

# Kasvosokeuden kuvantaminen toiminnallisella magneettikuvauksella

TURUN YLIOPISTO  
Tietotekniikan laitos  
TkK-tutkielma  
Lääketieteellinen tekniikka ja terveysteknologia  
Maaliskuu 2026  
Aino Riikonen

TURUN YLIOPISTO

Tietotekniikan laitos

AINO RIIKONEN: Kasvosokeuden kuvantaminen toiminnallisella magneettikuvauksella

TkK-tutkielma, 25 s.

Lääketieteellinen tekniikka ja terveysteknologia

Maaliskuu 2026

---

Kasvojentunnistus on keskeinen osa ihmisen sosiaalista vuorovaikutusta ja mahdollistaa yksilöiden tunnistamisen sekä sosiaalisten suhteiden ylläpitämisen. Kasvosokeus eli prosopagnosia on neurologinen häiriö, jossa tämä kyky on heikentynyt. Tämä kirjallisuuskatsaus käsittelee kasvosokeuden kuvantamista ja keskittyy erityisesti toiminnallisen magneettikuvauksen rooliin diagnostiikassa ja tutkimuksissa. Tietoa tutkielmaa varten on haettu PubMed-tietokannasta, ScienceDirect-tietokannasta sekä Web of Science -tietokannasta. Lisäksi tietoa on haettu Duodecimin oppiportista ja Duodecimin lehdestä artikkelihaun avulla. Tarkastelun perusteella hankinnainen kasvosokeus liittyy tyypillisesti rakenteellisiin vaurioihin okkipitotemporaalisella aivoalueella, kun taas kehityksellisessä kasvosokeudessa rakenteelliset poikkeavuudet ovat usein vähäisempiä ja häiriö liittyy enemmän toiminnallisiin muutoksiin.

Toiminnallisen magneettikuvauksen rooli korostuu erityisesti kehityksellisen kasvosokeuden tutkimuksessa, koska se mahdollistaa aivojen toiminnan tarkastelun myös tilanteissa, joissa rakenteelliset muutokset eivät ole selviä.

Asiasanat: toiminnallinen magneettikuvaus, kasvosokeus, aivokuvantaminen

# Sisällys

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Kuvantaminen fMRI:llä</b>	<b>4</b>
2.1	fMRI:n tausta . . . . .	4
2.2	Multimodaalinen aivokuvantaminen . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Kasvosokeus</b>	<b>8</b>
3.1	Kasvojentunnistus . . . . .	8
3.2	Kasvosokeuden eri tyypit . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Kasvosokeuden kuvantaminen</b>	<b>14</b>
4.1	Kehityksellinen kasvosokeus . . . . .	14
4.2	Hankinnainen kasvosokeus . . . . .	17
4.3	Kuvantamiskorrelaatit . . . . .	19
<b>5</b>	<b>Pohdinta</b>	<b>21</b>
<b>6</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>24</b>
	<b>Lähdeluettelo</b>	<b>26</b>

# 1 Johdanto

Aivoperäisten häiriöiden diagnosointi erilaisilla neurokuvantamismenetelmillä on kehittynyt paljon viimeisen vuosisadan aikana. Toiminnalliset kuvausmenetelmät auttavat nimensä mukaisesti mittaamaan kehon fysiologisia mekanismeja ja sen toimintoja. Magneettikuvaus (eng. magnetic resonance imaging, MRI) on yksi yleisimmistä kuvantamismenetelmistä, ja sitä on käytetty laajasti vuodesta 1984 alkaen. Toiminnallinen magneettikuvaus (eng. functional magnetic resonance imaging, fMRI) kehitettiin vuonna 1991 ja tämän kuvantamismenetelmän pohjalta on myöhemmin luotu muita malleja. Toiminnallisella magneettikuvauksella voidaan mitata aivojen alueellista aktivaatiota, mikä on hyödyllistä eri aivoperäisten häiriöiden diagnosoinnissa. Tämä kuvantamismenetelmä on erityisen tehokas silloin, kun aivovaurioita ei ole havaittavissa rakenteellisilla kuvantamismenetelmillä, kuten perinteisellä magneettikuvauksella. [1]

Agnosia-sana on peräisin muinaiskreikan kielestä ja se tarkoittaa kirjaimellisesti tiedon puutetta tai tietämättömyyttä. Ensimmäisen kerran termiä käytettiin vuonna 1891 Sigmund Freudin toimesta, jolla hän viittasi aivovaurioista kärsiviin potilaisiin, jotka olivat menettäneet kykynsä tunnistaa esineitä havaintokyvystä huolimatta. Freud itse ei jatkanut tutkimustaan tällä osa-alueella, mutta termi jäi käyttöön. [2] Agnosia on harvinainen häiriö, missä potilaat eivät pysty tunnistamaan objekteja, ääniä tai henkilöitä. Aistinelimet toimivat normaalisti, mutta prosessointi aivoissa jää puutteelliseksi. Yksi visuaalisen agnosian tunnetuin tyyppi on prosopagnosia eli

kasvosokeus, joka on jälleen kategorisoitavissa pienempiin ryhmiin. Hankinnainen kasvosokeus, jossa kasvosokeus on jonkun trauman, syövän tai muun aivovamman seuraus, on suhteellisen harvinainen. Kehityksellinen eli synnynäinen kasvosokeus on sen sijaan yleisempi häiriö, jota jopa 2,5 prosenttia väestöstä sairastaa. Täsmällinen luku vaihtelee kriteerien perusteella. [3]

Tämän tutkielman tarkoituksena on selvittää, miten toiminnallista magneettikuvausta hyödynnetään aivoperäisten häiriöiden tunnistamisessa. Erityisesti tutkielmassa keskitytään kasvosokeuden eri tyyppien neurokuvantamiseen. Tutkielmassa pyritään löytämään vastaukset seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

**TK1:** Miten kasvojentunnistus eroaa hankinnaista ja kehityksellistä kasvosokeutta sairastavien henkilöiden välillä, ja miten se tulee huomioida kuvantamisessa?

**TK2:** Mitkä ovat kasvosokeuden rakenteelliset ja toiminnalliset korrelaatiot aivokuvantamisessa?

Tutkielma suoritetaan kirjallisuuskatsauksena. Aineistohaku tehtiin pääasiassa PubMed-tietotakannassa, ScienceDirect-tietokannassa ja Web of Science -tietokannassa. Hakusanoina käytettiin muun muassa "fMRI", "functional magnetic resonance imaging", "functional MRI", "prosopagnosia", "acquired prosopagnosia", "developmental prosopagnosia", "congenital prosopagnosia", "agnosia", "functional neuroimaging", "imaging", "neuroimaging", "medical imaging", "brain", "deoxyhemoglobin". Haussa hyödynnettiin myös Boolean operaattoreita kuten OR ja AND. Useimmiten käytetyt hakulauseet olivat: ("acquired prosopagnosia") AND ("fmri" OR "functional MRI" OR "functional neuroimaging" OR "functional magnetic resonance imaging"), ("developmental prosopagnosia" OR "congenital prosopagnosia") AND ("fmri" OR "functional MRI" OR "functional neuroimaging" OR "functional magnetic resonance imaging") sekä "prosopagnosia" AND ("fmri" OR "functional MRI" OR "functional neuroimaging" OR "functional magnetic resonance imaging"). Tämän lisäksi tiedonhakuprosessissa on hyödynnetty löydettyjen artikkelien lähteitä

sekä tietokantojen suosittelimia artikkeleita. Lisäksi aineistoa on haettu Duodecimin oppiportista ja Duodecimin lehdestä artikkelihaun avulla, jossa hakusanoina on käytetty muun muassa "magneettikuvaus", "toiminnallinen magneettikuvaus", "fMRI", "aivotoiminta", "deoksihemoglobiini", "EEG", "aivokuori", "näköjärjestelmä", "näköhäiriö".

