

**VASEMMAN JA OIKEAN ETUSORMEN YHTÄAIKAISEN PASSIIVISEN
LIIKUTUKSEN AIHEUTTAMAN PROPRIOSEPTTIIVISEN SIGNAALIN
KORTIKAALINEN LATERALISAATIO**

Joona Juurakko

Biomekaniikan pro gradu -tutkielma
Liikuntatieteellinen tiedekunta
Jyväskylän yliopisto
Syksy 2022

TIIVISTELMÄ

Juurakko, J. 2022. Etusormien proprioseptiikan kortikaalinen lateralisaatio. Liikuntatieteellinen tiedekunta, Jyväskylän yliopisto, (Biomekaniikka) pro gradu -tutkielma. 53 s., 3 liitettä.

Proprioseptoreiksi lasketaan lihaksessa oleva lihasspindel, jännerakenteissa sijaitseva Golgin jänne-elin, nivelessä sijaitsevat reseptorit ja ihon venymää aistivat reseptorit. Kortikokinemaattisen koherenssin (CKC) avulla voidaan laskea ääreishermostolta lähtevän proprioseptiivisen signaalin ja keskushermoston vasteen välistä koherenssia. CKC kuvaa kortikaalisen vasteen voimakkuutta proprioseptiiviselle signaalille. Näyttäisi siltä, että proprioseptiivisen informaation käsittely olisi lateraloitunut oikealle aivopuoliskolle. Tarkoittaen sitä, että kyseistä informaatiota prosessoidaan enemmän oikealla aivopuoliskolla verrattuna vasempaan aivopuoliskoon.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, havaitaanko pneumaattisen stimulaattorin avulla tapahtuvan etusormien jatkuvan liikkeen CKC:n kortikaalista lateraloitumista primääreillä sensorimotorisilla alueilla (SM1). Lisäksi tarkasteltiin etusormien CKC:n voimakkuuden ja sen lateraloitumisen yhteyttä molempien käsien näppäryyttä mittaavan Grooved Pegboard testin aikaan.

Yhteensä 31 oikeakätisen koehenkilön tulokset analysoitiin lopullisessa tarkastelussa. Analyysit suoritettiin koko otoksen tasolla ja aikaisempien havaintojen mukaisesti myös ikäryhmissä. Ikäryhmät jaettiin otoksen mediaanin mukaan nuoriin (alle 35-vuotiaat, $n = 16$) ja varttuneisiin (yli 35-vuotiaat, $n = 15$). Neuraalinen aktiivisuus mitattiin magnetoenkefalografian avulla ja sormien passiivinen liikutus suoritettiin pneumaattisilla stimulaattoreilla. Sormien passiivisen liikkeen ja neuraalisen aktiivisuuden välille laskettiin CKC:n voimakkuus liiketaajuudella (F0) ja sen ensimmäisellä harmonisella taajuudella (F1).

CKC F0-taajuuden lateraloituminen oli yhteydessä käsien näppäryyteen ($r = -0.409$, $p < 0.05$). CKC:n F0-taajuuden lateraloituminen oikealle hemisfäärille ennusti parempaa käsien näppäryyttä ($\beta = -22.70$, $p < 0.01$). Oikean sormen ja vasemman hemisfäärin SM1 alueen CKC F0-taajuuden voimakkuus oli yhteydessä heikompaan käsien näppäryyteen (0.459 , $p < 0.01$). Koko otoksen kohdalla CKC:n voimakkuuden lateraloituminen ei ollut tilastollisesti merkitsevää, vaikka yksilöiden kohdalla havaittiin CKC:n voimakkuuden lateraloitumista. Nuorten ryhmässä havaittiin merkitsevästi voimakkaampi CKC F1-taajuudella vasemman hemisfäärin SM1 alueella. Nuorilla CKC F1-taajuuden lateralisaatio oli yhteydessä käden näppäryyteen ($r = -0.629$, $p < 0.05$). Tarkoittaen parempaa käsien näppäryyttä, kun oikean hemisfäärin CKC:n voimakkuus oli yhtä korkea tai korkeampi kuin vasemman hemisfäärin SM1 alueen.

Tulokset tukevat käsitystä, että oikean hemisfäärin aktiivisuus on yhteydessä ihmisen sensorimotorisiin toimiin, jotka nojaavat proprioseptiivisen informaation käsittelyyn.

Asiasanat: proprioseptiikka, kortikokinemaattinen koherenssi, lateralisaatio

ABSTRACT

Juurakko, J. 2022. Cortical lateralization of the index finger's proprioception. Faculty of Sport and Health Science, University of Jyväskylä, Master's thesis, 53 pp., 3 appendices.

Muscle spindle, Golgi tendon organ, joint receptors, and receptors signaling stretch of the skin are counted as proprioceptors. Corticokinematic coherence (CKC) can be used to calculate coherence between activated proprioception and cortical areas. CKC describes the strength of the cortical response to repetitive activated proprioceptors. Proprioceptive signals seem to be processed a bit more dominantly in the right hemisphere.

The purpose of this study was to find out if we see lateralization between the primary sensorimotor areas (SM1) of the index fingers' CKC. Second question: do we have a relationship between possible lateralization and motor performance of the hands?

In total 31 right-handed participants were recorded. Pneumatic artificial muscle was used to move passively both index fingers at the same time and neural activity was recorded with magnetoencephalography. Motor performance was measured as the total time of both hands in the Grooved Pegboard -test. Data analyses were done for all participants and within age groups. Age groups were categorized by the median age of the whole population to "young adults" (under 35 years) and "grown adults" (over 35 years). CKC was calculated on the movement frequency (F0) and its first harmonic (F1).

Lateralization of the CKC at F0-frequency has a relationship with the motor performance of the hands ($r = -0.409$, $p < 0.05$). Lateralization of the CKC at F0-frequency predicted better motor performance ($\beta = -22.70$, $p < 0.01$). Also, higher CKC at F0-frequency in the left SM1 had a relationship with the poorer motor performance of the hands (0.459 , $p < 0.01$). The left hemisphere had significantly ($p < 0.05$) higher CKC at F1-frequency in the "young-adult" group. Lateralization of the CKC at F1-frequency had a relationship with motor performance of the hands ($r = -0.629$, $p < 0.05$). This means that young adults had a better motor performance of the hands when CKC at F1-frequency amplitude was higher or as high as left SM1.

Results support that the right hemisphere activity is important for better proprioceptive processing.

Key words: proprioception, corticokinematic coherence, lateralization

KÄYTETYT LYHENTEET

BA	Brodmannin alue
BOLD-vaste	Veren happisaturaatiosta riippuvainen vaste
CKC	Kortikokinemaattinen koherenssi
EDI	Edinburgh Handedness Inventory -kysely
EOG	Elektro-okulografia
fMRI	Toiminnallinen magneettiresonanssikuvaus
GABA	Gamma-aminovoihapon
IPAQ	Kansainvälisen fyysisen aktiivisuuden kysely
IPL	Inferioparietaalinen alue
IW	Ian Watterman
LI	Lateralisaatioindeksi
M1	Primäärinen motorinen alue
MABEC2	Movement Assessment Battery for Children – Second Edition
MRI	Magneettiresonanssikuvaus
OS	Oikea sormi
S1	Primäärinen sensorinen alue
SAI	Lyhyen latenssin afferenttien inhibitio
SEF	Somatosensorinen herätevaste
SII	Sekundäärinen sensorinen alue
SM1	Primäärinen sensorimotorinen alue
VS	Vasen sormi

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

JOHDANTO.....	1
1. PROPRIOSEPTIIKKA.....	2
1.1 Proprioseptiikan tärkeys	3
1.1.1 Proprioseptiikan yhteys motoriseen toimintakykyyn	5
1.1.2 Alaraajan proprioseptiivisen havainnointikyvn yhteys suoritustasoon	5
1.1.3 Yläraajan proprioseptiivisen havainnointikyvyn yhteys suoritustasoon	6
1.1.4 Proprioseptiikan neuraaliset vasteet ja niiden yhteys toimintakykyyn.....	8
1.1.5 Ikääntymisen vaikutus yläraajan proprioseptiikkaan	9
1.2 Proprioseptorit ja niiden päätehtävät	10
1.2.1 Lihasspindeli.....	11
1.2.2 Golgin jänne-elin	12
1.2.3 Nivelen reseptorit	13
1.3 Proprioseptiivista informaatiota kuljettavat hermoradat	14
1.4 Proprioseptiivisen vasteen primäärit kortikaaliset alueet	16
2. AIVOJEN LATERALISAATIO	19
2.1 Yläraajojen sensorimotorisen systeemin kortikaalinen lateralisoituminen	20
3. KORTIKOKINEMAATTINEN KOHERENSSI JA MAGNETOENKELOGRAFIA.	23
4. TUTKIMUKSEN TARKOITUS.....	25
5. METODIT	27
3.1 Koehenkilöt	27
3.2 Tutkimusprotokolla	27

3.3	Fyysisen aktiivisuuden ja kätsyyden kyselyt.....	28
3.4	Käden näppäryystesti.....	28
3.5	Proprioseptiivinen stimulaatio	29
3.5.1	Magnetoenkefalografia, MEG	30
3.5.2	Etusormien kinematiikka.....	31
3.6	Datan prosessointi	31
3.6.1	MEG datan preprosessointi	31
3.6.2	Kortikokinemaattinen koherenssi	31
3.6.3	Kortikokinemaattisen koherenssin lateralisoituminen.....	33
3.7	Tilastoanalyysi.....	33
6.	TULOKSET	34
7.	POHDINTA.....	40
	LÄHTEET	45

LIITTEET

Liite 1: Edinburgh kätsyydesti

Liite 2: Kansainvälinen fyysisen aktiivisuuden kysely (IPAQ)

Liite 3: Grooved Pegboard ohjeistus

JOHDANTO

Ihmisen proprioseptiivisen aistin eli liike-, asento- ja sisäisten voimien aisti on jäänyt sensorimotorisen toiminnan tutkimisen ulkolaidalle. Aikaisemmin proprioseptiikan tutkiminen on perustunut käyttäytymistutkimukseen, jonka avulla on kartoitettu ihmisten kykyä aistia erilaisia liikesuuruuksia, raajojen asentoja tai voiman muutoksia. Nykyaikaisten tutkimusmenetelmien avulla on alettu hahmottamaan kuinka ääreishermostolta saapuva proprioseptiivinen informaatio on mukana ihmisen sensorimotorisessa toiminnassa. Tätä tutkimusala on vienyt eteenpäin aivokuvantamismenetelmien kehittyminen. Lisäksi tutkimuksissa on kehityksen myötä kyetty rakentamaan proprioseptoreita stimuloivia stimulaattoreita. Näiden stimulaattoreiden avulla voidaan stimuloida proprioseptiivisiä reseptoreita, kuten lihasspindelitä, ilman muiden sensoristen reseptoreiden voimakasta aktivoitumista.

Tällä hetkellä tiedetään hyvin, kuinka proprioseptiivinen informaatio kulkeutuu keskushermostoon. Lisäksi on selvää, millä kortikaalisilla alueilla kyseisen informaation käsittely alkaa. Nykyaikaisilla metodeilla, kuten pneumaattisella stimulaattorilla tai jänteen vibraattorilla kyetään aktivoimaan proprioseptiivisiä reseptoreita ja havaitsemaan tämän aktivoitumisen keskushermoston vaste. Tällä hetkellä tiedetään, että motoriseen muistiin perustuvien kompleksisten motoristen toimintojen toteuttaminen on lateralisoitunut voimakkaammin vasemmalle aivopuoliskolle eli hemisfäärille.

Kuitenkin tämänhetkinen näyttö proprioseptiivisen informaation prosessoinnin lateralisoitumisesta terveillä koehenkilöillä oikealle hemisfäärille pohjautuu pitkälle vain vibraation avulla toteutettuihin tutkimuksiin. Tämän vuoksi tässä tutkimuksessa tutkitaan pneumaattisen stimulaattorin avulla tuotetun etusormien liikkeen proprioseptiivisen vasteen lateralisoitumista ja sen yhteyttä käden sensorimotoriseen toimintakykyyn.

1. PROPRIOSEPTIIKKA

H. Charlton Bastian viittasi ensimmäisen kerran proprioseptiikkaan vuonna 1887. Hän kuvaili ensimmäisenä liikeaistia termillä kinestisia - "kinaesthesia". Bastian uskoi, että kinesteettiset aistimukset ovat sisäisten ja ulkoisten voimien aiheuttamia. (Bastian 1887) Sir Charles Sherrington esitteli ensimmäisenä termin proprioseptiikka vuonna 1906. Hän halusi tehdä selvän erottelun kahden eri tavalla aktivoituvan afferentin välille. Eksteroseptorit aktivoituvat ulkoisesta ärsykkeestä ja proprioseptorin aktivoituvat kehon sisäisestä ärsykkeestä. (Burke 2007) Eksteroseptoreita ovat hyvin tunnetut aistit, kuten näkö, kuulo, haju, maku ja somatosensoriset aistit: tunto-, kipu- ja lämpöaisti. Sisäisistä ärsykkeistä informaatiota kuljettavat kahden tyyppiset afferentit: interoseptorit ja proprioseptorit. Interoseptorit saavat ärsykkeensä sisäelimestä, kun taas proprioseptorit aktivoituvat lihaksen, jänteen, nivelten ja ihon sensoristen päätteiden kautta. Proprioseptoreiden toiminta aiheuttaa ihmiselle tiedostettuja aistimuksia, kuten raajan liikkeen ja asennon aistimus, voiman tai jännitteen aistimus ja työpanoksen aistimisen. Tätä voidaan kutsua proprioseptiiviseksi aistiksi. (Proske & Gandevia 2012) Lisäksi on hyvä muistaa, että proprioseptiivinen aisti on aina aktiivisena toimijana, vaikka aistimukset eivät saavuttaisi tietoisuuden tasoa.

Proprioseptiikan aikaisemmin mainitut alaryhmät tarjoavat kehon liikkeestä, sijainnista ja ihmisen kehoon vaikuttavista voimista tietoa. Proprioseptiikka kykenee aistimaan ihmiseen kohdistuvaa ulkopuolista voimaa sekä ihmiseen itsensä aiheuttamia liikkeitä, asentoja ja niistä seuraavia voimia. (Taylor 2009) Tätä henkilön oman lihasaktiivisuuden aikaansaamaa liikettä, asentoa tai lihaksen tuottamaa voimaa kutsutaan aktiiviseksi toiminnaksi. Passiivisesta havainnoinnista puhutaan, kun ulkopuolinen tekijä aiheuttaa kehoon kohdistuvan voiman ja siitä seuraavan liikkeen tai asennon.

Liikeaisti eli aisti nivelen liikkeestä on havainto kehon osien liikkeestä suhteessa kehoon. *Asentoaisti* tarkoittaa kykyämme havaita kehon osan sijainti suhteessa muuhun kehoon. *Voiman tai jännityksen aisti* kertoo meille, kuinka paljon voimaa kohdistuu lihakseen. Kaikkia näitä

aistihavaintoja käytetään yksittäin ja yhdessä muodostamaan käsitys kehon toiminnasta suhteessa itseensä ja ympäristöön. (Taylor 2009)

1.1 Proprioseptiikan tärkeys

Somatosensorisen systeemin ehkäpä tärkein rooli on tarjota tietoa kehon osien suhteesta toisiinsa sekä ympäristöön. Tätä varten tuntoaistin ja proprioseptiikan tarjoama informaatio sulautetaan näköaistilta ja tasapainoaistilta saatavan tiedon kanssa. (Dijkerman & de Haan 2007.) Ihmiset aistivat tiedostamattaan jatkuvasti kehonsa asentoa ja sen suhdetta ympäröivään tilaan sekä sen tarjoamiin motorisen toiminnan mahdollisuuksiin (Haagard and Wolpert 2005). Tästä sisäisen ja ulkoisen tilan yhteensovittamisen mallista käytetään termiä *kehoskeema* (Paillard 1999).

Proprioseptiivinen aisti näytteleekin suurta osaa tässä mallissa. Kehoskeema omaa kaksi kehon sisäistä pääkomponenttia: (1) tieto kehon osien massasta, pituudesta ja sijainnista sekä (2) oletus liikkeestä seuraavasta sensorisesta palautteesta. (Enoka 2015, 284) Kehoskeemaa voidaan kuvata eräänlaiseksi hermoverkostollisesti aktiiviseksi tilaksi, joka reagoi ulkoisen sekä kehon sisäisen mallin muutoksiin. On näytetty, että kehosta saatava proprioseptiivinen informaatio vaikuttaa esimerkiksi motoriseen mielikuvitteluun (Ionta ym. 2012; McCormick ym. 2007; Petit ym. 2003). Toisin sanoen, kädestä saatavan proprioseptiivisen palautteen seurauksena kehoskeemassa tapahtuu muutoksia ja tämä vaikuttaa motorisen hahmottamisen kykyyn.

Proprioseptiivisen palautteen roolia ihmisen toiminnassa on melko vaikeaa tutkia erillään somatosensorisesta ja tasapainoaistista. Kirjallisuudessa on kuitenkin hyvin tunnettu potilastapaus, jossa proprioseptoreilta tuleva palaute oli tulehduksen aiheuttaman tilan seurauksena hävinnyt lähes kokonaan. Ian Watterman, ”IW”, kärsi 19-vuotiaana lähes täydellisen tulehduksen aiheuttaman deafferentaation eli keskushermostoon tuovien hermoimpulssien kulun estymisen. IW:n motorinen toiminta oli käytännössä täysin toimintakykyinen, mutta hänen keskushermostonsa ei saanut lainkaan tietoa kehon liikkeistä.

Hän opetteli kokonaan ohjaamaan motorista toimintaansa näköaistinsa turvin. (McNeil ym. 2010) McNeilin ja hänen tutkimusryhmänsä tutkimuksissa havaittiin, että tämän seurauksena esimerkiksi käsien ollessa peitettynä katseelta ei IW kyennyt kontrolloimaan niitä normaalisti. Hänelle tehdyissä kokeissa kädet täytyi asetella näkösuojan taakse, koska täydellisen visuaalisen deprivaaation seurauksena IW ei kyennyt orientoimaan itseänsä ja tuoilta tippumisen riski olisi ollut liian suuri. IW:n tapaus osoittaa hyvin kuinka tärkeässä roolissa proprioseptoreiden tarjoama informaatio on ihmisen normaalin motorisen toimimisen mahdollistajana.

Terveen ihmisen tahdonalaiset liikkeet voidaan jakaa niiden nopeuden mukaan kahteen eri kategoriaan. Nopeat liikkeet suoritetaan alle 200 millisekunnin aikana ja hitaiden liikkeiden suorittamiseen käytetään yli 200 ms. (Schmidt ym. 1979) Tätä noin 200 millisekunnin rajaa kutsutaan sensorinmotoriseksi viiveeksi (Enoka 2015, 300). Motorisen toiminnan kannalta olennainen ero nopeiden ja hitaiden liikkeiden välillä on niiden toteutukseen vaikuttavat tekijät. Nopeat liikkeet toteutetaan kehoskeemaan suhteutettujen jo opittujen liikemallien avulla. Näiden liikkeiden ohjaamiseen sensorinen palaute on liian hidasta korjaamaan liikkeen aikaisia virheitä. Tällöin kyseessä on avoimen liikejärjestelmän malli (feedforward control, open-loop system). (Sainburg ym. 1999) Hitaiden liikkeiden aikana sensoriselta järjestelmältä saatavalla palautteella on riittävästi aikaa vaikuttaa liikkeen toteutukseen. Tällöin liikettä kyetään korjaamaan liikkeen aikana sensorisen palautteen avulla (closed-loop, feedback control). (Enoka 2015, 300)

Fengin tutkimusryhmän (2019) mukaan ranteen ja kyynärpään proprioseptiivinen havainnointikyky selitti yläraajan hitaiden liikkeiden tarkkuuden variaatiosta 52 %. He havaitsivat kuitenkin myös, että proprioseptiivinen havainnointikyky selittäisi myös pientä osaa nopeiden liikkeiden tarkkuudesta. Onkin esitetty, että keskushermoston liikkeen suunnittelun taustaa voitaisiin kuvata liikevektorin suunnan ja liikkeen sisältämän nivelperusteisen toiminnan avulla (Sober & Sabes 2003). Nopeat liikkeet perustuvat pitkälle ballistiseen karkeamotoriseen toimintaan, jolloin motorisen toiminnan aloitus ja lopetus on määritelty keskushermostossa ennen liikkeen toteuttamista. Tällöin proprioseptiivisen palautteen rooli on

pitkälle yhteydessä kehoskeemaan. Mahdollistaen liikkeen aloituksen ja lopetuksen oikeassa suhteessa kehoon nähden (Scheidt ym. 2005). Hitaat liikkeet perustuvat voimakkaammin hienomotoriseen liikehallintaan. Tällöin keskushermoston tehtävänä on aloittaa, hallita ja lopettaa liike mahdollisimman tarkasti. Liikkeen hallintavaiheessa keskushermosto pyrkii toteuttamaan liikkeessä mukana olevien nivelten mahdollisimman optimaalisen toiminnan (Sobinov & Bensmaia 2021). Sober ja Sabes (2003) osoittivatkin nivelperusteisen liikkeen hallinnan perustuvan enemmän proprioseptiiviseen palautteeseen kuin visuaaliseen informaatioon.

