

Matias Laitinen

**Keinonäkö- ja parannellun näön järjestelmien
käyttöönotto uuden sukupolven ilmailussa**

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

18. heinäkuuta 2015

Jyväskylän yliopisto

Tietotekniikan laitos

Tekijä: Matias Laitinen

Yhteystiedot: matias.laitinen@gmail.com Vesa Lappalainen

Työn nimi: Keinonäkö- ja parannellun näön järjestelmien käyttöönotto uuden sukupolven ilmailussa

Title in English: Use of Synthetic and Enhanced Vision Systems in Next Generation Aviation

Työ: Kandidaatintutkielma

Sivumäärä: 28+0

Tiivistelmä: Tähän tulee tiivistelmä (tausta, tavoite, tulokset, johtopäätökset).

Avainsanat: SVS, EVS, ilmailu, näkyvyys, HUD, HDD, lentäminen, lentoturvallisuus, IFR, NextGen, NGATS, EVO

Abstract: Tähän tulee englanninkielinen versio tiivistelmästä.

Keywords: SVS, EVS, synthetic vision, enhanced vision, aviation, HUD, HDD, flying, safety, visibility, IFR, NextGen, NGATS, EVO

Sisältö

1	JOHDANTO	1
2	JÄRJESTELMÄT.....	3
2.1	TODO YHDISTELE SAMANKALTAISET TIEDOT Keinonäköjärjestelmät (Synthetic Vision)	3
2.2	Parannellun näön järjestelmät (Enhanced Vision).....	4
2.3	Lasiohjaamot (Primary Flight Displays, Head-Down Displays)	4
2.4	Heijastusnäytöt (Head-Up Displays)	5
2.5	TODO UPOTA MUIHIN Maatoiminnassa saavutettavia etuja	6
2.6	TODO UPOTA MUIHIN Lentotoiminnassa saavutettavia etuja	7
3	OHJAAJAN SUORITUSKYKY JA KOGNITIIVISET HAASTEET	11
3.1	Tilannetietoisuus (Situational awareness)	11
3.2	? Huomiokyvyn kaventuminen (Attentional tunneling)	13
3.3	Automaatiovinouma (Automation bias).....	15
3.4	Näyttöjen sekavuus (Display clutter)	15
3.5	Akkommodaatiovääristymä (Misaccommodation)	17
4	TODO UPOTA MUIHIN SV- JA EV-JÄRJESTELMIEN TULEVAISUUS	18
4.1	Tulevaisuuden sovelluksia	18
4.2	NextGen ja EVO-konseptit.....	18
5	TODO TULOKSET JA YHTEENVETO	20
	KIRJALLISUUTTA	21

1 Johdanto

Lentoturvallisuusasiat nousevat usein esille medioissa, kun ilmailussa tapahtuu lento-onnettomuuksia tai vaaratilanteita, sillä niissä on osallisena enemmän ihmisiä, kuin esimerkiksi tieliikenneonnettomuuksissa. Nämä onnettomuudet aiheutuvat usein inhimillisistä virheistä.

Näkyvyys on lentokoneen ohjaajalle tärkeää lennettäessä lähellä maata, etenkin laskeutumisen aikana. Sen vuoksi huonot näkyvyysolosuhteet aiheuttavat suuria rajoitteita lentotoiminnalle (Möller & Sachs, 1994). Ohjaajan lentonäkyvyyteen vaikuttavat monet meteorologiset olosuhteet, kuten pimeys, pöly, sumu ja sade (Wickens & Alexander, 2009). Erityisesti sumuisissa olosuhteissa näkyvyys voi huonontua voimakkaasti ja ulkomaailman yksityiskohtia on miltei mahdotonta erottaa (Beier & Gemperlein, 1994).

Kaikilla lentokentillä toimittaessa ovat voimassa tietyt näkyvyysrajoitukset. Kentillä, joilla on käytössä esimerkiksi ILS:n (Instrument Landing System, mittarilähestymisjärjestelmä) kaltaisia lähestymisapuja, on tietty minimikorkeus, johon päästäessä tulee olla mahdollista jatkaa lähestymistä visuaalisesti. Eniten rajoitukset vaikuttavat kentillä, joilla ei tällaisia järjestelmiä ole käytössä. Nämä säännöt ovat voimassa, vaikka lähestyvällä koneella olisikin käytössään nykyaikaiset mittari- ja navigointilaitteet. Möller & Sachs (1994).

Jo ilmailun alkua ajoista asti on ilmailuteollisuus kehittänyt laitteita, joilla voittaa näitä huonon näkyvyyden rajoituksia. Tällaisia voivat olla esimerkiksi lentoasentojärjestelmät, navigointilaitteet, mittarilähestymislaitteet (Instrument Landing System, ILS), liikkuvat karttalaitteet (Moving Maps) sekä maastoesteistä varoittavat järjestelmät (Terrain Awareness and Warning System, TAWS). Näissä voidaan kuitenkin havaita se ongelma, että kaikki nykyaikaisetkin informaation esittämiseen tarkoitetut järjestelmät vaativat ohjaajilta jatkuvaa tiedonhakua ja -käsittelyä pysyäkseen selvillä ilma-aluksensa tulevasta liikkeistä huonon näkyvyyden olosuhteissa (Prinzel ym., 2004).

FSFN:n (Flight Safety Foundation) mukaan miltei 60 % kaupalliseen lentotoimintaan liittyvistä maahansyöksyonnettomuuksista on tapahtunut lähestymisen tai laskeutumisen aikana. Etheringtonin ym. (2000) mukaan ohjattavissa olevan ilma-aluksen törmäys maastoon (Controller Flight Into Terrain, CFIT) on vallitseva onnettomuustyyppi ja vastuussa yli puolesta kaupallisen ilmailun onnettomuuksista. Myös lentokonevalmistaja Boeingin (1996) tilastot tukevat tätä näkemystä. CFIT- onnettomuudet liittyvät yleensä paikka- tai asentotiedon (Situational Awareness, SA) menetykseen lähestymis- ja laskuvaiheessa, kun ohjaajat menettävät käsityksensä suunnasta, korkeudesta ja suhteesta ympäristöön Schnell ym. (2004).

Tämän tutkimuksen tavoitteena on kirjallisuuskatsauksen keinoin ottaa selvää, millä eri tavoin keinonäköjärjestelmiä (Synthetic Vision Systems, SVS) ja parannellun näön järjestelmiä (Enhanced Vision Systems, EVS) käyttämällä on mahdollista parantaa lentäjän tilannetietoisuutta ja mahdollistaa turvallinen ja tehokas lentotoiminta, jopa huonon näkyvyyden olosuhteissa. Tällaisia järjestelmiä on ollut sotilasilmailun käytössä jo pitkän aikaa, mutta siviili-ilmailussa niitä hyödynnetään vasta melko vähän. Kartoittamalla näiden järjestelmien käytettävyyttä ja soveltuvuutta eri tilanteisiin saadaan toivottavasti tehtyä jonkinlaisia johtopäätöksiä niiden turvallisuudesta käyttöönotosta uuden sukupolven ilmailussa.

