



MIGREENIPOTILAAN TUNNISTAMINEN KASVOJEN LÄMPÖSÄTEILYN KUVANTAMISEN AVULLA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Laskennallinen tekniikka, Kandidaatintyö

2024

Elina Hyttinen

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Erik Vartiainen

Tiivistelmä

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Engineering Science

Laskennallinen tekniikka

Elina Hyttinen

Migreenipotilaan tunnistaminen kasvojen lämpösäteilyn kuvantamisen avulla

Kandidaatintyö

2024

22 sivua ja 5 kuvaa

Tarkastajat: Tutkijaopettaja Erik Vartiainen

Avainsanat: migreeni, lämpösäteily, emissio, Planckin vakio, Pennesin yhtälö

Tässä kandidaatin työssä tutkittiin migreenipotilaiden kasvojen pintaverenkiertoa lämpökamerakuvantamisen avulla. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voidaanko lämpökamerakuvista havaittavaa verenkierron epäsymmetriaa hyödyntää migreenipotilaiden tunnistamisessa.

Työssä kuvattiin migreenipotilaan ja terveen henkilön kasvot infrapunalämpökameralla, jonka avulla saatiin tarkat lämpökuvat kasvojen pintalämpötiloista. Kuvia analysoitiin Matlab-ohjelmistolla, jossa värikuvat muunnettiin lämpötilakuviksi pikseleiden avulla. Analysointi keskittyi vain kasvojen alaosaan. Lämpötilakuvien avulla saatiin selville kasvojen, maksimi-, minimi- ja keskilämpötilat. Pikseleiden avulla voitiin laskea anisotropia indeksejä, jotka kertovat verenkierron symmetriasta.

Tulokset osoittivat, että migreenipotilailla kasvojen lämpötilajakauma oli epäsymmetrinen, erityisesti kasvojen alaosassa. Lämpökamerakuvaus osoittautui lupaavaksi menetelmäksi migreenin tunnistamisessa.

Kiitokset

Haluan kiittää ohjaajaani, Erik Vartiaista, arvokkaasta ohjauksesta sekä kärsivällisyydestä tämän kandidaatintyön aikana. Hänen ohjeensa olivat korvaamattomia työn etenemisessä. Kiitän myös perhettäni ja ystäviäni tuesta ja kannustuksesta opintojeni aikana.

Symboli- ja lyhenneluettelo

BPI	Blood Perfusion Imaging
FIT	Frontal Infrared Thermography
FPA	Focal Plane Array

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Kiitokset	
Symboli- ja lyhenneluettelo	
Sisällysluettelo	5
Kuva- ja taulukkoluetelot (valinnainen)	6
1 Johdanto	7
1.1 Tausta	7
1.2 Miten migreeni kohtaus syntyy	7
1.3 Aiemmat tutkimukset	8
1.4 Työn tavoitteet ja rajaus	9
2 Lämpösäteilyn teoria	10
2.1 Mustan kappaleen säteily	10
2.1.1 Planckin laki	10
2.1.2 Wienin siirtymälaki	11
2.1.3 Stefanin-Boltzmannin laki	11
3 Lämmön siirtyminen kasvojen pintaverenkierrossa	13
3.1 Pennesin yhtälö	13
3.2 Kasvojen pintaverenkierto	14
4 Aineistot ja ohjelmistot	15
5 Lämpökamera kuvien analysointi	16
5.1 Lämpökamera kuvat	16
5.2 Kuvien analysointi	17
5.3 Kuvien analysoinnin tulokset	19
6 Yhteenveto	21
Lähdeluettelo	22

Kuvaluettelo

- 1 Mustan kappaleen aallonpituusjakauman kuvaaja
- 2 Migreenipotilaan kasvokuva ennen kuvan käsittelyä
- 3 Terveen ihmisen kasvokuva ennen kuvan käsittelyä
- 4 Migreeni potilaan analysoitava alue kasvoista
- 5 Terveen henkilön analysoitava alue kasvoista

Taulukkoluetelo

- 1 Lämpötilat ja anisotropia indeksit

1 Johdanto

1.1 Tausta

Migreeni on neurologinen sairaus, joka aiheuttaa voimakkaita päänsärkyjä, pahoinvointia, herkkyyttä valolle ja äänelle sekä muita neurologisia oireita. Migreeniä voi esiintyä eri muodoissa ja vaikeusasteissa, ja sen diagnoosi perustuu pääasiassa potilaan subjektiiviseen kertomukseen sekä klinisiin oireisiin. Tämä aiheuttaa haasteita migreenin diagnoosin tekemiselle, koska oireet voivat vaihdella suurestikin eri henkilöiden välillä. (Atula, 2024)

Viime vuosina on herännyt kiinnostusta uusien diagnostisten menetelmien kehittämiseen migreenipotilaiden tunnistamiseksi. Yksi uusista menetelmistä on lämpökameran käyttö ihmisten kasvojen verisuonten kuvantamisessa. Lämpökameran avulla voidaan havaita kehon lämpötilan jakautuminen sekä tarkastella verenkierron muutoksia lämpötilan avulla.

