähtökohta on nähdä kaikki älykäs käyttäytyminen eräänlaisena ongelmanratkaisuna. Siinä uutta tietoa opitaan, kun ongelmanratkaisun aikana kohdataan umpikuja, jotka ilmenevät käyttäjän valinnan haasteena. SOAR arvioi eri vaihtoehdot ja valitsee niistä parhaan. Tehtävän suorittamiseen tarvittavan tiedon kuvaamiseksi asiantuntijatasolla on vakiintunut GOMS mallinnustapa, jossa tehtävä analysoidaan tavoitteiden, operaattorien, menetelmien ja valintasääntöjen kannalta. Tässä metodologiassa tavoitteet muodostavat hierarkian, joka alkaa lopputuloksen saavuttamista edustavasta pääavoitteesta ja jatkuu osatavoitteisiin. (Van Rijn ym., 2011.) Keystroke-level Model (KLM) paradigmassa tapahtuvassa mallinnuksessa keskeisiä komponentteja ovat silmänliike, visuaalinen haku ja cursorin liikettä kuvaava malli. KLM on suosittu malli, jolla voidaan ennustaa tehtävien suoritusaikaa graafisessa käyttöliittymässä. KLM ennustaa tehtävän valmistumisen ajan operaattoreiden lineaarifunktiona. (Oulasvirta, Leino & Kurimo 2019.)

Erilaisten mallien avulla voidaan analysoida vuorovaikutusta ja arvioida tehtävässä suoriutumista. Niiden avulla voidaan vähentää virheitä ja työkuormaa sekä vertailla suunnitelmia. (Leino ym., 2019.) Malleja voidaan hyödyntää ymmärtämään ja ennustamaan ihmisten käyttäytymistä. Nämä kognitiiviset arkkitehtuurit sisältävät psykologisia teorioita ja empiirisiä esityksiä ihmisten kognitiosta, jotka ovat jatkuvia ja tehtävästä riippumattomia. Tämän pohjalta siis mallintaminen edustaa proseduraalista ja selittävää tietoa, joka oletetaan olevan vaadittua tietyn tehtävän suorittamiseen. Mallin luominen vaatii, että kognitiiviset mekanismit ovat kuvattu erittäin yksityiskohtaisesti sekä samalla tapaa kuin ihmisellä (Heinath & Urbas, 2007).

### 2.2.1 Motorinen liike

Käyttöliittymässä kohteen klikkaaminen on välttämätön osa käyttöliittymän suunnittelussa. Ihmisen ja teknologian vuorovaikutuksen (*HCI*) alalla kohdistetun liikkeen nopeuden ja tarkkuuden tasapaino ja sen vaikutus ihmisen liikkeeseen on ollut tärkeänä tutkimusaiheena. Näiden yhteensovittaminen kuvataan ihmisen ja teknologian vuorovaikutuksen alalla pitkälti Fittsin lain ajan minimointiparadigman mukaisesti (Guiard & Rioul, 2015). Fittsin laki on vuonna 1954 julkaisussa artikkelissa kuvattu matemaattisen yhtälön muodossa mitä

tarkempi tarkkuusvaatimus, sitä hitaampi liike (Fitts, 1992). Guiardin & Rioulin (2015) mukaan Fittsin laissa on kuitenkin puutteita, jonka takia se ei kuvaa ei ota huomioon kaikkia ihmisen liikkumisen ominaisuuksia, kuten liikkeen aloituksen ja pysäyttämisen aikaa. Nämä puutteet voivat johtaa virheellisiin ennusteisiin liikkeen nopeudesta ja tarkkuudesta. Guiardin & Rioulin (2015) artikkelissa esitetään kehitetty malli WHO (The Wighted Homographic Model), joka kannustaa parempaan ymmärrykseen nopeuden ja tarkkuuden suhteen syistä hyödyntäen Fittsin lakia. Sen avulla voidaan arvioida perinteistä suoritusta vastaavien resurssien määrä sekä tunnistaa resurssien jakamisen strategiaa. Resurssien jakamisen strategialla tarkoitetaan ihmisen kykyä mukauttaa mihin käytössä olevia resursseja kohdistetaan. Ihminen voi huomattavassa määrin moduloida osuutta, jossa he kohdistavat resurssinsa keskenään ristiriitaisiin nopeus- ja tarkkuuspyrkimyksiin, osoittaen tiettyä strategista joustavuutta. Kyseinen strategia on tärkeä näkökulma tarkkuuden ja nopeuden suhteesta, joka ei ole aiemmin ollut osana mallia. Tämä voi auttaa suunnittelijoita samaan tutkimusdatasta luotettavampaa ja valmiimpaa tietoa suunnitteluvaihtoehtojen vertailevista eduista. (Guiard & Rioulin, 2015.)

## 2.2.2 Muisti

Kognitiivisen psykologian nousun myötä ihmisen muisti nousi tärkeäksi tutkimuskohteeksi. Anderson (1983) on määritellyt muistiin liittyen, että yksinkertainen havainto ihmiskokemuksesta on se, että kohtaamme erilaisia tosiasioita ja säilytämme ne eri aikakausien ajan. Baddeleyn (2001) kuvauksen mukaan muistilla on kolme toiminnallista erillistä ajallista vaihetta, joita ovat tiedon tallettaminen, säilyttäminen ja haku, eli muistin käyttäminen. Pitkäaikainen muisti luokitellaan deklaratiiiviseen muistiin tai ei-deklaratiiiviseen muistiin. Deklaratiiivisessa, eli ekspansiivisella (*explicit*), muistilla tarkoitetaan tapahtumien ja tiedon tietoista muistamista. Ei-deklaratiiivisella, eli implisiivisellä (*implicit*), muistilla, tarkoitetaan pitkäkestoista muistia. Implisiivinen muisti eroaa eksplisiivisestä muistista siinä mielessä, että se ei vaadi tietoista ajattelua. Deklaratiiivinen muisti luokitellaan semanttiseen muistiin, eli kyvykkyyteen assosoida symbolista informaatiota ja episodiseen muistiin, joka käsittää ihmisen muistin kokemuksista, tapahtumista ja tilanteista. Episodista muistia voidaan myös kutsua tapahtumamuistiksi. Implisiivinen muisti jaetaan taitoihin ja tapoihin, alustamiseen, klassisiin ehdollistamiseksiin ja ei-assosiatiiviseen oppimiseen. (Baddeley, 2001.)

Anderson (1974) on tehnyt klassisen tutkimuksen, joka kuvaa pitkäkestoisen muistin toimintaa kognitiivisessa mallintamisessa. Tutkimuksessa osallistujien tuli oppia eri lauseita, jotka assosioivat ihmisiä eri paikoissa. Tämän jälkeen osallistujilta kysyttiin, muistivatko he nähneensä kyseisen lauseen. Tutkimuksessa selvitettiin eri tekijöitä, kuten oppimisen kontekstin vaikutusta tiedon palauttamiseen pitkäkestoisesta muistista (Anderson, 1974). Tästä tutkimuksesta on pohjautunut kognitiivisen mallin ACT-R (*Adaptive Control of Thought-Rational*) teoria, mikä pyrkii tarjoamaan yhtenäisen kuvauksen useista ihmisen kognition näkökulmista (Anderson, Bothell, Lebiere & Matessa, 1998).

Kyseinen malli voi ennustaa kuinka visuaaliset ominaisuudet, kuten väri, muoto ja koko, vaikuttavat visuaalisen haun toimintaan yksittäisen fiksaation tasolla. (Jokinen, ym. 2020). Mallissa oppiminen perustuu rationaaliseen analyysiin, jossa tietoa lisätään ja säilytetään muistissa odotetun käytön ja hyödyn perusteella. (Andersen, 2004). ACT-R erottuu aiemmista ACT teorioista, sillä yksityiskohdat sen suunnittelussa on johdettu vahvasti Andersonin rationaalisesta analyysistä. ACT-R:ssa on muun muassa tuotantojärjestelmä, joka on säädetty toimimaan mukautuvasti ympäristön tilastollisen rakenteen perusteella. Teoria olettaa, että tuotantojärjestelmä operoi deklaratiiivisessa muistissa. (Anderson, Bothell, Lebiere & Matessa, 1998.) ACT-R arkkitehtuurissa keskiössä oleva moduuli on deklaratiiivinen muistijärjestelmä, joka tallentaa tietoja. Deklaratiiivinen tieto esitetään rakenteeltaan kaavamaisina osina. Tiedoilla deklaratiiivisessa muistissa on eri aktivointi-arvoja, jotka kuvastavat kuinka usein tietoa on käytetty menneisyydessä ja miten se liittyy nykyiseen kontekstiin. Aktivointi määrittää kuinka kauan menee tiedon hakemiseen muistista ja voidaanko sitä palauttaa ollenkaan. (Andersen, ym. 1998.) ACT-R mallissa työmuistin rajoitteet johtuvat tiedon unohtumisesta muistissa ja häiriöstä deklaratiiivisessa muistissa (Anderson ym., 2004). Yksilölliset erot selittyvät eroilla levitysaktivoinnissa (Van Rijn, Johnson & Taatgen, 2011.) ACT-R malliin on tehty jatkokehitystä edeltävien vuosien aikana, jotka parantavat sen käytettävyyttä mallinnukseen. Esimerkiksi siihen on lisätty uusia mekanismeja, jotka tunnistavat paremmin lyhytkestoisien muistin toimintaa (Van Rijn, ym., 2011). ACT-R juuret ovat oppimisen mallintamisessa, joka tekee siitä sopivan graafisten käyttöliittymien oppimisen mallintamiseksi. (Jokinen, ym. 2020).

Tutkimuksessa käytettävässä olevassa mallissa ei suoranaisesti hyödynnetä ACT-R arkkitehtuuria, vaan ACT-R arkkitehtuurista johdettua pitkäkestoisien muistin komponenttia. Käytetyt komponentit ovat ACT-R mallissa kuvattuja yksinkertaistettuja yhtälöitä ja algoritmeja siitä, kuinka simuloidaan, säilytetään ja palautetaan assosiaatioita ihmisen muistista. Mallia on käytetty onnistuneesti tutkimuksessa selvittämään kuinka käyttöliittymän muutokset vaikuttavat tiedon hakuaikaan ja uudelleen oppimiseen (Jokinen, Sarcar, Oulasvirta, Silpasuwanchai & Wang, 2017.)

### 2.2.3 Silmän liike

Ihmisen näköaisti on perusteeltaan tiedonkäsittelyn kapasiteetiltaan rajoitteellinen (Salvucci 2001). Silmän anatomia rajaa alueen minkä ihminen voi nähdä tarkasti. Näön tarkkuus on paras foveassa, joka ulottuu kahden asteen päähän näkökeskuksesta (*fixation*). Fovea huononee nopeasti parafovean kohdalla ja reuna-alueen ulkopuolella, eli parafovean ulkopuolella. Tämä liike edellyttää ballistia silmän liikkeitä, jotka tuovat fiksaatioiden avulla visuaalista selkeyttä kiinnostaville alueille. Tämän liikkeen valmistelu ja toteutus vie aikaa, mikä rajoittaa ihmisen näön tiedonkäsittelyä. Nämä rajoitteet johtavat strategisen mukautumiseen painottamiseen määrittäessä, kuinka kohdetta etsitään. (Jokinen, ym. 2020.) Toisin sanoen visuaalisessa järjestelmässä on kyse poimintaongelmasta, eli

visuaalisen järjestelmän on päätettävä mihin kiinnittää huomiota seuraavaksi (Wolfe and Horowitz, 2017).

Laskennallinen malli EMMA (*Eye Movements and Movement of Attention*) mahdollistaa katseen ja huomion liikkeen mallintamisen (Salvucci, 2001). Mallin toiminnassa kognitiivisen prosessori aloittaa visuaalisen huomion muodostamisen antamalla käskyn liikuttaa huomiota visuaalista kohdetta kohti. Kun visuaalinen haku on löytänyt kohteen, EMMA aloittaa kohteen koodauksen prosessin. Tässä prosessissa tunnistetaan visuaalinen representaatio ja tallennetaan se deklaratiiviseen muistiin, eli muistin sisällöllisiin yksiköihin. EMMA mallissa koodausaika riippuu siitä, miten useasti objektia esiintyy ja kuinka kaukana objekti on fovean pisteestä. Objektin etäisyyden kasvaessa myös koodausaika kasvaa ja vähentyy, kun objektia esiintyy useammin. (Salvucci, 2000.) Malli sisältää tiiviin, mutta välillisen linkin silmän liikkeiden ja visuaalisen koodauksen välillä, sallien mallin ottaa huomioon yleiset silmän liikkeet, kuten useat fiksaatiot tai ohitetut fiksaatiot. Ohitettu fiksaatio tarkoittaa, että visuaalinen kohde ei ole fiksoitu suoraan, mutta kohde on koodattu perifeerisesti. Silmien liikkeiden osalta malli kuvaa tapahtuuko silmän liikkeitä, milloin liikettä esiintyy ja mihin kohde pysähtyy suhteessa kohteisiinsa. (Salvucci, 2001.)

Mallissa silmän liikkeet jaetaan valmisteluun ja toimeenpanoon. Silmän liikkeen valmistelu alkaa, kun visuaalinen huomio kiinnitetään uuteen kohteeseen. Kun valmistelu on tehty, malli ohjelmoi ja johtaa sakkadit, jotka ovat silmän pieniä liikkeitä. Näiden vaiheiden ero on, että ihmisen huomion voi vaihtua ja silmänliike peruuntuu sen takia, mutta se ei voi peruuntua enää valmistelun jälkeen. Liikkeissä valmisteluaika vie keskimäärin 150ms ja motorinen toimeenpano 50ms. Sakkadi vie 20 ms, jonka lisäksi kuluu 2 ms jokaisen sakkadin rajamaan visuaalisen. (Salvucci, 2000.) Silmän liikkeiden ja visuaalisen koodauksen lisäksi EMMA malli kuvailee näiden kahden kohtaamispistettä ja keskeistä kognitiivista prosessia. Kohtaamispiste on melko minimaalinen, sillä kun kognitio pyytää jonkun visuaalisen objektin koodausta, EMMA käsittelee koodauksen prosessin ja siitä seurauksena olevan silmän liikkeet ja tarjoaa visuaalista objektia kognitiolle, kun kohteen koodaus on valmis. Tämä mahdollistaa EMMA mallin yhdistämisen useisiin erityyppisiin kognitiivisiin prosessoreihin. Mallin tuloksia on verrattu empiirisen dataan, jonka pohjalta on todettu, että niiden avulla pystytään aika hyvin ennustamaan ihmisten käyttäytymistä. (Salvucci, 2001.)