Valintakriteereinä käytettiin pääsääntöisesti vuotta 2020 ja myöhempiä julkaisuja, mutta tätä aikaisempia julkaisuja käytettiin myös etenkin taustoituksessa. Perusteena näille valinnoille oli tiedon muuttumattomuus yleisen tiedon sekä toimintaperiaatteiden osalta. Aineistojen valinnat tehtiin otsikoiden, avainsanojen, abstraktin tekstin ja alustavan tarkastelun perusteella. Aineistohakua pyrittiin soveltamaan ja rajaamaan yksityiskohtaisesti jokaista aihetta kohden siten, että tuloksena saatiin mahdollisimman olennaisia aineistoja. Myös päteviksi todettujen tutkijoiden muita julkaisuja tarkasteltiin Google Scholarin profiilihaun avulla ja valittiin aiemmin todettujen valintakriteerien perusteella lähteiksi.

Tutkielman rakenne perustuu kuuteen lukuun. Tämän tutkielman luvussa 2 taustoitetaan toiminnallista magneettikuvausta ja sen toimintaperiaatetta. Multimodaalista kuvantamista sekä sen antamia etuja ja haasteita käsitellään lyhyesti. Tutkielman kolmannessa luvussa taustoitetaan kasvosokeutta ja visuaalista järjestelmää. Luvussa 4 perehdytään eri tyyppin kasvosokeuksien kuvantamiseen sekä niitä vastaaviin kuvantamiskorrelaatteihin. Tutkielman viidennessä luvussa pohditaan nykypäivää ja tulevaisuutta kasvosokeuden kuvantamisessa. Viimeisessä luvussa esitetään tutkielman yhteenveto ja vastataan aiemmin esitettyihin tutkimuskysymyksiin.

## 2 Kuvantaminen fMRI:llä

Toiminnallinen magneettikuvaus eli fMRI on ei-invasiivinen menetelmä, joka mittaa aivojen toimintaa havaitsemalla veren happipitoisuuden muutoksia. Aktivoitunut aivojen alue tarvitsee enemmän happea, jolloin veren virtaus myös lisääntyy. Toiminnallinen magneettikuvaus hyödyntää veressä esiintyvien deoksihemoglobiinin ja oksihemoglobiinin erilaisia magneettisia ominaisuuksia. Deoksihemoglobiini on hapen kulutuksessa esiintyvä proteiini, joka syntyy oksihemoglobiinin luovuttaessa kantamansa hapen. Näiden kahden proteiinityypin ominaisuudet muuttavat magneettikenttien voimakkuuksia. Tämän avulla voidaan arvioida, mikä aivojen alue on aktivoitunut tietyn tehtävän aikana. [4] [5]

### 2.1 fMRI:n tausta

Toiminnallinen magneettikuvaus perustuu veren happipitoisuuden muutokseen sekä veren virtauksen muutokseen kudoksessa. BOLD-mekanismi (eng. blood oxygen level dependent mechanism) eli veren happipitoisuuteen perustuva ilmiö pohjautuu veressä esiintyvän hemoglobiinin eri toiminnallisuuksiin. Oksihemoglobiinilla eli hemoglobiinilla, johon on sitoutunut happi, on erilaiset magneettiset ominaisuudet kuin deoksihemoglobiinilla; oksihemoglobiini on diamagneettinen, kun taas deoksihemoglobiini on paramagneettinen. Aivojen hermostollisesti aktiivisimmilla alueilla verenkierto lisääntyy, ja tällöin oksihemoglobiinin konsentraatio myös suurenee. Veren virtauksen kasvu on suurempi kuin hapenkulutuksen lisääntyminen, minkä vuoksi

aivoalueelle kertyy suhteellisesti enemmän oksihemoglobiinia. Tämä taas vaikuttaa fMRI-signaaliin. Deoksihemoglobiinin ja oksihemoglobiinin suhteen avulla havaitaan lisääntynyt hermostollinen aktiivisuus tilallisella resoluutiolla. [6] [5]

Spatiaalista eli tilallista tarkkuutta voidaan kasvattaa säätämällä gradienttimagneettikentän voimakkuutta. Voimakkuuden säätely muuttaa protonien Larmor-taajuutta sijainnin funktiona, jolloin eri kohdissa olevien protonien signaalit voidaan paikantaa valmiissa kuvassa. Tiettyjä magneettikentän sekvenssejä (eng. pulse sequence) käyttämällä voidaan optimoida spesifisyyttä. Pulssisekvenssi muodostuu radiotaajuuspulssista (eng. radiofrequency pulse, RF-pulse) sekä gradienttimagneettikenttien ja signaalin mittauksen ajoituksista. Näin kuvassa korostuvat vain halutut kudosten ominaisuudet, kuten verisuonet. On kuitenkin tärkeää valita vain oleellimmat sekvenssit, sillä jokainen lisäsekvenssi lisää kuvausajan pituutta. [7] [8]

Magneettikuvauksessa hyödynnetään tiettyjen ydinten, kuten vetyatomien, magneettisia momenteja, jotka syntyvät atomien spineistä. Ulkoiset magneettikentät vaikuttavat kehon sisäisiin ytimiin järjestäen ne joko ulkoisen magneettikentän suuntaiseksi tai sen vastaisiksi. Ilman ulkoisen magneettikentän vaikutusta ytimet järjestyisivät satunnaisesti kumoten toistensa magneettiset momentit. Ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta linjautuneet spinit luovat yhteisvaikutuksena magneettikentän suuntaisen nettomagnetisaation, joka tekee prekessioliikettä magneettikentän suunnan ympärillä tietyllä taajuudella eli Larmor-taajuudella. [7] [8]

Toinen tärkeä ja tähän liittyvä ilmiö on ydinmagneettinen resonanssi (eng. nuclear magnetic resonance, NMR), jossa radiotaajuinen sähkömagneettinen säteily voi vuorovaikuttaa ulkoisessa magneettikentässä olevien ytimien kanssa. Käyttämällä RF-pulssia, jonka taajuus vastaa prekessiotajuutta, nettomagnetisaatio virittyy ja kääntyy kohtisuorasti päämagneettikentän suuntaan. Kun viritys päättyy, nettomagnetisaatio palautuu takaisin alkuperäiseen suuntaan ja relaksoituu. Relaksaation

aikana kudoksesta luovuttaa energiaa radiotaajuusena signaalina, joka voidaan havaita ja muuttaa kuvaksi. [7] [8]

Toiminnallisessa magneettikuvauksessa käytetään useimmiten nopeaa EPI-tekniikkaa (eng. echo planar imaging). Tässä menetelmässä yksi RF-pulssi virittelee protonit, minkä jälkeen signaali luetaan nopeasti useiden gradienttikenttien avulla. Tämä mahdollistaa koko kuvatason keräämisen hyvin lyhyessä ajassa. Nopea kuvantaminen onkin välttämätöntä fMRI-mittauksessa, jossa aivojen aktiivisuutta seurataan ajallisesti peräkkäisten kuvien avulla. Nopeuden lisäksi EPI-kuvantamistekniikan etuna on korkea signaali-kohinasuhde eli SNR. Jälkimmäinen etu johtuu EPI:n alhaisesta spatiaalisesta resoluutiosta, jota rajoittaa signaalin nopea vaimeneminen. Korkean SNR:n vuoksi tämä kuvantamistekniikka on sopiva BOLD-mekanismissa esiintyvien dynaamisten sekä heikkojen signaalimuutosten mittaamiseen. [5]

## 2.2 Multimodaalinen aivokuvantaminen

Multimodaalinen aivokuvantaminen yhdistää dataa eri neurokuvantamismenetelmistä, kuten magneettikuvauksesta, positroniemissiotomografiasta (PET) ja aivosähkökäyrätutkimuksesta (eng. electroencephalography, EEG). Yhdistelemällä kuvantamismenetelmiä voidaan luoda kattavampi kuva aivotoiminnasta, jota ei pystytä saavuttamaan pelkästään yhdellä kuvantamismenetelmällä. EEG–fMRI-yhdistelmäkuvaus on yksi tehokkaimmista ja laajimmin käytetyistä multimodaalisista menetelmistä aivokuvantamisessa. Molemmat tekniikat mittaavat tarkasti aivojen synaptisen toiminnan muutoksia. Yhtäaikainen kuvantaminen mahdollistaa ajallisen eli temporaalisen ja spatiaalisen resoluution yhdistämisen. EEG-kuvauksen toiminta perustuu elektrodien sijoittamiseen päänahkaan ja jotka mittaavat aivojen sähköistä aktiivisuutta korkealla temporaalisella resoluutiolla. Elektrodien si-

joittelu tehdään kansainvälisen 10–20-järjestelmän mukaisesti, missä hyödynnetään neljää vertailupistettä eri puolilla kalloa. [9] [10]