Tämä tutkimus voi avata uusia näkökulmia migreenin diagnosointiin sekä edistää lämpökameran käyttöä lääketieteellisissä sovelluksissa yleisesti. Lisäksi se voi tarjota perustan tuleville tutkimuksille, jotka lisäävät ymmärrystä migreenin ilmentymisestä.

1.2 Miten migreeni kohtaus syntyy

Aiempien teorioiden mukaan migreenikohtaus ja -kipu syntyvät mahdollisesti aivojen verenkierron muutoksista. Uusimpien tutkimusten mukaan taas muutokset verenkierrossa ja verisuonissa eivät laukaise kipua vaan voivat lisätä sitä. (Encyclopedia, ei julkaisupäivää)

Yhden migreenikiputeorian mukaan migreenikohtaus syntyy, kun aivojen hermosolut alkavat toimia poikkeuksellisen aktiivisesti. Tämän aivojen ylivilkkauksen voi laukaista kemikaaliset yhdisteet ja hormonit, kuten serotoniin vapautuminen. Serotoniini vaikuttaa verisuoniin, aiheuttaen niiden supistumista, mikä voi lisätä kipua. (Encyclopedia, ei julkaisupäivää)

Migreenin tarkkaa syntymekanismia ei täysin tunneta, mutta toisen teorian mukaan se alkaa aivorungon sähkökemiallisella aktivaatiolla, jonka voivat laukaista esimerkiksi kirkas valo tai stressi. Kolmoishermosto, joka säätelee pään tuntoa ja verenkiertoa, on keskeinen migreenissä. Sen hermopäätteiden aktivoituminen välittää kipusignaaleja aivoihin ja aiheuttaa ve-

risuonten laajenemista. Tämä johtaa migreenille tyypilliseen sykkivään kipuun, kun herkistyneet kipureseptorit reagoivat valtimoiden pulssiaaltoon. Kohtaukset voivat vaihdella syyn mukaan, mutta migreenin jälkeen aivorunko palautuu normaaliksi ilman pysyviä vaurioita. (Migreeni, ei julkaisupäivää)

Naisilla migreeni liittyy usein hormonitasojen, kuten estrogeenin, vaihteluihin. Tämä myös voi selittää miksi migreeni on yleisempää naisilla kuin miehillä. Estrogeenitasojen heilahtelut voivat joko herkistää päänahan tai kasvojen hermoja kivulle. Nämä muutokset aiheuttavat usein sykkivää kipua. (Encyclopedia, ei julkaisupäivää)

1.3 Aiemmat tutkimukset

Aiemmin migreenin tunnistamista epätasaisen verenkierron avulla on tutkittu Suomessa Itä-Suomen yliopistossa, Kuopiossa. Tutkimuksessa käytettiin tutkimusta varten kehitettyä BPI-menetelmää (Blood Perfusion Imaging). Tutkimuksessa havaittiin merkittävää epäsymmetriaa verenkierron pulsaatioamplitudissa ja ajallisissa ominaisuuksista verrattuna terveisiin henkilöihin. Tulokset viittaavat siihen, että migreenipotilaiden verisuonten perfuusio poikkeaa normaalista, terveen henkilön verisuonten perfuusiosta. Vahvin korrelaatio löytyi päänsäryn puolen ja veren perfuusioaallon suunnan välillä. Migreenipotilailla, joilla oli oikeanpuoleinen päänsärky, veri kulki ensin kasvojen oikealle puolelle ja sitten vasemmalle, ja päinvastoin vasemmanpuoleisessa päänsäryssä. (Zaproudina et al., 2013)

Kroonisen migreenin tunnistamista on tutkittu aiemmin myös lämpökameran avulla. Tutkimus keskittyy otsan infrapunalämpökuvaukseen (Frontal Infrared Thermography, FIT) terveillä ja kroonista migreeniä sairastavilla henkilöillä. Tutkimuksen päätavoitteena on arvioida FIT tekniikan toistettavuutta eli luotettavuutta toistuvissa mittauksissa. Lisäksi tutkimuksen avulla pyritään ymmärtämään FIT-parametreja, kuten lämpötilaeron (Side Difference) ja asymmetriaindeksin käyttökelpoisuutta migreenin diagnosoinnissa. Tutkimuksessa kuvattiin koehenkilöitä kahtena eri päivinä luotettavempien tulosten saamiseksi. Tutkimuksen tulokset osoittivat, että FIT-mittaukset ovat luotettavia erottamaan migreeni potilaat terveistä sekä mittauksien avulla voidaan paikantaa migreenipotilaiden kasvojen kivun puoli. FIT-mittaukset noudattivat myös toistettavuutta eli tulokset ovat luotettavia. (Antonaci et al., 2019)

1.4 Työn tavoitteet ja rajaus

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tutkia lämpökameran hyödyntämistä migreenipotilaiden tunnistamisessa. Erityisesti keskittymällä kasvojen lämpökuvien analysointiin, jotta voimme havaita mahdollisia eroja migreenipotilaiden verisuonten anisotrooppisuudessa verrattuna terveisiin verrokkiryhmiin. Migreenipotilaiden verisuonten anisotrooppisuuden arvioiminen voisi helpottaa migreenitutkimuksia jatkossa.

