

Henrik Kallioma

**LISÄTYN TODELLISUUDEN KÄYTTÖLIITTYMIEN
KÄYTETTÄVYYS**



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
INFORMAATIOTEKNOLOGIAN TIEDEKUNTA
2024

TIIVISTELMÄ

Kalliomaa, Henrik

Lisätyn todellisuuden käyttöliittymien käytettävyys

Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2024, 30 s.

Tietojärjestelmätiede, kandidaatintutkielma

Ohjaaja: Riekkinen, Janne

Erilaisten teknologisten ratkaisujen kirjo laajenee jatkuvasti, kun uusia innovaatioita kehitetään ja otetaan käyttöön. Näin ollen on yhä haastavampaa rakentaa kestäviä asiakassuhteita ja sitoutuneisuutta tiettyyn tuotteeseen. Hyvä käyttäjäkokemus ja käytettävyys voidaan nähdä elinehtona onnistuneen tuotteen kannalta, mikä tekee sen tutkimisesta tärkeää. Tässä tutkielmassa tarkasteltiin lisätyn todellisuuden käyttöliittymien käytettävyyteen vaikuttavia tekijöitä sekä niihin liittyviä haasteita ja arviointimenetelmiä. Tutkielmassa määriteltiin keskeiset käsitteet lisätty todellisuus, käyttöliittymä, käyttäjäkokemus sekä käytettävyys. Tutkielma tehtiin kirjallisuuskatsauksena ja se pyrki tarjoamaan keinoja käytettävyyden parantamiseksi ja mahdollisten ongelmien ennaltaehkäisemiseksi. Tuloksena löydettiin lisätyn todellisuuden käyttöliittymien käytettävyyteen vaikuttavia asioita, jotka voidaan sijoittaa käytön helppoutta edistäviin tekijöihin kuten opittavuus, tehokkuus, visuaalisuus, virheiden minimointi ja tyytyväisyys. Käytettävyyden haasteet liittyivät käyttöliittymien yhtenäisyyden puuttumiseen ja teknologisiin ongelmiin. Lisätyn todellisuuden käyttöliittymien käytettävyyden arvioinnin keinoiksi tunnistettiin objektiiviset heuristiikat ja subjektiiviset käyttäjäkyselyt, joiden yhteiskäytöllä saadaan kohteesta parempi kokonaiskuva.

Asiasanat: lisätty todellisuus, käyttäjäkokemus, käytettävyys, käyttöliittymä.

ABSTRACT

Kallioma, Henrik

The usability of augmented reality user interfaces

Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2024, 30 pp.

Information Systems, Bachelor's Thesis

Supervisor(s): Riekkinen, Janne

The range of technological solutions continues to expand, as new innovations are developed and implemented. Consequently, building sustainable customer relationships and loyalty to a specific product becomes increasingly challenging. Good user experience and usability can be seen as a vital factor for the success of any product, making research in this area important. This thesis examined the factors influencing the usability of augmented reality user interfaces, along with associated challenges and evaluation methods. The thesis defined key concepts: augmented reality, user interface, user experience, and usability. The study was conducted as a literature review with the aim of identifying factors influencing the usability of augmented reality. Additionally, the research sought to provide insights into improving usability and preventing potential problems. The findings revealed factors affecting the usability of augmented reality user interfaces, which can be categorized into usability-enhancing factors such as learnability, efficiency, visual appeal, error minimization, and satisfaction. Usability challenges were related to the lack of interface consistency and technological issues. The usability of augmented reality user interfaces can be evaluated both objectively through heuristic evaluation and subjectively through user surveys.

Keywords: augmented reality, user experience, usability, user interface.

KUVIOT

KUVIO 1	Tutkielman keskeiset käsitteet	8
KUVIO 2	AR-käyttöliittymien käyttäjäkokemuksen tutkiminen eri toimialoilla.....	12
KUVIO 3	Käyttäjäkokemuksen ja käytettävyyden suhde.....	15

TAULUKOT

TAULUKKO 1	Nielsenin kymmenen heuristiikka.....	22
------------	--------------------------------------	----

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVIOT JA TAULUKOT

1	JOHDANTO.....	6
2	LISÄTTY TODELLISUUS	8
2.1	Käsitteiden määrittelyä	8
2.2	Lisätyn todellisuuden teknologiat ja niiden kehitys	9
2.3	Lisätyn todellisuuden käyttökohteet ja keskeiset toimialat	11
3	KÄYTTÖLIITTYMÄN KÄYTETTÄVYYS	13
3.1	Käyttöliittymä	13
3.2	Käyttäjäkokemus	14
3.3	Käytettävyys.....	15
4	LISÄTTY TODELLISUUS: KÄYTETTÄVYYS, HAASTEET JA ARVIOINTIKEINOT	17
4.1	Käytettävyyteen vaikuttavat tekijät	17
4.2	Teknologiset ja käyttöön liittyvät haasteet	19
4.3	Käyttöliittymän käytettävyyden arviointi	21
5	YHTEENVETO	24
	LÄHTEET	27

1 JOHDANTO

Tämän tutkielman tarkoituksena on tutkia lisätyn todellisuuden käyttöliittymien käytettävyyttä. Lisätyn todellisuuden (eng. *Augmented Reality*, AR) laitteita on jo otettu käyttöön usealla eri alalla ja tulevaisuuden potentiaali teknologialla on suuri (Dargan ym., 2023). AR onkin kerännyt huomiota nousujohteisesti viimeisten vuosien aikana (Ahmad ym., 2022). Seuraavien vuosien aikana markkinan odotetaan kasvavan noin 40 % vuositaitia (Vigkos ym. 2022). Uusien teknologioiden kehityksen vauhtiin vaikuttaa organisaatioiden kasvava halu kehittää prosesseja ja luoda arvoa (Gutierrez, 2022). AR:llä on potentiaalia kasvaa merkittävästi tällä ja seuraavilla vuosikymmenillä, mutta teknologian menestys ei ole ikinä täysin varmaa. AR:n kehityksen myötä merkittäväksi haasteeksi on muodostunut käyttäjäkokemuksen suunnittelu (Salman, 2023).

Käyttöliittymän sulava käytettävyyks on tärkeää uusien teknologioiden menestyksen kannalta ja Jangin (2022) mukaan käyttäjien kokema sulavuus ja tyytyväisyys ovatkin ratkaiseva komponentti uuden teknologian omaksumisen kannalta. Käyttäjäkokemus ja käyttäjäkeskeinen suunnittelu on noussut yhdeksi tärkeimmistä periaatteista käyttöliittymiä suunniteltaessa (Hillman, 2021), minkä vuoksi sitä on tärkeä tutkia uusien teknologioiden menestyksen takaamiseksi. AR:n käyttöliittymien käytettävyyden tutkimisen avulla voidaan havaita teknologialle ominaisia käytettävyyden piirteitä tai vaatimuksia, jotka voidaan jatkossa huomioida. Tämä mahdollistaa käyttäjäkokemuksen parantamisen, ja se voi vaikuttaa suoraan palvelujen ja tuotteiden omaksumiseen sekä niihin sitoutumiseen. Tutkimustiedon avulla voidaan myös tunnistaa käytettävyyteen liittyviä haasteita, joita voidaan jatkossa ratkaista jo käyttöliittymän suunnitteluvaiheessa. Sinlapanuntakul (2023) mukaan empiirisiä tutkimuksia käyttäjäkokemuksesta ja käyttöliittymien ongelmista on vielä rajallisesti, mutta hän uskoo AR:n olevan avainasemassa työtehokkuuden nostamiseen tulevaisuudessa.

Jeffrin ja Ramblin (2021) löysivät tutkimuksessaan AR:n käytön vähentävän kognitiivista rasitetta. Tämä tarkoittaa sitä, että käyttäjän on helpompi keskittyä tekemänsä tehtävän suorittamiseen, koska AR helpottaa aivojen kuormitusta ja ajatustyötä. Jeffrin ja Ramblin (2021) löysivät myös positiivisen korrelaation kognitiivisen rasitteen ja tehokkuuden välillä. Mitä vähemmän kognitiivista rasitetta

oli, sitä nopeampi ja helpompi tehtäviä oli suorittaa. He havaitsivat, että käytetty AR-laite vaikutti saavutettavaan hyötyyn, ja jos AR-laite lisäsi käyttäjän kognitiivista rasiitetta, ongelma oli todennäköisesti AR-laitteen käytettävyydessä (Jeffri ja Rambli, 2021). Käytettävyyden tutkimuksen avulla voidaan siis mahdollisesti vähentää kognitiivista rasiitusta, millä voidaan saavuttaa merkittäviä yhteiskunnallisia hyötyjä, mikä korostaa aiheen tutkimisen tärkeyttä.

Tutkielmassa tarkastelen AR:n käyttöliittymiin vaikuttavia tekijöitä käytettävyyden näkökulmasta, millaisia haasteita niihin liitetään, sekä miten käyttöliittymien käytettävyyttä voidaan arvioida. Tutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena ja lähdeaineistoa on etsitty avainsanoilla: "user experience", "augmented reality", "usability" ja "user interface". Päätietokantoina ovat toimineet tieteilisten aineistojen julkaisukanavat Scopus ja Web of Science sekä lisäksi joitain artikkeleita on etsitty JYKDOKista ja Google Scholarista. Lähdekirjallisuutta esittäessä artikkelit on pyritty rajaamaan niin, että ne ovat tietojärjestelmätieteen kirjallisuutta, vertaisarvioituja ja niillä on vähintään JUFO-luokitus 1.

Tutkielmassa vastataan kolmeen seuraavaan tutkimuskysymykseen:

1. Mitä ovat keskeiset käytettävyyden tekijät lisätyn todellisuuden käyttöliittymissä?
2. Millaisia haasteita liittyy lisätyn todellisuuden käyttöliittymien käytettävyyteen?
3. Millaisia keinoja hyödynnetään lisätyn todellisuuden käyttöliittymien käytettävyyden arvioinnissa?

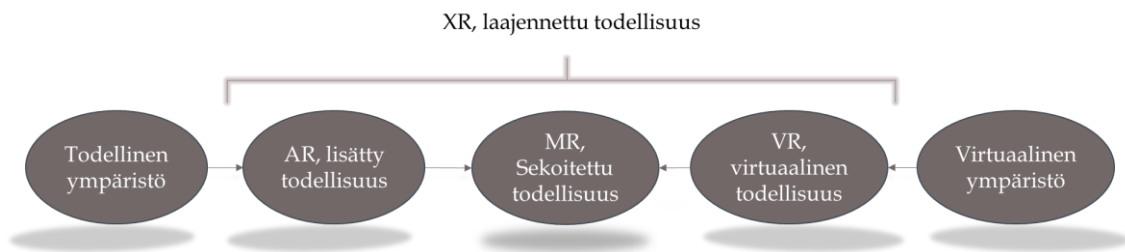
Tutkielman aluksi määrittelen mitä on AR, mitä käsitteitä siihen liittyy ja millaisia käyttökohteita sillä on. Seuraavaksi määrittelen käyttöliittymän, käyttäjäkokemuksen ja käytettävyyden käsitteet. Määrittelyiden jälkeen vastaan tutkimuskysymyksiin ja esitän, mitkä tekijät vaikuttavat lisätyn todellisuuden käyttöliittymien käytettävyyteen, millaisia haasteita niihin liittyy ja miten lisätyn todellisuuden käyttöliittymien käytettävyyttä voidaan arvioida. Päätän tutkielman yhteenveto- ja pohdintalukuun, jossa esitän tärkeimmät tulokset ja johtopäätökset sekä pohdin mahdollisia jatkotutkimusaiheita.