1.1.1 Proprioseptiikan yhteys motoriseen toimintakykyyn

Ihmisen suorituskkyä ja toimintakykyä voidaan mitata monella eri tavalla. On kuitenkin selvää, että sensorimotorisen systeemin suorituskkyyn vaikuttaa erittäin merkittävästi somatosensorinen toiminta. (Sobinove and Bensmaia 2021) Taktiilisen ja propsioseptiivisen informaation yhteistoiminta on tiukasti toisiinsa sidoksissa käden hienomotoristen liikkeiden toteutuksessa. Taktiilisen informaation avulla keskushermosto saa esimerkiksi tiedon sormien väliin otetun objektin ominaisuuksista. (Purves ym. 2018, 185) Havaitaan, mikä on oikea ajanjakso tuottaa voimaa ja riittävä voimataso pitämään objekti sormien välissä. Ilman tätä tietoa proprioseptiikan tarjoaman tuotetun voiman informaatiota ei osata tulkita. Tämän seurauksena objekti tippuu liian vähäisen voimantuoton seurauksena tai objektin hallitsemista varten tuotetaan liian paljon voimaa. (Augurelle ym. 2003; Gentilucci ym. 1997)

1.1.2 Alaraajan proprioseptiivisen havainnointikyvn yhteys suoritustasoon

Proprioseptiivinen palaute tarjoaa suoritusta varten informaatiota raajan sen hetkisestä asennosta, liikkeestä ja raajan sisäisistä voimista. Tämän informaation tarkkuudella näyttäisi olevan yhteyttä ihmisen motoriseen toimintakykyyn. Lephartin tutkimusryhmä (1996) havaitsi voimistelijoiden olevan merkittävästi herkempiä kuin ei-voimistelijat havaitsemaan polvinivelen passiivisen ekstension. Uudemmatkin tutkimukset ovat havainneet Alaraajan proprioseptiivisen havainnointikyvn olevan kilpaurheilijoilla herkempi kuin ei-urheilijoilla

(Han ym. 2015, Lin ym. 2006, Muaidi ym. 2009). Lin ym. (2006) toivat esille, että eliittitason tennispelaajat kykenevät muistamaan tarkemmin polvi- ja nilkkanivelen asentoja kuin amatööri- tai noviisipelaajat. He kuitenkin havaitsivat, että proprioseptiivisessä havainnointikyvyssä ei ollut eroa amatöörin ja noviisin välillä. Olympiatason jalkapalloilijoilla eli alle 23-vuotiailla huippu-urheilijoilla havaittiin polvinivelen proprioseptiivisen havainnointikyvyn olevan yhteydessä valmentajan määrittämään taitoindeksiin (Muaidi ym. 2009). Han tutki ryhmänsä (2015) kanssa nilkkanivelen, olkanivelen ja spinaalisen proprioseptiikan havainnointikyvyn yhteyttä kansainvälisten eliittuurheilijoiden kilpailulliseen tasoon. 100 urheilijan joukossa oli lajien edustajia aerobicista, uinnista, tanssista, sulkapallosta ja jalkapallosta. He havaitsivat, että monen nivelen proprioseptiivisen informaation havainnointikyvyn yhteistulos on yhteydessä urheilijoiden kilpailulliseen tasoon. Tutkimuksessa ei kuitenkaan havaittu spesifisen lajiharjoittelun määrän vaikuttavan proprioseptiiviseen havainnointikykyyn.

1.1.3 Yläraajan proprioseptiivisen havainnointikyvyn yhteys suoritustasoon

Yläraajan nivelten toiminnassa ihmisen proprioseptiivinen havainnointikyky toimii hieman eri tavalla proksimaalisten ja distaalisten nivelten välillä. Ihminen aistii herkemmin yläraajan distaalisten osien kuten käden nivelten kulmanmuutoksia verrattuna kulmanopeuksien muutokseen. Proksimaalisten osien kuten kyynärnivel ja olkanivel havainnoinnissa ihminen on sensitiivisempi nivelten kulmanopeuksien muutokselle kuin asentomuutoksille. (Hall & McCloskey 1983)

Tseng havaitsi tutkimusryhminensä (2018; 2020), että passiivisen asentoaistin sensitiivisyys on lapsilla yhteydessä käden näppäryyteen. Tutkimuksissa tarkempi kyky erotella ranteen nivelkulmat toisistaan korreloi negatiivisesti ($r = -0.44, p = 0.006$; $r = -0.40, p = 0.005$) käden näppäryyttä arvioivan indeksin kanssa (Movement Assessment Battery for Children – Second Edition, MABEC2). Toisin sanoen pienempi ero käden asennon havaitsemisessa oli yhteydessä korkeampiin pisteisiin MABEC2:n asteikolla.

Koripallon heittotarkkuutta ja yläraajan asentoaistia tutkittaessa on havaittu, että ranteen, kyynärnivelen ja olkanivelen asentoaistin tarkkuudella ja seisten toteutettujen heittojen onnistumismäärällä ei ole yhteyttä (Sevrez & Bourdin 2015; Freeston ym. 2015). Sevrez & Bourdin (2015) osoittivat kuitenkin, että istuma-asennossa suoritettujen heittojen osumatarkkuus ja ranteen sekä kyynärnivelen proprioseptiivinen havainnointikyky ovat yhteydessä toisiinsa. Heidän hypoteesinsa mukaan seisten ja istuen toteutettavien heittojen tarkkuus onkin riippuvaista eri tekijöistä. Voi olla mahdollista, että seisten tapahtuvassa heitossa toimenpiteen tarkkuus määräytyy kehon kokonaisvoimantuoton ja hallinnan kautta. Tällöin yläraajan distaaliset osat pyritään stabiloimaan ja palloon kohdistuvan voiman suunta määräytyy voimakkaammin koko kehon orientaation mukaan. Istuma-asennossa palloon kohdistuva voima ja sen suunta on riippuvaista yläraajan voimantuotosta sekä pallon vapautushetken ranteen asennosta. Tässä tapauksessa ranteen asennon hallinta korostuisi, joka voisi selittää asentoaistin yhteyden voimistumista istuma-asennosta tapahtuvaan heittotarkkuuteen. (Mirdamadi & Block 2020; Sevrez & Bourdin 2015; Hall & McCloskey 1983)

On oleellista selvittää tehtävän optimaalisen suorittamisen kannalta käytettävät lihakset ja niiden vaikutuspiirissä olevat nivelet. Mirdamadi & Block (2020) tutkivat kyynär- ja olkanivelen asentomuistin tarkkuutta ja sen yhteyttä motoriseen oppimiseen. Tutkimuksessa havaittiin harjoittelun seurauksena asentomuistin eli toisin sanoen proprioseptiivisen havainnointikyvyn parantumista. Tämä asentomuistin kehittyminen oli yhteydessä heidän tehtävänsä, jossa tavoiteorientoituneen tehtävän suorittaminen vaati ranteen stabilointia sekä kyynär- ja olkanivelen tarkkaa hallintaa.

Toisaalta myöskään ranteen proprioseptiikan havainnointikyvyn ja käden näppäryyttä vaativien tavoiteorientoitujen tehtävien välillä ei ole aina löydetty yhteyttä aikuisväestössä (Helsen ym. 2016; Wright ym. 2011). Erot voivat johtua tutkimusmenetelmien eroavaisuuksista. Yhteyden havainneet Tseng ym. (2020; 2018) tutkivat asentoaistin erottelukykyä, kun Wright tutki ryhmänsä (2011) kanssa passiivisen liikkeen havainnointia eikä korrelaatiota löytynyt. Tämän lisäksi Feng ym. (2019) osoittivat, että aktiivisen proprioseptiivisen havainnon uudelleen

toistamisen tarkkuus on yhteydessä voimakkaammin hitaamman (> 200 ms) liikenopeuden vaativan toiminnan onnistumiseen kuin nopean (< 200 ms) liikenopeuden vaativan liikkeen onnistumiseen. On myös havaittu, että tehtävästä riippuen ihmiset kykenevät muuttamaan heidän motorista strategiaansa ja hyödyntämään toimivampia ominaisuuksiaan tavoitteen optimaalista suorittamista varten, jolloin proprioseptiivisen palautteen merkitys liikkeen suorituksessa voi heikentyä (Helsen ym. 2016).

1.1.4 Proprioseptiikan neuraaliset vasteet ja niiden yhteys toimintakykyyn

Nurmi ym. (2021) tutkivat käden proprioseptiivisen vasteen voimakkuutta terveillä ja CP-vammaisilla nuorilla toiminnallisen magneettikuvauksen (fMRI, functional magnetic resonance imaging) avulla. He havaitsivat, että voimakkaampi dominantin käden etusormen BOLD-vaste (veren happisaturaatiosta riippuvainen vaste, brain oxygen-level dependent) primäärillä sensorimotorisella (SM1) ja sekundäärisellä somatosensorisella (SII) alueella etusormen proprioseptiiviseen stimulaatioon oli yhteydessä dominantin käden heikompaan sensorimotoriseen toimintakykyyn. Ei-dominantin käden etusormen osalta vain voimakkaampi vaste SII alueella oli yhteydessä ei-dominantin käden heikompaan sensorimotoriseen toimintakykyyn. Aikaisemmissa tutkimuksissa on osoitettu, että voimakkaampi BOLD-vaste on yhteydessä hermosolujen laukeamisherkkyyttä alentavan välittäjäaine glutamiinin eksitoivaan vaikutukseen. Vastaavasti hermosolun laukeamisherkkyyttä inhiboiva välittäjäaine gamma-aminovoihapon (GABA) määrä on käänteisesti yhteydessä BOLD-vasteeseen. (Kurcyus ym. 2018; Just & Sonnay 2017)

Piitulainen ym. (2018a) tutkivat nilkan proprioseptiivisen stimulaation aiheuttamaa neuraalista vastetta aivojen sensorimotorisella alueella kortikokinemaattisen koherenssin (CKC, corticokinematic coherence) avulla. Heidän tutkimuksensa mukaan dominantin jalan voimakkaampi CKC oli yhteydessä heikentyneeseen tasapainoon. Lisäksi he havaitsivat, että ikääntyneiden koehenkilöiden (66–73 v) dominantin jalan CKC oli merkittävästi korkeampi kuin nuorten (18–31 v). Nuorilla havaittiin myös CKC:n lateralisoituminen, kun ei-dominantin jalan CKC oli merkittävästi korkeampi kuin dominantin jalan.

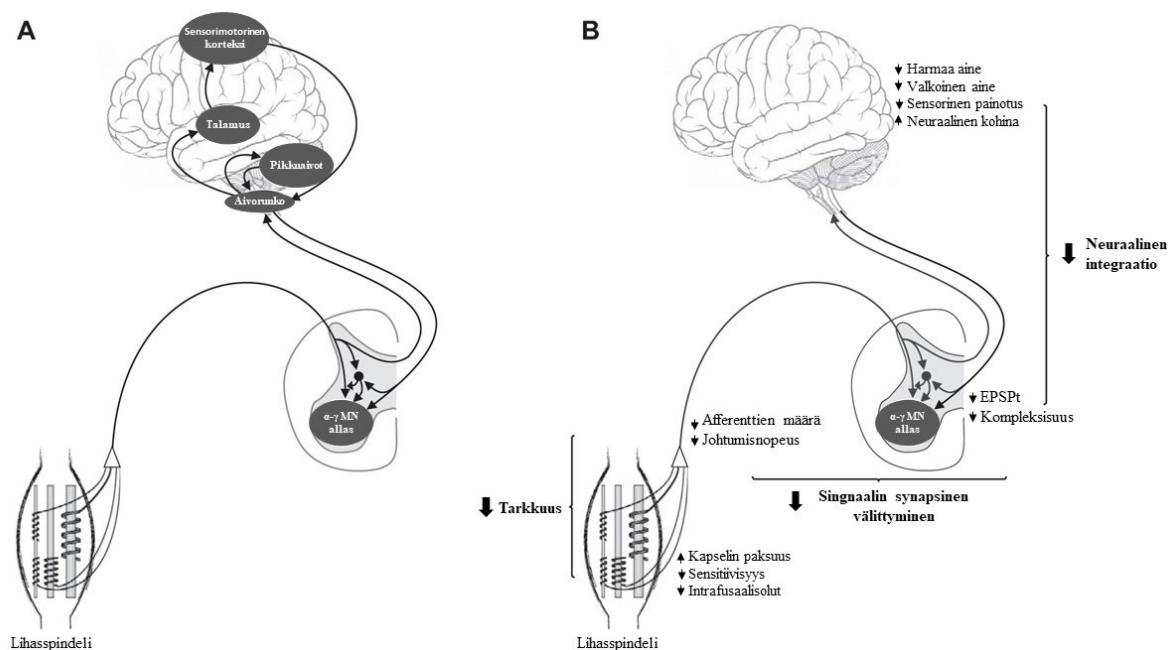
Mirdamadi & Block (2020) tutkivat sensorimotorisen oppimisen vaikutusta afferenttien inhibitoriseen vaikutukseen ja sen yhteyttä suorituskkyyn transkraniaalisen magneettistimulaation (TMS) avulla. Tutkimuksessa käytettiin lyhyen latenssin afferenttien inhibitiio -menetelmää (SAI, shor-latency afferent inhibition). SAI:n avulla tutkitaan periferiasta tulevan afferenttisen impulssin vaikutusta TMS:n avulla herätettyyn lihasvasteeseen. He havaitsivat, että inhibitorisen vaikutuksen kasvu oli yhteydessä sensorimotorisen taidon kehittymiseen. Inhibitorinen vaikutus kasvoi koehenkilöillä, joiden sensorimotorinen taito oli kehittynyt ja heikkeni niillä, joilla kehitystä ei havaittu.

Piitulainen ym. (2018a) esittivätkin, että heikentynyt sensorimotorinen toimintataso voisi johtua inhibitorisen ja eksitatorisen toiminnan epätasapainosta. Näyttääkin siltä, että dominantin puolen SM1:lle kohdistuva voimakkaampi inhibitorinen aktiivisuus olisi yhteydessä korkeampaan motoriseen toimintatasoon (Nurmi et al. 2021, Mirdamadi & Block 2020). Toisin sanoen madaltunut inhibitorinen vaikutus voi mahdollistaa epäspesifimmän informaation käsittelyn, joka vaikuttaa heikentävästi sensorimotoriseen toimintakkyyn.

1.1.5 Ikääntymisen vaikutus yläraajan proprioseptiikkaan

Ikääntyvien ihmisten proprioseptiivisen aistin heikentymisen taustalla on anatomiset ja fysiologiset muutokset keskus- ja ääreishermostossa. Kyseiset muutokset heikentävät arkipäiväistäkin toimintakkyä esimerkiksi tilanteissa, joissa näköaistilta saatava palaute puuttuu tai on rajoittunutta. (Hughes ym. 2015) Ihmisen proprioseptiiviselle aistille tärkeissä ääreishermoston osissa tapahtuu ikääntymiseen liittyviä muutoksia. Swash ja Fox (1972) havaitsivat tutkimuksessaan, että yläraajan lihasten lihasspindleitä ympäröivä kapselirakenne paksuuntuu lineaarisesti suhteessa ikään. Lihasspindleissä tapahtuu myös intrafusaalisolujen rakenteellisia muutoksia iän myötä, jotka vaikuttavat laskevasti tumaketjusolujen määrään (Liu ym. 2005). Hiirillä tehdyssä tutkimuksessa selvisi, että Ia- ja II-afferenttien sekä spinaalisella tasolla takajuuren ganglion sensoristen hermosolujen degeneraatio alkaa ennen intrafusaalisolujen atrofiaa (Vaughan ym. 2017). Ikääntyminen vaikuttaa lihasspindleiden lisäksi nivelen mekanoreseptorien määrään laskevasti (Morisawa 1998).

Anatomisten löydösten lisäksi eläinkokeissa on todistettu, että lihasspindelien dynaaminen sensitiivisyys heikkenee. Ikääntyneiden rottien lihasspindelien venyttäminen aiheuttaa madaltuneen laukeamistaajuuden verrattuna nuorten rottien lihasspindeliin. (Kim ym. 2007; Miwa ym. 1995) Burke ym. (1996) havaitsivat, että ikääntyneillä ihmisillä vibraation avulla aiheutettu refleksin inhiboinnin voimakkuus on matalampi kuin nuorilla. He havaitsivat lisäksi refleksin fasilitoinnin heikentymisen iäkkäämmillä koehenkilöillä. Kuvasta 1 havaitaan, millä alueilla lihasspindelien vaikutuksessa olevissa hermoverkostoissa tapahtuu muutoksia ikääntymisen myötä.



Kuva 1. A: Proprioseptiikan spinaalisten ja nousevien ratojen skeemakuva. B: Ikääntymisen vaikutus lihasspindelien vaikutuksen alaiseen hermoverkostoon. (Mukailtu: Henry & Baudry 2019)

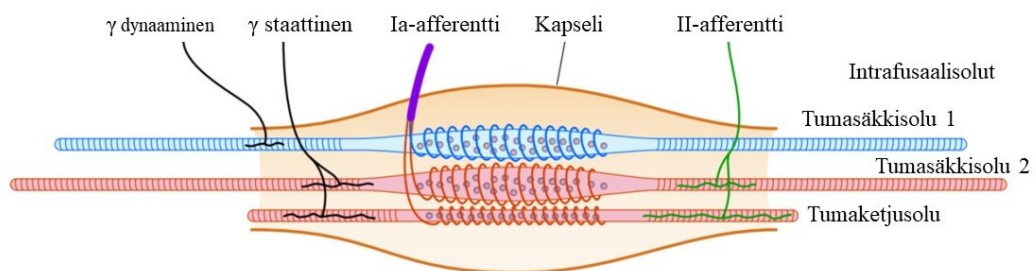
1.2 Proprioseptorit ja niiden päätehtävät

Proprioseptiivinen informaatio saa alkunsa elimistön ääreisosista. Ääreisosissa toimivat proprioseptorit lähettävät keskushermostolle informaatiota raajan liikkeistä, asennosta ja sen tuottamista tai siihen kohdistuvista voimista. Tämä proprioseptiivinen aisti syntyy

ääreishermoston proprioseptoreilta: lihasspindelien, Golgin jänne-elinten ja nivelen mekanoreseptoreiden avulla. (Delhaye ym. 2018)

1.2.1 Lihasspindeli

Lihasspindleitä pidetään tärkeimpinä sensorisina reseptoreina ihmisen liike- ja asentoaistin taustalla (Proske & Gandevia 2012). Nämä reseptorit sijoittuvat yhdensuuntaisesti lihassolujen kanssa ja ovat erittäin sensitiivisiä lihaksen lihaspituuksille sekä niiden muutoksille (Henry & Baudry 2019). Kuvassa 2 esitellään lihasspindelin rakenne. Lihasspindelit koostuvat kolmesta erilaisesta intrafusaalista lihassolusta, joiden käskytyks saapuu selkäytimestä dynaamisten ja staattisten gamma-motoneuronien aksonien välityksellä. Keskushermostolle lihasspindelin sisäisistä muutoksista informaatiota toimittavat primäärit sensoriset päätteet Ia-afferentit ja sekundäärit sensoriset päätteet II-afferentit. (Proske & Gandevia 2012)



KUVA 2. Lihasspindelin rakenne (Mukailtu: Proske & Gandevia 2012).