2 Järjestelmät

2.1 TODO YHDISTELE SAMANKALTAISET TIEDOT Keinonäköjärjestelmät (Synthetic Vision)

Keinonäköjärjestelmillä (Synthetic Vision System, SVS, Synthetic Vision Information System, SVIS) tarkoitetaan keinotekoisien ympäristökuvan luomista tietokoneella (Bailey ym., 2007) tai NASA:n Rockwell Collinsin kanssa kehittämää tällaista teknologiaa käyttävää järjestelmää, SVS (Crawford & Neal, 2006). Prinzelin ym. (2004) mukaan NASA:n ilmailuturvallisuusohjelman osana SVS:n tarkoituksena on eliminoida huono näkyvyys lento-onnettomuuksien aiheuttajana sekä parantaa yleisliike- ja kaupallisen ilmailun operationaalisia valmiuksia.

Kuva luodaan yhdistäen lentoasento- ja tarkkuusnavigointijärjestelmiltä sekä maasto- ja estetietokannoista saatua lennon kannalta tärkeää tietoa. Schnell ym. (2004) toteavat SVIS -järjestelmien olevan uuden sukupolven ohjaamojärjestelmä, joka tulee olemaan tärkeässä osassa tulevaisuuden kaupallisten lentokoneiden ohjaamoissa. Crawford ja Neal kuitenkin (2006) huomauttavat, että tieto ei välttämättä ole aina täysin ajan tasalla, koska se on peräisin tietokannasta. He mainitsevat myös tiedonkäsittelystä aiheutuvan viiveen voivan aiheuttaa hämmennystä, mikäli näkyvyyden palautuessa visuaalinen näkymä ei olekaan yhtenevä järjestelmän esittämän tiedon kanssa.

Suunnitellessa uusia ohjaamoita voidaan ottaa luonnollisesti huomioon SV-näyttöjen tarpeet (forward fit), mutta oman haasteensa asettaa se, miten käytännölliset ja toimivat näyttölaitteet voidaan asentaa vanhempiin ohjaamoihin, tai ohjaamoihin, joissa tilaa on rajallisesti (retro fit). Eräs ratkaisu tilankäyttöön olisi näyttää SVS heijastusnäytöllä, jolloin voitaisiin keskittyä siihen, kuinka parhaiten esittää keinotekoisia kuvia maastosta sen rajoitettujen grafiikkaominaisuuksien vuoksi. Toinen tapa olisi poistaa perinteiset mittarit ja asentaa tilalle keinonäkönäytöt, jolloin puolestaan jäisi selvitettäväksi, millaiset näyttöesitykset toimivat parhaiten miehistön näkökulmasta. Esimerkiksi yleisten ja fotorealististen tekstuurien maastotekstuuriin

käytössä ei olla huomattu suorituskykyeroja ohjaajien välillä, mutta ohjaajat tuntuivat pitävän tuloksista huolimatta fotorealistisia tekstuureja parempana vaihtoehtona. NASA:n ilmailuturvallisuusohjelma onkin tutkimassa keinonäkökonseptia, joka yhdistää yleisten ja fotorealististen tekstuurien tilannetietoisuutta parantavat puolet. (Prinzel ym., 2004).

2.2 Parannellun näön järjestelmät (Enhanced Vision)

Parannellun näön järjestelmillä (Enhanced Vision System, EVS tai Enhanced Flight Vision System, EFVS) tarkoitetaan elektronisen apuvälineen, kuten lämpökameran (Forward-Looking Infrared, FLIR) tai millimetritutkan (Millimeter Wave Radar, MMWR) avulla näytettyä kuvaa ulkomaailmasta (Bailey ym., 2007). Möller ja Sachs (1994) selvittävät optisten järjestelmien olevan passiivisia laitteita, joilla voidaan muodostaa ympäristökuva ilman etäisyystietoa. Sitä vastoin esimerkiksi tutkalla saadaan aktiivisesti etäisyystietoa ympäristöstä, mutta tavallisen näköistä kuvaa on vaikea muodostaa.

Kuten Crawford ja Neal (2006) mainitsevat, voidaan EV-järjestelmiä käyttää yhdessä sekä heijastusnäyttöjen (Head Up Display, HUD), että ohjauspaneelin näyttöjen (Head Down Display, HDD) kanssa, tarjoten lentäjälle lämpökamerakuvaa maastosta ja liikenteestä myös heikoissa valaistus- ja sääolosuhteissa.

2.3 Lasiohjaamot (Primary Flight Displays, Head-Down Displays)

[Onko tämä kappale turha / miten sijoittaisin / Lähde?] Ns. Lasiohjaamossa ainakin osa ohjaamon kojetaulun mittareista on korvattu suurehkolla näytöllä, jossa voidaan esittää mittaritieto selkeästi yhdellä näytöllä, usein keinohorisonttia korostaen. SVS/EVS-tietoa voidaan esittää ja yhdistellä tällaisella näytöllä ja ohjaaja voi joissakin tapauksissa itse valita, mitä näytöllä näkyy.

2.4 Heijastusnäytöt (Head-Up Displays)

SVS/EVS-tietoa voidaan esittää myös heijastusnäyttöjen (Head-Up Display, HUD) avulla. HUD-näytöissä haluttu informaatio ja symbolit heijastetaan läpinäyväälle näytölle, josta ohjaaja katsoo läpi. Tällöin on mahdollista nähdä yhtä aikaa näytöllä oleva tieto sekä ulkona oleva näkymä, mikä mahdollistaa vähemmän aikaa käytettävän mittaritaulun tarkkailuun ja ympäristön seuraamiseen on helpompaa. (Crawford & Neal, 2006)

Ensimmäiset HUD:t olivat käytössä 1950-luvulla ja niitä käytettiin tähtäiminä, eikä pääasiallisesti lentomittaristona (Crawford & Neal, 2006). Ensimmäistä kertaa HUD oli käytössä koneen lentomittaritiedon näyttämiseen tarkoitettuna välineenä Hawker Siddeley Buccaneer -koneessa vuonna 1960 (Weintraub & Ensing, 1992). Tämä HUD koostui keinohorisontista sekä lentokoneen asentoa esittävästä symbolista. Korkeus ja nopeus näytettiin digitaalisesti ja ohjaintietokone näytti karkeaa opastustietoa. Nykyäänkin heijastusnäytöissä käytetään samankaltaista symbolologiaa. HUD:a käytetään visuaalisena apuna kahdessa päätehtävässä: näkölähestymisessä sekä siirryttäessä mittarilento-olosuhteista visuaaliseen laskeutumiseen. HUD:n käytöstä päättää koneella operoiva lentoyhtiö. (Crawford & Neal, 2006)

HUD:t ovat tulossa käyttöön myös yleisilmailun käyttöön osaltaan sotilas- ja siviilipuolella havaittujen etujen ansiosta (Ververs & Wickens, 1998). Crawford ja Neal (2006) mainitsevat kuitenkin, ettei sotilaspuolen tutkimustuloksia voida helposti soveltaa sellaisenaan kaupalliselle sektorille erilaisten varusteiden ja lentotilanteiden vuoksi. Verrattuna saman informaation näyttämiseen näkökentän alapuolella sijaitsevassa perinteisessä mittaritaulussa tai HDD-näytöillä, voidaan HUD:lla tyypillisesti saavuttaa parempi suorituskyky etenkin seuraavilla alueilla:

- Vähemmän aikaa katse mittaritaulussa (head-down time) kriittisissä lennon vaiheissa ja vähemmän tarvetta tarkentaa katsetta läheltä kauas (mittareista ulkomaailmaan) (May & Wickens, 1995)
- Parempi lentoreitin säilyttäminen (Fischer ym., 1980; Lauber ym., 1982; Wickens & Long, 1995)

