

Hertta Leinonen

**DYNAAMISESSA YMPÄRISTÖSSÄ TAPAHTUVAN VISUAALISEN PÄÄTÖKSENTEON HELPOTTAMINEN**



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO  
INFORMAATIOTEKNOLOGIAN TIEDEKUNTA  
2023

# TIIVISTELMÄ

Leinonen, Hertta

Dynaamisessa ympäristössä tapahtuvan visuaalisen päätöksenteon helpottaminen

Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2023, 38s.

Kognitiotiede, pro gradu -tutkielma

Ohjaaja: Jokinen, Jussi

Suuri osa ihmisen ja tietokoneen välisestä vuorovaikutuksesta koostuu visuaalisesta navigoinnista, ja tiedon etsimisestä erilaisista käyttöliittymistä. Ympäristöjä tarkkaillessaan ihminen joutuu päättämään, mihin kohteeseen kiinnittää huomionsa, sillä visuaalinen järjestelmä ei kykene käsittelemään kaikkia ärsykeitä samanaikaisesti. Käyttäjän on kuitenkin onnistuttava tekemään päätös seuraavista toiminnoistaan visuaalisesti vastaanottamansa informaation perusteella. Tämä pro-gradu -tutkielma käsittelee dynaamisessa ympäristössä tapahtuvaa visuaalista päätöksentekoa, sen laskennallista mallintamista, ja mallien validointia. Osana tutkielmaa toteutettiin empiirinen tutkimus, jossa visuaaliseen dynaamiseen päätöksentekoon helpottavasti vaikuttavia tekijöitä tutkittiin simuloitussa tehtäväympäristössä kahtakymmentä koehenkilöä apuna käyttäen.

Asiasanat: dynaaminen päätöksenteko, ihmisen ja tietokoneen välinen vuorovaikutus, laskennallinen kognitiivinen mallintaminen, laskennallinen rationaalisuus, ominaisuusohjaus, visuaalinen päätöksenteko

## ABSTRACT

Leinonen, Hertta

Facilitating visual decision-making in a dynamic environment

Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2023, 38 pp.

Cognitive Science, Master's Thesis

Supervisor: Jokinen, Jussi

A large part of human-computer interaction consists of visual navigation and searching for information from various user interfaces. When observing the environment, a person must decide which object to pay attention to, because the visual system is not able to process all stimuli at the same time. However, the user must also make a decision about their next actions based on the information received visually. This thesis studies visual decision-making in a dynamic environment, the computational modeling of it, and model validation. An empirical study was carried out as part of the dissertation. The factors that facilitate visual dynamic decision-making were investigated in a simulated task environment using twenty volunteers.

Keywords: computational cognitive modeling, computational rationality, dynamic decision making, feature guidance, human computer interaction, visual decision making

## KUVIOT

|         |  |    |
|---------|--|----|
| KUVIO 1 | Dynaaminen päätöksentekoprosessi diagrammina .....   | 13 |
| KUVIO 2 | Laskennallisen rationaalisuuden malli simuloimassa päätöksentekoa .....  | 16 |
| KUVIO 3 | Ympäristön kanssa vuorovaikuttava POMDP -agentti .....   | 17 |
| KUVIO 4 | Laskennallisen rationaalisuuden POMPD-agentti vuorovaikuttaa sisäisen ympäristönsä välityksellä ulkoisen ympäristön kanssa ..... | 18 |
| KUVIO 5 | Ruutukaappaus värikoodatusta tehtävästä .....  | 22 |
| KUVIO 6 | Symbolein koodatut tehtävät, 4 ja 5 vaihtoehtoa .....  | 24 |
| KUVIO 7 | Värein koodatut tehtävät, 4 ja 5 vaihtoehtoa .....   | 25 |
| KUVIO 8 | Kokovaihteluin koodatut tehtävät, 4 ja 5 vaihtoehtoa .....   | 25 |
| KUVIO 9 | Tehtäväsarjojen pistejakaumat pylväsdiagrammina .....  | 28 |

## TAULUKOT

|  |    |
|--|----|
| TAULUKKO 1 Tutkimuksen tulokset .....          | 27 |
| TAULUKKO 2 Tutkimuksen tulosten analyysi ..... | 28 |

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVIOT

TAULUKOT

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | JOHDANTO.....   | 7  |
| 2     | PÄÄTÖKSENTEKO JA SEN LASKENNALLINEN MALLINTAMINEN ...             | 9  |
| 2.1   | Päätöksenteon psykologinen tausta.....                            | 9  |
| 2.2   | Visuaalinen päätöksenteko.....                                    | 10 |
| 2.3   | Dynaaminen päätöksenteko.....                                     | 12 |
| 2.4   | Päätöksenteon mallintaminen ja laskennallinen rationaalisuus..... | 14 |
| 2.4.1 | Esimerkki laskennallisen rationaalisuuden mallista.....           | 16 |
| 2.5   | Mallien validointi.....   | 18 |
| 3     | TUTKIMUS JA MENETELMÄT .....                                      | 20 |
| 3.1   | Hypoteesit.....   | 20 |
| 3.2   | Koeasetelma.....  | 22 |
| 3.2.1 | Tehtävät .....  | 23 |
| 3.2.2 | Tehtävän rajoitteet.....  | 25 |
| 3.2.3 | Koehenkilöt .....   | 26 |
| 3.3   | Tulokset.....   | 26 |
| 4     | POHDINTA .....  | 30 |
| 5     | YHTEENVETO .....  | 33 |
|       | LÄHTEET .....   | 35 |

# 1 JOHDANTO

Ihmisen ja tietokoneen välisessä vuorovaikutuksessa (engl. human computer interaction, HCI) tulee jatkuvasti eteen tilanteita, joissa käyttäjän on tehtävä päätös seuraavista toiminnoistaan visuaalisesti vastaanottamansa informaation perusteella. Suuri osa käyttäjän vastaanottamasta tiedosta on luonteeltaan symbolista, eli koostuu numeroista ja tekstistä (Lurie & Mason, 2007). Tällaisen tiedon käsittely on ihmiselle luonnostaan hankalaa, sillä sen prosessointiin liittyy sääntöpohjaista päättelyä, ja datan abstrahoimista merkityksiä sisältäviksi arvoiksi (Lurie & Mason, 2007). Sen sijaan ihmisen kyvyt havainnoida ympäristöään visuaalisesti ja tilallisesti ovat kehittyneet tarkoiksi, mm. kyky havaita kontrasteja ja epäjatkuvuuksia, ja huomata herkemmin elementtejä, jotka erottuvat värin ja muodon perusteella (Lurie & Mason, 2007; Chen et al., 2017; Cyr et al., 2010). Suhteellisen suoraviivaisissakin visuaalisissa päätöksissä ihminen joutuu ottamaan huomioon välittömän käyttöliittymästä keräämänsä aistisyötteen lisäksi myös mm. aiemmat kokemukset, sekä tulevaisuuden tavoitteet ja odotukset (Gold & Stocker, 2017). Visuaalinen päätöksenteko perustuu siis todisteiden keräämisen mekanismeihin (Gold & Stocker, 2017). Tätä päätöksentekijän kognitiivista kuormaa voidaan keventää hyödyntämällä tiedon välityksessä numeroiden ja tekstin sijaan muita näköaistia ja muistia koodaavia elementtejä, kuten värejä ja muotoja (esim. Chen et al., 2017).

Visuaalista päätöksentekoa voidaan tutkia kognitiotieteen menetelmin, ja mallintaa laskennallisen tieteen menetelmin. Kognitiivisten toimintojen laskennallisen mallinnuksen avulla kehitetään ja validoidaan uusia teorioita tutkittavista ilmiöistä, ja opitaan ymmärtämään aihetta tarkemmin (Murray-Smith et al., 2022). Tämä tekee teknologian suunnittelusta ennakoitavampaa, ja parantaa teknologian käytettävyyttä, turvallisuutta ja saavutettavuutta (Murray-Smith et al., 2022). Mallinnuksella voidaan tuottaa systemaattisempia, täsmällisempiä ja yleistettävämpiä havainnollistuksia vuorovaikutuksesta, kuin esimerkiksi sanallisilla kuvauksilla (Chen et al., 2015). Mallinnus siis mahdollistaa tieteellisen teorian toteutuksen, ja mallien tuottamat ennusteet voidaan validoida

reaalimaailman havainnoilla (Murray-Smith et al., 2022), joita saadaan esimerkiksi käyttäjätutkimuksilla.

Tässä tutkielmassa testataan koehenkilöillä tehtäviä, jotka mittaavat dynaamisessa ympäristössä tapahtuvaa visuaalista päätöksentekoa. Tehtävien on tarkoitus olla sovitettavissa laskennallisen rationaalisuuden teoriaan, jotta tutkimuksen tuottama aineisto sopisi teorian mukaisten laskennallisten mallien ennusteiden validoimiseen. Tutkimustulokset myös tarjoavat lisää tietoa siitä, kuinka visuaalista päätöksentekoa voidaan helpottaa muistia ja huomiota koo- daavilla elementeillä. Tutkimuskysymys on seuraava;

- Kuinka huomiota ohjaavilla visuaalisilla ratkaisuilla voitaisiin helpottaa aikarajatussa, dynaamisessa ympäristössä tapahtuvaa visuaalista päätöksentekoa?

Kysymystä lähestytään tutkimusta varten toteutettujen tehtävien avulla, joissa koehenkilöille on asetettu tavoite, mutta tehtävän suoritustapaa ei ole määriteltä tarkasti, eivätkä virheet ole suorituksen kannalta kriittisiä. Tällainen koeasetelma sopii testaamaan päätöksentekoa ympäristöissä, joissa on varaa päätöksentekijän mukautumiselle esimerkiksi taitotason tai aikaisemman kokemuksen perusteella. Tulosten analysoinnin on määrä tarjota uudella koeasetelmalla aiempaa tutkimusta vahvistavaa tietoa visuaalisesta päätöksenteosta dynaamisissa ympäristöissä, ja kuinka tällaista päätöksentekoa olisi mahdollista tukea. Aiempaa tutkimusta visuaalisen, dynaamisen päätöksenteon helpottamisesta ei juuri ole ennestään. Yleistettävissä oleva yksinkertainen havaintoaineisto on kuitenkin tärkeää kognitiivisessa mallinnuksessa, sillä sen avulla mallien tuottamaa käytöstä voidaan verrata havaittuun käyttöön. HCI:ssa visuaaliseen ja dynaamiseen päätöksentekoon vaikuttavista tekijöistä on tärkeä saada tietoa, sillä ne voivat vastata mm. kysymyksiin siitä, kuinka suunnitella käyttöliittymiä helpottamaan tiedonhakua, joka on tärkeä haaste ihmisen ja tietokoneen välisen vuorovaikutuksen tutkijoille ja suunnittelijoille (Rele & Duchowski, 2005).



## 2 PÄÄTÖKSENTEKO JA SEN LASKENNALLINEN MALLINTAMINEN

Teknologiaa käytetään pääasiallisesti visuaalisten käyttöliittymien välityksellä, joiden piirteiden ymmärtämistä ja tulkintaa ohjaavat käyttäjän kognitiiviset prosessit. Visuaalinen päätöksenteko on hyvin keskeinen osa ihmisen ja tietokoneen välistä vuorovaikutusta graafisten käyttöliittymien ollessa hyvin yleisiä (Gold & Stocker, 2017). Päätöksenteon tutkimus kognitiotieteessä perustuu tutkimustietoon ihmismielen toiminnasta ja suorituskyvystä. Visuaalinen päätöksenteko puolestaan perustuu silmien toimintaan ja huomion kiinnittymisen mekanismeihin. Tässä luvussa käydään läpi päätöksenteon psykologista taustaa, visuaalista ja dynaamista päätöksentekoa, sekä päätöksenteon prosessien mallintamiseksi kehitettyjä menetelmiä aiemman tutkimuksen ja teorioiden avulla. Mallinnuksen osalta tutkielmassa keskitytään laskennalliseen rationaalisuuteen perustuviin malleihin (esim. Oulasvirta et al., 2022), joiden ennusteiden validointiin sopivaksi tämän tutkimuksen tuottama aineisto on tarkoitettu.

### 2.1 Päätöksenteon psykologinen tausta

Päätöksenteko käsitteenä voi arkikielessä tarkoittaa useita asioita. Tässä tutkielmassa se määritellään valinnaksi kahden tai useamman kilpailevan toimintatavan välillä (Padilla et al., 2018). Psykologian termeissä päätöksenteko perustuu muistiin, informaation ja epävarmuuden käsittelyyn, sekä niihin loogisiin sääntöihin ja heuristiikkoihin, joita ihminen noudattaa tehdessään valintoja (Padilla et al., 2018; Hotaling et al., 2015; Dzulkifli et al., 2013). Dynaamisessa ympäristössä tapahtuvassa päätöksenteossa vaaditaan näiden lisäksi myös mm. seuranta, tunnistamista, oppimista, etsimistä, suunnittelua, arviointia ja valintaa (Gonzalez et al., 2005). On siis jopa hieman harhaanjohtavaa lokeroida tutkimus pelkän päätöksenteon alle, sillä päätöksentekoprosessit ovat vain yksi monista tällaisiin tehtäviin vaadittavista kognitiivisista prosesseista - oppiminen,

suunnittelu ja ongelmanratkaisu ovat yhtä tärkeitä. Esimerkiksi oppimisprosesseilla voidaan selittää suuri osa vaihteluista ihmisten suorituskäytännössä tehdä dynaamisia päätöksentekotehtäviä (Hotelling et al., 2015). Tutkielma keskittyy erityisesti visuaaliseen päätöksentekoon, eli päätöksentekoon tilanteessa, jossa informaatio vastaanotetaan näköaistin avulla. Visualisoinnit ovat ulkoisia visuaalisia esityksiä, jotka liittyvät systemaattisesti niiden edustamaan tietoon. Ne voivat välittää informaatiota esimerkiksi ympäristöstä, tapahtumista, esineistä, tai hyvinkin abstrakteista ilmiöistä (Padilla et al., 2018).