Ia-afferentin laukeamistiheys saavuttaa huippunsa lihaksen passiivisen venytyksen alussa ja lopussa. Samalla laukeamistiheys lisääntyy suhteessa lihaksen lisääntyvään venytykseen ja tasaantuu nopeasti staattisessa venytyksessä. Ia-afferentti hiljenee hetkellisesti lihaksen palautuessa passiivisesti takaisin alkutilaan. II-afferentin laukeamistiheydessä ei tapahdu yhtä suuria dynaamisia muutoksia kuin Ia-afferentilla. II-afferentit näyttävät omaavan korkeamman asentosensitiivisyyden ja Ia-afferentit reagoivat voimakkaammin lihaksen pituuden muutoksiin. (Edin & Vallbo 1990)

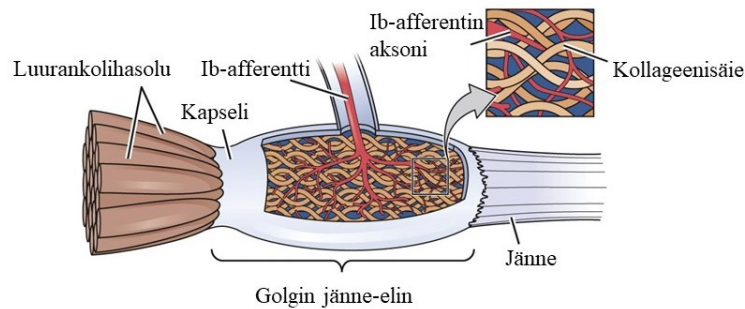
Lihaksen ekstra- ja intrafusaalisoluja käskyttävät efferentit. Ihmisten motoneuronit eli spinaalisella tasolla lihassoluille käskyä välittävät hermosolut jaetaan kahteen ryhmään. Alfa-motoneuronit hermottavat luurankolihasia eli ekstrasfusaalisoluja. Gamma-motoneuronit hermottavat lihasspindelin intrafusaalisoluja. (Enoka 2015, 257.) Keskushermoston käskyttäessä alfa-motoneuronia myös gamma-motoneuronit aktivoituvat (alfa-gamma koaktivaatio). Ilman gamma-motoneuronin aktiivisuutta intrafusaalisolut veltostuisivat ekstrasfusaalisolujen supistuksen aikana. Tämän seurauksena primäärit tai sekundäärit sensoriset päätteet eivät pystyisi reagoimaan välittömästi lihaksen piteuden muutoksiin. (Purves ym. 2019, 349.) Intrafusaalisoluja hermottavia gamma-motoneuroneita on havaittu olevan kahden tyyppistä: dynaaminen ja staattinen (Kuva 2). Dynaaminen gamma-motoneuroni hermottaa vain ensimmäistä tumasäkkisolua ja säätelee lihasspindelin sensitiivisyyttä dynaamiselle venytykselle. Staattinen gamma-motoneuroni hermottaa toista tumasäkkisolua ja tumaketjusolua säädellen lihasspindelin herkkyyttä staattiselle venytykselle. (Pierrot-Deseilligny & Burke 2012, 110.)

Tutkimuksissa on kuitenkin näytetty, että alfa- ja gamma-motoneuronien laukeamiskaavat eriävät ajoittain toisistaan. Täyttä selvyttä lihasspindelien sensitiivisyyden säätelystä ei olla sen monimutkaisuuden vuoksi saatu vielä selvitettyä. Pääpaino aktiivisessa säätelyssä on kuitenkin alfa-gamma koaktivaatiolla. (Windhorst 2007.)

1.2.2 Golgin jänne-elin

Kapseloituneen Golgin jänne-elimien pituus vaihtelee 0.2 ja 1 mm välillä. Jänne-elimet sijoittuvat luurankolihasolun ja sidekudoksen väliseen liitokseen. Ib-afferentin aksonit saavat alkunsa sidekudoksen lomasta mahdollistaen sen ominaisen toiminnan. (Kuva 3.) Golgin jänne-elin toimittaa keskushermostolle informaatiota lihaksen kohdistuvasta voimasta (Porske & Gandevia 2012). Lihasjännekompleksiin kohdistuva venytys aiheuttaa kollageenisäikeiden tiivistymisen Ib-afferenttien ympärillä. Tämän seurauksena Ib-afferentit heräävät ja alkavat lähettämään aktiopotentiaaleja. Ib-afferentit inhihoivat agonisti lihaksen toimintaa ja näin suojelevat lihasta liian voimakkaan voiman tuottamiselta. Golgin jänne-elin on huomattavasti

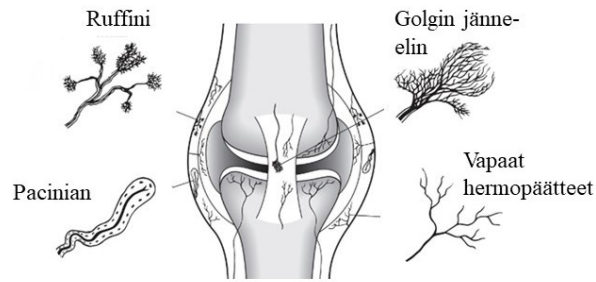
herkempi aktiivisen lihassupistuksen aikana tapahtuvalle venytykselle kuin passiiviselle venytykselle. Passiivisen venytyksen aikana Golgin jänne-elimien on kohdistuttava 2 N voima aktiopotentiaalien laukeamiseksi, kun taas aktiivisen venytyksen aikana 30–90 μN voima riittää herättämään jänne-elimien. (Enoka 2015, 261.)



KUVA 3. Golgin jänne-elin (Mukailtu: Purves ym. 2019, 350)

1.2.3 Nivelen reseptorit

Nivelen reseptorit sijaitsevat nivelkapselissa, nivelsiteessä ja sidekudoksessa. Näiden reseptorien aksonit ovat pääsääntöisesti II, III ja IV tyyppisiä eli läpimitaltaan pienempiä kuin lihasspindelistä ja golgin jänne-elimistä lähtevien afferenttien aksonit. Nivelessä sijaitsee neljää erilaista hermopäätettä (Kuva 4). *Ruffinin päätteet* reagoivat nivelen asentoon, kulmamutokseen ja nivelen sisäisen paineen muutokseen. *Pacinin keränen* reagoi mekaaniseen stressiin ja nivelliikkeen kiihtyvyyteen. Nivelessä sijaitsevat *golgin jänne-elimet* ovat vastaavia kuin lihasjännekompleksissa, mutta niiden aksonien johtumisnopeus on heikompi. Ne omaavat myös korkean syttymiskynnyksen ja reagoivat liikelaajuksien loppupuolella. Vapaat hermopäätteet ovat kipureseptoreita ja reagoivat epänormaaleihin tapahtumiin. (Enoka 2015, 262.)



KUVA 4. Nivelen reseptorit (Mukailtu: Hauser 2022).

Nivelreseptoreiden päätehtävänä pidetään nivelen suojelua ilmoittamalla keskushermostolle, kun liikelaajuus lähenee mahdollisia vaurioita aiheuttavia asentoja (Ferrell & Smith 1988). Näyttääkin siltä, että nivelreseptoreiden proprioseptiivinen informaatio ei ole normaalin liikkeen aikana suuressa roolissa. Tämä asetelma voi kuitenkin muuttua, jos lihasspindelit eivät toimi normaalisti. (Burke ym. 1988.)

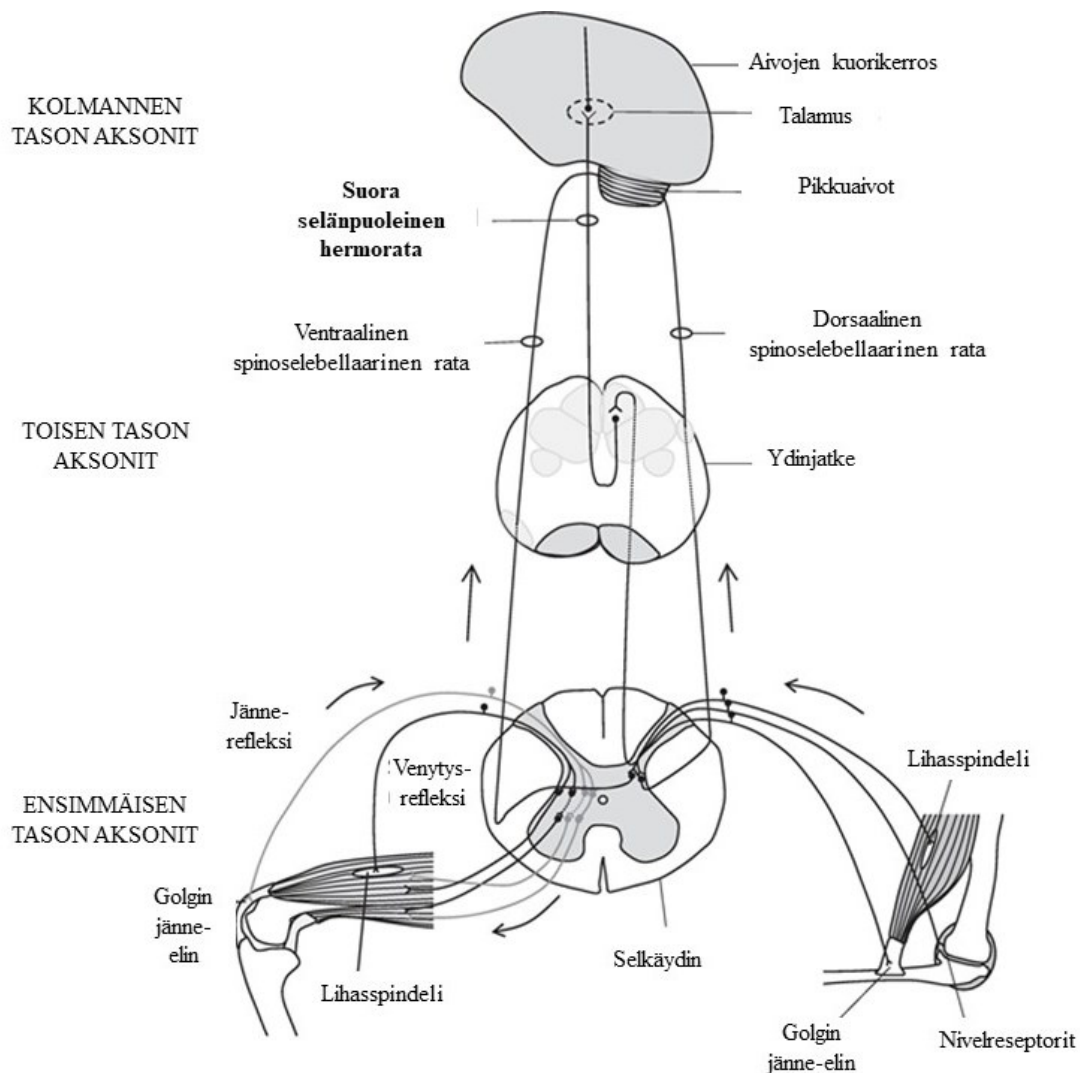
1.3 Proprioseptiivista informaatiota kuljettavat hermoradat

Proprioseptiivista informaatiota käsitellään sen syntymisen jälkeen laajamittaisesti keskushermoston eri osissa. Lihaskompleksin proprioseptiivisen signaalin synnyn jälkeen se kulkee afferentti aksonia pitkin dorsaalisen juuren kautta selkäyttimeen. Osa afferenttien haaroista päättyvät selkäytimen tasolle, jossa ne muodostavat hermoliitoksia ventraalisessa sarvessa olevien hermosolujen kanssa. Nämä *propriospinaaliset* hermoverkostot toimivat tärkeässä liikettä koordinoivassa ja lihasjännekompleksia suojelevassa roolissa. (Sengul & Watson 2011, 234–236.) Lihasspindeliltä tulevien Ia-afferenttien haarat synapsoituvat ventraalisessa sarvessa agonisti lihaksen alfa-motoneuroniin muodostaen monosynaptisen venytysrefleksihermopolun (Kuva 5). Venytysrefleksin avulla tuotetaan refleksin omaisesti voimaa äkillistä lihasta venyttävää voimaa vastaan ja pyritään suojelemaan solukkoa repeytymiseltä. Golgin jänne-elimeltä saapuvat afferentit synapsoituvat selkäytimessä inhiboivan välineuronin välityksellä agonisti lihaksen ja fasilitoivan välineuronin välityksellä antagonistilihakseen (Kuva 5). Tämän jännerefleksin tarkoitus on estää mahdollisesti vaurioittavan voiman tuottamista. (Enoka 2015, 268–275.)

Proprioseptiiviset aksonit jatkavat signaalin välitystä selkäytimen nouseviin ratoihin. Näitä aksoneita kutsutaan *ensimmäisen tason aksoneiksi*. Nämä radat välittävät lopulta proprioseptiivisiltä sensoreilta viestiä supraspinaaliselle tasolle eli aivoille ja pikkuaivoille (Kuva 5). (Sengul & Watson 2011, 236–238.) Selkäytimessä sijaitseva *suora selänpuoleinen hermorata* (direct dorsal column pathway) pitää sisällään nousevia primäärien ja sekundääristen proprioseptiivisten ja taktiilisten hermosolujen aksoneita. Hermorata saa alkunsa *ensimmäisen tason* pseudounipolaarisilta hermosoluilta, joiden solukeskus sijaitsee takajuuren läheisyydessä ja sensoriset päätteet periferiassa (esim. lihasspindel). Yläraajojen aksonit jatkavat selkäytimessä dorsolateraalisesti kulkevaa Cuneate hermosäiekimppua aina ydinjatkeessa sijaitsevaan Cuneate tumakkeeseen asti. Vastaavasti alaraajoilta saapuu ydinjatkeen Gracile tumakkeeseen aksoneita. Kyseiset tumakkeet muodostavat selänpuoleisensaraketumakkeen (dorsal column nuclei). (Niu ym. 2013)

Selänpuoleisesta saraketumakkeesta saavat alkunsa *toisen tason* aksonit, jotka ylittävät ydinjatkeessa keskilinjän kontralateraaliseen puolelle ja jatkavat nousemistaan kohti talamuksen ventroposteriorisen kompleksin hermosoluja (Delhaye ym. 2018). Apinoilla tehdyissä tutkimuksissa on havaittu, että talamuksen somatosensoriset solut näyttäisivät toimivan pitkälle periferiasta tulevien viestien välittäjänä. Toisin sanoen, periferiasta saapuvat somatosensoriset signaalit jatkaisivat talamuksesta kohti korteksia pitkälti samanlaisena kuin ne sinne saapuivatkin. (Vazquez ym. 2012; Camarillo ym. 2012.) Suoraa johtopäätöstä proprioseptiivisen informaation modulaatiosta talamuksen tasolla ei voida kuitenkaan tehdä, koska tutkimuksissa on tarkasteltu talamuksen aktiivisuutta taktiilistimulaation seurauksena.

Kolmannen tason aksonit jatkavat matkaansa talamuksesta kortikaalisille alueille. Yksinkertaisempi signaalin käsittely tapahtuu primäärillä somatosensorisella (S1) alueella, josta yhteydet jatkuvat lateraaliparietaaliselle ja posterioriparietaaliselle alueelle. Näillä jälkimmäisillä alueilla tapahtuva aktiivisuus on voimakkaammin yhteydessä kognitiivisiin toimintoihin. (Delhaye ym. 2018.) Edellä mainitut kolmen eri tason aksonit muodostavat yhdessä selänpuoleisen nousevan hermoradan. Tämä hermorata sisältää nopeimman yhteyden periferiasta kortikaaliselle alueelle vain kolmen hermosoluliitoksen avulla.

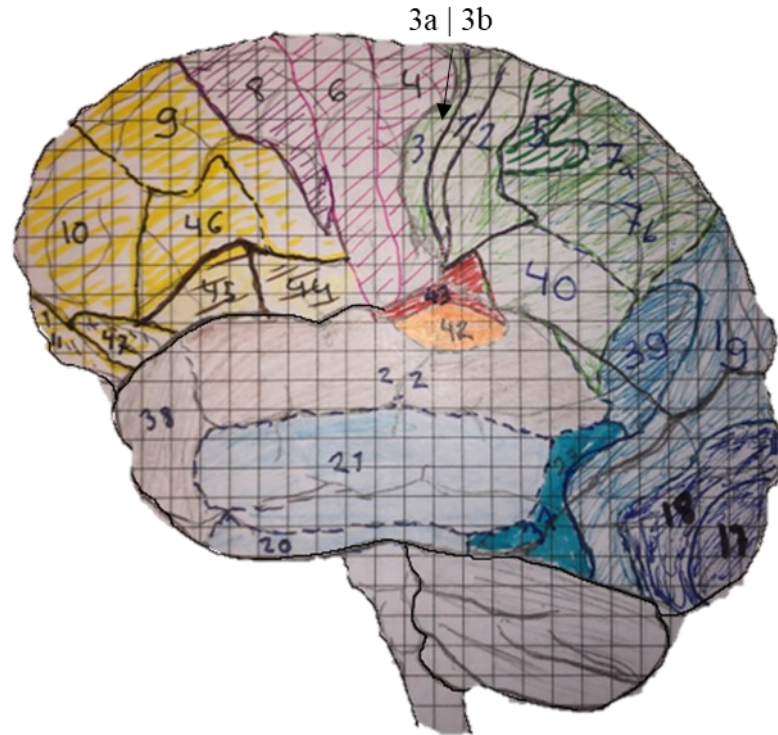


KUVA 5. Proprioseptiiviset hermoradat. (Mukailtu: Chu ym. 2017; Niu ym. 2013)

1.4 Proprioseptiivisen vasteen primäärit kortikaaliset alueet

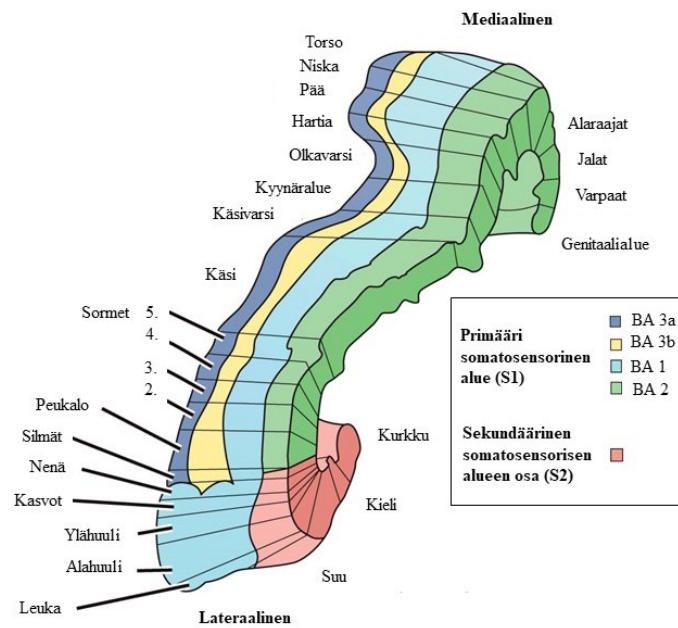
Suurin osa periferiasta lähtöisin olevasta somatosensorisesta informaatiosta saapuu aivojen kontralateraalaisella puolella sijaitsevalle S1:lle (Purves ym. 2018, 190). Kuvassa 6 havainnollistetaan, kuinka S1 alue jakaantuu neljään Brodmannin alueeseen aneterioposteriorisessa järjestyksessä: 3a, 3b, 1 ja 2 (Kaas ym. 1979). Kuvassa 7 esitellään primäärin somatosensorisen alueen selkeintä ominaisuutta, joka on sen somatotooppinen

järjestäytyminen. Somatotooppinen järjestys jakautuu S1:lla systemaattisesti siten, että alaraajat ovat edustettuina kaikista mediaalisimpana syvällä aivojen hemisfäärejä erottavassa pitkittäisuurteessa. Käden sekä sormien edustusalueet sijoittuvat lateraalisempaan osaan.