- Parempi tietoisuus ulkomailmasta ja odotettavissa olevien tapahtumien tai vaaroitusten havaitseminen ulkona tai näytöllä (Fadden ym., 2000; Fischer, 1979; Larish & Wickens, 1991; May & Wickens, 1995; Wickens & Long, 1995)
- Tarkemmat laskeutumiset (Naish, 1964)
- Paremmat nousu- ja laskeutumisminimit joillakin lentokentillä ja ilma-alustyypeillä (Crawford & Neal, 2006)
- Parempi laatu mittaritiedon näyttämisessä (May & Wickens, 1995)

2.5 TODO UPOTA MUIHIN Maatoiminnassa saavutettavia etuja

FAA:n vuoden 2010 turvallisuusselvityksen mukaan 52 928 316 maatoimintaan liittyvän tapahtuman aikana tapahtui 951 kiitotiepoikkeamaa (Runway Incursion), joista 12 oli vakavia. Vaikka tämä luku on suhteessa pieni, kiitotiepoikkeamalla voi olla tuhoisat seuraukset. Suurimpana syynä näissä tapauksissa oli ohjaajan inhimillinen erehdys (63 %). Tilannetietoisuutta parantamalla voitaisiin siis saada merkittävästi vähennettyä kiitotiepoikkeamien määrää. (Prinzel ym., 2013).

Maatoiminnassa lennonjohdon, koneiden ohjaajien sekä ajoneuvonkuljettajien tilannetietoisuutta pyritään pitämään yllä tarjoamalla visuaalisia merkkejä omasta sijainnista, kulkureiteistä ja tilasta kiito- ja rullausteilla, odotuspaikoilla ja asemata-
soilla. Tämä hoidetaan esimerkiksi valojen, merkintöjen ja opasteiden avulla. Tällaisia järjestelmiä kutsutaan nimellä Surface Movement Guidance and Control System (SMGCS). (Prinzel ym., 2013).

Maatoiminnan tilannetietoa ylläpitäviä järjestelmiä voitaisiin myös käyttää ohjaamoissa. Tällaisista järjestelmistä voisi Prinzelin ym. (2013) mukaan olla hyötyä, varsinkin miehistön näkyvyyden parantamisessa keinotekoisesti sekä tilannetietoisuuden (paikka- ja reittitiedon ja mahdollisesti myös liikenne- ja estetiedon) parantamisessa erilaisten karttajärjestelmien avulla. Etenkin yöllä, tai savun tai pölyn haitatessa näkyvyyttä EV-järjestelmät voivat auttaa ohjaajia toimimaan turvallisemmin maassa (Prinzel ym., 2013). Käyttämällä infrapunakameroita, jopa tiheän sumun olosuhteissa havaittaisiin paremmin esteitä, kuten henkilöstöä, ajoneuvoja ja lait-

teistoja (Beier & Gemperlein, 1994).

Prinzelin ym. (2013) tutkimuksen perusteella pelkkä EV-järjestelmien käyttö ilman karttaa ei merkittävästi paranna toimintaa maassa. Myös ohjaajat arvioivat AMM-karttojen olevan olennaisessa osassa maatoimintaa ja yhdessä EV sekä AMM toivat huomattavia etuja, esimerkiksi mahdollistamalla toiminnan entistä huonomman näkyvyyden olosuhteissa kentillä, joilla on vain vähän tai ei lainkaan rullausapuja käytössä. (Prinzel ym., 2013).

Prinzel ym. (2013) toteavat huonon näkyvyyden aiheuttamien toiminnan hidastumisten ja viivästysten maatoiminnassa olevan kasvavasti vaikuttamassa myös ilmatilankäytön viiveisiin. Huonon näkyvyyden olosuhteissa ohjaajien ja ajoneuvonkuljettajien tulee säilyttää tilannetietoisuutensa varmistaakseen, että maatoiminta on turvallista ja tehokasta. FAA:n mukaan (2001) Lennon vaarallisin vaihe onkin juuri maassa rullaaminen.

Hooeyn & Foylen (2007) tutkimuksen mukaan 17% yö- tai huonon näkyvyyden olosuhteissa tapahtuneessa rullauskokeessa tuli esille navigointivirheitä, jotka saatiin korjattua liikkuvien lentokenttäkarttojen (Airport Moving Map, AMM) avulla. Liikkuvat kartat parantaisivat huomattavasti ohjaajan tilannetietoisuutta, toteavat myös Möller ja Sachs (1994).

2.6 TODO UPOTA MUIHIN Lentotoiminnassa saavutettavia etuja

Bennet ja Flach (1994) väittävät tiedon näyttämisen ohjaamoissa dynaamisten ja graafisten esitysten avulla johtavan ihmiskeskeisempään malliin, jossa jatkuva tiedonsaanti näyttäisi luonnollisen kaltaiset rajat turvalliselle toiminnalle. Tällöin korostuisi ihmisen joustavuus käyttää luonnollista ja koodattua informaatiota parhaiten hyväkseen.

Luonnollisella informaatiolla käsitetään tietoa, jota saadaan samalla tavoin kuin näkölento-olosuhteissa katsomalla ulos ohjaamosta. Koodattu informaatio sen sijaan vaatii ohjaajalta erikseen sen todellisen arvon ymmärtämistä. Luonnollista in-

formaatiota voi olla esimerkiksi korkeuden silmämääräinen arviointi ja koodattua informaatiota korkeusmittarin näyttämä. (Prinzel ym., 2004). SV -järjestelmien avulla voidaan esittää tällaista luonnollisen kaltaista ja intuitiivista informaatiota, jota on helppo käsitellä (Wickens & Andre, 1990).

SVS-teknologia voi mahdollistaa rajoitetusta näkyvyydestä aiheutuvien ongelmien ratkaisemisen visuaalisesti, tehden lentotoiminnasta säästä riippumatta samanlaista kuin kirkkaassa päivänvalossa ja parantaen ohjaajien tilannetietoisuutta (Prinzel ym., 2004). Koska rajoittunut näkyvyys on suurimpana tekijänä monissa kohtalokissa lento-onnettomuuksissa (Boeing, 1996), voisi SVS:n käytöllä olla merkittävä vaikutus turvallisuuteen. Jo pelkät lentoturvallisuuden hyödyt, joita SVS mahdollistaa, ovat tarpeeksi aiheen tutkimiselle, mutta koska kyseinen järjestelmä on hyvin kallis, on löydettävä myös operationaalisia ja taloudellisia hyötyjä (Prinzel ym., 2004).

Seuraavanlaisia hyötyjä ainakin NASA (2001) arvioi voitavan saavuttaa kasvavan lentoliikenteen myötä esimerkiksi seuraavien etujen kautta:

- Pienempi ajankäytön tarve kiitoteillä huonon näkyvyyden olosuhteissa
- Pienemmät lähtö - ja tulominimit
- Helpommin sallittavat erilaiset lähestymistavat, etenkin rinnakkaisille kiitoteille
- Pienemmät porrastukset saapuvien ilma-alusten välillä
- Toisistaan riippumattoman toiminnan mahdollistaminen rinnakkaisilla, lähekkäin sijaitsevilla kiitoteillä

Myös Schnellin ym. (2004) mukaan SVIS-järjestelmät antavat ohjaajille tehtäväkohtaista tietoa ja opastusta, jota tarvitaan lennettäessä monimutkaisia, kaartuvia lähestymispolkuja. Lisäksi hekin mainitsevat nykyisen ilmatilan olevan varsinkin joillain lähestymisalueilla kapasiteettinsa rajoilla. Jo pieniki muutos säätilassa tai laitteisto-ongelmat lentokentällä voivat aiheuttaa liikenteen ruuhkautumisen. SVIS-järjestelmistä kaavaillaan mahdollista ratkaisua tähän.

