

Eko Hakala

# LÄMPÖKAMERAN KÄYTTÖ TERVEYDENHUOLLON SOVELLUKSISSA

Kandidaatintyö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Mikko Peltokangas  
Tomppa Pakarinen  
Toukokuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Eko Hakala: Lämpökameran käyttö terveydenhuollon sovelluksissa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tieto- ja sähkötekniikan TkK-tutkinto-ohjelma, Sähkötekniikka  
Toukokuu 2020

---

Lämpökamera on laite, joka muodostaa kuvan kohteen emittoiman infrapunasäteilyn perusteella, mahdollistaen pintalämpötilan mittaamisen. Lämpökameran käyttökohteet vaihtelevat laajasti terveydenhuollossa, sotilaskäytössä sekä rakennus- ja konetekniikan sovelluksissa. Tässä työssä perehdytään lämpökameran käyttöön lääketieteessä.

Kirjallisuusselvityksenä toteutetussa työssä tutkitaan lämpökameran nykyisiä käyttökohteita terveydenhuollossa sekä esitellään potentiaalisia käyttökohteita, joissa lämpökameraa voitaisiin hyödyntää tulevaisuudessa. Lisäksi työssä esitellään terveydenhuollossa käytettävä mittausjärjestelmä sekä yleisimmät käytössä olevat lämpökameran ilmaisintyytit. Työn aineistona käytetään pääosin vertaisarvioituja tieteellisiä artikkeleita ja kirjoja, joiden lisäksi hyödynnetään suurelle yleisölle suunnattuja julkaisuja käytännön esimerkkejä esiteltäessä.

Työssä selviää, että lämpökameran suurimmat edut verrattuna muihin terveydenhuollossa käytettäviin kuvantamismenetelmiin ovat sen potentiaali havaita sairauksia aikaisessa vaiheessa, turvallisuus, potilaaseen koskemattomuus sekä kameran pieni hankinta- ja käyttökustannus. Lisäksi kameran pienen koon takia lämpökamerakuvantamista voidaan käyttää joustavasti eri paikoissa tai eri kuvakulmista kuvaa otettaessa. Suurimmat menetelmää rajoittavat tekijät ovat tutkimukseen liittyvien standardien vähäisyys tai täydellinen puuttuminen sekä kameran resoluutio, mitkä vaikuttavat tutkimusten toistettavuuteen.

Terveydenhuollossa lämpökameraa käytetään verenkierron, ihosairauksien, lihasten ja sisäelinten tutkimuksissa sekä hammashoidossa ja kuumeseulonnassa. Tutkituin käyttökohde on rintasyövän havaitseminen. Tutkimukset osoittavat, että potentiaalisia käyttökohteita tulevaisuudessa ovat uupumuksen ja kivun havaitsemiseen liittyvät sovellukset. Lämpökameroiden kehittyessä on mahdollista, että lämpökamerakuvantamisen tarkkuus kasvaa tulevaisuudessa. Lisäksi koneoppimisen hyödyntäminen lämpökamerakuvien analysoimisessa voi parantaa tutkimusten tarkkuutta.

Avainsanat: lämpökamera, terveydenhuolto, rintasyöpä, diabetes, kuumeseulonta

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	LÄMPÖKAMERA .....	3
2.1	Lämpökameran rakenne ja toiminta .....	5
2.2	Jäähdytetyt lämpökamerat .....	6
2.3	Jäähdyttämättömät lämpökamerat .....	7
3.	LÄMPÖKAMERAKUVANTAMINEN TERVEYDENHUOLLOSSA .....	9
3.1	Menetelmän edut .....	10
3.2	Menetelmää rajoittavat tekijät .....	11
4.	NYKYISET KÄYTTÖKOHTEET .....	13
4.1	Rintasyöpä .....	13
4.2	Jalkapohjien diabeettiset muutokset .....	15
4.3	Kuumeseulonta .....	16
4.4	Kuivasilmäisyys .....	18
5.	LÄMPÖKAMERAKUVANTAMISEN TULEVAISUUDENNÄKYMÄÄ .....	20
5.1	Säännöllisen liikunnan aiheuttama uupumus .....	20
5.2	Kivun havaitseminen .....	21
5.3	Alaraajojen tukkiva valtimotauti .....	22
6.	YHTEENVETO .....	24
	LÄHTEET .....	26

# 1. JOHDANTO

Lämpötilan on havaittu liittyvän ihmisen terveyteen jo vuosisatojen ajan. 1800-luvulla kehitetty lämpömittari oli ensimmäinen iso askel lämpötilan mittaamiseen terveydenhuoltosovelluksissa. [1] Samalla vuosisadalla löydetty infrapunasäteily [2] ja sen avulla saatu ensimmäinen lämpökamerakuva saivat infrapunasäteilyyn perustuvan kuvantamisen syntymään. Nykyaikaisen terveydenhuollossa käytetyn lämpökamerakuvantamisen perustana on Hardyn tutkimus vuodelta 1934 [3], jonka mukaan ihmisen ihon ajatellaan muistuttavan emissiivisyydeltään mustaa kappaletta. Tämän perusteella neutraalissa mittausympäristössä ihmisen ihon emittoima lämpösäteily riippuu pääasiassa sen sisäisestä lämpötilasta.

Lämpökamerat suunniteltiin alun perin sotilaskäyttöön, mutta vuonna 1960 ne otettiin käyttöön myös lääketieteellisiin tarkoituksiin. Ensimmäiset kamerat olivat kuitenkin heikkolaatuisia ja kärsivät suuresta kohinan määrästä [4]. Yksi ensimmäisistä, ja edelleen tutkituin käyttökohde, oli rintasyövän diagnosoiminen [5]. 1970-luvulla kehitettiin jäähdyttämättömät mikrobolometrikamerat, jotka saatiin yleiseen käyttöön 1990-luvun alussa [6]. Niiden nopea kehittyminen 2000-luvulla on nostanut lämpökamerakuvantamisen suosiota niiden halvan hinnan ja saatavuuden ansiosta. Hinnat vaihtelevat muutamista sadoista euroista yli 100 000 euroon [7]. Viime vuosina markkinoille on tullut myös älypuhelimia, joissa on integroitu lämpökamera avaten uusia käyttökohteita [8].

Tämän kirjallisuusselvityksenä toteutettavan kandidaatintyön tarkoituksena on selvittää lämpökameran nykyisiä käyttökohteita terveydenhuollossa, sekä tutkia potentiaalisia uusia käyttökohteita. Lisäksi työssä pyritään tunnistamaan lämpökamerakuvantamisen tärkeimpiä etuja ja sitä rajoittavia tekijöitä. Työn toisessa luvussa esitetään yleistä tietoa lämpökamerasta ja sen toimintaperiaatteesta, sekä vertaillaan jäähdytettyjen ja jäähdyttämättömien lämpökameran ilmaisimien ominaisuuksia. Kolmannessa luvussa käsitellään tyypillistä terveydenhuollossa käytettyä mittausjärjestelyä, sekä asioita, joita tulee ottaa huomioon tieteellistä lämpökamerakuvantamista tehtäessä. Lisäksi arvioidaan menetelmän terveydenhuoltosovelluksiin liittyviä etuja ja rajoitteita. Neljännessä luvussa esitetään yleisesti käytössä olevia terveydenhuollon sovelluksia lämpökameralle keskittyen kaikista eniten käytettyihin käyttökohteisiin. Viidennessä

luvussa puolestaan etsitään mahdollisia uusia käyttökohteita lämpökameralle perustuen uusiin tutkimustuloksiin alalla. Lopuksi työn keskeiset asiat kootaan yhteenvedossa.

## 2. LÄMPÖKAMERA

Kaikki absoluuttista nollapistettä lämpimämmät esineet emittoivat lämpösäteilyä. Lämpösäteily on infrapunasäteilyä eli näkyvää valoa suuremmista aallonpituuksista koostuvaa sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituudet ovat välillä 750 nm – 1 mm. Infrapunasäteilyä syntyy molekyylien rotaatio- tai vibraatiotilan muuttuessa, jolloin vapautuu energiaa fotonin muodossa. [9] Lämpökamera on laite, jolla kohteen lämpötilaa voidaan tutkia reaaliaikaisesti ja turvallisesti kohteen emittoiman infrapunasäteilyn perusteella. Laite muodostaa kuvan, jossa eri lämpöiset alueet näkyvät eri väreinä tai sävyinä. [10] Lämpökameroita käytetään muun muassa rakennus- ja konetekniikan sovelluksissa, sotilaskäytössä sekä terveydenhuollossa [4][11]. Tässä työssä käsitellään ainoastaan terveydenhuollossa käytettyjä sovelluksia.

Lämpökameran käyttö terveydenhuollossa perustuu ihon korkeaan emissiivisyyteen, jolloin se käyttäytyy lähes täydellisen mustan kappaleen tavoin. Ihon emissiivisyys on noin 98% mustan kappaleen emissiivisyydestä. [3] Täydellinen musta kappale on emissiivisyydeltään 1 ja absorboi kaiken ympäriltä tulevan lämpösäteilyn. Sen säteilevä spektri riippuu ainoastaan sen sisälämpötilasta. Mustan kappaleen emittoiman lämpötilariippuvaisen säteilyn jakaumaa kuvataan Planckin lailla

$$B(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}, \quad (1)$$

missä  $h$  on Plankin vakio  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J s,  $\nu$  on taajuus,  $c$  on valonnopeus  $c = 2,998 \cdot 10^8$   $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $k_B$  on Boltzmannin vakio  $k_B = 1,381 \cdot 10^{-23}$   $\frac{\text{J}}{\text{K}}$  ja  $T$  on absoluuttinen lämpötila. Planckin laista kaikkien taajuuksien ja avaruuskulman yli integroimalla saatavan Stefanin-Boltzmannin lain mukaan kappaleen säteilemä teho riippuu lämpötilasta kaavalla

$$E = \sigma \varepsilon T^4, \quad (2)$$

missä  $E$  on säteilyteho pinta-alaa kohti,  $\sigma = 5,673 \cdot 10^{-12}$   $\frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{K}^4}$  on Stefanin-Boltzmannin vakio,  $\varepsilon$  on kappaleen emissiivisyys ja  $T$  on kappaleen absoluuttinen lämpötila kelvineissä. Kappaleen emittoiman lämpösäteilyn aallonpituus, jossa lämpösäteilyn intensiteetti on suurimmillaan, saadaan Wienin siirtymälailalla

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad (3)$$

missä  $b$  on Wienin siirtymävakio  $b = 2,897 \cdot 10^{-3}$  m K ja  $T$  on lämpötila kelvineissä. [9] Koska iho ei kuitenkaan ole täydellinen musta kappale, täytyy sitä kuvattaessa ottaa huomioon esimerkiksi mittaushuoneen olosuhteet kuten lämpötila ja ilmankosteus tarkan tuloksen saamiseksi. Terveystieteiden sovelluksissa lämpökameraa käytetään etsimään lämpötilapoikkeamia kehosta, jotka voivat johtua esimerkiksi sairaudesta tai kasvaimesta [11].