KUVA 6. Ihmisen aivot ja Brodmannin alueet. 3a, 3b, 1 ja 2 muodostavat primääriin somatosensorisen alueen (S1). Brodmannin alue 4 ja S1 muodostavat primääriin sensorimotorisen alueen (SM1). Keskiuurre sijaitsee Brodmannin alueen 4 ja 3 välissä. (Mukailtu: Purves ym. 2018, 194 & 707.)

Apinoilla tehdyissä tutkimuksissa on havaittu, että keskiuurteessa tai sen välittömässä läheisyydessä sijaitseva Brodmannin alue 3a:n hermosolut syttyvät ensisijaisesti lihasspindelien tai nivelreseptoreiden aktivoitumisen seurauksena (Krubitzer ym. 2004; Iwamura ym. 1983). Onkin esitetty, että kyseinen Brodmannin alue 3a olisi S1:n proprioseptiivisen vasteen alue (Delhaye ym. 2018). Tämän lisäksi on havaittu, että primääreistä alueista Brodmannin alue 2:n (Naito ym. 2005; Schwarz ym. 1973) ja primääriin motorisen alueen (M1, Brodmannin alue 4) hermosolut aktivoituvat proprioseptiivisen stimulaation seurauksena (Naito & Ehrsson 2001; Goldring & Ratcheson 1972).



KUVA 7. Kehon alueiden somatotooppinen järjestäytyminen primäärillä somatosensorisella alueella. BA = Brodmannin alue. (Mukailtu: Purves ym. 2018,194)

2. AIVOJEN LATERALISAATIO

Ihmisen aivot muodostuvat kahdesta erillisestä aivopuoliskosta eli vasemmasta ja oikeasta hemisfääristä. Hemisfäärejä yhdistää aivokurkiainen, joka kuljettaa informaatiota toiselta puolelta toiselle. Hemisfäärit näyttävät pintapuolisesti samalta, mutta tarkemmassa tarkastelussa huomataan niin anatomisia kuin toiminnallisiakin eroja puoliskojen välillä. Kyseistä aivopuoliskojen erilaistumista kutsutaan lateralisoitumiseksi. Tässä työssä lateralisoitumisella tarkoitetaan toisen aivopuoliskon dominoivaa roolia vertailtaessa hemisfäärien toimintaa keskenään. (Gazzaniga ym. 2019.)

Lateralisoitumista pidetään tärkeänä aivojen optimaalisen suorituskyvyn kannalta (Gazzaniga ym. 2019). Hemisfäärien erilaistumisen taustalla on todennäköisesti aivojen neuroverkostollisen rakenteen kehittymisen tavoite maksimaaliseen suorituskyykyyn sekä taloudellisuuteen. Pienemmät yksiköt käsittelevät tehokkaammin erilaisia ärsykeitä. Lopulta moduulit yhdistävät tietonsa isommaksi kokonaisuudeksi hermoratojen avulla. Tämän hajautuksen seurauksena aivojen toimintakyky pysyy vakaampana ja tehokkaana. (Van den Heuvel ym. 2009.)

Hemisfäärien lateralisoituminen harvoin on täysin spesifistä (Mutha ym. 2012). Jotkut prosessit voivat olla suurella osalla yksilöitä lateralisoituneet lähes täysin toiselle aivopuoliskolle. Esimerkiksi tutkimukset aivojen konnektiivisuuden häiriöstä kärsivillä potilailla ovat osoittaneet, että vasen aivopuolisko prosessoii kielellistä auditiivista informaatiota eli puhetta (Gazzaniga, 2000). Vasen aivopuolisko näyttää prosessoivan kyvykkäämmin temporaalista informaatiota, joka on yksi kulmakivi puheen ymmärtämisessä. Tämä on mahdollisesti yhteydessä vasemman aivopuoliskon mikro- ja makrotason anatomiaan, joka on muodostunut tehokkaammaksi vasemman puolen puhetta käsittelevillä alueilla. (Hustler & Galuske 2003.)

Teoriassa lateralisoituminen voidaan jakaa kahteen erilaiseen tasoon: 1. heikossa lateralisoitumisessa molemmat hemisfäärit kykenevät toteuttamaan prosessia, mutta toinen

suoriutuu siitä korkeammalla tasolla. 2. vahvassa lateralisoitumisessa vain toinen hemisfääri kykenee toteuttamaan prosessin ja aivokurkiainen toimii tärkeänä linkkinä informaation integroimisessa hemisfäärien välillä. (Mutha ym. 2012.)

2.1 Yläraajojen sensorimotorisen systeemin kortikaalinen lateralisoituminen

Ihmisen motorisen kontrollin ajatellaan olevan kontralateraalisesti toimivaa eli vasen aivopuolisko kontrolloi kehon oikeaa puolta ja päinvastoin. Suurin osa hermoradoista kulkeutuukin ihmisen liikettä kontrolloivilta aivoalueilta kontralateraaliseen puolelle kehoa (Nyberg-Hansen & Rinvik 1963). Myös sensoriset hermoradat kuljettavat kehosta tulevan informaation pääsääntöisesti kontralateraaliseen hemisfäärille (Delhaye ym. 2018). Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että hemisfäärit vastaisivat vain ja ainoastaan kontralateraalisen kehon puolen sensorimotorisesta toiminnasta.

Liikkeen toteutuksen ollessa vahvasti lateralisoitunut liikettä suorittavan kehon osaan nähden kontralateraaliseen hemisfäärille, nähdään liikkeen hallintaan liittyvien tekijöiden matalamman tason lateralisoitumista eri hemisfäreille (Merrick ym. 2022; Mutha ym. 2012). Yläraajojen liikekontrollin aikana rekrytoidaan molemmilta hemisfäreiltä erilaisia kontrolliin liittyviä neuraalisia prosesseja. Tämä rekrytointi nojaa voimakkaammin raajan kontralateraaliseen hemisfäärille lateralisoituneen systeemin toimintaan, johtuen suuremmista hemisfäärin sisäisistä hermoradoista. (Yadav & Sainburg 2011.) Merrick ym. (2022) osoittivat elektrokortikografian avulla, että vasen hemisfääri käsittelee korkeammalla tasolla myös oikeaan käteen liittyvää sensorimotorisen toiminnan informaatiota. Kyseinen lateralisoituminen oli ensisijaisesti havaittavissa premotorisella ja parietaalisella korteksilla. Premotorisen korteksin katsotaan liittyvän motorisen toiminnan suunnitteluun ja kyseinen parietaalinen alue yhdistelee sensorista informaatiota. Vasen hemisfääri näyttäisikin omaavan tärkeän roolin kompleksisten liikkeiden toteutuksessa (Chettouf ym. 2020).

Kompleksisten liikkeiden toteutuksessa aktivoituu kuitenkin laajasti erilaisia liikkeen toteutukseen liittyviä hermoverkostoja eikä tästä voida vetää suoraa johtopäätöstä

proprioseptiikan lateralisoitumisesta. Chilvers ym. (2021) havaitsivat oikean hemisfäärin temporoparietaalisen ja S1 alueen yhteisvaurion johtavan useammin liikeaistin avulla suoritettujen tehtävien heikentymiseen. Heidän havaintonsa eivät kuitenkaan olleet täysin johdonmukaisia. Käden position peilauksen vaikeutuminen oli yhteydessä voimakkaammin oikean hemisfäärin vaurion suuruuteen. Toisaalta vasemmalla hemisfäärillä havaitun vaurion laajuus oli ainoa tekijä, joka korreloi merkitsevästi asentoaistia mittaavan suorituksen kanssa. Aivoinfarkti potilailla tehdyssä tutkimuksessa havaittiin myös, että oikean hemisfääriin kohdistunut infarkti aiheutti suuremman heikentymisen etusormien liikeaistia mittaavassa tehtävässä (Rinderknecht ym. 2018).

Proprioseptiivisen informaation käsittelyn heikkoa lateralisoitumista oikealle hemisfäärille on havaittu myös terveillä oikea käteisillä koehenkilöillä tehdyissä yläraajojen sensorimotorista toimintaa vertailevissa tutkimuksissa. Goble ja Brown (2010) havaitsivat, että vasen yläraaja/oikea hemisfääri suoriutui paremmin asentoaistia sekä asentomuistia mittaavasta tehtävästä. Oikea yläraaja/vasen hemisfääri suoriutui paremmin visuumotorista toimintaa mittaavasta tehtävästä.

Terveillä koehenkilöillä suoritettujen neuraalisen aktivaation lateralisoitumista tutkivat tutkimukset puoltavat proprioseptiivisen prosessoinnin oikean hemisfäärin dominoivampaa roolia eli heikompaan lateralisoitumista oikealle aivopuoliskolle (Naito ym. 2017; Goble ym. 2012; Naito ym. 2005). Vaikkakin ristiriitaisiakin tuloksia on esitetty. Sekundäärisen somatosensorisen alueen (S2) voimakkaampaa aktivoitumista on havaittu mediaanihermon stimulaation sekä etusormien passiivisen ekstension seurauksena. (Simões ym. 2002; Alary ym. 2002.)

Naiton tutkimusryhmä (2016) on osoittanut 80 Hz vibraation aiheuttaman liikeaistin illuusiotutkimuksissaan, että aikuisilla koehenkilöillä lihasspindeliltä tulevan proprioseptiivisen informaation prosessointi aktivoi laajemmin ja voimakkaammin oikean aivopuoliskon inferiorisia frontoparietaalisia alueita. fMRI:llä tehdyissä jatkotutkimuksissa havaittiin, että lihasspindelien vibraatio herättää lapsilla (8–11 v.) inferioristen parietaalisten

alueiden (IPL, inferiorparietal lobule) bilateraalista aktiivisuutta. 12–15-vuotiailla IPL:n aktiivisuus alkaa siirtymään kohti aikuisilla havaittua oikean puolen dominoivampaa aktiivisuutta. (Naito ym. 2017.)

Simões ym. (2002) tutkivat kuinka hemisfäärien somatosensorinen herätevaste (SEF, somatosensory evoked field) eroaa bilateraalisen mediaanihermon stimulaation aikana. Alary ym. (2002) tutkivat myös SEF:n voimakkuuden eroa eri hemisfääreillä, mutta liikuttivat passiivisesti yhtä etusormea kerrallaan. Molemmat tutkimukset havaitsivat, ettei S1:n aktiivisuus eronnut hemisfäärien välillä. Kuitenkin vasemman hemisfäärin SII alueella havaittiin voimakkaampi amplitudinen SEF.

Kortikokinemaattisen koherenssin (CKC) avulla ei ole havaittu hemisfäärien SM1-alueiden (primääri sensorimotorinen alue) aktiivisuuden välillä eroa (Piitulainen ym. 2018). Nuorilla aikuisilla, joilla oikea jalka on dominantti (18–31vuotiailla), oikean nilkan liikutuksen herättämä kortikokinemaattinen koherenssi on matalampaa vasemman hemisfäärin SM1 alueella verrattuna vasemman nilkan liikutukseen ja oikean hemisfäärin SM1 vasteeseen. Vanhemmalla ryhmällä (66–73vuotiailla) kyseistä lateralisoitumista ei kuitenkaan havaittu. On kuitenkin huomioitava, että tutkimuksessa korkeampi CKC oli yhteydessä heikompaan tasapainoon. (Piitulainen ym. 2018a.)

Proprioseptiivisen informaation käsittelyn lateralisoitumisen tutkimukset ovat osittain ristiriitaisia. Kuitenkin hemisfäärien eroja tutkivat leesio ja infarkti tutkimukset osoittaisivat, että oikean hemisfäärin vammautuminen aiheuttaisi suuremman proprioseptiivisen toimintakyvyn heikentymisen. (Chilvers ym. 2021; Rinderknecht ym. 2018) Lisäksi vibraatiostimulaation avulla tehdyt tutkimukset näyttävät puoltavan proprioseptiivisen informaation käsittelyn heikkoa lateralisoitumista oikealle hemisfäärille. (Naito ym. 2017; Goble ym. 2012; Naito ym. 2005)

3. KORTIKOKINEMAATTINEN KOHERENSSI JA MAGNETOENKELOGRAFIA

Kortikokinemaattisella koherenssilla tarkoitetaan kinemaattisten signaalien ja kortikaalisen aktiivisuuden yhteyttä toistuvan liikkeen aikana (Bourguignon ym. 2011). Koherenssi itsessään on kahden signaalin annetun taajuusalueen korrelaatio, joka ilmaistaan 0 ja 1 välillä. 0 tarkoittaa ettei signaalien välillä havaita yhteyttä ja 1 viittaa täydelliseen yhteyteen. Koherenssin voimakkuuteen vaikuttavat signaalien amplitudien ja vaiheiden yhteen kytkeytyminen. (Mujunen ym. 2021; Srinath & Ray 2014; Lachaux ym. 1999) CKC:n avulla voidaan tarkastella esimerkiksi periferiasta mitattavien signaalien kuten käden tai sormen kinematiikkaa määrittävän kiihtyvyyssignaalin ja magnetoenkefalografian avulla mitattavan neuraalisen aktiivisuuden koherenssia (Piitulainen ym. 2012).

Etusormien passiivisen liikutuksen seurauksena havaitaan kontralateraalilla SM1 alueella liiketaajuuden (F0) ja sen ensimmäisen harmonisen taajuuden (F1) koherenttia aktiivisuutta (Mujunen ym. 2021; Piitulainen ym. 2018a; Piitulainen ym. 2013). Raajan liikutuksen seurauksena havaitun CKC:n on todennettu olevan lähtökohtaisesti proprioseptiivisen aktiivisuuden kortikaalinen vaste. F0 taajuutta pidetään suorana vasteena liikkeen aiheuttamaan proprioseptiiviseen signaaliin. (Bourguignon ym. 2015; Piitulainen ym. 2013). F1 taajuuden kohdalla on esitetty, että se olisi kortikaalinen vaste liikutettavan kehonosan fleksorin ja ekstensorin proprioseptoreiden aktivoitumiselle. Tämä sen vuoksi, että kokonaisen liikesyklin aikana molemmat aktivoituvat kertaalleen. Oikeakätisten oikean etusormen passiivisen liikutuksen seurauksena on myös havaittu, että CKC on voimakkaampaa F1 taajuudella kuin F0 taajuudella. (Piitulainen ym. 2013) Kuitenkaan tällä hetkellä ei ole vielä täysin selvää, mitkä neurofysiologiset tekijät moduloivat CKC:n F0:n ja F1:n voimakkuutta (Bourguignon ym. 2015; Bourguignon ym. 2012). Passiivisen liikutuksen aikaansaaman CKC:n on havaittu olevan hyvin toistettava metodi tarkastella proprioseptiikan kortikaalista prosessointia (hallitsevan käden CKC:n ICC: 0.86 ja ei-hallitsevan käden CKC:n ICC: 0.97) (Piitulainen ym. 2018).

Magnetoenkefalografia (MEG) on non-invasiivinen aivokuvantamismetodi, jonka avulla kyetään mittaamaan kortikaalista aktiivisuutta korkealla temporaalisella resoluutiolla (Hari & Forss 1999). MEG mittaa suprajohtavien sensorien avulla aivojen tuottamia heikkoja magneettisia kenttiä. Sensorit sijaitsevat heliumsäiliössä ja mittaavat aktiivisuutta pään ulkopuolelta. Helium ylläpitää sensorit noin -269 Celsiuksen lämpötilassa mahdollistaen niiden pysymisen suprajohtavassa tilassa, jonka ansiosta sensorit kykenevät reagoimaan heikkoon magneettikenttään (Hämäläinen ym. 1993). Mitattava magneettikenttä syntyy neuronien post-synapsisista potentiaaleista (Baillet 2017). Havaittavan signaalin syntymiseen tarvitaan 10 000–50 000 neuronin aktiivisuus (Murakami & Okada 2006). CKC:n lähdettä ei ole pystytty tarkasti erottelemaan S1:n ja M1 välillä. On kuitenkin selvää, että korkein CKC havaitaan MEG sensoreissa, jotka sijoittuvat sentraalisen uurteen yläpuolelle eli primäärille sensorimotoriselle alueelle (Piitulainen ym. 2013).

4. TUTKIMUKSEN TARKOITUS

Tämän työn tarkoitus on tarkastella molempien käsien etusormien yhtäaikaisten liikkeen aiheuttaman proprioseptiivisen signaalin ja kortikaalisen vasteen välistä kortikokinemaattista koherenssia ja sen kortikaalista lateralisoitumista koko otoksessa sekä nuorilla ja varttuneilla. Lisäksi tarkoituksena on selvittää, onko kortikokinemaattisen koherenssin voimakkuudella ja sen lateralisoitumisella yhteyttä molempien käsien näppäryyteen.

Tutkimuskysymys 1.) Havaitaanko etusormien bilateraalisesta passiivisesta liikutuksesta seurauksena proprioseptiivisen vasteen lateralisaatiota?

Hypoteesi 1.) Bilateraalisesta passiivisesta liikutuksesta seurauksena havaitaan kortikokinemaattisen koherenssin lateralisoitumista vain nuorilla koehenkilöillä.

Piitulainen ym. (2018a) havaitsivat nuorilla koehenkilöllä nilkan passiivisen liikutuksen seurauksena voimakkaampaa CKC:tä non-dominantin nilkan liikutuksen seurauksena. Lateralisoituminen oli kuitenkin rajoittunut vain tutkimuksen nuorten ryhmään (keski-ikä 24.8 vuotta). Lisäksi Piitulaisen ym. (2018b) tutkimuksen lisäanalyysissä havaittiin trendiä CKC:n lateralisoitumista dominantin käden puolelle nuorilla aikuisilla (keski-ikä 21.7 vuotta). Havainto ei ollut kuitenkaan tilastollisesti merkitsevä todennäköisesti johtuen pienestä otoskoosta.

Tutkimuskysymys 2.) Onko passiivisen liikutuksen herättämällä kortikokinemaattisella koherenssilla ja sen lateralisoitumisella yhteys käsien näppäryyteen?

Hypoteesi 2.) Kortikokinemaattisen koherenssin ja käden näppäryyden välillä havaitaan yhteys.

Aikaisemmissa tutkimuksissa on havaittu, että kortikokinemaattisen koherenssin voimakkuudella on yhteys tasapainosuoritukseen (Piitulainen ym. 2018a). SM1 alueelle

kohdistuva voimakkaampi inhibitorinen aktiivisuus näyttäisi olevan yhteydessä kohonneeseen sensorimotoriseen toimintakykyyn (Nurmi ym. 2021, Mirdamari & Block 2020). Lisäksi Goble ja Brown (2010) havaitsivat, että vasen yläraaja/oikea hemisfääri suoriutui paremmin asentoaistia sekä asentomuistia mittaavasta tehtävästä.

5. METODIT

3.1 Koehenkilöt

Yhteensä 35 tervettä koehenkilöä mitattiin, joista 31 koehenkilön data analysoitiin. Koehenkilöistä naisia oli 13 ja miehiä 18. Neljä vasenkätistä koehenkilöä tiputettiin analyysistä pois. Koehenkilöiden keski-ikä oli 35.99 vuotta nuorimman ollessa 20.7 vuotta ja vanhimman 54.8 vuotta. Sekundäärianalyysyjä varten koehenkilöt jaettiin kahteen ikäryhmään mediaani iän (34.2 v) mukaan. Alle 35-vuotiaiden ryhmässä (nuoret) koehenkilöitä oli 16 henkilöä ja yli 35-vuotiaiden ryhmässä (varttuneet) 15 henkilöä. Nuorten keski-ikä oli 28.3 vuotta ja varttuneet keski-ikä oli 44.2 vuotta.