#### 2.2.4 Ihmisen havaintokyky

EMMA malli ennustaa silmän liikettä ja koodauksen aikaa, mutta se ei tee valintoja mikä koodattava objekti tulisi olla. Jokisen ym. (2020) määritelmässä mallin tavoite on löytää objekti koodaamalla visuaalisia elementtejä ympäristössä. Kohteen koodaus mahdollistaa kohteen tekemään päätöksen onko kyseessä kohde vai häiritsevä tekijä. Ennen kuin malli voi koodata mitään elementtejä, sen täytyy osallistua yhteen. Mallissa käytetty *The feature guidance* -komponentti säilyttää ympäristön visuaalisen representaation ja ohjaimen pyynnöstä se kiinnittää huomion johonkin sen elementeistä. Huomioitava kohde määräytyy visuaalisten elementtien ominaisuuksien mukaan, joiden esiintyminen perustuu niiden

eksentrisyyteen tai kulmaetäisyyteen fiksaatiosta. Malli perustuu ominaisuusohjauksen ja hyödyllisyysoppimisen periaatteisiin. Odotetun hyödyn perusteella ohjain pyytää ohjattua huomion käyttöönottoa silmän liikejärjestelmältä. Tämä ohjaa huomion näkyvimpään valvomattomaan näkyvään elementtiin visuaalisesti esitetyssä ympäristössä ja johtaa sen koodaukseen. Jos tietoja sijainnista tai ominaisuuksista on tallennettu pitkäkestoiseen muistiin (*Long term memory, LTM*), ohjain, joka oppii toimiensa avulla, voi valinnaisesti pyytää näiden tietojen huomioimista kohteen tarkastelussa." Koodatut elementit tallennetaan visuaaliseen lyhytkestoiseen muistiin (*visual short term memory, VSTM*), mikä estää uudelleenkäynnit. Elementtien sijainti ja visuaaliset ominaisuudet tallennetaan pitkäkestoiseen muistiin myöhempää käyttöä varten. (Jokinen ym., 2020.) Esitettyjen visuaalisten ominaisuuksien perusteella kaikille elementille annetaan aktiivitaatio painotettuna yhteenvetona aktiivitaatioista ärsykelähtöisestä (*bottom-up*) ja skeemalähtöisestä (*top-down*) prosessoinnista. Ärsykelähtöinen aktivointi tarkoittaa elementin näkyvyyttä, joka lasketaan sen ominaisuuksien erona ympäristön kaikkiin muihin elementteihin nähden, painotettuna elementtien välisen lineaarisen etäisyyden neliöjuurella. (Nyamsuren & Taatgen, 2013). Käytännössä elementit kiinnittävät huomiota ja kiinnittävät käyttäjän katseen. Esimerkkinä voidaan kuvata kaksi vihreää elementtiä, jotka ovat samanlaisia ja punainen ja vihreä elementti, jotka ovat erilaisia. Elementin ärsykelähtöinen aktiivitaatio lisääntyy, jos se on lähellä elementtejä, jotka eivät jaa samoja ominaisuuksia. Esimerkissä ainut punainen elementti vihreiden elementtien joukossa antaa punaiselle elementille suuren ärsykelähtöisen aktiivitaation, sillä se on erilainen kuin muut ympärillä olevat elementit. Vihreillä elementeillä on vähemmän ärsykelähtöistä aktiivitaatiota, sillä ne ovat väriominaisuudeltaan samanlaisia toistensa kanssa. (Jokinen, ym. 2020.)

Jos ohjain ei sisällä ominaisuuksia huomion kohdistamiseen liittyen, huomio ohjataan kohti elementtiä, joka kiinnittää eniten käyttäjän katseen. Kuitenkin ohjain voi myös sisältää omaisuuden, joka sopii huomion käyttöönottoon ja johtaa huomiota skeemalähtöisen prosessoinnin mukaan. (Jokinen, ym.2020). Skeemalähtöisessä prosessoinnissa suuntautuvat prosessit kuvaavat korkean tason visuaalisen hakutehtävän roolia määritettäessä aluetta, johon seuraavaksi kohdistetaan. Tämä tarkoittaa sitä, että huomion kiinnittäminen riippuu hakutehtävästä. Skeemalähtöinen prosessointi edellyttää, että visuaalisen käyttöliittymän käyttäjällä, on tehtävään liittyvää tietoa haluttujen kohteiden ominaisuuksista. Tieto ominaisuuksista voi olla värin, suunnan tai koon muodossa. (Wolfe ja Horowitz, 2017.)

### 2.2.5 Vahvistusoppiminen

Vahvistusoppiminen on menetelmä, jolla voidaan testata tehtävän oppimista ympäristössä, jotka vaativat peräkkäisiä toimintoja. Näissä tehtävissä ympäristö tunnetaan vain osittain eikä se ole täysin agentin hallinnassa. Vahvistusoppiminen on herättänyt kiinnostusta yleisyytensä ja kestävyytensä ansiosta, joita on testattu esimerkiksi pelaamisessa, robotiikassa ja dialogijärjestelmissä. Näissä ihminen voi keskustella tietokoneen kanssa. (Leino, ym. 2019.)

Vahvistusoppimisen avulla voi testata mikä on paras ratkaisu päätöksenteon ongelmaan. Siinä tehtävän tavoitteen mukaan koneoppimiseen perustuva vahvistusoppiminen kokeilee valittua mallia ja selvittää, mikä on paras tapa hyödyntää käytettävissä olevia resursseja tehtävän tekemiseksi. Vahvistusoppimisen avulla voidaan myös arvioida käyttäytymiseen liittyvät subjektiiviset hyödyt, kun laskennallinen rationaalinen teoria on tehnyt ennusteet käyttäytymisen mukautumisesta niin ulkoiseen kuin sisäiseen ympäristöön. (Oulasvirta, ym. 2022.)

### 2.3 Kognitiivinen mallintaminen tuotekehityksessä

Heinath ja Urbas (2007) nostavat tutkimuksessaan esiin, että kognitiivinen mallintaminen mahdollistaa tuotekehitystiimille ihmisen käyttäytymisen ymmärtämisen ja ennustamisen, sekä näiden pohjalta paremman käyttöliittymäsuunnitelman. Mallien avulla pystytään tekemään oletuksia ja sen avulla ennustamaan eri näkökulmien ja muuttujien vuorovaikutusta käyttäjään. Eli voidaan tuottaa käyttäytymisen havaintoja empiirisissä tutkimuksissa. Järjestelmää käyttäessä useat tekijät vaikuttavat ihmisen käyttäytymiseen ja siinä mallintamista voitaisiin hyödyntää auttamaan ymmärtämään mitkä toisiinsa liittyvät kognitiiviset prosessit johtavat havaittuun käyttäytymiseen.

Prezenski, Brechmann, Wolff, & Russwinkel (2017) esittävät artikkelissaan, että kognitiiviset mallit pystyvät käyttöliittymässä toistamaan samoja tehtäviä simuloimalla useita käynnissä olevia kognitiivisia prosesseja kuin ihmiset. Tämän ansiosta mallit pystyvät antaa käsityksen käyttöliittymän tehtävistä, jotka ovat liian monimutkaisia analysoitaviksi kontrolloiduilla kokeilla. Käyttöliittymäsuunnittelun varhaisessa vaiheessa tämä voi tuoda lisäarvoa parantamalla järjestelmän käytettävyyttä. Mallintamista hyödyntäessä on silti tärkeä huomioida, että mallien käyttämisessä lopputulokseen johtavan prosessin ymmärtäminen on tärkeämpää kuin mallin sovittaminen koetuloksen mukaiseksi (Prezenski ym., 2017). Oulasvirran (2019) mukaan tuotekehityksessä kognitiivisten mallien etuna on, että ne pystyvät analysoimaan ja tuottamaan suunnitelmia sekä auttavat suunnittelijoita ymmärtämään, kuinka heidän käyttäjänsä käyttäytyisivät suunnitelmien käyttöliittymien suhteen. Tämä mahdollistaa suunnittelijoille tilaisuuden parantaa suunnitelmia. Jokinen ja kumppanit (2020) tutkimuksessa esitetään mallintamisen hyötyjä suunnittelijalle. Heidän tutkimuksessansa nostetaan esiin, että mallintaminen auttaa suunnittelijaa ennustamalla visuaalisen haun kestoa ja silmänliikkeiden määrää tietyssä käyttöliittymässä. Tämän lisäksi mallintamisen avulla voidaan saada tieto muutoksista visuaalisen haun kestosta ja silmänliikkeistä, kun käyttäjä tottuu elementtien asetteluun, sekä tietoa miten käyttäjät sopeutuvat dynaamisesti muuttuviin asetteluihin. (Jokinen, ym. 2020.)

John (2004) sekä Heinath ja Urbas (2007) toteavat tuotekehityksessä mallintamisen olevan sopiva tapa arvioida käyttöliittymän käytettävyyttä suunnitteluvaiheen varhaisessa vaiheessa. Varhaisen vaiheen mallintamisen testauksesta

huolimatta mallintaminen ei poissulje käyttäjätestauksien tarpeellisuutta ja muita menetelmiä käytettävyyden tutkimiselle, mutta se pystyy toimimaan täydentävänä menetelmänä suunnitelmien testauksessa. (Oulasvirta, 2019.) Järjestelmien kehittyessä entistä monimutkaisimmiksi ja käyttäjien joukko monimuotoisemmaksi, käyttäjätestaukseen tulee lisää haasteita. Näitä ovat muun muassa monimutkaisuus ja eettiset haasteet. Haasteiden määrän kasvaessa mallintamisen avulla tehtävissä simulaatioissa voidaan testata laajempaa käyttäjäjoukkoa. (Murray-Smith ym., 2022). Laajemman ja monimuotoisemman käyttäjäjoukon testaaminen mallintamisen avulla voi mahdollisesti tuoda merkittäviä etuja tuotekehitysprosessiin.

Mainituista hyödyistä huolimatta mallintaminen ei ole ollut kovin laajasti käytössä. John ja kumppanit (2004) uskovat, että syinä siihen ovat työmäärä, joka muodostuu mallin oppimisesta ja valmistelusta. Näin ollen mallintamisen hyötyjä ei pakosti ole voinut perustella riittävästi. Heinath & Urbas (2007) artikkelissaan tukevat näitä tuloksia, sillä heidän tutkimuksensa mukaan kognitiivista mallintamista ei hyödynnetä lähinnä mallin kehitysprosessin aikaa vievän prosessin takia. John & Suzuki (2009) esittelevät taas mallintamisen olevan kustannustehokas ja aikaa säästävä testaustapana (John & Suzuki, 2009), mutta rajoitteena sen käytölle voi olla prosessin haastavuus (John, ym. 2004).

Jeffries, Miller, Wharton & Uyeda (1991) tutkimuksessa mallintamisen etuna nähdään sen joustavuus, sillä mallinnuksen voi tehdä kehitystiimi eikä tarvitse varsinaista osaamista käyttäjäkokemuksen suunnittelun alalta. Tutkimuksen tulos herättää pohdintaa onko kehitystiimillä kyvykkyyttä analysoida mallintamisesta muodostuvaa tutkimusdataa ja ymmärrystä eri kognition vaikutuksista. Tutkimustuloksien hyödyntäminen ja analysointi voi vaatia ymmärrystä ihmisen kognitiosta ja vuorovaikutuksen suunnittelusta, jotta niistä saadaan paras mahdollinen hyöty. Gil & Kaber (2012) nostavat esiin artikkelissaan, ettei kaikki visuaaliset ja motoriset käyttäytymismallit ole vielä edustettuna, joka voi hidastaa mallintamisen käyttöönottoa tuotekehitysprosesseihin.

Kognitiiviseen mallintamiseen on kohdistunut myös enemmän kritiikkiä sen hyödyllisyydestä. Oulasvirran (2019) artikkelissa on kyseenalaistettu, miksi vaivautua tekemään mallintamista, kun käytettävyydestä ja vuorovaikutussuunnittelu vastaavat samaan ongelmaan. Artikkelin mukaan mallintamiseen investointi voi tarjota pitkän aikavälin etuja paremman tieteen ja parempien ratkaisujen kautta. Malleja voidaan myös käyttää analysoimaan ominaisuuksia, kuten kestävyyttä ja skaalautuvuutta. Esimerkiksi mallintamisen avulla voidaan selvittää mitä tapahtuu, kun ruudun koko muuttuu, käyttäjiä tulee lisää tai käyttäjien tehtäviä muutetaan. Malleja on mahdollista myös integroida suunnittelu-työkaluihin, jotka auttavat suunnittelijoita analyysseissa. (Oulasvirta, 2019.) Murray-Smith ja kumppanit (2022) toteavat artikkelissaan, että perinteinen käytettävyydestä on aiemmin koettu nopeampana ja hyödyllisempänä testausmenetelmänä, mutta offlinessa tehtävä simulaatio testaa pystytäänkö ymmärtämään vuorovaikutuksellista järjestelmää. Sen avulla voidaan parantaa käyttöliittymän ennustettavuutta ja toimivuutta. Artikkelissa esitetään mallintamisen simulaatioiden olevan tulevaisuudessa kustannustehokas ratkaisu, sillä sen avulla voi säästää aikaa ja rahaa. Sillä voidaan myös välttää laajoja käyttäjien kanssa tehtäviä parametrien optimoinnin tutkimuksia. (Murray-Smith ym. 2022.)



Mallintamisen on kritisoitu olevan myös luonnostaan virheellistä, sillä ihmisen kognitio ei ole laskennallinen mekanismi. Jatkuvasti kehittyvä tekoälyn merkittävät kehitysaskeleet ovat perustuneet mielen laskennallisiin kaavoihin. Tälle lähestymistavalle ei ole vielä muodostunut selkeitä rajoja. (Oulasvirta, 2019.)