***Kuva 1: Esimerkkejä lämpökameroista. Vasemmalla jäähyttämätön Fluke PT120 [12]. Oikealla jäähydytetty FLIR X8500sc MWIR [13].***

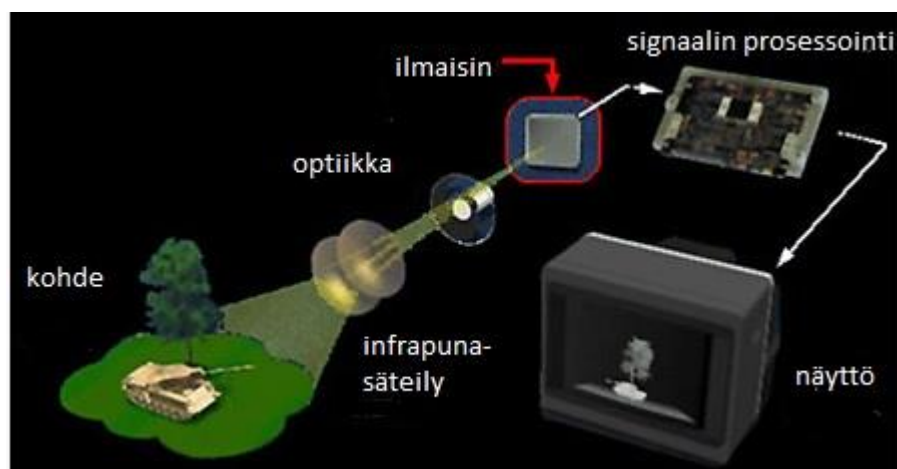
Ihmisen kehon emittoima lämpösäteily on aallonpituudeltaan tyypillisesti 3–20  $\mu\text{m}$  ja aallonpituuden huippu on kaavan 3 mukaan laskettuna 25  $^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa on noin 10  $\mu\text{m}$ , mikä johtaa terveydenhuollon sovelluksissa kapeisiin tutkittaviin spektreihin [10]. Näissä sovelluksissa käytössä olevien lämpökameroiden mittausalueen spektri on esimerkiksi 2–6  $\mu\text{m}$  tai 8–12  $\mu\text{m}$  [5] [10]. Käytetyillä spektrialueilla ilmakehän molekyylit absorboivat vain vähän infrapunasäteilyä, jolloin ilmakehästä aiheutuva mittausvirhe on pienempi kuin muilla spektrialueilla [9]. Lisäksi valittu spektrialue vaikuttaa laitteen herkkyyteen, sillä lyhyemmällä aallonpituuksilla eri Planckin lämpötilakäyrien erotus radianssissa on suurempi.

Kameroita on kahdenlaisia: jäädytystä vaativia ilmaisimia käyttäviä, sekä jäädyttämättömiä mikrobolometri-ilmaisimia käyttäviä kameroita. Kuvassa 1 on esimerkki molemmista kameratyypeistä. Yleisesti ottaen jäädytetyillä kameroilla saadaan aikaan tarkempia kuvia, mutta ne ovat huomattavasti kalliimpia kuin jäädyttämättömät lämpökamerat. [5] Lisäksi jäädyttämättömät kamerat ovat käsin

kannettavia, mikä avaa uusia käyttökohteita niille. Lääketieteessä käytetään molempia lämpökameratyyppejä riippuen sovelluskohteesta.

## 2.1 Lämpökameran rakenne ja toiminta

Lämpökamera voidaan jakaa viiteen eri toiminnalliseen osa-alueeseen kuvan 2 mukaan. Nämä ovat optinen systeemi, anturi, vahvistinpiiri ja signaalin prosessointipiiri sekä näyttöpäätte [10]. Lämpökameralla saatu mittausdata tallennetaan joko kameran omaan muistiin tai järjestelmässä kiinni olevan tietokoneen muistiin. Terveystieteessä käytetystä mittausjärjestelmästä kerrotaan luvussa 3.



*Kuva 2: Lämpökameran rakenne, muokattu lähteestä [14].*

Tyypillisesti hiilipinnoitetusta germaniumista [15] valmistettu optinen systeemi ohjaa laajalta alueelta tulevan infrapunasäteilyn anturiin, joka muuttaa sen sähköiseksi signaaliksi. Kuva-anturissa on vierekkäin useita ilmaisimia muodostaen matriisirakenteen, jota kutsutaan kennoksi (focal plane array) [6]. Jokaisesta ilmaisimesta saatava signaali vastaa yhden pikselin saamaa arvoa, jolloin ilmaisimien lisääminen matriisissa vastaa suoraan resoluution paranemiseen. Kaupallisten lämpökameroiden resoluutiot vaihtelevat 80x60 ja 1280x1024 välillä [7].

Signaalin prosessointipiirissä kerätään ilmaisimilta saatu informaatio, parannetaan kuvanlaatua ja muodostetaan näyttöpäätteelle sopivassa muodossa oleva signaali. Ilmaisimilta saadusta signaalista havaitaan ja korvataan huonosti tai väärin toimivien ilmaisimien signaaleita. Kuvanlaatua parannetaan digitaalisesti algoritmeja käyttäen muun muassa valoisuuden ja kontrastin korjauksella sekä matalien ja korkeiden taajuuksien suodattamisella. Signaalin prosessointipiiristä saatu data tallennetaan ja esitetään näyttöpäätteellä. [16] Useat kaupalliset lämpökamerat tuottavat PNG- tai

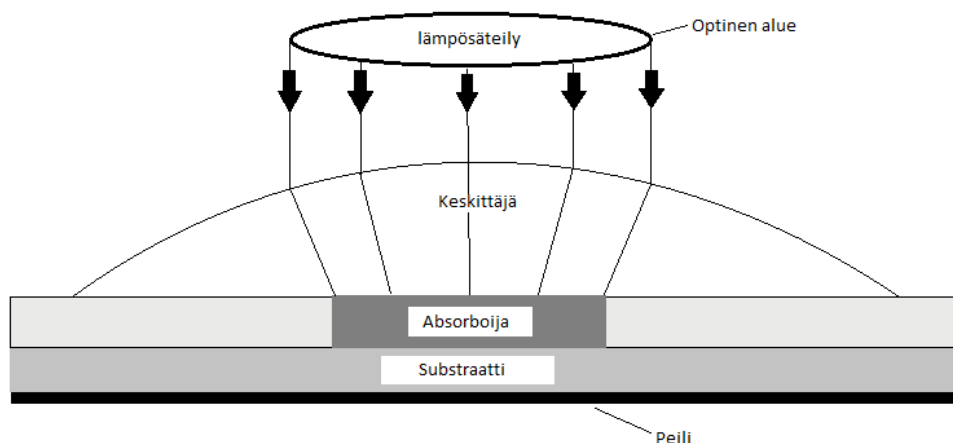


JPEG-muodossa olevia kuvia, mutta käsittelemättömään raakadataan on mahdollista päästä käsiksi esimerkiksi käyttämällä valmistajan ohjelmistoa [7].

Kaupallisissa lämpökameroissa käytettävät ilmaisimet voidaan edelleen jakaa kahteen pääluokkaan: erillistä jäähdytystä vaativiin valokennoihin (photo-detector) sekä ilman jäähdytystä toimiviin mikrobolometreihin [6]. Valokennot perustuvat fotonin energian aikaansaamaan muutokseen anturin resistanssissa, induktanssissa, jännitteessä tai virrassa. Mikrobolometreissä fotonit muuttavat anturin lämpötilaa, mikä saa aikaan materiaalin resistanssin muutoksen. [6] [10] Yleisesti lämpökameroissa käytettyihin antureihin ja niiden eroihin perehdytään tarkemmin alaluvuissa 2.2 ja 2.3.

## 2.2 Jäähdytetyt lämpökamerat

Jäähdytetyissä lämpökameroissa käytetään seosmateriaaleista valmistettua valokennoa lämpösäteilyn muuntamisessa sähköiseksi signaaliksi. Kaupallisissa kameroissa ilmaisimet ovat yleensä joko InSb (indium antimonide) tai MCT (alloy of cadmium, mercury and telluride) materiaalseoksista valmistettuja. Käytetyt materiaalit vaativat matalan käyttölämpötilan, jota ilman ilmaisimen synnyttämän lämpöhäiriön määrä on liian suuri selkeän kuvan saamiseksi. [6] [10] Jäähdytys toteutetaan esimerkiksi laitteeseen integroidulla heliumkiertopumpulla [5], jonka vuoksi jäähdytettävät lämpökamerat ovat jäähdyttämättömiä kameroita kalliimpia sekä kooltaan suurempia. Lisäksi ne vaativat jäähdytysjärjestelmän uusimista noin 10000–13000 [17] käyttötunnin välein, mikä lisää kameran käyttökustannusta. Jäähdytettyjen lämpökameroiden hinta vaihtelee noin 10 000 eurosta yli 100 000 euroon [7].



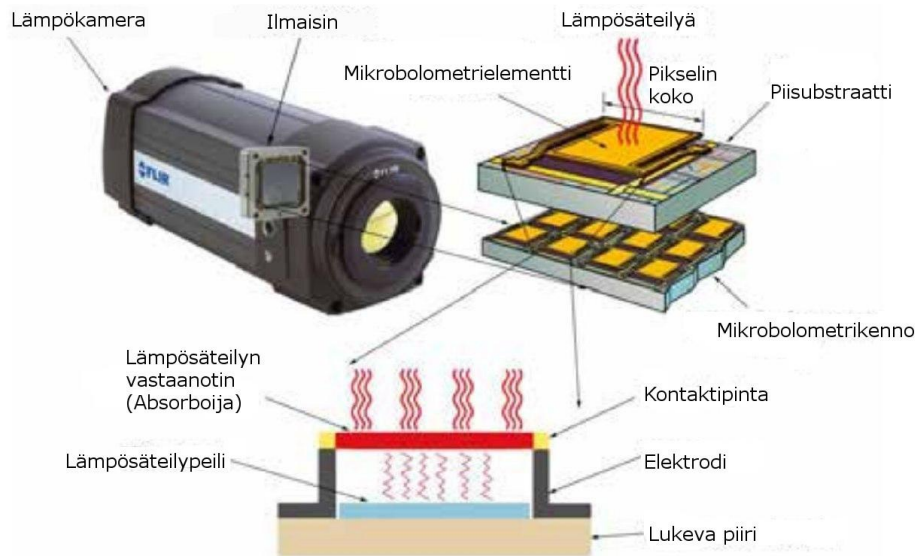
*Kuva 3: Jäähdytetyt ilmaisimen rakenne.*

Kuvassa 3 on jäädytetyssä lämpökamerassa käytetyn ilmaisimen rakennekuva. Ilmaisimien koostuu homogeenisestä puolijohdelevystä, jossa on alue mihin optinen järjestelmä kohdistaa lämpösäteilyä. Fotonit aiheuttavat elektroni-aukko-parien syntyä substraatissa osuessaan ilmaisimen pintaan. Tämä synnyttää virran, jonka suuruus kertoo kohteen lämpötilasta. Lämpökamerakuva syntyy useiden ilmaisimien muodostamien virtojen perusteella. [6]

Jäädytettävää ilmaisinta käyttävän lämpökameran hyviä puolia ovat sen korkea herkkyys, kantama ja lyhyt integrointiaika [10]. Jäädytetyssä lämpökameran maksimikuvausetaisyys on suuri: osaa kameroista voidaan käyttää jopa 25 km kuvausetaisyudella [7]. Terveystieteiden sovelluksissa tällä ei kuitenkaan ole merkitystä, sillä tyypillisesti kuvattavat kohteet ovat lähellä. Kameran sensorin herkkyydellä puolestaan on suuri merkitys, sillä ihon lämpötilan muutoksia mitattaessa kyseessä ovat usein hyvin pienet lämpötilaerot [11]. Lisäksi jäädytetyssä kameran lyhyt integrointiaika mahdollistaa suuren kuvataajuuden [6], minkä vuoksi kameralla saadaan tarkkoja kuvia liikkuvista kohteista. Kuvataajuus vaihtelee kameroittain sadoista hertseistä jopa yli tuhanteen hertsiin [6] [7]. Terveystieteiden sovelluksissa kuvattava kohde on pääasiassa paikoillaan, mutta nopeat lämpötilamuutokset voidaan saada tarkasti havaittua.