Tutkimuksessa kuvataan kahta koehenkilötä InfraTec-lämpökameralla, joista toisella on todettuna migreeni. Henkilöistä otetaan kuvia eri kuvakulmista, jonka jälkeen kuvia analysoidaan Matlabin avulla. Työssä keskitytään pelkästään eri lämpötila-alueiden erotteluun kuvista ja vertailemalla kuvia verrokki ryhmien välillä.

2 Lämpösäteilyn teoria

Lämpösäteilyllä tarkoitetaan säteilyä, joka johtuu aineessa olevien varattujen hiukkasten lämpöliikkeestä. Lämpösäteilyä lähettävät kaikki aineet, joiden lämpötila on suurempi kuin absoluuttinen nollapiste. Lämpötilan kasvaessa myös lämpösäteily lisääntyy (Tapio, 2015).

2.1 Mustan kappaleen säteily

Mustaksi kappaleeksi kutsutaan kappaletta, joka absorboi kaiken itseensä kohdistuvan säteilyn kaikilla aallonpituuksilla. Nimitys mustalle kappaleelle tulee Kirchhoffin laista (Gustav Robert Kirchhoff, 1824-1887), jonka mukaan kappale, joka absorboi kaiken itseensä kohdistuvan säteilyn niin pystyy myös lähettämään säteilyä. Mustan kappaleen säteilyä voidaan kuvata kolmella lausekkeella: Planckin laki, Wienin siirtymälaki, Stefan-Boltzmannin laki (Infradex, 2003).

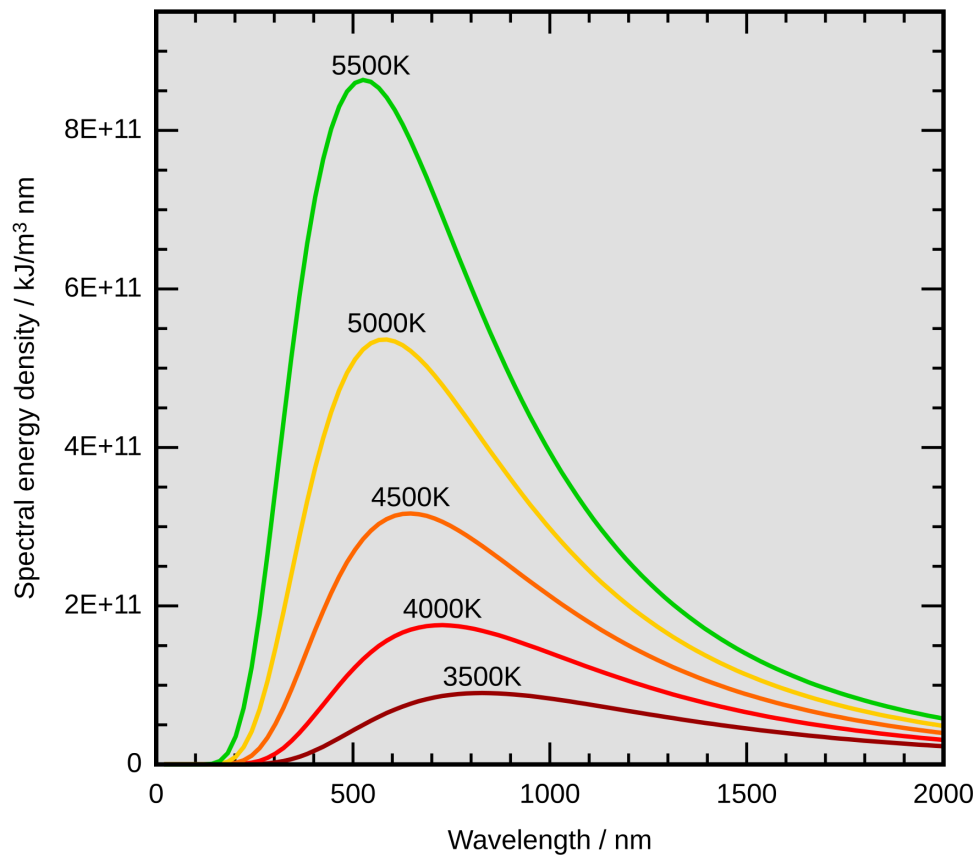
2.1.1 Planckin laki

Max Planckin (1858-1947) mukaan mustan kappaleen säteilyä voidaan kuvata kaavalla:

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \times 10^{-6} [\text{W}/\text{m}^2 \mu\text{m}], \quad (1)$$

missä $W_{\lambda b}$ kuvaa mustan kappaleen säteilytehoa aallonpituudella λ , $c = 3 \times 10^8$ m/s (valon nopeus), $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J/K, T = mustan kappaleen absoluuttinen lämpötila (K) ja λ kuvaa aallonpituutta (μm)

Planckin laki kuvaa siis mustan kappaleen säteilyenergian jakautumista eri aallonpituuksilla eri lämpötiloissa (Infradex, 2003).



Kuva 1: Mustan kappaleen säteilyn aallonpituusjakauma eri lämpötiloissa. (Wikipedia, 2024)

2.1.2 Wienin siirtymälaki

Wienin siirtymälaki kertoo lämpötilan ja mustan kappaleen säteilyn aallonpituuden maksimiarvon välisen suhteen (Wikipedia, 2024). Wienin lakia voidaan esittää kaavalla:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, \quad (2)$$

missä λ_{max} kuvaa säteilyn spektrin huippua, $b = 0.002898$ mK luonnonvakioita ja T on kappaleen lämpötila kelvineinä.