## 2.4 Tiedonkäsittelyn rationaalisuus

Ihmisen tiedonkäsittelyn rationaalisuus selittää miten ihmisen kognitiota käsitellään tiedonkäsittelyn näkökulmasta. Nämä mallit selittävät kognition osalta käytöstä monipuolisesti, sillä ne keskittyvät kognitiivisiin rajoitteisiin ja tehtävän luomiin rajoitteisiin. Tiedonkäsittelyn rationaalisuus selittää kuinka havaittavissa oleva vuorovaikutus on seurausta kognitioiden ja ympäristön asettamien rajoitusten seurauksena. (Oulasvirta ym., 2022.) Teorian keskeinen ajatus on, että vuorovaikutuksellinen käyttäytyminen ilmenee menettelytavasta, joka on optimaalisesti sopeutunut subjektiivisiin mieltymyksiin ja rajoihin. Mieltymyksiin sisältyy havaitut voitot ja kustannukset, jotka asetetaan sekä sisäiseen ympäristöön, eli mieleen, että ulkoiseen ympäristöön. Mainittuja kustannuksia ovat muun muassa virhekustannukset ja rajat. Ulkoiseen ympäristöön lasketaan mukaan myös käytettävä laite. (Oulasvirta ym., 2022.) Ihmisen tiedonkäsittelyn prosessointia rajoittaa useasti rajoitteet, eli käytännössä ne rajoittavat kapasiteettia mitä laskennallisilla strategioilla on käytettävissä vuorovaikutukselle. Oulasvirta ja kumppanit (2022) ovat kehittäneet perusteen, että ohjauksen toimitapa sopeutetaan rajoitteiden vuorovaikutuksesta ulkoiseen ympäristön kanssa vain sisäisen, eli kognitiivisen ympäristön, kautta. Tämän määrityksen mukaisesti suunnittelu ei vain määrittele käyttäytymistä, vaan enemmän muokkaa käyttäjän ulkoista ympäristöä ja näin ollen vaikuttaa valintoihin mitä rationaalinen käyttäjä tekee. Tätä kutsutaan tiedonkäsittelyn rationaalisuudeksi, sillä vuorovaikutuksen ennustamiseen käytetty menettelytapa on laskennallinen toimintatapa mielen käytettävissä olevien laskelmien asettamien rajojen sisällä. (Oulasvirta ym., 2022.)

Lewis, Howes ja Singh (2014) toteavat, että ihmisen käyttäytyminen muodostuu ympäristön rakenteeseen ja kognitioon itseensä mukautuvista kognitiivisista mekanismeista. Lewisin ja kumppaneiden (2014) määrittämässä teoriassa nostetaan esille, että tiedonkäsittelyn rationaalisuudessa on optimaalisen ohjelman ongelma. Mainittuun ongelmaan vaikuttaa ympäristö, mekanismi ja hyötyfunktiot, jolloin ongelman ratkaisemiseksi käytetään optimaalista ohjelmaa. (Lewis ym., 2014.) Tiedonkäsittelyn rationaalisuus nähdään vuorovaikutuksen teoriana sopeutumisesta rajoihin. Havaittavissa olevat ilmiöt, jotka muodostavat sopeutumisen ihmisen ja teknologian vuorovaikutuksessa ovat yksilöllisiä ja vaihtelevat henkilön ominaisuuksien, mieltymyksien ja kognitiivisen kykyjen mukaan. Mukautumisen teorioiden tulee selittää, miten monimuotoisuus syntyy sen sijaan että vain kuvailee miten. (Oulasvirta ym., 2022.)

Tiedonkäsittelyn rationaalisuus on siis vuorovaikutuksen teoria rajoituksiin mukautumisesta. Käyttöliittymän suunnittelun osalta on tärkeä

ymmärtää, että miksi ihmiset sopeutuvat sellaisiin rajoihin, jotka liittyvät monenlaisiin tietokoneen käytön ongelmiin. Esimerkiksi ihmisen muisti rajoittaa merkittävästi ihmisen sopeutumista vuorovaikutuksellisiin tehtäviin. Useasti käyttöliittymän suunnitelmassa nähdään ominaisuuksia, jotka vastaavat ihmisen muistin ominaisuuksiin. Näistä esimerkkinä voidaan käyttää menua ja ikoneita, sillä niitä käytettäessä ihminen voi hyödyntää tunnistusmuistia, eikä ne vaadi erillistä palauttamista muistista. Muistista palauttaminen on vähemmän luotettava menetelmä verrattuna tunnistusmuistin käyttöön. Rajallisen muistin lisäksi ihmisillä on kyky mukautua ja muuttaa tapojaan, jotta he suoriutuvat tehtävästä. Esimerkiksi ihmisen kopioidessa puhelinnumeroa paperilta älypuhelimelle, ihmiset jakavat tehtävän hallittaviin ja pienempiin osiin. Pienempien tehtäväosien avulla virheen todennäköisyys pienenee, mutta niihin käytetään enemmän aikaa, sillä ihmisen katsoo vuorotellen paperia ja puhelinta. Vastaavassa tehtävässä yksilöllä on taipumus valita numeroiden kappalejako sen mukaan, mikä hyödyntää parhaiten heidän muistiansa huomioiden tehtävän nopeuden ja tarkkuuden vaatimukset. (Oulasvirta ym., 2022).

Muistin osalta tiedonkäsittelyn rationaalisuuden malleja on käytetty selittämään, kuinka käyttäjän käyttäytyminen mukautuu niin lyhyt- ja pitkäkestoisien muistin rajoituksiin. Tiedonkäsittelyn rationaalisissa malleissa olevat erilaiset käytännöt ovat seurausta ihmisen muistin erilaisista rajoista. Tutkimuksissa Jokinen ja kumppanit (2020) ovat osoittaneet, että visuaalinen haku pystyy mukautumaan visuaalisen lyhytaikaisen muistin rajoihin ja saatavuuteen sekä tarkkuuteen pitkäaikaisen muistin paikallisessa takaisin kutsussa (*positional recall*). Mallin avulla pystytään selittämään miten yksityiskohdat käyttöliittymän suunnittelussa vaikuttavat käyttöliittymän oppimiseen ja miten ne mukautuvat muutoksiin suunnitelmassa. (Jokinen ym., 2020).

Ihmisen havaintokyky on osa tiedonkäsittelyn rationaalisuutta. On olemassa useita visuaalisen järjestelmän määrittämiä rajoitteita, jotka ovat tärkeitä ihmisen ja teknologian vuorovaikutuksen alalla (Oulasvirta, ym. 2022). Käyttäjän kerää jatkuvasti informaatiota useilla silmän liikkeillä ja samaan aikaan rakentaa kuvaa maailmasta. Tutkimuksissa on näyttöä siitä, että nämä silmän liikkeet ovat mukautettuja kunkin yksilön oman verkkokalvon tappisolujen ja sauvasolujen (Geisler, 2011) havainto-ominaisuuksiin sekä odotettuun tiedonsaantiin (Najemnik & Geisler, 2008). Lisäksi ääreisnäön ja lähinäön yhdistelmän tiedetään olevan visuaalisissa hakutehtävissä tärkeitä (Kieras & Horgnof, 2014). Visuaalisissa hakutehtävissä ihmiset mukautuvat kohteen värin, muodon ja koon mukaan erilaisiin profiileihin. Esimerkiksi jos kohteen muototieto on vaikeimmin havaittavissa ääreisnäössä, ihmiset eivät niin todennäköisesti valitse muotoa katseen ohjaamiseen kuin väriä tai kokoa. Ihmisen ja teknologian vuorovaikutuksessa kognitiivisten teorioiden tulee selittää, kuinka havaitsemiseen liittyvät rajoitteet, kuten näön rajoitteet, muokkaavat vuorovaikutteista käyttäytymistä. (Oulasvirta ym., 2022.)

Käyttäjän havaintokykyä ja motorisia rajoitteita voi mallintaa ärsyke- ja havaintofunktioissa. Chen, Bailly, Brumby, Oulasvirta ja Howes (2015) esittivät tutkimuksessaan, että erilaiset visuaaliset ominaisuudet, kuten valikon otsikon muodot ja niiden sanallinen sisältö voidaan ryhmitellä eri tarkkuuteen

riippuen niiden kulmaetäisyydestä foveasta. He osoittivat, että tämän rajoituksen vuoksi optimaalinen toimintatapa riippuu menun pituudesta ja järjestyksestä. Tutkimuksesta saatiin hyvä vastaavuus, kun sitä verrattiin katseenseurantatietoihin. Jokinen, Acharya, Uzair, Jiang ja Oulasvirta (2021) ovat osoittaneet tutkimuksessaan, että kosketusnäytöllä kirjoittamisen tapa mukautuu näppäimistön aseteluun. Tutkimuksessa käytettävä malli on pystynyt toistamaan onnistuneesta useita ihmisen kirjoittamisessa havaittavia mittareita ja ilmiöitä, kuten näppäimen valinnan välinen aika, keskimääräinen kirjoitusnopeus sekä kirjoitusvirheiden ja oikolukujen välinen korrelaatio.

Ihmisen ja tietokoneen välisen vuorovaikutuksen tutkimuksissa on myös noussut esiin eri tapoja, joilla vuorovaikutus mukautuu ympäristöön. (Oulasvirta, ym. 2022). Ihminen mukautuu aktiivisesti muutoksiin ympäristöstä. Jos tehtävässä suuri epävarmuus kasvattaa virheiden määrää, ihminen muuttaa tapansa tehdä tehtävä, jotta suoriutuvat siinä parhaalla mahdollisella tavalla. Tiedonkäsittelyn rationaalisissa vuorovaikutusteorioissa ulkoisen ympäristön tila havaitaan ärsykkeiden kautta, jotka johtavat havaintoihin sisäisessä ympäristössä. Ulkoisen ympäristön tila määritetään olevan agentin kehon ulkopuolella oleva ympäristö. Vuorovaikutuksessa yksi tekijä on myös käyttäjän aiempi kokemus, joka useasti unohtuu ihmisen ja teknologia vuorovaikutuksen tutkijoilta (Oulasvirta, ym. 2022). Oaksford ja Chater (2009) kirjoittavat artikkelissaan, että ihmisten aiemmat uskomukset ja kokemukset tarjoavat ihmiselle lähtökohdan arvion tekemiselle. Todisteet tutkimuksista aiemman kokemuksen vaikutuksista ovat auttaneet luomaan rationaalista näkemystä ihmisen kognitiosta, erityisesti siitä, kuinka ihmiset ajattelevat epävarmuudesta ja kuinka aiempi tieto vaikuttaa rationaalisuuteen (Oaksford & Chater, 2009). Aiempaan kokemukseen liittyen ihmisen muistin suorituskykyä voidaan ymmärtää ympäristön rakenteeseen mukautumisena. Oletuksena on, että muistijärjestelmä täyttää ympäristön ärsykkeistä johtuvat informaatiovaatimukset hakemalla niihin liittyviä muistijälkiä ja toimii sen odotuksen mukaan, että ympäristön ärsykkeillä on taipumus toistua ennustettavalla tavalla. Muistia muokkaa myös tulevaisuuden muistitarpeiden odotettu jakautuminen, sillä ihminen unohtamaan tiedot, joita ei odoteta tarvitsevan tulevaisuudessa ja säilyttämään ne tiedot, joista todennäköisesti tulee olemaan tulevaisuudessa hyötyä (Schooler & Hertwig, 2005). Esimerkiksi muistitarpeiden odotettu jakautuminen näkyy salasanojen unohtamisena todennäköisemmin niillä sivustoilla, joita käyttäjän ei tarvitse niin useasti käyttää (Gao, Yang, Liu, Mitropoulos, Lindqvist & Oulasvirta, 2018).

Tiedonkäsittelyn rationaaliset teoriat ovat pystyneet selittämään yksilökohtaisia eroja eri tehtäväkonteksteissa. Jokinen, Remes, Kujala ja Corander (2021) ovat tutkimuksessaan selvittäneet eroja vaarallisessa ajokäyttäytymisessä optimaalisena sopeutumisessa ohjaukseen liittyviin häiriöihin. Tutkimuksessa tutkijat onnistuivat tunnistamaan ne henkilöt, joilla on korkea riski saada aikaan vaarallisia ajoradalta poikkeamisia. Sarcar, Jokinen, Oulasvirta, Wang, Silpasuwanchai & Ren (2018) ovat tutkimuksessaan mallintaneet motoriseen liikkeeseen liittyvän yksilökohtaisen vapinan vaikutuksen kosketusnäytön kirjoitustapaan.

Tiedonkäsittelyn rationaalisuus näkyy esimerkiksi tämän tutkielman tutkimuksessa käytetyssä käyttöliittymässä, jossa elementtejä on paljon. Tällöin ihmisen silmä pystyy näkemään vain yhteen paikkaan kerrallaan ja informaation koodaus vie aikansa, vie kohteen hakukin aikaa. Rajoitetta voidaan helpottaa, jos käyttöliittymässä voidaan hyödyntää jotakin informaatiota, kuten kohteen visuaalista salienssia. Rationaalisesti voitaisiin myös hyödyntää pitkäkestoista muistia kohteen sijainnista, jos sijainti on jo aiemmin viety muistiin.

## 3 MENETELMÄT

Menetelmäluvussa esitellään tutkimusmenetelmä ja käytetyt tehtävät. Aluksi käydään läpi tutkimusmenetelmä ja sen eteneminen, minkä jälkeen keskitytään tutkimuksessa käytettyyn käyttöliittymään ja siihen liittyviin tehtäviin.

### 3.1 Tutkimusmenetelmä

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää kuinka laskennallinen kognitiivinen mallintaminen tuottaa dataa käyttäjien eroavaisuuksista ja käyttöliittymän sopivuudesta tutkimukseen valituille käyttäjäpersoonille. Tutkimuksen tuloksien pohjalta arvioidaan kognitiivisen mallintamisen sopivuutta tuotekehitysprosessin aikaiseen suunnitteluvaiheeseen, sillä aiemmat tutkimukset puoltavat mallintamisen sopivuutta varhaiseen suunnitteluvaiheeseen. Menetelmäksi on valittu kokeellinen simulointi laskennallisen kognitiivisen mallintamisen menetelmällä, joka luodaan ennalta määritettyjen tehtävien mukaisesti. Tutkimuksessa käytetty malli on Jussi Jokisen kehittämä kokeellinen laskennallisen rationaliteetin malli, jota ei ole vielä julkaistu. Malli simuloi yleisesti käyttäjän vuorovaikutusta graafisten käyttöliittymien kanssa. Käytetyt komponentit ovat silmän liikkeet ja visuaalinen haku, hiiren motoriset liikkeet, ja pitkäkestoinen muisti, sekä vahvistusoppimisen avulla luotu teoria laskennallisesti rationaalisesta päätöksenteosta. Käytettävän mallin komponentteja on tarkemmin kuvattu luvussa 2. Tehtävistä muodostetaan mallin konfiguraatiolla useampia simulaatioita eri muuttujilla, jolloin ne tulkitaan erillisiksi kokeiksi. Simuloinnit ei tapahdu tutkijan toimesta, vaan tutkimuksessa hyödynnetään dataa, joka muodostuu mallista.