Ihmisen muisti on yleensä jaettu pitkäkestoiseen muistiin eli säiliömuistiin, ja lyhytkestoiseen muistiin eli työmuistiin (Dzulkifli et al., 2013). Työmuisti koostuu useista komponenteista, jotka säilyttävät oman kapasiteettinsa suuruisen, rajoitetun määrän tietoa, rajallisen ajan (Padilla et al., 2018). Visuaalisen päätöksenteon kontekstissa työmuistia merkittävästi kuormittavia prosesseja ovat sellaiset, jotka riippuvat työmuistin tarkoituksellisesta soveltamisesta toimintaan (Padilla et al., 2018). Tätä kutsutaan tyyppin 2 käsittelyksi. Tyyppin 1 käsittelyä on puolestaan sellainen toiminta, joka tapahtuu päätöksentekijän tietoisena toimintana ulkopuolella, käyttää pienempiä määriä työmuistia, eikä luota tietoiseen käsittelyyn työmuistissa prosessin ohjaamiseksi (Padilla et al., 2018). Monet tosielämän päätökset sisältävät molempien tyyppisiä prosesseja (Padilla et al., 2018).

Välitön ympäristöstä vastaanotettava aistisyöte ei ole visuaalisen päätöksenteon kannalta ainoa merkityksellisen tiedon lähde, sillä päätöksentekijää ympäröivä maailma voi olla luonteeltaan epävarma (Gold & Stocker, 2017). Epävarmuus syntyy tyypillisesti tilanteessa, jossa on rajallista tai arvaamatonta tietoa käyttäytymisen ennustetuista tuloksista, ja epävarmuuden onnistunut havaitseminen, käsittely ja ratkaiseminen ovat välttämättömiä mukautuvalle käyttäytymiselle (Bland et al., 2012). Visuaalinen epävarmuus voi johtua esimerkiksi visuaalisen kohteen epäselvyydestä, tai sen tunnistamisen hankaluudesta (Gold & Stocker, 2017). Lisäksi epävarmuuksien käsittelyn nopeuteen ja sujuvuuteen vaikuttavat esimerkiksi häiriötekijät tai kiire (Gold & Stocker, 2017).

Psykologian ja kognitiotieteen tutkimus on osoittanut, että myös intuitiolla on tärkeä rooli päätöksentekoprosessissa (Johnny et al., 2020). Tietokoneelle ei ole mahdollista ohjelmoida "intuitiota", mutta laskennallisten mallien avulla tämä kyky voidaan tarjota myös koneelle. Onnistunut päätöksenteko perustuu kykyyn muodostaa esityksiä tilanteiden taustalla olevista ärsyke-vaste-seuraussäännöistä (engl. stimulus-response-outcome, S-R-O), jotka on opittu aiemmista kokemuksista (Bland et al., 2012). Intuition hyödyntäminen ei kuitenkaan pois sulje strategista päätöksentekoa. Kykyä tehdä sekä intuitiivisia että strategisia päätöksiä kuvataan päätöksenteon kaksoisprosessilla (engl. dual-process of decision making), jonka mukaan ihmiset tekevät oletusarvoisesti nopeita, helppoja, ja laskennallisesti kevyitä päätöksiä (tyypin 1 käsittelyä), mutta tarvittaessa tekevät hitaampia, pohdintaa vaativia päätöksiä käyttämällä tyyppin 2 käsittelyä (Padilla et al., 2018).

## 2.2 Visuaalinen päätöksenteko

Monet HCI-tehtävät koostuvat visuaalisesta navigoinnista ja tiedon etsimisestä erilaisista käyttöliittymistä (Hornof & Halverson, 2003). Ympäristöjä tarkkaillaan ihminen joutuu päättämään, mihin kohteeseen kiinnittää huomionsa. Visuaalinen päätös on prosessi, jossa silmän verkkokalvon aktivaatiokuvioit (engl. patterns) muunnetaan esityksiksi kuvioiden lähteiden olemassaolosta ja sijainnista (Gold & Stocker, 2017). Suurin osa ympäristössä sijaitsevista kohteista jää foveaan eli katseen keskipisteen ulkopuolelle, niin kutsutulle perifeeriselle näköalueelle, eivätkä aivot koodaa niitä tarkasti. Ihmiset joutuvat turvautumaan valikoivaan visuaaliseen huomioon, sillä aivojen kapasiteetti ei kykene käsittelemään kaikkea näköpiiriin osuvaa samanaikaisesti (Wolfe & Horowitz, 2017). Koska silmien liikkeet heijastavat päätöksentekijän senhetkistä kiinnostuksen kohdetta, on silmien liikkeitä mitattu visuaalisten hakutehtävien aikana (Van der Stigchel et al., 2011). Silmien liikkeellä ja katseen fiksaatioilla on siis tärkeä osa siinä, mihin ihminen kiinnittää huomionsa päätöksensä tueksi. Silmien liikkeitä on mallinnettu laskennallisesti mm. EMMA (Eye Movements and Movement of Attention) -mallin avulla, joka mallintaa havaittavia silmäliikkeitä ja huomion siirtymistä (Salvucci, 2001). EMMA:n toimintaperiaate sisältää yhteyden silmien liikkeiden ja visuaalisen koodauksen välillä, mikä mahdollistaa sen, että malli ottaa huomioon yleiset silmien liikeilmiöt, kuten peräkkäiset fiksaatiot tai "ohitetut" fiksaatiot, eli tilanteet, joissa visuaalinen kohde on koodattu vain perifeerisesti (Salvucci, 2001).

Ihmisen huomiota ja silmien fiksaatioita voi ohjata kiinnittymään haluttuihin kohteisiin eri tavoin. Yksi näistä tavoista on ärsykkeisiin perustuva ohjaus, jossa tiettyjen ympäristön kohteiden visuaaliset ominaisuudet suunnitellaan herättämään enemmän huomiota, kuin toisten. Tätä kutsutaan ominaisuusohjaukseksi (engl. feature guidance) (Wolfe & Horowitz, 2017). Kohteiden tietyt ominaisuudet, kuten väri, koko ja muoto ovat ohjaavia ominaisuuksia, sillä ne voivat ohjata huomion sijoittumista visuaalisen salienssin eli erottumisen avulla. Kohteessa tai ympäristössä voi olla muitakin silmiinpistäviä ominaisuuksia, kun kohdetta tarkastellaan lähemmin, ja ne voivat olla tärkeitä kohteen tunnistamisen kannalta, mutta ne eivät varsinaisesti ohjaa huomiota (Wolfe & Horowitz, 2017). Huomion ohjaamista on mallinnettu esimerkiksi vertailemalla väreillä korostettuja visualisointeja symboleihin, kuten tekstiin ja numeroihin (Chen et al., 2017). Kyseisessä tutkimuksessa todettiin, että väreillä korostetut käyttöliittymäelementit mahdollistivat perifeerisen näön hyödyntämisen tiedon keräämiseen. Tämä tulos on seurausta siitä, että ihmisen tiedonkeruustrategioihin liittyy erilaisia terävyystoimintoja; kun väritietoa voidaan saada katseen periferialta, foveaan on kohdistuttava suoraan tekstiin, jotta sitä voi ymmärtää (Chen et al., 2017). Graafisen käyttöliittymän elementtien koodaaminen värein ja muodoin siis hypoteettisesti helpottaa visuaalista, dynaamista päätöksentekoa, ja tukee muistia ohjaamalla näkökykyä, ja samalla päätöksentekijää yksinkertaistamalla visuaalisten ärsykkeiden tulvaa.

Yksi yksinkertaisimmista tavoista tutkia visuaalisen salienssin ja ominaisuusohjauksen vaikutusta empiirisesti on näyttää päätöksentekijälle visuaalisia esityksiä, ja mitata reaktioaika, joka kuuluu esimerkiksi sen raportoimiseen, onko jokin kohde olemassa vai ei. Kohteiden määrän funktiolla voidaan mitata visuaalisen haun tehokkuutta (Wolfe & Horowitz, 2017). Tätä perusideaa visuaalisesta hausta, ja aikaisempaan tutkimukseen perustuvaa hypoteesia ominaisuusohjauksen muistia tukevasta ja päätöksentekoa helpottavasta vaikutuksesta, on hyödynnetty osana tämän tutkielman empiiristä koeasetelmaa ja tehtäväympäristöä, johon palataan tarkemmin luvussa 3.

### 2.3 Dynaaminen päätöksenteko

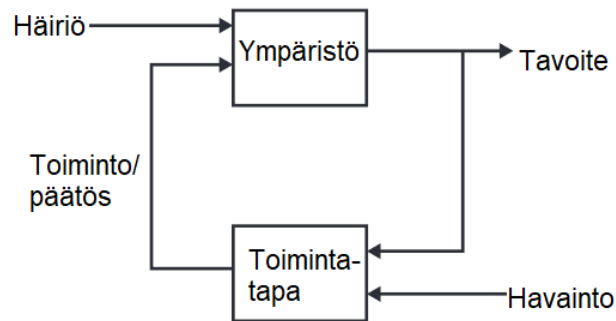
Visuaaliseen päätöksentekoon yhdistetään tässä tutkimuksessa dynaamisen päätöksenteon tutkimus toteuttamalla empiirinen koe molempia samanaikaisesti tutkivassa tehtäväympäristössä. Dynaaminen päätöksenteko (engl. dynamic decision making, DDM) kattaa laajan joukon monimutkaisia kognitiivisia tehtäviä, joissa ihmisen on tehtävä useita päätöksiä muuttuvassa aikarajoitetussa tehtäväympäristössä (Peebles & Banks, 2010). Dynaaminen päätöksenteko määrittellään kolmen yhteisen piirteen avulla:

1. sarja toimenpiteitä on suoritettava ajan kuluessa jonkin tavoitteen saavuttamiseksi,
2. toimien tulee olla toisistaan riippuvaisia niin, että myöhemmät päätökset riippuvat aikaisemmista, ja
3. ympäristö muuttuu sekä spontaanisti, että aikaisempien toimien seurauksena (Edwards, 1962).

Tällaista ajan mukana muuttuvaa ympäristöä kutsutaan matematiikassa dynaamiseksi järjestelmäksi. Järjestelmä koostuu erillisistä osista, jotka ovat toistensa kanssa vuorovaikutuksessa. Tämä johtaa siihen, ettei dynaamisen järjestelmän tarvitse olla kovinkaan monimutkainen ollakseen toiminnaltaan vaikeasti ennustettavissa (Fishwick, 2007). Klassinen laskennallisen tieteen esimerkki on ns. Lorenzin malli, jossa kolmen yhtälön ja kolmen muuttujan järjestelmä on kaoottinen (Lorenz, 1963). Ympäristössä tapahtuvat muutokset voivat johtaa joko ympäristön rakenteesta, tai päätöksentekijän omista toimista, mutta tyypillisimmin muutokset aiheutuvat näiden kahden vaikutuksen yhdistelmästä (Peebles & Banks, 2010). Dynaamisten järjestelmien monimutkaisuus (engl. complexity) on termi, joka kuvaa järjestelmän rakennetta. Dynaamiset järjestelmät sisältävät osia, jotka liittyvät toisiinsa tavalla, joka tekee järjestelmän käyttäytymisen ennustamisen vaikeaksi (Gonzalez et al., 2005). Lisäksi järjestelmän joidenkin osien läpinäkymättömyys (engl. opaqueness) lisää epävarmuutta. Läpinäkymättömyys voi tarkoittaa esimerkiksi joidenkin käyttöjärjestelmän ominaisuuksien tai toiminnallisuuden piilottamista painikkeiden taakse, jolloin ne eivät ole

välittömästi päätöksentekijän käytettävissä (Gonzalez et al., 2005). Päätöksenteko dynaamisissa ympäristöissä ei synny pelkän harkinnan ja valintojen avulla, vaan siihen liittyvät myös järjestelmän toiminnan tunnistamisen, sekä palautteen ymmärtämisen kognitiiviset prosessit (Gonzalez et al., 2005).