### **2.3 Jäädyttämättömät lämpökamerat**

Jäädyttämättömät matriisi-ilmaisimia käyttävät kamerat ovat yleisimpiä käytössä olevia lämpökameroita [10]. Niiden tarkkuus on jatkuvasti kehittynyt 2000-luvulla jopa samalle tasolle osan jäädytettyjen lämpökameroiden kanssa [6]. Jäädyttämättömien lämpökameroiden toiminta perustuu lämpösäteilyä aiheuttamiin anturielementin pikselien resistanssien muutoksiin mikrobolometri-ilmaisimessa. Lämpösäteily lämmittää ensin pikselielementin, mikä saa lämpötilariippuvaisen resistanssin muuttumaan. [10]



**Kuva 4: Mikrobolometrin toimintaperiaate, muokattu lähteestä [18].**

Mikrobolometri-ilmaisimet valmistetaan piikiekolle mikrovalmistustekniikoin. Jokainen ilmaisim koostuu mahdollisimman pienestä levystä, johon lämpösäteily osuu, sitä kannattelevista (piinitridi)jaloista sekä CMOS-piisubstraattiosasta (Complementary Metal Oxide Semiconductor), johon jalat on kiinnitetty. [10] Lämpösäteilyn absorboivan levyn koko vaikuttaa laitteen herkkyyteen, sillä pienempi levy lämpenee nopeasti tuottaen vasteen jo pienellä lämpösäteily määrällä. Kaupallisissa lämpökameroissa pikselin sivun pituus on 12–25  $\mu\text{m}$  [6], mutta uusissa lämpökameroissa käytetään pääosin vain 12  $\mu\text{m}$  teknologiaa laitteen pienen koon takaamiseksi [7].

Jäähdyttämättömillä lämpökameroilla on useita etuja jäähdytettuihin lämpökameroihin verrattuna. Ne ovat hinnaltaan huomattavasti halvempia, kooltaan pienempiä ja vähemmän virtaa kuluttavia, helposti massatuotettavia ja kestävämpiä käytössä, sillä niissä on vähemmän liikkuvia osia [6][10][15]. Jäähdyttämättömien lämpökameroiden hinta vaihtelee noin 200 euron ja 35 000 euron välillä riippuen laitteen resoluutiosta, herkkyydestä ja muista ominaisuuksista. Jäähdyttämättömien lämpökameroiden resoluutiot vaihtelevat 80x60 ja 1280x720 välillä. [7] Pieni virrankulutus ja mikrobolometrisensorin koko mahdollistavat pienten käsin kannettavien tai älypuhelimeen integroitavien laitteiden valmistuksen [8]. Lämpökameran kannettavuus on johtanut uusien käyttökohteiden syntyyn niin rakennus- ja sotilaskäyttöön, mutta myös terveydenhuollon sovelluksiin. Kannettavia lämpökameroita voidaan hyödyntää esimerkiksi lentokentillä suuren ihmismäärän ympärivuorokautiseen tarkkailuun muun muassa vakavaan infektio tautiin sairastuneiden ihmisten havaitsemiseksi [11].

### 3. LÄMPÖKAMERAKUVANTAMINEN TERVEYDENHUOLLOSSA

Terveydenhuollossa käytetään pääosin kiinteästi paikallaan olevia kameroita ja vain pienessä osassa sovelluksia lämpökameroita käytetään käsin kantaen. Tyypillinen mittausjärjestelmä koostuu kamerasta, siihen liitetystä tietokoneesta ja jalustasta sekä kuvattavasta kohteesta. Jalustan sijaan suurikokoinen kamera voidaan myös kiinnittää seinään. Mittausjärjestelmässä tietokonetta käytetään datan tallentamiseen, analysoimiseen sekä prosessointiin. [11]

Lämpökamerakuvantamisessa tärkeää on, että kamera kalibroidaan oikein. Oikein kalibroitujen kameroiden välillä otettuja kuvia voidaan verrata keskenään. Kalibroinnissa kameran mittaustulosta verrataan ja säädetään vastaamaan kuvattavan kohteen lämpötilaa, jonka arvo tiedetään. Kalibroinnin suorittaa tavallisesti lämpökameran valmistaja, sillä kalibrointiin liittyvien standardien mukaista erikoislaitteistoa ei ole useinkaan saatavilla muualla. [19]

Terveydenhuollon sovelluksissa kuvattujen kohteiden lämpötilat vaihtelevat enimmilläänkin vain muutamia lämpöasteita. Tämän vuoksi kuvaushuoneen mittausolosuhteiden täytyy olla kontrolloituja: niin huoneen lämpötilaa, ilmankosteutta sekä ilmankiertoa tulee tarkkailla ja säätää. Tarkkoja standardeja mittausolosuhteille tai käytännöille ennen kuvausta ei kuitenkaan ole määritetty, sillä ihmisten ihon normaalilämpötila vaihtelee huomattavasti yksilöittäin. [11] Standardoinnin puuttuminen vaikeuttaa tutkimustuloksien vertailua eri paikoissa tehtyjen kuvausten välillä. Tähän mennessä ainoastaan kuvattavan kohteen asentoihin on tehty standardeja, mutta tulevaisuudessa myös mittausolosuhteille tehtäneen omansa [20].

Standardoinnin puuttuminen aiheuttaa myös epäselvyyttä siihen, millaisia asioita tulisi ottaa huomioon lämpökamerakuvantamiseen liittyen. Kirjallisuudessa esitetään useita erilaisia kuvaushuoneeseen sekä kuvattavaan kohteeseen liittyviä käytäntöjä, jotka tulisi huomioida ennen kuvausta. Huoneeseen liittyviä asioita ovat lämpötila ja ilmankosteus. Kuvaushuoneen lämpötila ei saa olla liian kylmä eikä liian kuuma vaan sen tulisi olla 18–25 °C [11][21]. Liian kylmä lämpötila pienentää ihon pintaverenkiertoa, jolloin ihon alla olevien epänormaalien kohtien muodostamat lämpoisemmat kohdat eivät välttämättä erotu kuvasta. Liian kuumassa huoneessa pintaverenkierron kasvun myötä kohonnut ihon lämpötila voi puolestaan peittää epänormaalit kohdat. Ilmankosteuden tulee olla

normaali, sillä kohteen emittoima lämpösäteily riippuu osittain siitä [11]. Mittaushuoneessa tulee olla myös mahdollisimman vähän lämpösäteileviä kohteita [22], sillä ihmisen iho heijastaa pienen osan siihen tulevasta lämpösäteilystä vääristäen mittaustuloksia.

Mittausympäristön lisäksi myös kuvattavaan potilaaseen liittyen tulee huomioida monia asioita; tutkittava kohta on aina kuvattava ilman peittävää vaatetusta, sillä lämpökameralla ei saa vaateiden läpi tarkkaa informaatiota ihon lämpötilasta. Ihmistä kuvattaessa on tärkeää, että ihon lämpötilan annetaan tasaantua paikalle tultaessa liikkumisen, vaatekerroksen sekä ulko-olosuhteiden vaikutuksista. [22] Tasaantumisaajat vaihtelevat huomattavasti eri tutkimuksissa 5–20 minuutin välillä [11], mutta tasaantumisaika voi olla jopa 30 minuuttia [23]. Ennen kuvausta kohteen tulisi välttää tupakoimista, alkoholin ja tiettyjen lääkeaineiden, kuten betasalpaajien käyttöä, sekä ruoan syömistä raskaasti, sillä ne vaikuttavat ihon verenkiertoon huomattavasti [11] [21].

### **3.1 Menetelmän edut**

Lämpökameralla on useita laitteen kokoon sekä ominaisuuksiin liittyviä asioita, joiden perusteella se sopii hyvin käytettäväksi monissa terveydenhuoltoon liittyvissä sovelluksissa. Näitä ovat esimerkiksi joustavuus erilaisten mittausasetelmien ja mittauspaikkojen suhteen, halpa hinta sekä reaaliaikaisuus. Koska lämpökamera mittaa vain kehon luonnostaan emittoimaa lämpösäteilyä, kyseessä on ei-invasiivinen ja potilaaseen koskematon kuvantamismenetelmä, josta ei aiheudu minkäänlaista haittaa kuvattavalle kohteelle. [5] Näin ollen kamera soveltuu käytettäväksi pitkän aikaa kerrallaan tai usein samaa kohdetta kuvattaessa [11].

Lämpökameran pieni fyysinen koko ja kuvausetäisyyden laaja vaihtelu senttimetreistä jopa kilometreihin [7] johtavat menetelmän joustavuuteen. Kameraa voidaan käyttää käsin tai jalustalle asennettuna. Pienen koon ansiosta kameralla voidaan ottaa kuvia helposti eri kuvakulmista mittaustilanteessa, jolloin epänormaalin lämpöiset kohdat voidaan havaita varmemmin. Lisäksi kuvauspaikan vaihtaminen tarpeen tullen on huomattavasti helpompaa verrattuna esimerkiksi suuriin magneettikuvauslaitteisiin. Lämpökamerakuvauksen mahdollistama laaja kuvausetäisyyden vaihtelu avaa käyttökohteita esimerkiksi ihmisten kuumeen tarkkailuun pandemioiden estämiseksi muun muassa lentoasemilla [11].

Lämpökameran hankinta- ja käyttökustannukset ovat erittäin pienet verrattuna muihin terveydenhuollossa käytettyihin kuvantamislaitteisiin, kuten magneetti- ja

ultraäänikuvantamislaitteisiin. Lämpökameran hankintahinta on korkeimmillaankin vain noin 100 000 euroa [7]. Moniin sovelluksiin kelpaavat myös halvemmat kamerat. Esimerkiksi kevättalvella 2020 COVID-19-viruksen leviämisen estämiseksi hankittu kamerajärjestelmä Tallinnan lentokentälle maksoi kokonaisuudessaan noin 30 000 euroa [24]. Magneettikuvantamislaitteiden hinnat voivat olla helposti yli 500 000 euroa, jonka lisäksi päälle tulevat asennus- ja käyttökustannukset [25]. Lämpökameralla ei käytännössä ole käyttökustannuksia lukuun ottamatta jäädytettyjen lämpökameroiden jäähdytysjärjestelmän uusimista ja valmistajan suorittamia kalibrointeja.