Jotta malli toimisi halutulla tavalla tutkimuksessa, tutkimuksen toteuttajan tulee määrittellä elementit, jotka noudattavat mukautuvan vuorovaikutuksen viitekehystä. Mallin tavoitteena on suoriutua tehtävistä tehokkaasti ja oikein, ja tähän päästään määrittelemällä hyöty tavoitteena ja palkkiona sekä rangaistuksina. Mallin on optimoitava käyttäytymisensä tavoitteiden ja saavutettavien hyötyjen suhteen. Tutkimuksessa käyttöliittymä ja siihen liittyvä tieto muodostavat ekologian. Malli ei pysty havaitsemaan ympäristössä olevaa tietoa täydellisesti, vaan

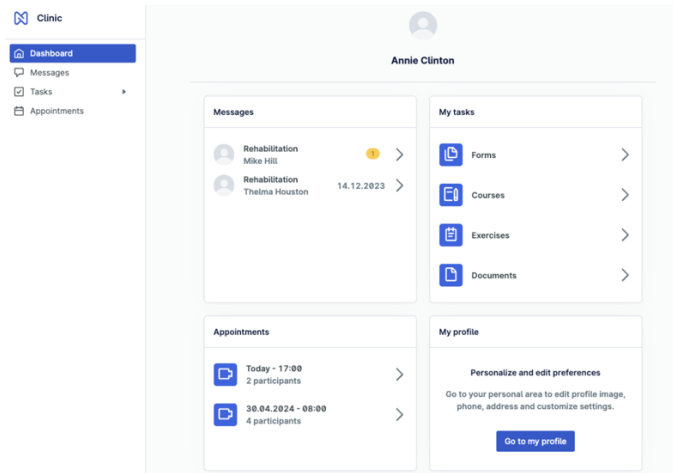
se luo koodatun tiedon perusteella sisäisen representaation. Kuvan tarkkuus riippuu siitä, miten malli on hakenut ja koodannut tiedon. Mallin muisti hiipuu ajan myötä, ja sisäisen representaation muodostumiseen vaikuttaa tiedonsiirtokanan kohina.

## 3.2 Tehtävät ja aineistot

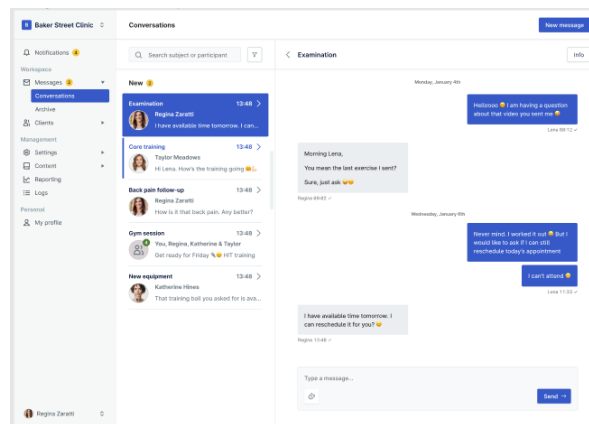
Tutkimukseen on valittu tutkittavaksi käyttöliittymäksi asiakkaille suunniteltu käyttöliittymä terveydenhuollon alalle suunnatussa asiakasportaaliissa. Tutkimuksessa mallinnukseen valitut kaksi eri tehtävää ovat käyttöliittymässä tuotetetaan perustuen yleisimpiä käyttötapauksia. Tutkimuksen alkuvaiheessa tehtävät luotiin käsitteelliseen kuvaukseen ja tämän kuvauksen pohjalta käytössä olevaa mallia muokataan vastaamaan kyseisen tehtävän tehtävänantoa. Tehtävistä muodostetaan mallin konfiguraatiolla useampia simulaatioita eri muuttujilla, jolloin ne tulkitaan erillisiksi kokeiksi. Simuloinnit ei tapahdu tutkijan toimesta, vaan tutkimuksessa hyödynnetään dataa, joka muodostuu mallista.

### 3.2.1 Tehtävä 1

Ensimmäisessä tehtävässä mallinnettava asiakas on kirjautunut sisään asiakasportaaliin, jonka jälkeen hänen tehtävänänsä on vastata terveydenalan ammattilaiselta saatuun viestiin. Tehtävästä suoriutuminen vaatii etusivulta tai vasemmasta sivunavigaatiosta viestiketjun hakemisen, jonka jälkeen käyttäjän tulee kirjoittaa viesti ja valita painike, jossa lukee *Lähetä*. Käyttöliittymässä uudet viestit ovat korostettu keltaiseksi merkityllä herätteellä. Kuviossa 1 nähdään palvelun etusivu, jossa uudet ja vanhat tapahtumat ovat ryhmiteltyinä. Kuviossa 2 on esitetty viestin lähettämiseen liittyvän tehtävän toinen näkymä, jossa käyttäjät voivat lähettää ja vastaanottaa viestejä.



Kuva 1 - Käyttöliittymä valikosta

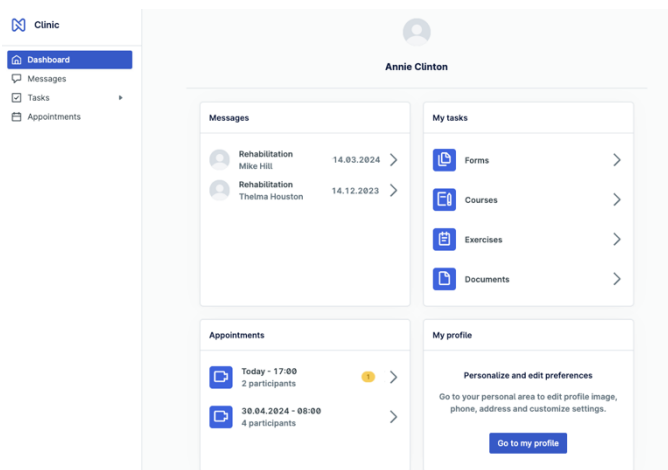


Kuva 2 - Käyttöliittymä viestin lähettämisestä

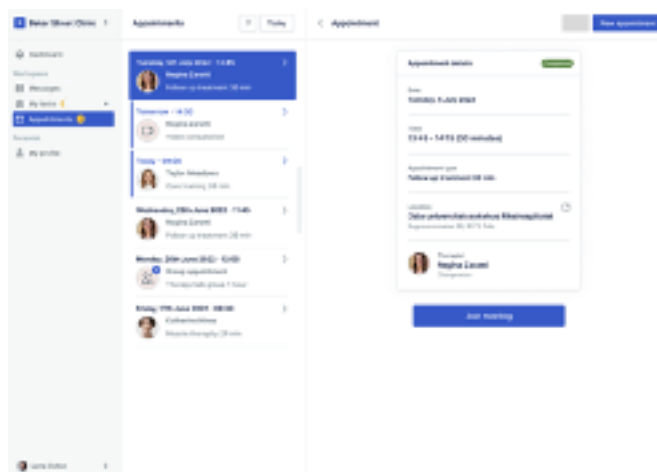
### 3.2.2 Tehtävä 2

Tehtävässä 2 asiakas on Tehtävä 1 mukaisesti kirjautunut jo palveluun käyttäjäksi, kun tehtävä aloitetaan. Tehtävässä simuloidaan videopuhelulla toteutettavaan vastaanottoon liittymistä. Käyttäjän tulee navigoida palvelussa seuraavaksi alkavaan videopuhelun tietoihin ja liittyä puheluun. Videopuhelu avataan käyttöliittymästä selaimessa erilliseen välilehteen. Tehtävä on rajattu valitussa käyttöliittymässä tapahtuvaan toiminnallisuuteen, johon sisältyy palvelun etusivun valikko sekä ajanvaraukseen liittymissivu. Tehtävässä ei oteta kantaa käyttäjän toimista videopuhelun näkymässä ja sen vaikutuksesta tehtävässä

onnistumiseen. Tehtävä tulkitaan suoritetuksi, kun käyttäjä valitsee ajanvarauksen sivulla painikkeen *Liity videopuheluun*. Kuviossa 3 on kuvattu palvelun etusivu, josta käyttäjä voi siirtyä tulevan ajanvarauksen tietoihin. Kuviossa 4 on näkymä videopuheluun liittymisestä.



Kuva 3 - Käyttöliittymä ajanvarauksien valikosta



Kuva 4 - Käyttöliittymä videopuheluun liittymisestä



## 4 TULOKSET

Tässä luvussa käsitellään tutkimuksen tuloksia eri simulaatioiden osalta. Tuloksissa ei raportoida merkityksellisyyttä, eli p-arvoa, sillä näiden testien osalta sillä ei ole merkitystä. Tuloksissa mallien datan pohjalta muodostuvat erot voivat olla pieniäkin. Datan erojen kohdalla tulkitaan, onko ero merkittävä ja ovatko tulokset mielekkäitä. Tutkimuksessa tehdään kaksi eri simulaatiota. Simulaatiossa 1 tutkitaan miten noviisit ja kokeneet käyttäjät suoriutuvat mallin ennusteen mukaan käyttöliittymässä. Simulaatiossa 2 selvitetään kohinallisten käyttäjien ja käyttäjien, joilla ei ole kohinaa, eroja. Simulaatioissa käytetyt tehtävät ovat jaettu kahteen eri osaan, sillä tehtävän suorittaminen vaatii käyttöliittymässä kaksi eri näkymää.

### 4.1 Simulaatio 1

Ensimmäisessä simulaatiossa tutkittiin noviisien ja kokeneiden käyttäjien tehtävän kokonaisaikaa ja fiksaatioiden määrää. Havaintojen määrä oli 120 ja käyttäjille oli määritetty normaali osoitinkyky käyttöön.

#### 4.1.1 Viestit

Viestien ensimmäisessä tehtävässä käyttäjän tulee navigoida etusivulta uusi viesti, joka on korostettu keltaisella notifikaatiolla. Tutkimuksen tulosten pohjalta käyttöliittymässä viesteihin liittyvässä tehtävässä noviisikäyttäjältä menee keskiarvolta 1.7 sekuntia suorittaa tehtävä. Kokeneiksi määritetyillä käyttäjillä tehtävän suoritus-aika on 1.3 sekuntia. Fiksaatioiden määrä oli keskiarvoltaan noviiseilla 2.5 ja kokeneilla käyttäjillä 2.4. Tulokset ovat mielekkäitä, sillä suoritus-aika, fiksaatioiden määrä ja virheosumat ovat vähäisiä. Taulukossa 1 on esitetty tulokset, kuinka noviisi ja kokenut käyttäjä suoriutui viesteihin liittyvän tehtävän ensimmäisestä sivusta.

	Suoritus aika (s)		Fiksaatiot		Osumat		Ohivalinnat	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Noviisi	1.7	0.9	2.5	2.7	1	0	0.5	0.5
Kokenut	1.3	0.6	2.4	0.5	1	0	0.9	0.4

Taulukko 1 - Kokemuksen vaikutus viestien valikon tuloksiin

Kun käyttäjä valitsee viestit valikosta, käyttöliittymässä ohjataan käyttäjä viestin lähettämisen näkymään. Tutkimuksessa käyttöliittymässä viesteihin liittyvässä tehtävässä viestin lähettämisen näkymässä noviisikäyttäjältä menee keskiarvolta 8.1 sekuntia löytää painike, jolla viesti lähetetään. Käyttäjillä, jolla on jo kokemusta, menee mallin ennusteen mukaan 1.5 sekuntia. Tuloksissa on merkittävä ero noviisiin ja kokeneen käyttäjän osalta. Noviisiin osalta tulokset eivät ole mielekkäitä, sillä tehtävän suoritus aika on korkea. Noviisien fiksaatioiden määrä on keskiarvoltaan 15.4, joka kuvastaa, että visuaalista hakua on tapahtunut paljon. Mallin ennusteen mukaan noviisikäyttäjillä on haasteita löytää oikea painike.

Käyttöliittymään tehdään muutoksia, joiden tavoitteena on parantaa noviisien suoritus aikaa. Viestin lähettämisen painike kasvatetaan, jotta nähdään, onko se käyttäjille helpommin löydettävissä. Painiketta kasvatetaan 30 pikseliä suuntaansa. Painike on jo muihin elementteihin nähden värikoodattu sinisellä, jotta käyttäjän katse löytäisi sen helpommin. Muutoksen yhteydessä pidetään sama värikoodaus. Tutkimus osoittaa, että painikkeen kasvattaminen vain lisää kummankin tehtävää suorittavan käyttäjän suoritus aikaa. Noviisikäyttäjillä suoritus aika on 8.4, eli 0.3 sekuntia pidempi kuin pienemmällä painikkeella ja kokeneilla käyttäjillä 1.5, eli 0.1 sekuntia pidempi. Tulokset eivät ole mielekkäitä, sillä tavoitteena on saada suoritus aikaa vähennettyä.