Multimodaalinen EEG–fMRI-kuvantaminen voidaan suorittaa joko eriaikaisesti tai samanaikaisesti. Data voidaan siis yhdistää kuvantamisen jälkeen eriaikaisessa metodissa, jossa EEG- ja fMRI-mittaukset otetaan eri ajankohtina. Suurin hyöty eriaikaisessa kuvantamisessa on kohinan vähentäminen. Signaali pysyy suhteellisen selvänä, jolloin myös data on helpommin tulkittavissa. Datankeruu kuitenkin kannattaa suorittaa mahdollisimman pienellä viiveellä, jotta testiympäristö säilyy optimaalisena. Pienetkin eroavaisuudet kahtena testihetkenä voivat vaikuttaa tuloksien virhearvoihin. Testihenkilön vireystila, tarkkaavaisuus, motivaatio ja tehtävän tutuus ovat muutamia huomioonotettavia tekijöitä. [9]

Mittauslaitteilla on myös erilaiset ominaispiirteet. fMRI:ssä on aina meluhaittaa toisin kuin EEG-kuvauksessa, joka voidaan suorittaa hiljaisessa ympäristössä. Tämä voi olla haitallista tietyissä kuvauksissa, kuten audittiiviseen prosessointiin liittyvissä tutkimuksissa. Samanaikaisessa kuvantamisessa haasteena on EEG-signaalin vähälaatuisuus, sillä se joudutaan ottamaan fMRI-laitteiston sisällä. Tällöin myös kohina lisääntyy. Hyviin puoliin kuuluu tietenkin tutkimusdatan identtiset aikaintervallit, jolloin testihenkilön mielentila ja ympäristötekijät eivät muutu vaikuttamatta molempiin testituloksiin. Samanaikaisessa fMRI–EEG-kuvantamisessa on kuitenkin tärkeää, että laitteistot ovat yhteensopivia eikä vaaratilanteita synny. [9]

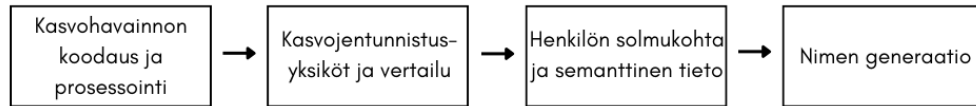
## 3 Kasvosokeus

Kädellisten lahkossa kasvojentunnistus on mutkikas tapahtumasarja, joka vaatii äärimmäisen paljon pinta-alaa aivokuorella ja monen eri aivoalueen yhteistyötä. Van Essenin tutkimukset arvioivat näköjärjestelmän kattavan kokonaisuudessaan jopa 52 % aivokuoresta [11]. Muita keskushermoston rakenteita, jotka osallistuvat näköärsykkeiden prosessointiin, ovat silmät, näköhermot, kiasma, hermoradat ja talamuksessa sijaitseva LGN (eng. lateral geniculate nucleus). Vaiheita on useita ja häiriöitä voi tapahtua missä tahansa vaiheessa. Tässä luvussa keskitytään erityisesti ongelmiin kasvojentunnistuksessa. [12]

### 3.1 Kasvojentunnistus

Kasvojentunnistus on monivaiheinen prosessi, jonka avulla aivot pystyvät tunnistamaan ja erottamaan eri henkilöitä toisistaan. Tunnistusprosessi jaetaan usein neljään osaan perustuen Brucen ja Youngin kasvojentunnistusmalliin vuodelta 1986. Ensimmäisessä vaiheessa tapahtuu varsinainen kasvohavainto (eng. facial percept), jossa kasvojen rakenteellinen tieto koodataan. Seuraavaksi tätä havaintoa verrataan kasvojentunnistusyksiköissä (eng. face recognition units) jo tiedossa oleviin kasvohavaintoihin, jotta saadaan selville, onko kyseistä henkilöä nähty aiemmin. Jos osuma löytyy, henkilön solmukohta (eng. person identity node) aktivoituu ja pääsy semanttiseen tietoon, kuten henkilön nimeen, valtuutetaan. Myös muut tietolähteet, kuten

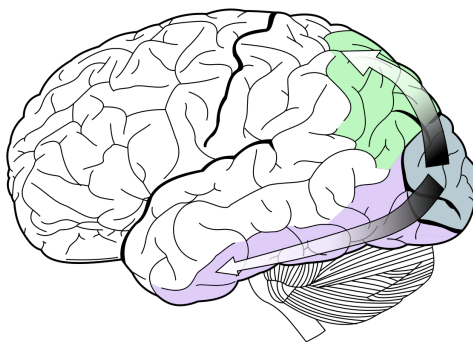
ääni tai pukeutumistyyli, vaikuttavat kasvojentunnistukseen. [3] Kasvojentunnistumallia on havainnollistettu kuvassa 3.1.



Kuva 3.1: Brucen ja Youngin kasvojentunnistumalli perustuen lähteeseen [3]

Ihmisen näköjärjestelmä voidaan jakaa ventraaliseen ja dorsaaliseen näköreittiin. Nämä reitit on havainnollistettu kuvassa 3.2. Ventraalinen näköreitti on kuvattu violetilla värillä, ja dorsaalinen näköreitti vihreällä värillä.

Ventraalinen näköreitti alkaa takaraivolohkosta ja yltää ohimo- eli temporaalilohkole saakka. Sen suurin tehtävä on visuaalisten objektien tunnistus, ja siihen kuuluvat aivokuoren alueet V1, V2, V3/Vp, V4 sekä ohimolohkon alaosan aivokuorialueet. Ensimmäinen näköaivokuori (V1) prosessoi yksinkertaisimmat näköärsykkeet ja mitä ylemmälle hierarkiatasolle siirrytään, sitä monimutkaisempia rakenteita prosessoidaan. Hermosolujen herkkyysprofiilit ovat siis monimuotoisempia siirryttäessä ohimolohkoille. Ohimolohkojen alaosien aivokuorialueilla herkkyysprofiilit käsittelevät visuaalisten objektien identiteettiä. Kuitenkaan yksittäiset hermosolu-



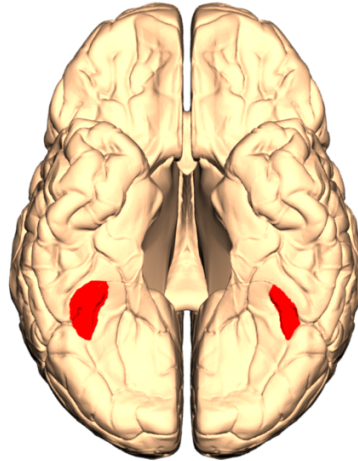
Kuva 3.2: Nuolilla havainnollistettu kuva ventraalisesta ja dorsaalisesta näköreitistä. [13]

ryhmät eivät aktivoidu vain tietylle objektille, vaan objektin eri piirteille. Kyseessä on eräänlainen yhteenlasku, jossa informaation koodaaminen tapahtuu yhdistelemällä näköärsykkeiden eri piirteitä. Yksinkertaisimmillaan väri tai muoto voivat aktivoida soluryhmän. [14]

Dorsaalinen näköreitti alkaa takaraivolohkon keskietuosista. Se yltää ohimolohkon yläosiin, taemman päälakilohkon alueisiin ja päättyy otsalohkon niille alueille, jotka ohjaavat silmien liikkeitä ja tarkkaavaisuutta. Dorsaalinen näköreitti on vastuussa visuomotorisesta ohjauksesta. Se siis auttaa tilan hahmottamisessa motorisissa tehtävissä ja osallistuu huomion fokusointiin eri näkökentän alueisiin. Dorsaalinen näköreitti ei aktivoidu yhtä hierarkkisesti kuin ventraalinen näköreitti. Pian V1:n aktivoitumisen jälkeen muut aivokuorialueet aktivoituvat rinnakkain. Dorsaalinen näköreitti saattaa myös ohjata ventraalista näköreittiä ja sen toimintaa. Dorsaalinen näköreitti ei ole myöskään riippuvainen V1:n aktiivisuudesta. Ensimmäisen näköaivokuoren inaktivoituessa muut aivokuoren alueet voivat säilyttää vasteen näköärsykkeisiin. Tämä todennäköisesti viittaa siihen, että näköaistimuksen tieto kulkee suurempaa reittiä verkkokalvosta aivokuoreen, eikä tarvitse V1:n johdollista asemaa. [14]