Potilaalle kuvantamistutkimukset maksavat Suomessa lähtökohtaisesti satoja euroja: tavallinen magneettitutkimus maksaa noin 400–500 euroa, ultraäänitutkimukset kuvattavan kohteen mukaan noin 200–400 euroa, tietokonetomografiatutkimukset noin 400–700 euroa ja rintasyövän seulomiseen ja diagnosoimiseen käytettävän mammografiatutkimuksen hinta on noin 200–250 euroa [26]. Lämpökuvantamistutkimuksia tehdään Suomessa vähän ja harvoissa yrityksissä. Kehonosan kuvaus maksaa 148 euroa nousten 468 euroon kokovartalokuvauksessa, olkoonkin että hinnat eivät suoraan ole vertailukelpoisia menetelmien erilaisten sovelluskohteiden vuoksi. [27]

Lämpökameralla saadaan kuvaus tehtyä reaaliaikaisesti ja nopeasti. Esimerkiksi mammografia ja rintojen ultraäänikuvaus kestää noin 30 minuuttia. Lämpökameralla kuva saadaan sekunneissa, jolloin samassa kuvauksessa voidaan ottaa kuvia useista kuvakulmista. Ennen kuvien ottamista kuvattavan henkilön lämpötilan kuitenkin täytyy antaa tasaantua ulkoisista vaikutuksista. Lisäksi lämpökameraa voidaan hyödyntää reaaliaikaisuutta vaativissa sovelluksissa, kuten ihmisten lämpötilan ja sen muutoksen jatkuva-aikaisessa tarkkailussa muun muassa lentokentillä.

### **3.2 Menetelmää rajoittavat tekijät**

Lämpökameran ominaisuuksissa sekä sillä tehdyissä tutkimuksissa löytyy useita tekijöitä, joiden perusteella lämpökameralla saatuihin tuloksiin tulisi suhtautua kriittisesti. Tuloksiin vaikuttavat etenkin käytetyn kameran resoluutio ja ennen kuvausta huomioon otetut asiat kuvauspaikalla. Varsinkin vanhat lämpökameroilla tehdyt tutkimukset ovat usein epätarkkoja verrattuna nykyisiin tehtäviin tutkimuksiin [28]. Vanhojen tutkimusten heikot tulokset ovat osaltaan vaikuttaneet siihen, että lämpökamerakuvantamista käytetään vain diagnoosin tekemisen apuna eikä ainoana tutkimusmenetelmänä.

Lämpökamerakuvantamisessa luotettavan tutkimustulosten saamiseksi vaaditaan kuvantamiseen liittyvien asioiden standardoimista. Viime vuosina standardoinnin määrä on lisääntynyt ja esimerkiksi tietyille sovelluksille on määritetty tarkempia sääntöjä liittyen kuvauskulmiin sekä olosuhteisiin. Tästä huolimatta suurimmassa osassa sovelluksia ei ole selkeitä standardeja, joiden mukaan kuvaus tulisi suorittaa. [20] Tämän takia lämpökameroilla tehtyjen tutkimuksien tuloksien vertailu on vaikeaa. Lisäksi kuvaushuoneessa ulkoiset tekijät voivat vääristää tutkimustuloksia.

Tutkimuksissa käytetyn kameran huono resoluutio vaikuttaa saatuihin tutkimustuloksiin negatiivisesti. Pienemmän resoluution kuvilla on huomattu olevan pienempi toistettavuus tutkittaessa resoluutioiltaan 80x60, 120x90, 160x120 ja 320x240 olevia kuvia [29]. Terveystieteiden sovelluksissa käytettävien kameroiden resoluution on oltava vähintään 320x240, mutta korkeamman resoluution kameroilla saadaan tarkempia tuloksia [30]. Korkean resoluution lämpökamerat ovat kalliimpia verrattuna matalan resoluution kameroihin ja varsinkin lämpökameraan liittyviä tutkimuksia tehtäessä ne voivat olla liian kalliita.

Resoluution huomioon ottamisen lisäksi lämpökamerakuvantamisessa tarvitaan aina kuvan jälkikäsitteilyä tietokoneella tai valmiiksi kameraan liitetyllä ohjelmistolla tutkimusdataa kerätessä, johtuen kuvien heikosta signaali-kohinasuhteesta. Jälkikäsitteilyssä kuvasta saadaan poistettua digitaalisesti muun muassa ilmaisimen aiheuttamaa häiriötä ja parannettua datan tarkkuutta. Jälkiprosessoinnin on huomattu olevan välttämätöntä, sillä epänormaalin fysiologisen toiminnan aiheuttamat lämpötilaerot kehossa ovat usein hyvin pienet. [11][20]

Lämpökameran käyttö liikkuvien kohteiden kuvaamisessa asettaa kameran ominaisuuksille lisävaatimuksia. Varsinkin SARS-epidemian (Severe Acute Respiratory Syndrome) jälkeen lämpökameroiden käyttö kuumeisten ihmisten löytämiseksi yleiseltä paikalta on lisääntynyt. Ihmisten kävelynopeus johtaa siihen, että lämpökameran kuvataajuus tulee olla tarpeeksi suuri. Erityisesti kuumeselontaan myytävien lämpökameroiden kuvataajuus on 9–25 Hz. Kannettavien ja halpojen mikrobolometrikameroiden kuvataajuus ei usein riitä ihmisten liikkeessä pysymiseen, jolloin mitattu lämpötila vääristyy ja kohteen lämpötilan havaitaan laskevan ja nousevan liikkeessä. Varsinkin lentokentillä käytetyt lämpökamerat ovat usein ominaisuuksiltaan riittämättömiä tai väärin käytettyjä liikkuvan kohteen lämpötilan mittaamiseksi luotettavalla tarkkuudella. Ihmisten liikkumisesta aiheutuvat ongelmat on usein ratkaistu pyytämällä ihmisiä pysähtymään tietyille alueille, johon lämpökameralla kuvataan. [20]

## 4. NYKYISET KÄYTTÖKOHTEET

Lämpökameraa käytetään useissa eri terveydenhuollon tutkimuksissa osana diagnoosin tekemistä. Se on turvallinen, reaaliaikainen ja halpa tutkimusmenetelmä, jota voidaan käyttää apuna aikaisen diagnoosin tekemiseen. Lämpökamerakuvantamista ei käytetä ainoana tutkimusmenetelmänä terveydenhuollossa, sillä useat ulkoiset tekijät voivat vääristää tuloksia. Lämpökameralla otetuista kuvista saatavaa tietoa verrataan muilla tutkimusmenetelmillä saatuihin tuloksiin ja eri lähteistä tulevista tiedoista pyritään löytämään yhtäläisyyksiä. [20] Lämpökamerakuvia voidaan ottaa myös kartoittamaan muiden tutkimusten tarvetta, esimerkiksi aikaisen rintasyövän diagnosoimisessa [11].

Lämpökamerakuvantamisessa pyritään löytämään kehosta tulehdusten, kasvaimien tai keskushermoston muutosten vuoksi tapahtuvia lämpötilapoikkeamia. Käyttökohteet vaihtelevat laajasti verenkiertoelimistön, ihosairauksien, lihasten ja sisäelinten tutkimuksista aina hammashoitoon. Lisäksi SARS-epidemian jälkeen ajankohtaiseksi käyttökohteeksi on noussut pandemioiden ja epidemioiden leviämisen estäminen kuumeseulonalla. [20] Tässä luvussa käsitellään lämpökameran käyttöä rintasyövän, diabeteksen ja kuivasilmäisyyden diagnosoinnissa sekä kuumeseulonassa. Nämä ovat yleisesti terveydenhuollossa käytettäviä sovelluskohteita lämpökameralle.

### 4.1 Rintasyöpä

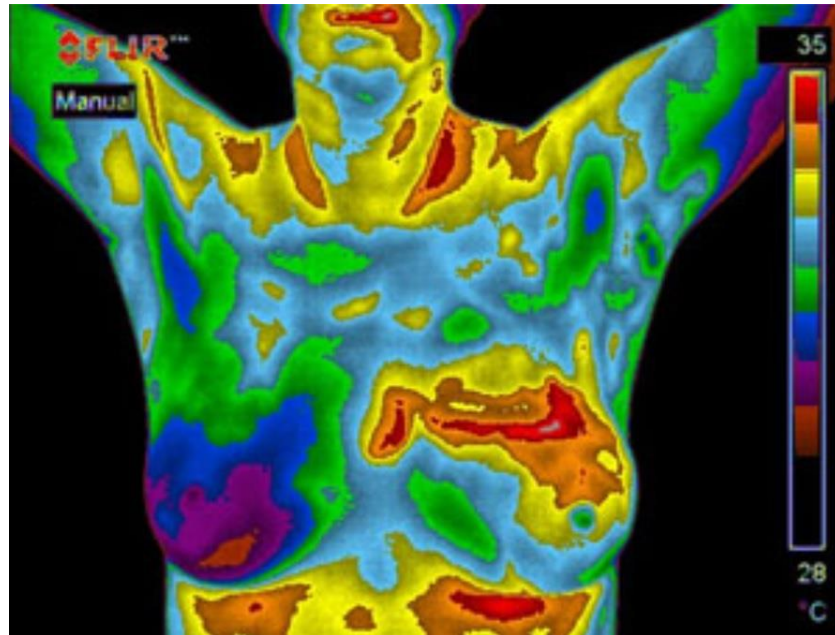
Rintasyöpä on naisten yleisin syöpä ja suurin syöpäkuolemien aiheuttaja kehitysmaissa [31]. Noin 30 % naisilla todettavista syöivistä on rintasyöpiä [5]. Myös miehillä todetaan rintasyöpää, mutta ne ovat harvinaisia naisiin verrattuna [31]. Rintasyövän aikainen diagnosoiminen vaikuttaa merkittävästi siitä selviämiseen. Tämän vuoksi rintasyövän aikaisin tunnistavat menetelmät ja niiden jatkuva kehittäminen on tärkeää. Aikaisin todetusta rintasyövästä selviää noin 85 % – 95 % [31] potilaista, kun myöhään todettujen kohdalla vastaava luku on 10 % [11].