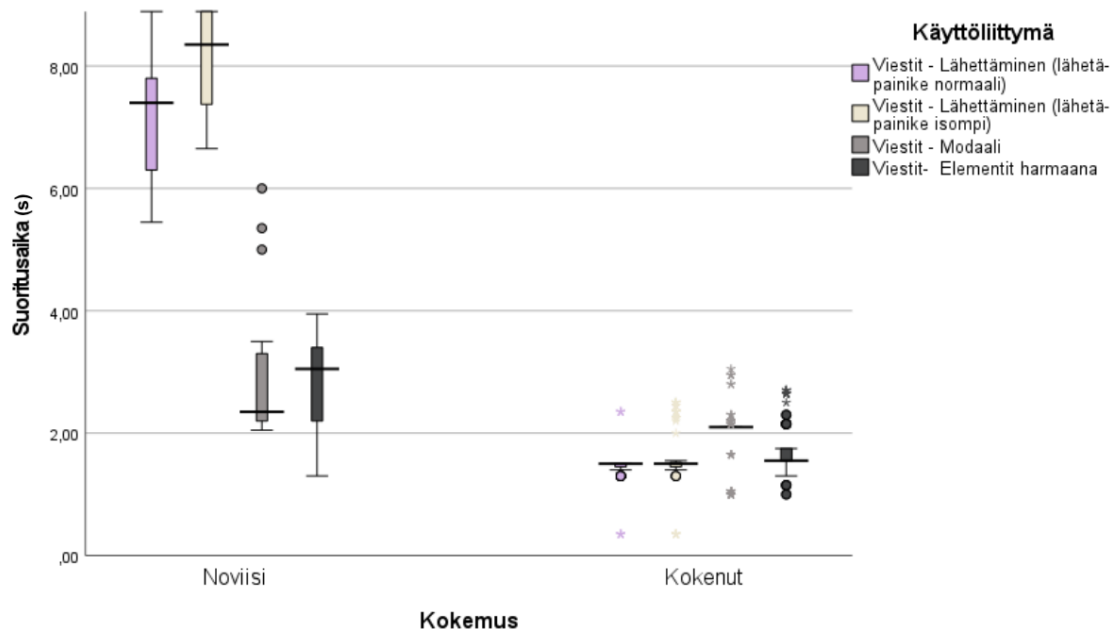
Seuraavaksi tutkimuksessa selvitettiin auttaisiko modaali käyttöliittymän optimoinnissa noviisikäyttäjille sopivammaksi. Käyttöliittymässä muutettiin viestin lähettämisen näkymässä muut elementit harmaiksi, ja viestin lähetys modaaliin. Tässä versiossa mikään muu elementti ei ole korostettuna kuin tekstikenttä ja painike viestin lähettämistä varten. Modaalin avulla suoritus aika saadaan noviisikäyttäjien osalta keskiarvolta 2.8 sekuntiin ja kokeneiden käyttäjien osalta keskiarvolta 2.0 sekuntiin. Tulokset ovat mielekkäitä verrattuna aiempiin yli 8 sekunnin suoritus aikoihin. Modaalin avaaminen kuitenkin vaatii erillisen valinnan, jonka takia tutkitaan vielä neljättä versiota käyttöliittymästä.

Neljäntenä versiona tutkimuksessa selvitettiin miten alkuperäisen käyttöliittymän viestielementtien värimuutos vaikuttaa suoritukseen. Käyttöliittymässä lähettäjän viestit ovat väriltään sinisiä ja vastaanottajan viestit harmaita. Tutkimuksen tulokset osoittavat, että elementtien värien muutoksen jälkeen noviisikäyttäjän suoritus ajan keskiarvo on 2.8 sekuntia ja fiksaatioiden määrä 5.8. Kokeneella käyttäjällä suoritus aika on keskiarvolta 1.8 sekuntia ja fiksaatioiden määrä 2.3. Tulokset ovat mielekkäitä, sillä suoritusajat ja fiksaatioiden määrät ovat vähäisiä. Yhdistämällä tämän käyttöliittymän tulokset tehtävän ensimmäiseen vaiheeseen, mallin ennusteen mukaan noviisikäyttäjiltä menisi keskiarvolta 4.5 sekuntia koko tehtävän suorittamiseen. Kokeneilla käyttäjillä menisi 3.1 sekuntia. Tulokset ovat kuvattu taulukossa 2.

	Suoritus aika (s)		Fiksaatiot		Osumat		Ohivalinnat	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
<b>Viestin lähetys</b>								
Noviisi	8.1	3.6	15.4	0.3	0.9	0.3	1.0	0.2
Kokenut	1.5	0.2	2.7	0.5	1.0	0	0.9	0.2
<b>Suurennettu lähetä-painike</b>								
Noviisi	8.4	1.7	15.9	3.1	1	0	0.3	0.5
Kokenut	1.6	0.5	2.1	0.7	1	0	0.9	0.3
<b>Modaali</b>								
Noviisi	2.8	0.7	3.8	2.0	0.9	0.3	1.0	0.2
Kokenut	2.0	0.5	1.9	0.3	1	0	0.1	0.3
<b>Elementtien värit</b>								
Noviisi	2.8	0.7	5.8	2.4	1	0	1.3	0.5
Kokenut	1.8	0.4	2.3	0.7	1.0	0.1	0.9	0.3

Taulukko 2 - Kokemuksen vaikutus viestien eri variaatioiden tuloksiin

Kuviossa 5 nähdään, että viestin lähettämisen suoritusajaa saadaan huomattavasti pienennettyä joko käyttämällä modaalia tai yhdenmukaistamalla elementtien värejä. Tulokset elementtien värien muutoksen jälkeen ovat mielekkäitä ja niiden pohjalta voidaan todeta, että elementtien värien muutos parantaa mallin ennustamaa suoritusajaa.



Kuva 5 - Noviisin ja kokeneen käyttäjien suoritusajat viestien lähetyksessä

### 4.1.2 Ajanvaraukset

Ajanvarauksiin liittyvässä tehtävässä noviisin ja kokeneen käyttäjän tulee navigoida valikosta kyseisen päivän videopuhelun ajanvaraukseen. Tehtävä jatkuu toisessa näkymässä, jossa käyttäjien tulee liittyä videopuheluun mukaan. Ensimmäisessä vaiheessa tutkimuksen tulosten pohjalta käyttöliittymässä ajanvaraukseen liittyvässä tehtävässä valikon näkymässä noviisilta menee keskiarvolta 1.6 sekuntia suorittaa tehtävä ja käyttäjillä, jolla on jo kokemusta, 1.2 sekuntia. Fiksaatioiden määrä noviiseilla on 4.3 ja kokeneilla käyttäjillä 2.7. Tulokset ovat mielekkäitä, sillä suoritus aika ja fiksaatioiden määrä ovat vähäisiä.

Käyttöliittymän valikossa uudet tapahtumat, kuten tulevat ajanvaraukset tai uudet lukemattomat viestit korostetaan erillisellä ikonilla ja värikoodauksella. Tutkimuksessa selvitettiin miten mallin ennustaa käyttäjien löytävän käyttöliittymässä tulevan ajanvaraukseen, jos sitä ei olisi merkitty värikoodilla. Tulevasta ajanvarauksesta poistetaan keltainen notifi kaatio. Tutkimuksen tulokset osoittavat, että noviisikäyttäjillä tehtävien keskimääräinen suoritus aika olisi 4.0 sekuntia, eli kasvaisi 150 prosenttia värikoodattuun versioon verrattuna. Harmaalla painikkeella visuaalisen hakua tapahtuu enemmän, joka nähdään fiksaatioiden kasvaneesta määrästä ja pidemmällä suoritusajalla. Kokeneilla käyttäjillä tehtävän suoritus aika harmaalla painikkeella on keskimäärin 2.0 sekuntia, eli suoritus aika kasvaisi 67 prosenttia värikoodattuun versioon nähden. Noviisikäyttäjillä fiksaatioiden keskiarvo nousee 4.3 fiksaatioista 12.6 fiksaatioon, joka selittyy visuaalisen haun määrällä ilman erottuvaa kohdetta. Tulokset kuvastavat salienssin merkitystä halutun elementin löytämisen vahvistamisessa. Tämän kokeilun tulokset vahvistavat, että värikoodattu merkintä on tarpeen olla käytössä.

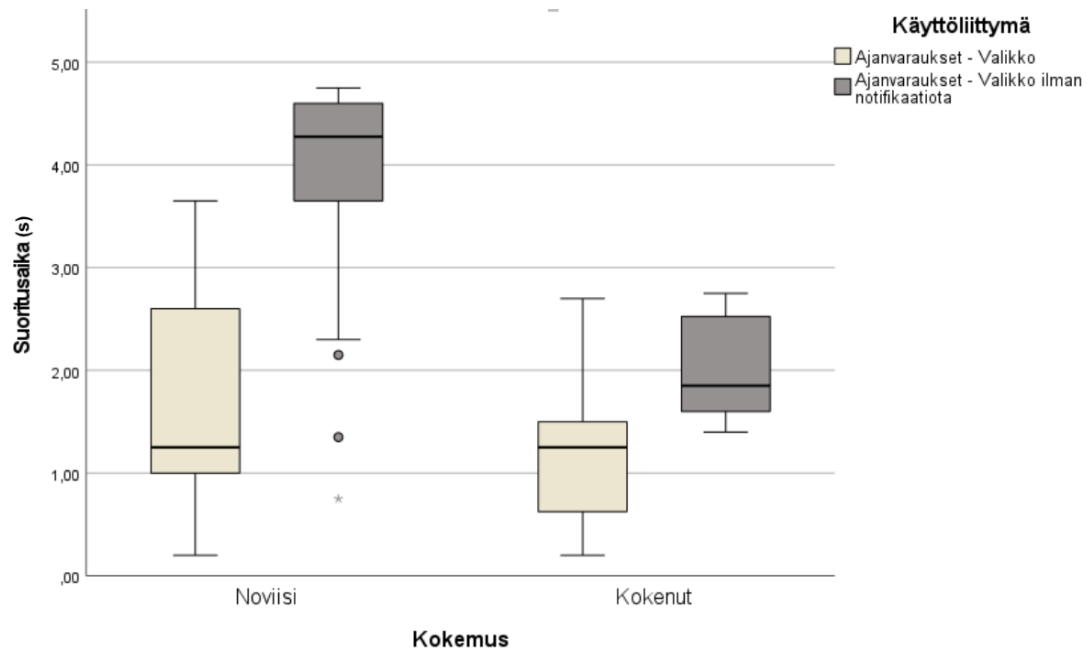
Tutkimuksia jatketaan ajanvarauksiin liittyvällä seuraavalla näkymällä käyttöliittymässä. Käyttäjä on ensimmäisessä vaiheessa avannut tulevan ajanvarauksen ja tämän jälkeen käyttäjän tulee liittyä videopuheluun. Tulosten pohjalta käyttöliittymässä ajanvaraukseen liittyvässä noviisilta menee keskiarvolta 1.9 sekuntia suorittaa tehtävä ja käyttäjillä, jolla on jo kokemusta, 1.8 sekuntia. Fiksaatioiden määrä on noviisikäyttäjillä 3.1 ja kokeneilla käyttäjillä 3. Tulokset ovat mielekkäitä, sillä suoritus aika, fiksaatioiden määrä ja virheosumat ovat vähäisiä. Taulukossa 4 on esitetty tulokset, kuinka noviisi ja kokenut käyttäjä suoriutui ajanvaraukseen liittyvästä tehtävästä.

	Suoritus aika(s)		Fiksaatiot		Osumat		Ohivalinnat	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
<b>Valikko</b>								
Noviisi	1.6	1.1	4.3	3.3	1	0	0.8	0.5
Kokenut	1.2	0.6	2.7	0.8	1	0	0.8	0.4
<b>Valikko ilman notifi kaatiota</b>								
Noviisi	4.0	1.1	12.6	2.7	1	0	2.2	6.5

Kokenut	2.0	0.45	2.6	0.5	1	0	0.7	0.5
<b>Liittyminen</b>								
Noviisi	1.9	0.6	3.1	0.6	1	0	0.9	0.3
Kokenut	1.8	0.4	3	0	1	0	0.9	0.3

Taulukko 3 - Kokemuksen vaikutus ajanvarauksen tehtävän tuloksiin

Kuviossa 6 on havainnollistettu, kuinka valikossa olevan korostetun kohteen merkitys näkyy suoritusajoissa. Mallin ennusteen mukaan käyttäjillä tapahtuu enemmän visuaalista hakua, kuin mitä tapahtuu versiossa, jossa valikossa on tapahtuman kohdalla käytetty merkintää notifiikaatiosta. Kuvioista myös nähdään, että noviisikäyttäjillä tuloksissa on enemmän hajontaa tehtävän molemmissa osioissa.



Kuva 6 - Noviisin ja kokeneen käyttäjän suoritukset valikon variaatioissa

## 4.2 Simulaatio 2

Simulaatiossa 2 tutkittiin kuinka käyttäjät normaalilla osoitinkyvyllä ja käyttäjät heikolla osoitinkyvyllä suoriutuvat käyttöliittymän tehtävistä. Havaintoja tehtiin 120 kappaletta. Tässä simulaatiossa on määritetty, että käyttäjät ovat noviisin ja kokeneen käyttäjän väliltä.

### 4.2.1 Viestit

Tutkimuksen tulosten pohjalta käyttöliittymässä viesteihin liittyvässä tehtävässä ensimmäisessä valinnassa käyttäjillä ilman kohinaa menee keskiarvolta 1.2 sekuntia suorittaa tehtävä. Käyttäjät ilman kohinaa on taulukoissa merkitty normaaleiksi käyttäjiksi. Suoritus aika on kohinallisilla käyttäjillä keskiarvolta 2.3 sekuntia. Tulokset voidaan todeta mielekkäiksi, sillä suoritus aika, fiksaatioiden määrä ja virheosumat ovat suhteellisen vähäisiä. Tuloksissa huomio kiinnittyy kohinallisen käyttäjän fiksaatioihin, jotka ovat keskiarvoltaan 0.9. Tämä viittaa siihen, että mallin toiminnassa voi olla häiriö, sillä tulosten mukaan visuaalista hakua ei ole tapahtunut.

Käyttöliittymässä viestien tehtävä jatkuu ja käyttäjälle avautuu erillinen näkymä, jossa käyttäjän tulee navigoida lähettämään viestiin vastaus. Tuloksien pohjalta tehtävän keskimääräinen suoritus aika on käyttäjillä ilman kohinaa keskiarvoltaan 1.9 sekuntia, eli hieman korkeampi kuin ensimmäisessä osiossa. Tulos on kuitenkin mielekäs ajan suhteen. Kohinallisten käyttäjien suoritus aika oli keskiarvoltaan 2.5 sekuntia, joka käyttöliittymän navigoinnissa vielä mielekäs aika. Tuloksista huomataan, että normaaleilla käyttäjillä fiksaatioiden määrä on keskimääräisesti 3.3, mutta kohinallisten käyttäjien osalta 1.8, eli vähemmän, vaikka tehtävän suoritus ajan perusteella visuaalista hakua on tapahtunut enemmän. Normaaliin käyttäjien korkeampi aika voi selittyä mallin virheellä, jossa malli ei jää tutkimaan kohdetta löydettyään oikean painikkeen, vaan silmät jäävät vapaalle kasvattamaan fiksaation määrää. Yleisesti fiksaatioiden määrä viestin lähettämisessä on korkeampi kuin muissa tehtävissä, joka voi selittyä elementtien määrällä käyttöliittymässä.