Visuaalisten objektien tunnistus tapahtuu siis ventraalisella näköreitillä. Tähän tunnistusreittiin kuuluvat myös kasvot. Toiminnallisella magneettikuvauksella on löydetty kasvoille selektiivisiä alueita, joissa neuronit reagoivat vahvasti kasvonpiirteisiin. Etenkin ihmisillä kasvojentunnistus on pitkälle kehittynyttä ja sen toimialue voidaan lokalisoida ventraaliselle okkipitotemporaaliselle aivokuorelle (eng. ventral occipito-temporal cortex, VOTC). Okkipitotemporaalinen aivokuori alkaa okkipitaaliselta lohkolta eli takaraivolohkolta ja päättyy temporaaliselle lohkolle eli ohimolohkolle. Suurin aktivaatio tällä aivokuorella tapahtuu lateraalisella osuudella, jota nimitetään varttinäpoimun kasvoalueeksi (eng. fusiform face area, FFA), joka on havainnollistettu alemmassa kuvassa (Kuva 3.3). Varttinäpoimun kasvoalue ei

kuitenkaan aktivoitu pelkästään kasvoille, vaan myös muille komplekseille kohteille. Siitä huolimatta suurin aktivoituminen tapahtuu usein kasvojentunnistuksessa. [15]



Kuva 3.3: Värttinäpoimun kasvoalue alapuolelta katsottuna. [16]

Värttinäpoimun kasvoalue ei ole kuitenkaan aivojen ainoa kasvoille aktivoituva alue. Sen lisäksi myös takaraivolohkon kasvoalue (eng. Occipital Face Area, OFA) ja taaempi osa ylemmästä ohimourteesta (eng. Superior Temporal Sulcus, STS) aktivoituvat kasvojentunnistuksessa. Näiden kolmen primäärisen kasvoalueen lisäksi myös muut osat aivoista osallistuvat kasvojentunnistukseen. Näitä niin sanottuja sekundäärisiä prosessointialueita ovat muun muassa etummaisen ohimolohkon kasvoalue (eng. anterior temporal face area), alempi otsalohkopoimu (eng. inferior frontal gyrus), mantelitumake ja prekunus. Vaikka kasvojentunnistuksessa molempien aivopuoliskojen mainitut alueet aktivoituvat, niin suurin aktivaatio on yleisesti oikealla puolella. [3]

## 3.2 Kasvosokeuden eri tyypit

Kasvosokeus eli prosopagnosia on tavanomaisesti jaettu kahteen eri tyyppiin: kehitykselliseen ja hankinnaiseen kasvosokeuteen. Tämän lisäksi on monia muita aspekteja, jotka vaikuttavat sen spesifiin diagnoosiin, sillä kasvojentunnistus on komplek-

si, kognitiivinen prosessi ja ongelmia voi ilmetä useassa eri vaiheessa. Kasvosokeus onkin ylätermi monelle eri neurologiselle häiriölle, eikä se itsessään ole kattava diagnoosi. [17]

Hankinnaisessa kasvosokeudessa kasvojentunnistukseen liittyvät oireet muodostuvat jonkin sairauden tai tapaturman johdosta. Joitakin esimerkkejä ovat aivo-peräinen trauma, aivohalvaus, kasvaimet ja otsa-ohimolohkorappeumat eli fronto-temporaalinen degeneraatio (FTD). Hankinnainen kasvosokeus on tunnistettu ensimmäisen kerran noin 150 vuotta sitten, mutta moderni käsitys sairautena kehittyi vuonna 1947 Bodamerin raportoidessa haavoittuneiden sotilaiden heikentyneestä kasvojentunnistuskyvystä. [3]

Kehityksellinen kasvosokeus on havaittu vasta hiljattain ja sitä ei ymmärretä yhtä hyvin kuin hankinnaista kasvosokeutta. Aivojen alueella ei havaita rakenteellisia poikkeavuuksia neurokuvantamisella, ja potilaiden muisti sekä näkökyky ovat normaaleja. Kehityksellisen kasvosokeuden on huomattu olevan usein geneettistä ja periytyvää, ja sen vakavuus vaihtelee. Tämän vuoksi on vaikea arvioida, kuinka monella on jonkin asteen kehityksellinen kasvosokeus. Se voidaan kuitenkin todeta olevan yleisempi kuin hankinnaisen kasvosokeuden. [3] Kehitykselliselle kasvosokeudelle ei ole löydetty selkeää syytä, joka pätsi jokaiseen tapaukseen. Sen kuitenkin uskotaan johtuvan osittain geneettisistä tekijöistä. Sitä voidaan verrata muihin neurokehityksillisiin häiriöihin, kuten dyskalkuliaan, lukihäiriöön ja motoristen toimintojen koordinaatiohäiriöön eli DCD:hen. Esimerkiksi autismin kirjon on huomattu lisäävän kehityksellisen kasvosokeuden riskiä, vaikka molemmat häiriöt esiintyvät itsenäisesti. Eri neurokehitykselliset häiriöt esiintyvätkin monesti samanaikaisesti. Geneettiset syyt tai ympäristötekijät siis lisäävät myös muiden häiriöiden todennäköisyyttä, vaikka eivät suoranaisesti aiheuta toista häiriötä, kuten kehityksellistä kasvosokeutta. [18]

Hankinnainen ja kehityksellinen kasvosokeus jaotellaan vielä pienempiin osaluveisiin; apperseptiiviseen ja assosiatiiviseen kasvosokeuteen. Apperseptiivisessä tyypissä potilas ei osaa yhdistää eri kasvon osia, kuten silmiä, nenää ja suuta, yhdeksi kokonaisuudeksi, ja täten ei pysty hahmottamaan kasvonpiirteitä kunnolla. Hän voi nähdä yksittäiset kasvonpiirteet, muttei pysty muodostamaan tarkkaa havaintokuvaa kasvoille. Assosiatiivisessa eli amnestisessä variantissa kasvonpiirteet havaitaan ongelmitta, mutta kasvojentunnistus silti epäonnistuu. Potilas ei pysty yhdistämään kasvoja niille kuuluvalla henkilölle, sillä havaintotieto ei pääse kasvojentunnistuyksiköihin. Kasvojentunnistusprosessi jää siis kesken. [17]

## 4 Kasvosokeuden kuvantaminen

Kasvosokeuden kuvantaminen riippuu paljolti siitä, minkä tyyppin häiriö on kyseessä. Luvussa 3.2 tarkasteltiin kehityksellistä ja hankinnaista kasvosokeutta, sekä niiden olennaisimpia eroja rakenteellisesti ja fysiologisesti. Nämä erot häiriöiden välillä määrittävät niille ominaiset kuvantamiskorrelaatit aivokuvantamisessa. Tässä luvussa tarkastellaan eri tyyppin kasvosokeuksien eroja ja ilmenemismuotoja kuvantamisessa sekä häiriöille spesifisiä kuvantamiskorrelaatteja.

### 4.1 Kehityksellinen kasvosokeus

Kehityksellistä kasvosokeutta ei ole pystytty lokalisoimaan yhteen rakenteelliseen tai toiminnalliseen poikkeavuuteen. Tämän tyyppin kasvosokeus onkin vaikeammin diagnosoitavissa johtuen kiistanalaisista korrelaateista. Rakenteellisia ja toiminnallisia poikkeamia on kuitenkin havaittu eri magneettikuvaustekniikoilla. Etenkin FFA on suuressa osassa ja siihen liittyvät anatomiset tai toiminnalliset poikkeavuudet uskotaan olevan osasyynä häiriöihin. Pääosassa aksoneista eli tuojahaarakkeista muodostuvan valkoisen aineen hermosäikeiden uskotaan olevan FFA:n ympärillä epätavallisia rakenteeltaan. Toinen hypoteesi olettaa kehityksellisten kasvojentunnistuksen häiriöiden johtuvan etummaisesta ohimolohkon poikkeavuuksista ja eri aivojen kasvojentunnistusalueiden yhteyshäiriöistä etenkin valkoisen aineen osalta. Näiden kahden eri väitteen yhteinen tekijä onkin aivojen rakenteellisesti poikkeava valkoinen aine. Joitain epätavallisuuksia on havaittu myös ydinkasvoverkon ulkopuolella.