2 LISÄTTY TODELLISUUS

Luvussa määritellään lisätyn todellisuuden käsite ja sen lähikäsitteet sekä niiden väliset suhteet. Aluksi analysoidaan käsitteiden välisiä eroja eri tutkijoiden määritelmien avulla. Tämän jälkeen tarkastellaan lisätyn todellisuuden teknologioita ja niiden kehitystä. Lopuksi perehdytään lisätyn todellisuuden käyttökohteisiin ja keskeisiin toimialoihin, joissa teknologiaa hyödynnetään.

2.1 Käsitteiden määrittelyä

AR:n käsitettä on määritelty monin eri tavoin. Tässä tutkielmassa käsitettä lähestytään ensin laajasta näkökulmasta tarkastelemalla laajennettua todellisuutta. Laajennettu todellisuus (eng. Extended Reality, XR) on kattokäsite, joka kokoaa yhteen kaikki siihen liittyvät teknologiat. Käsite pitää sisällään AR:n, virtuaalitodellisuuden (eng. Virtual Reality, VR) sekä sekoitetun todellisuuden (eng. Mixed Reality, MR). Kuviossa (kuvio 1) havainnollistetaan käsitteiden välistä suhdetta toisiinsa.



KUVIO 1 Tutkielman keskeiset käsitteet

AR ja VR teknologioissa on hyvin paljon samankaltaisuuksia. Molempien teknologioiden kanssa ollaan vuorovaikutuksissa äänen, kosketuksen ja liikkeen

avulla. Lisäksi molemmat sijoittavat digitaalisia ja interaktiivisia elementtejä omiin ulottuvuuksiinsa. AR eroaa virtuaalitodellisuudesta siinä, että VR upottaa käyttäjän täysin virtuaaliseen maailmaan (Jeffri ja Rambli, 2021). Dargan ym. (2023) määrittelevät VR:n todellisen maailman korvaavaksi ulottuvuudeksi, johon käyttäjä voi irrottautua kokonaan. VR teknologian käyttäjällä ei siis ole suoraa kontaktia todellisen maailman kanssa.

Toisin kuin virtuaalitodellisuus, AR ei upota käyttäjää täysin virtuaaliseen maailmaan. Teknologia mahdollistaa digitaalisten kuvien ja elementtien liittämisen reaali maailmaan niin, että voit nähdä sekä todellisen että virtuaalisen maailman samaan aikaan. AR kaventaa todellisen ja virtuaalisen maailman välistä kulkua (Sahu, Young & Rai, 2021). Sinlapanuntakulin (2023) määritelmän mukaan AR mahdollistaa käyttäjille vuorovaikutuksen fyysisen ja virtuaalisen maailman elementtien kanssa samanaikaisesti. Porter ja Heppelmann (2017) määrittävät AR:n rajapinnaksi ihmisten ja koneiden välillä, joka yhdistää digitaalisen ja fyysisen maailman. Yhteistä käsitelmääritelmällä on virtuaalisen ja fyysisen maailman yhdistäminen. Dargan (2023) taas määrittelee AR:n on ihmisen ja tietokoneen välisen vuorovaikutuksen mahdollistavaksi välineeksi, jonka avulla on mahdollista uppoutua tai syventyä digitaaliseen maailmaan todellisessa maailmassa. Darganin ja hänen kollegoidensa määritelmä eroaa edellä mainituista siinä, että he painottavat digitaaliseen maailmaan syventymistä, vaikkakin mainitsevat sen tapahtuvan todellisessa maailmassa. AR on siis teknologia, joka mahdollistaa virtuaalisen ja reaali maailman yhdistämisen käyttäen jonkinlaista näyttölaitetta. Tätä tietoa syvennetään seuraavassa alaluvussa.

MR on teknologiana lisätyn ja virtuaalitodellisuuden hybridi. Darganin ym. (2023) mukaan se mahdollistaa todellisen ja virtuaalisen maailman elementtien reaaliaikaisen vuorovaikutuksen keskenään. Käyttäjän on mahdollista liikuttaa todellisen maailman objekteja, joihin virtuaaliset objektit reagoivat (Dargan ym., 2023). Teknologia menee siis vielä AR:ää pidemmälle eikä luo selkeää rajaa todellisen ja virtuaalisen maailman välille.

2.2 Teknologiat ja niiden kehitys

Keskeisimpiä AR-teknologioita on kädessä pidettävät mobile augmented reality (MAR) -laitteet sekä päässä pidettävät älylasit, jotka voidaan lukea head-mounted display (HMD) -laitteisiin. HMD on näyttölaite, jota pidetään päässä ja näyttö on lähellä silmiä (Dargan ym., 2023). MAR taas määritellään mobiililaitteiden avulla tuotetuksi lisätyksi todellisuudeksi (Gutierrez ym., 2022). Erilaiset AR-laitteet vaativat erilaisia komponentteja. Gutierrezin ym. (2022) kertovat, että eri teknologioiden yhdistelmiä hyödynnetään laitteen luonteen mukaan. MAR hyödyntää erilaisia teknologioita, kuten kuvan tunnistamista, visualisointia, objektien seuranta sekä antureita, jotka seuraavat sijaintia ja suuntaa (Gutierrez ym., 2022). Käytännössä MAR toimii niin, että AR-teknologiaa tukevalla mobiilisovelluksella osoitetaan kamera ympäristöön ja näytölle ilmestyy reaaliaikaisesti

digitaalisia elementtejä ympäröivään maailmaan (Husár ja Knapčíková, 2023, s. 7). Elementit voivat olla esimerkiksi animaatioita, tekstiä tai interaktiivisia objekteja.

Husár ja Knapčíková (2023) kertovat AR-tekniikan toimivan tietyn periaatteen teknologiasta huolimatta. Laite tallentaa kuvaa todellisesta maailmasta, ohjelmisto vastaanottaa ja tunnistaa kuvaa, täydentää sen tarpeiden mukaan ja esittää lopputuloksen näytölle (Husár & Knapčíková, 2023). Käyttäjälle AR-kokemus näkyy valitun laitteen näytöllä. Husár ja Knapčíková (2023) kertovat, että jokaisessa AR-järjestelmässä on laitteisto, ohjelmisto ja sovellus. Laitteisto viittaa objektiin, jonka läpi kuvaa näytetään. Laitteessa tulee olla erilaisia komponentteja, joista tärkeimpiä ovat prosessori, graafinen prosessiyksikkö, gyroskooppi, valo-, kiihtyvyyden- ja läheisyysanturi (Husár & Knapčíková, 2023). Näiden komponenttien avulla voidaan käsitellä grafiikkaa, liikkeitä, valoa, kiihtyvyyttä ja havaita esineitä. Kameroiden, objektintunnistustekniikan ja muiden sensoreiden avulla AR tekee ympäristöstä interaktiivista ja muokattavaa (Dargan ym., 2023).

Laitteisto toimii fyysisinä resursseina ohjelmistolle, jonka tehtävänä on suorittaa tiettyjä komentoja ja toiminnallisuuksia. Esimerkiksi Applen (ARKit) ja Androidin (ARCore) ovat AR-järjestelmille kehitetyt omat ohjelmistot (Husár & Knapčíková, 2023). Husár ja Knapčíková (2023) kertovat tällaisten ohjelmistojen kolmeksi tärkeimmäksi teknologiaksi ympäristön ymmärtämisen, liikkeen seurannan ja valoituksen arvioinnin. Viimeiseksi ohjelmisto ja laitteisto tarvitsevat sovelluksen, joka mahdollistaa sulavan yhteistyön kaikkien komponenttien välillä. Sovellus on vastuussa konkreettisen lisätyn todellisuuden kokemuksen luomisesta käyttäjälle.

Lisätty todellisuus voi olla merkkipohjaista (eng. marker-based) tai merkitöntä (eng. markerless). Merkkipohjainen AR toimii skannaamalla kamerasella kuvaa ja tunnistamalla kohteen, jota laite käyttää niin sanottuna merkinä (Dargan ym., 2023). Laite liittää digitaalisen sisällön merkin kohdalle, minkä käyttäjä näkee näytöllä (Ramli, 2023). Yleisimmin merkkipohjaista lisättyä todellisuutta käyttävät MAR-laitteet, mistä esimerkki voisi olla huonekalujen sijoittamiseen tehty mobiilisovellus. Merkitön AR sijoittaa digitaalisen sisällön esimerkiksi GPS:stä saatavan paikkatiedon avulla, eikä vaadi tunnistettavaa kohdetta toimiakseen (Dargan ym., 2023). Merkitöntä AR käytetään paljon HMD-laitteissa. Dargan ym. (2023) mukaan merkittömässä AR:ssä hyvää on se, että vaikka kamera ja käyttäjän huomio kääntyisikin pois kohteesta, virtuaalinen elementti pysyy sille määritetyssä paikassa. Jos virtuaalinen elementti katoaa kamerasta merkkipohjaisessa AR:ssä, laitteen tulee skannata ja liittää kuva aina uudestaan (Dargan ym., 2023). Kuitenkin Ramlin (2023) mukaan merkkipohjainen AR on siitä hyvä, että se osallistaa ja aktivoi käyttäjää. Käyttäjän tulee esimerkiksi mobiilisovelluksen avulla osoittaa kamera tiettyyn kohteeseen.

AR-tekniikalla historia on ollut suoraviivaisempi kuin VR:llä. Hillmanin (2021) mukaan virtuaalitodellisuuteen panostettiin 1980–1990-luvulla, mutta teknologia epäonnistui saamaan laajaa huomiota, kunnes suuret yritykset, kuten Facebook aloittivat teknologiaan panostamisen vuonna 2012. Tästä alkoi VR:n suosion kasvu, mikä puolestaan auttoi kiinnittämään huomiota AR-tekniikkaan.

AR:n käyttökohteet ovat laajempia ja vähemmällä resursseilla skaalattavissa, mikä mahdollisti AR:n yltämisen päivittäiseen käyttöön nopeammin kuin VR:n (Hillman, 2021). Nopeiden prosessoreiden, graafisen laitteiston ja erilaisten sensoreiden kehitys mobiilirintamalla onkin tehnyt AR-teknologioista hyvin saavutettavia (Dargan ym., 2023).