Wienin laki on osa Planckin säteilyteoriaa.

2.1.3 Stefanin-Boltzmannin laki

Stefan-Boltzmannin laki (Josef Stefan, 1835-1893, ja Ludwig Boltzmann, 1844-1906), kuvaa mustan kappaleen kokonaissäteilytehon riippuvuutta absoluuttisesta lämpötilasta. Mitä korkeampi lämpötila on, sitä enemmän musta kappale säteilee energiaa. Säteilyteho kasvaa

absoluuttisen lämpötilan neljänteen potenssiin. Stefan-Boltzmannin kaava saadaan integroimalla Planckin kaavaa arvosta $\lambda = 0$ arvoon $\lambda = \infty$. (Infradex, 2003) Kokonaissäteilytehoa kuvataan kaavalla:

$$W_b = \sigma T^4, \quad (3)$$

Kaavassa σ on verrannollisuuskerroin (Stefanin-Boltzmannin vakio) $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5,670374419 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$, missä k on Boltzmannin vakio, c valonnopeus ja h Planckin vakio.

3 Lämmön siirtyminen kasvojen pintaverenkierrossa

Kasvojen infrapunakuvat perustuvat kasvojen lämpötila eroihin, mitkä riippuvat verisuonten jakautumisesta ja veren perfuusionopeudesta. Kumpikin on ihmisen biologisia ominaisuuksia, mihin ei vaikuta ympäristö (Xie & Liu, 2014).

3.1 Pennesin yhtälö

Pennesin yhtälö kuvaa lämmönsiirtymistä biokudoksen ja sen ympäristön välillä. Teoriansa biolämmön siirrolla tarkoitetaan lämmön ja aineen johtumista kudoksissa sekä aineen ja energian vaihtumista sen ympäristön kanssa. Tätä lämmönsiirtoa voidaan kuvata Pennesin yhtälöllä (Xie & Liu, 2014) :

$$\rho c_b \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + W_b C_b (T_a - T) + q_m + q_r, \quad (4)$$

missä ρ on kudosten tiheys, c kudosten ominaislämpökapasiteetti, k kudosten lämmönjohtavuuskerroin, W_b veren perfuusio nopeus, C_b veren ominaislämpö, T olennon lämpötila, T_a valtimoveren lämpötila, q_m lämmön veren perfuusionopeus ja q_r ympäristön lämmönsiirron perfuusionopeus.

Kasvojen lämpökenttä on kaksiulotteinen, kun taas Pennesin yhtälö, joka kuvaa lämmönjohtoa kudoksissa, on kolmiulotteinen ja symmetrinen. Jotta Pennesin yhtälöä voidaan soveltaa kasvojen lämpökenttään ja kuvantamiseen, täytyy yhtälö muuttua kolmiulotteisesta kaksiulotteiseksi. (Xie & Liu, 2014)

Kaksi ulotteisessa termisessä tasapainossa lämpötila ei muutu ajan suhteen, eli sen osittaisderivaatta ajan suhteen on nolla. Kasvoilla ei myöskään ole ulkoista lämmönlähdettä, jonka vuoksi lämpövirtaa ilmaiseva termi q on nolla. Alkuperäinen kolmiulotteinen Pennesin yhtälö voidaan muuntaa muotoon:

$$K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + W_b C_b (T_a - T) + q_m = 0 \quad (5)$$

3.2 Kasvojen pintaverenkierto

Kasvojen verenkiertoa hallitsee ensisijaisesti kasvojen valtimo, joka haarautuu kaulavaltimosta. Ihmisellä on kummallakin puolella kasvoja yksi valtimo. Kasvovaltimo kuljettaa verta myös pintaverenkiertoon eli suuhun, leukaan, poskiin, huuliin ja nenään. Valtimo alkaa niskan sivuilta ja kulkee vinosti posken läpi. Kasvovaltimo loppuu silmien alle. (Clinic, 2023)

Kasvojen pinta verenkierron anisotropiaa voidaan kuvata anisotropia indeksin avulla. Anisotropia indeksi kuvastaa symmetriaa tai epäsymmetriaa. Pinta-alojen anisotropia indeksi voidaan laskea kaavalla:

$$A_s = |N_o - N_v| / \max(N_o, N_v), \quad (6)$$

missä N_o on pikseleiden lukumäärä oikealla, n_v pikseleiden lukumäärä vasemmalla.