[3] [19] Koska kasvojentunnistukseen liittyvät häiriöt ovat spektriltään laajoja, molemmat hypoteesit saattavat olla totuudenmukaisia eri yksilöillä. Aivojen rakenne ja toiminta on tunnetusti monimutkaista, ja yksittäisiä vastauksia neurologisiin häiriöihin ei välttämättä ole.

Toiminnallisuuden poikkeuksia pystytään mittaamaan funktionaalisella eli toiminnallisella magneettikuvauksella. Potilaalle annetaan jokin tehtävä, joka neurotyypillisissä aivoissa aiheuttaa poikkeuksetta aivoalueen aktivaation. Tällaisia tehtäviä ovat muun muassa passiivinen kuvien katsominen sekä aktiiviset erottelu- ja kategorisointiharjoitukset. Tehtävien aiheuttama aivoaktivaatio on heikentynyt tai puuttuu kokonaan kehityksellistä kasvosokeutta sairastavilla henkilöillä. fMRI-lohkomalli (eng. block design) on todettu olevan käytännöllisempi kehityksellisen kasvosokeuden diagnosoinnissa. Sen etuja ovat muun muassa kohinan suhteellinen vähäisyys ja BOLD-signaalien alhainen ajallinen resoluutio. Myös tehtävien suorittamiseen liittyvät tekniset rajoitukset mittalaitteessa ovat johtaneet lohkomallin suosimiseen verrattuna tapahtumasidonnaiseen malliin (eng. event-related design). [20] [21]

Lohkomalli tarkoittaa käytännössä sitä, että yhden tyypin stimulusta tai tehtävää suoritetaan lohkoissa eli pidemmän aikajakson verran. Kasvojentunnistuksessa yksi lohko voisi sisältää esimerkiksi kuvia tutuista kasvoista ja toinen lohko kuvia tuntemattomista ihmisistä. Yhden lohkon pituus vaihtelee riippuen tehtävästä ja voi kestää kymmeniäkin sekunteja. Syy, miksi fMRI-lohkomalli on hyvä valinta aivohäiriöiden diagnosoinnissa, kuten kasvosokeudessa, voidaan arvioida olevan suoraan yhteydessä pidempiin mittausjaksoihin. Ne ovat siis varmempia aktivoitujen aivoalueiden löytämisessä, koska yhden tyypin ärsyke aktivoi aivolohkoa kauemmin. Tällöin BOLD-signaalit kumuloituvat, mikä parantaa myös tilastollista herkkyyttä. Tätä mallia käytetään etenkin passiivisissa tehtävissä. [20] [21]

Tapahtumasidonnainen malli on sen sijaan lyhytkestoista ja irrallista. Ärsykkeet ovat usein satunnaisessa järjestyksessä ja niiden sisäiset väliajat (eng. inter-stimulus intervals, ISIs) ovat vaihtelevia. Tämä väliaikojen vaihtelevuus on erityisen tärkeää tilastollisen tehokkuuden kannalta, sillä se parantaa vasteiden havainnointia verrattuna kiinteään ISI-arvoon. Tapahtumasidonnainen malli keskittyy täten diskreetteihin, yksittäisiin tapahtumiin, mikä mahdollistaa erilaisiin ärsykkeisiin liittyvien vasteiden ajallisen tarkastelun. Kuitenkaan kasvosokeuden diagnosoinnissa se ei ole paras mahdollinen työkalu. Signaali-kohinasuhde ei ole optimaalinen ja täten hienovaraisemmat yksityiskohdat jäävät huomaamatta. Tutkimuksissa on usein myös lähtökohtana eri ärsykeryhmien vertailu, joka ei onnistu tapahtumasidonnaisessa mallissa satunnaisuuden vuoksi. [20] [21]

K-Means-klusterointia ja erilaisten hierarkkisten menetelmien yhdistelmiä hyödynnetään havainnollisen heterogeenisyyden analysoinnissa. Menetelmän avulla on pyritty tunnistamaan kehityksellisen kasvosokeuden erillisiä alaryhmiä eli klustereita kasvojentunnistustaitojen perusteella. Se auttaa erottamaan erilaisia sairaudessa esiintyviä kognitiivisia häiriöitä. Kuitenkin uudemmissa tutkimuksissa on esiintynyt vaikeuksia replikoida osaa näistä aiemmin havaituista klustereita. Etenkin piirreperustaisen ja holistisen prosessoinnin klusterit näyttävät olevan tietyistä tehtävistä riippuvaisia, ja niiden täsmällisyys vaihtelee paljon. Uudemmassa hypoteesissa kehityksellisessä kasvosokeudessa ei siis ole selvästi erilaisia alaryhmiä, vaan ne sijoittuvat jatkumolle, jossa erot vaihtelevat asteittan. Kasvojentunnistuskyky voidaan kehityksellisessä kasvosokeudessa jakaa tämän mukaan lievästä vaikeaan, eikä siihen, että jokin tietty mekanismi on mustavalkoisesti "rikki". [22]

Pelkän toiminnallisen magneettikuvauksen lisäksi voidaan hyödyntää muita kuvausmenetelmiä tai niiden yhdistelmiä kasvosokeuden kuvantamisessa. Aiemmin todettiin, että fMRI käyttää spatiaalista resoluutiota, joten EEG:n temporaalinen resoluutio laajentaa sen kuvantamismahdollisuuksia. Myös syväoppimista on alet-

tu hyödyntämään neurokuvantamisessa, mikä mahdollistaa monimutkaisemman ja määrällisesti suuremman datan käsittelyn. Syvät neuroverkostot (eng. Deep Neural Networks, DNNs) ovat osoittautuneet tehokkaaksi hermosolujen toiminnan analysoinnissa etenkin spatiaali-temporaalisissa malleissa. Verrattuna unimodaalisiin kuvantamistekniikoihin, kuten fMRI DNN:ään ja EEG DNN:ään, multimodaalisilla fMRI-EEG DNN-malleilla suoritetuilla kuvantamismenetelmillä on parempi suorituskyky aivojen visuaalisen alueen kategorisoinnissa. Vaikka unimodaaliset tekniikat yhdistettäisiin myöhemmässä vaiheessa, niistä saadut tulokset eivät ole yhtä monipuolisia. [23] Multimodaalisen DNN-menetelmän voidaan olettaa olevan tärkeä työkalu etenkin kehityksellisen kasvosoikeuden kuvantamisessa, sillä sen avulla pystytään paikantamaan kasvoille selektiivisiä aivoalueita niiden aktivoituessa normaalisti. Neuroverkostojen kouluttaminen on kuitenkin tunnetusti työlästä, jonka vuoksi tekniikkaa tuskin tullaan hyödyntämään laajasti kasvosoikeuden tutkimuksessa.

## 4.2 Hankinnainen kasvosoikeus

Hankinnaisen kasvosoikeuden diagnosoinnissa on tärkeää huomioida, että häiriö voi johtua eri aivoalueiden vaurioista eikä kasvosoikeutta voi paikallistaa vain yhteen aivolohkon alueeseen kohdistuneesta vauriosta. Kuten Luvussa 3.1 tarkasteltiin, kasvojentunnistus on monivaiheinen prosessi, jossa monet eri aivoalueet tekevät yhteistyötä. Tällöin traumaperäinen vaurio mihin tahansa kasvojentunnistukselle olennaiselle aivolohkolle voi aiheuttaa kasvosoikeutta. On tärkeää paikantaa rakenteelliset poikkeavuudet ja vauriot, etenkin jos kirurgisia toimenpiteitä vaaditaan. Esimerkiksi syövän aiheuttamassa kasvosoikeudessa tämä on kriittistä. Tyypillisesti vauriot voivat olla molemminpuolisia tai yksipuolisia, ja yksipuolisissa tapauksissa vaurio on todennäköisemmin oikealla aivopuoliskolla. Tämä toispuolisuus johtuu aivoille tyypillisestä lateralisaatiosta eli toimintojen sijoittumisesta vahvemmin toiselle aivopuoliskolle. Vasemmanpuolisista vaurioista harvemmin seuraa kasvosoikeus, mutta

tämäkin on mahdollista. Etenkin vasenkätisyys kasvattaa riskiä tähän poikkeamaan, mikä mahdollisesti viittaa aivopuoliskojen käänteiseen lateralisaatioon. [3] [19]