Hillmannin (2021) mukaan ensimmäinen massoittain käyttöön otettu AR oli vuonna 2016 julkaistu mobiilipeli Pokemon Go, joka ylsi yhteen miljardiin lataukseen vuoteen 2019 mennessä. Hän kertoo myös, että ensimmäisen kerran termistä AR puhui Thomas P. Caudell vuonna 1990, mutta idean on kehittänyt Ivan Sutherland jo vuonna 1968 (Hillman, 2021). Vaikka AR on saanut lähivuosina näkyvyyttä, Porter ja Heppelmann (2017) kertovat AR-teknologioiden käyttöönotossa olevan kuitenkin edelleen haasteita. Haasteisiin perehdyn tarkemmin jäljässä pääluvussa.

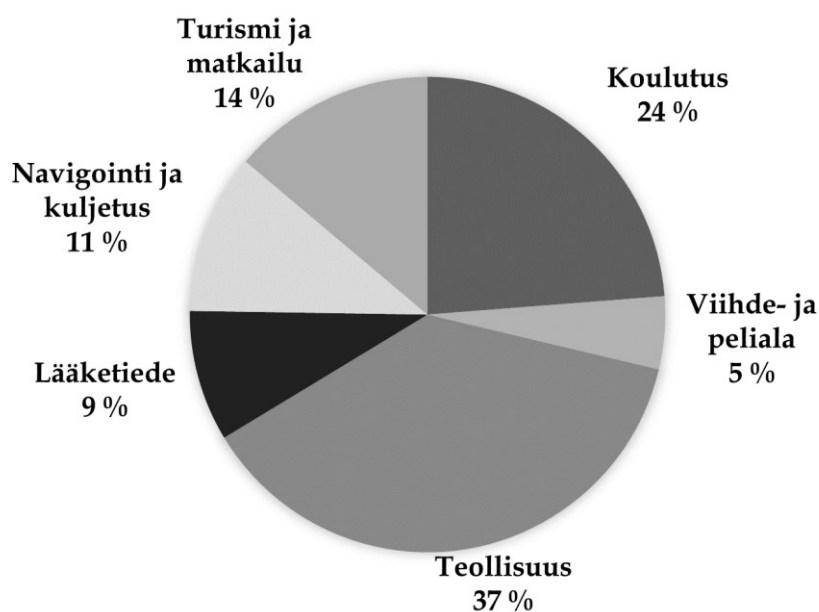
AR-laitteita on erilaisia ja ne voivat rakentua erilaisista komponenteista. On kuitenkin olemassa ominaisia piirteitä, jotka tulisi huomioida kaikissa erilaisissa XR-laitteissa. Hillman (2021) esittääkin XR-laitteissa huomioon otettavat asiat, jotka ovat relevantteja teknologiasta riippumatta: mukavuus ja turvallisuus, vuorovaikutus (laitteen antama palaute), ympäristön osatekijät (sopeutuminen, esim. valaistusolosuhteet), aistienvaarainen syöttö (visuaalinen, auditiivinen, haptinen), osallistavuus, rajoitteet (akunkesto, tekniset- ja käyttöön liittyvät rajoitteet) sekä käyttöliittymän mukautettavuus.

2.3 Käyttökohteet ja keskeiset toimialat

AR teknologiana tarjoaa lukuisia käyttömahdollisuuksia erilaisilla aloilla. Dargan ym. (2023) mukaan peli- ja viihdemarkkinat olivat ensimmäisiä AR:n implementoijia. Peli- ja viihdemarkkinoiden lisäksi Dargan ym. (2023) kertoo, että AR-sovelluksia käytetään nykyään aloilla, kuten viihde, teollisuus, robotiikka, markkinointi, koulutus, turismi ja terveydenhuolto. Useiden lähteiden mukaan AR on osoittautunut hyvin hyödylliseksi etenkin terveydenhuollossa ja koulutuksessa (Baashar ym., 2023; Dey ym., 2018; Krüger ym., 2022). AR on hyödyksi näillä aloilla, koska se mahdollistaa oikeiden tilanteiden mallintamisen virtuaalisesti sekä auttaa opiskelijoita hahmottaan esimerkiksi kehon osia 3D-ympäristössä (Krüger ym., 2022). AR saattaakin pysyä koulutuksessa hyvin tutkittuna alueena, sillä Chen ja Duh (2019) löysivät selkeän trendin koulutuksesta AR:n tutkimusalueena.

Kuluttajamarkkinoille AR tarjoaa useita erilaisia sovelluksia, joiden avulla voi virtuaalisesti esimerkiksi sovittaa asusteita tai sijoittaa sisustuselementtejä ympäristöön (Oyman ym., 2022). Tämä tekee ostopäätöksiä tekemisestä helpompaa. Lisäksi lisättyä todellisuutta käytetään armeijassa, robotiikassa ja kaikenlaisissa suunnittelutöissä (Dargan ym., 2023). Vaikka teollisuus toimialana ei välttämättä ollut ensimmäinen AR:n implementoija, Gutierrez ym. (2022) mukaan se on nykyään yksi suurimmista AR:n hyödyntäjistä. Potentiaali teollisuuden eri aloilla on suuri, sillä AR-lasit mahdollistavat tehokkaamman työnteon

jättämällä työntekijän kädet vapaiksi. Kuviossa (kuvio 2) näkyy, miten Gutierrezin ym. (2022) tutkimuksen mukaan AR-laitteiden käytettävyyttä oli tutkittu eri aloilla. Tutkimuksessa lähdekirjallisuutena käytettiin AR-laitteiden käyttäjäkokemusta käsitteleviä artikkeleita, joten tulokset eivät anna täysin realistista kuvaa AR:n käytöstä eri aloilla. Erityisesti kuvio osoittaa, millä aloilla AR-laitteiden käyttäjäkokemusta ja käytettävyyttä on tutkittu eniten. Toiseksi kuvio antaa viitettä siitä, mitkä toimialat ovat edelläkävijöitä AR-teknologioiden ja käyttäjäkokemuksen kehittämisessä. AR:n jatkuva kehitys ja tutkimus mahdollistavat laajemman käyttöönoton eri aloilla tulevaisuudessa aikaisten omaksujien ohjaamana.



KUVIO 2 AR-käyttöliittymien käyttäjäkokemuksen tutkiminen eri toimialoilla (Gutierrez ym., 2022 mukaan)

3 KÄYTTÖLIITTYMÄN KÄYTETTÄVYYS

Tässä luvussa käsitellään käyttöliittymää käsitteenä ja mistä keskeisistä elementeistä se rakentuu. Tarkempuna tutkimuksen kohteena on käyttäjäkokemus ja etenkin siihen kuuluva osa, käytettävyys. Käytettävyydestä esitetään sen keskeisiä ominaisuuksia sekä keskeisiä tekijöitä sen kehittämiseen.

3.1 Käyttöliittymä

Käyttöliittymä mahdollistaa ihmisen ja järjestelmän välisen vuorovaikutuksen. Käsitteenä käyttöliittymä voidaan muotoilla erilaisin tavoin, mutta ISO (the International Organization for Standardization) antaa yleisesti käytetyn selityksen käsitteelle. ISO (2019) määrittää käyttöliittymäksi interaktiivisen järjestelmän, joko ohjelmiston tai laitteiston, joka antaa käyttäjälle mahdollisuuden suorittaa sen kautta tehtäviä. Esimerkiksi tietokoneella käyttöliittymä tarkoittaa näyttöä, josta näkyy eri elementit sekä hiirtä, jolla elementtien kanssa ollaan vuorovaikutuksessa.

Käyttöliittymiä on monia erilaisia, ja ne mahdollistavat käyttäjälle erilaisia vuorovaikutustapoja. Yksi yleisimmistä käyttöliittymistä on graafinen käyttöliittymä. Graafiseksi käyttöliittymäksi kutsutaan käyttöliittymää, jossa on visuaalisia elementtejä, joita voidaan nähdä, kuulla ja koskettaa eri tavoin (Galitz, 2007). Nämä elementit, kuten painikkeet, kuvakkeet ja tekstikentät, tekevät käyttöliittymästä helposti ymmärrettävän. Niiden kanssa vuorovaikuttamalla käyttäjä voi suorittaa erilaisia toimintoja ja tehtäviä. Informaation esittämiseen tietokoneella käytetään perinteisesti graafista WIMP (Windows, Icons, Menus ja Pointing) -käyttöliittymämallia (Chen & Duh, 2019). Malli perustuu neljään elementtiin, joita ovat ikkunat, kuvakkeet, valikot sekä osoittaminen hiirellä tai toisenlaisella osoittimella.

Mallia ei kuitenkaan voi liittää suoraan AR-käyttöliittymiin (Chen & Duh, 2019). AR vaatii käyttöliittymältä muitakin vuorovaikutuskeinoja kuin perinteinen graafinen käyttöliittymä, joka toimii pelkästään osoittimella. Chenin ja

Duhin (2019) mukaan muiden modaalisuuksien integroiminen AR-sovelluksiin on välttämätöntä, sillä todellisen ja digitaalisen maailman yhdistäminen vaatii käyttöliittymältä enemmän. Ghazwani ja Smith (2020) puolestaan korostavat perinteisten käyttöliittymien kohtaamia haasteita AR:n vuorovaikutusmuotojen kanssa. AR-käyttöliittymät ovatkin siis usein multimodaalisia. Multimodaalinen käyttöliittymä tarkoittaa, että käyttäjällä on useita eri tapoja olla vuorovaikutuksessa käyttöliittymän kanssa (Ghazwani ja Smith, 2020, s. 42). Esimerkiksi multimodaalinen käyttöliittymä olisi ohjattavissa liikkeen, äänen ja kosketuksen avulla. AR-käyttöliittymät ovat tyypillisesti myös 3D-käyttöliittymiä. Ghazwani ja Smith (2020) mukaan 3D-käyttöliittymä on rajapinta, joka mahdollistaa kolmiulotteisen vuorovaikutuksen elementtien kanssa. Lisäksi käyttäjä voi ohjata näyttölaitettaan kolmiulotteisessa tilassa, mikä antaa mahdollisuuden liikkua sekä todellisessa että virtuaalisessa maailmassa (Ghazwani ja Smith 2020). Tämä mahdollistaa käyttäjälle upottavan ja realistisen kokemuksen.