Bailey ym. (2007) väittävät SV-järjestelmillä saatavan huomattavia parannuksia maas-

toestetietouteen ja että se voisi vähentää CFIT-onnettomuuksien riskiä nykyiseen ohjaamoissa käytettävään teknologiaan verrattuna. Tästä samaa mieltä vaikuttavat olevan myös Schnell ym. (2004) todetessaan, että SVIS voisi olla avainteknologia CFIT-onnettomuuksien vähentämisessä.

Tutkijat selvittävät SV- ja EV-järjestelmien yhdistämismahdollisuuksia (Enhanced Synthetic Vision System). Tällainen järjestelmä voisi antaa ohjaajalle liikennetietoa samalla tavoin kuin lennettäessä selkeässä säässä päivänvalossa. Esitettäessä paljon tietoa eri järjestelmistä samalla näytöllä, on otettava huomioon inhimilliset tekijät, lentäjän suorituskyky, ongelmat ja turvallisuuskohdat. (Crawford & Neal, 2006)

SV-EV yhdistäminen, tähän kuva (Möller & Sachs, 1994)

Nordwallin (1993) mukaan heijastusnäytön ja lämpökameran yhdistelmällä saavutetaan esimerkiksi sumussa huomattavasti parempi kuva ympäristöstä, kuin mitä paljaalla silmällä voitaisiin. Beierin ja Gemperleinin (1994) tutkimuksen perusteella aivan tiheässä sumussa, jossa näkyvyydet ovat 300m tai vähemmän, ei lämpökameroita käyttämällä kuitenkaan saada parannusta näkyvyyteen. Myös Crawford ja Neal (2006) toteavat kovan sumun, sateen tai pölyn heikentävän lämpökameralla saavutettavia etuja. Tällaisissa tapauksissa lähestymisessä tarvittaisiin esimerkiksi tutkajärjestelmä ympäristökuvaa luomaan.

Baileyn ym.(2007) mukaan näiden teknologioiden optimaalisin yhdistelmä olisi näyttää ohjaamomiehistölle suoraan keinonäköjärjestelmän informaatiota, mutta EV-järjestelmä toimisi ikäänkuin taustalla, suorittaen navigaatiovirheiden korjausta, tietokannan eheyden valvontaa sekä reaaliaikaista esteentunnistusta. Kuvanprosessointi toimisi automaattisesti taustalla ja voitaisiin näyttää ohjaajille tietoa säästä rippumatta.

Schnell ym. (2004) lisäävät, että SVIS:n käyttö yhdessä GPS-navigointijärjestelmien kanssa voisi mahdollistaa uusia jatkuvan laskun kaartolähestymismenetelmiä, jotka olisivat nykyisiä suorita ja portaattaisia lähestymisiä tehokkaampia. Tällaisia lähestymismenetelmiä miehistön on vaikeaa suorittaa perinteisillä lentonäyttöjärjestelmillä. Etenkin ajallisesti kaartolähestymisiä on haastavaa käsittää verbaalisesti tai pa-

perilla. SVIS helpottaisi asiaa ilmassa sijaitsevalla keinotekoisella, kolmiulotteisella tunnelilla, jota on helppo seurata (Barrows & Powell, 1999).

Ehkä kuvia tähän vielä (Schnell ym., 2004) *TODO*:

3 Ohjaajan suorituskky ja kognitiiviset haasteet

Ihmisen suorituskky aiheuttaa paljon haasteita, kun kehitetään uusia tapoja esittää tietoa ohjaamomiehistölle. Seuraavaksi käsitellään joitakin tällaisia haasteita, joita keinoakö- ja parannellun näön järjestelmiä kehiteltäessä tulisi ottaa huomioon.

3.1 Tilannetietoisuus (Situational awareness)

Hyvän tilannetietoisuuden ylläpitäminen on erittäin olennaista turvallisen lennon kannalta. Schnell ym. (2004) toteavat tilannetietoisuuden olevan menetetty, mikäli ohjaamomomiehistö ei osaa vastata seuraaviin kysymyksiin:

- Missä ollaan?
- Minne ollaan menossa?
- Mitä tehdä, kun päästään sinne?

Lennettäessä mittarilahestymisiä haastavissa olosuhteissa on tärkeintä tietää oman tilankäytön vaatimukset ja maaston sille asettamat haasteet. Lisäksi Schnell ym. (2004) mainitsevat tilannetietoisuuden voivan olla myös ajallista, sillä miehistön tulisi olla jatkuvasti selvillä siitä, mitä tehtäviä on suoritettava missäkin vaiheessa lentoa.

Tilannetietoisuuden kadotessa hetkellisesti voidaan joutua epätavalliseen lentotilaan. Tällöin on olennaista, kuinka nopeasti saadaan tilannetietoisuus palutettua ja virheellinen lentoasento saadaan oikaistua tehokkaasti. Käytettäessä perinteisiä mittareita tai ohjainpaneelissa sijaitsevaa näyttölaitetta, voidaan helposti värien avulla kertoa ohjaajalle, missä päin maa ja taivas sijaitsevat. Sen sijaan ainakin nykyiset monokromaattiset heijastusnäytöt aiheuttavat haasteita, kun lennetään mittarilento-olosuhteissa ja joudutaan yllättäen epätavalliseen lentotilaan.

Newman (2000) on listannut HUD:en ominaisuuksia, jotka saattavat vaikeuttaa oikaisua epätavallisista lentotiloista:

- Merkistön sekavuus (Clutter)
- Näytön kehykset (Framing)
- Silmän tarkentumista häiritsevät tekijät (Accommodation traps)
- Ylösalaiset symbolit
- Digitaalisen tiedon esittäminen
- Todellisen kokoiset pituuskallistusmerkinnät
- Näytön käyttäytyminen ohitettaessa suoraan ylös (zenith) tai alas (nadir) -merkinnät
- Nopeusvektorin hallinta

Digitaalisessa muodossa olevan tiedon hahmottaminen nopeasti voi olla hankalaa, mutta analogiset nauhat ja osoittimet voivat lisätä heijastusnäytön sekavuutta (2003). Todellisen kokoiset pituuskallistusmerkinnät voivat nopeasti edetessään olla myös vaikeita hahmottaa. Newmanin (1995) mukaan tällaisissa tilanteissa pituuskallistusmerkintöjen tiivistäminen hidastaisi niiden liikettä ja saada ohjaajan tunnistamaan paremmin epätavalliseen lentotilaan joutumisen. Mikäli heijastusnäytön nopeusvektorisymbolia käytetään hallitsevana havaintotekijänä voidaan joutua tilaan, jossa todellinen kohtauskulma on ylempänä kuin lentosuunta ja tällöin on virheellistä vetää sauvasta, vaikka nopeusvektori onkin matalalla (Crawford & Neal, 2006). FAA on ohjeistanut näyttöjen suunnittelijoita ottamaan huomioon, että mikäli heijastusnäytöllä käytetään erityistä merkistöä ohjeistamaan oikaisussa vaadittavia ohjainliikkeitä, tulisi käyttää sellaisia symboleja, jotka eivät sekoitu tavanomaisesti näkyvissä oleviin indikaattoreihin (Crawford & Neal, 2006).