Aivolohkovauriot voidaan myös jakaa hankinnaisen kasvosokeuden diagnosoinnissa ohimolohkon ja takaraivolohkon eri alueisiin. Vaurio voi olla siis joko okkipitotemporaalisella lohkolla tai etummaisella ohimolohkolla. Tyypillisesti vaurio okkipitotemporaaliselle lohkolle aiheuttaa todennäköisemmin kasvosokeutta. Tämä johtuu häiriön lokalisoitumisesta; okkipitotemporaalinen lohko sisältää tärkeitä kasvojen tunnistukseen erikoistuneita aivoalueita kuten FFA:n ja OFA:n. Toiminnallisella magneettikuvauksella on havaittu, että vauriot okkipitotemporaaliselle lohkolle usein vaikuttavat myös FFA:n ja OFA:n toimintaan, vaikkeivät vauriot aina sijaitu suoraan näihin kasvoalueisiin. Päinvastoin etummaiseen ohimolohkoon kohdistuvat vauriot eivät aina vaikuta FFA:han tai OFA:han, vaikka tämäkin on mahdollista. [3] [19]

Jälkimmäisessä tapauksessa amnestinen kasvosokeuden tyyppi on todennäköisempi, mikä taas johtuu usein neurodegeneratiivisistä häiriöistä, kuten dementiasta. Kasvosokeus on yksi dementian ydinoireita, jonka merkitystä saatetaan aliarvioida. Sitä pidetään yleisoireena ja merkinä potilaan yleisestä kognitiivisesta heikkene- mistä. Amnestinen kasvosokeus on kuitenkin yhdistetty dementiassa etenkin oikean etummaisen ohimolohkon surkastumiseen. Myös vasen puoli surkastuu, mutta yleisesti pahin degeneraatio on oikealla aivopuoliskolla. [24] Potilailla, joilla vauriot rajoittuvat oikealle tai molemminpuolisesti okkipitotemporaaliselle aivoalueelle, havaitaan apperseptiivista kasvosokeutta. Etenkin silmien alueen on havaittu olevan potilaille vaikeasti tunnistettavissa. Sen lisäksi vauriot, jotka kohdistuvat ainakin oikeaan etummaiseen ohimolohkoon sekä molemminpuolisesti okkipitotemporaaliseen aivolohkoon, johtavat yhdistelmälliseen kasvosokeuteen, jossa havaitaan niin apperseptiivista kuten amnestista varianttia. [25]

Yleisesti aivovauriot pystytään havaitsemaan rakenteellisella magneettikuvauksella, mutta niiden kokonaisvaltaisia vaikutuksia aivotoimintaan voi olla mahdollista arvioida ilman funktionaalista kuvausta. Ihmisen visuaalinen järjestelmä on erityisen kompleksi sen hierarkisuuden ja moniosaisuuden vuoksi. Toiminnallinen magneettikuvaus on helpottanut hankinnaisen kasvosokeuden diagnosointia. Kuten aiemmin mainittiin, sen avulla on mahdollista havaita aivovaurioiden sekundäärisen vaikutuksen toisiin, rakenteellisesti ehjiin aivo-osiiin. Myös kompensoivaa aktiivisuutta pystytään havainnoimaan. [3] Kykyä yhdistää yksittäisten potilaiden rakenteelliset vauriot toiminnallisiin aivoverkostoihin on pystytty tutkimaan kehittämällä mittausmenetelmiä, jotka osoittavat aktiivisten aivoalueiden verkoston. [19] Etenkin dynaamiset fMRI-paikantimet (eng. dynamic localizer) ovat osoittautuneet johdonmukaisemmiksi ja herkemmiksi staattisiin paikantimiin verrattuna. Dynaamiset paikantimet ovat esimerkiksi liikkuvia videoleikkeitä kasvoista, ja niiden avulla pystytään tunnistamaan kategoriakohtaisia aivoalueita tehokkaammin kuin pelkillä staattisilla kuvilla. [26]

### 4.3 Kuvantamiskorrelaatit

Kasvosokeuden kirjon voidaan luokitella olevan heterogeeninen eli kasvojen tunnistamisen vaikeudet ilmenevät eri henkilöillä eri tavoin. Tämän vuoksi etenkin kehitykselliselle kasvosokeudelle on vaikeaa löytää kaikille potilaille yleispäteviä kuvantamiskorrelaatteja. [22] Joillakin kehityksellisistä kasvosokeutta sairastavilla voi olla merkittäviäkin tunnistusvaikeuksia, kun taas toiset suoriutuvat jopa keskimääräistä paremmin tietyissä tehtävissä. Vaikka potilaan tunnistuskyky olisi siis heikentynyt yhdessä tai useammassa visuaalisessa tehtävässä, niin eri tehtävien välisten suoriutumiseroavuuksien yhteys on heikko. Tämä viittaa siihen, ettei ole olemassa yhtä yleistä mekanismia, joka vastaa kaikista visuaalisista tunnistusvaikeuksista eri potilaiden välillä. Tämä vahvistaakin kasvosokeuden heterogeenistä luokittelua. [27]

Hankinnaisessa kasvosokeudessa aivovaurion sijainti on suuressa osassa häiriön diagnosointia, kuten luvussa 4.2 todettiin. Nämä löydökset viittavat siihen, että hankinnainen kasvosokeus ei ole yksittäinen sairaus, vaan ylätermi joukolle häiriöitä, joilla on eri vaikutukset aivojen toimintaan. Lopputulos on kuitenkin sama; heikentynyt kasvojentunnistuskky. [19]

Heterogeenisyyden lisäksi vaikeuksia selkeiden kuvantamiskorrelaattien löytämiseen tuovat puutteelliset tutkimukset – etenkin kehityksellisessä kasvosokeudessa. Vain harvat kuvantamistutkimukset ovat luokitelleet kasvojentunnistuksen toiminnallista puutetta. Myös tutkimusten lähestymistavat vaihtelevat paljon, joten niiden vertailu on vaikeaa. Tämän lisäksi tutkimukset on tehty pienille testiryhmille. Hyvin harvassa tutkimuksessa on ollut yli 20:tä kehityksellistä kasvosokeutta sairastavaa henkilöä. Myös isoissa ryhmissä aivoaktivaation vaihtelevuus on ollut suurta eri alueilla, joka viittaisi jälleen heterogeenisyyteen. Täsmällisyyden puutetta kuitenkin löytyy, ja joissain näissä kehityksellisen kasvosokeuden tutkimuksissa virallista diagnoosia ei ole välttämättä tarvittu, vaan itsediagnosoitu kasvojentunnistuksen vaikeus on kelvannut. [19] Kehityksellisen kasvosokeuden tutkimuksiin tarvitaan siis tiukempia poissulkemiskriteerejä tutkimushenkilöiden homogeenisyyden lisäämiseksi. Etenkin keskitason näkövammaisuutta tulisi pitää poissulkevana kriteerinä tutkimuksissa, sillä se voi vaikuttaa negatiivisesti tuloksiin. Myös autismin piirteet pitää huomioida diagnostiikassa, jotta jatkossa voidaan huomioida, mitkä kehityksellisen kasvosokeuden piirteet voivat liittyä autismin kirjoon. [28]

## 5 Pohdinta

Nykyhetken tietojen mukaan kasvosokeuden voidaan olettaa olevan heterogeeninen häiriö, jolla on monta ilmenemismuotoa. Yksi markkeri ei siis pysty selittämään koko häiriötä, sillä jokaisella on eri ongelmat ja oireet. Tämän oletuksen pohjalta voidaan päätellä, että yksittäisen potilaan data on jopa arvokkaampaa kuin mahdolliset keskiarvot. Oletuksena on kuitenkin, että mahdollisen yksittäisen tapauksen analyysi on täsmällistä ja monipuolista. Luvussa 4.3 huomioitiin mahdollisia vaikeuksia kuvantamiskorrelaattien löytämisessä. Puutteelliset tutkimukset, kuvantamistapojen vaihtelevuus tutkimusten välillä ja pienet testiryhmät sekä täsmällisyyden puute vaikuttavat negatiivisesti etenkin kehitykselliseen kasvosokeuteen liittyvissä tutkimuksissa. Tämän vuoksi mahdolliset yhtäläisyydet, joita on löydetty kuvantamisessa, pysyvät spekulatiivisena. Joitain samankaltaisuuksia kuitenkin on: vähentynyt aktivaatio etenkin FFA:ssa on laajasti tunnistettu. Kasvoärsykkeistä syntyvä aivoaktivaatio on olemassa, mutta se on puuttellinen. Tämä voi viitata siihen, että joko aivoalue on viallinen tai informaatio ei saavu kyseiseen alueeseen moitteettomasti.

