Verenpaineen mittaaminen älypuhelimella

Turun yliopisto
Tietotekniikan laitos
TkK-tutkielma
Lääketieteellinen tekniikka ja terveysteknologia
Maaliskuu 2025
Matilda Paananen

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

TURUN YLIOPISTO
Tietotekniikan laitos

Matilda Paananen: Verenpaineen mittaaminen älypuhelimella

TkK-tutkielma, 33 s.
Lääketieteellinen tekniikka ja terveysteknologia
Maaliskuu 2025

Kohonnut verenpaine on merkittävä kansanterveysongelma, mikä lisää terveysriskejä ja kuormittaa terveydenhuoltoa. Säännöllinen verenpaineen seuranta ja terveelliset elintavat voivat ehkäistä verenpaineen kohoamista haitalliselle tasolle. Tällä hetkellä seuranta perustuu kuitenkin pääasiassa lääkärin vastaanotolla tehtäviin mittauksiin. Älypuhelinpohjaiset mittausratkaisut voivat tarjota uudenlaisen ja saavutettavamman tavan verenpaineen säännölliseen seurantaan.

Tässä kandidaatintutkielmassa tutkitaan, onko verenpaineen mittaaminen mahdollista pelkän älypuhelimen avulla sekä millaista tarkkuutta eri mittausmenetelmillä voidaan saavuttaa. Tutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Älypuhelimeen perustuvaa verenpaineen mittausta tarkastellaan tutkimalla kolmea keskeistä puettavien laitteiden teknologiaa: fotopletysmografiaa (PPG), seismokardiografiaa (SKG) ja venymäliuska-anturia.

Tutkimustulokset osoittavat, että älypuhelimien sisäänrakennettujen sensorien, kuten PPG:n ja SKG:n, avulla on mahdollista kehittää vaihtoehtoinen menetelmä perinteisille olkavarsimittareille. Mittaustarkkuus ja käytettävyys riippuvat kuitenkin merkittävästi niin sensorien kuin käyttäjän suorittamien mittausten laadusta. Mittaustarkkuutta voidaan parantaa hyödyntämällä räätälöityjä sensoreita ja kehittyneempiä algoritmeja. Menetelmien validointi ja laajamittaisen käytettävyyden tutkiminen edellyttävät kuitenkin jatkotutkimusta.

Asiasanat: verenpaine, älypuhelin, PPG, SKG, venymäliuska -anturi

Sisällys

1 Johdanto **1**

2 Verenpaine ja sen mittausperiaate **3**

3 Puettavien laitteiden yleisiä teknologioita **6**

3.1 Fotopletysmografia 6

3.2 Seismokardiografia 8

3.3 Venymäliuska -anturi 11

4 Teknologioiden soveltaminen verenpaineen mittaamisessa **12**

5 Älypuhelintoteutus **16**

5.1 Seismo: PTT-pohjainen mittaus älypuhelimen sensoreilla 17

5.2 Pulssimuodon analyysi koneoppimisella 19

5.3 Oskillometrinen sormenpainallustekniikka voima-anturilla toteutettuna 20

5.4 Oskillometrinen sormenpainallustekniikka ilman voima-anturia 22

6 Loppupäätelmät **26**

Lähdeluettelo **34**

1 Johdanto

Sydän- ja verisuoniperäiset sairaudet ovat merkittäviä, terveitä elinvuosia vieviä sairauksia, maailmanlaajuisesti. Kohonnut verenpaine kuuluu niistä yleisimpiin, koska se aiheuttaa noin kymmenen miljoonaa ennenaikaista kuolemaa vuosittain. Suomen mittakaavassa vain joka viidennen aikuisen verenpaine on viitearvojen sisällä. Suurimpia kohonneen verenpaineen riskitekijöitä ovat liiallinen natriumin saanti, alkoholin käyttö, vähäinen liikunta ja ylipaino. Säännöllisellä verenpaineen mittaamisella ja elintavoilla on siis suora merkitys terveyden ylläpitämisessä. Kohonnutta verenpainetta voidaan myös kontrolloida tarvittaessa lääkityksellä. [1]

Perinteiset verenpaineen mittaustavat vaativat joko terveydenhuollon ammattilaisen apua taikka erillisen mittauslaitteen, kuten olkavarsimittarin. Erillisen mittauslaitteen tarve vähentää säännöllistä mittausta huomattavasti ja siksi puettavien sensoriratkaisujen kehittäminen on tärkeää. [2] Tässä kirjallisuuskatsauksessa käsitellään verenpaineen mittausta älypuhelimella, sillä älypuhelimia on jo tarjolla määrällisesti enemmän kuin maailmassa on ihmisiä [3]. Täten älypuhelinpohjaisella verenpainemittauksella on mahdollisuus kasvattaa verenpainemittauksen saatavuutta merkittävästi.