Syöpäkasvaimessa verenkierron määrä on kasvanut verrattuna normaalin rinnan kudokseen, joka lisää iholta mitattavaa lämpötilaa paikallisesti [31]. Tämän vuoksi lämpökameraa voidaan käyttää rintasyövän havaitsemisessa. Muita rintasyövän havaitsemisessa käytettyjä metodeja ovat mammografia, magneetti- sekä ultraäänikuvantaminen, joista mammografia on yleisin [32]. Lämpökuvantamiseen perustuvassa tutkimuksessa rintasyöpä voidaan havaita jopa 8–10 vuotta aikaisemmin



mammografiaan verrattuna [33]. Vuonna 2019 FDA (U.S Food and Drug Administration, Yhdysvaltain ruoka- ja lääkevirasto) kuitenkin varoitti, ettei lämpökuvantamista tule käyttää mammografiaa korvaavana menetelmänä, vaan ainoastaan diagnoosin tekemistä avustavana menetelmänä. FDA:n mukaan lämpökuvantamisella ei ole saatu merkittäviä tieteellisiä tuloksia, joiden perusteella sitä voitaisiin käyttää ainoana tutkimusmenetelmänä tai yhteiskäytössä muun kuin mammografiatutkimuksen kanssa luotettavaa rintasyöpädiagnoosia tehdessä. [34]

Rintasyöpä on yleisin ja pisimpään lämpökameralla tutkittu sairaus. Sen käyttö tutkimuksien apuna aloitettiin vuonna 1982. [11] Lämpökameroiden teknisen kehityksen myötä kuvantamismenetelmällä saatava tarkkuus on noussut huomattavasti. Tutkimusten [35] mukaan yksin lämpökamerakuvantamista käyttämällä saadaan 80 % – 98 % tarkkuudella havaittua rintasyöpä. Tulosten suuri vaihteluväli johtuu osittain siitä, että tutkimusten otoskoko on pieni. Lämpökamerakuvantamiseen ja mammografiatutkimukseen perustuvalla hybridimenetelmällä voidaan rintasyöpä havaita luotettavasti 95 % tarkkuudella, verrattuna 66 % tarkkuuteen pelkkää mammografiaa käytettäessä [18]. On kuitenkin huomattava, että luotettavan tuloksen saamiseksi lämpökameralla on otettava kuva useasta kuvakulmasta, sillä kaarevien pintojen takia kasvaimesta johtuva paikallinen lämpötila ei välttämättä näy joka suunnasta [20]. Lämpökamerakuvantaminen on halpa tutkimusmenetelmä verrattuna magneetti- ja ultraäänikuvantamiseen, mikä nostaa sen potentiaalista käyttöä diagnoosia tehtäessä.



*Kuva 5: Lämpökamerakuva rintasyöpää sairastavasta naisesta [36].*

Kuvassa 5 on esimerkkikuva lämpökameralla otetusta kuvasta. Kuvan naisella myöhemmin todettiin rintasyöpä. Kuvasta voidaan nähdä vasemman rinnan alueella olevan huomattavasti korkeampi lämpötila oikeaan normaalilämpöiseen verrattuna, mikä johtuu lisääntyneestä verenkierrosta.

## 4.2 Jalkapohjien diabeettiset muutokset

Diabeteksestä eli sokeritaudista on olemassa useita eri tyyppisiä, joiden syyt ja hoitomenetelmät vaihtelevat. Yhteistä eri diabetestyypeille on se, että verensokeri on ilman asianmukaista hoitoa kohonnut. Yleisesti ottaen hoidon päätavoitteena on saada verensokeri lähelle normaalia tasoa esimerkiksi ruokavaliota ja elintapoja muuttamalla tai insuliinihoidolla. Diabetes altistaa useille lisäsairauksille, sillä korkea verensokeri vahingoittaa hiussuonia ja valtimoita. Tällaisia sairauksia ovat muun muassa ääreishermoston häiriö eli neuropatia sekä munuaissairaus. [37] Diabetekseen liittyvät verenkierron ja ääreishermoston häiriöt ilmenevät usein jaloissa, mutta niitä voi ilmetä myös käsissä [4]. Noin 50 % diabeetikoista joutuu sairaalahoitoon jalkojen sairauksien vuoksi. Lämpökameraa voidaan käyttää diabeetikoiden jalkojen tutkimuksissa, sillä sekä verisuoni- että hermosairaudet johtavat ihon lämpötilan muutoksiin. Vaikka lämpökamerakuvantamista voidaan hyödyntää diabeettisten jalkapohjan vaurioiden etsinnässä, lämpökameratutkimuksella ei kuitenkaan suoraan saada selville onko kyse verisuoni- vai hermosairaudesta. [11]

Lämpökameraa voidaan käyttää sekä diabetesdiagnoosin saaneille, että aikaisen diagnoosin tekemisen apuna riskiryhmille. On huomattu, että diabetesriskin omaavilla on huomattavasti korkeampi jalkojen keskilämpötila ( $30,2 \pm 1,3$  °C) verrattuna normaaliin  $26,8 \pm 1,8$  °C lämpötilaan [38]. Myös jalkojen välillä voi olla paikallisia lämpötilaeroja, mikä yleensä viittaa epänormaaliin toimintaan kehossa [4]. Näiden perustella lämpökameralla voidaan havaita diabetes aikaisessa vaiheessa, jolloin elämäntapamuutokset voidaan saada aloitettua aiemmin. Huomattavaa on, että jalkojen ihon lämpötilan muutokset voivat johtua myös muista syistä, kuten esimerkiksi tulehdustilasta tai alaraajan tukkivasta valtimotaudista, joten myös muut tutkimukset kuten verikokeet ovat välttämättömiä diabetesta diagnosoitaessa. Diabetesdiagnoosin saaneille lämpökameratutkimuksia voidaan hyödyntää lisäsairauksien havaitsemisessa ja seurannassa.

Lämpökamerakuvantaminen on täysin turvallinen ja ei-invasiivinen kuvantamismenetelmä ja sen on osoitettu antavan tarkkoja tuloksia diabeettisiin jalkaoireisiin liittyen [4]. Tutkimusten [35] mukaan tarkkuus vaihtelee 81–94 % välillä. Näiden perusteella lämpökamerakuvantaminen on hyvä menetelmä diabeettisten muutosten etsinnässä. Kuitenkin on huomattava, että vaikka raajojen verisuoni- ja hermosairaudet ovat yleisiä diabeetikoilla, niiden perusteella ei saada informaatiota diabeteksen vakavuudesta. Tämän vuoksi tarvitaan lisäksi muita tutkimusmenetelmiä diabetesta diagnosoitaessa, mutta lämpökamerakuvantamista voidaan käyttää diabeteksen aikaisessa havaitsemisessa.

### 4.3 Kuumeseulonta

Kannettavien lämpökameroiden kehittyminen sekä niiden hinnan jatkuva pienentyminen 2000-luvun alun jälkeen johtivat niiden yleistymiseen käytössä, joten niitä alettiin asentaa esimerkiksi satamiin ja lentokentille. 2000-luvun alun vakavien keuhkosairauspandemiauhkien myötä uudeksi käyttökohteeksi lämpökameroille muodostui ihmismassojen reaaliaikainen kuumeseulonta. Menetelmässä kuvataan ihmisten kasvoja ja niiden lämpötilaa, jolloin kuumeiset ihmiset voidaan havaita. Kuumeseulontaa on käytetty pääasiassa epidemioiden, kuten koronaviruksiin kuuluvien SARS- ja MERS-epidemioiden (Middle East Respiratory Syndrome), sekä COVID-19-viruksen leviämisen hillitsemisessä. Kasvojen lämpötilan on osoitettu antavan tarpeeksi tarkkaa tietoa kuumeisten ihmisten löytämiseksi. [11][20]

Vuosien 2002 ja 2012 SARS- ja MERS-koronavirukset olivat eläimistä ihmisiin tarttuneita hengenvaarallisia hengitystieinfektioita. Alkuvaiheessa tauteihin kuului korkea kuume ja lihaskipua, sekä myöhemmässä vaiheessa pahimmillaan kuolemaan johtava keuhkokuume. SARS-tapauksia oli todettu yhteensä noin 8500 maailmanlaajuisesti ja MERS-tapauksia noin 2300. [39] Vuoden 2019 joulukuussa Kiinasta liikkeelle lähtenyt uusi koronavirus COVID-19 aiheuttaa äkillisen hengitystieinfektion ja myös korkean kuumeen, mutta sen aiheuttama kuolleisuus näyttää tällä hetkellä olevan huomattavasti pienempi kuin SARS- ja MERS-viruksilla. [40] COVID-19 on kuitenkin levinnyt maailmanlaajuisesti huomattavasti laajemmin sairastuttaen vähintään miljoonia ihmisiä ympäri maailmaa [41].

Epidemioiden aikana niiden leviämisen hillitsemiseksi kuumeseulontaa käytetään paikossa, joissa ihmiset matkustavat paljon joko maiden tai kaupunkien välillä. Esimerkiksi COVID-19-viruksen aikana rajatarkastuspisteillä, lentokentillä sekä satamissa käytetään lämpökameroita, jolloin kuumeiset ihmiset voidaan tarvittaessa käskeä sivuun tarkempia tutkimuksia varten. Mittausjärjestelmä koostuu kamerasta ja siihen kytketystä tietokoneesta, joka ilmoittaa automaattisesti tietyn lämpötilan ylittyessä reaaliaikaisessa kuvassa. Esimerkiksi Tallinnan lentokentällä käytetty järjestelmä hälyttää yli 38 °C ylittyessä [42].



*Kuva 6: Kuumeseulonnan järjestelmä [42]*

Kuumeseulontaan liittyy myös useita ongelmia. SARS-epidemian aikaan huomattiin, että liikkuvien ihmisten kuumeseulonnalla ei saada välttämättä tarkkoja tuloksia. Osalla ihmisistä saattoi olla kuumetta, mutta kasvojen keskimääräinen lämpötila oli silti alle lämpökameralla mittauksille määritellyn kuumeen alarajan. Tarkan tuloksen saamiseksi vaaditaan lähikuva kasvojen yläosasta, mutta tätä ei liikkeessä olevilta ihmisiltä ole mahdollista ottaa. [20] Lisäksi automaattisten järjestelmien on huomattu hälyttävän myös vääristä kohteista, kuten kädessä kannettavasta juomasta kuumeisten ihmisten sijaan [43].

#### **4.4 Kuivasilmäisyys**

Kuivasilmäisyys on liian vähäisestä kyynelten erityksestä tai liiallisesta kyynelten haihtumisesta johtuva sairaus, joka aiheuttaa muun muassa kirvelyä ja pistelyä sekä roskan tuntemista silmässä. Myös näöntarkkuus voi vaihdella. Kuivasilmäisyys on erittäin yleinen sairaus, jota esiintyy eriaikaisesti jopa 50 prosentilla väestöstä. Tauti todetaan pääasiassa oirekyselyn perusteella, minkä lisäksi jatkotutkimuksena voidaan tutkia silmäluomen reunan kunto sekä kyynelneesten ominaisuuksia mikroskoopilla. [44] Myös lämpökameraa voidaan hyödyntää apuna tutkimuksissa ja varsinkin taudin aikaisen vaiheen toteamisessa [35]. Diagnoosia ei kuitenkaan tehdä ainoastaan

lämpökamerakuvantamisen perusteella, vaan myös perinteisesti käytetyt tutkimukset tehdään kuivasilmäisyyttä todettaessa.