Lähtökohtana dynaamisissa päätöksentekotehtävissä on se, että päätökset täytyy tehdä reaaliajassa. DDM:n kokeelliset tutkimukset on tyypillisesti toteutettu simuloitujen tehtäväympäristöjen muodossa, joissa osallistujien on tarkkailtava tiettyjä ympäristön tiloja, ja ylläpitää tai optimoida yhden tai useamman muun tilan arvo tietyn ajanjakson aikana (Peebles & Banks, 2010). Ympäristön tilat on esitetty joko numeerisesti tai graafisesti. Tehtävät ovat tavallisesti tosielämän tehtävien yksinkertaistuksia, mutta monimutkaisempiakin simulaatioita on tutkittu realistisuuden saavuttamiseksi (Hotaling et al., 2015). Tyypilliset DDM-tehtäväympäristöt simuloivat esimerkiksi reitin valintaa autoa ajaessa tai parhaan strategian valitsemista jossakin pelissä (Gonzalez et al., 2005). Dynaamista päätöksentekoa tutkiva tehtävätyyppi, jota tämän tutkielman empiirisessä tutkimuksessa päädyttiin käyttämään, on ns. DSF-tehtävä ("dynamic stocks and flows"), joka on suunniteltu tutkimaan, kuinka ihmiset hallitsevat resursseja muuttuvassa, yksinkertaisista komponenteista muodostuvassa ympäristössä (Peebles & Banks, 2010). Alkuperäisessä DSF-tehtävässä koehenkilöiden tuli valvoa simuloitussa tehtäväympäristössä, ettei nesteellä täytetty tankki vuoda yli, tai jää vajaaksi (Peebles & Banks, 2010). Tässä tutkielmassa koeasetelmaan on lisätty visuaalista päätöksentekoa tutkiva elementti. Empiirinen tutkimus esitellään tarkemmin luvussa 3.



KUVIO 1 Dynaaminen päätöksentekoprosessi diagrammina (mukailtu Hotaling et al., 2015).

Kuviossa 1 on esitetty dynaaminen päätöksenteko-ongelma diagrammina. Diagrammissa päätöksentekijällä on tavoite, johon pyrkiä, ja sen saavuttamiseksi on tehtävä joukko päätöksiä. Päätöksiä tueksi on löydettävä optimaalinen toimintatapa, jonka valitsemiseksi on otettava huomioon sekä tavoite, että havainnot. Tilanteeseen voivat vaikuttaa myös erilaiset häiriötekijät (esim. kiire tai häiriöäänet). Näiden määritelmien perusteella tätä ongelmaa on mahdollista analysoida lineaarisena stokastisena optimointiongelmana (Hotaling et al., 2015). Ongelma voidaan muotoilla matemaattiseen asuun, jolle voidaan etsiä laskennallisia ratkaisuja.

## 2.4 Päätöksenteon mallintaminen ja laskennallinen rationaalisuus

Visuaalista dynaamista päätöksentekoa voidaan mallintaa laskennallisen tieteen keinoin. Kognitiiviset mallit perustuvat psykologisiin hypoteeseihin siitä, kuinka agentit tekevät päätöksiä (Jokinen et al., 2020). Usein nämä mallit toteutetaan laajemmissa teoreettisissa rakenteissa, eli arkkitehtuureissa, jotka ovat yhtenäisiä järjestelmiä ajattelun ja käyttäytymisen eri komponenttien integroimiseksi yhdeksi johdonmukaiseksi kognitioksi (Jokinen et al., 2020). Kognitiivisten arkkitehtuurien kehittäminen on edesauttanut mm. tiedonhaun, visuaalisen haun, ja häiriötekijöiden vaikutusta koskevien teorioiden muodostumisessa, jotka auttavat ymmärtämään ihmisen ja tietokoneen välistä vuorovaikutusta paremmin (Oulasvirta et al., 2022). Paljon käytetty kognitiivinen arkkitehtuuri on ACT-R, eli "Adaptive Control of Thought – Rational" (suom. mukautuva ajattelun hallinta – rationaalinen). ACT-R:n tavoitteena on määrittellä ihmismielen kognitiivisia toimintoja, sekä havainnointiin liittyviä toimintoja, kuten muistia ja päätöksentekoa (Anderson et al., 2004). Teoria esittää joukon mekanismeja, jotka hyödyntävät niille annettua tietoa tehtävän suorittamisesta, ja sen perusteella ennustavat ja selittävät ihmisen käyttäytymisen muodostavia kognition tiloja (Ritter et al., 2019). ACT-R:lla on toteutettu runsaasti empiirisiä tutkimuksia, jossa on mallinnettu päätöksentekoa dynaamisissa ympäristöissä. Mallinnusta on tehty koskien mm. moniajtoa autoa ajaessa (Kiefer & Urbas, 2006), ilmasodankäyntiä (Sohn et al., 2005), ja lennonjohtoa (Lebiere et al., 2001) niitä simuloivissa tehtäväympäristöissä.

ACT-R:n kaltaisten kognitiivisten arkkitehtuurien soveltamisessa monimutkaisiin vuorovaikutustilanteisiin on kuitenkin muutamia merkittäviä rajoituksia, jotka liittyvät käytettävissä olevien mallinnuskeinojen jäykkyyteen. Jokaiselle mallille tulee erikseen määrittellä, kuinka tehtävä suoritetaan, ja tämä tieto koodataan säännöiksi koskien mm. käyttäjän taitoja (Oulasvirta et al., 2022). Sääntöjen laatiminen sillä tarkkuudella, että ne ottavat huomioon potentiaalisten käyttäjien odottamattomatkin toiminnot, on hyvin vaikeaa ja aikaa vievää (Oulasvirta et al., 2022). Tämä ongelma on johtanut laskennallisten esitysten ja menettelytapojen kehittämiseen kohti todennäköisyyksien ennustamista; menetelmiä optimaalisten toimien tunnistamiseksi päätellyillä todennäköisyyksillä (Gershman et al., 2015). Nämä laskennallisen rationaalisuuden (engl. computational rationality, CR) malleiksi kutsutut menetelmät rakentuvat todennäköisyyspäätelyprosessien pohjalle, ja pyrkivät havaitsemiseen, ennustamiseen, oppimiseen, sekä päättelyyn tilanteissa ja ympäristöissä, joissa on epävarmuuksia ja rajoitteita (Gershman et al., 2015). Menetelmät yhdistävät laskennalliset kognitiiviset arkkitehtuurit rajoitettuun optimiteettiin (engl. bounded optimality), jolla on pohja koneoppimisessa (Oulasvirta et al., 2022). Laskennallinen rationaalisuus on siis teoria vuorovaikutuksesta sopeutumisenä ympäristön ja päätöksentekijän rajoihin (Oulasvirta et al., 2022). Laskennallisen rationaalisuuden malleja on testattu visuaalisen päätöksenteon mallintamisessa mm. siinä, kuinka ihmiset

käyttävät verkkokaupassa asioidessaan päätöksenteon apuna verkkoarvosteluja (Lelis & Howes, 2011).

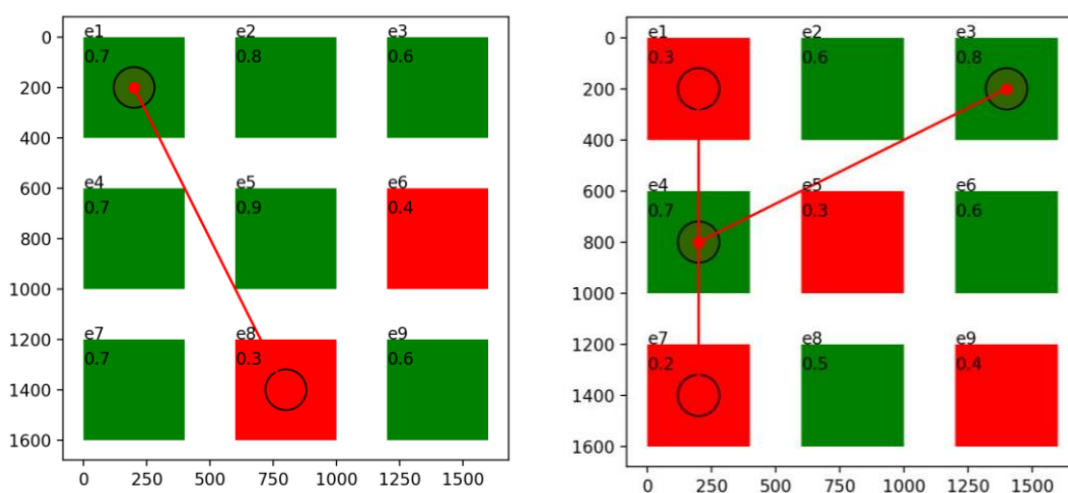
Laskennallisen rationaalisuuden mallit perustuvat tavallisesti vahvistusoppimiseen. Vahvistusoppiminen (engl. reinforcement learning) on tekoälytekniikka, jossa ensiarvoista on käyttäytymisen mukautuminen ympäristön, ja itse päätöksentekijän oman suorituskyvyn asettamiin rajoihin (Wiering & Van Otterlo, 2012). Vahvistusoppiminen on tutkimusten mukaan myös eräs tavoista, joilla ihmisäivot toimivat päätöksentekotilanteissa (Niv, 2009). Vahvistusoppiminen käsittää joukon erilaisia koneoppimisalgoritmeja, joiden tarkoituksena on oppia toimimaan sellaisissa ympäristöissä, joissa ainoa päätöksentekijän saama palaute koostuu palkintosignaalista (Wiering & Van Otterlo, 2012). Palkinto pitää sisällään kaiken sen, mikä on päätöksentekijän toiminnan kannalta tärkeää, kuten sen prioriteetit ja tavoitteet, mutta myös ympäristön tiloihin liittyvät negatiiviset palkinnot, kuten aikakustannukset (Oulasvirta et al., 2022). Päätöksentekijän tavoitteena vahvistusoppimisessa on suorittaa toimintoja, jotka maksimoivat palkintosignaalin pitkällä aikavälillä (Wiering & Van Otterlo, 2012).

Olennaista vahvistusoppimisessa on päätöksentekijän mukautuminen ympäristöön. Päätöksentekijän ja ympäristön välinen raja on toisinaan häilyvä, mutta lähtökohtaisesti kaikkea, mitä päätöksentekijän ei ole mahdollista hallita, pidetään osana ympäristöä (Wiering & Van Otterlo, 2012). Päätöksentekijä valitsee suoritettavat toiminnot ympäristöstä havaintojen perusteella. Laskennallisen rationaalisuuden kontekstissa päätöksentekijä tekee sen ratkaisemalla rajoitetun optimiteetin ongelmia (Oulasvirta et al., 2022). Tehtävänä on olla vuorovaikutuksessa ympäristön kanssa ja kerätä tietoa siitä, kuinka käyttäytymistä voidaan palautteen ohjaamana optimoida (Wiering & Van Otterlo, 2012).

Paljon käytetty menetelmä vahvistusoppimisessa on Markovin päätösprosessi (engl. Markov decision process, MDP), sekä sen eri variaatiot. Tässä tutkielmassa esimerkkinä ja empiirisen kokeen esikuvana käytettävän laskennallisen rationaalisuuden mallin toiminta perustuu erääseen MDP:n variaatioon. MDP on stokastinen prosessi, joka tarjoaa matemaattisen viitekehyksen diskreetti-aikaisten päätöksenteko-ongelmien tutkimiseen (Spaan, 2012). MDP:tä käytetään erityisesti optimaalisten, peräkkäisten päätösten määrittämiseen dynaamisissa ja epävarmoissa ympäristöissä (Ibe, 2013). Ympäristötilojen (engl. state) joukko  $S$  määritellään äärelliseksi joukoksi  $\{s_1, \dots, s_N\}$ , missä tila-avaruuden koko on  $N$ , eli  $|S| = N$ . Toimintojen (pätösten) joukko  $A$  määritellään äärelliseksi joukoksi  $\{a_1, \dots, a^k\}$ , jossa toiminta-avaruuden koko on  $K$ , eli  $|A| = K$ . Toimintojen avulla on mahdollista hallita järjestelmän tilaa (Wiering & Van Otterlo, 2012). Jokainen päätöksentekijän ympäristössä suorittama toiminto voi johtaa palkintoon (Ibe, 2013). Mallin tarkoituksena on löytää optimaalinen toimintatapa (engl. policy) määrittämään toimintojen sarjaa, joka päätöksentekijän on suoritettava maksimoidakseen odotetun palkinnon tietyllä aikavälillä (Ibe, 2013). Toimintatapa on funktio, joka määrittää jokaiselle tilalle  $s \in S$  toiminnon  $a \in A$ . Stokastinen toimintatapa määritellään muotoon  $\pi : S \times A \rightarrow [0,1]$  siten, että jokaiselle tilalle  $s \in S$  pätee, että  $\pi(s,a) \geq 0$ , ja  $\sum_{a \in A} \pi(s,a) = 1$  (Wiering & Van Otterlo, 2012).

### 2.4.1 Esimerkki laskennallisen rationaalisuuden mallista

Tämän tutkielman on innoittanut laskennallinen kognitiivinen malli, jonka ovat luoneet Antti Oulasvirta, Jussi P.P. Jokinen, ja Andrew Howes. Mallia käytetään kognitiivisen mallintamisen opetuksessa Jyväskylän yliopiston kurssilla Cognitive modeling (kurssikoodi KOGS536). Malli käyttää hyväkseen vahvistusoppimista, jonka avulla se kykenee navigoimaan uusissa tilanteissa, joihin liittyy epävarmuuksia. Mallilla voidaan simuloida ja ennustaa erilaisia kognitiivisia toimintoja, kuten visuaalista hakua, silmien liikkeen ennustamista, hahmontunnistusta, sekä päätöksentekoa. Tämän tutkielman yksi tavoitteista oli luoda tutkimuksen avulla aineisto, jota voitaisiin käyttää mm. kyseisen mallin ennusteiden validoimiseen.