Amnestisessä kasvosokeudessa etummainen ohimolohko on surkastunut tai muuten vaurioitunut. Tämän tyyppin kasvosokeutta sairastava henkilö ei kykene oppimaan tai muistamaan uusia kasvoja, vaikka itse kasvojen havaitseminen ja visuaalinen prosessointi toimivatkin normaalisti. Tästä voidaan päätellä, että etummainen ohimolohko on yhteydessä kasvomuistiin tai yleisesti aivoalueisiin, jotka osallistuvat muistikuvien tallentumiseen. Kasvohavainto koodataan ja prosessoidaan normaali-

listi, mutta yhteys kasvojentunnistussyksikköihin epäonnistuu. Ongelmana tuntuu olevan siis konnektiivisuuden puutteellisuus aivoalueiden välillä. Apperseptiivisessä kasvosokeudessa kasvohavaintoa ei onnistuta koodaamaan ollenkaan, jolloin kyse on enemmän lokalisoituneesta häiriöstä kuin yhteysongelmasta.

Hankinnaisessa kasvosokeudessa, joka on todennäköisimmin traumaperäinen, häiriöt ovat usein lokalisoituneita tietyille aivoalueille. Selkeitä aivovaurioita pystytään havaitsemaan rakenteellisella magneettikuvauksella, ja nämä vauriot ovat usein okkipitotemporaalisella alueella. Tämän tyyppin kasvosokeuden voidaan olettaa olevan helpommin diagnosoitavissa kehitykselliseen kasvosokeuteen verrattuna, sillä se on rakenteellisesti havaittavissa. Kehityksellisessä kasvosokeudessa sen sijaan aivoalueet ovat rakenteellisesti ehjiä, mutta toiminnallisia ja konnektiivisia poikkeavuuksia esiintyy. Jälkimmäisen tyyppin kasvosokeus on saanut viime vuosina enemmän huomiota, mikä todennäköisesti johtuu häiriön kompleksisuudesta. Synnyntäiset neuroepätyypillisyydet ovat saaneet huomiota viime vuosien aikana ja onkin johdonmukaista, että myös tämä häiriö on pinnalla tutkimusaloilla – etenkin sen linkittyessä autismin kirjoon.

Suuri osa kasvosokeuden fMRI-tutkimuksista keskittyy vain tiettyihin aivoalueisiin kuten FFA:han. Tulevaisuuden kannalta painopiste tuntuu siirtyvän yhä enemmän aivoalueiden yhteyksiin etenkin kehityksellisen kasvosokeuden tutkimuksissa. Tämä tuntuukin luonnolliselta siirtymältä, sillä kasvosokeus ei aina johdu vain yhden alueen vauriosta vaan kokonaisvaltaisesta verkoston toiminnan häiriöstä. Toiminnallinen magneettikuvaus tuntuu pitävän vahvasti paikkansa yhtenä suosituimmista kuvantamismenetelmistä jatkossakin. Sen avulla funktionaalisen konnektiivisuuden tutkimus onnistuu ja tarkempi kuva häiriön luonteesta on mahdollista havaita.

Yksi uusimmista työkaluista kasvosokeuden tutkimisessa on tekoäly. Kuten aiemmin mainittiin, k-means-klusteroinnin avulla voidaan tunnistaa kasvosokeuden

alatyyppejä tai osoittaa, että kyseessä on jatkumo. Jatkumon asema on parantunut uusimmissa tutkielmissa, mutta kategorisointia tullaan todennäköisesti myös hyödyntämään. Etenkin yksilötason analyysi on oletettavasti tärkeää tulevaisuudessa, koska häiriön heterogeisuus on pitkälti tunnistettu. Tekoäly voi tunnistaa aktivaatiomalleja, joita ei välttämättä löydy muuten. Koneoppimismenetelmät voivat jatkossa tunnistaa kasvosokeuden muista samankaltaisista sairauksista. Myös eri vaikeusasteiden ja muiden alatyyppien asemaa voidaan analysoida tekoälyä hyödyntävissä tutkimuksissa. Toisaalta myös jatkumohypoteesi voi vahvistua lähitulevaisuudessa. Klusterointimenetelmät voivat vahvistaa, että kasvosokeus ei ole yksi yhtenäinen häiriö vaan joukko erilaisia hermostollisia profiileja jatkumolla. Tämä voisi selittää ristiriitaisia tutkimustuloksia ja parantaa diagnostiikkaa.

Aiemmin pohdittiin yksilötason datan merkityksestä häiriön tutkimisessa. Perinteisesti fMRI käyttää ryhmäkeskiarvoja diagnostiikassa. Kuitenkin havaintojen perusteella kasvosokeus on häiriönä hyvin yksilöllinen ja vaikeasti yleistettävissä. Tämä ristiriita kuvausmenetelmän ja häiriön kesken on todennäköisesti viivästyttänyt kasvosokeuden laajempaa ymmärrystä. Tulevaisuudessa yksilötason analyysit voivat tarjota tarkemman kuvan hermostollisesta perustasta ryhmätason vertailuita poiketen.

## 6 Yhteenveto

Tässä kirjallisuuskatsauksessa on käsitelty toiminnallisen magneettikuvauksen roolia kasvosokeuden eri tyyppien diagnosoinnissa ja tutkimisessa. Tarkastelu osoitti, että toiminnallinen magneettikuvaus on pitänyt roolinsa ensisijaisena kuvantamismenetelmänä kasvosokeuden tutkimisessa sen turvallisuuden ja funktionaalisuuden vuoksi. Se on etenkin tehokas kognitiivisten poikkeavuuksien havaitsemisessa, mikä on kasvosokeuden kuvantamisessa tärkeää. fMRI:n spatiaalinen resoluutio mahdollistaa aktivoituneiden aivoalueiden tarkan paikantamisen, jolloin myös häiriöiden lokalisointi onnistuu.

Kasvosokeuden tyyppi tulee huomioida kuvantamisessa ja tämän vuoksi tässä kirjallisuuskatsauksessa vertailtiin kehityksellisen ja hankinnaisen kasvosokeuden eroja. Kehityksellinen kasvosokeus on kirjoiltaan laaja ja tämän vuoksi toiminnalliset poikkeavuudet sekä heikentynyt konnektiivisuus ovat keskeisiä. Traumaperäisiä vaurioita ei ole, mutta rakenteellisia poikkeavuuksia voi esiintyä. Tämä korostaa toiminnallisen magneettikuvauksen merkitystä etenkin kehityksellisen kasvosokeuden tutkimuksessa. Hankinnainen kasvosokeus johtuu sen sijaan selkeästä aivovauriosta. Aivovaurio sijoittuu usein oikealle okkipitotemporaaliselle aivokuorelle. Toisin kuin kehityksellisessä kasvosokeudessa, tässä tyypissä on selkeämpi yhteys vaurion sijainnin ja oireen välillä. Vaikka rakenteelliset muutokset ovat havaittavissa rakenteellisella magneettikuvauksella, fMRI:n asema diagnostiikassa on monipuolisempi.

Sen avulla pystytään havaitsemaan epäsuoria vaikutuksia muihin, rakenteellisesti ehjiin aivoalueisiin.

Kuvantamiskorrelaatiit voidaan jakaa rakenteellisiin ja toiminnallisiin häiriöihin. Rakenteellisesti etenkin värttinäpoimun ja okkipitotemporaalinen aivokuoren vauriot liittyvät kasvojentunnistuksen häiriöihin. Toiminnallisesti kasvosokeuteen liittyy poikkeavuudet kasvojentunnistukseen osallistuvissa aivoalueissa, kuten FFA:ssa ja OFA:ssa. Lisäksi tutkimuksissa on havaittu heikentynyttä funktionaalista konnektiivisuutta kasvojentunnistusalueiden välillä, mikä viittaa laajempaan kasvojentunnistusverkoston toiminnallisiin häiriöihin. Kehityksellisessä kasvosokeudessa erityisesti verkostotason poikkeavuudet ovat keskeisiä, vaikka yksittäisten aivoalueiden aktiivatio voi olla säilynyt. Kehityksellistä kasvosokeutta sairastavilla on havaittu myös valkoisen aineen poikkeavuuksia, joka viittaa jälleen konnektiivisuuden ongelmiin.