Simulaatiossa 1 viestien lähettämisessä tutkittiin 30 pikseliä suuntaansa isomman painikkeen merkitystä tutkimuksen tuloksiin. Mallin ennustamien tuloksien pohjalta selvitetään miten isompi painike vaikuttaa kohinallisten käyttäjien suoritukseen. Suoritus ajan keskiarvo normaaleilla käyttäjillä nousi 1.9 sekunnista 2.1 sekuntiin ja kohinallisilla käyttäjillä 2.3 sekunnista 2.6 sekuntiin. Näiden tulosten pohjalta isomman painikkeen voidaan tulkita vaikuttavan negatiivisesti tuloksiin, sillä tehtävän suoritus aika ja fiksaatioiden keskiarvo kasvaa. Taulukossa 5 on kuvattu suoritus aikoja, fiksaatioita, virhepainalluksia ja osumia.

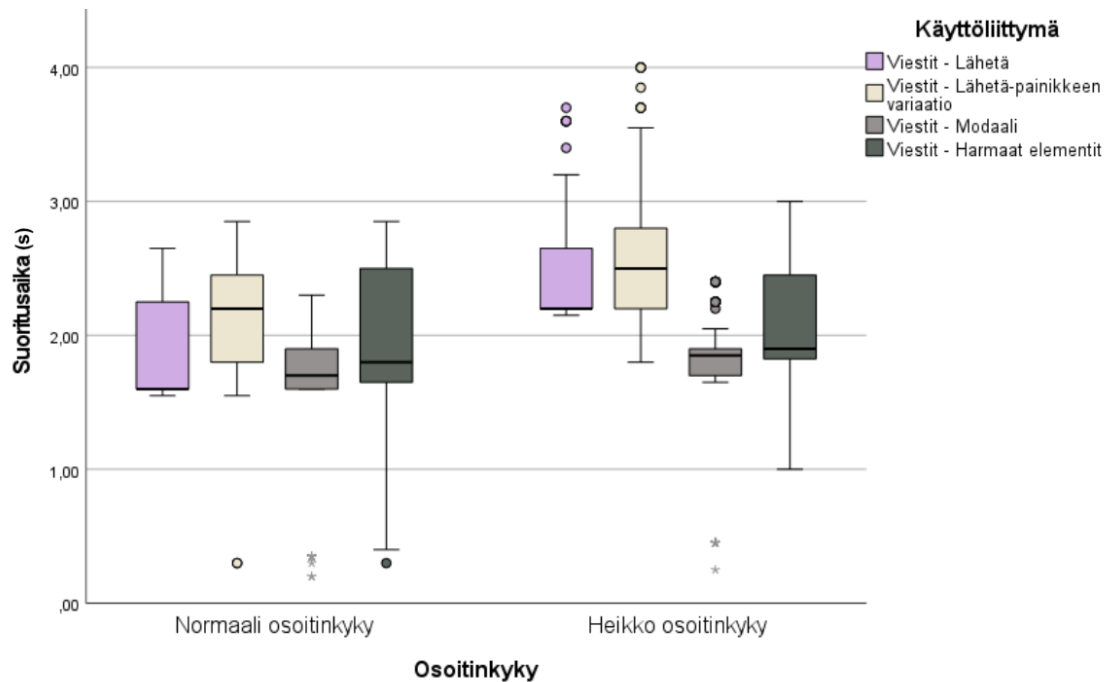
Tutkimuksessa selvitetään voiko suoritukseen vaikuttaa positiivisesti muuttamalla viestin lähetys näkymä modaaliin, jossa käyttöliittymän ylimääräiset elementit ovat piilotettuina. Tutkimuksen tulokset osoittavat, että modaalin avulla normaaliin käyttäjien ja kohinallisten käyttäjien suoritusajat ovat matalampia. Normaaliin käyttäjältä menee suoritukseen keskimäärin 1.7 sekuntia,

kun taas kohinallisella käyttäjällä 1.8 sekuntia. Fiksaatioiden määrä vähenee kummallakin käyttäjällä. Modaalin lisäksi simulaation 1 tutkimustulosten pohjalta todettiin, että muiden elementtien muuttaminen harmaaksi parantaa suoritusajaa. Neljännessä versiossa normaalin käyttäjän suoritusajat olivat keskiarvolta 2.0 ja kohinallisen käyttäjän osalta 2.1. Tuloksien keskiarvot ja keskihajonnot ovat nähtävissä taulukossa 5.

	Suoritusajaka (s)		Fiksaatiot		Osumat		Ohivalin- nat	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
<b>Viestit - Valikko</b>								
Normaali	1.2	0.4	2.5	0.9	1	0	0.8	0.4
Kohina	2.3	0.3	0.9	0.4	1	0	0.8	0.4
<b>Viestit - Lähetys</b>								
Normaali	1.9	0.4	3.3	0.8	1	0	0.9	2.4
Kohina	2.5	0.4	1.8	0.9	1.0	0.1	0.9	0.2
<b>Isonnettu painike</b>								
Normaali	2.1	0.4	3.5	1.4	0	0	1	0.9
Kohina	2.6	0.5	4.2	1.5	1	0	0.6	0.5
<b>Modaali</b>								
Normaali	1.7	0.5	3.3	0.8	1	0	1.8	0.7
Kohina	1.8	0.5	3.9	1.3	1	0	1.0	0.6
<b>Elementit har- maana</b>								
Normaali	2.0	0.5	3.8	1.1	1	0	1.4	0.6
Kohina	2.1	0.4	3.2	1.5	1.0	0	1.1	0.5

Taulukko 4 - Kohinan vaikutus viestin lähettämisen tuloksiin

Kuviossa 7 nähdään, että lähetä-painikkeen kasvattaminen ei pelkästään riitä parantamaan suoritusajakoja niin normaaleilla käyttäjillä kuin käyttäjillä, joilla on kohinaa. Kohinan suhteen suoritusajat ovat jokaisessa versiossa mielekkäitä. Kuviossa nähdään, että mallin ennusteen mukaan viestikeskusteluiden muutos harmaiksi kasvattaa normaalilla osoitinkyvyllä olevien käyttäjien tuloksien hajontaa. Modaali pienentää tehtävän suoritusajokoja muihin toteutuksiin nähden. Kuviossa myös nähdään, että heikolla osoitinkyvyllä olevalla käyttäjällä menee tehtävän suorittamisessa pidempään kuin normaalilla käyttäjällä.



Kuva 7 - Osoitinkyvyn vaikutus viestin lähettämisen variaatioihin

#### 4.2.2 Ajanvaraukset

Tutkimuksen tulosten pohjalta käyttöliittymässä ajanvaraukseen liittyvän tehtävän ensimmäisessä vaiheessa käyttäjiltä ilman kohinaa menee keskiarvolta 1.3 sekuntia suorittaa tehtävä. Kohinallisella käyttäjällä tehtävän suoritusajan keskiarvo on 1.4 sekuntia. Tulokset voidaan todeta mielekkäiksi, sillä suoritus aika, fiksaatioiden määrä ja virheosumien määrät ovat vähäisiä.

Ajanvarauksen valinnasta käyttäjä ohjataan liittymään videopuheluun. Tutkimuksen tulosten mukaan käyttäjä ilman kohinaa suoriutuu liittymisestä 2.0 sekunnin keskiarvolla ja kohinallinen käyttäjä 2.2 sekunnin keskiarvolla. Kohinalla ei siis ole merkitsevää vaikutusta suoritus aikaan. Tulokset voidaan todeta mielekkäiksi, sillä suoritus aika on lyhyt.

Tutkimuksessa testattiin, miten mallin ennusteen mukaan värikoodaus on merkittävä videopuheluun liittymisen tehtävän suorittamiseen ja tuottaako sen puuttuminen eroja kohinallisten ja käyttäjien, joilla ei ole kohinaa, välille. Taulukossa 6 on esitetty tulokset, miten käyttäjät suoriutuvat videopuheluun liittymisestä, kun liittymisen elementti on sininen muiden elementtien ollessa harmaita. Tutkimuksen tuloksen mukaan painikkeen muuttaminen sinisestä harmaaksi ei aiheuta merkittäviä kasvua suoritus ajassa eikä virhepainalluksissa kummallakaan käyttäjäpersoonalla. Käyttäjillä, joilla on kohinaa, fiksaatioiden määrien keskiarvo jopa laski, mutta suoritus aika kasvoi 0.1 sekuntia. Nämä tulokset selittyvät käyttöliittymän yksinkertaisuudella, jossa liity-painike on elementtinä



merkittävässä roolissa ja siihen on helppo kiinnittää huomiota ilman värikoodausta. Tuloksien keskiarvo ja keskihajonta on esitetty taulukossa 6.

	Suoritus-aika (s)		Fiksaatiot		Osumat		Ohivalinnat	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
<b>Valikko</b>								
Normaali	1.3	0.7	3.4	1.5	1	0	0.7	3
Kohina	1.4	0.7	3.4	1.3	1	0	1.1	0.7
<b>Liittyminen</b>								
Normaali	2.0	0.4	3.9	0.8	0.9	0.3	2	0
Kohina	2.2	0.3	3.8	1.1	1	0	1.2	0.7
<b>Harmaa painike</b>								
Normaali	2.0	0.4	3.9	0.9	1	0	1.6	0.7
Kohina	2.3	0.6	3.3	1.4	1.0	0.1	1.3	0.8

Taulukko 5 - Kohinan vaikutus ajanvarauksien tuloksiin

## 5 POHDINTA

Tutkimuksen tavoitteena oli testata kognitiivista mallintamista käyttöliittymän varhaisen suunnitteluvaiheen käyttäjätestauksen menetelmänä ja selvittää sen soveltuvuutta tuotekehitysprosessin varhaiseen suunnitteluvaiheeseen. Tutkimuksessa pyrittiin hankkimaan tietoa käyttöliittymän toiminnasta eri käyttäjäpersoonilla ja analysoitiin mallin tekemiä ennusteita. Käyttöliittymään tehtiin muutoksia mallin ennustamien käyttäjien suoritusaikojen ja fiksaatioiden pohjalta. Mallintamista tutkittiin terveydenalan järjestelmän käyttöliittymässä suoritettavien tehtävien avulla, jossa tehtäviksi oli valittu tuotetiedon pohjalta yleisimmin käytetyt toiminnot, eli viestin lähettäminen ja videopuheluun liittyminen. Pohdinnassa käydään lävitse tutkimuksen tulokset, arvioidaan tutkimuksen luotettavuutta ja esitetään ideoita jatkotutkimuksille.

### 5.1 Tutkimuksen tulokset

Tutkimuksen tulokset osoittivat, että tutkimuksen kohteena olevassa käyttöliittymässä on kehityskohteita. Kehityskohteita parantamalla mallin ennusteen mukaan käyttöliittymästä saataisiin toimivampi eri käyttäjäpersoonille. Mallin ennusteissa matalin suoritus aika oli keskiarvoltaan 1.2 sekuntia ja korkein keskiarvo 8.4. sekuntia. Tulosten perusteella havaittiin, että ajanvarausten sekä viestien ensimmäisen vaiheen valikkoon liittyvien tehtävien suoritus aika oli alhainen. Tuloksien pohjalta yksi keskeinen tekijä mielekkään suoritusajan taustalla oli tehtäviin liittyvä notifi kaatio, joka vähensi visuaalista hakua erottamalla tehtävään määritetyn elementin muista elementeistä.

Mallin ennusteiden mukaan erityisesti noviisikäyttäjillä olisi haasteita viestien "Lähetä"-painikkeen löytämisessä, joka näkyi korkeina fiksaatioiden määränä ja pitkänä suoritus aikana. Tutkimuksen aikana tuloksien pohjalta luotu uusi versio käyttöliittymästä vahvisti Oulasvirran (2019) näkemystä mallintamisen mahdollistavan muuttuneiden tehtävien testaamisen. Tutkimuksen aikana oli helppoa ja nopeaa tehdä käyttöliittymästä eri variaatioita.

Variaatioiden pohjalta saatiin testattua miten käyttäjien tulokset muuttuvat. Tulosten pohjalta todettiin, että muuttamalla jo saapuneiden viestien elementtien väri harmaaksi käyttäjän katse kiinnittyy helpommin viestin lähettämiseen. Tutkimuksen aikana suoritusaikaa saatiin myös huomattavasti vähennettyä muuttamalla viestin lähettäminen modaaliin, jossa muita toiminnallisuuksia ei näytetä, vaan ne ovat taustalla. Modaalin käyttäminen voi lisätä haasteita käytettävyydelle, koska käyttäjä ei pysty lukemaan jo aiemmin saapuneita viestejä viestin kirjoituksen yhteydessä ja modaalin avaaminen vaatii yhden valinnan lisää. On siis huomioitava, että pelkkä mielekäs suoritus aika ei ole riittävä peruste muutoksille, vaan muutosten suhteen tulee huomioida kokonaisuus eri käyttötapauksien välillä ja niiden vaikutus muihin toiminnallisuuksiin. Hyödyntäessä mallintamista käyttöliittymän tutkimuksen menetelmänä on myös tärkeä huomioida, että mallintamisessa voidaan testata vain yksi näkymä kerrallaan. Useasti käyttöliittymien rakenne kattaa useita eri sivuja. Malli palvelisi tuotekehitystiimiä tehokkaammin, jos mallin konfiguraatio sallisi useamman näkymän lisäämisen samaan testiin.

Ajanvarauksien tehtävissä mallin ennusteissa tutkimuksen tulokset olivat mielekkäitä. Mallin toimintaa ja muutoksien vaikutusta tuloksiin testattiin erilaisilla variaatioilla. Yksi keskeinen löydös oli, että elementtien määrä ei vaikuta fiksaatioiden määrään, jos käyttöliittymän oleelliset elementit ovat salientteja. Tutkimuksessa testattiin miten eri käyttäjäpersoonien suoritukset muuttuvat, jos videopuhelun liittymisen painike muutettaisiin sinisestä harmaaksi, kuten muutkin elementit olivat. Muutoksella ei ollut merkittävää eroa, sillä malli ennusti käyttäjän löytävän keskeisen ja kooltaan ison painikkeen hyvin kummassakin tapauksessa. Tulokset selittyvät sillä, että mallissa elementin salienssi lasketaan siitä mitä kohteita on lähellä ja onko ne erieviä vai ei. Keskeiset elementit saavat enemmän erottuvuutta. Värikoodauksen merkittävyyttä testattiin myös ajanvarauksen valikon suhteen. Valikossa muutettiin tulevan ajanvarauksen notifikatio keltaisesta harmaaksi, eli yhdenarvoiseksi muiden elementtien kanssa. Tässä näkymässä vastaavia elementtejä on useita, joten mallin ennusteen mukaan käyttäjien on haastava löytää oikeaa painiketta ja suoritusajat moninkertaistuvat, koska visuaalista hakua tapahtuu enemmän. Tulokset ohjaavat harkitsemaan kuinka tarpeellista värikoodaus on, vai voiko siitä olla jopa haittaa käytettävyyden suhteen. Tulosta tukee Jokisen ym. (2020) artikkeli, jossa huomattiin satunnaisesti väritetyn käyttöliittymän olevan selvästi vaikeampi käyttää sekä noviiseille että kokeneille käyttäjille. Yhtenäisesti väritetty asettele, kuten värittömät asettelutkin, ovat selvästi helpompia molemmille käyttäjäryhmille. (Jokinen, ym. 2020).