Tämä tutkimus on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää älypuhelinpohjaisen verenpainemittauksen mahdollisuuksia ja vaadittavia teknologiaratkaisuja tarkkuuden tarkastelua unohtamatta. Tämän kirjallisuuskatsauksen tutkimuskysymykset ovat:

TK1: Voidaanko verenpainetta mitata pelkästään älypuhelimella?

TK2: Mikä mittauksen tarkkuus on?

Verenpaineen mittaamiseen on tutkittu ja kehitetty myös lukuisia älypuhelimen lisälaitteita, mutta tässä kirjallisuuskatsauksessa katsaus rajataan vain suoraan älypuhelimella toteutettaviin mittauksiin ja älypuhelimen sisäänrakennettuihin sensoreihin. Esitellyiksi teknologioiksi on valittu monissa puettavissa laitteissa käytössä olevat teknologiat fotopletysmografia, seismokardiografia ja kohdistetun paineen mittaus venymäliuska-anturilla. Edellä mainitut mittausteknologiat ovat lähtökohtaisesti mahdollisia älypuhelimeen sisäänrakennetuilla sensoreilla.

Tutkielman tiedonhakuun käytettiin pääsääntöisesti Google Scholaria, IEEE-hakuportaalia ja PubMediä. Hakutulosten rajaamiseen käytettiin avainsanoja kuten: PPG, SKG, strain gauge array, mobile phone, blood pressure, cuffless, wearable ja technology. Avainsanoista yhdisteltiin erilaisia hakulauseita. Kirjallisuuskatsaukseen perehtymisen aloitin hakulauseella: "blood pressure"AND "mobile phone". Hakulause tuotti valtavan määrän tuloksia, joista osa valikoitui jatkotarkasteluun otsikon ja tiivistelmän perusteella. Tämän jälkeen hakulausetta tarkennettiin tarpeen ja käsiteltävän luvun mukaan.

Tutkielman luvussa 2 taustoitetaan tutkielman aihetta esittelemällä verenpaineen taustalla vaikuttava fysiologia. Luvussa käsitellään sydämen toiminta, verenpaineen synty ja sen mittausperiaate. Luvussa 3 esitellään fotopletysmografian, seismokardiografian ja venymäliuska-anturin toimintaperiaatteet. Tämän jälkeen luvussa 4 esitellään teknologioiden soveltuvuus erityisesti verenpaineen mittaamiseen ja teknologioiden tärkeitä muuttujia tutkielman kontekstissa. Luvussa 5 päästään älypuhelintoteutuksiin, joilla on onnistuttu mittaamaan verenpainetta sormen päästä. Lopulta luvussa 6 pohditaan älypuhelintoteutusten tarkkuutta, mahdollisuuksia ja haasteita.

2 Verenpaine ja sen mittausperiaate

Veren virtaamisesta verenkiertoelimistön läpi vastaa sydän. Sydänlihas toimii supistuessaan pumppuna ja sen tarkoituksena on synnyttää paine-eroja, jolloin veri pääsee virtaamaan korkeammasta matalampaan paineeseen. Pumppausvoiman synnyttämä paineaalto kuljettaa veren valtimoita pitkin hiussuoniin asti. [4]

Sydän rakentuu kahdesta puoliskosta, joista kumpikin jakautuu eteiseen ja kammioon. Onteloiden välissä sijaitsevat läpät, jotka estävät veren takaisinvirtauksen sydämessä. Vähähappinen veri saapuu laskimoita pitkin oikeaan eteiseen ja poistuu happirikkaana vasemman kammion kautta valtimoihin. Eteisten pääasiallisena tehtävänä on varastoida verta ja pumpata veri kammioihin. Kammioiden pumppausvoima on eteisiä suurempi, sillä kammioiden tehtävänä on työntää veri ulos sydämestä korkealla paineella. [4], [5]

Sydämen toimintakierto muodostuu kahdesta päävaiheesta: diastolesta ja systolesta. Diastolen aikana kammiot veltostuvat, ja kammiopaine laskee eteispaineen alle, jolloin kammiot täyttyvät verellä. Systolen aikana kammiot supistuvat ja paine kasvaa nopeasti. Samaan aikaan eteiset täyttyvät verellä. Systole päättyy, kun vasemman kammion paine kasvaa aorttapainetta suuremmaksi, mikä aikaansaa aorttaläpän avautumisen.