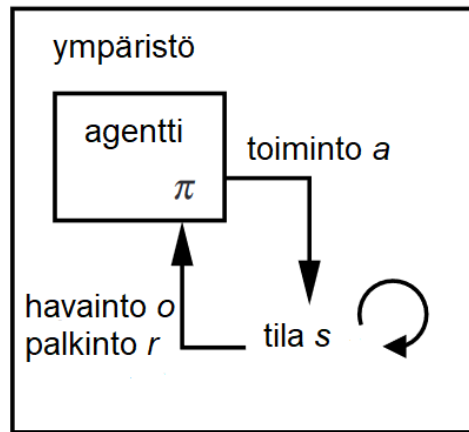
KUVIO 2 Laskennallisen rationaalisuuden malli simuloimassa päätöksentekoa

Kuviossa 2 näkyy saman päätöksentekotehtävän kaksi eri variaatiota, jotka CR-malli on onnistuneesti suorittanut. Tehtävissä mallin tuli päättää, onko verkkopankkitapahtuma luotettava. Se tapahtui tutkimalla, onko arvoltaan 0.5 tai yli olevia laatikoita (vihreät) suurempi osuus, kuin alle 0.5 arvoisia laatikoita (punaiset). Kuviossa näkyy, kuinka monta katseen fiksaatiota päätöksen tekemiseen on tarvittu. Ensimmäisessä tehtävässä laatikoiden selvä enemmistö on vihreitä, ja malli on tarvinnut päätöksentekoon vain kaksi fiksaatiota. Toisessa tehtävässä punaisia ja vihreitä laatikoita on lähes sama määrä, ja päätöksen tekemiseksi on tarvittu neljä fiksaatiota. Tämä ero selittyy sillä, että visuaalinen järjestelmä valitsee vain murto-osan syöttestä yksityiskohtaista käsittelyä varten, ja on virittynyt poimimaan näkymästä helposti erottuvia, visuaalisesti salienteja elementtejä (Zhaoping, 2008).

Kyseisessä laskennallisen rationaalisuuden mallissa (Oulasvirta et al., 2022) käytettävä vahvistusoppimismenetelmä on versio osittain havainnoitavasta Markovin päätösprosessista (engl. partially observable Markov decision process, POMDP), joka puolestaan on yleistys MDP:stä. MDP:ssä päätösten tekemiseen tehtyjen toimenpiteiden järjestys olettaa, että ympäristö on täysin



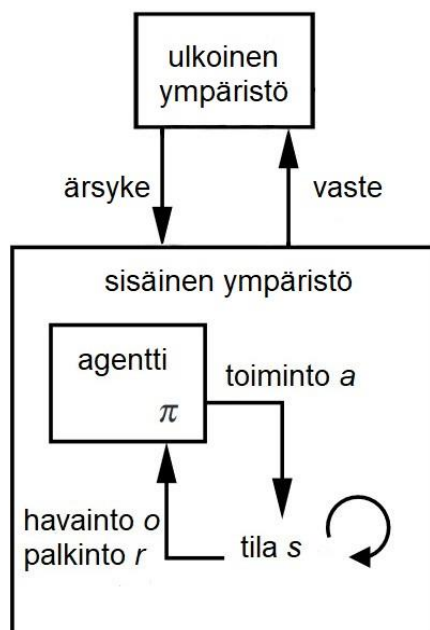
havainnoitavissa, ja päätöksentekijän toimintojen vaikutukset ovat deterministisiä (Ibe, 2013). Reaalimaailmassa on kuitenkin paljon tilanteita, joissa kaikki ympäristön elementit eivät ole täysin havaittavissa, mikä tarkoittaa, että valittujen toimintojen vaikutukset ovat usein epädeterministisiä. Tällaista dynaamista päätöksentekotilannetta mallintaa MDP:tä paremmin POMDP, joka ei oletta kaikkien ympäristön tilojen olevan välittömästi havainnoitavissa – sen sijaan päätöksentekijä on joukko havaintoja, joista se voi päätellä, millä todennäköisyydellä järjestelmä on jossakin tilassa (Ibe, 2013). Näiden havaintojen perusteella päätöksentekijä suorittaa toiminnon, joka johtaa palkintoon, ja saatu palkinto antaa tietoa siitä, kuinka hyvä toimenpide oli (Ibe, 2013).



KUVIO 3 Ympäristön kanssa vuorovaikuttava POMDP-agentti (mukailtu Spaan, 2012).

Kuviossa 3 on esitys siitä, kuinka POMDP-agentti (pätöksentekijä) vuorovaikuttaa jonkin stokastisen ympäristön, esimerkiksi ohjelmiston käyttöliittymän kanssa. Päätöksentekijä vastaanottaa ympäristön tilasta  $s$  havainnon  $o$ , jonka perusteella se suorittaa jonkin toiminnon  $a$ . Toiminto johtaa palkintoon  $r$ . Kuviossa  $\pi$  kuvaa toimintatapaa, jonka päätöksentekijän muodostaa havaintojen ja palkintojen muodossa vastaanotettavien palautteiden perusteella, ja muokkaa seuraavia toimintojaan sen mukaisiksi (Spaan, 2012). Matemaattisesti POMDP kuvataan monikkona  $(S, A, T, R, \Omega, O)$ , jossa  $S$  on äärellinen joukko mahdollisia ympäristön tiloja;  $A$  on äärellinen joukko päätöksentekijän mahdollisia toimintoja;  $\Omega$  on äärellinen joukko havaintoja;  $T$  on siirtymäfunktio, joka määritellään muodossa  $T : S \times A \times S \rightarrow [0, 1]$ ;  $O$  on havaintofunktio, joka määritellään muodossa  $O : S \times A \times \Omega \rightarrow [0, 1]$ ; ja  $R$  on palkitsemisfunktio, joka määritellään muodossa  $R : S \times A \times S \rightarrow R$  (Spaan, 2012).

Laskennalliseen rationaalisuuteen perustuvissa malleissa POMDP-agentti ei kuitenkaan ole edellä kuvatun prosessin kaltaisesti suoraan vuorovaikutuksessa ulkoisen ympäristön (esim. digitaalisen käyttöliittymän) kanssa, vaan pääsee siihen käsiksi vain sisäisen ympäristönsä välityksellä (Oulasvirta et al., 2022), ks. kuvio 4 alla.



KUVIO 4 Laskennallisen rationaalisuuden POMPD-agentti vuorovaikuttaa sisäisen ympäristönsä välityksellä ulkoisen ympäristön kanssa (Mukailtu Spain, 2012; ja Oulasvirta et al., 2022).

Sisäinen ympäristö on teoria erilaisista kognitiivisista tiloista, joihin päätöksentekijän noudattama toimintatapa perustuu. Sisäinen ympäristö sisältää ärsykeistä muodostetut havainnot, sekä ne kapasiteettirajoitukset, jotka määrittelevät mm. päätöksentekijän muistin rajoja (Oulasvirta et al., 2022). Ulkoisen ympäristön tavoin myös sisäinen ympäristö on stokastinen, ja vain osittain havaittavissa oleva; seuraavat tilat määritetään todennäköisyyksillä, eikä ympäristön todellinen tila ole päätöksentekijän käytettävissä. Päätöksentekijän siis tulee tehdä toistuvia havaintoja, ja rakentaa niiden perusteella arvio sisäisen ympäristön tilasta (Oulasvirta et al., 2022). Sisäisen ja ulkoisen ympäristön leikkauspisteessä tapahtuu vuorovaikutusta, kun sisäisestä ympäristöstä käsin aistitaan ympäristön ärsykeitä, ja aktivoidaan reaktioita, joilla ympäristöä manipuloidaan (Oulasvirta et al., 2022).

## 2.5 Mallien validointi

Mallinnus on välttämätön väline tieteellisessä tutkimuksessa, joka tähtää ymmärtämään monimutkaisten järjestelmien ja päätöksentekijän käyttäytymistä myös hypoteettisissa tai äärimmäisissä olosuhteissa, tai tilanteissa, joissa itse todellisen prosessin käyttäminen on liian hidasta tai kallista (Murray-Smith et al., 2022). Kognitiotieteessä on useita teorioita, jotka kuvaavat ja ennustavat ihmisen eri toimintoja, ja joita on menestyksekkäästi mallinnettu simuloituissa ympäristöissä. Yksi näistä teorioista on laskennallisen rationaalisuuden teoria. Aina ei ole

kuitenkaan selvää, kuinka hyvin teorioihin pohjautuvien mallien tuottamat ennusteet ihmisen käyttäytymisestä yleistyvät todellisen maailman päätöksiin (Sohn et al., 2005). Missä mallinnuksen avulla mahdollistetaan tieteellisen teorian toteutus, mallien ennusteiden validoimisen työkaluna voidaan käyttää reaali-maailman havaintoja (Murray-Smith et al., 2022).

Laskennallisia kognitiivisia malleja on melko vaikea validoida, sillä ne määrittelevät paljon enemmän yksityiskohtia, erityisesti laskennallisia yksityiskohtia kognitiivisista prosesseista ja mekanismeista, kuin perinteiset laskennalliset mallit (Sun, 2009). Mallien validoimiseen on kuitenkin kehitetty useita menetelmiä, kuten suorien käyttäytymismittausten (esim. tarkkuus, vasteaika) ja epäsuorien mittareiden (esim. katseen seuranta) käyttö (Sun, 2009). Paljon käytetty menetelmä kognitiivisten mallien validoimisessa on empiirinen käyttäjätutkimus koehenkilöitä hyödyntäen. Käyttäjiltä kerätystä aineistosta on mahdollista hahmottaa mallin soveltuvuutta ja hyödyllisyyttä erilaisiin tehtäviin (Silva et al., 2021). Tällainen validointityö tapahtuu analysoimalla osallistujien suorituskyykyä valittuun teoriaan sopivilla tehtävillä, ja vertailemalla mallin antamaa ennustetta käyttäjätutkimuksella havaittuun lopputulokseen (Silva et al., 2021). Monet tässä tutkielmassa käytettyjen kirjallisten lähteiden mallit on validoitu käyttämällä empiirisiä tekniikoita, joiden avulla saatiin vahvistettua ennustettu käsitys käyttäjien vuorovaikutussuorituskyvystä (Silva et al., 2021). Esimerkiksi tutkimuksessa Jokinen et al. (2020) esitelty visuaalista ominaisuusohjausta tutkiva laskennallinen malli validoitiin testaamalla sen tuloksia koehenkilöiden avulla. Koska kyseinen malli ennustaa visuaalista hakua, koeasetelma suunniteltiin niin, että osallistajat etsivät visuaalisesti koodattuja elementtejä erilaisista graafisista käyttöliittymistä. Mallin validiteetin arvioinnissa käytettiin mallien ennusteiden ja ihmisen havaintojen kvantitatiivisia ja laadullisia vertailuja (Jokinen et al., 2020).

Eräs tämän tutkielman tavoitteista oli saada empiirisen tutkimuksen avulla tuloksia, jotka soveltuisivat laskennallisen rationaalisuuden mallien validoimiseen. Koehenkilöiden suorittamat tehtävät ja koeasetelma kokonaisuudessaan suunniteltiin tavoitetta silmällä pitäen, mallivalidoinnin perusteita noudattaen.

### 3 TUTKIMUS JA MENETELMÄT

Dynaamisessa ympäristössä tapahtuvaa visuaalista päätöksentekoa ja sen mallintamista lähestyttiin tässä tutkielmassa empiirisellä tutkimuksella. Tutkimusta varten suunniteltiin dynaaminen päätöksentekotehtävä, jossa visuaalista päätöksentekoa helpottavia tekijöitä testattiin 20 koehenkilön avulla. Tehtävät olivat yksinkertaisessa graafisessa käyttöliittymässä suoritettavia aikarajoitettuja seurantatehtäviä, joissa vajavaisesta ja epävarmasta visuaalisesta informaatiosta oli kerättävä tarpeeksi evidenssiä päätöksenteon tueksi. Tehtävissä päätöksentekijän tuli valita neljästä tai viidestä arvoaan ajan mukana vaihtavasta vaihtoehdosta mielestään paras. Valintavaihtoehdot oli esitetty palkkien muotoisina elementteinä, joiden arvot oli merkitty joko symboleilla, väreillä, tai kokomuutoksilla. Tehtävistä saatavilla pisteillä mitattiin suorituskykyä eri tehtäväsarjojen välillä. Kaikki 20 tutkimukseen osallistunutta koehenkilöä suorittivat samat tehtävät alustanaan tietokone, ja kokeet toteutettiin paikan päällä tutkielman kirjoittajan ohjeistuksella.

#### 3.1 Hypoteesit

Tehtävien suoritusta pyrittiin ennustamaan kognitiivisten hypoteesien perusteella. Valittujen manipulaatioiden vaikutuksista on olemassa aiempaa tutkimusta, jota hyödynnettiin hypoteesien muotoilussa.