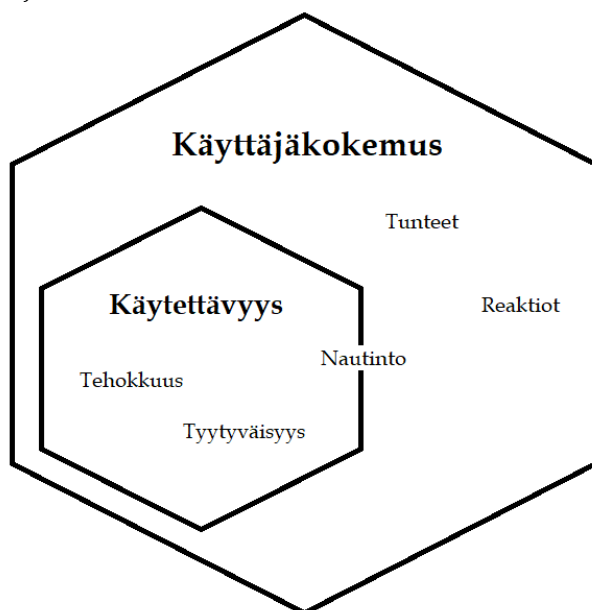
3.2 Käyttäjäkokemus

Käyttäjäkokemus on hyvin keskeinen käsite ihmisen ja teknologian vuorovaikutuksessa. Se voidaan nähdä yhdeksi tärkeimmistä periaatteista käyttöliittymää suunniteltaessa. ISO (2019) standardin 9241–210 mukaan käyttäjäkokemus (engl. user experience, UX) on tuotteen tai palvelun käytöstä tai odotetusta käytöstä seuraavia reaktioita ja havaintoja. Reaktioihin ja havaintoihin kuuluvat esimerkiksi käyttäjän käyttäytyminen ja kaikki käyttäjän kokemat tunteet, jotka tapahtuvat ennen käyttöä, sen aikana tai käytön jälkeen (ISO, 2019). Käyttäjäkokemus muodostuu monesta eri osa-alueesta. ISO (2019) mukaan sen luomiseen vaikuttaa esimerkiksi brändi, järjestelmän toiminnallisuudet ja suorituskyky sekä vuorovaikutustavat. Lisäksi käyttäjän persoona, aiemmat kokemukset sekä asenne ja taitotaso voivat vaikuttaa käyttäjäkokemukseen sekä negatiivisesti että positiivisesti (ISO, 2019). Normanin ja Nielsenin (1998) mukaan käyttäjäkokemuksen tärkein vaatimus on täyttää kaikki käyttäjän tarpeet. Toiseksi tärkein vaatimus on heidän mukaansa esteettisyys ja yksinkertaisuus, jotka luovat käytön iloa ja tyytyväisyyttä (Norman ja Nielsen, 1998).

Käyttäjäkokemus on siis hyvin laaja käsite, joka muotoutuu useasta pienemmästä tekijästä. Käyttäjäkokemus voidaan nähdä kokoavana suunnitteluperiaatteena, joka vastaa käyttäjien kaikkiin tarpeisiin ja tekee käytöstä mukavaa. Hyvän käyttäjäkokemuksen voidaan katsoa lisäävän käyttäjien tyytyväisyyttä tuotteeseen tai palveluun, mikä luo parempaa mielikuvaa brändistä. Tämä voi vaikuttaa tuotteen tai palvelun menestykseen markkinoilla, mikä tekeekin käyttäjäkokemuksen tutkimisesta tärkeää. Jos käyttäjien tarpeet jäävät ymmärtämättä, saatetaan luoda negatiivista käyttäjäkokemusta, kuten turhautumista ja epätyytyväisiä kokemuksia (Dargan ym., 2023). On siis tärkeää varmistaa hyvä käyttäjäkokemus tuotteen tai palvelun suunnitteluprosessin alusta alkaen.

3.3 Käytettävyys

Käytettävyys on yksi käyttäjäkokemuksen keskeisimmistä tekijöistä, ja havainnollistan käsitteiden välistä suhdetta seuraavassa kuviossa (kuvio 3). On olemassa monia erilaisia näkemyksiä siitä, mitkä tekijät luovat käytettävyyden. Lawin ja Heintzin (2021) mukaan interaktiivinen järjestelmä voidaan nähdä käytettäväksi, kun sen käyttäjät pystyvät suorittamaan tehtäviä tyytyväisinä, vähillä virheillä ja kohtuullisilla resursseilla.



KUVIO 3 Käyttäjäkokemuksen ja käytettävyyden suhde (Law ja Heintz, 2021 mukaan)

ISO (2019) mukaan järjestelmän, tuotteen tai palvelun käytettävyys tarkoittaa, kuinka tehokkaasti ja tyytyväisesti käyttäjä voi saavuttaa tavoitteensa. Nielsenin (2012) mukaan käytettävyys taas on laatukriteeri, joka määrittää käytön helpoutta. Hänen mukaansa käytettävyyttä käytetään myös viittaamaan keinoihin, joilla käyttöliittymästä voidaan tehdä helpompikäyttöinen. Nielsenin korostama helppokäyttöisyys parantaa kyllä tehokkuutta ja tyytyväisyyttä, mutta ISO:n määritelmä painottaa enemmän käyttäjän suorituskykyä ja kokemusta. Käytettävyys voidaan nähdä myös eräänlaisena määreenä ja mittana. Chenin ja Duhin (2019) mukaan käytettävyyttä käytetään mittaamaan kaikkia käyttäjän suorituskykyyn vaikuttavia tekijöitä. Haastavaksi käytettävyyden mittaamisen tekee sen subjektiivisuus. Kuten edellä todettiin käyttäjäkokemuksesta, henkilöiden persoonana ja tunteet vaikuttavat myös jokaisen itse koettuun käytettävyyteen. Gutierrez ym. (2022) esittävätkin, että yleensä objektiivisuuden etsiminen on käytettävyyden arvioinnissa avainasemassa. Vaikka objektiivisuus olisikin avainasemassa, tulee käytettävyyden arvioinnissa ottaa subjektiivisetkin näkökulmat huomioon, sillä ne auttavat hahmottamaan kokonaiskuvaa.

Nielsenin (2012) mukaan käytettävyys on verrattavissa siihen, kuinka helppoa käyttöliittymää on käyttää. Hän esittää viisi keskeisintä käytettävyyden

laatutekijää, jotka helpottavat käyttöliittymän käyttöä. Näitä ovat opittavuus, tehokkuus, muistettavuus, virheet ja tyytyväisyys. Opittavuudella hän tarkoittaa, kuinka helppoa käyttöliittymä on ottaa haltuun ensimmäisillä käyttökerroilla. Tehokkuudella käyttäjien nopeutta suorittaa tehtäviä haltuun ottamisen jälkeen ja muistettavuudella tehokkuuteen palaamista pienen tauon jälkeen. Virheillä Nielsen (2012) tarkoittaa käyttäjän tekemien virheiden määrää ja vakavuutta sekä kuinka helppoa niistä on päästä eteenpäin. Viimeiseksi tyytyväisyydellä hän tarkoittaa, kuinka mukavaa käyttöliittymää on käyttää (Nielsen, 2012). Käytettävyyden kattaa monia ominaisuuksia ja näiden tekijöiden huomioiminen voi parantaa käyttäjäkokemusta jo huomattavasti.

Jos käytettävyyden vaatimat kriteerit eivät täyty, voidaan järjestelmässä nähdä olevan käytettävyyso ongelmia. Ongelmat heikentävät järjestelmän hyväksymistä sekä mahdollisesti estävät käyttöönoton (Law ja Heintz, 2021). Nielsen (2012) korostaa käytettävyyden keskeistä roolia ja antaa esimerkin verkkoympäristöstä. Hän huomauttaa, että jos sivuston käytettävyyden on alhainen, kävijät todennäköisesti poistuvat sivulta välittömästi (Nielsen, 2012). Alhainen käytettävyyden heikentää jokaisen tuotteen, palvelun tai sivuston kilpailukykyä huomattavasti.

Käytettävyyttä tuleekin testata tuotteen kehityksen eri vaiheissa ja seurata toteutuuko edellä mainitut asiat. Galitzin (2007) mukaan käytettävyydentestaus on olennaista kahdesta eri syystä. Ensiksi kehittäjä oppii tarkemmin käyttäjän tavoitteista ja ongelmista. Toiseksi voidaan testata eri versioita ja vahvistaa suunnittelupäätöksiä ennen tuotteen valmistumista (Galitz, 2007). Käytettävyyden testaus tuotteen kehityksen eri vaiheissa varmistaa, että lopputuote vastaa käyttäjien tarpeita ja odotuksia parhaalla mahdollisella tavalla. Se myös varmistaa, että mahdolliset käytettävyyso ngelmat tunnistetaan jo suunnitteluprosessin varhaisessa vaiheessa Law & Heintz, (2021).

4 LISÄTTY TODELLISUUS: KÄYTETTÄVYYS, HAASTEET JA ARVIOINTIKEINOT

Luvussa käsitellään AR-käyttöliittymien käytettävyyttä ja mitä asioita niissä tulee huomioida käytettävyyden näkökulmasta. Käyttöliittymien käytettävyyden osalta perehdytään myös AR:n kohtaamiin haasteisiin. Viimeisenä tarkastelun kohteeksi otetaan, millä keinoin AR-käyttöliittymien käytettävyyttä voidaan arvioida.

4.1 Käytettävyyteen vaikuttavat tekijät

Käytettävyyden näkökulmasta AR-käyttöliittymissä on paljon samoja piirteitä ja vaatimuksia kuin kaikissa muissakin käyttöliittymissä. AR-käyttöliittymissä on kuitenkin paljon muutakin huomioitavaa, sillä ne yhdistävät virtuaalisen ja todellisen maailman. Gutierrezin ym. (2022) mukaan AR-käyttöliittymien suunnittelijoiden tulisi huomioida käyttäjän kognitiivisuus ja tunteet. Tämä voi olla haastavaa, mutta käytettävyydeltään hyvä käyttöliittymä voi vähentää käyttäjän kokemia negatiivisia tunteita, kuten turhautumista. Turhautumista voi aiheuttaa esimerkiksi käyttöliittymän käytön vaikeus, minkä takia ohjeet tulevat olla selkeästi saatavilla. Funkin ym. (2016) mukaan ohjeiden esittämiseen AR-laitteilla kuvien, symboleiden ja grafiikan käyttö on tehokkaampaa kuin pelkän tekstin. Lisäksi 3D-elementit ovat parempia verrattuna 2D-elementteihin. He kertovat myös, että ohjeiden esittämiseen videoiden käyttäminen ei välttämättä ole niin tehokasta, koska se saattaa vain lisätä kognitiivista raskautta. Heidän mukaansa jatkuvasti esillä olevat ohjeet ovat tehokkaampia ja käyttäjän kannalta ystävällisempiä (Funk ym. 2016).

AR-käyttöliittymien suunnittelussa käytettävyyden kannalta olennaista on etenkin elementtien tunnistettavuus ja niiden saavutettavuus. Endsleyn ym. (2017) mukaan elementtien tulisi mukaila jo yleisesti käytettyjä elementtejä, jotta käyttöliittymän tarjoamat mahdollisuudet ovat käyttäjälle selkeitä. Tämä on tärkeää, jotta käyttöliittymän käyttö olisi käyttäjälle mahdollisimman helppoa.