Aorttaläpän avautuminen aiheuttaa paineaallon, jolloin aortan ja suurten valtimoiden seinät venyvät. Systolevaiheen jälkeen aorttaläppä sulkeutuu, mutta korkea valtimopaine säilyy kimmoisten valtimoseinien vuoksi. Diastolen aikana valtimopai-

ne laskee. Sydämen syklin korkein verenpainearvo eli systolinen paine saavutetaan systolen aikana ja matalin eli diastolinen paine diastolen aikana. [4], [6]

Ihmisen verenpainetta mitataan valtimoverenpaineesta. Mittaus tehdään sydämen tasolta, jottei painovoima vaikuta mittaustulokseen. Valtimoverenpaine mitataan tyypillisesti oskillometrisella tekniikalla olkavarteen asetettavan mansetin avulla. Olkavarsimansetin käyttö ei vaadi ammattitaitoa ja onkin siksi suosittu kotimittaustapa. Mittaus perustuu valtimoon kohdistettavan paineen säätelyyn. Mittauksen alussa mansetti pumpataan täyteen ilmaa, jolloin mansettipaine ylittää systolisen paineen ja puristaa olkavaltimon kiinni. Tällöin valtimon painevaihteluita ei havaita. Mansetin painetta lasketaan sitten hiljalleen, jolloin veren virtaus palautuu ja aiheuttaa mansetin sisällä havaittavia painevaihteluita. Kun mansetin paine vastaa valtimon keskipainetta, mansetin sisäiset painevaihtelut saavuttavat suurimman voimakkuutensa. Tämän jäkeen paineen vaihtelut alkavat vähentyä. Automaattiset olkavarsimittarit analysoivat nämä vaihtelut mittausalgoritmiensa avulla ja laskevat systolisen ja diastolisen verenpaineen arvot keskipaineen perusteella. [6], [7]

Verenpaineesta mitataan systolista, diastolista ja keskiverenpainetta, mutta verenpaine ilmoitetaan yleensä muodossa systolinen/diastolinen. Nuoren aikuisen normaali verenpaine levossa on noin 120/80 mmHg. Mikäli verenpaine kohoaa pitkäaikaisseurannassa yli 140/90 mmHg:iin, kyseessä on kohonnut verenpaine, joka voi johtaa sydän- ja verisuonisairauksiin. [1] Valtimoverenpaineen suuruuteen vaikuttavat lukuisat tekijät, kuten sydämen minuuttitilavuus, valtimoiden kimmoisuus, verenkierron vastus, verimäärä, mieliala ja fyysinen aktiivisuus [4].

Mitatun verenpaineen mittaustarkkuuden arvioinnissa käytetään usein keskiarvon ja keskihajonnan määreitä (engl. mean $\pm$ standard deviation, SD), jotka kuvaavat mittaustulosten keskimääräistä arvoa ja niiden hajontaa. Määreitä käytetään vertaamaan mittaustuloksia referenssilaitteen arvoihin ja ne auttavat arvioimaan mittausmenetelmän toistettavuutta ja luotettavuutta.

Graafisesti mittauksen tarkkuus esitetään yleensä korrelaatio- ja Bland-Altman-kuvaajilla. Korrelaatiokuvaaja näyttää, kuinka hyvin uusi menetelmä korreloi referenssimenetelmän kanssa. Korrelaatiokuvaajassa tarkastellaan erityisesti Pearsonin kerrointa (r). Mitä lähempänä se on arvoa 1.0, sitä vahvempi yhteys mittausmenetelmien välillä on. Bland-Altman-kuvaaja havainnollistaa mittausmenetelmien välistä eroa (engl. bias) ja mittaustulosten hajontaa. Kuvaaja auttaa arvioimaan, ovatko erot hyväksyttävällä tasolla ja missä määrin mittaukset ovat yhdenmukaisia. Bland-Altman-kuvaajassa esitetään myös luottamusrajat, jotka auttavat arvioimaan mittausmenetelmien yhdenmukaisuutta ja mahdollisia systemaattisia virheitä. [8]

3 Puettavien laitteiden yleisiä teknologioita

Elektrokardiogrammin (EKG) käyttö on perinteisesti suosittu menetelmä sydämen toiminnan seuraamisessa, mutta sen ehdottomia haasteita ovat esimerkiksi käyttömukavuus ja sen suppea soveltamisympäristö [9]. Fotopletysmografia (PPG), seismokardiografia (SKG) ja venymäliuska-anturi edustavat nykyaikaisia teknologioita, jotka tarjoavat joustavia ja sopeutuvia ratkaisuja eri ympäristöissä tapahtuviin mittaustarpeisiin. Niiden etuja ovat muun muassa ei-invasiivisuus, kompaktius ja mahdollisuus reaaliaikaisen tiedon soveltamiseen. [10], [11]

Tässä luvussa käsitellään kolmea sensoriteknologiaa, jotka ovat saaneet erityistä jalansijaa sekä lääketieteellisissä että yleisissä kuluttajalaitteissa, erityisesti puettavien laitteiden sensoriteknologioissa.