Koehenkilöiden sopivuus tutkittavaksi selvitettiin ennen tutkimusta. Poissulkukriteereinä olivat neurologinen häiriö, liikuntaa rajoittava vamma, kehossa olevat metalliset esineet ja sensorimotoriseen toimintaan vaikuttava lääkitys. Koehenkilöt saivat tutustua tutkimuksen tiedotteeseen ja keskustella tutkijoiden kanssa ennen kuin he lukivat ja allekirjoittivat suostumuslomakkeen. Koehenkilöt osallistuivat tutkimukseen vapaaehtoisesti ja saivat keskeyttää tutkimuksen halutessaan. Tutkimus suoritettiin Helsingin julistuksen eettisten periaatteiden mukaisesti ja Keski-Suomen sairaanhoitopiirin eettinen toimikunta arvioi sekä antoi puoltavan lausunnon tutkimuksen toteuttamisesta.

3.2 Tutkimusprotokolla

Tutkimus toteutettiin Jyväskylän yliopiston monitieteellisessä aivotutkimuskeskuksessa (CIBR, Centre for Interdisciplinary Brain Research). Koehenkilön saapumisen jälkeen hänelle esiteltiin tilat, kerrottiin protokolla ja pyydettiin vaihtamaan MEG mittauksiin sopivat vaatteet sekä poistamaan mahdolliset korut. Seuraavaksi koehenkilö täytti liikunta-aktiivisuus- ja kätsiyskyselyn, jonka jälkeen toteutettiin käden näppäryydesti. Tämän jälkeen koehenkilö valmistettiin MEG-mittausta varten kiinnittämällä elektro-okulografiaa (EOG) varten elektrodit

ja päänsijainnin seuraamiseen vaadittavat käämit. EOG:lla mitataan koehenkilöiden silmien liikkeitä ja tämän tiedon avulla kyetään lopullisesta signaalista poistamaan silmän iskujen aiheuttamat artefaktit. Koehenkilön sopivuus mittaukseen tarkastettiin vielä lyhyellä MEG-häiriötestillä, jonka aikana koehenkilö totutettiin mittaustilaan. Häiriötestin jälkeen koehenkilön etusormet kiinnitettiin pneumaattisiin keinolihasiin (proprioseptiivinen stimulaattori) ja proprioseptiivinen stimulaatio suoritettiin.

3.3 Fyysisen aktiivisuuden ja kätsisyyden kyselyt

Koehenkilöiden kätsisyysindeksi selvitettiin Edinburgh Handedness Inventory -kyselyn (EDI) avulla (Oldfield 1971). Kyselyssä on 10 erilaista kysymystä liittyen arkipäiväiseen käden käyttämiseen (Liite 1). Vain toisella kädellä tehtävästä vastauksesta saa 2 pistettä kyseiselle kädelle. Useimmiten toisella kädellä 1 pisteen. Molemmat kädet saavat 1 pisteen, kun vastataan molemmilla yhtä paljon. Pisteet summataan lopuksi käsikohtaisesti. Lopullinen kätsisyyttä kuvaava tulos lasketaan kaavalla: $100 * ((Oikea - Vasen) / (Oikea + Vasen))$ Täysin oikeakätistä indikoi +100 pistettä ja vastaavasti täysin vasenkätistä -100. Molempikätsisyyttä ilmaisee pisteytyksessä 0 arvo.

Fyysistä aktiivisuutta selvitettiin kansainvälisen fyysisen aktiivisuuden kyselyn (IPAQ, International Physical Activity Questionnaire – Short Form) avulla (Liite 2). IPAQ:n avulla saadaan tulos, joka arvioi henkilön fyysisetä aktiivisuutta. Mittaria pidetään toistettavana ja validina fyysisen aktiivisuuden itsearviointina (Craig ym. 2003). Tulos muodostuu viikonaikana tehtyjen aktiivisuuksien kokonaisuudesta, joka kuvaa fyysisen aktiivisuuden tasoa (IPAQ 2005).

3.4 Käden näppäryystesti

Käden näppäryyttä arvioitiin Grooved Pegboard testin (Lafayette Instrument, Lafayette Instrument Company, Inc., Lafayette, Yhdysvallat) avulla. Testissä koehenkilö asettaa 25

tappia Grooved Pegboardin koloihin. Kaikki uurretut tapit ovat samanlaisia. Urteen vuoksi tapit sopivat koloihin vain tietyssä toisista koloista eroavassa asennossa. Koehenkilön tulee kohdistaa tappi oikeassa asennossa koloon, jotta se saadaan asetettua paikalleen. 25 koloa on laudalla viidessä rivissä ja jokaisella rivillä on viisi koloa. Tapit laitetaan ennalta määrättyssä järjestyksessä. Oikealla kädellä vasemmasta yläkulmasta aloittaen rivi kerrallaan. Vasemmalla kädellä oikeasta yläkulmasta aloittaen. Vain yhtä kättä saa käyttää kerrallaan. Käsi, jota ei käytetä, asetetaan reiden päälle lepäämään. Tavoitteena on asettaa tapit mahdollisimman nopeasti koloihin.

Testi suoritettiin yhdellä kädellä kerrallaan ja ennen testiä koehenkilölle ohjeistettiin, kuinka testi kuuluu toteuttaa (Liite 3). Ennen mitattavaa suoritusta koehenkilö suoritti testiin tutustumisen, jonka aikana hän sai täyttää kolme ensimmäistä riviä omaan tahtiinsa. Tämän jälkeen koehenkilö suoritti Grooved Pegboard testin vuoron perään molemmilla käsillä. Testi ohjeistettiin tekemään mahdollisimman nopeasti. Testin suorittamiseen kulunut aika indikoi käsien näppäryyttä. Koehenkilöt suorittivat testin satunnaisesti, joko ensin oikealla kädellä tai vasemmalla kädellä.

3.5 Proprioseptiivinen stimulaatio

Etusormien proprioseptiivinen stimulaatio suoritettiin pneumaattisilla stimulaattoreilla (Piitulainen ym. 2015). Stimulaattori liikutti etusormia samanaikaisesti samassa vaiheessa 3 Hz taajuudella. Liike tapahtui pääosin etusormen tyvinivelessä. Koehenkilö istui MEG-laitteessa stimulaattorit hänen edessään pöydällä (Kuva 8). Etusormien taktiiliaistia peitettiin teippaamalla sormenpäät ihoteipillä, jonka jälkeen sormet kiinnitettiin kiihtyvyyssanturin kanssa distaalisesta falangista teipillä stimulaattorin pneumaattisiin keinolihaksiin. Yläraajat tuettiin siten, että kyynärnivelet olivat keskenään samassa kulmassa ja korkeudella. Visuaalinen kenttä rajattiin valkoisen paperin ja tyynyn avulla siten, että koehenkilöt eivät nähneet käsiänsä. Tämän lisäksi pneumaattisen stimulaattorin aiheuttamat mahdolliset kuuloärsykkeet peitettiin korvatulppien ja kaiuttimista toistetun valkoisen kohinan avulla. Koehenkilöitä ohjeistettiin

pysymään täysin rentona sekä pitämään katse edessä olevassa fiksaatiopisteessä ja välttämään ylimääräisiä silmienräpytyksiä mittauksen aikana.



KUVA 8. Mittausasetelma.

3.5.1 Magnetoencefalografia, MEG

Aivojen kortikaalista aktivaatiota mitattiin magneettisuojatussa huoneessa (Magnetical Shielding Cabin, VACOSHIELD, Vacuumschmelze GmbH & CO. KG, Hanau, Saksa) 306-kanavaisella koko kallon kattavalla neuromagnetometrillä (Elekta Neuromag, Elekta Oy, Helsinki, Suomi). Signaalit tallennettiin 1 kHz näytteenottotaajuudella ja 0.1–330 Hz kaistanleveydellä. Elektro-okulogrammia varten koehenkilön oikean silmäkulman yläpuolella ja vasemman silmäkulman alapuolelle laitettiin elektrodit. Päänsijaintia suhteessa MEG:n sensoreihin monitoroitiin viiden päänsijaintia osoittavan käämin avulla. Kyseiset käämit digitointiin (Isotrak, Polhemus, Colchester, VT) samaan kolmiulotteiseen tilaan anatomisten markkereiden ja pään pinnan kanssa. Anatomisina markkereina käytettiin nenäntyvipistettä ja korvan preaurikulaarisia pisteitä.

3.5.2 Etusormien kinematiikka

Oikean ja vasemman etusormen kiihtyvyys tallennettiin kolmiakselisen kiihtyvyyssmittarin (ADXL335 iMEMS Accelerometer, Analog Devies Inc. Norwood, MA) avulla. Kiihtyvyyssanturit kiinnitettiin teipillä etusormien kynsiin. Näytteenottotaajuutena käytettiin 1 kHz ja suodatuksena 330 Hz alipäästösuodatinta.

3.6 Datan prosessointi

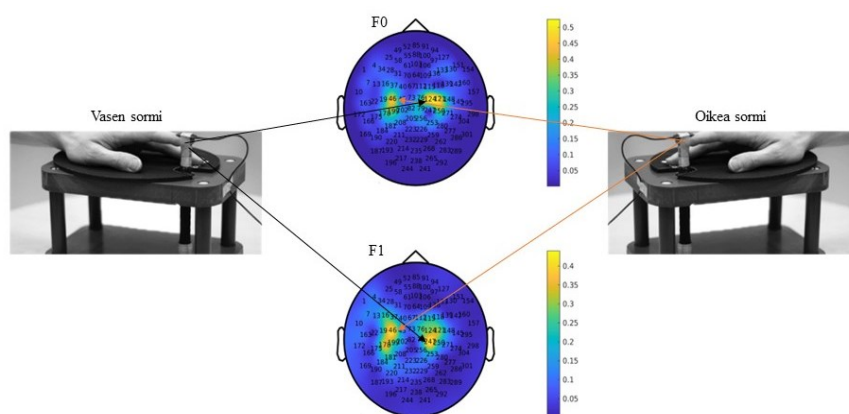
3.6.1 MEG datan preprosessointi

Mittausten jälkeen MEG datalle suoritettiin offlineena preprosessointi. Häiriötä sisältävien sensorien tunnistamiseksi jokaisen koehenkilön MEG data tarkastettiin visuaalisesti. Tämän jälkeen data preprosessoitettiin MaxFilterin tSSS (temporal signal-space-separation) algoritmilla (MaxFilter 2.2 software, Elekta Neuromag Oy, Helsinki, Suomi). Algoritmiin määritettiin visuaalisessa tarkastelussa havaitut häiriöiset sensorit. Lisäksi automaattinen häiriöisten sensorien tunnistaminen pidettiin käytössä, jotta mahdolliset visuaalisessa tarkastuksessa havaitsematta jääneet häiriöiset sensorit huomioitaisiin preprosessoinnissa. Tämän jälkeen silmän iskujen ja sykkeen aiheuttamat häiriöt tunnistettiin ja poistettiin itsenäisten komponenttien analyysillä (ICA, independent component analysis). ICA:n suoritettiin MNE Python softwarella (Camfort ym. 2014), jota varten data suodatettiin 1–40 Hz taajuudelle. Analyysin jälkeen 30 komponentin joukossa havaittavat häiriöiset komponentit hyväksyttiin häiriöiksi visuaalisen tarkastuksen jälkeen ja kyseiset häiriöt poistettiin lopullisesta MEG datasta. Lopullisen datan analyysia varten MEG data suodatettiin 0.5–195 Hz taajuuteen.

3.6.2 Kortikokinemaattinen koherenssi

Kortikokinemaattinen koherenssi analysoitiin MEG:n sensorisella tasolla. CKC analysoitiin passiivisesti liikutetun sormen ja sen kontralateraalisen hemisfäärin välillä (esim. oikean

sormen ja vasen hemisfääri). Tämän avulla voitiin laskea CKC kontralateraalisen hemisfäärin MEG signaalin ja sormen kiihtyvyyden magnitudin välille molempien etusormien kiihtyvyyssignaalista. Hemisfäärien CKC arvoksi määritettiin tutkimuksessa passiivisesti liikutetun sormen liiketaajuudella ja sen ensimmäisellä harmonisella taajuudella (F0: 3 Hz ja F1: 6 Hz, tässä järjestyksessä) havaittu CKC:n suurin voimakkuus passiivisesti liikutetun sormen kontralateraalisen SM1 alueen yläpuolella olevassa sensorissa (Kuva 9).



KUVA 9. Esimerkki CKC:n määrittämisestä. Vasemman sormen liikutuksen ja oikean hemisfäärin SM1 yläpuolella olevien kanavien korkein CKC määritettiin kyseiseksi CKC:n voimakkuudeksi. Tässä esimerkissä vasemman sormen korkein CKC havaittiin F0 taajuudella oikean hemisfäärin päällä olevasta kanavasta numero 124 ja F1 taajuudella pykälän posteriorisemmasta kanavasta 247. Oikean sormen korkein CKC havaittiin F0 ja F1 taajuudella vasemman hemisfäärin päällä olevasta 46 kanavasta.

CKC analyysia varten data jaettiin 2 sekunnin aikaikkunoihin. Aikaikkunoiden päällekkäisyydeksi valittiin 1.6 sekuntia, jonka avulla taajuuden resoluutioksi muodostui 0.5 Hz (Taulu & Simola 2006). Analyysistä poistettiin aikaikkunat, joissa MEG:n magnetometriin signaali ylitti 3 pT/cm tai gradiometriin signaali ylitti 0.7 pT/cm. Tämän avulla vältetään aikaikkunoissa mahdollisesti havaittavia MEG signaalin häiriöitä. Sormien kiihtyvyyden magnitudi määritettiin kummallekin sormelle sen kolmen kohtisuoran kiihtyvyyssignaalin Euklidisen normin avulla. Kiihtyvyyden jokainen aikaikkuna normalisoitiin sen Euklidisen

normiin. Tämän jälkeen suoritettiin koherenssianalyysi (Halliday ym. 1995) MEG signaalin ja kiihtyvyyden magnitudin välille. Jokaiselle gradiometriparille määritettiin optimaalisen koherenssin arvo. Koherenssi laskettiin optimaalisessa suunnassa kahden gradiometrin kattamassa kaksiulotteisessa tilassa, kuten Bourguignon ym. (2015) tekivät heidän CKC-tutkimuksessaan.

3.6.3 Kortikokinemaattisen koherenssin lateralisoituminen

CKC:n lateralisoitumiselle määritettiin lateralisoitumisen indeksi (LI). LI laskettiin kaavalla $(\text{Oikean SM1:n korkein CKC} - \text{Vasemman SM1:n korkein CKC}) / (\text{Oikean SM1:n korkein CKC} + \text{Vasemman SM1:n korkein CKC})$. Lopputulemana -1 tarkoittaa täysin vasemmalle hemisfäärille lateralisoitunutta CKC:a ja +1 täysin oikealle hemisfäärille lateralisoitumista.

3.7 Tilastoanalyysi

Tilastoanalyysit toteutettiin R ohjelman 4.0.5 versiolla. Analysoitavan aineiston normaalijakaumat tarkistettiin Shapiro-Wilk testiä käyttäen. Sormien passiivisen liikituksen aiheuttaman CKC:n voimakkuutta hemisfäärien välillä analysoitiin kaksisuuntaisella kahden riippuvan otoksen t-testillä. Myös CKC:n F0 taajuuden ja F1 taajuuden eroavaisuus analysoitiin kahden riippuvan otoksen t-testillä. Muuttujien yhteyttä tarkasteltiin Pearsonin korrelaatiokertoimen ja lineaarisen regressioanalyysin avulla. Tulokset analysoitiin koko otoksen tasolla. Tilastollisesti merkitseväksi p-arvoksi määritettiin 0.05. Luvut ilmoitetaan keskiarvoina ja keskihajontana.

Tämän lisäksi aikaisempien tutkimushavaintojen vuoksi (Piitulainen ym. 2018a) analyysit suoritettiin myös ikäryhmissä. Ikäryhmien sisällä tehdyt korrelaatiokertoimet laskettiin Spearmanin järjestykorrelaatiokertoimen avulla. Kaksisuuntaista kahden riippuvan otoksen t-testiä käytettiin analysoitaessa CKC:n voimakkuuden eroa hemisfäärien välillä sekä eroa F0 taajuuden ja F1 taajuuden voimakkuuksien välillä.

6. TULOKSET

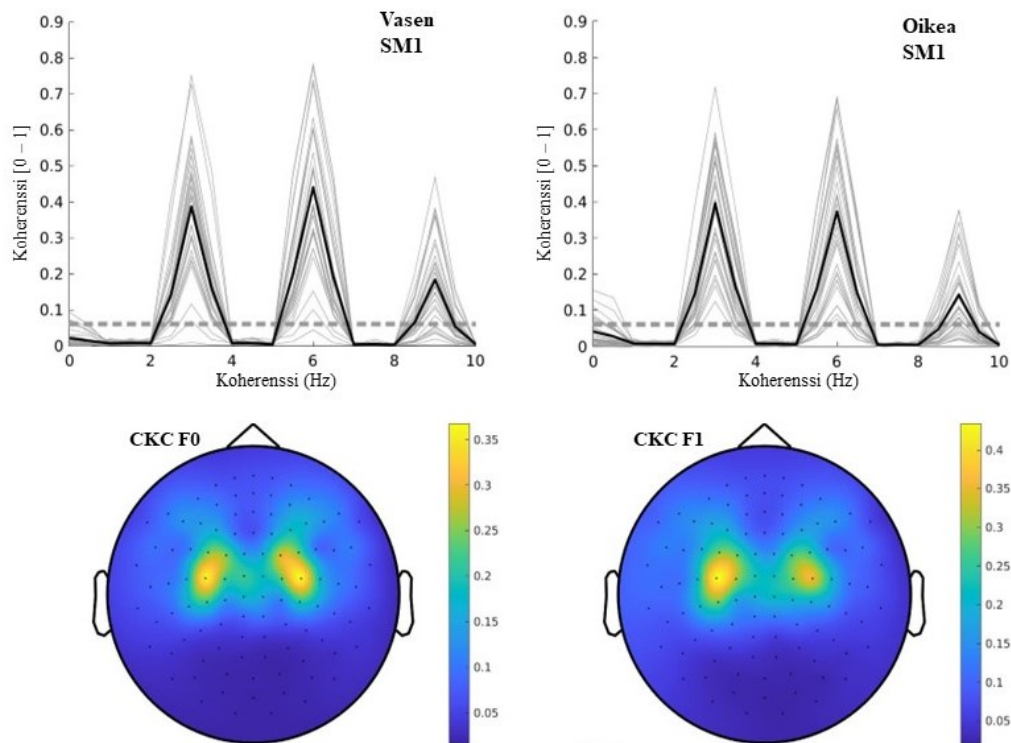
Suurin osa koehenkilöistä sijoittui liikunta-aktiivisuusluokan perusteella kohtuullisen tai korkean liikunta-aktiivisuuden ryhmään. Vain yksi koehenkilö raportoi liikunta-aktiivisuudekseen matalan (alle 600 MET-min/vk) liikunta-aktiivisuuden. Käsien näppäryystehtävässä kului keskimäärin 121.97 s (\pm 11.5 s). Koehenkilöt selviytyivät 8.04 s (CI 95 %: 5.95 – 10.21 s) nopeammin heidän dominoivalla eli oikealla kädellä käden näppäryys tehtävästä (p-arvo < 0.001). EDI-kyselyn perusteella koehenkilöt olivat selvästi oikeakätisiä. (Taulukko 1)