Endsleyn ym. (2017) mukaan tärkeää on myös käyttöliittymän soveltuminen käyttäjän fyysisiin kykyihin sekä havaintokykyyn. Havaintokykyyn soveltumisella he tarkoittavat, että AR-käyttöliittymissä tulisi huomioida koot, värit, liike, etäisyys ja resoluutio, jotta käyttäjän havaintokyky maksimoidaan eikä sitä ylitetä. Käyttöliittymän soveltumisesta käyttäjän fyysisiin kykyihin he esittävät, että AR:n vaatima liikehdintä ei tulisi olla vaarallisia, fyysisesti haastavaa eikä vaatia suurta koordinaatiokykyä (Endsley ym. 2017).

Eleillä ohjattavat AR-käyttöliittymät vaativat käyttäjältä kuitenkin jonkinlaista liikehdintää. Sinlapanuntakul (2023) mukaan mahdollisimman luonnollisia liikkeitä muistuttavat vuorovaikutuskeinot johtavat parempaan käyttäjän suorituskykyyn, joka taas parantaa käyttöliittymän käytettävyyttä. Tämä tarkoittaa sitä, että entuudestaan tuttuja liikkeitä muistuttavat vuorovaikutustavat tekevät käyttöliittymästä helpompikäyttöisen sekä käytön opettelusta nopeampaa. Lisäksi tutut liikkeet saattavat vähentää mahdollista käytöstä koituvaa räsitusta. Liikkeillä ja eleillä ohjattavuus on kuitenkin vielä suurelle yleisölle melko tuntematonta. Hun ym. (2023) mukaan kosketusta vaativat vuorovaikutukset ovat käytettävyydeltään tehokkaampia, sillä ne ovat käyttäjille tutumpia. Heidän mukaansa eleiden käyttäminen lisää kognitiivista räsitettä, mikä tekee käytettävyydestä heikkoa etenkin käytännöllisissä tehtävissä. He suosittelivatkin eleillä ohjattavia AR-käyttöliittymiä viihdekäyttöön, jossa tavoitteena on hauskuus eikä tehokkuus (Hu ym. 2023). Tähän johtopäätökseen saattaa vaikuttaa se, että AR-laitteiden käytettävyyks ja vuorovaikutustavat koetaan haastavaksi niiden uutuu-den vuoksi. Uuden teknologian käytettävyyks onkin tutkitusti huonompaa kuin jo tunnetun teknologian (Arifin ym. 2018). Ei ole yhtä totuutta siitä, mitkä vuorovaikutustavat ovat AR-käyttöliittymien käytettävyyden kannalta parhaita, mutta yleensä vuorovaikutustapoja, kuten ääntä, kosketusta ja liikettä käytetäänkin yhdessä. Käytettävyyden kannalta ei välttämättä kannata varautua vain yhteen keinoon.

AR-käyttöliittymien käytettävyyteen vaikuttaa vuorovaikutuksen helpous. Sinlapanuntakulin (2023) tutkimuksen mukaan AR-laseilla vaikeimpia vuorovaikutuksia olivat vierittäminen ja selaaminen, tähtääminen, valitseminen sekä ikkunoiden nappaaminen ja raahaaminen. Tähän vaikutti se, että kohteet olivat liian pieniä. Suurin vaikuttaja heikkoihin vuorovaikutuksiin oli kuitenkin käyttöliittymältä saadun palautteen puute ja intuitiivisuus, eli käyttöä ei koettu luonnolliseksi (Sinlapanuntakul 2023). AR-käyttöliittymien käytettävyyden kannalta on siis tärkeää tehdä interaktiivisista elementeistä tarpeeksi suuria vuorovaikutuksen selkeyttämiseksi. Lisäksi käyttöliittymän tulisi antaa onnistuneesta vuorovaikutuksesta palautetta esimerkiksi värinä tai vaihtaa elementin väriä. Sinlapanuntakul (2023) ehdottaa AR-käyttöliittymien antaman visuaalisen ja auditiivisen palautteen vahvistamista, jotta käyttöliittymä olisi mahdollisimman responsiivinen ja osallistava. Tämä antaisi käyttäjälle selkeämmän kuvan siitä mitä toimintoja hän tekee ja mitä seurauksia niillä on.

Sinlapanuntakul (2023) mukaan AR-käyttöliittymissä ja etenkin AR-laseissa tulisi olla myös zoomaus toiminto ja intuitiivisemmän käyttöliittymän kannalta sen tulisi toimia käden tai käsien liikkeen avulla. Lisäksi hän suosittelee

käytettävyyden parantamiseksi näytön reunaan näkyvää palkkia, mistä voi selata sisältöä. Tämä tekisi AR-lasien käyttöliittymän navigoinnista tehokkaampaa, ja toimintatavaksi hän ehdottaa, että se toimisi kahdella sormella, mikä vähentää virheiden syntymistä (Sinlapanuntakul, 2023).

Yksi aiemmin esitetystä Nielsenin (2012) käyttöliittymän käytettävyyden laatutekijöistä oli tyytyväisyys. Nguyen ym. (2023) mukaan tyytyväisyys nähdään usein objektiivisena muuttujana ja sitä voidaan ennustaa varmistamalla, että tuote on hyödyllinen, viihdyttävä, visuaalisesti miellyttävä ja nautinnollinen. Yksi käytön nautinnollisuuteen vaikuttava tekijä lisätyn todellisuuden HMD-laitteissa on se, miten ne istuvat päähän. Vaikka käytön mukavuus ei suoraan liity käyttöliittymien käytettävyyteen, on se tärkeää yleisen käyttäjäkokemuksen kannalta. Gutierrezin ym. (2022) mukaan AR-käyttöliittymien käytettävyyttä voidaan tarkastella kahdesta eri perspektiivistä: teknologian suorituskyky ja kuinka hyvin käyttäjät onnistuvat tarkoituksen mukaisessa käytössä. Teknologiseen suorituskykyyn voidaan myös lukea laitteen paino käyttäjän suorituskyvyn ja mukavuuden näkökulmasta. Syberfeldt ym. (2017) mukaan AR-lasien paino on hyvin kriittinen käytettävyyden kannalta, sillä niitä on tarkoitus pitää pidempiaikaa aikoja päässä. Heidän mukaansa AR-laseille realistinen yläraja olisi 100 g, joka on viisinkertainen normaaleihin laseihin verrattuna (Syberfeldt ym. 2017). Tämä mahdollistaisi AR-lasien pidempiaikaisen käytön esimerkiksi työnteossa ja opiskelussa.

Voidaan todeta, että AR-käyttöliittymien käytettävyyteen vaikuttaa eri elementtien ja ominaisuuksien tunnistettavuus, niiden saavutettavuus ja soveltuvuus käyttäjän havainto- ja fyysisiin kykyihin. Tunnistettavuus tarkoittaa lähinnä yhteyttä yleisesti käytettyihin elementteihin ja tapoihin, mutta voidaan liittää myös käyttäjälle aiemmin tuttuihin liikkeisiin ja eleisiin. Käytettävyyteen vaikuttaviin tekijöihin voidaan myös liittää teknologinen suorituskyky ja laitteiden fyysiset ominaisuudet. Saavutettavuus on osaltaan käyttämisen helppoutta ja siinä keskeisin käytettävyyteen vaikuttava tekijä on vuorovaikutus, oli kyseessä sitten eri ohjaustavat tai käyttöliittymän käyttäjälleen antama palaute.

4.2 Teknologiset ja käyttöön liittyvät haasteet

AR-teknologiat tuntuvat olevan vielä uusia, eivätkä ne ole levinneet yleiseen laajaan käyttöön. Ghazwani ja Smith (2020) toteavatkin, että AR ei ole kuluttajille laajasti levinnyt tuote, vaikka se onkin otettu käyttöön monilla eri aloilla. Heidän käsityksensä mukaan syy saattaa olla käyttäjien odotuksissa, jotka saattavat olla korkeammat kuin mitä nykyiset AR-laitteet tarjoavat. Tähän he lisäävätkin, että AR-laitteilla on käytettävyyden osalta vielä parantamisen varaa (Ghazwani & Smith 2020). AR-laitteiden käytettävyyteen kohdistuukin monia erilaisia haasteita.

Haasteeksi on muodostunut se, että AR:n standardit eivät ole vielä yhtä laajalti määriteltyjä tai vakiintuneita kuin joillakin muilla teknologioilla. Kansainväliset organisaatiot, kuten IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)

pyrkivät luomaan AR- ja VR-teknologioille standardeja, mutta esimerkiksi käyttäjäkokemusta ja käytettävyyttä ei ole vielä otettu käsittelyyn (Yuan, 2018). Eri AR-laitteiden käyttöliittymät eroavat siis käytettävyydeltään toisistaan hyvin paljon. Derby ja Chaparro (2021) mukaan vuorovaikutuksessa käytettäviä tapoja ja elementtejä ei ole standardoitu AR-laitteiden kesken, mikä saattaa vaikeuttaa AR-laitteiden käytön opettelemista ja omaksumista. He jatkavat, että käyttöliittymien epäsäännöllisyys aiheuttaa huonompaa käytettävyyttä ja täten johtaa laitteen käytön vähentämiseen (Derpy & Chaparro, 2021). On siis haastavaa luoda helposti omaksuttavaa AR-laitetta, sillä käyttöliittymät ovat vielä hyvin epäsäännöllisiä.

Standardien puutteen lisäksi ihmisten erilaisuus on AR-käyttöliittymien käytettävyyden kannalta haastava aihe. Gutierrezin ym. (2022) mukaan mielihalu ja toiveet ovat osoittautuneet ongelmallisiksi AR-käyttöliittymien käytettävyyden suunnittelijoille ja kehittäjille, sillä ne voivat olla niin erilaisia. Erilaisiin preferensseihin AR-käyttöliittymien käytettävyyden osalta saattaa vaikuttaa se, että teknologia on sen verran uusi kuluttajille, eikä standardeja käytettävyydelle ole vielä luotu.

Yksi haasteellinen alue MAR-laitteiden käytettävyyden kannalta on pieni näyttö ja 3D-käyttöliittymät. Ghazwani ja Smith (2020) mukaan MAR-laitteilla käyttäjän näkökenttä on sen verran pienempi kuin HMD-laitteissa, että se saattaa vaikuttaa negatiivisesti laitteen käytettävyyteen. MAR-laitteiden pienen näytön takia 3D-käyttöliittymien navigointi saattaa olla käyttäjille haastavaa verrattuna HMD-laitteisiin (Ghazwani & Smith, 2020). Tämän lisäksi pieni näyttö tai näkökenttä voi tehdä multimodaalisesta vuorovaikutuksesta ja ohjeiden esittämisestä haastavaa (Gutierrez ym., 2022). Toiseksi haasteeksi Ghazwani ja Smith havaitsivat AR-käyttöliittymissä responsiivisuuden eli laitteen antaman fyysisen palautteen puutteen (Ghazwani & Smith, 2020). Tällä tarkoitetaan laitteen kanssa vuorovaikutuksesta saatavaa tuntopalautetta, mitä on esimerkiksi äänimerkki tai värinä painalluksen jälkeen. Tämä tekee käyttäjälle selväksi, että hän on onnistunut haluamassaan toiminnossa.