3.1 Fotopletysmografia

Fotopletysmografia on optinen mittausmenetelmä, jossa valonlähteen ja fotodetektorin avulla saadaan tietoa ihmisen fysiologisista muuttujista, kuten sydämen sykkeestä tai happisaturaatiosta. Ei-invasiivinen mittaus suoritetaan ihon pinnalta, ja se perustuu fotodetektorin havaitsemaan valonmäärän vaihteluun. Tutkimusten mukaan pulssi on helpoimmin mitattavissa esimerkiksi korvalehdestä, ranteesta tai sormenpäästä. [12]

Fotopletysmografiasensorin perusrakenne koostuu valonlähteestä sekä fotodetektorista. Mittauksessa käytetään tyypillisesti LEDiä valonlähteenä sen sopivan aallonpituus alueen vuoksi. LEDit ovat lisäksi energiatehokkaita ja pieniä, jonka vuoksi ne ovat helposti integroitavissa puettaviin laitteisiin. Puettavien laitteiden käyttötapauksissa valonlähteen on oltava muun muassa pitkäikäinen, kompakti ja luotettava. Onnistuneen mittaustuloksen saavuttamiseksi valonlähteen ei tulisi myöskään kuumentaa ihokudosta, johon se on mittauksen aikana kosketuksissa.

PPG:llä on kaksi erilaista toimintakonfiguraatiota, transmissiivinen ja reflektiivinen. Transmissiivisessa PPG:ssä mitattu kudos, esimerkiksi sormenpää, asetetaan valonlähteen ja fotodetektorin väliin. Mittaus perustuu tällöin kudoksen läpi kulkevan valon havaitsemiseen. Reflektiivisessä PPG:ssä valonlähde ja fotodetektori asetetaan rinnakkain, jolloin havaittava valoenergia perustuu heijastumiseen. PPG on erityisen hyödyllinen veren virtaamismuutosten tarkastelussa, koska veri absorboi enemmän valoa kuin ympäröivät kudokset. Pulssiaallon saapuessa mittauskohtaan veren lisääntynyt volyymi absorboi enemmän valoa. [10]

LED muuntaa sähköenergiaa fotodetektorin havaitsemaksi valoenergiaksi. Fotodetektorin toiminta on päinvastainen LEDiin nähden: se muuntaa valoenergian sähköiseksi signaaliksi. Mikäli fotodetektori toimii infrapunan aallonpituudella, sen yhteyteen voidaan asentaa suodatin, joka parantaa mittausten luotettavuutta päivänvalossa. Puettavien laitteiden näkökulmasta fotodetektorin etuja ovat muun muassa sen kompakti koko, herkkyys sekä nopea vasteaika. [13]

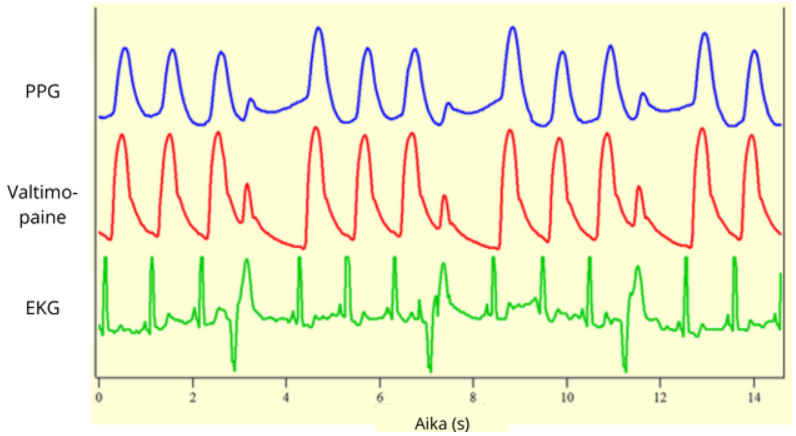
Mittauksissa käytettävät valon aallonpituudet valitaan yleensä näkyvän punaisen ja lähi-infrapunan alueelta, koska ne sopivat parhaiten valon ja kudoksen vuorovaikutusten hyödyntämiseen. Kudokset, jotka sisältävät runsaasti vettä, absorboivat voimakkaasti ultraviolettivaloa sekä pitkien infrapuna-aaltojen valoa. Lyhyemmillä aallonpituuksilla melaniini puolestaan absorboi valon lyhyempiä aallonpituuksia tehokkaasti. Näkyvän punaisen ja lähi-infrapunan aallonpituudet pystyvät kuiten-

kin läpäisemään kudoksen niin sanotun optisen vesiraon, minkä ansiosta ne ovat yleisimmin käytettyjä valonlähteitä fotopletysmografiassa. Lisäksi nämä aallonpituudet tunkeutuvat riittävän syvälle kudokseen, mahdollistaen tarkat mittaukset. Veren oksyhemoglobiini ja hemoglobiini absorboivat valoa eri tavoin aallonpituudesta riippuen. Valitsemalla isobestisen aallonpituuden, jolla molemmat absorboivat yhtä paljon valoa, voidaan estää veren happisaturaation vaihteluiden vaikutus mittaustuloksiin. [10]