Monista nykyaikaisista varoitujärjestelmistä poiketen SVS-järjestelmät voisivat osaltaan jo ennaltaehkäistä vaarallisiin tilanteisiin joutumista, sen sijaan että toimivat vasta tilanteen sattuessa. (Schnell ym., 2004). Newman (2000) mainitseekin heijastusnäyttöjen käyttämisessä saavutettavat hyödyt ylittävät niiden mahdolliset haittavaikutukset.

3.2 ? Huomiokyvyn kaventuminen (Attentional tunneling)

HUD-näyttöä käytettäessä voisi olettaa, että ohjaajan on helpompi havaita ulkona tapahtuvia asioita, kun katsetta ei tarvitse siirtää ohjaintaulusta ylös havaintojen tekemiseksi. Useat tutkimukset (Fischer ym., 1980; Weintraub & Ensing, 1992; Wickens & Long, 1995; Wickens & Alexander, 2009) kuitenkin osoittavat, että heijastusnäytön symbolit voivat kiinnittää liikaa ohjaajan huomiota puoleensa ja heikentää hänen kykyään havainnoida ennalta odottamattomia ympäristön tapahtumia. Samankaltaisesta ilmiöstä on kyse, kun esimerkiksi puhutaan puhelimeen autolla ajaessa, mikä voi johtaa huomion keskittymiseen keskusteluun ajamisen sijaan (Horrey & Wickens, 2006; Strayer & Drews, 2007; Strayer ym., 2001). Wickens ja Alexander (2009) toteavat, että näkökentän sisälläkään olevat objektit eivät automaattisesti herätä tarpeeksi huomiota ja määrittelevät huomiokyvyn kaventumisen (attentional tunneling): *"The allocation of attention to a particular channel of information, diagnostic hypothesis, or task goal, for a duration that is longer than optimal, given the expected cost of neglecting events on other channels, failing to consider other hypotheses, or failing to perform other tasks"*.

Huomiokyvyn kaventumisen voimakkuuteen vaikuttaa huomiota vaativien tehtävien luonne, sekä tapa, jolla tietoa aistitaan. Selkeän sään olosuhteissa ohjaajan huomiokyky keskittyy selvästi enemmän ulos, kun oikea horisontti on paremmin näkyvissä ja näin ollen heijastusnäytön symboleita suurempana tarjoaa paremman näytämisen asentotiedosta (Ververs & Wickens, 1998). Crawford ja Neal (2006) toteavat ympäristön kanssa yhtenevien (conformal) HUD:n symbolien helpottavan ymmärtämistä. Wickensin ja Hollandsin mukaan (2000) ihmisen onkin helpompi havaita ympäristössään tapahtuvia asioita, mikäli heidän huomionsa on keskittynyt alueelle, jossa tapahtumat esiintyvät. Esimerkiksi samankaltaisten objektien ryhmitteleminen saattaa tukea huomiokyvyn jakautumista, mutta vaikeuttaa keskittymistä yhteen tiettyyn asiaan näytöllä. Samalla tavoin dynaamiset, liikkuvat kohteet voivat herättää erittäin paljon huomiota muilta visuaalisilta elementeiltä (Crawford & Neal, 2006).

Ohjaajan huomiokykyä tutkittaessa tulee ottaa huomioon, suunnitellaanko tutkitta-

via järjestelmiä käytettävän yhden vai useamman ohjaajan miehistöllä, sillä molemmat ohjaajat useinkaan keskitty lennon aikana samojen työtehtävien hoitamiseen, vaan jakavat niitä keskenään, ja esimerkiksi ulkona sijaitsevien odottamattomien tapahtumien havainnointi voi kuulua enemmän toisen ohjaajan työtehtäviin (Crawford & Neal, 2006). Kehitettäessä järjestelmiä yleisilmailun tarpeisiin tulisi huomioida huomiokyvyn kaventumisen tutkimuksissa painottaa sitä, kuinka HUD:n käyttö vaikuttaa ulkona esiintyvien tapahtumien havainnointiin VFR-olosuhteissa, kun ohjaajalla on päävastuu riittävän erotuksen säilyttämisestä (Ververs & Wickens, 1998) sekä ohjaajan huomiokykyä toimittaessa yksin ohjaamossa (Crawford & Neal, 2006).

Mikäli HUD- tai HDD-näyttöä käytetään keinonäköjärjestelmän tuottaman kolmiulotteisen kuvan näyttöön, saattaa ohjaaja uppoutua aidontuntuiseen 3D-näkymään (3D immersion) ja jättää muiden näyttöjen näyttämää tietoa tai ulkopuolella sijaitsevia tapahtumia huomioimatta (Olmos ym., 2000). Tästä on luonnollisesti haittaa silloin, mikäli ulos katsomalla on saatavilla sellaista olennaista tietoa, mitä keinonäköjärjestelmän näyttämä ei sisällä (Foyle & Hooey, 2003). Crawfordin ja Nealin (2006) tutkimukset osoittavat, että HUD:n käyttö voi nopeuttaa odotettavissa olevien tapahtumien havainnointia näytöllä, mutta hidastaa sekä lähellä että kaukana esiintyvien, odottamattomien tapahtumien huomaamista. Tämä ero on huomattava etenkin työkuormituksen (workload) kasvaessa (Larish & Wickens, 1991).

On todennäköistä, että ohjaajalle odottamattomien tapahtumien määrä vähenee yhdistettyjen SV- ja EV-järjestelmien kehittyessä yhä luotettavammiksi (Korn ym., 2009). Tämä saattaa kuitenkin lisätä luottamusta järjestelmiin liikaa, ja heikentää ennestään sellaisten tapahtumien huomaamista, joista järjestelmä ei syystä tai toisesta pysty ilmoittamaan (Molloy & Parasuraman, 1996). Crawfordin ja Nealin (2006) mukaan ohjaajat pitävät HUD:a yleensä luotettavana eivätkä välttämättä huomaa sivuuttavansa tietoa huomiokyvyn kaventumisen vuoksi. Tällaisen automaatioviannon (Mosier ym., 1998) vaikutuksen huomiokyvyn kaventumiseen mainitsevat myös Wickens ja Alexander (2009). Seuraavaksi käsitellään hieman tarkemmin automaatioviannoa ja sen vaikutuksia. [Onko näin hyvä?]

3.3 Automaatiovinouma (Automation bias)

Osa kognitiivisista lennonaikaisista tehtävistä (reitinlaskenta, navigointi, järjestelmien vikailmoitukset) voidaan hoitaa automatiikan avulla tai päätöksentekoa helpottavien työkalujen avustuksella. Koska ohjaamoympäristössä käsitellään entistä enemmän ja monimutkaisempaa tietoa, on odotettavissa, että ohjaamoautomatiikan määrä lisääntyy nopeasti uuden sukupolven ohjaamoissa. Vaikka tiedon käsittelyn ja varastoinnin tehostuminen onkin hyödyksi, automatiikkaan tottuminen muuttaa käyttäjäkokemusta ja toimintaa sekä nostaa esiin uudenlaisen käyttäjäongelman, automaatiovinouman (automation bias). Automaatiovinoumalla tarkoitetaan virheitä, jotka aiheutuvat siitä, että käyttäjä luottaa liikaa automaatioon ja korvaa automaattisten järjestelmien luomilla merkeillä muun aktiivisen tiedonhakunsa ja -käsittelynsä. (Mosier ym., 1998).