AR-käyttöliittymät haastavat suunnittelijoita ottamaan huomioon uusia näkökulmia käytettävyyden kannalta. Maqboolin ja Heroldin (2024) mukaan AR-käyttöliittymien eroavaisuus perinteisistä käyttöliittymistä tuo uniikkeja käytettävyysongelmia, kuten liikepahoinvointia ja syvyysnäkövaikeuksia. Sinlapanuntakul (2023) teki tutkimuksessaan samankaltaisen havainnon liikepahoinvoinnista. Hän kertoo, että AR-laseja pitkään pidettäessä ilmenee niin kutsuttua simulaattoritautiä (eng. simulator sickness). Simulaattoritauti on ehkä paremmin tuttu VR:n ja muiden simulaattoreiden käytöstä, mutta sitä ilmenee myös AR:ssä. Dużmańskan (2018) mukaan oireisiin kuuluu esimerkiksi epämukavuuden tunne, pahoinvointi, väsymys ja sekavuus. Hänen mukaansa tämä johtuu luultavasti siitä, että ihmisen omat aistit ovat ristiriidassa laitteen tuottamien aistikoemuksien kanssa (Dużmańska, 2018). Aistien ristiriitaan saattaa vaikuttaa se, että näyttölaite reagoi viiveellä käyttäjän liikkeisiin. Simulaattoritaudin oireet tekevät AR-lasien käyttäjäkokemuksesta ja käytettävyydestä selkeästi heikompa. Yksiselitteistä ratkaisua simulaattoritautiin Sinlapanuntakul (2023) tai

Dużmańska (2018) eivät löytäneet, mutta yhdeksi vaikuttajaksi selvisi laitteen käytön aika. Mitä pidempään laitetta käyttää, sitä todennäköisempää on altistua simulaattoritautille (Sinlapanuntakul, 2023., Dużmańska, 2018). Simulaattoritauti on yksi AR-käyttöliittymien käytettävyyden haaste, ja tämän vuoksi on tärkeää kehittää ratkaisuja, jotka vähentävät sen esiintymistä. Maqboolin ja Heroldin (2024) mukaan simulaattoritauti haastaa aiempia käytettävyyden varmistamiseen käytettyjä menetelmiä, ja uusien tapojen adaptointi on elintärkeää teknologian ja etenkin käyttäjäkokemuksen kehityksen kannalta.

Kuten jo aiemmin mainittu, AR-käyttöliittymät ovat usein multimodaalisia ja monimutkaisempia perinteisiin käyttöliittymiin verrattuna. Multimodaalinen käyttöliittymä tuo erilaisia haasteita, kuten suurempi akun kulutus ja laitteen paino (Ghazwani ja Smith, 2020, s. 42). Tällä hetkellä AR-lasit ovat suhteellisen painavia, mutta on hyvin todennäköistä, että teknologian kehittyessä komponentit ja laite kevenevät.

4.3 Käyttöliittymän käytettävyyden arviointi

Käyttöliittymän käytettävyyden arviointiin ja testaukseen on useita menetelmiä. Hillmanin (2021) mukaan käytettävyyden suunnittelussa käytettäviin keinoihin vaikuttaa vahvasti AR-laitteen luonne. MAR-laitteet seuraavat tiettyyn pisteeseen asti perinteisiä mobiililaitteille kehitettyjä periaatteita, mutta HMD-laitteet vaativat erilaisia lähestymistapoja (Hillman, 2021). Kaikilla AR-laitteilla on kuitenkin ominaisia käytettävyyden piirteitä ja laitteen luonteesta huolimatta niiden arvioinnissa voidaan osittain hyödyntää samankaltaisia menetelmiä.

Yksi tunnettu menetelmä on Nielsenin ja Molichin (1990) alkujaan yhdessä esittämä heuristinen arviointi. Myöhemmin Nielsen (1994) on muodostanut tähän päivään asti muuttumattomina pysyneet 10 käytettävyyden heuristiikkaa (taulukko 1). Heuristiikka on yleinen käsite, jota käytetään kuvaamaan periaatteita tai sääntöjä. Heuristinen arviointi taas on vapaamuotoinen menetelmä, joka perustuu heuristiikkojen analysointiin tietyssä kontekstissa. Nielsenin ja Molichin (1990) mukaan heuristinen arviointi perustuu mielipiteiden muodostamiseen siitä, mikä on hyvää, ja mikä huonoa. Nämä näkemykset ohjaavat päätöksentekoa ja auttavat tunnistamaan käyttöliittymän vahvuudet ja heikkoudet. Nielsenin heuristiikat ovat vieläkin yksi käytetyimmistä tavoista arvioida käyttöliittymän käytettävyyttä (Lima ja Hwang, 2023).

Hillman (2021) toteaa, että Nielsenin (1994) heuristiikat toimivat myös XR-laitteiden käytettävyyden arviointiin. Tästä voimme päätellä heuristiikkojen olevan yksi toimiva tapa myös AR-käyttöliittymien käytettävyyden arviointiin. AR:lle on kehitetty myös omia heuristiikkoja. Hillmannin (2021) mukaan yksityiskohtaisemmat XR-laitteille kehitetyt käytettävyyden heuristiikat voivat olla toimivia, mutta ne ovat hyvin subjektiivisia ja laitekohtaisia. Laitteet kehittyvät ja heuristiikat vanhenevat nopeaa tahtia, jonka takia hän ei välttämättä suosittelen niiden käyttöä. Hän ei kuitenkaan kokonaan poissulje niiden käyttöä vaan sen

sijaan korostaa pohtimaan kyseessä olevan laitteen luonnetta, ja mitkä heuristiikat vastaavat parhaiten laitteen ominaisuuksia (Hillman, 2021).

TAULUKKO 1 Nielsenin kymmenen heuristiikkaa (Nielsen, 1994)

Heuristiikat	Kuvaus
Järjestelmän tilan näkyvyys	Järjestelmän tulee informoida käyttäjää, jotta käyttäjä pysyy ajan tasalla tapahtumista.
Järjestelmän ja todellisen maailman vastaavuus	Suunnittelun tulee tukea käyttäjien kieltä ja tuntemia käsitteitä.
Käyttäjän kontrolli ja vapaus	Käyttäjät tarvitsevat selkeän tavan poistua virheellisistä valinnoista ja toiminnoista.
Yhdenmukaisuus ja standardit	Käyttäjien tulisi tietää mitä erialaiset sanat, tilanteet ja toiminnot tarkoittavat.
Virheiden estäminen	Virheilmoitukset ovat tärkeitä, mutta ongelmien syntyminen tulee pyrkiä estämään etukäteen.
Tunnistaminen muistamisen sijaan	Minimoidaan käyttäjien muistin rasitusta rakentamalla toiminnot, elementit ja eri vaihtoehdot näkyviksi
Joustavuus ja tehokkuus	Oikoteiden avulla voidaan nopeuttaa vuorovaikutusta kokeneille käyttäjille.
Minimalistinen estetiikka	Annetaan vain relevanttia tietoa ja vältetään turhan esittämistä.
Virheiden tunnistaminen, diagnosointi ja korjaus	Virheviestien tulee olla selkeitä kuvaten ongelman ja esittäen siihen ratkaisun.
Ohjeiden ja dokumentaation selkeys	Parhaimmillaan käyttäjälle ei tarvitse esittää lisätietoa, mutta tarvittaessa ohjeiden on oltava helposti löydettävissä ja selkeät.

Ramlinin (2023) mukaan Nielsenin (1994) heuristiikat toimivat parhaiten, kun arvioinnissa on mukana kokenut käytettävyyteen perehtynyt ammattilainen. Jos käytettävyyden arvioinnissa ei ole mukana ammattilaista, jokin toinen keino saattaa olla parempi. Ramlinin (2023) tutkimuksen mukaan System Usability Scale (SUS) oli suosituin AR-laitteiden käytettävyyden arviointiin käytetty mittari vuosina 2018–2022. Brooken (1996) kehittämä SUS on joukko subjektiivisia kysymyksiä, joilla hahmotetaan käyttäjän kokemuksia (Derby & Chaparro, 2021). Derbyn ja Chaparron (2021) mukaan kysymyspohjaiset arviointitavat, kuten SUS voivat olla hyvä, sillä ne ovat nopeita ja luotettavia. Toisaalta he mainitsevat, että ne antavat hyvin rajatun määrän vastauksia (Derpy & Chaparro, 2021). Maqboolin ja Heroldin (2024) mukaan, vaikka SUS on hyvin käytetty mittari, se ei välttämättä anna yksityiskohtaista ymmärrystä ainutlaatuisiin käytettävyysongelmiin. Nielsenin (1994) heuristiikat eroavat Brooken (1996) SUS-kyselystä siinä, että heuristiikat ovat sääntöjä ja periaatteita, joita tarkastellaan objektiivisesti. SUS taas antaa hyvin subjektiivisia vastauksia. Derbyn ja Chaparron (2021) mukaan SUS ei aina tarjoa selityksiä siihen, miksi käyttäjät antavat tuotteelle arvioita, mutta myöskään pelkän heuristisen arvioinnin käyttö ei paljasta kaikkia käytettävyysongelmia. Heuristinen arviointi tarjoaa kuitenkin nopean ja kustannustehokkaan tavan arvioida käyttöliittymän käytettävyyttä (Derpy & Chaparro, 2021). AR-käyttöliittymien käytettävyyden arviointiin molemmat voivat olla hyödyllisiä, ja niitä voidaan käyttää yhdessä tai erikseen. Gutierrezin ym. (2022) mukaan AR-käyttöliittymän käytettävyyttä on hyvä arvioida sekä objektiivisesti, että subjektiivisesti.

Ramlin (2023) tutkimuksessa yhdeksi käytettävyyden arviointiin soveltuvaksi mittariksi havaittiin Technology Acceptance Model (TAM), jossa kaksi keskeistä arviointikohdetta on käytön ja käyttöönoton helppous. Javid ja Sidhu (2022) toteavat, että TAM-mallia on käytetty laajasti erilaisissa tutkimuksissa, joissa tavoitteena on ollut arvioida käyttäjien uusien teknologioiden omaksumista. Tutkimuksessaan he arvioivat TAM:in avulla lisätyn todellisuuden omaksumista käytön helppouden, koetun käyttökelpoisuuden, monimutkaisuuden, virheellisyiden, itsenäisyyden ja käytön halukkuuden näkökulmista (Javid & Sidhu, 2022).