Fotopletysmografiasta saatava aaltomuoto jaetaan AC- ja kvasi-DC-komponentteihin. Komponenttien nimitykset juontavat juurensa sähkötekniikan termeihin vaihtovirta (engl. alternating current, AC) ja tasavirta (engl. direct current, CD). Aaltomuodon sykkivää osaa kutsutaan AC-komponentiksi, koska se edustaa sykkeen aiheuttamia vaihteluita verenkierrossa. Toisin sanoin AC-komponentti edustaa säännöllisesti ajan myötä vaihtuva signaalia. Komponentin taajuus on yleensä noin yhden hertsin, riippuen sykkeestä. AC-komponentti on päällekkäinen suuremman kvasi-DC-komponentin kanssa. DC-komponentti viittaa siihen osaan signaalia, joka muuttuu hitaasti tai on lähes vakio ajan kuluessa kuten tasavirta. Tämä komponentti kuvaa kudosten ja verisuonten hitaampia muutoksia, kuten hengityssyklin vaikutusta veren tilavuuteen [10], [14]. Aaltomuodon komponentit voidaan erottaa toisistaan suodattamalla ja vahvistamalla signaalia pulssiaallon myöhempää analysointia varten [10]. Kuvassa 3.1 on esitetty PPG- ja EKG-aaltojen suhde toisiinsa.

3.2 Seismokardiografia

Seismokardiografia (SKG) on teknologia värähtelyiden mittaamiseen, mitä mitataan kiihtyvyytenä (m/s^2). Ihmiskehossa tätä ei-invasiivista menetelmää käytetään sydämen toiminnan mittaamiseen ja arviointiin. Hienovarainen värähtely, joka havaitaan ihmisen rintakehästä, syntyy sydämen sykkeen ja veren pumppauksen seurauksena.



Kuva 3.1: PPG, valtimopaine ja EKG ajan suhteen (muokattu lähteestä [13]).

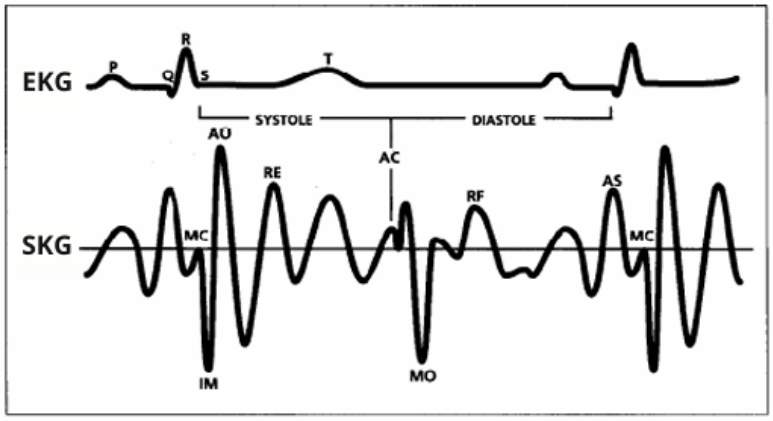
SKG:n muodostama aaltomuoto kuvaa sydämen toimintasyklin eri mekaanisia vaihteita. [11]

SKG:sta saatava signaali riippuu käytetystä sensorityypistä. Sensorissa voi olla yksi tai useampi akseli, sekä se voi tarjota kiertoliikkeeseen liittyvää tietoa. [15] Kolmeakselinen kiihtyvyysanturi on tyypillinen SKG:n mittauksessa käytetty sensorityyppi. Kiihtyvyysanturin mittaamat kolme suuntaa ovat x-, y- ja z-akselit. X-akseli vastaa vaakasuuntaista mittausta, joka ulottuu olkapäästä olkapäähän, y-akseli pituussuuntaista mittausta päästä varpaisiin, ja z-akseli syvyyssuuntaista mittausta selästä vatsaan [9]. Näistä suuntauksista vahvin signaali saadaan z-akselilta [16]. Sensori voi kuitenkin sisältää myös gyroskoopin eli kulmanopeusanturin, jolla saadaan mitattua kiertyvät suunnat ja täten saatu signaali on kattavampi [15]. Sensori vaatii edellä mainittujen komponenttien lisäksi myös signaalin käsittelyyn soveltuvan piirin. Sensorilla saatavat signaalit ovat hyvin pieniä, joten ne on vahvistettava ja suodatettava häiriöiltä luettavan kuvaajan muotoon. [17]