Ihmiselle on luonnollista pyrkiä toimimaan siten, että hän joutuu käyttämään mahdollisimman vähän vaivaa kognitiiviseen työskentelyyn ja usein erilaiset oikopolut ja heuristiikat tarjoavat siihen parhaan mahdollisuuden (Fiske & Taylor, 1994). Tämä houkuttelee käyttämään automaattisia merkkejä heuristisesti muun saatavilla olevan informaation sijaan. Mosierin ym. (1994) mukaan automaatiovinouman aiheuttamat laiminlyöntivirheet ovat todennäköisimpiä matkalentovaiheen aikana, kun ohjelmoidaan jokin järjestelmä suorittamaan tehtävää ja luotetaan täysin siihen, tarkastelematta muita merkkejä, jotka saattaisivat viestiä epätavallisuuksista tai vikatilanteista. Käyttäjän vastuuntuntoisuus ja kokemus vaikuttavat huomattavasti siihen, tarkistaako hän automatiikan antamien merkkien oikeellisuuden muita menetelmiä käyttäen, vai jättääkö ne huomiotta (Mosier ym., 1998).

3.4 Näyttöjen sekavuus (Display clutter)

Tehokkaan ohjaamotyöskentelyn kannalta on tärkeää, että vain tehtävän kannalta oleellisin tieto näytetään ohjaajalle, jotta sitä on helpompi hahmottaa ja käsitellä (Ververs & Wickens, 1998). Muuttuvien tilanteisiin on kyettävä reagoimaan nopeasti ja liiallinen informaation määrä voi vaikeuttaa tiedon etsintää. Piirretäessä tietoa

HUD:lle on myös vaarana, että liialliset symbolit peittävät näkyvyyttä ulos. Crawford ja Neal (2006) toteavat sekavuuden aiheuttavan huomiokyvyn kaventumista, jota käsiteltiin tässä tutkielmassa tarkemmin hieman aiemmin. Myös Ververs ja Wickens (1996) mainitsevat näytön sekavuuden (clutter) eliminoivan joitakin HUD:sta saatavia hyötyjä. Sekavuus saattaa vaikeuttaa tehtävän kannalta tärkeän tiedon havainnointia (Nikolic ym., 2004; Stelzer & Wickens, 2006; Wickens ym., 2003).

Sekavuutta voidaan vähentää erottelemalla SV- ja EV -järjestelmistä tulevaa tietoa (Bailey ym., 2007):

- Tiedon sijainnin mukaisesti (spatial separation). Tämä onnistuu käyttämällä eri näyttöjä, jolloin ohjaaja itse erottaa tarvitsemansa tiedon niistä. HUD:lta on löydyttävä tällöin kaikki tehtävän kannalta kriittinen informaatio, jotta mahdollisimman vähän aikaa tarvitsee käyttää sen etsimiseen katse mittaritaulussa (head-down). Muutoin työkuormitus voi lisääntyä liikaa tai tilannetietoisuus voidaan menettää.
- Ajallisesti (temporal separation). Tässä tapauksessa automaattisesti ajastettu vaihtelu eri tiedonlähteiden välillä on havaittu ohjaajalle manuaalista luonnollisemmaksi.

Sekä näytön symboleissa että ympäristössä esiintyvien tapahtumien huomaaminen on helpompaa käytettäessä heijastusnäyttöä (head-up), kuin mittaritaulun näyttöä (head-down). Tähän vaikuttavat todennäköisesti HUD:n symboleita selkeyttävät paremmat kontrastierot, HDD:n visuaalisen tiedon mukauttamisen tarpeesta aiheutuva viive sekä HUD:n sijainnista johtuva vähäisempi tiedonetsinnän tarve. Vaikka näytön sekavuus voikin hidastaa mittarien ymmärtämistä ja ulkona esiintyvien kohteiden huomaamista, ovat HUD:n käytössä saavutettavat hyödyt silti siitä aiheutuvia haittoja suurempia. (Ververs & Wickens, 1998)

Ververs and Wickens (1996) ovat havainneet myös tehtävän kannalta vähemmän tärkeän tai häiritsevän tiedon himmentämisen auttavan etenkin matkalentovaiheissa ohjaajia reagoimaan nopeammin suunnan, korkeuden ja nopeuden muutoksiin HUD:lla. Kuitenkin myöhemmässä tutkimuksessaan (1998) he rajaavat, että ainoas-

taan HDD:lla tehtävän kannalta hyödyttömän tiedon himmentämisestä olisi merkittävää hyötyä.

Näytettäessä keinonäkö- ja parannellun näön järjestelmien tuottamaa tietoa yhdistetysti, pienenee tarve siirtää katsetta etsittäessä tietoa eri lähteistä. Kuitenkin, tämä saattaa vaikeuttaa tiedon alkuperän hahmottamista ja ymmärtämistä, lisäämällä näytön sekavuutta. Tarpeettoman tiedon poistamisen hallinta (declutter control) mahdollistaa ohjaajan valita, mitä saatavilla olevasta tiedosta renderöidään näytölle, mutta sen käyttö voi kasvattaa työkuormitusta kriittisissä tilanteissa tai jopa tärkeän tiedon tahattoman näyttämättä jättämisen. (Bailey ym., 2007).

3.5 Akkommodaatiovääristymä (Misaccommodation)

Silmän akkommodaatiovääristymäksi kutsutaan tilannetta, jossa katse ja katsojan huomio tarkentuu jokin lähietäisyydellä sijaitsevaan kohteeseen ja vaikeuttaa muiden kohteiden huomiointia sekä koon ja etäisyyden arviointia. Tämän välttämiseksi heijastusnäytöt kohdistetaan usein optiseen äärettömyyteen, jotta näyttäisi, että näytön symbologia sijaitsisi samalla etäisyydellä ulkomaailman kanssa ja näin ollen vähentäisi katseen uudelleentarkentamisen tarvetta (Naish, 1964).

HUD:en kohdistamisen tehokkuudesta ja tärkeydestä vat väitelleet esimerkiksi Newman (1995) sekä Weintraub ja Ensing (1992). Koska erilaiset sääolosuhteet ja HUD:n tarkkuuden taso vaikuttavat huomion kohdistumiseen, ei ole vielä täysin varmaa, vähentävätkö kauas kohdistetut HUD:t akkommodaatiovääristymiä, vai lisäävätkö ne niitä (Crawford & Neal, 2006).

4 TODO UPOTA MUIHIN SV- ja EV-järjestelmien tulevaisuus

4.1 Tulevaisuuden sovelluksia

Keinonäkö- ja parannellun näön järjestelmien käyttöönotosta on hyötyä varsinkin suurta tarkkuutta vaativissa lähestymisissä. Se voi mahdollistaa pienemmän erotuksen vierekkäisille kiitoteille lähestyttäessä tai turvallisemman estevarakorkeuden käyttäen kaartolähestymisiä haastavilla kentillä, joille suorat lähestymiset eivät onnistu. (Schnell ym., 2004).