4 Aineistot ja ohjelmistot

Tässä työssä käytettiin InfraTec ImageIR-lämpökameraa, joka on suunniteltu korkearesoluutioisiin infrapunalämpökuvauksiin. Kamera hyödyntää Focal Plane Array (FPA) -detektoria, joka mahdollistaa tarkan lämpötila mittauksen laajalla lämpötila-alueella. Kuvantamisessa käytettiin 25mm linssiä, joka mahdollisti kasvojen lämpökamerakuvien ottamisen sopivalta etäisyydeltä. (InfraTec, 2020, s. 11-12)

Kamerassa on sisäänrakennettu Stirling-jäähdytin, joka pitää toiminta lämpötilan vakiona. Tämä parantaa lämpötilamittausten tarkkuutta ja vähentää häiriöitä. Kameran tuottama data prosessoidaan reaaliajassa ja tulokset välitetään tietokoneelle Ethernet-kaapelin avulla. Kamerassa on myös sisäisenä ominaisuutena automatisoitu tarkennus ja epätasaisuuden poisto. (InfraTec, 2020, s.11, 18)

Datan käsittelyyn ja analysointiin käytettiin IRBIS- ohjelmistoa, joka mahdollistaa lämpökuvien visualisoinnin, tallentamisen ja lämpötilajakaumien analyysin. Lisäksi kuvia jatkokäsiteltiin Matlabin avulla. Lämpökuvista pystyttiin segmentoimaan alueita eri lämpötilojen mukaan.

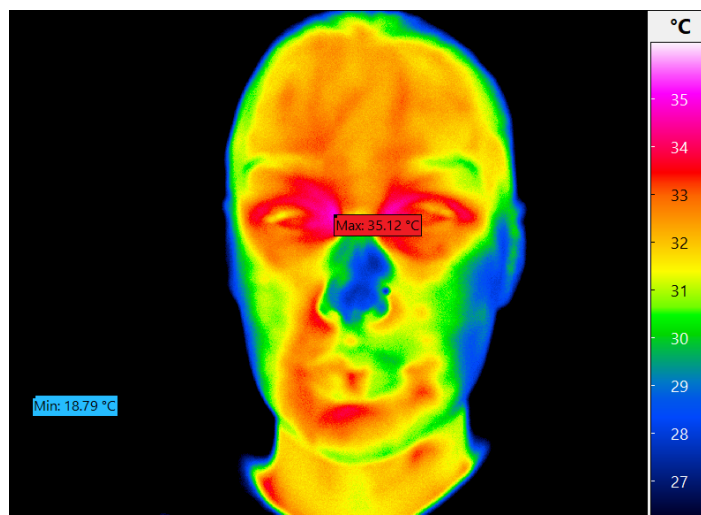
5 Lämpökamera kuvien analysointi

5.1 Lämpökamera kuvat

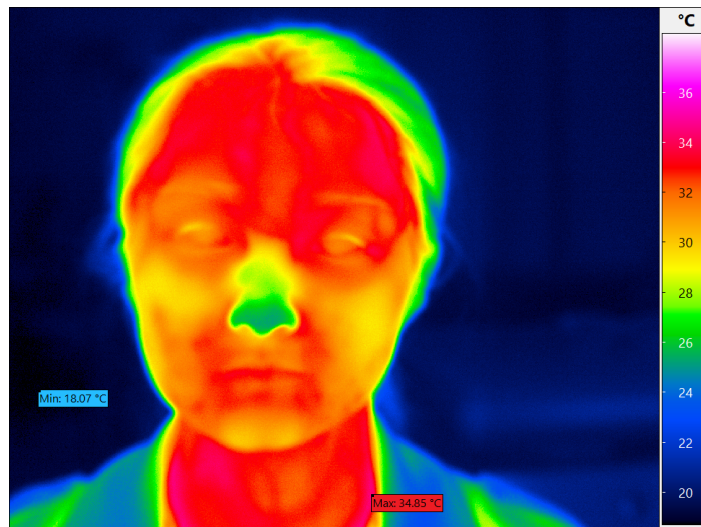
Saatuja lämpökamera kuvia analysoitiin Matlabin avulla. Kuvasta 1 huomataan, että suurimmat lämpötila erot oikean ja vasemman puoliskon välillä ovat kasvojen alaosassa. Erityisesti lämpötilaerot korostuvat leuan ja poskien alueella. Otsassa lämpötila erot puoliskojen välillä ovat huomattavasti pienempiä, mikä viittaa siihen, että lämpötilan epäsymmetria ei ole yhtä voimakasta kasvojen yläosan alueella.

Kuvassa 2 esitettynä terveen henkilön koko kasvokuva ennen Matlab-analyysiä. Tästä kuvasta nähdään, että terveen henkilön kasvoissa lämpötila on jakautunut symmetrisesti oikean ja vasemman puoliskon välillä. Lämpötilaeroja ei havaita merkittävässä määrin millään kasvojen alueella, mikä kertoo tasaisesta verenkierrosta kummallakin puolella kasvoja.

Näiden kuvien avulla jo voidaan päätellä, että migreenipotilaan kasvoilla esiintyvä lämpötilaanisotropia (epäsymmetriä) on selkeästi havaittavissa erityisesti kasvojen alaosassa, kun taas terveellä henkilöllä vastaavaa lämpötilojen epäsymmetriää ei ole.



Kuva 2: Migreenipotilaan lämpökamerakuva ennen kuvan käsittelyä.