Järkevän mittaustuloksen aikaansaamiseksi SKG-sensori on asetettava mitattavan rintakehälle. Tarkempi sijoituspaikka on yleensä joko rintalastan päällä tai sen vasemmassa alareunassa. Mittaus voidaan suorittaa myös esimerkiksi rintalastan muilta alueilta, kuten niin sanotulta aorttaläpän kuuntelualueelta. [15]

SKG:stä saatava aaltomuoto muistuttaa perinteistä EKG:tä, ja aaltomuodot

ovat vertailukelpoisia sydämen syklin vaiheiden kuvaamisessa. Seismokardiografiassa voidaan tunnistaa sydämen toiminnan keskeiset tapahtumat, kuten mitraaliläpän avautumis- ja sulkeutumishetket (MO, MC) sekä aorttaläpän avautumis- ja sulkeutumishetket (AO, AC) . Lisäksi aaltomuodosta voidaan havaita kammioiden nopea täyttyminen (RF) ja ejektio (RE) sekä eteissystole (AS). [17] SKG:n ja EKG:n välinen vertailukelpoisuus on havainnollistettu kuvassa 3.2.



Kuva 3.2: EKG:n ja SKG:n suhde toisiinsa sekä sydämen syklin vaiheet (muokattu lähteestä [17]).

Seismokardiografiasta saatavaa tietoa voidaan soveltaa monenlaisiin tarkoituksiin. Mittauksella voidaan tutkia esimerkiksi sydämen sykettä ja mahdollisia sykkeen häiriötilanteita. SKG:ta hyödynnetään pulssin kulkuajan (engl. pulse transit time, PTT) määrittämisessä, jota voidaan hyödyntää verenkiertoelimistön terveydenseurannassa. Lisäksi mittausta voidaan hyödyntää sydämen toiminnan intervallien tutkimisessa. [15]

3.3 Venymäliuska -anturi

Venymäliuska -antureita sovelletaan laajalti eri aloilla, kuten terveysteknologiassa ja rakennusten kunnon valvonnassa [18], [19]. Anturit mittaavat ulkoisia voimia, kuten kuormitusta, jännitystä ja painetta, ja auttavat näin arvioimaan esimerkiksi rakenteiden tai kudosten kestävyyttä ja käyttäytymistä rasituksessa. Antureiden toiminta perustuu siihen, että anturin sähköinen resistanssi muuttuu siihen kohdistuvan mekaanisen rasituksen mukaisesti.

Mittaustilanteessa venymäliuska-anturi havaitsee pinnan rasituksen, joka siirtyy anturin sähkönjohtimeen ja aiheuttaa resistanssin muutoksen. Tämä resistanssin muutos aiheuttaa ulostulojännitteen vaihtelun, mikä muunnetaan signaaliksi. Anturi on yleensä Wheatstonen siltakytkennässä, jossa venymäliuskan resistanssi on verrannollinen tunnettuihin vastuksiin. Kytkennän etuna on se, että pienetkin muutokset anturissa pystytään havaitsemaan ja välittämään tarkasti käyttäjälle.

Useampia venymäliuskoja voidaan asettaa rinnakkain, jolloin muodostuu niin kutsuttu anturimatriisi (engl. strain gauge array). Anturimatriisilla saadaan tarkemmat mittaukset suuremmalta alueelta kuin yksittäisellä venymäliuskalla. [19]

4 Teknologioiden soveltaminen verenpaineen mittaamisessa

Tarkkojen ja helposti saavutettavien mittausmenetelmien kehittäminen sydän- ja verisuonisairauksien ennaltaehkäisyssä ja hoidossa on ensiarvoisen tärkeää. Tässä luvussa keskitytään kunkin esitellyn teknologian omainaisuuksien hyödyntämiseen osana verenpaineen mittausjärjestelmiä. Näiden tekniikoiden hyödyntäminen perustuu erilaisten fysiologisten signaalien mittaamiseen ja analysointiin, mikä mahdollistaa verenpaineen arvioinnin ilman perinteistä olkavarsimansettia.