TAULUKKO 1 Koehenkilöiden tunnusomaiset piirteet

	n	%		
Koehenkilöitä	31			
Miehiä	18	58		
Naisia	13	42		
Liikunta-aktiivisuusluokka				
< 600 MET-min/vk	1	3		
600 - 3000 MET-min/vk	15	48.5		
>3000 MET-min/vk	15	48.5		
	Keskiarvo	SD	Minimi	Maksimi
Ikä (v)	35.9	9.5	20.7	54.8
Nave (n)	601	28.36	541	660
OS CKC F0 (Vasen SM1)	0.387	0.17	0.010	0.751
OS CKC F1 (Vasen SM1)	0.470	0.17	0.163	0.784
VS CKC F0 (Oikea SM1)	0.396	0.14	0.124	0.717
VS CKC F1 (Oikea SM1)	0.416	0.18	0.076	0.692
Käsien näppäryys (s)	121.97	11.5	102.3	144.6
OK näppäryys (s)	56.96	6.92	43.0	70.7
VK näppäryys (s)	65.00	9.35	52.4	78.4
EDI	94.0	9.26	69.2	100
MET-min/vk	3141.4	1898.5	412.5	9159

OS = Oikea sormi, VS = Vasen sormi, OK = Oikea käsi, VK = Vasen käsi, Nave = analyysissä käytettyjen aikaikkunoiden määrä

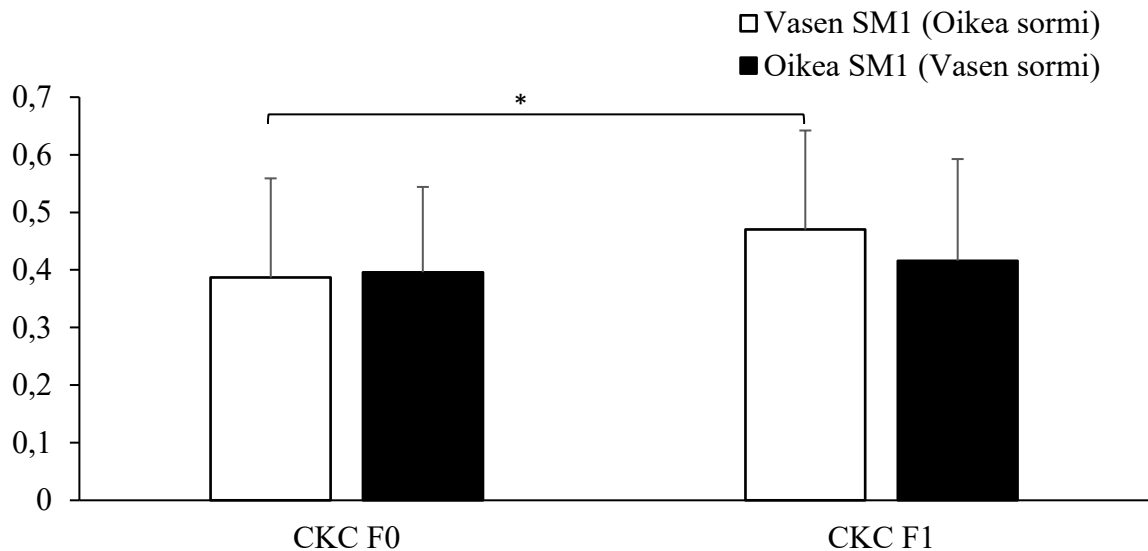
Korkein CKC:n voimakkuus F0 ja F1 taajuuksella havaittiin primäärin sensorimotorisen alueen yllä olevissa MEG sensoreissa. Koko otoksen vasemman hemisfäärin korkeimman CKC:n keskiarvo oli F0 taajuudella $0.387 (\pm 0.17)$ ja F1 taajuudella $0.470 (\pm 0.17)$. Oikean hemisfäärin osalta vastaavat arvot olivat F0 taajuudella $0.396 (\pm 0.14)$ ja F1 taajuudella $0.416 (\pm 0.18)$. (Kuva 10)



KUVA 10. Ryhmätason kortikokinemaattisen koherenssin taajuusspektri ja topografinen sijoittuminen päämallissa. Koherenssin taajuusspektri muodostettu hemisfäärin kontralateraalisen sormen kiihtyvyyssignaalista. Ylärivin taajuusspektrien kuvaajissa harmaa katkonainen poikkiviiva kuvaa tilastollisesti merkitsevän koherenssin rajaa. Alarivin topografisten kuvien koherenssi muodostettu stimulaattorin hallintasiinaalin ja neuraalisen vasteen välille tulosten kuvittamista varten.

F0 taajuuden CKC:n voimakkuus oli oikealla hemisfäärillä 0.0092 (CI 95 %: $-0.058 - 0.077$) voimakkaampi kuin vasemmalla hemisfäärillä ($p > 0.05$). F1 taajuudella vasemman hemisfäärin CKC:n voimakkuus oli 0.054 (CI 95 %: $-0.016 - 0.124$) voimakkaampaa kuin oikean hemisfäärin ($p > 0.05$). Tilastollisesti merkitsevää eroa hemisfäärien aktivoitumisen

välillä ei havaittu. Vasemman SM1:lla havaitun CKC:n F1 taajuuden voimakkuus oli 0.08 (CI 95 %: 0.05 – 0.15) voimakkaampaa kuin F0 taajuudella havaittu voimakkuus ($p < 0.05$) (Kuva 11). Oikean SM1:n CKC:n taajuuksien välillä ei havaittu vastaavaa eroa.

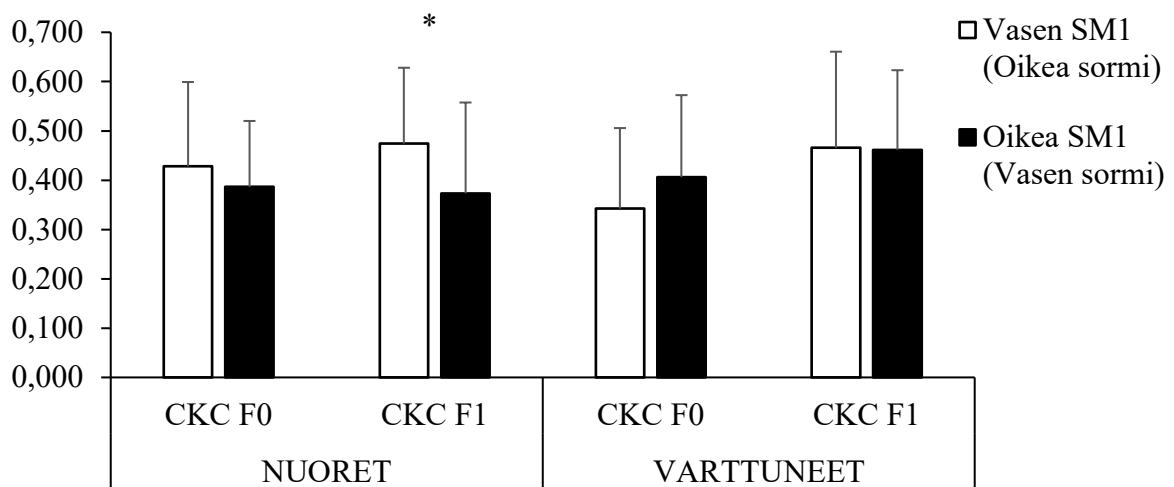


KUVA 11. Primääristen sensorimotoristen alueiden kortikokinemaattinen koherenssi sormen passiivisen liikuttamisen seurauksena. CKC = kortikokinemaattinen koherenssi, F0 = liiketaajuus, F1 = ensimmäinen harmoninen taajuus. Pystyviiva kuvaa keskihajontaa. * $p < 0.05$

Ikäryhmien tulokset. Koko otoksen iän mediaanin (35 vuotta) mukaan jaettujen ryhmien välillä ei havaittu minkään muuttujan kohdalla tilastollisesti merkitseviä eroja pois lukien ikä. Nuorten ryhmän keski-ikä oli 28.3 vuotta (± 3.6) ja varttuneempien keski-ikä oli 44.2 (± 6.3). Nuorten ryhmässä oli 16 koehenkilöä, joista naisia oli 5. Varttuneiden ryhmässä oli 15 koehenkilöä, joista naisia oli 8.

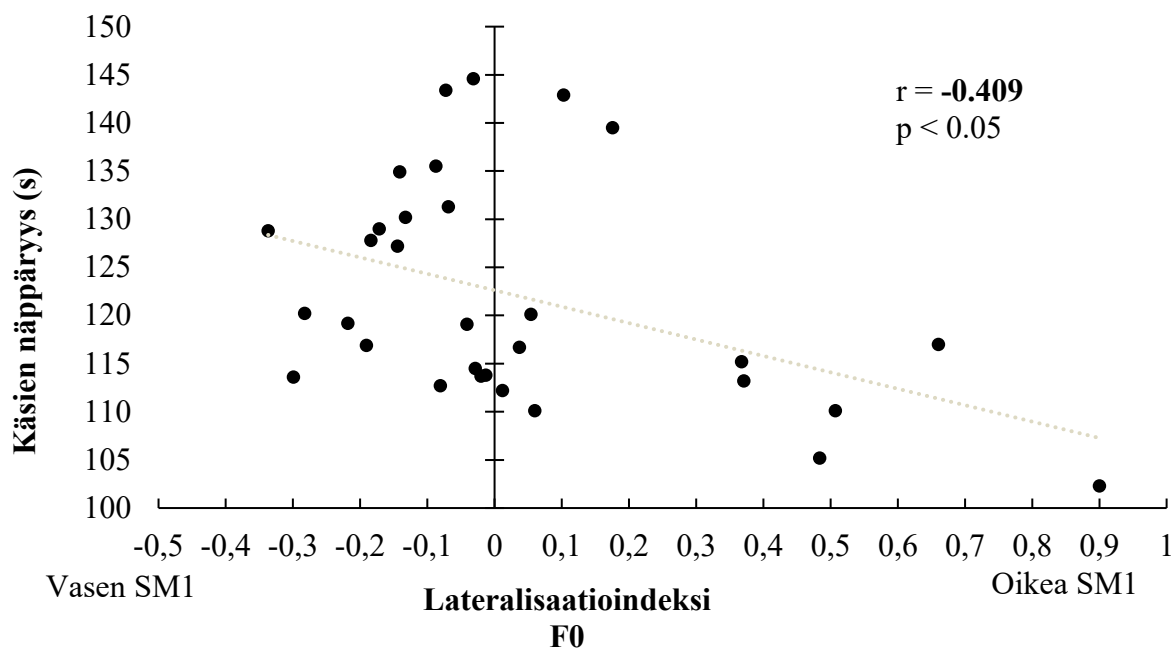
Nuorten ryhmän korkein CKC F0 taajuudella oli keskiarvoltaan vasemmalla hemisfäärillä 0.428 (± 0.171) ja F1 taajuudella 0.474 (± 0.154). Oikealla hemisfäärillä F0 taajuudella CKC:n voimakkuus oli 0.387 (± 0.133) ja F1 taajuudella 0.373 (± 0.184). Nuorten ryhmän F0 taajuuden CKC oli vasemmalla hemisfäärillä 0.042 (CI 95 %: -0.04 – 0.123) voimakkaampaa ($p > 0.05$). F1 taajuudella CKC oli vasemmalla hemisfäärillä 0.101 (CI 95 %: 0.025 – 0.177) voimakkaampaa ($p < 0.05$). (Kuva 12)

Varttuneiden ryhmässä vasemman hemisfäärin puolella havaittiin CKC:n voimakkuuden keskiarvona F0 taajuudella 0.342 (\pm 0.163) ja F1 taajuudella 0.466 (\pm 0.195). Oikealla hemisfäärillä havaittiin voimakkaampaa CKC:ta F0 taajuudella sen ollessa 0.406 (\pm 0.166). F1 taajuuden pysyessä lähes samana vasemman hemisfäärin kanssa CKC:n voimakkuuden ollessa 0.463 (\pm 0.161). Varttuneiden ryhmän CKC:n voimakkuudet eivät kuitenkaan eronneet merkitsevästi toisistaan hemisfäärien välillä. (Kuva 12)



KUVA 12. Ikäryhmien CKC:n voimakkuus eri hemisfäreillä. SM1 = sensorimotorinen alue.

Koko otoksen osalta käsien näppärystehtävään käytetty aika korreloi positiivisesti vasemman hemisfäärin eli oikean sormen liikituksen CKC:n voimakkuuteen ($r = 0.459$, $p < 0.01$) (Taulukko 2). Tarkoittaen sitä, että käsien näppäryyden heikentyessä vasemman hemisfäärin F0 taajuuden CKC:n voimakkuus kasvoi. Lisäksi käsien näppärystehtävän aika korreloi negatiivisesti CKC:n lateralisaatioindeksiin ($r = -0.409$, $p < 0.05$). Toisin sanoen enemmän oikealle hemisfäärille lateralisoitunut CKC:n aktiivisuus oli yhteydessä parempaan käsien näppäryyteen. (Kuva 13)



KUVA 13. F0 taajuuden lateralisaatioindekin yhteys käden näppäryyteen

MET-min/vk oli myös yhteydessä lateralisaation absoluuttisiin arvoihin ($r = -0.382$, $p < 0.05$) (Taulukko 2). Liikunta-aktiivisuus näyttäisi olevan siis heikosti yhteydessä F0 taajuuteen LI:in siten, että aktiivisuuden lisääntyessä lateralisoituminen heikkenee. Liikunta-aktiivisuus ei kuitenkaan ollut yhteydessä lainkaan lateralisoitumisen suuntaan.

TAULUKKO 2. Korrelaatiomatriisi koehenkilöiden muuttujien välillä

	Vasen SM1 CKC F0	Oikea SM1 CKC F0	Vasen SM1 CKC F1	Oikea SM1 CKC F1	LI F0	LI F1
Käsien näppäryys (s)	0.459**	0.123	0.228	-0.022	-0.409*	-0.125
Ikä	-0.294	0.117	0.065	0.328	0.226	0.34
MET-min/vk	0.259	-0.042	0.035	-0.01	-0.382*^a	-0.189 ^a

SM1 = primääri sensorimotorinen alue, LI = lateralisaatioindeksi. ^a = analyysissä käytetty LI:n absoluuttisia arvoja. ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

Taulukossa 3 nähdään ei-standardoitujen kahden enter-mallin mukaan tehdyn lineaarisen regressioanalyysin beta koeffisientit ja niiden p-arvot. Ensimmäisen malli sopi aineistoon ($F(6,24) = 2.653$, $p < 0.05$) ja sen korjattu selitysaste oli kohtuullinen $R^2 = 0.25$. Mallin

merkitsevästi käsien näppäryyttä selittävät tekijät olivat F0 taajuuden CKC vasemmalla hemisfäärillä (beta = 45.15, $p < 0.01$) ja sukupuoli (beta = -8.96, $p < 0.05$). Toinen malli sopi myös aineistoon ($F(4,26) = 2.898$, $p < 0.05$), mutta korjattu selitysaste oli hieman heikompi $R^2 = 0.20$. Tässä vain F0 taajuuden lateralisaatioindeksi oli merkitsevästi käsien näppäryyttä selittävä muuttuja. Malleja ei voitu yhdistää, koska lateralisaatioindeksi korreloi voimakkaasti CKC muuttujien kanssa.

TAULUKKO 3. Kahden eri lineaarisen mallin käsien näppäryyttä ennustavat beta koeffisientit.

<i>1. malli</i>	Beta	p-arvo	<i>2. malli</i>	Beta	p-arvo
OS F0 CKC (Vasen SM1)	45.15**	0.005	LI F0	-22.70**	0.005
VS F0 CKC (Vasen SM1)	-5.71	0.697	LI F1	-2.88	0.731
OS F1 CKC (Oikea SM1)	8.88	0.494	Ikä	0.27	0.235
VS F1 CKC (Oikea SM1)	-18.18	0.176	Sukupuoli	-8.04	0.224
Ikä	0.43	0.073			
Sukupuoli (N)	-8.98*	0.033			

OS = Oikea sormi, VS = Vasen sormi.

Kun dataa analysoitiin ikäryhmien sisällä, ei CKC:n voimakkuuden ja käsien näppäryyden välillä havaittu yhteyttä. Vasemman SM1:n CKC:n F0-taajuuden yhteys käsien näppäryyteen havaittiin vasta suuremmalla otos koolla. Mielenkiintoinen havainto oli kuitenkin se, että nuorten ryhmässä CKC:n F1-taajuuden lateralisaatioindeksi korreloi voimakkaasti käsien näppäryyden kanssa ($r = -0.629$, $p < 0.05$). (Taulukko 4)

TAULUKKO 4. Nuorten ja varttuneiden ryhmän korrelaatiomatriisi

	Vasen SM1	Oikea SM1	Vasen SM1	Oikea SM1	LI F0	LI F1
	CKC F0	CKC F0	CKC F1	CKC F1	F0	F1
<i>Nuoret:</i>						
Käsien näppäryys (s)	0.362	0.171	0.124	-0.309	-0.318	-0.629*
<i>Varttuneet:</i>						
Käsien näppäryys (s)	0.307	-0.82	0.246	0.329	-0.514	0.129

* $p < 0.05$

7. POHDINTA

Tutkimuksessa havaittiin käsien näppäryyden olevan yhteydessä oikean (dominantin) käden proprioseptiikan neuraaliseen vasteeseen. Vasteen voimistuessa käsien näppäryys heikkeni. Lisäksi neuraalisen vasteen lateralisoituminen oikealle hemisfäärille oli yhteydessä nopeampaan aikaan käsien näppäryyttä kuvaavassa tehtävässä. Vain alle 35-vuotiailla havaittiin merkitsevästi voimakkaampi kortikokinemaattinen koherenssi vasemman hemisfäärin primäärillä sensorimotorisella alueella. Aikaisempien tutkimusten mukaisesti voimakkain kortikokinemaattinen koherenssi havaittiin hemisfäärien primäärien sensorimotoristen alueiden yläpuolella olevista MEG:n sensoreista.

Proprioseptiikan neuraalista vastetta tarkasteltiin kortikokinemaattisen koherenssin avulla, joka kuvaa periferiasta mitattavan kinemaattisen signaalin ja neuraalisen aktiivisuuden koherenssia (Bourguignon ym. 2015; Piitulainen ym. 2013). Proprioseptiivisen informaation neuraalisen vasteen lateralisoitumista ei havaittu koko otoksen analyysissä. Kuitenkin nuorten alle 35-vuotiaiden kohdalla havaittiin merkitsevästi voimakkaampaa F1 taajuuden CKC:a vasemman hemisfäärin SM1 alueella. Nuorten kohdalla näyttäisikin siltä, että periferiasta saapuva proprioseptiivinen informaatio aiheuttaa voimakkaamman vasteen oikean (dominantin) käden aivojen sensorimotorisella alueella. Yli 35-vuotiaiden kohdalla vastaavaa lateralisoitumista ei havaittu. Lisäksi heidän F0 taajuuden CKC oli trendiltään voimakkaampaa vasemman (ei-dominantin) käden aivojen sensorimotorisella alueella. Alle 35-vuotiailla F0 taajuuden CKC vaste oli trendiltään voimakkaampaa oikean (dominantin) käden sensorimotorisella alueella verrattuna vasemman (ei-dominantin) käden sensorimotorisen alueen vasteeseen.

CKC:n voimakkuuden yhteys motoriseen toimintakykyyn on havaittu aikaisemmin nilkan proprioseptiivisen vasteen ja tasapainon välillä (Piitulainen ym. 2018a). Tämän tutkimuksen löydökset ovat saman suuntaisia, kun oikean etusormen CKC:n korkeampi voimakkuus oli yhteydessä heikompaan suoriutumiseen käden näppäryydestä. Mirdamari & Block (2020)

havaittivat, että kohonnut periferiasta tuleva afferenttien aiheuttama inhibitio sensorimotorisilla alueilla on yhteydessä motorisen taidon oppimiseen. Lisäksi Nurmi ym. (2021) havaitsivat, että voimakkaampi dominantin käden SI ja SII alueen aktivoituminen oli yhteydessä heikompaan sensorimotoriseen toimintakykyyn. Tämänhetkisten tutkimustulosten mukaan voidaan muodostaa hypoteesi, että primäärin sensorimotorisen alueen aktiivisuuden voimakkuuden kasvu näyttäisi olevan yhteydessä heikompaan suoriutumiseen sensorimotorisessa tehtävässä. Tällä hetkellä ei kuitenkaan tiedetä kuinka hyvin CKC on vuorovaikutuksessa sensorimotorisen alueeseen vaikuttavaan inhibitioon. Tätä voitaisiin tarkastella jatkotutkimuksilla, jossa tutkittaisiin CKC:n voimakkuuden yhteyttä periferiasta tulevien afferenttien aiheuttamaan inhibitioon sekä näiden vuorovaikutukseen sensorimotorisessa tehtävässä.