Aiemmin esitettiin, että AR-laitteille on muodostettu myös omia heuristiikkoja käytettävyyden arvioimiseksi. Endsley ym. (2017) esittävät yhdeksän heuristiikkaa, jotka heidän mukaansa tulisi huomioida AR-laitteita suunniteltaessa. Ensimmäinen heuristiikka on soveltuminen käyttäjän ympäristöön ja tehtävään (visualisoinnit tulisi vastata fyysistä ympäristöä, jossa ne esitetään). Toinen kohdistuu elementtien tunnistettavuuteen ja kolmas käyttöliittymän häiriöiden ja ylikuormitusten minimoimiseen. Neljännen heuristiikan mukaan käyttöliittymän tulee mukautua käyttäjän sijaintiin ja liikkeisiin. Viides ohjeistaa todellisen ja virtuaalisen maailman yhteensovittamiseen. Kuudes ottaa kantaa käyttöliittymän soveltumiseen käyttäjän fyysisiin kykyihin, kun taas seitsemäs kohdistuu käyttäjän havaintokykyyn. Kahdeksas painottaa ruudun ulkopuolisten kohteiden saavutettavuutta (esimerkiksi virtuaalinen näppäimistö tulisi saada helposti esille). Viimeisen heuristiikan mukaan tulee huomioida laitteiston ominaisuudet ja rajoitukset.

Liman ja Hwangin (2023) mukaan perinteiset heuristiikat, kuten Nielsenin (1994), eivät riitä AR-käyttöliittymien arviointiin, koska ne eivät ota tarpeeksi yksityiskohtaisesti huomioon AR:n vaatimuksia. Heidän mukaansa eri aistien varainen vuorovaikutus erilaisten 3D-elementtien kanssa ovat selkeitä rajoituksia perinteisten heuristiikkojen käytölle. He tekivät tutkimuksen perinteisten ja yksityiskohtaisempien heuristiikkojen käytöstä AR:n käytettävyyden arviointiin ja havaitsivat, että perinteisillä heuristiikoilla arvioijien tyytyväisyys oli selkeästi parempi. Kuitenkin yksityiskohtaisemmat heuristiikat paljastivat enemmän käytettävyysongelmia (Lima & Hwang, 2023).

AR:n käyttöliittymien käytettävyyden arviointiin käytetyistä arviointitavoista on siis eriäviä mielipiteitä. Tutkimukset osoittavat, että perinteiset, kuten Nielsenin (1994) heuristiikat ovat edelleen laajasti käytössä myös AR-käyttöliittymien käytettävyyden arvioinnissa. Tutkimusten mukaan perinteisten heuristiikkojen käyttö saattaa jättää joitain asioita huomioimatta. Yksityiskohtaisemmat AR-laitteille suunnatut heuristiikat tunnistavat enemmän käytettävyysongelmia ja näin mahdollistavat paremman käyttöliittymän käytettävyyden.

5 YHTEENVETO JA POHDINTA

Uusia teknologioita kehitetään ja otetaan käyttöön jatkuvasti. Hyvä käyttäjäkokemus käytettävyyden näkökulmasta voidaan nähdä elinehtona onnistuneen tuotteen kannalta, mikä tekee sen tutkimisesta tärkeää. Tässä tutkielmassa tarkasteltiin lisätyn todellisuuden käyttöliittymien käytettävyyttä sekä niihin liittyviä haasteita ja mahdollisia arviointikeinoja. Tarkemmat tutkimuskysymykset olivat:

1. Mitkä tekijät vaikuttavat käytettävyyteen lisätyn todellisuuden käyttöliittymissä?
2. Millaisia haasteita liittyy lisätyn todellisuuden käyttöliittymien käytettävyyteen?
3. Millä tavoin lisätyn todellisuuden käyttöliittymien käytettävyyttä voidaan arvioida?

Tutkimusmenetelmänä oli kirjallisuuskatsaus, jonka aineistona käytettiin pääasiassa tietojärjestelmätieteen artikkeleita, jotka olivat vertaisarvioituja ja JUFO-luokitukseltaan vähintään 1.

Tuloksena ensimmäiseen tutkimuskysymyksen voidaan todeta, että keskeinen tekijä AR-käyttöliittymien käytettävyydessä on käytön helppous. Käytön helppoutta edistävät käyttöliittymän opittavuus, tehokkuus, muistettavuus, virheiden minimointi ja käytön mukavuus (ks. Nielsen, 2012). AR-käyttöliittymien käytettävyyteen löydettiin vaikuttavan myös visuaalisuus ja etenkin elementtien tunnistettavuus, koko, värit ja saavutettavuus. Käyttäjän on onnistuttava vuorovaikuttamaan käyttöliittymän kanssa erilaisissa ympäristöissä ja tilanteissa helposti. AR-käyttöliittymät ovat usein multimodaalisia eli ne käyttävät eri aistien varaista syöttöä. Keskeinen löytö oli, että AR-käyttöliittymien vuorovaikutuksessa on otettava huomioon käyttäjän fyysiset kyvyt ja rajoitteet. Varsinkin liikkeet ja eleet tulisi mukaila ennestään tuttuja liikkeitä, jotta ne eivät olisi haastavia tai käyttäjälle raskaita. Käytettävyyteen AR-käyttöliittymissä todettiin vaikuttavan myös käyttöliittymän ohjeet, joissa tulisi käyttää 3D-elementtejä ja niiden

tulisi olla koko ajan esillä käyttäjäystävällisyyden kannalta. AR-käyttöliittymän käytettävyyteen vaikuttaa myös käyttöliittymän antama fyysinen palaute, joka tulisikin tehdä selkeäksi, jotta käyttäjä tietää onnistuneensa vuorovaikutuksessa. Keskeistä on, että AR-käyttöliittymä on helposti opittava, sen käyttäminen on tehokasta, minimoidaan käyttäjän tekemät virheet ja ennen kaikkea, käyttäjä on tyytyväinen.

Toisen tutkimuskysymyksen osalta tuloksiksi tunnistettiin useita AR-käyttöliittymien käytettävyyteen liittyviä haasteita. Keskeinen löytö oli, että AR-laitteiden kesken ei ole vielä luotu yhtenäisiä standardeja etenkin käyttäjäkokemuksen ja käyttöliittymän näkökulmasta, mikä tekee käytettävyyden kehittämisestä haastavaa. Helposti omaksuttavaa AR-laitetta on toistaiseksi haastava luoda, sillä käyttöliittymät ovat vielä hyvin epäsäännöllisiä. Haasteeksi havaittiin myös, että vuorovaikutuksessa käytettävät tavat ja elementit eivät ole yhtenäisiä AR-laitteiden kesken, mikä vaikeuttaa AR-laitteiden omaksumista ja käytön opettelemista. Toinen haastava alue on se, että käyttäjillä on vielä hyvin erilaisia toiveita ja vaatimuksia käyttöliittymille. AR-käyttöliittymien eroavaisuuden perinteisistä käyttöliittymistä löydettiin tuovan uniikkeja käytettävyysongelmia, kuten liikepahoinvointia. Tähän saattaa vaikuttaa aistien ristiriita, johon vaikuttaa teknologian luoma viive, mutta yksiselitteistä syytä ei ole löydetty. Lisäksi tutkimuksessa tunnistettiin, että MAR-käyttöliittymien käytettävyyden haasteena vuorovaikutus 3D-elementtien kanssa pienten näyttöjen vuoksi. HMD-laitteissa tämä ei ole ongelma. Haasteeksi todettiin myös AR-laitteiden responsiivisuus, ja käyttöliittymän antamaa palautetta käyttäjälle tulisikin kohentaa.

Keskeisenä tuloksena kolmanteen tutkimuskysymykseen voidaan todeta, että käytettävyyden arviointiin on olemassa useita erilaisia menetelmiä, joiden soveltamista AR-käyttöliittymien arvioinnissa suoraan sellaisenaan tulee harkita tapauskohtaisesti. Käytettävyyttä arvioidaan usein kysymysten tai periaatteiden ja sääntöjen muodossa, joista toiset menetelmät saattavat olla parempia tilanteesta ja käytettävissä olevista resursseista riippuen. Tutkielmassa löydettiin, että käytettävyyttä on tärkeää pyrkiä analysoimaan sekä objektiivisesti että subjektiivisesti. Tutkielma osoitti myös, että yleisiä käyttöliittymän käytettävyyden arviointiin käytettäviä menetelmiä voidaan käyttää myös AR-laitteiden käyttöliittymissä. Esimerkiksi Nielsenin (1994) heuristiikat ovat erittäin suosittu menetelmä myös AR-laitteiden käyttöliittymien käytettävyyden arviointiin, vaikka niitä ei suoraan siihen olekaan tehty. Heuristiikat tarjoavat hyvän objektiivisen arviointitavan AR-käyttöliittymien käytettävyyden arviointiin. Tutkielmassa löydettiin myös kaksi suosittua subjektiivisempaa lähestymistapaa: TAM ja SUS. Heuristiikkojen objektiivisen luonteen lisäksi käytettävyyden arviointiin voisi olla hyvä käyttää esimerkiksi SUS:ia tai TAM:ia, jotta saadaan kattavampi kuva mahdollisista käytettävyysongelmistä. Yhdessä heuristiikkojen kanssa käytettynä voivat antaa hyvän kokonaiskuvan AR-käyttöliittymän käytettävyydestä. Havaittiin myös, että AR-laitteille suunnitellut omat heuristiikat ja muut käytettävyyden arviointikeinot saattavat olla liian laitekohtaisia, jonka takia niitä voi olla vaikea käyttää käyttöliittymän käytettävyyden arvioimiseksi. Toisaalta AR:n erityispiirteet, kuten multimodaalinen vuorovaikutus ja interaktiiviset 3D-elementit tuovat

mukanaan erilaisia käytettävyyden piirteitä, jotka voidaan huomioida paremmin AR:lle kehitetyissä heuristiikoissa. Yksityiskohtaisempien heuristiikkojen löydettiin myös havaitsevan käytettävyyssongelmia perinteisiä heuristiikkoja tarkemmin.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan vielä todeta, että AR-käyttöliittymät eivät eroa muista käyttöliittymistä niin paljoa, että ne vaatisivat täysin omat periaatteet käytettävyydelle. Pitkälti esimerkiksi elementtien sijoitteluun MAR-laitteiden käyttöliittymissä voidaan seurata mobiililaitteille kehitettyjä standardeja, mutta AR-HMD-laitteilla käyttöliittymän suunnittelu käytettävyyden kannalta on haastavampaa. AR-laitteille ei ole vielä kehitetty yhtenäisiä standardeja, mikä hankaloittaa laitteiden käyttöönottoa, ja on selkeä heikkous AR-käyttöliittymien käytettävyyden kannalta.