Esiteltävät teknologiat eroavat toisistaan mittausmenetelmien ja tarkkuuksien suhteen, mutta ne kaikki tuottavat merkityksellisiä muuttujia, kuten pulssin kulkuajan (PTT), pulssin saapumisajan (PAT) ja pulssiaallon muodon, joita voidaan soveltaa verenpaineen arviointiin. PTT, PAT ja pulssiaallon muoto voidaan määrittää eri mittaustekniikoilla PPG:n ollessa yksi yleisimmin käytetyistä. Mittaussignaaleista saatavien muuttujien tulkinta vaatii usein monimutkaisia laskennallisia menetelmiä, kuten koneoppimismalleja ja algoritmeja, joiden avulla mittaustuloksia voidaan tarkentaa. Mittaustarkkuus ja luotettavuus riippuvat myös käytetyn tekniikan kalibroinnista ja mittausolosuhteista. [20], [21]

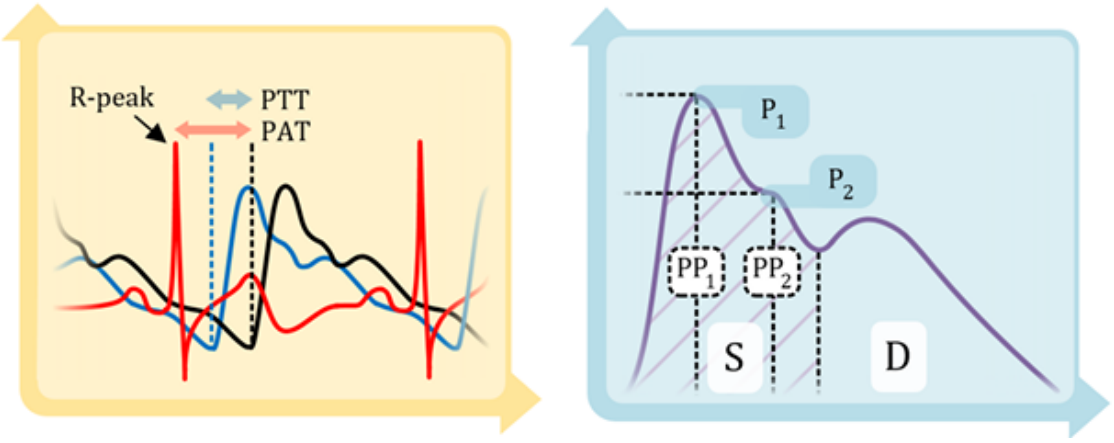
Signaalista saatava pulssin kulkuaika on ajanjakso, joka kuluu pulssiaallon kulkiessa kahden pisteen välillä. Aika mitataan usein sydämen ja ääreisvaltimon välillä, kuten korvasta tai sormesta. PTT voidaan määrittää esimerkiksi mittaamalla

kaksi eri PPG-signaalia. [21] Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää muita sopivia menetelmiä, kuten seismokardiografiaa [20]. PTT määritetään laskemalla viive kahden PPG-aallon välillä. Tämä viive saadaan mittaamalla aikaero aaltomuotojen saapumisessa aortan kaaresta eri mittauspisteisiin, kuten sormeen ja varpaaseen. Laskentapisteet valitan aaltomuotojen ominaispiirteiden avulla. Laskentapisteeksi valitaan tyypillisesti aallon pohja, johon aallonheijastumat vaikuttavat vähiten. [21], [22]

Pulssin saapumisaika (engl. Pulse Arrival Time, PAT) kuvaa aikaa sydämen depolarisoitumisen alkamisesta siihen hetkeen, kun pulssiaalto saavuttaa ääreisvaltimon mittauspisteessä olevan PPG-sensorin. Sydämen depolarisoituminen mitataan yleensä EKG:n avulla. PAT lasketaan hyödyntämällä EKG-kuvaajan R-aaltoa sekä PPG-signaalin systolista huippua. PAT sisältää pulssin kulkuajan, mutta lisäksi siihen sisältyy aika, joka kuluu sähköisen impulssin etenemiseen sydämen depolarisoitumisesta pulssiaallon lähettämiseen. [22] PAT- ja PTT-aikaintervallien eroavaisuudet on havainnollistettu kuvassa 4.1.