CKC:n F0 taajuuden lateralisoitumisella havaittiin myös olevan yhteys käsien näppäryyteen (Kuva 12). Lateralisaatioindeksi osoitti, että voimakkaampi lateralisoituminen oikean hemisfäärin primäärille sensorimotoriselle alueelle ennusti nopeampaa suoriutumista käden näppäryystehtävästä (Taulukko 3). Aikaisempia tutkimuksia käden alueen CKC:n lateralisoitumisen ja yläraajan motorisen toimintakyvyn välillä ei ole tehty. Aikaisemmissa tutkimuksissa on kuitenkin havaittu proprioseptiivisen informaation prosessoinnin olevan lateralisoitunut oikealle hemisfäärille (Naito ym. 2017; Goble ym. 2012; Naito ym. 2005).

Nuorten ryhmässä havaittiin voimakkaampi CKC F0 ja F1 taajuudella vasemman SM1:lla. Kuitenkin vain F1 taajuuden voimakkuuden ero oli tilastollisesti merkitsevä (Kuva 12). Mielenkiintoinen havainto onkin nuorten CKC:n F1-taajuuden käänteinen yhteys käden näppäryyden kanssa (Taulukko 4). Tarkoittaen sitä, että oikean hemisfäärin SM1:n CKC:n ollessa yhtä voimakas tai voimakkaampi kuin vasemmalla SM1:lla havaittu CKC oli nuorempien koehenkilöiden käsien näppäryyttä mittaavan testin aika nopeampi. Näyttäisikin siltä, että oikean hemisfäärin voimakkaampi aktivoituminen suhteessa vasempaan hemisfäärin olisi yhteydessä parempaan sensorimotoriseen toimintakykyyn.

Kirjallisuudessa ei ole vielä saavutettu konsensusta CKC:n F0 ja F1 taajuuksien toiminnallisesta merkityksestä. Aikaisemmassa tutkimuksessa havaittiin, että oikean etusormen

passiivisen liikituksen seurauksena vasemman SM1 alueen CKC:n F1 taajuudella havaitaan voimakkaampi vaste kuin F0 taajuudella (Piitulainen ym 2013). Tämän lisäksi Bourguignon ym. (2012) havaitsivat, että aivojen primäärin sensorimotorisen aivoalueen ulkopuolella havaitaan voluntaarisen liikkeen seurauksena CKC:a riippuen kumpaa CKC:n taajuutta tarkasteltiin. Esimerkiksi dorsolateraalilla prefrontaalikorteksilla havaittiin sormien voluntaarisen liikituksen CKC:a vain F1 taajuudella. Tässä tutkimuksessa havaittiin vasemmalla SM1 alueella F1 taajuudella voimakkaampaa CKC:a kuin F0 taajuudella (Kuva 11). Havainto on linjassa Piitulaisen ym. (2013) tulosten kanssa. Mielenkiintoista on kuitenkin se, että oikealla hemisfäärillä eli vasemman (ei dominantin) käden toiminnasta vastaavalla aivojen puolella ei vastaavaa CKC:n F0 ja F1 taajuuden eroavaisuutta havaittu. Kaikki koehenkilöt olivat oikeakätisiä ja tällä voi olla vaikutusta kyseiseen havaintoon. Koehenkilöiden oikean käden dominoiva asema arkikäytössä on voinut vaikuttaa periferiasta saapuvan proprioseptiivisen informaation prosessointiin. Onkin mahdollista, että F0 ja F1 taajuudet kuvaavat proprioseptiivisen informaation käsittelyä eri aspekteista. Suoraa tutkimusta ei ole vielä tehty, jonka avulla pyrittäisiin selvittämään F0 ja F1 taajuuksien toiminnallisia eroavaisuuksia. Tulevaisuudessa olisikin hyvä pyrkiä selvittämään liittyvätkö CKC:n F0 ja F1 taajuudet ihmisen eriäviin neuraalisiin mekanismeihin.

Tämän taustalla on mahdollisesti teoria siitä, että dominantin käden hermoverkosto kehittyy voimakkaammin toimimaan visuomotorisessa toimintaympäristössä. Ei-dominantin yläraajan tehtäväksi jää tukeva toiminta, joka useimmiten nojautuu keholliseen aistimukseen ja kehoskeeman päivittämiseen. Näin ollen oikea hemisfääri kehittyisi kohti hienostuneempaa kehollisen eli proprioseptiivisen informaation käsittelyä ja vasen hemisfääri toimisi aktiivisempänä toimijana visuomotoristen toimintojen toteuttajana. (Goble & Brown 2010)

Varttuneilla ihmisillä ei havaittu lateralisoitumisen yhteyttä käsien näppäryyteen. Tämä voi johtua vanhenemisen seurauksena johtuvista muutoksista ääreis- tai keskushermoston neuraalisissa muuttujissa (Hughes ym. 2015). Ikäryhmien välillä ei myöskään havaittu eroa käden näppäryyttä mittaavan tehtävän toteutuksessa. Onkin mahdollista, että varttuneiden ryhmässä mahdollisesti heikentyneitä liikeaistin toimintaa on kompensoitu muiden aistien

avulla käsien näppäryydestä tehdessä. Block & Sexton (2021) havaitsivat tutkimuksessaan, että vanhemmat ihmiset vaihtavat sensorimotoristen tehtävien toteutusstrategiaa. Nuoremmat luottavat enemmän keholliseen eli proprioseptiiviseen palautteeseen ja vanhemmat henkilöt alkavat toimimaan enemmän visuaalisten vihjeiden avulla (Helsen ym. 2016). Tutkimuksessa käytetty käden näppäryyttä mittaava Grooved Pegboard -testi mahdollistaa erilaisten aistien hyödyntämisen toteutuksen aikana. Onkin mahdollista, että koehenkilöt käyttävät erilaisia strategioita tehtävän toteutuksessa. Tämä voi vaikuttaa tulokseen, kun tarkastellaan proprioseptiivisen vasteen yhteyttä sensorimotoriseen toimintakykyyn.

Nilkan liikituksen seurauksena havaittiin voimakkaampaa CKC:ta ei-dominantin nilkan primäärillä sensorimotorisella alueella (Piitulainen ym. 2018a). Vastaavaa ei kuitenkaan havaita käden CKC:n kohdalla. Aikaisemmin (Piitulainen 2018b) ja tässä tutkimuksessa havaittiin ennemminkin trendiä dominantin käden voimakkaammasta CKC:sta. Voikin olla, että alaraajojen proprioseptoreilta tulevan informaation käsittely eroaa keskushermostossa yläraajojen informaation käsittelystä.

Tämän tutkimuksen yhtenä vahvuutena on aikaisemmissa tutkimuksissa käytettyjen ja luotettavaksi todennettujen proprioseptiikan kortikaalista aktiivisuutta mittaavan metodin soveltaminen lateralisaatiotutkimukseen. Hyvän koehenkilöiden alkuvalmisteluiden ja käytettyjen mittausmenetelmien toimivuuden avulla kaikkien mitattujen oikeakätisten koehenkilöiden tutkimusdata voitiin sisällyttää analyysiin. MEG:n avulla kortikokinemaattisen koherenssin mittaaminen etusormien passiivisen liikituksen seurauksena on toimiva ja helposti toteutettava mittausmenetelmä, kun tutkijalla on riittävästi kokemusta MEG ympäristössä toimimisesta. Tutkimustulokset ovat linjassa aikaisempien tutkimusten kanssa, joka tukee mittausten onnistumista ja saatujen tulosten luotettavuutta.

Heikkoutena tutkimuksessa on otoksen homogeenisyys. Liikunta-aktiivisuutta tarkasteltaessa havaitaan, että koehenkilöiden liikunta-aktiivisyys oli korkealla tasolla. Vain yksi koehenkilö sijoittui liikunta-aktiivisuuden osalta vähän aktiivisten joukkoon. Tutkimukseen ei myöskään onnistuttu rekrytoimaan riittävästi vasenkätisiä koehenkilöitä, jonka seurauksena heidän

tuloksiansa ei sisällytetty analyysiin. Tutkimuksen tulokset ja johtopäätökset koskevatkin vain fyysisesti aktiivisia oikeakätisiä henkilöitä. Tämän lisäksi tutkimuksessa ei havaittu aikaisemmin todennettua iän yhteyttä kortikokinemaattisen koherenssin voimakkuuteen. Kyseisen yhteyden puuttuminen johtuu todennäköisesti siitä, että tutkimukseen ei onnistuttu rekrytoimaan yli 60-vuotiaita. Aikaisemmissa tutkimuksissa, joissa iän yhteys kortikokinemaattisen koherenssin voimakkuuteen on havaittu, on tutkittu koehenkilöitä aina 20 vuotiaista 73 vuotiaisiin (Piitulainen ym. 2018a). Myös liikunta-aktiivisuuden hidastava vaikutus ikääntymisen aiheuttamiin muutoksiin voi vaikuttaa iän ja kortikokinemaattisen koherenssin väliseen yhteyteen. Vaikka Grooved Pegboard näppäryydestä on paljon käytetty käsien näppäryydestä, mahdollistaa se erilaisten toteutusstrategioiden käytön. Tämän seurauksena proprioseptiivisen informaation tärkeys toteutuksen onnistumisessa voi teoriassa pienentyä. Tulevaisuudessa olisi hyvä muodostaa testipatteristo, jonka avulla pyrittäisiin testaamaan ihmisen proprioseptiivisen aistin suorituskykyä tilanteessa, jossa muiden aistien kautta saatava lisäinformaatio olisi minimaalista.

Tiivistettynä voidaan todeta, että CKC:n voimakkuudella näyttäisi olevan käänteinen yhteys ihmisen sensorimotoriseen toimintakykyyn. CKC:n lateralisoituminen oikealle hemisfäärille on yhteydessä parempaan sensorimotoriseen toimintakykyyn ja näin puoltasi Naiton tutkimusryhmän (2016) havaintoja proprioseptiikan lateralisoitumisesta. Lisätutkimusta tarvitaan CKC:n vahvuuteen vaikuttavista tekijöistä. Lisäksi olisi tärkeää selvittää kuvaako korkeampi CKC:n voimakkuus heikompa kortikaalista inhibitiota.

LÄHTEET

- Alary, F., Simões, C., Jousimäki, V., Forss, N. & Hari, R. 2002. Cortical activation associated with passive movements of the human index finger: An MEG study. *NeuroImage* 15, 691 – 696.
- Augurelle, A-S., Smith, A. M., Lejeune, T. & Thonnard, J-L. 2003. Importance of cutaneous feedback in maintaining a secure grip during manipulation of hand-held objects. *Journal of Neurophysiology* 89, 665 – 671.
- Baillet, S. 2017. Magnetoencephalography for brain electrophysiology and imaging. *Nature Neuroscience* 20, 327 – 339.
- Bastian, H. C. 1887. The “Muscular sense”: Its nature and cortical localization. *Brain*. 1 – 89.
- Block, H. J. & Sexton, B. M. 2021. Visuo-proprioceptive control of the hand in older adults. *Multisensory Research* 34, 93 – 110.
- Bourguignon, M., De Tiège, X., Op de Beeck, M., Pirotte, B., Van Bogaert, P., Goldman, S., Hari, R. & Jousmäki, V. 2011. Functional motor-cortex mapping using corticokinematic coherence. *NeuroImage* 55, 1475 – 1479.
- Bourguignon, M., Piitulainen, H., De Tiège, X., Jousmäki, V. & Hari, R. 2015. Corticokinematic coherence mainly reflects movement-induced proprioceptive feedback. *NeuroImage* 106, 382 – 390.
- Burke, D., Gandevia, S. C. & Macefield, G. 1988. Responses to passive movement of receptors in joint, skin and muscle of the human hand. *The Journal of Physiology* 402, 347 – 361.
- Burke, J. R., Schutten, M. C., Koceja, D. M. & Kamen, G. 1996. Age-dependent effects of muscle vibration and the Jendrassik maneuver on the patellar tendon reflex response. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 77 (6), 600 – 604.
- Burke, R. E. 2007. Sir Charles Sherrington’s The integrative action of the nervous system: a centenary appreciation. *Brain* 130, 887 – 894.
- Chettouf, S., Rueda-Delgado, L. M., de Vries, R., Ritter, P. & Daffertshofer, A. 2020. Are unimanual movements bilateral? *Neuroscience and Behavioral Reviews* 113, 39 – 50.

- Chilvers, M. J., Hawe, R. L., Scott, S. H. & Dukelow, S. P. 2021. Investigating the neuroanatomy underlying proprioception using stroke model. *Journal of the Neurological Science* 430, 1 – 15.
- Craig, C. L., Marshall, A. L., Sjöström, M., Bauman, A. E., Booth, M. L., Ainsworth, B. E., Pratt, M., Ekelund, U., Yngve, A., Sallis, J. F. & Oja, P. 2003. International physical activity questionnaire: 12-country reliability and validity. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 35 (8), 1381 – 1395.
- Delhaye, B. P., Long, K. H. & Bensmaia, S. J. 2018. Neural basis of touch and proprioception in primate cortex. *Comprehensive Physiology* 8 (4), 1575 – 1602.
- Dijkerman, H. C. & de Haan, E. H. F. 2007. Somatosensory processes subserving perception and action. *Behavioral and Brain Science* 30, 189 – 239.
- Edin, B. B. & Vallbo, Å. B. 1990. Dynamic response of human muscle spindle afferents to stretch. *Journal of Neurophysiology* 63 (6), 1297 – 1306.
- Enoka, R. M. 2015. *Neuromechanics of human movement*. 5. painos. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Feng, J., Hung, T-M., Huang, R., Hou, S. & Ren, J. 2019. Role of proprioception in slow and rapid movements. *Perceptual and Motor Skills*, 1 – 18.
- Ferrell, W. R. & Smith, A. 1988. Position sense at the proximal interphalangeal joint of human index finger. *The Journal of Physiology* 399, 49 – 61.
- Freeston, J., Adams, R. D. & Rooney, K. Shoulder proprioception is not related to throwing speed or accuracy in elite adolescent male basketball players. *Journal of Strength and Conditioning Research* 29 (1), 181 – 187.
- Gazzaniga, M. S. 2000. Cerebral specialization and interhemispheric communication: Does the corpus callosum enable the human condition? *Brain* 123 (7), 1293 – 1326.
- Gazzaniga, M. S., Ivry, R. B. & Mangun, G. R. 2019. *Cognitive neuroscience: The biology of the mind*. 5. Painos. New York, W.W. Norton & Company.
- Gentilucci, M., Toni, I., Daprati, E. & Gangitano, M. 1997. Tactile input of the hand and the control of reaching to grasp movements. *Experimental Brain Research* 114, 130 – 137.

- Goble, D. J. & Brown, S. H. 2010. Upper limb asymmetries in the perception of proprioceptively determined dynamic position sense. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 36 (3), 768 – 775.
- Goble, D. J., Coxon, J. P., Van Impe, A., Geurts, M., Van Hecke, W., Sunaert, S., Wenderoth, N. & Swinnen, S. P. 2012. The neural basis of central proprioceptive processing in older versus younger adults: An important sensory role for right putamen. *Human Brain Mapping* 33, 895 – 908.
- Goldring, S. & Ratcheson, R. 1972. Human motor cortex: Sensory input data from single neuron recordings. *Science* 175 (4029), 1493 – 1495.
- Gramfort, A., Luessi, M., Larson, E., Engemann, D. A., Strohmeier, D., Brodbeck, C., Parkkonen, L. & Hämäläinen, M. S. 2014. *NeuroImage* 86, 446 – 460.
- Hall, L. A. & McCloskey, D. I. 1983. Detections of movements imposed on finger, elbow and shoulder joint. *Journal of Physiology* 335, 519 – 533.
- Halliday, D. M., Rosenberg, J. R., Amjad, A. M., Breeze, P., Conway, B. A. & Farmer, S. F. 1995. A framework for the analysis of mixed time series/point process data – Theory and application to the study of physiological tremor, single motor unit discharge and electromyograms. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 64 (2-3), 237 – 278.
- Han, J., Waddington, G., Anson, J. & Adams, R. Level of competitive success achieved by elite athletes and multi-joint proprioceptive ability. *Journal of Science and Medicine in Sport* 18, 77 – 81.
- Hari, R. & Forss, N. 1999. Magnetoencephalography in the study of human somatosensory cortical processing. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 345 (1387), 1145 – 1154.
- Hauser, R. 2022. Joint instability as the cause of nerve pain – Treatment of neuralgia. Verkkosivu. Viitattu 12.4.2022. <https://www.caringmedical.com/prolotherapy-news/joint-instability-cause-nerve-pain-treatment-neuralgia/>
- Henry, M. & Baudry, S. 2019. Age-related changes in leg proprioception: implications for postural control. *Journal of Neurophysiology* 122, 525 – 538.
- Hughes, C. M. L., Tomassino, P., Budhota, A. & Campolo, D. 2015. Upper extremity proprioception in healthy aging and stroke populations, and the effects of therapist- and

- robot-based rehabilitation therapies on proprioceptive function. *Frontiers in Human Neuroscience* 9 (120), 1 – 11.
- Hutsler, J. & Galuske, R. A. W. 2003. Hemispheric asymmetries in cerebral cortical networks. *TRENDS in Neuroscience* 26 (8), 429 – 435.
- Hämäläinen, M. Hari, R., Ilmoniemi, R., Knuutila, J. & Lounasmaa, O. 1993. Magnetoencephalography: theory, instrumentation, and applications to the noninvasive study of the working human brain. *Reviews of Modern Physics* 65 (2), 413 – 490.
- Ionta, S., Perruchoud, D., Draganski, B. & Blanke, O. 2012. Body context and posture affect mental imagery of hands. *PlosOne* 7 (3).
- IPAQ. 2005. Guidelines for data processing and analysis of the international physical activity questionnaire (IPAQ) – Short and Long Forms.
- Iwamura, Y., Tanaka, M., Sakamoto, M. & Hikosaka, O. 1983. Functional subdivisions representing different finger regions in area 3 of the first somatosensory cortex of the conscious monkey. *Experimental Brain Research* 51, 315 – 326.
- Just, N. & Sonnay, S. 2017. Investigating the role of glutamate and GABA in the modulation of transthalamic activity: A Combined fMRI-fMRS study. *Frontiers in Physiology* 8 (30), 1 – 14.
- Kaas, J. H., Nelson, R. J., Sur, M., Lin, C. S., & Merzenich, M. M. 1979. Multiple representations of the body within the primary somatosensory cortex of primates. *Science* 204 (4392), 521–523.
- Kim, G. H., Suzuki, S. & Kanda, K. 2007. Age-related physiological and morphological changes of muscle spindles in rat. *The Journal of Physiology* 582 (2), 525 – 538.
- Kolb, B. & Whishaw, I., Q. 2015. *Fundamentals of human neuropsychology*. 7. Painos. New York, NY: Worth Publishers.
- Krubitzer, L., Huffman, K. J., Disbrow, E. & Recanzone, G. 2004. Organization of Area 3a in Macaque monkeys: Contributions to the cortical phenotype. *The Journal of Comparative Neurology* 471, 97 – 111.
- Kurcyus, K., Annac, E., Hanning, N. M., Harris, A. D., Oeltzschner, G., Edden, R. & Riedl, V. 2018. Opposite dynamics of GABA and glutamate levels in the occipital cortex during visual processing. *Journal of Neuroscience* 38 (46), 1214 – 1218.