Tutkielman heikkoudeksi voidaan nähdä se, että aihetta tarkastellaan löydettyjen ja valittujen tutkimustulosten näkökulmasta. Heikkoudeksi voidaan myös nähdä se, että AR-teknologiat kehittyvät nopeasti ja tutkimustulokset teknologian käytettävyydestä saattavat tulla viiveellä. Tutkimusten tulosten yleistettävyys on hankalaa, sillä tutkimuksien kohteina on hyvin erilaisia AR-laitteita. Voidaan kuitenkin varovasti esittää, että tässä tutkimuksessa esitetyt tulokset ovat yleistettävissä kaikkiin AR-laitteisiin.

Tämän tutkielman perusteella voidaan ehdottaa kolmea jatkotutkimusideaa. Ensimmäiseksi voisi tutkia AR-käyttöliittymien käytettävyyden eri tekijöiden merkitystä tarkemmin, koska AR-teknologia kehittyy jatkuvasti. Tunnistamalla selkeästi käytettävyyden haasteet jo kehittämisen aikana, voidaan parantaa tuotteiden laatua ja nopeuttaa kehitysprosessia. Toiseksi voisi tutkia AR-käyttöliittymien eroavaisuuksia ja yhtäläisyyksiä tavoitteena yhteisten standardien luominen käytettävyydelle. Näin tuotteiden omaksuminen olisi käyttäjille helpompaa, suunnitteluprosessi tehostuisi sekä samalla koko ala hyötyisi yhteisistä standardeista. Kolmanneksi AR-käyttöliittymien käytettävyyden kannalta voisi tutkia, miten vuorovaikutusta käyttäjien ja käyttöliittymien välillä voisi kehittää mahdollisimman tehokkaaksi, intuitiiviseksi ja responsiiviseksi. Näiden tulosten avulla voitaisiin parantaa AR-käyttöliittymien käytettävyyttä eri toimialoilla, mikä edistäisi käytön tehokkuutta ja käyttäjäkokemuksen laatua.

LÄHTEET

- Ahmad, N. A. N., Suhaimi, A. I. H., & Lokman, A. M. (2022). Conceptual Model of Augmented Reality Mobile Application Design (ARMAD) to Enhance user Experience: An Expert Review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(10).
<https://doi.org/10.14569/IJACSA.2022.0131067>
- Baashar, Y., Alkaws, G., Wan Ahmad, W. N., Alomari, M. A., Alhussian, H., & Tiong, S. K. (2023). Towards Wearable Augmented Reality in Healthcare: A Comparative Survey and Analysis of Head-Mounted Displays. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5). Scopus. <https://doi.org/10.3390/ijerph20053940>
- Brooke, J. (1996). SUS: A “quick and dirty” usability scale. In P. Jordan, B. Thomas, & B. Weerdmeester (Eds.), *Usability evaluation in industry* (pp. 189–194). London, UK: Taylor & Francis.
- Chen, S. S.-C., & Duh, H. (2019). Interface of mixed reality: From the past to the future. *CCF TRANSACTIONS ON PERVASIVE COMPUTING AND INTERACTION*, 1(1), 69–87. <https://doi.org/10.1007/s42486-018-0002-8>
- Derby, J. L., & Chaparro, B. S. (2021). The Challenges of Evaluating the Usability of Augmented Reality (AR). *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 65(1), 994–998.
<https://doi.org/10.1177/1071181321651315>
- Dargan, S., Bansal, S., Kumar, M., Mittal, A., & Kumar, K. (2023). Augmented Reality: A Comprehensive Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(2), 1057–1080. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09831-7>
- Dey, A., Billingham, M., Lindeman, R. W., & Swan, J. E. (2018). A Systematic Review of 10 Years of Augmented Reality Usability Studies: 2005 to 2014. *Frontiers in Robotics and AI*, 5.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2018.00037>
- Dużmańska, N., Strojny, P., & Strojny, A. (2018). Can Simulator Sickness Be Avoided? A Review on Temporal Aspects of Simulator Sickness. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02132>
- Endsley, T. C., Sprehn, K. A., Brill, R. M., Ryan, K. J., Vincent, E. C., & Martin, J. M. (2017). Augmented Reality Design Heuristics: Designing for Dynamic Interactions. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 61(1), 2100–2104. <https://doi.org/10.1177/1541931213602007>
- Funk, M., Kosch, T., & Schmidt, A. (2016). Interactive worker assistance: Comparing the effects of in-situ projection, head-mounted displays, tablet, and paper instructions. *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, 934–939.
<https://doi.org/10.1145/2971648.2971706>

- Galitz, W. O. (2007). *The Essential Guide to User Interface Design: An Introduction to GUI Design Principles and Techniques*. John Wiley & Sons.
- Ghazwani, Y., & Smith, S. (2020). Interaction in Augmented Reality: Challenges to Enhance User Experience. *Proceedings of the 2020 4th International Conference on Virtual and Augmented Reality Simulations*, 39–44. <https://doi.org/10.1145/3385378.3385384>
- Gutierrez, L. E., Betts, M. M., Wightman, P., Salazar, A., Jabba, D., & Nieto, W. (2022). Characterization of Quality Attributes to Evaluate the User Experience in Augmented Reality. *IEEE Access*, 10, 112639–112656. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3216860>
- Hillmann, C. (2021). UX for XR User Experience Design and Strategies for Immersive Technologies. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-7020-2_1
- Hu, S., Rong, L., Han, J., Zhang, D., & Jiang, W. (2023). The Effects of Interaction Mode and Individual Differences on Usability and User Experience of Mobile Augmented Reality Navigation. *IEEE Access*, 11, 41783–41795. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3271522>
- Husár, J., & Knapčíková, L. (2023). Implementation of Augmented Reality in Smart Engineering Manufacturing: Literature Review. *Mobile Networks and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s11036-023-02121-x>
- ISO. (2019). Ergonomics of human-system interaction – Part 210: Human-centred design for interactive systems. Haettu 27. maaliskuuta 2024, osoitteesta <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:9241:-210:ed-2:v1:en>
- Jang, Y. (2022). Satisfied or not: User experience of mobile augmented reality in using natural language processing techniques on review comments. *Virtual Reality: The Journal of the Virtual Reality Society*, 26(3), 839–848. <https://doi.org/10.1007/s10055-021-00599-y>
- Javid, I., & Sidhu, M. S. (2022). Acceptance of dance training system based on augmented reality and technology acceptance model (TAM). *Virtual Reality*, 26(1), 33–54. <https://doi.org/10.1007/s10055-021-00529-y>
- Jeffri, N. F. S., & Rambli, D. R. A. (2021). A review of augmented reality systems and their effects on mental workload and task performance. *HELIYON*, 7(3), e06277. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06277>
- Krüger, J. M. (2022). Learning with augmented reality: Impact of dimensionality and spatial abilities. *Computers and Education Open*, 3, 100065-. <https://doi.org/10.1016/j.caeo.2021.100065>
- Law, E. L.-C., & Heintz, M. (2021). Augmented reality applications for K-12 education: A systematic review from the usability and user experience perspective. *International Journal of Child-Computer Interaction*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2021.100321>

- Lima, I. B., & Hwang, W. (2023). Effects of Heuristic Type, User Interaction Level, and Evaluator's Characteristics on Usability Metrics of Augmented Reality (AR) User Interfaces. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 0(0), 1–18. <https://doi.org/10.1080/10447318.2022.2163769>
- Maqbool, B., & Herold, S. (2024). Potential effectiveness and efficiency issues in usability evaluation within digital health: A systematic literature review. *Journal of Systems and Software*, 208, 111881. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2023.111881>
- Nielsen, J., & Molich, R. (1990). Heuristic evaluation of user interfaces. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 249–256. <https://doi.org/10.1145/97243.97281>
- Nielsen, J. (1994) 10 Usability Heuristics for User Interface Design. *Nielsen Norman Group*. Haettu 27. maaliskuuta 2024, osoitteesta: <https://www.nngroup.com/articles/ten-usability-heuristics/>
- Nielsen, J. (2012) Usability 101: Introduction to Usability. *Nielsen Norman Group*. Haettu 27. maaliskuuta 2024, osoitteesta: <https://www.nngroup.com/articles/usability-101-introduction-to-usability/>
- Norman, D. & Nielsen, J. (1998). The Definition of User Experience (UX) Nielsen Norman Group. Haettu 27. maaliskuuta 2024, osoitteesta: <https://www.nngroup.com/articles/definition-user-experience/>
- Oyman, M., Bal, D., & Ozer, S. (2022). Extending the technology acceptance model to explain how perceived augmented reality affects consumers' perceptions. *Computers in Human Behavior*, 128, 107127. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2021.107127>
- Porter, M. E., & Heppelmann, J. E. (2017). Why every organization needs an augmented reality strategy. *Harvard Business Review*, 95(6), 46–57. Haettu 12. helmikuuta 2024 osoitteesta: <https://hbr.org/2017/11/why-every-organization-needs-an-augmented-reality-strategy>
- Ramli, R. Z. (2023). Augmented reality: A systematic review between usability and learning experience. *Interactive Learning Environments*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/10494820.2023.2255230>
- Sahu, C. K., Young, C., & Rai, R. (2021). Artificial intelligence (AI) in augmented reality (AR)-assisted manufacturing applications: A review. *International Journal of Production Research*, 59(16), 4903–4959. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1859636>
- Salman, F. A. (2023). User Experience In Augmented Reality: A Review Of Studies. 20(3). Haettu 27. maaliskuuta 2024, osoitteesta: [https://www.webology.org/data-cms/articles/20230715121016pmWEBOLOGY%2020%20\(3\)%20-%201.pdf](https://www.webology.org/data-cms/articles/20230715121016pmWEBOLOGY%2020%20(3)%20-%201.pdf)

- Sinlapanuntakul, P. (2023). Exploring the user experience (UX) of a multi-window augmented reality environment. *Frontiers in Virtual Reality*, 4. <https://doi.org/10.3389/frvir.2023.1194019>
- Syberfeldt, A., Danielsson, O., & Gustavsson, P. (2017). Augmented Reality Smart Glasses in the Smart Factory: Product Evaluation Guidelines and Review of Available Products. *IEEE ACCESS*, 5, 9118–9130. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2703952>
- Vigkos, A., Bevacqua, D., Turturro, L., Kuehl, S., Fox, T., Diestre, P., & Sørensen, S. Y. (2022). VR/AR Industrial Coalition: Strategic paper. *Publications Office of the European Union*. <https://data.europa.eu/doi/10.2759/197536>
- Yuan, Y. (2018). Paving the Road for Virtual and Augmented Reality [Standards]. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 7(1), 117–128. <https://doi.org/10.1109/MCE.2017.2755338>