Kokonaisuudessaan kirjallisuus osoittaa, että kasvosokeus on monimuotoinen häiriö, jonka hermostollinen perusta vaihtelee eri muotojen välillä. Hankinnainen kasvosokeus liittyy useammin selkeisiin rakenteellisiin vaurioihin, kun taas kehityksellisessä kasvosokeudessa korostuvat toiminnalliset poikkeavuudet ja konnektiivisuuden heikentyminen. Toiminnallinen magneettikuvaus on osoittautunut keskeiseksi kuvantamimentelmäksi, sillä se mahdollistaa hermoverkostojen toiminnan tarkastelun.

# Lähdeluettelo

- [1] P. Bandettini, "Twenty years of functional MRI: The science and the stories", *NeuroImage*, vol. 62, nro 2, s. 575–588, 2012. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1053811912004223>.
- [2] R. Lane, K. Weihs ja ym., "Affective agnosia: Expansion of the alexithymia construct and a new opportunity to integrate and extend Freud's legacy", *Neuroscience amp; Biobehavioral Reviews*, vol. 55, s. 594–611, 2015. url: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.06.007>.
- [3] S. Corrow, K. Dalrymple ja J. Barton, "Prosopagnosia: current perspectives", *Eye and Brain*, vol. 8, nro 8, s. 165–175, 2016. url: <https://doi.org/10.2147/EB.S92838>.
- [4] C. Yen, C. Lin ja M. Chiang, "Exploring the Frontiers of Neuroimaging: A Review of Recent Advances in Understanding Brain Functioning and Disorders", *Life*, vol. 13, nro 7, 2023. url: <http://dx.doi.org/10.3390/life13071472>.
- [5] R. Buxton, "The physics of functional magnetic resonance imaging (fMRI)", *Reports on Progress in Physics*, vol. 76, nro 9, 2013. url: <http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/76/9/096601>.
- [6] J. Hakumäki, R. Kauppinen, P. Vainio ja S. Soimakallio, "Aivotoiminta tuo magneettikuviin eloa", *Lääketieteellinen Aikakauskirja Duodecim*, vol. 110, nro 11, s. 1068–, 1994. url: <https://www.duodecimlehti.fi/duo40221>.

- [7] S. Vaara, S. Syväranta ja J. Peltonen, ”Magneettikuvauksen ABC: T1, T2, fat sat, DWI ynnä muut”, *Lääketieteellinen Aikakauskirja Duodecim*, vol. 137, nro 24, s. 2681–, 2021. url: <https://www.duodecimlehti.fi/duo16593>.
- [8] E. Amaro ja G. Barker, ”Study design in fMRI: Basic principles”, *Brain and Cognition*, vol. 60, nro 3, s. 220–232, 2006. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278262605001752>.
- [9] E. Ebrahimzadeh, S. Saharkhiz ja ym., ”Simultaneous electroencephalography-functional magnetic resonance imaging for assessment of human brain function”, *Frontiers in systems neuroscience*, vol. 16, 2022. url: <https://doi.org/10.3389/fnsys.2022.934266>.
- [10] S. Vanhatalo, L. Lauronen ja ym., ”EEG:n perusta”, *Duodecim oppiortti*, 2018. url: <https://www.oppiortti.fi/oppikirjat/knf00801>.
- [11] D. Van Essen, ”Organization of Visual Areas in Macaque and Human Cerebral Cortex”, teoksessa *Visual Neurosciences*, L. M. Chalupa ja J. S. Werner, toim., MIT Press, 2002.
- [12] S. Prasad ja S. Galetta, ”Chapter 1 - Anatomy and physiology of the afferent visual system”, teoksessa *Neuro-ophthalmology*, sarja Handbook of Clinical Neurology, C. Kennard ja J. Leigh, toim., vol. 102, Elsevier, 2011, s. 3–19. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444529039000078>.
- [13] Selket, *Image showing dorsal stream (green) and ventral stream (purple) in the human brain visual system*. 2007. url: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ventral-dorsal\\_streams.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ventral-dorsal_streams.svg).
- [14] S. Vanni, ”Näkötiedon käsittely aivokuoressa”, *Lääketieteellinen Aikakauskirja Duodecim*, vol. 120, nro 22, s. 2655–, 2004. url: <https://www.duodecimlehti.fi/duo94630>.

- [15] R. Quian Quiroga, M. Boscaglia ja ym., "Single neuron responses underlying face recognition in the human midfusiform face-selective cortex", *Nature Communications*, vol. 14, nro 1, 2023. url: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41323-5>.
- [16] Database Center for Life Science, *Fusiform face area (FFA)*, 2009. url: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fusiform\\_Face\\_Area.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fusiform_Face_Area.png).
- [17] J. Davies-Thompson, R. Pancaroglu ja J. Barton, "Acquired prosopagnosia: structural basis and processing impairments", *FBE*, vol. 6, nro 1, s. 159–174, 2014. url: <https://www.imrpress.com/journal/FBE/6/1/10.2741/E699>.
- [18] R. Cook ja F. Biotti, "Developmental prosopagnosia", *Current Biology*, vol. 26, nro 8, 2016. url: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2016.01.008>.
- [19] J. Barton, J. Davies-Thompson ja S. Corrow, "Chapter 10 - Prosopagnosia and disorders of face processing", teoksessa *Neurology of Vision and Visual Disorders*. Elsevier, 2021, s. 175–193. url: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-821377-3.00006-4>.
- [20] V. Manippa, A. Palmisano ja ym., "The Neural Correlates of Developmental Prosopagnosia: Twenty-Five Years on", *Brain Sciences*, vol. 13, nro 10, s. 1399, 2023. url: <http://dx.doi.org/10.3390/brainsci13101399>.
- [21] M. Chee, V. Venkatraman ja ym., "Comparison of block and event-related fMRI designs in evaluating the word-frequency effect", *Human Brain Mapping*, vol. 18, nro 3, s. 186–193, 2003. url: <http://dx.doi.org/10.1002/hbm.10092>.
- [22] J. DeGutis, L. Kirsch ja ym., "Perceptual heterogeneity in developmental prosopagnosia is continuous, not categorical", *Cortex*, vol. 176, s. 37–52, 2024. url: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cortex.2024.03.011>.

- [23] N. Watanabe, K. Miyoshi ja ym., "Multimodal deep neural decoding reveals highly resolved spatiotemporal profile of visual object representation in humans", *NeuroImage*, vol. 275, s. 120–164, 2023. url: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.120164>.
- [24] C. Koros, I. Beratis ja ym., "Prosopagnosia, Other Specific Cognitive Deficits, and Behavioral Symptoms: Comparison between Right Temporal and Behavioral Variant of Frontotemporal Dementia", *Vision*, vol. 6, nro 4, s. 75, 2022. url: <http://dx.doi.org/10.3390/vision6040075>.
- [25] J. Barton, B. Duchaine ja A. Albonico, "Imagery and perception in acquired prosopagnosia: Functional variants and their relation to structure", *Cortex*, vol. 183, s. 330–348, 2025. url: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cortex.2024.11.011>.
- [26] C. Fox, G. Iaria ja J. Barton, "Defining the face processing network: Optimization of the functional localizer in fMRI", *Human Brain Mapping*, vol. 30, nro 5, s. 1637–1651, 2008. url: <http://dx.doi.org/10.1002/hbm.20630>.
- [27] G. Epihova ja D. Astle, "What is developmental about developmental prosopagnosia?", *Cortex*, vol. 173, s. 333–338, 2024. url: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cortex.2024.02.006>.
- [28] T. Susilo ja B. Duchaine, "Improving diagnosis of developmental prosopagnosia: The role of exclusion criteria", *Cortex*, vol. 183, s. 304–308, 2025. url: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cortex.2024.12.010>.