- Lachaux, J. P., Rodriguez, E., Martinerie, J. & Varela, F. J. 1999. Measuring phase synchrony in brain signals. *Human Brain Mapping* 8 (4), 194 – 208.
- Lephart, S. M., Giraldo, J. L., Borsa, P.A. & Fu, F. H. 1996. Knee joint proprioception: a comparison between female intercollegiate gymnasts and controls. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy* 4, 121 – 124.
- Lin, C-H., Lien, Y-H., Wang, S-F. & Tsauo, J-Y. 2006. Hip and knee proprioception in elite, amateur, and novice tennis players. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation* 85, 216 – 221.
- Liu, J.-X., Eriksson, P.-O., Thornell, L.-E., & Pedrosa-Domellöf, F. 2005. Fiber Content and Myosin Heavy Chain Composition of Muscle Spindles in Aged Human Biceps Brachii. *Journal of Histochemistry & Cytochemistry* 53(4), 445 – 454.
- McCormick, K., Zalucki, N., Hudson, M., L. & Moseley, G., L. 2007. Faulty proprioceptive information disrupts motor imagery: an experimental study. *Australian Journal of Physiotherapy* 57, 41 – 45.
- McNeil, D. Quaeghebeur, L. & Duncan, S. 2010. IW – ”The man who lost his body”. Teoksessa: Schmicking, D. & Gallagher, S. (ed.) *Handbook of Phenomenology and Cognitive Science*. Springer, Dordrecht, 519 – 543.
- Merrick, C. M., Dixon, T. C., Breska, A., Lin, J., Chang, E. F., King-Stephens, D., Laxer, K. D., Weber, P. B., Carmena, J., Knight, R. T. & Ivry, R. B. 2022. Left hemispheric dominance for bilateral kinematic encoding in the human brain. *eLife* 11, 1 – 25.
- Mirdamadi, J. L. & Block, H. J. 2020. Somatosensory changes associated with motor skill learning. *Journal of Neurophysiology* 123, 1052–1062.
- Miwa, T., Miwa, Y. & Kanda, K. 1995. Dynamic and static sensitivities of muscle spindle primary endings in aged rats to ramp stretch. *Neuroscience Letters* 201 (2), 179 – 182.
- Muaidi, Q. I., Nicholson, L. L. & Refshauge, K. M. Do elite athletes exhibit enhanced proprioceptive acuity, range and strength of knee rotation compared with non-athletes? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 19, 103 – 112.
- Mujunen, T., Nurmi, T. & Piitulainen, H. 2021. Corticokinematic coherence is stronger to regular than irregular proprioceptive stimulation of the hand. *Journal of Neurophysiology* 126, 550 – 560.

- Murakami, S. & Okada, Y. 2006. Contributions of principal neocortical neurons to magnetoencephalography and electroencephalography signal. *The Journal of Physiology* 575 (3), 925 – 936.
- Mutha, P. K., Haaland, K. Y. & Sainbur, R. L. 2012. The effects of brain lateralization on motor control and adaptation. *Journal of Motor Behavior* 44 (6), 455 – 469.
- Naito, E. & Ehrsson, H. H. 2001. Kinesthetic illusion of wrist movement activates motor-related areas. *NeuroReport* 12 (17), 3805 – 3809.
- Naito, E., Morita, T. & Amemiya, K. 2016. Body representations in the human brain revealed by kinesthetic illusions and their essential contributions to motor control and corporeal awareness. *Neuroscience Research* 104, 16 – 30.
- Naito, E., Morita, T., Saito, D. N., Ban, M., Shimada, K., Okamoto, Y., Kosaka, H., Okazawa, H., & Asada, M. 2017. Development of Right-hemispheric Dominance of Inferior Parietal Lobule in Proprioceptive Illusion Task. *Cerebral cortex* 27(11), 5385–5397.
- Naito, E., Roland, P. R., Grefkes, C., Choi, H. J., Eickhoff, S., Geyer, S., Zilles, K. & Ehrsson, H. H. 2005. Dominance of the right hemisphere and role of area 2 in human kinesthesia. *Journal of Neurophysiology* 93, 1020 – 1034.
- Niu, J., Ding, L., Li, J. J., Kim, H., Liu, J., Li, H., Moberly, A., Badea, T. C., Duncan, I. D., Son, Y-J., Scherer, S. S. & Luo, W. 2013. Modality-based organization of ascending somatosensory axons in the direct dorsal column pathway. *Journal of Neuroscience* 33 (45), 17691-17709.
- Nurmi, T., Jaatela, J., Vallinoja, J., Mäenpää, H. & Piitulainen, H. 2021. Stronger proprioceptive BOLD-response in the somatosensory cortices reflect worse sensorimotor function in adolescents with and without cerebral palsy. *NeuroImage: Clinical* 32, 1 – 15.
- Nyberg-Hansen, R. & Rinvik, E. 1963. Some comments on the pyramidal tract, with special reference to its individual variations in man. *Acta Neurological Scandinavica* 39 (1), 1 – 30.
- Oldfield, R.C. 1971. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113

- Paillard, J. 1999. Body schema and body image – A double dissociation in deafferented patients. In: Gantchev, G.N., Mori, S. & Massion, J. (eds.) *Motor Control, Today and Tomorrow*. Academic Publishing House, Sofia, 197 – 214.
- Petit, L., S., Pegna, A., J., Mayer, E. & Hauert, C., A. 2003. Representation of anatomical constraint in motor imagery: mental rotation of a body segment. *Brain and Cognition* 51, 95 – 101.
- Pierrot-Deseilligny, E., & Burke, D. C. 2012. *The Circuitry of the Human Spinal Cord: Spinal and Corticospinal Mechanisms of Movement*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Piitulainen, H., Bourguignon, M., De Tiège, X., Hari, R. & Jousmäki, V. 2013. Corticokinematic coherence during active and passive finger movement. *Neuroscience* 238, 361 – 370.
- Piitulainen, H., Bourguignon, M., Hari, R. & Jousimäki, V. MEG-compatible pneumatic stimulator to elicit passive finger and toe movements. 2015. *Neuroimage* 112, 310 – 317.
- Piitulainen, H., Ilman, M., Laaksonen, K., Jousmäki, V. & Forss, N. 2018b. Reproducibility of corticokinematic coherence. *NeuroImage* 179, 596 – 603.
- Piitulainen, H., Seipäjärvi, S., Avela, J., Parviainen, T. & Walker, S. 2018a. Cortical proprioceptive processing is altered by aging. *Frontiers in Aging Neuroscience* 10 (147), 1 – 13.
- Proske, U. & Gandevia, S. C. 2012. The proprioceptive senses: Their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiological Reviews* 92, 1651 – 1697.
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D. Hall, W. C., LaMantia, A.m Mooney, R. D., Platt, M. L. & White, L. E. 2018. *Neuroscience*. 6th edition. Oxford: Sinauer Associates, Inc.
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A., Mooney, R. D., Platt, M. L. & White, L. E. 2019. *Neuroscience*. 6. painos. New York: Sinauer Associates.
- Sainburg, R. L., Ghez, C. & Kalakanis, D. 1999. Intersegmental dynamics are controlled by sequential anticipatory, error correction, and postural mechanisms. *Journal of Neurophysiology* 81, 1045 – 1056.

- Scheidt, R. A., Conditt, M. A., Secco, E. L. & Mussa-Ivaldi, F. A. 2005. Interaction of visual and proprioceptive feedback during adaptation of human reaching movement. *Journal of Neurophysiology* 93, 3200 – 3213.
- Schwarz, D. W. F., Deecke, L. & Fredrickson, J. M. 1973. Cortical projection of group I muscle afferents to area 2, 3a, and the vestibular field in the rhesus monkey. *Experimental Brain Research* 17 (5), 516 – 526.
- Sengul, G. & Watson, C. 2011. *Spinal Cord: Connections*. Teoksessa: *The Human Nervous System*. 3. Painos. (ed.) Mai, J. K. & Paxions, G. London: Elsevier Science and Technology
- Sevrez, V. & Bourdin, C. 2015. On the role of proprioception in making free throws in basketball. *Research Quarterly for Exercise and Sport* 86, 276 – 280.
- Simões, C., Alary, F., Forss, N & Hari, R. 2002. Left-hemisphere-dominant SII activation after bilateral median nerve stimulation. *NeuroImage* 16, 686 – 690.
- Sober, S. J. & Sabes, P. N. 2003. Multisensory integration during motor planning. *The Journal of Neuroscience* 23 (18), 6982 – 6992.
- Sobinov, A. R. & Bensmaia, S. J. 2021. The neural mechanisms of manual dexterity. *Nature Review Neuroscience* 22, 741 – 757.
- Srinath, R. & Ray, S. 2014. Effect of amplitude correlations on coherence in the local field potential. *Journal of Neurophysiology* 112, 741 – 751.
- Swash, M. & Fox, K. P. 1972. The effect of age on human skeletal muscle studies of the morphology and innervation of muscle spindles. *Journal of the neurological Science* 16, 417 – 432.
- Taulu, S. & Simola, J. 2006. Spatiotemporal signal space separation method for rejecting nearby interference in MEG measurements. *Physics in Medicine & Biology* 51 (7), 1759 – 1768.
- Tseng, Y-T., Tsai, C-L. & Chen, F-C. 2020. Wrist proprioceptive acuity is linked to fine motor function in children undergoing piano training. *Journal of Neurophysiology* 124, 2052 – 2059.

- Tseng, Y-T., Tsai, C-L., Chen, F-C. & Konczak, J. 2018. Wrist position sense acuity and its relation to motor dysfunction in children with developmental coordination disorder. *Neuroscience Letters* 674, 106 – 111.
- Tuthil, J., C. & Azim, E. 2018. Proprioception. *Current Biology* 28, 194 – 203.
- Van den Heuvel, M. P., Stam, C. J., Kahn, R. S. Hulshoff Pol, H. E. 2009. Efficiency of functional brain networks and intellectual performance. *Journal of Neuroscience* 29 (23), 7619 – 7624.
- Vaughan, S. K., Stanley, O. L. & Valdez, G. 2017. Impact of aging on proprioceptive sensory neurons and intrafusal muscle fibers on mice. *Journals of Gerontology: Biological Sciences* 72 (6), 771 – 779.
- Yadav, V. & Sainburg, R.L. 2011. Motor lateralization is characterized by a serial hybrid control scheme. *Neuroscience* 196, 153 – 167.

LIITTEET

Liite 1: Edinburgh kätsisyystesti

Edinburgh kätsisyystesti ID: _____ Pvm: _____

Merkitse kunkin tehtävän (1–10) kohdalla rasti kohtaan joka kuvaa parhaiten käsiesi käyttöä kysymyksessä olevan toiminnan tapauksessa. Rastita vain yksi vaihtoehto per kysymys. Jotkin alla luetelluista tehtävistä vaativat molempien käsien käyttöä. Näissä tapauksissa, tehtävän tarkempi osa tai kohde on ilmoitettu sulkeissa.

	Vain vasemalla	Useimmiten vasemalla	Molemmilla yhtä paljon	Useimmiten oikealla	Vain oikealla
1. kirjoittaminen					
2. piirtäminen					
3. heittäminen					
4. leikkaaminen saksilla					
5. hampaiden harjaus					
6. veitsen käyttö (ilman haarukkaa)					
7. lusikan käyttö					
8. lakaiseminen harjalla (ylempi käsi)					
9. tulitikun sytyttäminen (tulitikku)					
10. lasipurkin avaaminen (kansi)					
Yhteensä					

Tutkija täyttää :

Ero	Kumulatiivinen	Pisteet

Liite 2: Kansainvälinen fyysisen aktiivisuuden kysely (IPAQ)

Päivämäärä: _____ ID: _____

KANSAINVÄLINEN FYYSISEN AKTIIVISUUDEN KYSELY (IPAQ)

Olemme kiinnostuneita selvittämään minkälaista fyysisiä aktiviteetteja ihmiset tekevät osana jokapäiväistä elämää. Kysymykset kysyvät ajasta, jonka olet ollut aktiivinen viimeisen **7 päivän aikana**. Ole hyvä ja vastaa kaikkiin kysymyksiin, vaikka et pitäisikään itseäsi fyysisesti aktiivisena henkilönä. Ole hyvä ja mieti sellaisia aktiviteetteja, joita teet töissä, koti- tai pihatöinä, miten liikut paikasta toiseen ja miten vapaa-aikanasi harrastat liikuntaa tai urheilut.

Mieti kaikkia **kuormittavia** aktiviteetteja, joita olet tehnyt **viimeisen 7 päivän** aikana. **Kuormittavat** fyysiset aktiviteetit tarkoittavat aktiviteetteja, jotka vaativat kovaa fyysistä ponnistusta ja saavat sinut kunnolla hengästymään. Mieti *vain* tällaisia fyysisiä aktiviteetteja, joita olet tehnyt vähintään 10 minuuttia kerrallaan.

3. **Viimeisen 7 päivän** aikana kuinka monena päivänä olet tehnyt **kuormittavaa** fyysistä aktiviteettia kuten raskasta nostamista, kaivamista, aerobisia tai nopeaa pyöräilyä?

_____ päivänä viikossa

Ei kuormittavia fyysisiä aktiviteetteja → Siirry kysymykseen 5

4. Kuinka paljon tavallisesti käytit aikaa **kuormittaviin** fyysisiin aktiviteetteihin yhtenä aktiivisena päivänä?

_____ tuntia päivässä

_____ minuuttia päivässä

en tiedä / en ole varma

Mieti kaikkia **kohtalaisia** aktiviteetteja joita olet tehnyt **viimeisen 7 päivän** aikana. **Kohtalaiset** fyysiset aktiviteetit tarkoittavat aktiviteetteja, jotka vaativat kohtalaista fyysistä ponnistusta ja saavat sinut hieman hengästymään. Mieti *vain* tällaisia fyysisiä aktiviteetteja, joita olet tehnyt vähintään 10 minuuttia kerrallaan.

5. **Viimeisen 7 päivän** aikana kuinka monena päivänä olet tehnyt **kohtalaista** fyysistä aktiviteettia kuten kevyiden kuormien kantamista, pyöräilyä normaaliin tahtiin tai tennistä kaksinpelinä? Älä laske kävelyä mukaan tähän.

_____ päivänä viikossa

Ei kohtalaisia fyysisiä aktiviteetteja → Siirry kysymykseen 7

6. Kuinka paljon tavallisesti käytit aikaa **kohtalaisiin** fyysisiin aktiviteetteihin yhtenä aktiivisena päivänä?

_____ tuntia päivässä

_____ minuuttia päivässä

en tiedä / en ole varma

Mieti aikaa, jonka olet käyttänyt **kävelyyn viimeisen 7 päivän** aikana. Tähän kuuluu kävely töissä, kotona, matka paikasta toiseen tai mitä tahansa kävelyä, jota olet tehnyt virkistyäksesi, liikuntaa harrastaessasi, urheilussa tai vapaa-ajallasi.

7. **Viimeisen 7 päivän** aikana kuinka monena päivänä olet kävellyt vähintään 10 minuuttia yhteen menoon?

_____ päivänä viikossa

Ei kävelyä ➔ **Siirry kysymykseen 9**

8. Kuinka paljon tavallisesti käytit aikaa **kävelyyn** yhtenä aktiivisena päivänä?

_____ tuntia päivässä

_____ minuuttia päivässä

en tiedä / en ole varma

Viimeisessä kysymyksessä kysytään sitä aikaa, jonka olet käyttänyt istumiseen viimeisen 7 päivän aikana. Laske mukaan aika töissä, kotona, opiskellessasi tai vapaa-aikanasi. Tähän voi kuulua pöydän ääressä istumista, ystävien tapaamista, lukemista ja istuen tai maaten television katselua.

9. **Viimeisen 7 päivän** aikana, kuinka paljon käytit aikaa **istumiseen yhden päivän aikana**?

_____ tuntia päivässä

_____ minuuttia päivässä

en tiedä / en ole varma

10. Liikutko mielestäsi riittävästi oman terveytesi kannalta? Arvio terveysliikuntamääräsi ympäröimällä alla olevasta janasta se numero, joka mielestäsi kuvaa parhaiten liikuntamääräsi **terveyden** kannalta. 0 tarkoittaa täyttä inaktiivisuutta ja 10 parasta mahdollista määrää liikuntaa.

0.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8.....9.....10

En liiku
ollenkaan

Paras mahdollinen
liikuntamäärä

11. Lopuksi, arvioi tämänhetkinen **fyysinen kuntosi** ympäröimällä alla olevasta janasta se numero, joka mielestäsi kuvaa parhaiten fyysistä kuntoasi. 0 vastaa huonointa mahdollista ja 10 parasta mahdollista.

0.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8.....9.....10

Huonoin
mahdollinen
fyysinen kunto

Paras mahdollinen
fyysinen kunto

Liite 3: Grooved Pegboard ohjeistus

JAMAR® GROOVED PEGBOARD



TESTIOHJEET

Reikälauta asetetaan tutkittavan keskilinjaan siten, että lauta on pöydän reunalla ja puikkoastia laudan yläpuolella. Testi selitetään seuraavasti:

”Tämä on reikälauta ja tässä ovat puikot (Tutkija osoittaa kumpaakin ja poimii yhden puikon ja jatkaa).

Kaikki puikot ovat samanlaisia. Jokaisessa on uurre eli toinen puoli on pyöristetty ja toinen neliön mallinen. Myös reikälaudassa on vastaavat muodot. Sinun täytyy yhdistää reikälaudassa olevan reiän uurre puikon uurteisiin ja laittaa puikko reikään näin (Tutkija demonstroi laittamalla puikot kaikkiin ylärivin reikiin. Poista puikot ja laita ne takaisin astiaan). Jos puikko putoaa pöydälle tai maahan, sitä ei saa nostaa siitä. Tällöin otetaan uusi puikko ja testiä jatketaan normaalisti. Puikkoja on astiassa enemmän kuin reikiä on reikälaudassa.

Kun sanon ”nyt”, aloita tästä ja laita puikot reikiin mahdollisimman nopeasti, käyttäen ainoastaan hallitsevaa kättäsi. Täytä ylärivi kokonaan tästä reunasta tähän. Älä hyppää yhtään

reikää yli ja täytä jokainen rivi kuten täytit ensimmäisen rivin. Onko kysyttävää? Valmiina, mahdollisimman nopeasti, nyt.”

LISÄOHJEET (NUORET / AIKUISET)

Oikean käden yrityksissä tutkija demonstroi, että puikot laitetaan koehenkilön vasemmalta puolelta oikealle. Vastaavasti vasemman käden yrityksissä oikealta vasemmalle.

Tutkija kehottaa tutkittavaa tekemään tehtävän mahdollisimman nopeasti ja pyytää toimimaan nopeammin, mikäli tarpeen. Puikot täytyy laittaa lautaan tarkassa järjestyksessä ja oikeaan suuntaan. Usein saattaa olla tarpeen osoittaa uuden rivin ensimmäinen reikä, erityisesti ei-hallitsevaa kättä testatessa. Tutkittavan tulee nostaa yksi puikko kerrallaan ja välittömästi huomauttaa, mikäli useampi kuin yksi nostetaan.

Ainoastaan yhden käden käyttö on sallittu. Tutkittava saattaa toisinaan yrittää käyttää toista kättä apunaan kääntää puikkoa. Tällöin kehoitus pitää toista kättä sylissä tai tarvittaessa tutkija pitää tutkittavan kädestä kiinni. Tarvittaessa lauta voi pitää paikallaan tutkittavaa varten. Vaikeiden motoristen häiriöiden tapauksessa tutkittavan tulee kokeilla tehtävää ja näin varmistua, että puikkojen asettaminen reikiin on mahdollista. Kaikki tekijät, jotka voivat vaikuttaa tutkittavan suoritukseen tulee kirjata ylös, mm. kipeä sormi, laastari ym.

Mikäli joku puikoista tippuu lattialle tai pöydälle, tutkittavan ei tule nostaa sitä ylös vaan jatkaa tehtävän toteutus normaalisti. Puikkoja on astiassa enemmän kuin reikiä on reikälaudassa.