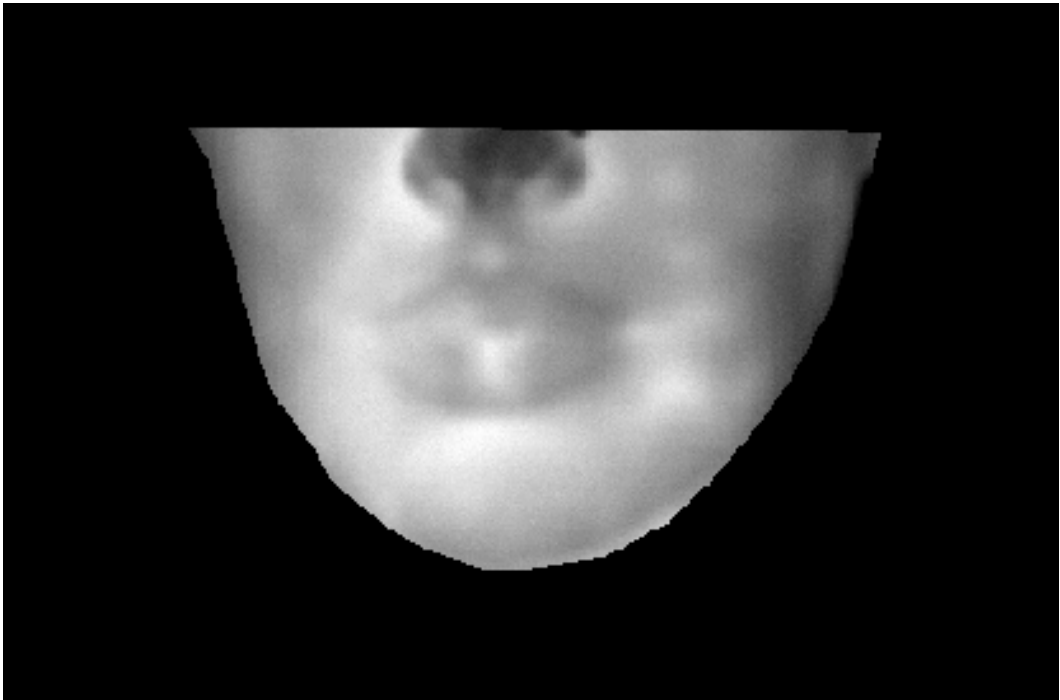
Kuva 3: Terveen henkilön lämpökamerakuva ennen kuvan käsittelyä.

5.2 Kuvien analysointi

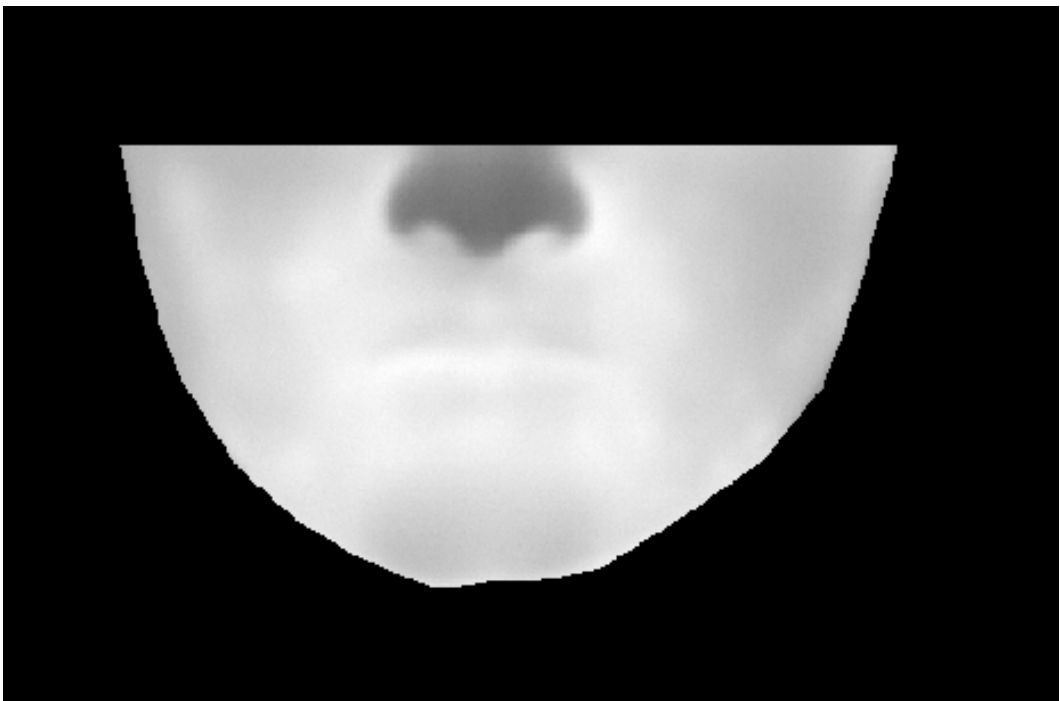
Kuvien analysointi aloitettiin jakamalla kasvat neljään osaan, jossa nenää käytettiin kasvojen keskikohtana. Kuvien analysointi keskittyy kasvojen alaosaan, koska siellä migreenipotilaan lämpötilaerot oikean ja vasemman puoliskon välillä ovat suurimmat. Alkuperäiset RGB-kuvat muunnettiin värikartan (colorbar) avulla lämpötilakuvaksi. Tällöin jokaiselle kuvan pikselille voitiin määrittää tarkka lämpötila, mikä mahdollisti lämpötilajakauman tutkimisen. Lämpötilakuvan avulla laskettiin kummankin puoliskon maksimi-, minimi- ja keskilämpötilat. Näitä arvoja vertailemalla voitiin määrittää kasvojen lämpötilaerojen suuruus oikean ja vasemman puoliskon välillä.