Tutkimustuloksissa fiksaatioiden määrä vaihteli tehtävien välillä. Fiksaatioiden määrä voidaan tulkita tietona, joka korreloi, että visuaalista hakua on tapahtunut. Tuloksien tulkinnan kannalta fiksaatioiden määrä huomioitiin välivaihemuuttujana ja merkittävimpänä tietona on pidetty tehtävän suoritus aikaa. Fiksaatioiden määrä linkittyy suoritus aikaan, sillä aika muodostuu pitkälti visuaalisesta hausta. Tutkimuksessa havaittiin, että mallin ennustama suoritus aika voi olla myös suhteellisen matala, mutta fiksaatioiden määrä korkea. Korkea fiksaatioiden määrä voi linkittyä käyttäjän kokemaan kuormittuneisuuteen, jota malli ei pysty ennustamaan. Tämä löydös voidaan lisätä kognitiivisen mallintamisen

käytön eduksi, sillä sen avulla voidaan löytää mahdollisia tarkempaa tutkimusta vaativia ongelmakohtia.

Tutkimuksen aikana mallintaminen osoittautui ensimmäisten vaiheiden konfiguraation jälkeen helpoksi tavaksi testata eri variaatioita. John & Suzuki (2009) esittelevät mallintamisen olevan kustannustehokas ja aikaa säästävä testaustapana (John & Suzuki, 2009), mutta rajoitteena sen käytölle voi olla prosessin haastavuus (John, ym. 2004). Tutkimuksen prosessi tuki John ja kumppanien (2004) näkemystä prosessin haastavuudesta, ennenkö tutkimuksen toteuttajalla on enemmän kokemusta mallin käytöstä ja siihen liittyvistä muuttujista. Kun kokemusta mallin käytöstä kertyy, niin parhaimmillaan sillä voidaan rikastaa käyttöliittymän testauksia ja saada ymmärrystä mallin ennustuksista suunnittelun tueksi. Ohjelmistokehityksessä projektit tyypillisesti toteutetaan määritetyissä aikatauluissa, jolloin jokaiseen projektin osa-alueeseen on määritetyn verran aikaa. Tämä korostaa sitä, että mallintaminen tulisi tuoda lähemmäksi suunnittelijoita ja tuotekehitystiimiä. Mallintamisen tulisi olla päivittäin käytettävissä työkaluissa helposti saatavilla ja käytettävissä, jotta sen hyödyntäminen tapahtuisi mahdollisimman laajasti ja pienellä kynnyksellä. Tässä tutkimuksessa käytettävään malliin koodattiin erillinen käyttöliittymä, joka on saman työn toistamista, kun suunnitelma tehdään erillisellä työkalulla. Tuotekehitysprosessissa tulisi pyrkiä säästämään aikaa sillä, että voidaan testata suunnitelmia sitä mukaan kuin niitä tehdään. Ajansäästöä saataisiin myös muutosten suhteen, sillä ne tehtäisiin kerralla yhteen paikkaan ja uudet testit olisivat mahdollista käynnistää helposti. Tämän tutkimuksen ja mallin käyttökokemuksen pohjalta voidaan todeta, että integraation toteutus suunnittelutyökaluun toisi kognitiivisen mallintamisen kustannustehokkaammaksi ja sen myötä entistä kiinnostavammaksi käyttäjätutkimuksien menetelmäksi. Oulasvirta (2019) mainitsee, että malleja on mahdollista integroida suunnittelutyökaluihin, mutta tietoa ei vielä onko integraatioita toteutettu.

Mallin toimivuus on tärkeässä roolissa käytön ja sen hyödyllisyyden suhteen. Tutkimuksen tuloksissa tuli esiin viestin valikossa kohinallisten käyttäjien fiksaatioiden määrä oli alle 1, joka voi viitata mahdolliseen ongelmaan mallissa. Fiksaatioiden osalta kokeneiden käyttäjien määrä oli yksittäisissä tehtävissä korkeampi kuin noviisikäyttäjien, joka selittyy sillä, että malli ei jää tutkimaan kohdetta vaan käytännössä katse jää vapaalle kasvattamaan fiksaatioiden määrää. Mallia olisi hyvä jatkokehittää niin, että ylimääräisten fiksaatioiden määrää ei lasketa vaan lasketaan vaan kohteen löytymiseen käytettyjen fiksaatioiden kokonaismäärä. Mallin konfiguroinnin yhteydessä kävi ilmi, että käytössä olevan mallin rajoituksena on perusvärit. Pelkkien perusvärien käyttö saattaa estää syvällisemmän tarkastelun värien vaikutuksesta. Tämä puute johti tutkimuksessa siihen, ettei pystytty tutkimaan esimerkiksi haaleamman sinisen mahdollista hyötyä elementtien näkyvyyden kannalta. Tutkimuksen yhteydessä mallin toiminnan nopeudessa huomattiin mahdollisuutta jatkokehitykseen.

Kognitiivisen mallintamisen käytössä on erityisen tärkeä huomioida, että malli tekee vain oletuksia eikä näin ollen voi toimia ainoana käyttäjätestauksen menetelmänä. Todellisessa tilanteessa eri muuttujat ja tilanteet vaikuttavat tuloksiin. Tutkimuksen tuloksissa nähtiin eroja erilaisten käyttäjäpersoonien suoriutumisesta käyttöliittymän tehtävissä. Mallintaminen on näiden tulosten

pohjalta hyödyllinen tapa, jonka avulla saadaan nostettua suunnittelijoiden tietoisuuteen eri käyttäjien mahdollisia haasteita. Murray-Smith ja kumppanit (2022) nostivat artikkelissaan esiin, että järjestelmien kehittyessä entistä monimutkaisimmiksi ja käyttäjien joukko monimuotoisemmaksi, käyttäjätestaukseen tulee lisää haasteita. Näissä tapauksissa mallintamisen avulla tehtävissä simulaatioissa voidaan testata laajempaa käyttäjäjoukkoa. (Murray-Smith ym., 2022). Tähän tutkimukseen testattiin kahta eri käyttäjäryhmää, mutta eri mallit mahdollistavat laajemminkin käyttäjäpersoonien luomiset. Laajat käyttäjäjoukot ja eri skenaariot ovat ehdottomasti mallintamisen etu. Mallintamisessa parametrien muuttaminen todettiin tutkimuksen toteutuksen aikana helpoksi ja ne mahdollistavat pienellä vaivalla ”mitä jos” kokeilut, joiden avulla käyttöliittymää pystyy optimoimaan entisestään. Kognitiivisen mallintamisen hyödyissä nämä voivat tuoda kustannustehokkuutta tuotekehitysprosessiin, koska käyttöliittymän A/B-testaus useammasta pienestä muutoksesta on useasti resurssien suhteen mahdollontonta. On silti muistettava, että mallintamisen lisäksi on hyödynnettävä muitakin käyttäjätestauksen menetelmiä, jotta lopputuloksesta saadaan käyttäjiä parhaiten palveleva käyttöliittymä.

Tutkimuksen toteutuksen yhteydessä korostui, että kognitiivista mallia käyttäessä on tärkeä huomioida ymmärrys datan merkityksestä ja kuinka sen avulla voidaan tehdä parempia suunnittelupäätöksiä. Malli tuottaa oletuksiin pohjautuvaa dataa tehtävien suoritusajoista, fiksaatioiden määrästä, käyttäjän tekemistä virheistä ja klikkauksista. Data itsessään ei ota kantaa onko suoritusajaltaan 5 sekuntia pitkä aika käyttöliittymän tehtävän suorittamisessa, vaan tulkinta jää tuotekehitystiimille. Tuotekehitystiimi voi määrittää omat raja-arvot ja tehdä arvion mikä on heidän mielestään hyvä suoritus aika ja mikä vaatii optimointia. Jeffries, Miller, Whaton & Uyeda (1991) esittivät mallin etuudeksi sen joustavuuden, sillä heidän näkökulmansa mukaan mallinnuksen voi tehdä kehitystiimi eikä se vaadi osaamista käyttäjäkokemuksen suunnittelun alalta. Tämän tutkimuksen perusteella näkisin hyväksi, että tuotekehitystiimi saisi koulutuksen mallin datan merkityksestä ja sen tulkinnasta, jotta muutoksissa osattaisiin keskittyä luomaan mahdollisimman käytettävää käyttöliittymää. On myös huomioitava, että tutkimuksessa tuotetut tulokset eivät ole yleistettävissä, sillä suoritusajojen vertailukelpoisuus riippuu käyttöliittymästä, tehtävästä ja tavoitteista.

Tuotekehitystiimit saattavat sisältää käyttöliittymäsuunnittelijan, jolla voi olla vaihteleva tieto ja osaaminen käyttäjän psykologisesta tiedosta ja sen hyödyntämisenä käytettävän käyttöliittymän suunnittelun hyötynä. Käyttäjän psykologinen tieto on laaja-alaista sekä teoreettisesti että empiirisesti. Kognitiiviset mallit mahdollistavat tämän tiedon tiivistämisen työkaluksi, joka mahdollistaa suunnittelijan konkreettisen oppimisen käyttöliittymäsuunnittelun psykologisista näkökulmista. Lisääntyneen ymmärryksen avulla voidaan suunnitella toimintoja, jotka ovat entistä intuitiivisempia, helppokäyttöisempiä ja motivoivimpia käyttäjille. Lähtökohtana suunnittelulle käyttäjän tarpeiden huomioiminen ja ihmisen ajattelun mukaan suunnittelu mahdollistaa intuitiiviset ja käytettävät käyttöliittymät. Osa suunnittelijoista voi olla tietoisia näistä, mutta käyttöliittymien kehityksen kannalta on tärkeää, että tietoisuutta saataisiin kasvatettua. Keskeiseksi kysymykseksi tämän osalta nousee, kuinka ihmisen tiedonkäsittelyn rationaalisuuden teorian esitetään niin, että suunnittelijat sisäistävät ne ja niiden

pohjalta tehdään entistä käytettävämpiä käyttöliittymiä. Mallintaminen tarjoaa hyvän työkalun nähdä ja kokeilla eri variaatioita. Suoritusajoille ja fiksaatioiden määrälle löytyy joko mallin toiminnasta tai ihmisen tiedonkäsittelyprosessien toiminnasta aina selitys. Jos mallia voitaisiin jatkokehittää ja se pystyisi tulosten ohella tuottamaan selityksen minkä takia esimerkiksi fiksaatioiden määrä kasvaa, se tarjoaisi kattavan työkalun suunnittelijoille ihmisen psykologisesta tiedosta, joka voi olla avain intuitiivisiin ja helppokäyttöisiin käyttöliittymiin.

Yhteenvetona voidaan todeta, että kognitiivisessa mallintamisessa on potentiaalia tuotekehityksen varhaisen suunnitteluvaiheen testauksiin. Jotta potentiaali päästäisiin hyödyntämään parhaalla mahdollisella tavalla, niin tutkimuksessa käytössä olevaa mallia tulisi jatkokehittää erityisesti integroimalla malli suunnittelutyökaluun ja toiminnan osalta.

## 5.2 Luotettavuus ja rajoitukset

Tutkimuksen luotettavuus, eli reliabiliteetti, kuvaa empiirisessä tutkimuksessa mittarin johdonmukaisuutta ja sitä kuinka sama asia on toistettavissa. Yleistettävyydellä eli validiteetilla kuvataan, kuinka tarkasti pystytään mittaamaan tiettyä ilmiötä tai asiaa. Tavoitteena on tehdä mittausta, joka on sekä riittävän tehokas että kattava. Tutkimuksen tuloksien yleistettävyyttä voidaan tarkastella eri asetelmien, tilanteiden ja populaatioiden osalta. (KvantiMOTV, 2018.) Tässä tutkimuksessa luotettavuuteen vaikuttavat mahdolliset tekniset virheet, joita voi ilmetä mallintamisen yhteydessä. Tekniset virheet voivat aiheuttaa vääristymiä tuloksiin, joten tutkimuksen toteutuksen yhteydessä on tärkeää, että mallintamisen konfiguraatio on tehty huolellisesti ja virheet ovat minimoitu.

Luotettavuuden osalta voidaan kyseenalaistaa voiko tietokoneella tuotettu data olla luotettavaa, sillä ihmisen kognitio ei ole laskennallinen mekanismi. Mallista muodostuva data pohjautuu kognitiivisiin arkkitehtuureihin, jotka ovat laskennallisia. Mallin laskentakaavat perustuvat tutkittuun tietoon ja sitä on validoitu muun muassa EMMA silmänliikearkkitehtuurin osalta ihmisdatalla (Salvucci, 2001). Luotettavuuden arvioinnin yhteydessä tulee huomioida, että mallin avulla saadaan oletuksia. Erilaiset muuttujat voivat vaikuttaa käytettävyydestä tuloksiin, mikä voi heikentää tutkimuksen luotettavuutta. Siksi on suositeltavaa testata käytettävyyttä eri menetelmin, jotta voidaan olla varmoja, että käyttöliittymä on intuitiivinen ja helppo käyttää. Tutkimuksen tavoitteena ei ollut tehdä täydellistä käytettävyydestä, vaan testata mallin toimintaa tuotekehitysprosessin näkökulmasta ja saada dataa suunnitellusta käyttöliittymästä. Kattavan käytettävyydestä sijaan mallintaminen antaa suunnittelijalle paremmat lähtökohdat jatkokehitykseen.