Avioniikan kehittyessä jatkuvasti opastusjärjestelmät (HITS, highway-in-the-sky), estevaroitussjärjestelmät (Enhanced Ground Proximity Warning System), ja infrapuna-tunnistimet, sekä näiden yhdistäminen ja näyttäminen käyttäen apuna HUD:a yleistyvät. Keinonäkö- ja parannellun näön järjestelmiä voidaan käyttää sekä HUD-että HDD-näytöissä ja luoda ohjaajalle aidontuntuinen kuva kiitotiestä huonoissa-kin sääolosuhteissa, mikä ehkäisee etenkin CFIT-onnettomuuksia. Maatoiminnassa ohjaajat joutuvat luottamaan visuaalisiin merkkeihin ja huonon näkyvyyden olosuhteissa näönparannusjärjestelmillä, kentälläliikkumiskartoilla (Airport Moving Maps) ja kiitotiepoikkeaman ehkäisyjärjestelmillä (Runway Incursion Prevention System) voidaan ehkäistä rullauksen aikana aiheutuvia vaaratilanteita. (Crawford & Neal, 2006).

4.2 NextGen ja EVO-konseptit

Eräs tapa hyödyntää EVS/SVS-järjestelmiä uuden sukupolven ilmailussa on EVO-konsepti (Equivalent Visual Operations), jossa keinonäkö- ja näönparannusjärjestelmiä käyttäen saataisiin tarpeeksi tietä ympäristössä, jotta voitaisiin ulkoisista näkyvyysolosuhteista riippumatta toimia näkölentösääntöjen mukaisesti. Tällainen menettely mahdollistaisi näkölento-olosuhteiden mukaisen operatiivisen toimintatahdin huonommissakin olosuhteissa ja parantaisi turvallisuutta näkölentösäännöillä

toimittaessa myös hyvällä näkyvyydellä toimittaessa. (Prinzel ym., 2013).

whereby Visual Flight Rules (VFR) operational tempos and also, perhaps, operating procedures (such as separation assurance) are maintained independent of the actual weather conditions. One methodology by which the goal EVO might be attainable is to create a virtual visual flight environment for the flight crew, independent of the actual outside weather and visibility conditions, through application of Enhanced Vision (EV) and Synthetic Vision (SV) technologies. (Bailey ym., 2007)

TODO Lisää NextGen -settiä ja viimeistele tuo edellinen.

5 TODO Tulokset ja Yhteenveto

- HUDeista hyötyä: - flight path, paitsi cruise; event detection, paitsi app ja landing ja unexpected - huomion siirto sisään ja ulos sekä unexpected events vaikeaa, mutta ei todisteita että HUD:n käyttö lisää onnettomuusriskiä - lähestyminen ja lasku huonommassa näkyvyydessä - tarkemmat lähestyminen ja lasku - vähemmän head-down time - vähemmän aikaa vaihdossa mittareista ulos - overlaid symbolien käyttöpotentiaali -> SA nousee - lisää tutkimusta tarvitaan, HUD:ien käyttö kasvussa - (Crawford & Neal, 2006) - SV potentiaalia turvallisuuteen, taloudellisuuteen, erityisesti jos toimii retro & forward fit - näyttöjn kasvaessa SV toimivuus paranee - SVS viable retrofit (Prinzel ym., 2004) - SVS parempi kuin perinteiset näytöt (Schnell ym., 2004) - HUD:ien käyttö multicrew, väsymys, (Crawford & Neal, 2006)

- automation bias tärkeää huomioida, kokeneemmat käyttävät jopa enemmän, koska illuusio luotettavuudesta ja cross checking delegoidaan perämiehille - vastuullisuudentunne vaikuttaa automation biasiin (Mosier ym., 1998) - myös suortuskyky hommassa, ennustettavuus ja palaute vaikuttaa - aviate, navigate, communicate tärkeysjärjestys - palautteen lisääminen automaatisoituihin järjestelmiin voisi olla avainasemassa biasin välttämiseksi - saattaa aiheuttaa myös vääriä muistikuvia (Mosier ym., 1998) - attentional tunnelling legitimate concern & attentional training tärkeää (Wickens & Alexander, 2009)

Kirjallisuutta

- Bailey, Randall E. , Kramer, Lynda J. & Prinzel, Lawrence III 2007. *Fusion of Synthetic and Enhanced Vision for All-Weather Commercial Aviation Operations*. NASA Technical Reports Server (NTRS), huhtikuu 2007.
- Barrows, A. & Powell, D. 1999. *Tunnel-in-the-sky cockpit display for complex remote sensing flight trajectories*. In Proceedings of the 4th International Airborne Remote Sensing Conference and 1st Canadian Symposium on Remote Sensing, Ottawa, Canada: ERIM International, s. I452–I459.
- Beier, Kurt & Gemperlein, Hans 2004. *Simulation of Infrared Detection Range at Fog Conditions for Enhanced Vision Systems in Civil Aviation*. Aerospace Science and Technology, 8, s. 63–71.
- Bennet, K.B. & Flach, J.M. 1994. *When automation fails...* . Human performance in automated systems: Current research and trends, s. 229–234.
- Boeing 1994. *Statistical summary of commercial jet aircraft accidents, worldwide operations, 1959–1995*. Seattle, WA: Airplane Safety Engineering, Boeing Commercial Airplane Group.
- Crawford, Jennifer & Neal, Andrew 2006. *A Review of the Perceptual and Cognitive Issues Associated With the Use of Head-Up Displays in Commercial Aviation*. The International Journal of Aviation Psychology, 16:1, s. 1–19.
- Etherington, T.J., Vogl, T.L., Lapis, M.B., & Razo, J.G. 2000. *Synthetic vision information system*. Proceedings of the 19th Digital Avionics Systems Conference, s. 2.A.4–2.A.8.
- Fadden, S. , Wickens, C.D., & Ververs, P.M. 2000. *Costs and benefits of head-up displays: An attention perspective and a meta analysis* (No. 2000-01-5542). 2000 World Aviation Congress, Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.
- Fischer, E. 1979. *The role of cognitive switching in head-up displays*. NASA Contractor Rep. No. 3137, Moffett Field, CA: NASA Ames Research Center.
- Fischer, E. , Haines, R. F. & Price, T. A. 1980. *Cognitive issues in head-up displays*. NASA Tech. Paper No. 1711, Moffett Field, CA: NASA Ames Research Center.
- Fiske, S. T. & Taylor, S. E. 1994. *Social cognition (2nd Ed.)*. New York: McGraw-Hill.