Ensimmäinen hypoteesi koskee värikoodauksen vaikutusta dynaamisessa ympäristössä tapahtuvaan visuaaliseen päätöksentekoon. Osassa tehtävistä käyttöliittymän elementtien arvot oli koodattu punaista ja vihreää väriä käyttäen niin, että arvoaan edellisestä tilasta pudottanut palkki oli merkitty punaiseella, ja arvoaan edellisestä tilasta korottanut palkki vihreällä. Ihmisen visuaalinen järjestelmä on virittynyt poimimaan näkymästä selkeästi erottuvia elementtejä, ja tämän erottumisen voi saada aikaan esim. väreillä (Zhaoping, 2008; Wolfe & Horowitz, 2017). Väri ylipäätään on muistia koodaava elementti, joka toimii

tehokkaana tietokanavana ihmisen kognitiiviseen järjestelmään, ja sillä on havaittu olevan merkittävä rooli muistin suorituskyvyn parantamisessa (Dzulkifli et al., 2013). Värit auttavat muistamaan asioita lisäämällä huomiotasomme, ja niiden rooli keskittymistason parantamisessa on kiistaton (Dzulkifli et al., 2013). On siis perusteltua olettaa, että värikoodatusta tehtävästä suoriudutaan symbolikoodattua standarditehtävää paremmin, sillä visuaalinen esitys tukee muistia. Toinen hypoteesi koskee elementtien kokomuutoksia. Toisessa tehtävätyypissä arvoaan edellisestä tilasta pudottanut palkki pieneni, ja arvoaan edellisestä tilasta korottanut palkki suureni. Kohteen koko on värin ohella eräs huomiota ohjaavista ominaisuuksista (Wolfe & Horowitz, 2017). Kokoestimaatio, tai muutos elementtien koossa ei kuitenkaan ole värejä yhtä selkeästi päätöksentekijää tukeva. Koon havaitsemiseen liittyy paljon kohinaa, sillä ihmissilmä ei ole hyvä havaitsemaan kokoeroja. Aiempi tutkimus on osoittanut, että ihminen tunnistaa paremmin elementtien värin, kuin niiden muodon (Pan, 2010). Hypoteesin mukaan elementtien kokomuutokset helpottavat päätöksentekoa verrattuna symbolikoodattuun standarditehtävään, mutta eivät yhtä paljon, kuin värikoodaus. Hypoteesit näyttävät seuraavanlaisilta:

H<sub>1</sub>) Elementtien värikoodaus helpottaa visuaalista päätöksentekoa.

H<sub>2</sub>) Elementtien kokovaihtelu helpottaa visuaalista päätöksentekoa, mutta vähemmän kuin värikoodaus.

Värikoodaus hypoteettisesti vähentää tarvetta muistaa edellisen näkymän arvoa, mikä helpottaa työmuistin kuormaa ja näin nopeuttaa tehtävää, ja parantaa tarkkuutta. Kokovaihtelu on merkitykseltään tässä välissä, sillä koon muutos tulee silti havainnoida, ja edellinen koko tulee muistaa. Edellisen koon muistaminen on kuitenkin helpompaa, kuin esimerkiksi symbolin, varsinkin jos muutos on huomattava. Perustuen näihin hypoteeseihin, nollahypoteesi on

H<sub>0</sub>) Väri- tai kokokoodaus ei vaikuta visuaaliseen päätöksentekoon.

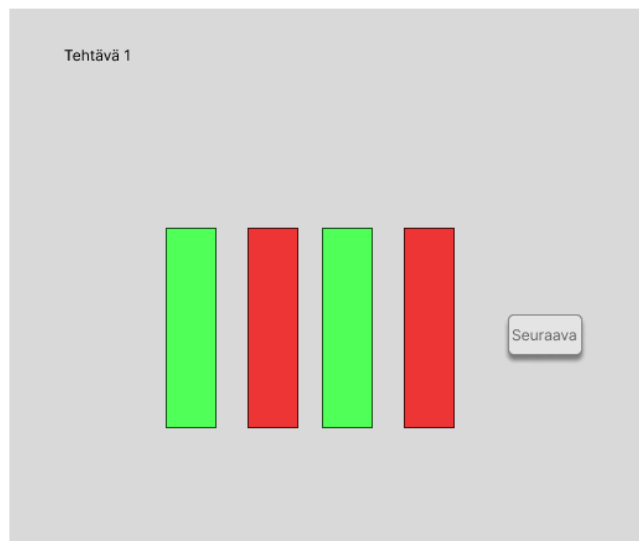
Tutkimuksen interaktiohypoteesi on, että valittavissa olevien vaihtoehtojen lukumäärä (set size) ei vaikuta päätöksenteon nopeuteen, mikäli päätöksentekoa helpotetaan esimerkiksi värikoodauksella. Tämän hypoteesin mukaan sekä neljän että viiden vaihtoehdon tehtävien tulisi sujua suunnilleen yhtä hyvin tilanteissa, joissa manipulaatiot ovat päätöksentekijää tukevia.

H<sub>0</sub>) Vaihtoehtojen määrän (set size) lisääminen vaikuttaa päätöksentekoon, mikäli päätöksentekoa helpotetaan.

H<sub>3</sub>) Vaihtoehtojen määrän (set size) lisääminen ei vaikuta päätöksentekoon, mikäli päätöksentekoa helpotetaan.

### 3.2 Koeasetelma

Tehtävät olivat dynaamisessa ympäristössä tapahtuvaa visuaalista päätöksentekoa tutkivia seuranta- ja valintatehtäviä. Laskennallisen rationaalisuuden teoriaan perustuen tehtävälle annettiin selkeä mitattavissa oleva tavoite, ja koehenkilön oletettiin mukauttavan käyttäytymisensä niin, että tavoite saavutettaisiin mahdollisimman hyvin. Koeasetelman interventiot pyrittiin rakentamaan siten, että tavoitteen maksimoinnin onnistumiseksi koehenkilön tulee mukauttaa käyttäytymistään. Käytöksen mukauttamisen keinoina oli erilaisia rajoitteita ja palkintoja siten, että oikeista valinnoista sai lisää pisteitä, ja vääristä menetti. Myös nopeista päätöksistä palkittiin.



KUVIO 5 Ruutukaappaus värikoodatusta tehtävästä.

Tehtäväympäristö oli yksinkertainen graafinen käyttöliittymä. Päätöksentekijää ohjeistettiin tarkastelemaan palkkien muotoisten elementtien muodossa esitettyjä vaihtoehtoja, ja liikkumaan ajassa eteenpäin. Tarkasteltujen näkymien perusteella tuli pystyä tekemään valinta siitä, mikä vaihtoehtoista oli paras, eli millä tuli todennäköisimmin olemaan korkein arvo. Tehtävässä oli tavoitteena tarkastella ensin dynaamista ympäristöä, ja tehdä havaintojen pohjalta päätös, joka maksimoi tehtäväsarjan pisteet. Valittavia palkkeja oli tehtävissä joko neljä tai viisi kappaletta. Painamalla « seuraava » -painiketta näkyviin tulivat järjestelmän palkkien seuraavat asennot, eli järjestelmän seuraava tila. Palkkien arvot muuttuivat ajassa liikuttaessa; yhden arvo saattoi laskea, toisen nousta, ja kolmannen vaihdella ylös ja alas. Päätöksentekijä sai klikkailla eteenpäin « seuraava » -painikkeesta niin kauan kunnes oli varma päätöksestään, mutta päätöksen saattoi tehdä jo heti ensimmäisen tai toisen kuvan perusteella, jos paras vaihtoehto tuntui selkeältä. Valinta tapahtui klikkaamalla haluttua palkkia. Palkkien muutoksen käytös pysyi tehtävän ajan samana, eli mikäli arvo oli edellisissä tiloissa laskenut, noussut, tai saanut paikallaan, se jatkui samanlaisena seuraavissakin tiloissa. Se, kuinka nopeasti tai

vähällä informaatiolla tämä havaittiin, vaihteli koehenkilöiden välillä. Valinnan jälkeen tehtävä siirtyi seuraavaan saman tehtävätyypin tehtävään, jos aikaa oli jäljellä. Aikaa yhden tehtäväsarjan tekemiseen oli 15 sekuntia, joten mitä vähemmän koehenkilö klikkasi « seuraavaa », sitä vähemmän aikaa kului yksittäiseen tehtävään, ja sitä enemmän pisteitä tehtäväsarjasta oli mahdollista saada. Kokonaispistemäärä kuvasi sitä, kuinka hyvin tehtävä meni. Pisteet eivät olleet koehenkilöille näkyvissä, mutta he olivat ohjeistuksen perusteella tietoisia pisteetyksestä. Tehtävissä mitattavat pisteet laskettiin seuraavanlaisesti:

1. Parhaan vaihtoehdon valitsemisesta sai kolme pistettä.
2. Jonkin muun vaihtoehdon valitsemisesta menetti pisteen
3. »Seuraavan » valitsemista menetti yhden pisteen

Koehenkilöt suorittivat yhteensä kuusi tehtäväsarjaa, joista jokaiseen oli varattu 15 sekuntia aikaa. Tehtäväsarjat edustivat kolmea erilaista tehtävätyyppiä: symbolikoodattuja, värikoodattuja, ja koko-koodattuja. Jokaisesta tehtävätyypistä oli kaksi eri variaatiota, joista toisessa vaihtoehtoja oli neljä, ja toisessa viisi. Eri tehtävätyypit olivat;

1. Symbolikoodattu tehtävä, ns. standarditehtävä, 4 tai 5 vaihtoehtoa
2. Värikoodattu tehtävä, 4 tai 5 vaihtoehtoa
3. Koko-koodattu tehtävä, 4 tai 5 vaihtoehtoa

### 3.2.1 Tehtävät

Tehtäväympäristö ja interaktiiviset tehtävät luotiin tutkielmaa varten Figman (Figma, 2023) prototyypityökalun avulla. Käyttöliittymän, sekä sen elementtien ulkoasu pyrittiin pitämään mahdollisimman yksinkertaisina, jotta ne tukisivat tutkimuskysymysten selvittämistä mahdollisimman hyvin. Yksinkertaisen ulkoasun avulla haluttiin vähentää ylimääräistä kognitiivista kuormaa, jotta koehenkilöiden huomio keskittyisi mahdollisimman tarkasti vain visuaaliseen päätöksentekoon. Elementtien suunnittelussa jouduttiin tekemään joitakin kompromisseja. Esimerkiksi värikoodattuun tehtävään valitut vihreä ja punainen ovat siitä kyseenalaiset värit, että punavihervärisokeus on melko yleistä. Tehtäväympäristön suunnittelussa värien valintaa perusteltiin sillä, että punaisella ja vihreällä värillä on hyvin selkeä ja tuttu merkitys monissa visuaalisissa käyttöliittymissä. Vihreä tarkoittaa monille automaattisesti oikeaa valintaa, ja punainen väärää (Cyr et al., 2010). Kahdenkymmenen henkilön otantakoko oli myös niin pieni, että poikkeavan värinäön omaavien osallistujien todennäköisyys oli vähäinen, ja jäikin lopulta nolllaksi. Suuremmassa tutkimuksessa värien käyttöä voisi harkita uudestaan.

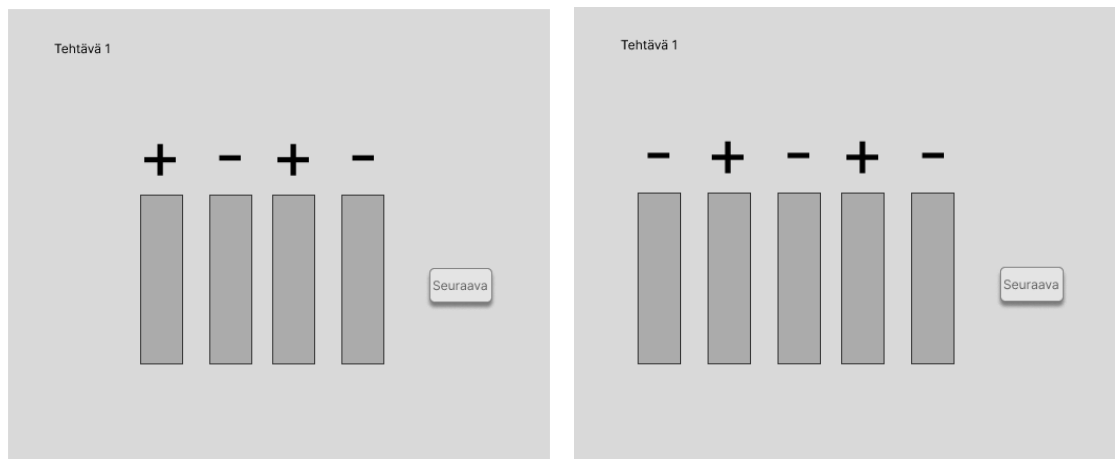
Manipulaatioiden, kuten väri- tai kokokoodauksen, oli tarkoitus olla redundantteja, eli niiden ei varsinaisesti tullut antaa lisää informaatiota, vaan helpottaa päätöksenekijää esim. vähentämällä työmuistikkuormaa. Kaikissa

tehtävissä tarjottiin siis sama, rajoitettu määrä tietoa, mutta hieman eri muodoissa.

Dynaaminen prosessi tehtävään tuotettiin autoregressiivistä prosessia hyödyntäen, joka määräsi vaihtoehtojen arvojen muuttumisen. Palkkien arvot generoitiin etukäteen, jolloin jokainen koehenkilö teki samat tehtävät samoilla arvoilla. Prosessimalli, joka tutkimukseen valittiin, oli yksinkertainen: otettiin satunnaisnumero väliltä 2 ja -2, ja lisättiin siihen vakio. Toinen satunnaisnumero lisättiin tämän jälkeen vielä kerran, jolloin muutoksen voimakkuus ja suunta saatiin päätettyä. Näin luvut olivat satunnaisgeneraattorilla luotuja, mutta niihin voitiin vaikuttaa etukäteen. Tässä kohtaa suunnittelua otettiin huomioon myös eräs toinen keskeinen koesuunnittelun valinta, eli kuinka volatiileja arvot tulisivat olemaan. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, ovatko muutokset yllättäviä ja suuria, vai onko muutos aina päätöksentekijän ennustettavissa. Jos tutkimukseen olisi valittu volatilitteetiltään hyvin erilaisia muuttujia, se olisi tuonut mahdollisesti lisää kiinnostavuutta tutkimusasetelmaan, mutta samalla voinut johtaa siihen, että tutkimukseen olisi tarvittu suurempi aineisto, sillä käytökseen tulisi enemmän kohinaa. Tästä syystä arvojen muutokset lopullisessa tehtävässä olivat melko ennustettavia.