Lämpökamerakuvantamista käyttäen on huomattu, että silmän pintalämpötila on erilainen kuivasilmäisyyttä sairastavien ja terveiden ihmisten välillä. Tautia sairastavilla lämpötilan on tutkittu olevan  $32,38 \pm 0,69$  °C verrattuna terveiden  $31,94 \pm 0,54$  °C:een (ANOVA,  $p < 0,01$ ) [45]. Koska lämpökamerakuvantaminen on turvallinen kuvantamismenetelmä, se sopii hyvin herkän silmän alueen tutkimiseen. Tätä tarkoitusta varten on kehitetty tutkimuskäytössä oleva automaattinen järjestelmä, joka havaitsee kuivasilmäisyyden jopa 99,8 % luokittelutarkkuudella [46]. Lisäksi erilaisten lääkkeiden vaikutusta kuivasilmäisyyden hoidossa voidaan tarkkailla lämpökameralla, mikä mahdollistaa toimivan lääkityksen varmistamisen eri potilaille.

## 5. LÄMPÖKAMERAKUVANTAMISEN TULEVAISUUDENNÄKYMÄ

Lämpökameroita käytetään jo monissa erilaisissa sovelluksissa, kuten luvussa 4 on esitetty. Kameroiden nopea kehitys ja yleistyminen käytössä mahdollistavat uusien käyttökohteiden muodostumisen. Näiden lisäksi muiden tekniikkaan liittyvien asioiden, kuten robotiikan ja tekoälyn kehittyminen sekä niiden yhdistäminen lämpökamerakuvantamiseen ovat nousseet suosituiksi tutkimuskohteiksi [47][48][49]. Uusien sovelluksien lisäksi vanhojen käyttökohteiden jatkuva kehittäminen ja automatisoiminen ovat tutkimuskohteita. Esimerkiksi kehitteillä on ratkaisuja, jotka pyrkivät havaitsemaan rintasyöpää sekä diabetekseen liittyviä verisuonisairauksia aikaisessa vaiheessa luotettavammin kuin aiemmin. [50][51]

Tässä luvussa esitetään terveyteen ja hyvinvointiin liittyviä sovelluksia, joissa lämpökameraa voitaisiin mahdollisesti hyödyntää joko yksinään tai osana laajempaa mittausjärjestelmää. Sovellukset ovat osittain uusista konferenssijulkaisuista, joten ne ovat alkuvaiheessa olevia ideoita tai jopa ensimmäisiä aiheeseen liittyviä tutkimuksia [47]. Yhteistä kaikille esitettäville sovelluksille on se, että ne vaativat laajaa jatkotutkimusta aiheeseen liittyen ennen niiden mahdollista käyttöönottoa terveydenhuollossa.

### 5.1 Säännöllisen liikunnan aiheuttama uupumus

Uupumus vaikuttaa heikentävästi sekä fyysiseen että henkiseen toimintaan kehossa. Säännöllistä liikuntaa harrastavilla ja varsinkin urheilijoilla oikean mittaisen levon saaminen on tärkeää korkean suorituskyvyn ylläpitämiseksi. Aiemmin uupumusta on havaittu haukotteluun ja väsyneisyyteen liittyen sekä kasvokuvia analysoivin konenäkösovelluksin, jolla on pääosin tutkittu kasvojen ilmettä [52]. Näistä ei kuitenkaan saada tietoa onko kyseessä fyysisestä vai henkisestä rasituksesta johtuvaa väsymystä. Uudessa tutkimuksessa [47] on esitetty, että lämpökamerakuvantamista ja koneoppimista hyödyntäen voitaisiin havaita fyysisestä rasituksesta johtuvaa uupumusta, jolloin harjoitusohjelma voidaan suunnitella sopivammaksi.

Tutkimuksessa [47] käytettiin älypuhelimeen liitettävää lämpökameraa, jolla eri henkilöiltä otetut kuvat muokattiin näyttämään samasta kuvakulmasta otetuilta nenän ja silmän koordinaattien avulla. Kuvien analysoinnissa käytettiin valmiiksi olemassa olevia koneoppimisalgoritmeja, jonka perusteella henkilö luokiteltiin joko uupuneeksi tai normaaliksi. Älypuhelimeen liitettävän kameran käyttäminen voi viitata siihen, että sovellusta voisi käyttää kuka tahansa lämpökameran omistava henkilö ilman tarvetta erillisiin tutkimuksiin terveydenhuollossa. Sovellus on potentiaalinen käyttökohteeksi jatkuvasti yleistyvillä mikrobolometrikameroille.

Saman tutkimuksen [47] mukaan uupuneilla ihmisillä tapahtuu naamassa lämpötilamuutoksia normaaliin tilaan verrattuna. Nenän ja suun lämpötila on viileämpi sekä silmien alue on lämpöisempi verrattuna muuhun naaman. Lisäksi iholla näkyy lämpötilakuvioita, jotka voivat johtua hikoilusta. Näiden perusteella lämpökamera soveltuu käytettäväksi uupumuksen havaitsemisessa.

Koko kasvokuvan sisältävän informaation on huomattu vaikuttavan lopputulokseen, sillä vain suun tai nenän alueen perusteella ei saatu määritettyä väsymystä. Tällä hetkellä ainoassa koneoppimista hyödyntävässä tutkimuksessa on saavutettu 81,51 % luokittelutarkkuus uupumuksen havaitsemisessa, jonka parantaminen on mahdollista jatkotutkimuksissa esimerkiksi tarkempaa kameraa käyttämällä. Tämän lisäksi uupumuksen eri tasoja voitaisiin tutkia. [47]

## 5.2 Kivun havaitseminen

Kipu on yleinen, jokaisella ihmisellä elämänsä aikana tapahtuva subjektiivinen kokemus, joka liittyy epänormaaliin tilaan kehossa. Kipua on tutkittu vuosikymmenten ajan eri metodeilla ja myös lämpökameran potentiaalia sen havaitsemisessa on tutkittu paljon. Viidennes kaikista lämpökameraan liittyvistä tutkimuksista liittyy kivun havaitsemiseen. Tällä hetkellä kivun arviointi tapahtuu pääasiassa potilaan oman kertomuksen mukaan siitä missä kipu tuntuu ja kuinka kovaa ja minkälaista kipu on, mutta standardisoitua menetelmää ei ole. Lisäksi kivun määrittämiseen on kehitetty kasvojen lihasten kuvaamiseen liittyvä mittausmenetelmä sekä aivojen signaalin tarkasteluun perustuva menetelmä. Näillä menetelmillä ei kuitenkaan saada tarkkaa tietoa kivun lähtökohdasta ja on huomattava, että jokainen tuntee kivun eri lailla. [53]

Kivun havaitseminen lämpökameralla perustuu siihen, että keskushermosto lisää verenkiertoa kivun alueella johtaen paikalliseen lämpötilan nousuun. Hetkellisen kivun aiheuttama nopea lämpötilan muutos voidaan havaita korkean resoluution



lämpökameroilla tai jatkuva kipu voidaan havaita yksinkertaisesti kuvaamalla kehoa lämpöisempää kohtaa etsien ja verraten sen lämpötilaa toisella puolella olevan kehon vastaavan kohtaan [53][54]. Vuonna 2008 julkaistun tutkimuksen [55] mukaan 0,5 °C tai suurempi ero lämpötilassa viittaa mittauspaikassa olevaan kipuun tai sairauteen. Tämän perusteella lämpökameralla voidaan havaita kivun lähtöpiste toisin kuin muilla menetelmillä.

Lämpökameran potentiaalia havaita kipua ihmisen kehossa on tutkittu useilla eri tavoilla. Vuonna 2017 tutkimuksessa kuvattiin ihmisen kasvoja korkearesoluutioisella lämpökameralla samalla kun testihenkilöä pistettiin neulalla raajaan. Tutkimuksessa selviää, että tuntiessaan neulan pistävää kipua koko naaman alueen keskilämpötila nousee ja pistoksen loputtua se rupeaa palautumaan takaisin alkuperäiseen lämpötilaan. [54] Vuonna 2018 julkaistussa tutkimuksessa kuvattiin hermosairaudesta kärsivän potilaan jalkoja ennen ja jälkeen juoksuharjoitusten, jotka potilaan oman kertomuksen mukaan nostivat kiputasoa. Tutkimuksessa jalan lämpötilan havaittiin olevan korkeampi, mitä kovempaa kipua potilas kertoi tuntevansa. [53]

Tutkimukset osoittavat, että lämpökameralla on potentiaalia arvioida kipua objektiivisesti samalla havaiten kivun lähtöpisteen, mutta laajempia tutkimuksia tarvitaan edelleen [53][54]. Lisäksi tulevaisuudessa on mahdollista, että koneoppimista ja tarkempia kameroita hyödyntämällä kehitetään automaattinen järjestelmä, joka pystyisi havaitsemaan ja arvioimaan kipua kehossa tarkasti.

### **5.3 Alaraajojen tukkiva valtimotauti**

Alaraajojen tukkivassa valtimotaudissa eli ääreisvaltimotaudissa henkilön ääreisverenkierto jaloissa on heikentynyt johtuen verta kuljettavien valtimoiden ahtautumisesta. Valtimoiden ahtautuminen johtuu verisuonten seinämille kerääntyneestä kolesterolista. Verenkierron heikentyessä myös hapen määrä jaloissa pienenee, jolloin voi ilmetä kudosten hapenpuutetta. Hapenpuute voi johtaa katkokävelyyn, eli pakottavaan tarpeeseen lopettaa jalkoihin kohdistuva rasitus hetkeksi, tai pahimmillaan raajan amputaatioon. Lisäksi ääreisvaltimotaudissa voi ilmetä lepokipua ja haavaumia jaloissa. Diabetes ja tupakointi ovat riskitekijöitä, mutta myös korkea ikä lisää sairastumisen riskiä. Ääreisvaltimotautia diagnosoidaan tunnustelemalla valtimoiden sykkeet sekä mittaamalla systolisten verenpaineiden suhde nilkasta ja olkavarresta. Myös verenkierron kuvantamistutkimuksia tehdään suunniteltaessa esimerkiksi alaraajan valtimoiden pallolaajennushoitoa. [56][57]

Lämpökameran käyttöä potentiaalisena tutkimusmenetelmänä ääreisvaltimotautia diagnosoitaessa on tutkittu, koska sillä pystytään mittaamaan ihon lämpötila laajalta alueelta reaaliaikaisesti ja ei-invasiivisesti. Koska verenkierron määrä vaikuttaa iholta mitattavaan lämpötilaan, lämpökameralla voidaan potentiaalisesti havaita verenkierron heikkenemisestä johtuvat lämpötilamuutokset. Tutkimuksen [58] mukaan tukkivaa valtimotautia sairastavilla raajoissa esiintyy 0,7–1,0 °C normaalia lämpötilaa korkeampia olevia alueita, jotka voivat johtua tulehduksista tai paikallisista verenkierron muutoksista.