- Foyle, D.C. & Hooey, B.L. 2003. *Improving evaluation and system design through the use of off-nominal testing: A methodology for scenario development*. 12th International Symposium on Aviation Psychology, Dayton, OH: Wright State University, s. 397–402.
- Gerold, A. 2001. *Runway Incursions: The Threat on the Ground*. Avionics Today. Saatavilla WWW-muodossa <http://www.aviationtoday.com/av/commercial/Runway-Incursions-The-Threat-on-the-Ground_12628.html>. Viitattu 1.11.2014.
- Hooey, B.L. & Foyle, D.C. 2007. *Aviation Safety Studies: Taxi Navigation Errors and Synthetic Vision Systems Operations*. Human Performance Modeling in Aviation.
- Horrey, W.J. , & Wickens, C.D. 2006. *Examining the impact of cell phone conversations on driving using meta-analytic techniques*. Human Factors, 48, s. 196–205.
- Kim, Sang-Hwan & Kaber, David. B. 2014. *Examining the Effects of Conformal Terrain Features in Advanced Head-Up Displays on Flight Performance and Pilot Situation Awareness*. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, Volume 24, Issue 4, heinä/elokuu 2014, s. 386–402.
- Kim, Sang-Hwan, Prinzel, Lawrence J. , Kaber, David B. , Alexander , Amy L. , Stelzer, Emily M. , Kaufmann, Karl & Kaber, Veil, Theo 2011. *Multidimensional measure of display clutter and pilot performance for advanced head-up display*. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 82, No. 11, marraskuu 2011, s. 1013–1022.
- Korn, B. , Schmerwitz, S. , Lorenz, B. , & Döhler, H.-U. 2009. *Combining enhanced and synthetic vision for autonomous all weather approach and landing*. International Journal of Aviation Psychology, 19, s. 49–75.
- Larish, I. , & Wickens, C.D. 1991. *Divided attention with superimposed und separated imagery: Implications for head-up displays*. NASA Tech. Rep. No. 914, HUD 91:1, Savoy: University of Illinois, Aviation Research Laboratory.
- Lauber, J.K. , Bray, R.S. , Harrison, R.L. , Hemingway, J.C. & Scott, B.C. 1982. *An operational evaluation of head-up displays for civil transport operation: NASMFAA phase 111 final report*. NASA Tech. Paper No. 1815, Moffett Field, CA: NASA Ames Research Center.
- May, P.A. & Wickens, C.D. 1995. *The role of visual attention in head-up displays: Design*

- implications for varying symbol intensity*. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 39. vuosikokous, s. 50–54. Santa Monica, CA: HFES.
- Molloy, R. , & Parasuraman, R. 1995. *Monitoring an automated system for a single failure: Vigilance and task complexity effects*. Human Factors, 38, s. 311–322.
- Mosier, Kathleen L. , Skitka, Linda J. , Heers, Susan, & Burdick, Mark 1998. *Automation Bias: Decision Making and Performance in High-Tech Cockpits*. The International Journal of Aviation Psychology, 8:1, s. 47–63.
- Mosier, K.L., Skitka, L.J. & Korte, K.J. 1994. *Cognitive and social psychological issues in flight crew/automation interaction..* M. Mouloua & R. Parasuraman (Eds.), Human performance in automated systems: Current research and trends. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc. s. 191–197.
- Möller, H. & Sachs, G. 1994. *Synthetic Vision for Enhancing Poor Visibility Flight Operations*. IEEE AES Systems Magazine, maaliskuu 1994, s. 27–33.
- Naish, J.M. 1964. *Combination of information in superimposed visual fields*. Nature, 202, s. 641–646.
- Newman, R.L. 1995. *Head-up displays: Designing the way ahead*. Aldershot, England: Ashgate.
- Newman, R.L. 2000. *HUDs, HMDs, and SDO: A problem or a bad reputation (Report)*. Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Aerospace Medical Research Laboratory.
- Nikolic, M.I. , Orr, J.M. , & Sarter, N.B. 2004. *Why pilots miss the green box: How display context undermines attention capture*. International Journal of Aviation Psychology, 14, s. 39–52.
- Nordwall, B.D. 1993. *HUD with IR System extends Pilot Vision*. Aviation Week & Space Technology, helmikuu 1993, s. 62–63.
- Olmos, O. , Wickens, C.D., & Chudy, A. 2000. *Tactical displays for combat awareness: An examination of dimensionality and frame of reference concepts and the application of cognitive engineering*. International Journal of Aviation Psychology, 10, s. 247–271.
- Prinzel, Lawrence J. III, Arthur, Jarvis J. , Kramer, Lynda J. , Norman, Robert M. , Bailey, Randall E. , Jones, Denise R. , Karwac, Jerry R. Jr. , Shelton, Kevin J. & Ellis, Kyle K.E. 2013. *Flight-Deck Technologies to Enable NextGen Low Visibility Surface Operations*. NASA Technical Reports Server (NTRS), toukokuu 2013.

- Prinzel, Lawrence J. III, Comstock, J. Raymond Jr. , Glaab, Louis J. , Kramer, Lynda J. , Arthur, Jarvis J. & Barry, John S. 2004. *The Efficacy of Head-Down and Head-Up Synthetic Vision Display Concepts for Retro and Forward-Fit of Commercial Aircraft*. The International Journal of Aviation Psychology, 14:1, s. 53–77.
- Schnell, Thomas, Kwon, Yongjin, Merchant, Sohel & Etherington, Timothy 2004. *Improved Flight Technical Performance in Flight Decks Equipped With Synthetic Vision Information System Displays*. The International Journal of Aviation Psychology, 14:1, s. 79–102.
- Stelzer, E.M. , & Wickens, C.D. 2006. *Pilots strategically compensate for display enlargements in surveillance and flight control tasks*. Human Factors, 48, s. 166–181.
- Strayer, D.L. & Drews, F.A. 2007. *Multitasking in the automobile*. A.F. Kramer, D.A. Wiegmann, & A. Kirlik (Eds.), *Attention: From theory to practice*, Oxford, UK: Oxford University Press, s. 121–133.
- Strayer, D.L. , Drews, F.A. & Johnston, W.A. 2001. *Driven to distraction: Dual-task studies of simulated driving and conversing on cellular telephone*. Psychological Science, 12, s. 462–466.
- Ververs, Patricia May & Wickens, Christopher D. 1996. *Allocation of attention with head-up displays*. Tech. Rep. ARL-96-1/FAA-96-1, Savoy: University of Illinois Institute of Aviation.
- Ververs, Patricia May & Wickens, Christopher D. 1998. *Head-Up Displays: Effect of Clutter, Display Intensity, and Display Location on Pilot Performance*. The International Journal of Aviation Psychology, 8:4, s. 377–403.
- Vygodov, O.V. 2013. *Enhanced and Synthetic Vision Systems Development Based on Integrated Modular Avionics for Civil Aviation*. 32nd Digital Avionics Systems Conference, 6.–10.10.2013.
- Weintraub, D. J. & Ensing, M. 1992. *Human factors issues in head-up display design: The book of HUD*. Wright-Patterson Air Force Base, OH: Crew Station Ergonomics Information Analysis Center., (SOAR, CSERIAC 92-2).
- Wickens, Christopher D. & Alexander, Amy L. 2009. *Attentional Tunneling and Task Management in Synthetic Vision Displays*. The International Journal of Aviation Psychology, 19:2, s. 182–199.

- Wickens, C.D. & Andre, A.D. 1990. *Proximity compatibility principle and information display: Effects of color, space, and objectness on information integration*. Human Factors, 32, s. 61–77.
- Wickens, C.D. & Hollands, J.G. 2000. *Engineering psychology and human performance* (3. painos). Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- Wickens, C.D. & Long, J. 1995. *Object vs. space-based models of visual attention: Implication for the design of head-up displays*. Journal of Experimental Psychology: Applied, 1, s. 179–194.
- Wickens, C.D. , Muthard, E.K. , Alexander, A.L. , Van Olffen, P. & Podczerwinski, E. 2003. *The influences of display highlighting and size and event eccentricity for aviation surveillance*. Proceedings of the 47th annual meeting of the Human Factors & Ergonomics Society, Santa Monica, CA: HFES.
- Williams, D. , Waller, M. , Koelling, J. , Burdette, D. , Doyle, T. , Capron, W. , ym. 2001. !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! *Concept of operations for commercial and business aircraft synthetic vision systems*. NASA Tech. Memo. No. TM-2001-211058.
- Zuschlag, M. 2003. *Certifying head-up displays*. Human Factors Newsletter. 02–22.