Pikseleiden avulla saatiin laskettua pinta-alojen anisotropia indeksejä. Indeksit laskettiin ainoastaan lämpimiltä alueilta, sillä näillä alueilla epäsymmetriä oli kaikkein selvimmin havaittavissa alkuperäisissä kuvissa.

Kuvissa 3 migreenipotilaan kuva analysoitavasta alueesta ja kuvassa 4 terveen henkilön.



Kuva 4: Migreeni potilaan analysoitava alue kasvoista.



Kuva 5: Terveen henkilön analysoitava alue kasvoista.

5.3 Kuvien analysoinnin tulokset

Tutkimuksessa havaittiin selkeitä eroja migreeni potilaan oikean ja vasemman puoliskon lämpötiloissa. Oikean puoliskon keskilämpötila oli $32,73^{\circ}\text{C}$ ja maksimilämpötila $34,02^{\circ}\text{C}$, kun taas vasemman puoliskon keskilämpötila oli $31,84^{\circ}\text{C}$ ja maksimilämpötila $33,98^{\circ}\text{C}$. Saatujen tulosten perusteella oikean ja vasemman puoliskon keskilämpötiloissa oli lähes yhden asteen ero, mikä viittaa mahdolliseen verenkierron anisotropiaan. Tämä havainto tukee aiempaa tietoa siitä, että migreenikohtaukset voivat aiheuttaa paikallisia verenkierto- ja lämpötilavaihteluita, erityisesti kohtauksen aktiivisella puolella. Maksimilämpötilojen pienempi ero ($0,04^{\circ}\text{C}$) viittaa siihen, että korkein lämpötila säilyy molemmilla puolilla samankaltaisella tasolla.

Terveen henkilön vasemman ja oikean puoliskon lämpötiloissa havaittiin vain pieniä eroja. Vasemman puoliskon keskilämpötila oli $32,44^{\circ}\text{C}$ ja oikean puoliskon keskilämpötila hieinan matalampi $32,16^{\circ}\text{C}$. Korkeimmat lämpötilat olivat oikealla $34,62^{\circ}\text{C}$ ja vasemmalla $34,59^{\circ}\text{C}$. Näiden tulosten perusteella keskilämpötilojen ero oli vain $0,28^{\circ}\text{C}$, mikä viittaa pieneen luonnolliseen epäsymmetriaan. Korkeimpien lämpötilojen ero oli vieläkin pienempi, vain $0,03^{\circ}\text{C}$. Pieni ero lämpötiloissa on luonnollista, mikä liittyy yksilöllisiin eroihin kehossa.

Migreenipotilaalla lämpimien alueiden ($T > 33^{\circ}\text{C}$) pikselien lukumäärä oikealla puoliskolla oli 9708, kun taas vasemmalla puoliskolla vastaava arvo oli huomattavasti pienempi, 4505. Näiden lukujen selkeä ero korostaa lämpötilajakauman epäsymmetriaa. Lukujen avulla laskettiin anisotropia indeksi, jonka arvo oli 0,54. Indeksillä kuvaa suhteellista suuruutta puolisko-kojen välillä ja osoittaa, että lämpötilan epäsymmetria puolisko-kojen välillä on huomattava.

Terveellä henkilöllä lämpimien alueiden pinta-ala erot ovat hyvin pienet. Lämpimien alueiden pikselimäärä oikealla oli 10 377, kun taas vasemmalla puoliskolla vastaava arvo oli 10 954 pikseliä. Nämä luvut osoittavat, että lämpötilajakauma lämpimien alueiden suhteen on erittäin tasaista, sillä ero pikselimäärissä on suhteellisen pieni.

Laskettu anisotropia-indeksi oli 0,05, mikä viittaa vähäiseen epäsymmetriaan. Indeksillä arvo on lähempänä nollaa, mikä kertoo lämpötilan jakautuvan lähes symmetrisesti kasvojen oikean ja vasemman puoliskon välillä. Tämä tulos tukee käsitystä siitä, että terveiden henkilöiden kasvojen lämpötila jakautuu tasaisesti. Taulukossa 1 esitettyinä saadut tulokset taulukko muodossa.

Taulukko 1: Lämpötilat ja anisotropia indeksit

	Puolisko	Keskilämpötila (°C)	Maksimilämpötila (°C)	Lämpimien alueiden pikselit	Anisotropia indeksi
Migreenipotilas	Oikea	32,73	34,02	9708	0,54
	Vasen	31,84	33,98	4505	
Terve henkilö	Oikea	32,16	34,62	10377	0,05
	Vasen	32,44	34,59	10954	

6 Yhteenveto

Tässä kandidaatin työssä tutustuttiin lämpökameran käyttöön ja tutkittiin migreeni potilaan tunnistamista lämpökamera kuvantamisen avulla. Lämpökamerakuvaus tarjoaa mahdollisuuden tarkastella kasvojen pintaverenkierron alueellisia vaihteluita, jotka voivat olla hyödyllisiä migreenipotilaiden erottelussa terveistä henkilöistä. Lämpökamerakuvia analysoitiin muuntamalla värikuvat lämpötilakuviksi, joiden perusteella mitattiin ja vertailtiin kasvojen oikean ja vasemman puoliskon keskilämpötiloja sekä korkeimpia lämpötiloja.