Toisessa tutkimuksessa [59] mitattiin lämpötilat jalkapohjasta ja säärestä levossa, 6 minuutin kävelyn jälkeen sekä rasiuksesta tasaantumisen jälkeen. Tutkimuksessa selviää, että levossa ja rasiuksesta tasaantumisen jälkeen ääreisvaltimotautia sairastavien ja terveiden välillä ei ole lämpötilaeroja. 6 minuutin kävelyn jälkeen mitattuna ääreisvaltimotautia sairastavien jalkojen lämpötilat ovat laskeneet sekä sääressä että jalkapohjassa. Jalkapohjassa lämpötila laski merkittävästi  $1,25 \pm 1,58$  °C verrattuna terveiden  $0,15 \pm 1,31$  °C ( $p < 0,001$ ) lämpötilan laskuun, mikä johtuu heikentyneestä verenkierrosta jaloissa.

Lämpökameran käyttöön liittyviä tutkimuksia ääreisvaltimotaudin diagnosoimisessa on niukasti, mutta se on potentiaalinen käyttökohde tulevaisuudessa. Lämpökameran käyttöä tässä tarkoituksessa tulisi kuitenkin tutkia huomattavasti lisää ja laajemmilla otoksilla verrattuna nykyisiin tutkimuksiin.

## 6. YHTEENVETO

Tässä työssä tarkasteltiin lämpökameroiden ominaisuuksia ja käyttöä terveydenhuollossa. Lisäksi tutkittiin potentiaalisia käyttökohteita lämpökameralle tulevaisuudessa.

Lämpökameroita on kahta päätyyppiä: jäähdytettyä ja jäähdyttämätöntä ilmaisinta käyttäviä. Jäähdytetyt lämpökamerat ovat tyypillisesti kalliimpia ja suurempikokoisia, mutta niiden tarkkuus ja kuvataajuus ovat parempia verrattuna jäähdyttämättömiin. Jäähdyttämättömät mikrobolometrikamerat ovat halpoja ja pienikokoisia kameroita ja niiden hinnan jatkuva aleneminen 2000-luvulla on johtanut niiden yleistymiseen.

Kameratyypistä riippumatta terveydenhuollossa käytetään samanlaista mittausjärjestelmää. Se koostuu kameratelineeseen tai seinään kiinnitetystä kamerasta sekä kameraan liitettävästä tietokoneesta, jossa kuvaan liittyvä jälkiprosessointi tapahtuu. Mittaushuoneen oloihin on suosituksia esimerkiksi lämpötilaan ja ilmankosteuteen liittyen, mutta tarkkoja standardeja ei ole.

Lämpökameran käyttökohteet vaihtelevat laajasti terveydenhuollossa. Sitä käytetään verenkierron, ihosairauksien, kasvainten, lihasten ja sisäelinten erilaisissa tutkimuksissa sekä hammashoidossa ja kuumeseulonnassa. Yleisin ja eniten tutkittu käyttökohde on rintasyövän seulonta. Yhteistä kaikille käyttökohteille on, että lämpökameraa käytetään vain osana diagnoosin tekemistä eli myös muita tutkimusmenetelmiä käytetään joka tapauksessa. Lämpökamerakuvantamisella saadaan tietyissä käyttökohteissa kuitenkin niin tarkkaa informaatiota sairauteen liittyen, että sitä voitaisiin tulevaisuudessa käyttää sellaisenaan diagnoosin tekemisessä.

Lämpökamerakuvantamisen suurimmat edut verrattuna muihin käytössä oleviin kuvantamismenetelmiin ovat sen ei-invasiivisuus, turvallisuus, joustavuus sekä pieni hankinta- ja käyttökustannus. Lisäksi sillä pystytään havaitsemaan tiettyjä sairauksia aikaisessa vaiheessa mahdollistaen hoidon tai ennaltaehkäisevien toimien aloittamisen ajoissa. Tämä voi parantaa selviytymismahdollisuutta esimerkiksi rintasyövän kohdalla.

Kuvantamismenetelmään liittyviä keskeisiä rajoittavia tekijöitä ovat standardoinnin puuttuminen tai vähäisyys sekä kamerasen resoluutio. Lisäksi mikrobolometrikameroissa ilmaisimen toiminnasta johtuva pieni kuvataajuus heikentää käyttöä tietyissä käyttökohteissa, esimerkiksi liikkuvien kohteiden kuvaamisessa. Standardoinnin

vähäisyys aiheuttaa tutkimusten tulosten vertailun vaikeaksi varsinkin vanhojen ja uusien tutkimusten välillä. Näiden lisäksi on huomattava, että ihon lämpötilan muutos on summa kehonsisäisistä muutoksista, joten lämpökameralla otettujen kuvien analysoimisessa tarvitaan paljon ymmärrystä kehon toiminnoista, mikä voi olla rajoittava tekijä lämpökameroiden yleistyessä.

Tulevaisuudessa lämpökameraa voitaisiin potentiaalisesti käyttää esimerkiksi kivun havaitsemisessa ja arvioinnissa sekä uupumuksen havaitsemisessa. Näiden lisäksi lämpökamerakuvantamisen yhdistäminen esimerkiksi robotiikan kanssa voi avata uusia käyttökohteita. Standardien tarkka määrittely lämpökameran käytössä terveydenhuollossa olisi tärkeää vertailukelpoisten tutkimusten aikaansaamiseksi. Tämä voisi myös lisätä lämpökameran käyttöä terveydenhuollossa.

## LÄHTEET

- [1] Wunderlich C.A., On the temperature in diseases: a manual of medical thermometry, The New Sydneyham society, London, 1871, Viitattu 1.3.2020, Saatavissa: <https://archive.org/details/ontemperatureind00wunduoft/mode/2up>
- [2] Herchel W., Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the sun, Royal Society of London, Vol. 90, Jan 1800, s. 284-292, Viitattu 1.3.2020, Saatavissa: <https://archive.org/details/philtrans08733349/mode/2up>
- [3] Hardy J.D., The radiation of heat from the human body, Journal of Clinical Investigation, Vol. 13, No. 4 , Jul 1934, s. 593–620, Viitattu 1.3.2020, Saatavissa: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC436015/?page=1>  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC436016/?page=1>  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC436017/?page=1>
- [4] Francis R., Thermal Imaging Today and Its Relevance to Diabetes, Journal of diabetes science and technology, Vol. 4, No. 4, Jul 2010, s. 857-862, Viitattu 1.3.2020, Saatavissa: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2909517/>
- [5] Hairong Q., Diakides N.A, Infrared Imaging in Medicine, 2005, Viitattu 1.3.2020, Saatavissa: <https://pdfs.semanticscholar.org/ca85/0ac2d59d2202d0ae02400240d820b9119765.pdf>
- [6] Rogalski A., Infrared detectors: status and trends, Progress in Quantum Electronics, Vol. 27, No. 2–3, 2003, s. 59-210, Viitattu 1.3.2020, Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079672702000241>
- [7] FLIR Systems, Inc., Viitattu: 1.3.2020, Saatavissa: <https://www.flir.com/>
- [8] CAT phones, Viitattu: 1.3.2020, Saatavissa: <https://www.catphones.com/en-dk/features/integrated-thermal-imaging/>
- [9] Martin P.L., Electronic Failure Analysis Handbook: Techniques and Applications for Electronic and Electrical Packages, Components, and Assemblies: Infrared thermography, McGRAW-HILL, 1999, Viitattu 1.3.2020, Saatavissa: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780070410442/chapter/chapter6>

- [10] Khandpur R.S, Handbook of Biomedical Instrumentation: Thermal Imaging Systems, McGraw Hill Education, India, 2014, Saatavissa: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9789339205430/chapter/chapter24>
- [11] Lahiri B.B., Bagavathiappan S., Jayakumar T., Philip J, Medical applications of infrared thermography: A review, Infrared Physics & Technology, Vol. 55, No. 4, Mar 2012, s. 221-235, Viitattu 1.3.2020, Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449512000308?via%3DIhub#b0020>
- [12] Fluke PT120, Viitattu: 1.3.2020: Saatavissa: <https://www.yeint.fi/mittaus-ja-testaus/lampokamerat/fluke-pti120-lampokamera>
- [13] FLIR X8500sc MWIR, Viitattu: 1.3.2020, Saatavissa: <https://www.flir.com/products/x8500sc-mwir/>
- [14] What is Infrared (kuva), US Infrared Inc., Viitattu: 1.3.2020, Saatavissa: <https://infrared.com/what-is-infrared%3F>
- [15] Lämpösäteily ja infrapuna, Viitattu:1.3.2020, Saatavissa: <https://www.infradex.com/lamposateily-ja-lampokamera/>
- [16] Sosnowski T., Bieszczad G., Madura H., Image Processing in Thermal Cameras, Studies in Systems, Decision and Control, Jan 2018, s. 35-57, Viitattu 1.3.2020, Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/319912243\\_Image\\_Processing\\_in\\_Thermal\\_Cameras](https://www.researchgate.net/publication/319912243_Image_Processing_in_Thermal_Cameras)
- [17] Cooled or Uncooled, FLIR Systems, Inc., Viitattu: 1.3.2020, Saatavissa: <https://www.flir.com/discover/rd-science/cooled-or-uncooled/>
- [18] Lasanen R., Infrared thermography in the evaluation of skin temperature: Applications in musculoskeletal conditions, Publications of the University of Eastern Finland, Dissertations in Forest and Natural Sciences, No. 186, Oct 2015, Viitattu 1.3.2020, Saatavissa: [https://epublications.uef.fi/pub/urn\\_isbn\\_978-952-61-1880-2/urn\\_isbn\\_978-952-61-1880-2.pdf](https://epublications.uef.fi/pub/urn_isbn_978-952-61-1880-2/urn_isbn_978-952-61-1880-2.pdf)
- [19] Simpson R., Machin G., McEvoy H., Rusby R., Traceability and calibration in temperature measurement: a clinical necessity, Journal of Medical Engineering & Technology, Vol. 30, No. 4, Aug 2006, s. 212-217, Viitattu 3.3.2020, Saatavissa:

[https://www.researchgate.net/publication/311321954\\_traceability\\_and\\_calibration\\_in\\_temperature\\_measurement\\_a\\_clinical\\_necessity](https://www.researchgate.net/publication/311321954_traceability_and_calibration_in_temperature_measurement_a_clinical_necessity)