Kognitiivisen mallintamisen tutkimuksissa reliabiliteetin näkökulmasta etuna on sen toistettavuus. Mallin avulla voidaan tehdä sama tutkimus toistamiseen samoilla parametreilla. Validiteetin suhteen on merkittävää, että käytetty mittaamenetelmä tutkimuksessa mittaa tarkasti sen ilmiön ominaisuutta, jota tutkimuksessa tarkoituskina mitata. Tämän tutkimuksen mittaamenetelmänä oli

mallintaminen, jonka avulla selvitettiin kuvitteellisten käyttäjien suoriutumista käyttöliittymän tehtävistä. Mittaukseen käytettiin tehtäväaikaa, fiksaatioita ja virhepainallusten määrää. Onnistuminen saada mielekästä dataa näiden osalta vahvistaa tutkimuksen validiteettia.

### 5.3 Jatkotutkimushaasteet

Johtopäätöksinä tästä tutkimuksesta voidaan todeta, että kognitiivinen mallintaminen voisi tarjota potentiaalisia mahdollisuuksia tuotekehityksen varhaisessa suunnitteluvaiheessa. Mallintamisen avulla voidaan tehdä oletuksia käyttäjän toimista käyttöliittymässä ja näin parantaa suunnitelmia antaen suunnittelijalle paremmat lähtökohdat jatkokehitykseen. Mallintamisen työkalut kuitenkin vaativat jatkokehitystä toiminnan ja suunnittelutyökalujen integraation osalta, jotta niitä saadaan paremmin hyödynnettynä osana tuotekehitysprosesseja.

Jatkotutkimuksena olisi mielenkiintoista verrata tutkimuksen tuloksia aitoon käyttäjädataan tutkimuksessa käytetyssä käyttöliittymässä. Tämä auttaisi arvioimaan, kuinka paljon tulokset poikkeavat toisistaan ja käytännön osalta antaisi lisää näkökulmaa mallintamisen luotettavuuteen. Ihmisdatan vertaaminen kognitiivisen mallintamisen dataan voi auttaa ymmärtämään entistä paremmin mallin toimintaa ja näin ollen helpottaa mallin käyttöä. Jatkotutkimuksena olisi myös kiinnostava keskittyä selvittämään suunnittelijoiden tietoisuutta ihmisen kognitiosta ja tiedonkäsittelyn rationaalisuudesta. Tämä näkökulma on tärkeä, sillä nykyisissä tutkimusaineistoissa sitä ei ole käsitelty riittävästi. Tietoisuuden lisääminen voisi parantaa suunnittelijoiden kykyä hyödyntää kognitiivista mallintamista ja sen tuloksia, tai vaihtoehtoisesti mallintaminen voisi olla työkalu minkä avulla suunnittelijoiden ihmisen psykologian ymmärrystä voitaisiin kehittää entisestään.

Yksi tämän tutkimuksen löydös oli, että mallin käyttö pitäisi tuoda lähemmäksi tuotekehitystiimiä, jotta se säästää paremmin aikaa ja kynnyksellä olisi mahdollisimman pieni. Jatkotutkimuksena olisi mielenkiintoista selvittää voitaisiinko kognitiivista mallintamista hyödyntää suunnittelutyökalun lisäosana ja kuinka tämän toteutuksen pitäisi olla tehty. Jos mallin toiminta olisi integroitu suunnittelutyökaluun, niin mallin palaute olisi helposti ja vaivattomasti saatavilla, eikä käyttöliittymää tarvitsisi mallintaa toistamiseen. Tämä voisi tehostaa suunnitteluprosessia ja parantaa suunnittelijoiden mahdollisuuksia hyödyntää mallinnuksen tarjoamia etuja. Oulasvirta (2019) esitti että, malleja on mahdollista myös integroida suunnittelutyökaluihin, jotka auttaisivat suunnittelijoita analyyseissa. Tietoa ei toistaiseksi löytynyt onko integraatiota vielä toteutettu ja millaiset sen käyttökokemukset olivat.

Aiemmin mainittujen ideoiden lisäksi jatkotutkimusideana olisi toteuttaa laadullinen tutkimus, jossa haastateltaisiin eri yritysten tai suunnittelijoiden edustajia kognitiivisen mallintamisen tunnettuudesta ja kokemuksista tuotekehitysprosessissa. Tutkimuksen tarkoituksena olisi saada ajankohtaista tietoa, kuinka laajasti kognitiivinen mallintaminen on käytössä eri organisaatioissa,

millaisia kokemuksia ja näkemyksiä suunnittelijoilla on sen hyödyntämisestä sekä mitkä ovat mahdolliset esteet tai haasteet mallinnuksen käytölle. Tämä tieto auttaisi ymmärtämään nykytilaa ja mahdollisesti löytää uusia näkökulmia mallintamisen jatkokehitykseen, jotta sen potentiaali saadaan laajemmin käyttöön. Aiemmin mainitut jatkotutkimusehdotukset voisivat edistää ymmärrystämme kognitiivisen mallintamisen hyödyistä sekä tarjota käytännön näkökulmia sen soveltamiseen suunnitteluprosessissa.



## LÄHTEET

- Anderson, J. R. (1983). A spreading activation theory of memory. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, 22(3), 261-295.  
[https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(83\)90201-3](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(83)90201-3)
- Anderson, J. R., Bothell, D., Lebiere, C., & Matessa, M. (1998). An Integrated Theory of List Memory. *Journal of memory and language*, 38(4), 341-380.  
<https://doi.org/10.1006/jmla.1997.2553>
- Baddeley, A. (2001). The concept of episodic memory. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 356(1413), 1345-1350. <https://doi.org/10.1098/rstb.2001.0957>
- Bailly, G., Oulasvirta, A., Kötzing, T., and Hoppe, S. Menuoptimizer: Interactive optimization of menu systems. Proc. UIST '13. ACM, New York, 2013, 331-342.
- Collin, K. (2002). Development Engineers' Conceptions of Learning at Work. *Studies in Continuing Education*, 24(2), 133-152.  
<https://doi.org/10.1080/0158037022000020956>
- David E. Kieras and Anthony J. Hornof. 2014. Towards accurate and practical predictive models of active-vision-based visual search. In Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, 3875-3884.
- Fitts, P. M. (1992). The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement. *Journal of experimental psychology. General*, 121(3), 262-269. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.121.3.262>
- Gao , X., Yang , Y., Liu , C., Mitropoulos , C., Lindqvist , J & Oulasvirta , A. (2018). Forgetting of passwords: Ecological theory and data . in Proceedings of the 27th USENIX Security Symposium . Usenix- The advanced computing systemes association, pp. 221-238 , USENIX Security Symposium , Baltimore , Maryland , United States , 15/08/2018 . < <https://www.usenix.org/system/files/conference/usenixsecurity18/sec18-gao.pdf> >
- Garret, J. (2011). Elements of user experience. New riders: California.
- Gil, G., & Kaber, D. B. (2012). An Accessible Cognitive Modeling Tool for Evaluation of Pilot-Automation Interaction. *The International journal of aviation psychology*, 22(4), 319-342.  
<https://doi.org/10.1080/10508414.2012.718236>
- Guiard, Y., & Rioul, O. (2015). A mathematical description of the speed/accuracy trade-off of aimed movement.  
<https://doi.org/10.1145/2783446.2783574>

- Heinath, M., & Urbas, L. (2007). Simplifying the development of cognitive models using pattern-based modeling. *IFAC Proceedings Volumes*, 40(16), 130-135. <https://doi.org/10.3182/20070904-3-KR-2922.00023>
- Hornbæk, K. (2006). Current practice in measuring usability: Challenges to usability studies and research. *International journal of human-computer studies*, 64(2), 79-102.  
<https://www.cs.helsinki.fi/u/thusu/opinnot/kaytarv/Hornbaek%202006%20usability%20measurement%20methods.pdf>
- Howes, A., Duggan, G. B., Kalidindi, K., Tseng, Y., & Lewis, R. L. (2016). Predicting Short-Term Remembering as Boundedly Optimal Strategy Choice. *Cognitive science*, 40(5), 1192-1223.  
<https://doi.org/10.1111/cogs.12271>
- Howes, A., Lewis, R. L., & Vera, A. (2009). Rational Adaptation Under Task and Processing Constraints: Implications for Testing Theories of Cognition and Action. *Psychological review*, 116(4), 717-751.  
<https://doi.org/10.1037/a0017187>
- ISO. (2021). ISO 9241-11:2018(en) Ergonomics of human-system interaction – Part 11: Usability: Definitions and concepts Haettu osoitteesta:  
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9241:-11:ed-2:v1:en>
- Jeffries, R., Miller, J., Wharton, C., & Uyeda, K. (1991). User interface evaluation in the real world: A comparison of four techniques.  
<https://doi.org/10.1145/108844.108862>
- Karat, C., Campbell, R., & Fiegel, T. (1992). Comparison of empirical testing and walkthrough methods in user interface evaluation.  
<https://doi.org/10.1145/142750.142873>
- Najemnik, J. & Wilson, S. (2008). Eye movement statistics in humans are consistent with an optimal search strategy. *Journal of Vision* 8, 3 (2008), 4.
- John, B. & Jastrzembski, T. (2010). Exploration of Costs and Benefits of Predictive Human Performance Modeling for Design. *Proceedings of the 10th International Conference on Cognitive Modeling, ICCM 2010*. 115-120.
- John, B. E., & Suzuki, S. (2009). *Toward Cognitive Modeling for Predicting Usability*.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-02574-7\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-642-02574-7_30)
- John, B., Prevas, K., Salvucci, D., & Koedinger, K. (2004). Predictive human performance modeling made easy.  
<https://doi.org/10.1145/985692.985750>
- Jokinen, J. P., Wang, Z., Sarcar, S., Oulasvirta, A., & Ren, X. (2020). Adaptive feature guidance: Modelling visual search with graphical layouts. *International journal of human-computer studies*, 136, 102376.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2019.102376>
- Jokinen, J., Remes, U., Kujala, T., & Corander, J. (2022). Bayesian parameter inference for cognitive simulators. In J. H. Williamson, A. Oulasvirta, P. O.

Kristensson, & N. Banovic (Eds.), *Bayesian Methods for Interaction and Design* (pp. 308-334). Cambridge University Press.

Jokinen, J., Sarcar, S., Oulasvirta, A., Silpasuwanchai, C., Wang, Z., & Ren, X. (2017). Modelling learning of new keyboard layouts. *CHI '17*, 4203-4215. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025580>.

Jussi Jokinen, Aditya Acharya, Mohammad Uzair, Xinhui Jiang, and Antti Oulasvirta. 2021. Touchscreen typing as optimal supervisory control. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*

Krug, S. (2006). *Älä pakota minua ajattelemaan*. Gummerus: Jyväskylä.

KvantiMOTV – Kvantitatiivisten menetelmien tietovaranto (2018). Mittaaminen: Mittarin luotettavuus. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto. Haettu 20.4.2024 osoitteesta <http://www.fsd.uta.fi/metelmaopetus/mittaaminen/luotettavuus.htm>

1

Leino, K., Oulasvirta, A., & Kurimo, M. (2019). RL-KLM: Automating keystroke-level modeling with reinforcement learning. <https://doi.org/10.1145/3301275.3302285>

Lewis, R. L., Howes, A., & Singh, S. (2014). Computational rationality: Linking mechanism and behavior through bounded utility maximization. *Topics in cognitive science*, 6(2), 279-311. <https://doi.org/10.1111/tops.12086>

Murray-Smith, R., Oulasvirta, A., Howes, A., Müller, J., Ikkala, A., Bachinski, M., . Klar, M. (2022). What simulation can do for HCI research. *Interactions (New York, N.Y.)*, 29(6), 48-53. <https://doi.org/10.1145/3564038>

Nielsen, J. (1998). Cost of user testing a website. <https://www.nngroup.com/articles/cost-of-user-testing-a-website/>

Nielsen, J. (2008). When to use which user experience research methods. <https://www.nngroup.com/articles/which-ux-research-methods/>

Nielsen, J. (2012). Usability 101:: Introduction to usability. <https://www.nngroup.com/articles/usability-101-introduction-to-usability/>

Nyamsuren, E., & Taatgen, N. A. (2013). Pre-attentive and attentive vision module. *Cognitive systems research*, 24, 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2012.12.010>

Oaksford, M., & Chater, N. (2009). Précis of Bayesian Rationality: The Probabilistic Approach to Human Reasoning. *The Behavioral and brain sciences*, 32(1), 69-84. <https://doi.org/10.1017/S0140525X09000284>

Ocak, N., & Cagiltay, K. (2017). Comparison of Cognitive Modeling and User Performance Analysis for Touch Screen Mobile Interface Design. *International journal of human-computer interaction*, 33(8), 633-641. <https://doi.org/10.1080/10447318.2016.1274160>

- Prezenski, S., Brechmann, A., Wolff, S., & Russwinkel, N. (2017). A Cognitive Modeling Approach to Strategy Formation in Dynamic Decision Making. *Frontiers in psychology, 8*, 1335.  
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01335>
- Salvucci, D. D. (2001). An integrated model of eye movements and visual encoding. *Cognitive systems research, 1*(4), 201-220.  
[https://doi.org/10.1016/S1389-0417\(00\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S1389-0417(00)00015-2)
- Salvucci, D.D. (2000). A Model of Eye Movements and Visual Attention. *Proceedings of the International Conference on Cognitive Modeling* (No. S 525, p. 259).
- Sarcar, S., Jokinen, J. P., Oulasvirta, A., Wang, Z., Silpasuwanchai, C., & Ren, X. (2018). Ability-Based Optimization of Touchscreen Interactions. *IEEE pervasive computing, 17*(1), 15-26.  
<https://doi.org/10.1109/MPRV.2018.011591058>
- Schooler, L. J., & Hertwig, R. (2005). How Forgetting Aids Heuristic Inference. *Psychological review, 112*(3), 610-628. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.112.3.610>
- Studies in Continuing Education, 24*(2), 133-152.
- Van Rijn, H., Johnson, W., & Taatgen, N. A. (2011). Cognitive user modeling. *Topics in Cognitive Science, 3*(3), 438-454. <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2010.01094.x>
- Wilson S. Geisler. 2011. Contributions of ideal observer theory to vision research. *Vision Research 51, 7* (2011), 771-781.
- Wolfe, J. M., & Horowitz, T. S. (2017). Five Factors that Guide Attention in Visual Search. *Nature human behaviour, 1*(3), .  
<https://doi.org/10.1038/s41562-017-0058>
- Xiuli Chen, Gilles Bailly, Duncan P. Brumby, Antti Oulasvirta, and Andrew Howes. 2015. The emergence of interactive behaviour: A model of rational menu search. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 4217-4226.