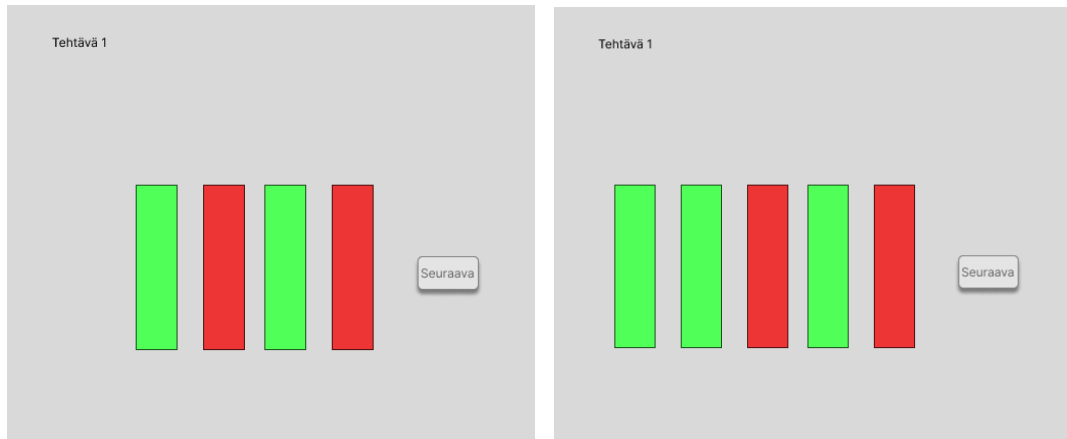
Tutkimuksessa pyrittiin eliminoimaan tehtävien tekojärjestyksen vaikutus tuloksiin. Designvariaatioiden testaamisen satunnaistamisessa hyödynnetään latinalaista neliötä, eli eri tehtävätyypit tulivat koehenkilöille eri järjestyksessä.

Alta löytyy kuvat kaikkien kuuden tehtävätyypin alkuasunnoista (KUVIO 6, KUVIO 7, KUVIO 8).

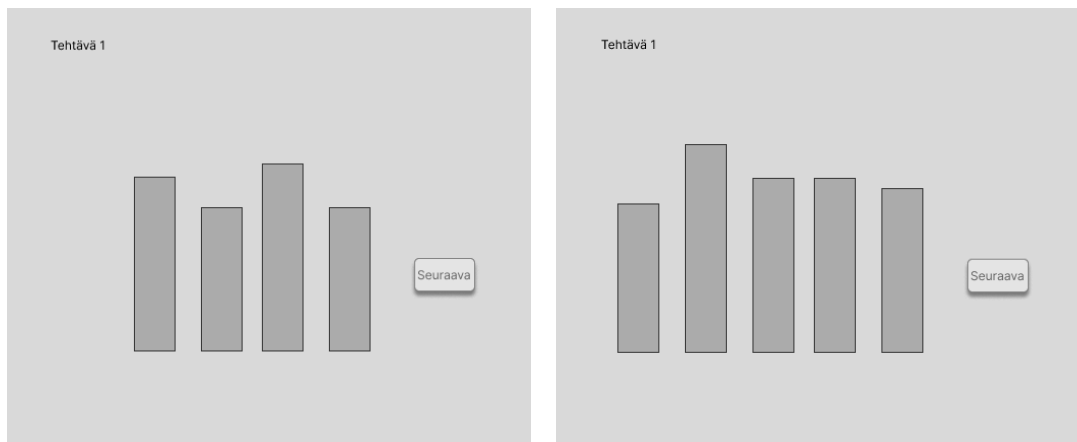


KUVIO 6 Symbolein koodatut tehtävät, 4 ja 5 vaihtoehtoa.





KUVIO 7 Värein koodatut tehtävät, 4 ja 5 vaihtoehtoa.



KUVIO 8 Kokovaihteluin koodatut tehtävät, 4 ja 5 vaihtoehtoa.

### 3.2.2 Tehtävän rajoitteet

Tehtäväympäristöön liittyi rajoitteita, jotka ohjasivat päätöksentekijän käytöstä mm. hidastamalla tai nopeuttamalla päätöksentekoa. Esinnäkin päätöksentekijän ei ollut mahdollista havaita tehtävän todellista tilaa, eli tehtävän oikeaa vastausta – käytännössä siis hypoteettista viimeistä kuvaa. Päätöksentekijä havaitsi vain sen aiheuttamat muutokset palkeissa, ja muutaman järjestelmän eri tilan liikuessaan ajassa eteenpäin klikaten « seuraavaa ». Toinen merkittävä rajoite oli aika. Yhden tehtäväsarjan tekemiseen oli aikaa 15 sekuntia, mikä pakotti päätöksentekijän nopeampaan valintaan, kuin mihin hän olisi mahdollisesti päätenyt ilman ajallista rajoitetta. Myös tehtävän ohjeistuksen kehoitus maksimoida pisteet sai koehenkilöt kiirehtimään, jotta tehtäväsarjassa ehtisi tehdä useamman kuin yhden tehtävän loppuun. Kolmas rajoite oli hinta, joka « seuraavan » klikkaamiselle oli asetettu. Pisteiden menetykset ohjasi tekemään mahdollisimman luotettavan päätöksen, mahdollisimman vähäisen tiedon avulla. Laskennalliseen rationaalisuuteen perustuvissa malleissa vahvistusoppimisagentin eri toimille asetetaan hintoja, jotka tuottavat halutun käytöksen. Siksi myös tässä tehtävässä « seuraavan » hinnan mahdollisesti

aiheuttamalla klikkaamisella tai klikkaamatta jättämisellä on tärkeä rooli päätöksenteon ohjaamisessa.

Päätöksentekijän sisäiset rajoitteet joihin edellä mainitut manipulaatiot vaikuttivat, olivat näköaisti ja muisti, etenkin työmuisti. Päätöksentekijällä oli muisti palkkien aikaisemmista asennoista, ja siihen oli tukeuduttava seuraavien toimien valitsemiseksi. Muistia pyrittiin helpottamaan osassa tehtävistä koodaamalla vaihtoehtoja väreihin ja kokomuutoksia, symbolien käyttämisen sijaan.

### 3.2.3 Koehenkilöt

Tutkimukseen osallistuneet koehenkilöt rekrytoitiin tutkielman kirjoittajan lähipiiristä. Tavoitteena oli löytää 20 osallistujaa within-subjects koeasetelmaan. Voima-analyysin tulos 20:lle koehenkilölle olisi merkitsevyystasoltaan 0.05, ja efektikooltaan 0.8. Tämä tarkoittisi suurta/keskisuurta efektiä. Koehenkilöistä ei kerätty taustatietoja muuttujiksi, mutta koehenkilöihin kuului korkeakouluopiskelijoita, työelämässä olevia ihmisiä, sekä työttömiä. Sukupuolijakauma oli hyvin tasainen. Suurimmalla osalla osallistujista oli hyvät IT-aidot ja kokemusta erilaisista käyttöliittymistä ennestään opintojen, harrastuneisuuden tai ammatin puolesta. Koeasetelma käyttöliittymiseen oli tosin suunniteltu sellaiseksi, ettei ennakkotietojen määrän olisi pitänyt suuresti vaikuttaa lopputulokseen. Enemmän vaikutusta oli osallistujien motorisilla kyvyillä (kuinka nopeasti hiiren sai oikealle kohdalle, kun päätös oli tehty), havaintokyvyillä, ja muistilla.

Ennen aineiston keräämisen aloittamista tutkimus pilotoitiin kahdelle vapaaehtoiselle, jotka testasivat tehtävien tekoa tietokoneella. Tutkielman kirjoittaja valvoi pilottikokeiden tekoa, ja teki muistiinpanoja, joiden pohjalta tutkimuksen ohjeistusta paranneltiin ennen aineiston keräämisen aloittamista. Aineistoa kerättiin aikavälillä 2.9.2023 - 10.10.2023. Tutkimukseen osallistui yhteensä 20 henkilöä.

## 3.3 Tulokset

Koehenkilöiden suorituskykyä mitattiin käyttäen koetehtävien pisteytystä. Pisteet kirjattiin ylös numeroarvona. Alla on tulokset tehtäväkategorioittain taulukoituna (TAULUKKO 1). Tehtävien mukaan jaettuihin sarakkeisiin merkittiin tehtävistä saadut pisteet per koehenkilö. Alimpana taulukossa on keskiarvot per tehtäväsarja.

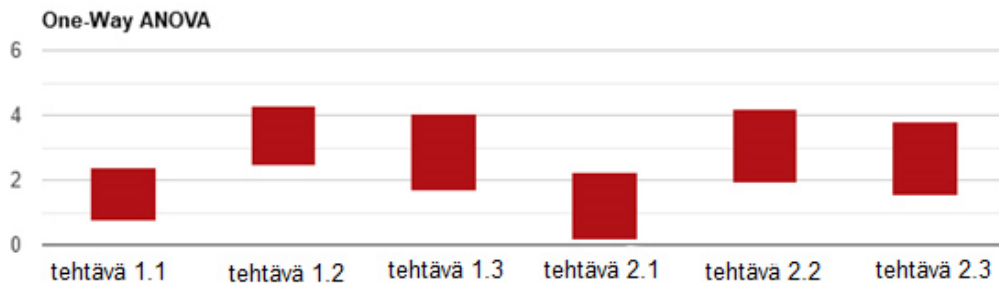
| koe-<br>henkilöt | tehtävä 1.1<br>(numerot_4) | tehtävä 1.2.<br>(värit_4) | tehtävä 1.3<br>(koot_4) | tehtävä 2.1<br>(numerot_5) | tehtävä 2.2<br>(värit_5) | tehtävä 2.3<br>(koot_5) |
|------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| kh1              | 3                          | 4                         | 5                       | 3                          | 5                        | 5                       |
| kh2              | 1                          | 2                         | 1                       | 2                          | 1                        | 2                       |
| kh3              | 3                          | 2                         | 4                       | 1                          | 2                        | 4                       |
| kh4              | 2                          | 3                         | 2                       | 1                          | 3                        | 2                       |
| kh5              | 3                          | 4                         | 4                       | 2                          | 4                        | 2                       |
| kh6              | 2                          | 3                         | 3                       | 1                          | 3                        | 2                       |
| kh7              | 2                          | 4                         | 3                       | 2                          | 3                        | 3                       |
| kh8              | 1                          | 2                         | 1                       | 0                          | 2                        | 1                       |
| kh9              | 1                          | 3                         | 2                       | 1                          | 4                        | 2                       |
| kh10             | 1                          | 2                         | 2                       | 0                          | 2                        | 2                       |
| kh11             | 3                          | 4                         | 5                       | 3                          | 5                        | 4                       |
| kh12             | 2                          | 4                         | 3                       | 1                          | 4                        | 3                       |
| kh13             | 1                          | 3                         | 2                       | 0                          | 3                        | 2                       |
| kh14             | 2                          | 5                         | 4                       | 1                          | 3                        | 3                       |
| kh15             | 1                          | 4                         | 3                       | 0                          | 3                        | 2                       |
| kh16             | 1                          | 3                         | 2                       | 3                          | 2                        | 3                       |
| kh17             | 0                          | 3                         | 2                       | 0                          | 2                        | 1                       |
| kh18             | 0                          | 3                         | 2                       | 0                          | 2                        | 2                       |
| kh19             | 1                          | 4                         | 3                       | 1                          | 3                        | 3                       |
| kh20             | 2                          | 5                         | 4                       | 2                          | 5                        | 5                       |
| keski-<br>arvo   | 1.6                        | 3.35                      | 2.85                    | 1.2                        | 3.05                     | 2.65                    |

TAULUKKO 1 Tutkimuksen tulokset.

Aineiston data-analyysi toteutettiin IBM SPSS-ohjelmistolla. Aineiston normaalijakautuneisuus testattiin Shapiro-Wilk-testillä. Testillä havaittu p-arvo (0.112) oli suurempi kuin 0.05, joten aineiston normaalijakautuneisuus oletettiin tämän perusteella. Tutkimuksen hypoteesien testaamisessa ja tulosten tilastollisessa analyysissä käytettiin toistettujen mittausten varianssianalyysiä (engl. repeated measures ANOVA). Mitatuista pisteistä laskettiin havaintokohtaiset keskiarvot eri koetilanteiden perusteella, ja hypoteeseja peilattiin analyysin tuloksiin. Keskiarvoerojen analysoinnissa päädyttiin käyttämään viiden prosentin merkitsevyystasoa. Tämä tarkoittaa, että jos testin p-arvo olisi pienempi, kuin 0.05, on saatu tulos tilastollisesti merkitsevä. Keskiarvojen p-arvo oli  $< 0.001$ , eli tulokset olivat ainakin osittain tilastollisesti merkittäviä. Mauchlyn sfäärisyystesti osoitti, että sfäärisyysoletusta ei voitu hylätä, joten oletusta ei oltu rikottu ( $\chi^2(14) = 17,438$ ,  $p = .234$ ).