- [20] Ring E.F.J., Ammer K., Infrared thermal imaging in medicine, *Physiological measurement*, Vol. 33, Mar 2012, s. R33-46, Viitattu 3.3.2020, Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/221866446\\_Infrared\\_thermal\\_imaging\\_in\\_medicine](https://www.researchgate.net/publication/221866446_Infrared_thermal_imaging_in_medicine)
- [21] Chojnowski M., Infrared thermal imaging in connective tissue diseases, *Reumatologia*, Vol. 55, No. 1, Mar 2017, s. 38-43, Viitattu 3.3.2020, Saatavissa: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5380771/>
- [22] Amalu W.C., Hobbins W.B., Elliot R.L., *Infrared Imaging of the Breast*, 2006, Viitattu 13.3.2020, Saatavissa: <https://www.semanticscholar.org/paper/Infrared-Imaging-of-the-Breast-%E2%80%94-An-Overview-Amalu-Hobbins/43087de1f65076985a238f9a0a0c519417a3379d#paper-header>
- [23] Agarwal-Kozlowski K., Lange A-C., Beck, H., Contact-free Infrared Thermography for Assessing Effects during Acupuncture: A Randomized, Single-blinded, Placebo-controlled Crossover Clinical Trial, *Anesthesiology*, Vol. 111, No. 3, Sep 2009, s. 632-639, Viitattu 13.3.2020, Saatavissa: <https://anesthesiology.pubs.asahq.org/article.aspx?articleid=1924163>
- [24] Viro alkaa mitata matkustajien kuumetta lentokentällä, MTV uutiset, Julkaistu: 29.2.2020, Viitattu: 31.3.2020, Saatavissa: <https://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/viro-alkaa-mitata-matkustajien-kuumetta-lentokentalla-lampokameroiden-hinta-nousee-30-000-euroon/7745164>
- [25] MRI machine cost and price guide, Block Imaging, Viitattu: 31.3.2020, Saatavissa: <https://info.blockimaging.com/bid/92623/mri-machine-cost-and-price-guide>
- [26] Kuvantamistutkimusten hinnasto, Mehiläinen, Viitattu: 31.3.2020, Saatavissa: <https://www.mehilainen.fi/kuvantaminen/hinnat>
- [27] Inzenter, Viitattu 27.4.2020, Saatavissa: <https://inzenter.com/?lang=fi>
- [28] Fauci M.A., Breiter R., Cabanski W., Koch R., Ziegler J., Gunapala S.D., Medical infrared imaging – differentiating facts from fiction, and the impact of high precision quantum well infrared photodetector camera systems, and other factors, in its reemergence, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 42, No. 3–5, Jun 2001, s. 337-344, Viitattu 13.3.2020, Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449501000937>

- [29] Vainionpaa M., Raekallio M., Tuhkalainen E., Hanninen H., Alhopuro N., Savolainen M., Junnila J., HielmBjorkman A., Snellman M. and Vainio O., Comparison of three thermal cameras with canine hip area thermographic images, *Journal of Veterinary Medical Science*, Vol 74, No. 12, 2012, s. 1539-1544, Viitattu 13.3.2020, Saatavissa: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jvms/74/12/74\\_12-0180/article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jvms/74/12/74_12-0180/article)
- [30] Hildebrandt C., Raschner C., Ammer K., An Overview of Recent Application of Medical Infrared Thermography in Sports Medicine in Austria, *Sensors (Basel)*, Vol. 10, No. 5, May 2010, s. 4700-4715, Saatavissa: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3292141/>
- [31] Lingxi P., Chen W., Zhou W., Li F., Yang J., Zhang J., An Immune-inspired semi-supervised algorithm for breast cancer diagnosis, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Vol. 134, Oct 2016, s. 259-265, Viitattu: 1.3.2020, Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016926071530359X#!>
- [32] Araújo M.C., Lima R.C.F., Interval symbolic feature extraction for thermography breast cancer detection, *Expert System with Applications*, Vol. 41, No. 15, Nov 2014, s. 6728-6737, Viitattu 1.3.2020, Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417414002504>
- [33] Tavakol M.E., Chandran V., Ng E.Y.K., Kafieh R., Breast cancer detection from thermal images using bispectral invariant features, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 69, Jul 2013, s. 21-36, Viitattu 1.3.2020, Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072913000380>
- [34] FDA Warns Thermography Should Not Be Used in Place of Mammography to Detect, Diagnose, or Screen for Breast Cancer: FDA Safety Communication, Viitattu: 27.4.2020, Saatavissa: <https://www.fda.gov/medical-devices/safety-communications/fda-warns-thermography-should-not-be-used-place-mammography-detect-diagnose-or-screen-breast-cancer>
- [35] Vardasca R., Magalhaes C., Mendes J., Biomedical Applications of Infrared Thermal Imaging: Current State of Machine Learning Classification, *Proceedings*, Vol. 27, No. 1, Oct 2019, Viitattu 1.3.2020, Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2504-3900/27/1/46>
- [36] Breast Termography (kuva), Viitattu: 1.3.2020, Saatavissa: [http://www.breastthermography.com/case\\_studies.htm](http://www.breastthermography.com/case_studies.htm)
- [37] Diabetes, *Lääkärikirja Duodecim*, 2018, Viitattu 1.4.2020, Saatavissa: [https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p\\_artikkeli=dlk00011](https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk00011)



- [38] Sun P., Lin H., Jao S.E., Ku Y., Chan R., Cheng C., Relationship of skin temperature to sympathetic dysfunction in diabetic at-risk feet, *Diabetes Research and Clinical Practice*, Vol. 73, No.1, Jul 2006, s. 41-46, Viitattu 1.4.2020, Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168822706000106>
- [39] SARS ja MERS, Lääkärikirja Duodecim, 2020, Viitattu: 31.3.2020, Saatavissa: [https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p\\_artikkeli=dlk00603](https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk00603)
- [40] Koronavirus COVID-19, Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, Päivitetty 19.3.2020, Viitattu: 31.3.2020, Saatavissa: <https://thl.fi/fi/web/infektiotaudit-ja-rokotukset/taudit-ja-torjunta/taudit-ja-taudinaiheuttajat-a-o/koronavirus-covid-19>
- [41] Coronavirus COVID-19 Global Cases, Johns Hopkins University, Päivitetty 20.4.2020, Viitattu 20.4.2020, Saatavissa: <https://coronavirus.jhu.edu/map.html>
- [42] Viro tunnistaa koronavirukseen sairastuneita lämpökameroilla, IS uutiset, Julkaistu: 6.3.2020, Viitattu: 31.3.2020, Saatavissa: <https://www.is.fi/kotimaa/art-2000006431158.html>
- [43] Tallinnan satamiin asennettiin lämpökamerat risteilymatkustajien skannaamiseksi, IS uutiset, Julkaistu: 9.3.2020, Viitattu: 31.3.2020, Saatavissa: <https://www.is.fi/ulkomaat/art-2000006433695.html>
- [44] Kuivasilmäisyyden hoito, Lääkärikirja Duodecim, 2018, Viitattu: 9.4.2020, Saatavissa: [https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p\\_artikkeli=dlk01218](https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk01218)
- [45] Morgan P.B., Tullo A.B., Efron N., Infrared thermography of the tear film in dry eye, *Eye*, Vol. 9, Sep 1995, s.615-618, Viitattu 9.4.2020, Saatavissa: <https://www.nature.com/articles/eye1995149>
- [46] Acharaya U.R., Tan J.H., Koh J.E.W., Sudarshan V.K., Yeo S., Too C.L., Chua C.K., Ng E.Y.K., Tong L., Automated diagnosis of dry eye using infrared thermography images, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 71, Jul 2015, s. 263-271, Viitattu 9.4.2020, Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449515000869#b0340>
- [47] Lopez M.B., del-Blanco C.R., Garcia N., Detecting exercise-induced fatigue using thermal imaging and deep learning, 2017 Seventh International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA), Montreal, 2017, s. 1-6, Viitattu 7.4.2020, Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8310151>
- [48] Sorostinean M., Ferland F., Tapus A., Reliable stress measurement using face temperature variation with a thermal camera in human-robot interaction, 2015

- IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), Seoul, 2015, s. 14-19, Viitattu 7.4.2020, Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7363516>
- [49] Coşar S., Yan Z., Zhao F., Lambrou T., Yue S., Bellotto N., Thermal Camera Based Physiological Monitoring with an Assistive Robot, 2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Honolulu, 2018, s. 5010-5013, Viitattu 7.4.2020, Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8513201>
- [50] Quinn S., Saunders C., Clealand I., Nugent C., Garcia-Constantino M., Cundell J., Madill G., Morrison G., A Thermal Imaging Solution for Early Detection of Pre-ulcerative Diabetic Hotspots, 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Berlin, 2019, s. 1737-1740, Viitattu 7.4.2020, Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8856900>
- [51] Anupama P., Rakesh G., Jithin S., Lekshmi G., Manju B.K., Basheer B., Design of a highly accurate data acquisition device for thermal imaging based early detection of breast cancer, TENCON 2019 - 2019 IEEE Region 10 Conference (TENCON), Kochi, India, 2019, s. 2439-2443, Viitattu 7.4.2020, Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8929300>
- [52] Fan X., Sun Y., Yin B., Guo X., Gabor-based dynamic representation for human fatigue monitoring in facial image sequences, Pattern Recognition Letters, Vol. 31, No. 3, Feb 2010, s. 234-243, Viitattu 7.4.2020, Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167865509002268>
- [53] Pal N., Kilaru A., Savaria Y., Lakhssassi A., Thermal image processing to Recognize and Quantify Pain in Human Body, 2018 International Conference on Smart Computing and Electronic Enterprise (ICSCEE), Shah Alam, 2018, s. 1-5, Viitattu 7.4.2020, Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8538368>
- [54] Erel V., Ozkan H.S., Thermal camera as a pain monitor, Journal of Pain Research, Vol 10, Dec 2017, s. 2827-2832, Viitattu 20.4.2020, Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/321788348\\_Thermal\\_camera\\_as\\_a\\_pain\\_monitor](https://www.researchgate.net/publication/321788348_Thermal_camera_as_a_pain_monitor)
- [55] Lee J., Song S., Lee H., Lee S., Lee K., Yoon Y., Detection of Suspicious Pain Regions on a Digital Infrared Thermal Image using the Multimodal Function Optimization, Conference proceedings : ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Vol. 2008, Feb 2008, s. 4055-8, Viitattu 20.4.2020, Saatavissa:

[https://www.researchgate.net/publication/23932771\\_Detection\\_of\\_Suspicious\\_Pain\\_Regions\\_on\\_a\\_Digital\\_Infrared\\_Thermal\\_Image\\_using\\_the\\_Multimodal\\_Function\\_Optimization](https://www.researchgate.net/publication/23932771_Detection_of_Suspicious_Pain_Regions_on_a_Digital_Infrared_Thermal_Image_using_the_Multimodal_Function_Optimization)

- [56] Alaraajojen tukkiva valtimotauti, Lääkäriseura Duodecim Käypä hoito -suositus, 2010, Viitattu 2.5.2020, Saatavissa:  
[https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p\\_artikkeli=khp00093](https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=khp00093)
- [57] Ouriel K., Peripheral arterial disease, The Lancet, Vol. 358, No. 9289, Oct 2001, s. 1257-1264, Viitattu 2.5.2020, Saatavissa:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140673601063516?via%3Dihub>
- [58] Bagavathiappan S., Saravanan T., Philip J., Jayakumar T., Raj B., Karunanithi R., Panicker T.M.R., Korath M.P., Jagadeesan K., Infrared thermal imaging for detection of peripheral vascular disorders, Journal of Medical Physics, Vol. 34, No. 1, Jan 2009, s. 43-47, Viitattu 2.5.2020, Saatavissa:  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2804148/>
- [59] Huang C-L., Wu Y-W., Hwang C-L., Jong Y-S., Chao C-L., Chen W-J., Wu Y-T., Yang W-S., The application of infrared thermography in evaluation of patients at high risk for lower extremity peripheral arterial disease, Journal of Vascular Surgery, Vol. 54, No. 4, Oct 2011, s. 1074-1080, Viitattu 2.5.2020, Saatavissa:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0741521411008391#tbl2>