Tuloksista ilmeni, että migreenipotilailla pään oikean ja vasemman puoliskon lämpötiloissa oli huomattavampi ero kuin terveillä henkilöillä. Migreenipotilaan oikean puoliskon keskilämpötila oli $32,73^{\circ}\text{C}$ ja vasemman puoliskon $^{\circ}\text{C}$, mikä tarkoittaa lähes yhden asteen eroa. Korkeimmat lämpötilat olivat oikealla $34,02^{\circ}\text{C}$ ja vasemmalla $33,98^{\circ}\text{C}$. Terveellä henkilöllä vastaavat keskilämpötilat olivat $32,44^{\circ}\text{C}$ vasemmalla ja $32,16^{\circ}\text{C}$ oikealla, mikä osoitti vain $0,28^{\circ}\text{C}$ eron. Korkeimmat lämpötilat olivat lähes samat kummallakin puolella, oikealla $34,62^{\circ}\text{C}$ ja vasemmalla $34,58^{\circ}\text{C}$. Näiden havaintojen perusteella migreenipotilailla lämpötilaerot kasvojen eri puolilla ovat merkittävämpiä kuin terveillä henkilöillä.

Anisotrooppisuus indeksi vahvisti teoriaa, että migreenipotilaiden lämpötilajakauma kasvojen puoliskojen välillä on epäsymmetrinen, tässä tapauksessa erityisesti lämpimien alueiden osalta. Saatu anisotropia indeksi oli 0,54, mikä kertoo selkeästi epäsymmetriasta lämpötilan jakautumisesta johtuen epätasaisesta verenkierrosta.

Terveellä henkilöllä vastaavat mittaukset osoittivat tasaisempaa lämpötilan ja verenkierron jakautumista. Laskettu anisotropia indeksi oli 0,05, mikä vahvistaa verenkierron lähen symmetrisen jakautumisen.

Tulokset viittavat siihen, että migreenipotilaan kasvojen alueen verenkierron epäsymmetria voi olla migreenin tunnistamisessa hyödyllinen piirre. Tämä epäsymmetriä saattaa liittyä migreenin aiheuttamiin muutoksiin verenkierron säätelyssä tai hermoston toiminnassa. Lämpökamerakuvaus osottautui lupaavaksi työkaluksi migreenipotilaiden tunnistamisessa, ja sen käyttöä voisi tulevaisuudessa laajentaa lääketieteeseen. Jatkotutkimuksissa olisi hyödyllistä tarkastella suurempaa otoskokoa sekä selvittää tarkemmin migreenin eri vaiheiden vaikutuksia lämpötilajakaumaan.

Lähdeluettelo

- Antonaci, F., Rossi, E., Christina Voiticovschi-Iosob, G. D. V. & Marceglia, Sara (2019). Frontal infrared thermography in healthy individuals and chronic migraine patients: Reliability of the method. *Cephalalgia*. DOI: 10.1177/0333102418788341.
- Atula, S. (2024). *Migreeni*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 2024-03-06]. URL: <https://www.terveyskirjasto.fi/dlk00047>.
- Clinic, C. (2023). *Facial Artery*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 2024-10-09]. URL: <https://my.clevelandclinic.org/health/body/24988-facial-artery>.
- Encyclopedia, H. (ei julkaisupäivää). *How a Migraine Happens*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 2024-10-09]. URL: <https://www.urmc.rochester.edu/encyclopedia/content.aspx?contenttypeid=85&contentid=P00787>.
- Infradex (2003). *Lämpökuvauksen teoria*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 2024-03-06]. URL: <https://www.infradex.com/wp-content/uploads/2016/08/teoria.pdf>.
- InfraTec (2020). *R Infrared-Thermographic Camera ImageIR*. InfraTec GmbH. Dresden, Saksa.
- Migreeni (ei julkaisupäivää). *Migreenikohtaus*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 2024-10-09]. URL: <https://migreeni.org/tietoa/migreeni/migreenikohtaus/>.
- Tapio, T. (2015). Väri- ja lämpökuvaukseen perustuva kaksiväripyrometria polttotekniikan sovelluksissa. Diplomityö. Tampere, Suomi: Tampereen teknillinen yliopisto. URL: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/22977/tapio.pdf>.
- Wikipedia (2024). *Wienin siirtymälaki*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 2024-03-07]. URL: https://fi.wikipedia.org/wiki/Wienin_siirtym%C3%A4laki.
- Xie, Z. & Liu, G. (2014). Blood perfusion construction for infrared face recognition based on bio-heat transfer. *Bio-Medical Materials and Engineering*, s. 2733–2742. DOI: 10.3233/BME-141091.
- Zaproudina, N., Teplov, V., Nippolainen, E., Lipponen, J. A., Kamshilin, A. A., Närhi, M., Karjalainen, P. A. & Giniatullin, R. (2013). Asynchronicity of Facial Blood Perfusion in Migraine. *PLoS One*. DOI: 10.1371/journal.pone.0080189.