Toistettujen mittausten variassianalyysillä saatiin selville, että riippuvissa muuttujissa oli tilastollisesti merkitsevä ero ryhmien välillä ( $F(5,95) = 31.16$ ,  $p < 0.001$ ), keskiarvon ollessa 1.6 ryhmässä 1, 3.35 ryhmässä 2, 2.85 ryhmässä 3, 1.2 ryhmässä 4, 3.05 ryhmässä 5, ja 2.65 ryhmässä 6 (katso KUVIO 9). Havaittu efektikoko (0.36) oli suuri. Tämä osoitti, että keskiarvojen välisen eron koko oli myös suuri. Näistä tuloksista oli jo mahdollista nähdä, että symbolikoodatut ns. standarditehtävät, joiden ei ollut tarkoitus olla merkittävästi näköaistia tai työmuistia

helpottavia, menivät kahta muuta tehtäväsarjaa huonommin. Koehenkilöt saivat väri- ja kokokoodatuista tehtävistä keskimäärin parempia pisteitä.



KUVIO 9 Tehtäväsarjojen pistejakaumat pylväsdiagrammina.

Post-hoc parillinen t-testi käyttäen Bonferroni-korjausta ( $\alpha = .0033$ ) osoitti, että seuraavien tehtäväsarja-parien keskiarvot ovat merkitsevästi erilaisia: 1.1-1.2, 1.1-1.3, 1.1-2.2, 1.1-2.3, 2.1-1.2, 2.1-1.3, 2.1-2.2, ja 2.1-2.3 (katso TAULUKKO 2). Muut post hoc -testit eivät olleet tilastollisesti merkittäviä ( $p > 0.05$ ).

| Pari    | Ero  | F       | p-arvo  |
|---------|------|---------|---------|
| 1.1-1.2 | 1.75 | 53.5057 | < 0.001 |
| 1.1-1.3 | 1.25 | 60.8974 | < 0.001 |
| 1.1-2.2 | 1.45 | 47.1357 | < 0.001 |
| 1.1-2.3 | 1.05 | 28.0234 | < 0.001 |
| 2.1-1.2 | 2.15 | 71.5499 | < 0.001 |
| 2.1-1.3 | 1.65 | 45.878  | < 0.001 |
| 2.1-2.2 | 1.85 | 52.9756 | < 0.001 |
| 2.1-3.3 | 1.45 | 53.4415 | < 0.001 |

TAULUKKO 2 Tutkimuksen tulosten analyysi.

Koska tulosten p-arvo oli  $< 0.001$ , nollahypoteesi  $H_0$ ) väri- tai kokokoodaus ei vaikuta visuaaliseen päätöksentekoon, voidaan hylätä. Hypoteesi  $H_1$ ) elementtien värikoodaus helpottaa visuaalista päätöksentekoa voidaan hyväksyä toistomittausten varianssianalyysillä testauksen jälkeen, sillä tuloksista nähtiin, että värikoodauksella oli tilastollisesti merkitsevä, parantava vaikutus tehtävien tuloksiin. Hypoteesi  $H_2$ ) elementtien kokovaihtelu helpottaa visuaalista päätöksentekoa, mutta vähemmän kuin värikoodaus, voidaan myös hyväksyä tietyin kommentein. Väri- ja kokokoodattujen tehtävien välillä ei havaittu merkitsevää tilastollista eroa, mutta molemmat vaikuttivat visuaaliseen päätöksentekoon helpottavasti. Värikoodatut tehtävät menivät keskimäärin paremmin, kuin kokovaihteluin koodatut tehtävät: neljän vaihtoehdon värikoodattu tehtävä meni 17.54 % paremmin kuin vastaava kokokoodattu tehtävä, ja viiden vaihtoehdon tehtävän vastaava luku oli 15.09 %. Suuremmalla otannalla ero voisi jo olla tilastollisesti merkitsevä. Väri- ja kokokoodattujen tehtävien välillä ei siis havaittu merkitsevää tilastollista eroa, mutta värikoodatut tehtävät menivät keskimäärin hieman paremmin. Molemmat tehtävätyypit vaikuttivat visuaaliseen päätöksentekoon helpottavasti.

Interaktiohypoteesi,  $H_3$ ) vaihtoehtojen määrä (set size) ei vaikuta päätöksentekoon, mikäli päätöksentekoa helpotetaan, pysyi myös voimassa, sillä hypoteesin kumoavien parien väliltä ei löytynyt tilastollisesti merkitsevää eroa. Pieni ero tosin löytyi, ja vaihtoehtojen määrän lisääminen neljästä viiteen hankaloitti tehtävää aavistuksen verran. Tähän hypoteesiin ei kuitenkaan sisältynyt, että myös niissä tilanteissa, joissa päätöksentekoa ei helpotettu (symbolikoodattu tehtävätyyppi), set size ei vaikuttanut merkittävästi päätöksentekoon. Symbolikoodatuissa tehtävissä saatujen pisteiden keskiarvo putosi 1.6:sta 1.2:een (33.3 %), kun vaihtoehtoja lisättiin neljästä viiteen. Värikoodatuissa tehtävissä se putosi 3.35:stä 3.05 (9.8 %), ja kokokoodatuissa 2.85:sta 2.65:een (7.6 %). Pudotus pisteissä oli siis huomattavasti suurin symbolikoodatuissa tehtävissä, joissa päätöksentekoa ei oltu visuaalisesti helpotettu, mutta ero ei ollut missään tehtäväparissa tilastollisesti merkitsevä. Suurempi otanta voisi paljastaa tilastollisesti merkitsevän eron.

## 4 POHDINTA

Tutkimus tarjosi tuloksia visuaalisesta päätöksenteosta dynaamisessa ympäristössä, ja siitä, kuinka päätöksentekoa voi helpottaa erilaisin visuaalisin keinoin. Tutkimuksen tavoitteet saavutettiin, eli alussa asetettuun tutkimuskysymykseen löydettiin tuloksista vastaus: huomiota ohjaavilla visuaalisilla ratkaisuilla, kuten elementtien värikoodauksella ja kokovaihtelulla, voidaan helpottaa aikarajatusta, dynaamisessa ympäristössä tapahtuvaa visuaalista päätöksentekoa.

Koeasetelmassa oli joitakin seikkoja, joiden muokkaaminen olisi voinut tehdä tutkimuksen suorittamisesta koehenkilöille helpompaa, ja mahdollisesti vaikuttanut positiivisesti pistekertymiin. Usempi koehenkilö otti tehtävien suorittamisen aikana esille, kuinka hankalaa oli saada hiiri nopeasti « seuraava » -painikkeen kohdalle, tai sieltä takaisin palkkeihin. Tehtäväympäristön siirtäminen mobiililaitteille voisi eliminoida tämän puutteen, sillä tehtävä sopisi yhtä hyvin myös kosketusnäytöllä suoritettavaksi. Tutkimuksen tuloksiin sinänsä ei todennäköisesti tulisi suuria muutoksia, sillä kaikki koehenkilöt kärsivät samasta koejärjestelyn heikkoudesta. Suuremmalla otannalla olisi mielenkiintoista kokeilla tehtäviä useilla eri laitteita, sillä se voisi helpottaa tulosten yleistettävyyttä.

Tutkimuksessa jätettiin myös joitakin seikkoja analyysin ulkopuolelle. Yksi näistä oli aikarajoituksen vaikutus. Aimpi tutkimus on osoittanut, että aikarajoitukset vaikuttavat negatiivisesti yksilön kykyyn tehdä päätöksiä tehokkaasti (Gonzalez et al., 2005). Tämä tarkoittaa sitä, että tehtävien 15 sekunnin aikarajoite vaikutti päätöksentekijään painostavasti. Koska aikarajoite oli läsnä kaikissa tehtävissä, sen oletettiin tässä tutkimuksessa pysyvän vakiona koko kokeen ajan. On tosin mahdollista, että vaativampiin tehtäviin se vaikutti enemmän, kuin niihin tehtäviin, joihin tehdyt manipulaatiot helpottivat päätöksentekoa. Tätä aikarajoitteen tuomaa vaikutusta voisi tutkia lisää edistyneemmällä tutkimusjärjestelyllä. Aiemmassa tutkimuksessa yhdeksi manipulaation keinoksi aikarajoitusten lisäksi on toisinaan lisätty myös viive, jotta järjestelmän seuraavia tiloja ei pääse tarkastelemaan välittömästi. Viive on

keino saada päätöksentekijä harkitsemaan, jatkaako hän tiedon keräämistä, vai tyytyykö jo kerättyihin todisteisiin päätöksen tueksi (Steiner et al., 2017). Tähän tutkimukseen viiveen mahdollista vaikutusta ei otettu mukaan, lähinnä toteutuksellista syistä, mutta myös tehtävän pitämisenä yksinkertaisempana.

Eräs relevantti jatkotutkimuskohde on päätöksen arviointi. Tätä voisi tutkia koeasetelmalla, jossa päätöksentekijä ei joutuisi ennustamaan vain yhtä oikeaa valintaa. Päätöstä tehdessä pisteitä voisi jakaa eri kandidaateille. Tässä tutkimuksen variaatiossa hypoteesi olisi, että ihminen pystyy metakognitiivisesti arvioimaan, kuinka paljon hän luottaa lopputulokseen. Koehenkilöiltä voisi myös kysyä valinnan jälkeen, kuinka varma hän oli valinnastaan. Tällöin voisi verrata syy-seuraussuhteita sen välillä, kuinka hyvin eri tehtävät menivät, ja kuinka hyvin ne koehenkilöiden mielestä menivät. Tulokset vaikeuden havainnoinnissa ja korrelaatioissa todennäköisesti vaihtelisivat eri tehtävätyyppien välillä. Tällaista itsearviointia on kokeiltu mm. dynaamisen päätöksenteon tutkimuksessa, jossa simuloitiin pilottien toimintaa lennon aikana (Rosa et al., 2021). Itsearviointiin ohessa voisi olla mahdollista tutkia toistakin päätöksentekoon ja sen laskennalliseen mallintamiseen liittyvää teoriaa, tiedonhaun teoriaa (engl. information foraging theory, IFT). IFT:llä mallinnetaan tietoa käsittelevän organismin toimintaa ja sitä, kuinka tiedon kerääjä päättää, milloin päätös on valmis, eikä enempää tietoa kannata jäädä keräämään (Pirolli, 2005). IFT:n mallintaminen tapahtuu perinteisesti potenssiyhtälöiden avulla, mutta sen tutkiminen koehenkilöillä olisi myös kiinnostavaa.

Toinen jatkotutkimuksen kohde koskee kannustamista ja kannustimien vaikutusta koetuloksiin. Koehenkilöitä voisi saman tehtävän edistyneemmissä versioissa kannustaa hyvään suoritukseen mm. pistesurannan avulla tapahtuvan pelillistämisen kautta. Sen voisi toteuttaa esittämällä pistekertymä koehenkilöille tehtävän aikana. Tällä saattaisi olla vaikutuksia siihen, kuinka koehenkilö muokkaa käytöstään nähdessään, kuinka pisteet nousevat tai vähenevät.

Tutkimuksen validiteettiin ja reliabiliteettiin vaikuttivat tehtävien suorittamisen alustana toimineet laitteet, suoritusympäristö, sekä tehtäväympäristö ja sen suunnittelu. Tutkimuksen ulkoisen validiteetin kannalta oli hyvä, että kaikki kokeet suoritettiin samalla laitteella, kannettavalla tietokoneella. Tämä vähensi riskiä siihen, että koehenkilöiden käyttämät erinäiset laitteet vaikuttaisivat tehtävien suorittamisen tapaan tai tuloksiin. Ulkoista validiteettia heikensi se, että kokeet toteutettiin useammassa eri paikassa, eikä erilaisten häiriöiden vaikutusta kyetty eliminoidaan. Esimerkiksi meluisuus saattoi aiheuttaa ylimääräisiä häiriötekijöitä, ja hälyisä ympäristö mahdollisesti vähensi koehenkilöiden keskittymistä. Optimaalisessa tilanteessa, häiriöttömien tulosten saamiseksi, kokeet olisi tullut suorittaa esimerkiksi yliopiston laboratoriossa. Toisaalta oikean elämän päätöksentekotilanteissa on usein läsnä paljon ulkoisia häiriötekijöitä, ja monet muutkin asiat käyttöliittymässä tulevat vaikuttamaan päätöksenteon sujuvuuteen. Tämä huomio tosin koskee jo enemmän ekologista validiteettia eli sitä, kuinka hyvin tulokset ovat sovitettavissa ja yleistettävissä muihin, ”todellisen maailman” tehtäviin. Toiseksi ulkoinen validiteetti heikkeni sillä, ettei

koehenkilöistä kerätty niitä taustatietoja (esim. ikä, sukupuoli, koulutustaso), joita tyypillisesti kerätään empiirisissä tutkimuksissa. Taustatietojen keräämättä jättäminen helpotti aineistonkeruuta, sillä osallistujat rekrytoitiin paikan päällä. Tulosten validiteettia pyrittiin parantamaan ottamalla jokaisen koehenkilön suorituksesta ruututallennus, jotta niihin oli mahdollista palata. Tämä puute on kuitenkin otettava huomioon, ja kokonaisuutena tutkimuksen ulkoinen validiteetti ei ole vahva.

Tutkitaan lisäksi tutkimuksen sisäistä validiteettia. Tehtävät oli suunniteltu perustuen kirjallisuuteen ja samankaltaisiin visuaalisen ja dynaamisen päätöksenteon tutkimuksiin (esim. Jokinen et al., 2020; Chen et al., 2017), mutta tehtäviä ei arvioitu tarkemmin ennen tutkimuksen toteutusta. Tehtäväympäristön luominen varta vasten tutkimusta varten tosin vahvisti sen sopivuutta tutkimuksen tavoitteisiin. Valmiin ympäristön ja tehtävien käyttäminen olisi tarkoittanut kompromisseja siihen, kuinka halutut manipulaatiot ja rajoitteet saatiin esitettyä päätöksentekijälle. Myös valittu menetelmä palkkien arvojen laskemiseksi vaikutti tutkimuksen validiteettiin. Koska palkkien arvojen muuttumisen määräävät luvut laskettiin autoregressiivistä prosessia käyttäen ennalta sen sijaan, että ne oltaisiin satunnaistettu joka kerta uudelleen, oli sillä muutamia tutkimukseen vaikuttavia seurauksia. Kun luvut ovat ennalta päätettyjä, hypoteesit voi olla vaikeampi löytää, sillä koehenkilöiden pieni määrä merkitsee suurempaa kohinan määrää. Toisaalta efektit saattoivat näkyä paremmin. Tutkimuksen tulosten yleistettävyyys muihin dynaamisen päätöksenteon tehtäviin todennäköisesti kärsi myös pienestä otannasta johtuen. Kaiken kaikkiaan myös tutkimuksen sisäisessä validiteetissa oli puutteita.



## 5 YHTEENVETO

Ihmisen ja tietokoneen välisessä vuorovaikutuksessa tulee eteen tilanteita, joissa päätös seuraavista toimista on tehtävä käyttöjärjestelmästä vastaanotetun informaation perusteella. Käyttäjä vastaanottaa pääosin symbolista tietoa, kuten tekstiä ja numeroita, joiden sääntöpohjaiseen päättelyyn pohjautuva käsittely on ihmiselle luonnostaan hankalaa (Lurie & Mason, 2007). Sen sijaan ihmisille on kehittynyt hyvät taidot havainnoida ympäristöään visuaalisesti, ja poimia elementtejä, jotka erottuvat värin ja muodon perusteella (Lurie & Mason, 2007; Wolfe & Horowitz, 2017; Cyr et al., 2010). Ihmisen huomiota voi ohjata kiinnittymään haluttuihin kohteisiin eri tavoin. Yksi näistä tavoista on ärsykkeisiin perustuva ominaisuusohjaus, jossa tiettyjen ympäristön kohteiden visuaaliset ominaisuudet suunnitellaan herättämään enemmän huomiota, kuin toisten (Wolfe & Horowitz, 2017). Visuaalisen päätöksenteon taustalla olevien kognitiivisten prosessien, ja siihen vaikuttavien tekijöiden ymmärtämisen työkaluna on käytetty laskennallista mallintamista.

Tämä tutkielma pyrki vastaamaan siihen, kuinka ominaisuusohjaukseen perustuvilla visuaalisilla ratkaisuilla voitaisiin helpottaa aikarajatussa, dynaamisessa ympäristössä tapahtuvaa visuaalista päätöksentekoa. Tutkimuskysymystä lähestyttiin empiirisellä tutkimuksella, jonka koeasetelma rakennettiin laskennalliseen rationaalisuuteen perustuvien mallien validointia silmällä pitäen. Tämä tapahtui toteuttamalla kuusi erilaista tehtäväsarjaa, joissa päätöksentekijän tuli valita optimaalinen vaihtoehto neljän tai viiden ajan mukana arvoaan muuttavan elementin joukosta. Tutkimusta varten luotu tehtäväympäristö oli tarkoituksella hyvin pelkistetty, jotta sen avulla esiin saatava käytös voitaisiin yleistää monenlaisiin dynaamisiin ja visuaalisiin päätöksentekotehtäviin, ja erilaisiin oikean elämän käyttöliittymiin. Tehtävissä valittavien elementtien arvojen muutos oli visuaalisesti koodattu joko symbolein, värein, tai kokovaihteluin. Tehtäviä testasi 20 tutkimukseen osallistunutta koehenkilöä, ja tehtävistä saatuja pisteitä arvioitiin tilastollisin menetelmin. Tulokset osoittivat, että elementtien väri-, ja kokovaihteluiden avulla on mahdollista helpottaa visuaalista päätöksentekoa dynaamisessa ympäristössä. Koehenkilöt saivat keskimäärin merkittävästi parempia

tuloksia niissä tehtävissä, joissa muistia koodattiin visuaalisin keinoin pelkkien symbolien sijaan.

Niin sanottua « benchmarking » -aineistoa visuaalisen, dynaamisen päätöksenteon helpottamisesta ei juuri ole ennestään olemassa. Tämän tutkielman tulokset ovat tällaista benchmark-aineistoa. Yleistettävissä oleva yksinkertainen aineisto on kuitenkin tärkeää kognitiivisessa mallinnuksessa, jotta mallien tuottamia tuloksia voidaan verrata ihmisten tuottamaan vastaavaan aineistoon. Tämä on yleisemmin tärkeää myös HCI :ssa, sillä tulokset auttavat ymmärtämään paremmin dynaamisessa ympäristössä tapahtuvaa visuaalista päätöksentekoa.

## LÄHTEET

- Anderson, J. R., Bothell, D., Byrne, M. D., Douglass, S., Lebiere, C., & Qin, Y. (2004). An integrated theory of the mind. *Psychological review*, 111(4), 1036.
- Bland, A. R., & Schaefer, A. (2012). Different varieties of uncertainty in human decision-making. *Frontiers in neuroscience*, 6, 85.
- Busemeyer, J. R., & Diederich, A. (2010). *Cognitive modeling*. Sage.
- Dzulkifli, M. A., & Mustafar, M. F. (2013). The influence of colour on memory performance: A review. *The Malaysian journal of medical sciences: MJMS*, 20(2), 3.
- Edwards, W. (1962). Dynamic decision theory and probabilistic information processings. *Human factors*, 4(2), 59-74.
- Figma. (19.11.2023) <https://www.figma.com>
- Fishwick, P. A. (Ed.). (2007). *Handbook of dynamic system modeling*. CRC Press.
- Gershman, S. J., Horvitz, E. J., & Tenenbaum, J. B. (2015). Computational rationality: A converging paradigm for intelligence in brains, minds, and machines. *Science*, 349(6245), 273-278.
- Chen, X., Bailly, G., Brumby, D. P., Oulasvirta, A., & Howes, A. (2015, April). The emergence of interactive behavior: A model of rational menu search. In *Proceedings of the 33rd annual ACM conference on human factors in computing systems* (pp. 4217-4226).
- Chen, X., Starke, S. D., Baber, C., & Howes, A. (2017, May). A cognitive model of how people make decisions through interaction with visual displays. In *Proceedings of the 2017 CHI conference on human factors in computing systems* (pp. 1205-1216).
- Gold, J. I., & Stocker, A. A. (2017). Visual decision-making in an uncertain and dynamic world. *Annual Review of Vision Science*, 3, 227-250.
- Gonzalez, C., Vanyukov, P., & Martin, M. K. (2005). The use of microworlds to study dynamic decision making. *Computers in human behavior*, 21(2), 273-286.
- Cyr, D., Head, M., & Larios, H. (2010). Colour appeal in website design within and across cultures: A multi-method evaluation. *International journal of human-computer studies*, 68(1-2), 1-21.
- Heathcote, A., Brown, S. D., & Wagenmakers, E. J. (2015). An introduction to good practices in cognitive modeling. *An introduction to model-based cognitive neuroscience*, 25-48.

- Hongwarittorn, N., & Punchoojit, L. (2017). Usability studies on mobile user interface design patterns: a systematic literature review. *Advances in Human-Computer Interaction*, 2017
- Hornbæk, K, Frøkjær, E., Hertzum, M., (2000, April). Measuring usability: are effectiveness, efficiency, and satisfaction really correlated?. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 345-352).
- Hornbæk, K. (2006). Current practice in measuring usability: Challenges to usability studies and research. *International journal of human-computer studies*, 64(2), 79-102.
- Hornof, A. J., & Halverson, T. (2003, April). Cognitive strategies and eye movements for searching hierarchical computer displays. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 249-256).
- Hotaling, J. M., Fakhari, P., & Busemeyer, J. R. (2015). Dynamic decision making. In *International encyclopedia of the social & behavioral sciences* (Vol. 8, pp. 708-713). New York, NY: Elsevier.
- Ibe, O. (2013). Markov processes for stochastic modeling. *Newnes*.
- Jastrzemski, T. S., & Charness, N. (2007). The Model Human Processor and the older adult: parameter estimation and validation within a mobile phone task. *Journal of experimental psychology: applied*, 13(4), 224.
- Johnny, O., Trovati, M., & Ray, J. (2020). Towards a computational model of artificial intuition and decision making. In *Advances in Intelligent Networking and Collaborative Systems: The 11th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS-2019)* (pp. 463-472). Springer International Publishing.
- 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.
- Kiefer, J., & Urbas, L. (2006). How to model different strategies in dynamic task environments. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Cognitive Modeling* (pp. 172-176).
- Lebiere, C., R Anderson, J., & Bothell, D. (2001). Multi-tasking and cognitive workload in an ACT-R model of a simplified air traffic control task.
- Lelis, S., & Howes, A. (2011, May). Informing decisions: how people use online rating information to make choices. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems* (pp. 2285-2294).
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of atmospheric sciences*, 20(2), 130-141.
- Lurie, N. H., & Mason, C. H. (2007). Visual representation: Implications for decision making. *Journal of marketing*, 71(1), 160-177.

- Murray-Smith, R., Oulasvirta, A., Howes, A., Müller, J., Ikkala, A., Bachinski, M., ... & Klar, M. (2022). What simulation can do for HCI research. *Interactions*, 29(6), 48-53.
- Niv, Y. (2009). Reinforcement learning in the brain. *Journal of Mathematical Psychology*, 53(3), 139-154.
- Oulasvirta, A., Jokinen, J. P., & Howes, A. (2022, April). Computational rationality as a theory of interaction. *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-14).
- Padilla, L.M., Creem-Regehr, S.H., Hegarty, M. *et al.* Decision making with visualizations: a cognitive framework across disciplines. *Cogn. Research* 3, 29 (2018). <https://doi.org/10.1186/s41235-018-0120-9>
- Pan, Y. (2010). Attentional capture by working memory contents. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 64(2), 124.
- Peebles, D., & Banks, A. P. (2010). Modelling dynamic decision making with the ACT-R cognitive architecture. *Journal of Artificial General Intelligence*, 2(2), 52-68.
- Pirolli, P. (2005). Rational analyses of information foraging on the web. *Cognitive science*, 29(3), 343-373.
- Rele, R. S., & Duchowski, A. T. (2005, September). Using eye tracking to evaluate alternative search results interfaces. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* (Vol. 49, No. 15, pp. 1459-1463). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Ritter, F. E., Tehranchi, F., & Oury, J. D. (2019). ACT - R: A cognitive architecture for modeling cognition. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 10(3), e1488.
- Rosa, E., Dahlstrom, N., Knez, I., Ljung, R., Cameron, M., & Willander, J. (2021). Dynamic decision-making of airline pilots in low-fidelity simulation. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 22(1), 83-102.
- Salvucci, D. D. (2001). An integrated model of eye movements and visual encoding. *Cognitive Systems Research*, 1(4), 201-220.
- Salvucci, D. D., & Lee, F. J. (2003, April). Simple cognitive modeling in a complex cognitive architecture. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 265-272).
- Silva, C., Vieira, J., Campos, J. C., Couto, R., & Ribeiro, A. N. (2021). Development and validation of a descriptive cognitive model for predicting usability issues in a low-code development platform. *Human factors*, 63(6), 1012-1032.

- Sohn, M. H., Douglass, S. A., Chen, M. C., & Anderson, J. R. (2005). Characteristics of fluent skills in a complex, dynamic problem-solving task. *Human Factors*, 47(4), 742-752.
- Spaan, M. T. (2012). Partially observable Markov decision processes. *Reinforcement learning: State-of-the-art*, 387-414.
- Steiner, J., Stewart, C., & Matějka, F. (2017). Rational inattention dynamics: Inertia and delay in decision - making. *Econometrica*, 85(2), 521-553.
- Sun, R. (2009). Theoretical status of computational cognitive modeling. *Cognitive Systems Research*, 10(2), 124-140.
- Van der Stigchel, S., & Nijboer, T. C. (2011). The global effect: what determines where the eyes land?. *Journal of Eye Movement Research*, 4(2).
- Voss, A., Rothermund, K., & Voss, J. (2004). Interpreting the parameters of the diffusion model: An empirical validation. *Memory & cognition*, 32, 1206-1220.
- Wiering, M. A., & Van Otterlo, M. (2012). Reinforcement learning. *Adaptation, learning, and optimization*, 12(3), 729.
- Wolfe, J. M., & Horowitz, T. S. (2017). Five factors that guide attention in visual search. *Nature Human Behaviour*, 1(3), 0058.
- Zhaoping, L. (2008). Attention capture by eye of origin singletons even without awareness – A hallmark of a bottom-up saliency map in the primary visual cortex. *Journal of Vision*, 8(5), 1-1.