Jos PTT ja PAT ovat saatavilla, voidaan laskea pulssin kulkunopeus (engl. Pulse Wave Velocity, PWV). Pulssin kulkunopeus määritetään jakamalla kahden mittausanturin välinen etäisyys niiden havaitsemien pulssin saapumisaikojen erotuksella. Pulssin kulkunopeus on keskeinen valtimoiden jäykkyyden indikaattori ja sen avulla voidaan myös ennustaa kohonneen verenpaineen riskiä. [21]

Verisuonissa kulkevan pulssiaallon ominaisuuksia verisuonissa hyödynnetään verenpaineen arvioinnissa PPG:n avulla. PPG-sensori havaitsee sydämenlyöntien aiheuttamat verenkierron muutokset, jotka näkyvät valon intensiteetin vaihteluina. Näiden vaihtelujen perusteella PPG-signaali kuvaa veren virtauksen vaihtelua, ja signaalin analysoinnilla voidaan arvioida verenpaineen tasoa. PPG-signaalista voidaan tunnistaa systolinen ja diastolinen osuus. Systolinen osa kuvaa sydämen pumppaaman veren aiheuttamaa painetta, kun taas diastolinen osa heijastaa verisuonten palautumista sykkeen välillä.



Kuva 4.1: Pulssin saapumis- ja kulkuaikojen sekä niiden analyysien perusperiaatteet. Vasemmalla: PTT:n ja PAT:n ero. Oikealla: Pulssiaallon analyysi (PWA). Pulssista johdettavia parametreja ovat esimerkiksi pulssipaineet PP1 ja PP2 pisteissä P1 ja P2 sekä systolinen ja diastolinen alue, S ja D. (muokattu lähteestä [21])

Seismokardiografiaa voidaan hyödyntää esimerkiksi pulssin kulkuajan mittaamiseen tarkasti. Tämä tekniikka mahdollistaa ajankohdan määrittämisen, jolloin aorttaläppä avautuu ja veri alkaa virrata sydämestä eteenpäin. Toisin kuin EKG, joka keskittyy sydämen sähköiseen toimintaan, seismokardiografia tarjoaa yksityiskohtaisempaa tietoa sydämen mekaanisista tapahtumista reaaliajassa, kuten veren ja sydänläppien liikkeistä. Kiihtyvyysantureilla mitatut sydänläppien liikkeet tuottavat tarkasti ajoitettua tietoa veren ulosvirtauksesta, mikä parantaa PTT-mittauksen tarkkuutta. Tämä johtuu siitä, että seismokardiografia keskittyy sydämen syklin määriteltyyn vaiheeseen, kuten aorttaläpän avautumiseen, toisin kuin EKG, joka ei yhtä tarkasti erota sydämen mekaanisia toimintoja. Tämän ansiosta seismokardiografia voi tarjota syvällisempää tietoa verenkierron dynamiikasta ja verisuonten tilasta, mikä tekee siitä hyödyllisen työkalun esimerkiksi verenpaineen arvioinnissa. [23]

Venymäanturin käyttö älypuhelinsovelluksessa verenpaineen mittauksessa tuo merkittävää lisäarvoa mittaustilanteeseen. Vaikka anturi ei suoraan mittaa verenpaineeseen liittyviä muuttujia, se auttaa parantamaan mittauksen tarkkuutta ja ohjaa-

maan käyttäjää prosessin aikana. Perinteisessä olkavarsimittauksessa laite säätelee automaattisesti mansetin painetta, kunnes valtimo sulkeutuu. Älypuhelinsovelluksessa käyttäjän on kuitenkin itse tuotettava tarvittava paine mittauksen suorittamiseksi. Venymäanturi mittaa tarkasti käyttäjän mittauskohtaan kohdistaman voiman ja paineen. Tämä varmistaa, että valtimon ulkoinen paine on riittävä onnistuneen mittauksen saavuttamiseksi, ja auttaa samalla käyttäjää soveltamaan oikeanlaista voimaa. [18]

5 Älypuhelintoteutus

Älypuhelinten älykkäät ja monipuoliset ominaisuudet perustuvat paitsi kehittyneisiin algoritmeihin ja ohjelmistoihin, mutta erityisesti erilaisiin sensoreihin. Näiden avulla puhelimet voivat tarjota käyttäjilleen monipuolista ja reaaliaikaista tietoa. Älypuhelinten sensorit keräävät dataa, joka muunnetaan käyttäjälle hyödylliseksi informaatioksi. Älypuhelimet sisältävät lukuisia erilaisia sensoreita kuten kiihtyvyysanturin, gyroskoopin, GPS-anturin ja biometrisiä sensoreita. Edellä mainitut sensorit mahdollistavat niin liikkeen ja asennon seuraamisen, sijaintitietojen tarjoamisen ja kasvojentunnistuksen.

Älypuhelimissa on myös kamerat, joissa on infrapunavalo ja fotodetektorit, mitkä mahdollistavat tarkan kuvantamisen ja valon heijastuksen mittaamisen. Nämä ominaisuudet luovat perustan aiemmin esitellyille teknologioille, jotka pystyvät mittaamaan verenkiertoon liittyviä arvoja, kuten sykkeeseen ja verenpaineeseen liittyvää dataa. [24]

Verenpaineen mittaaminen älypuhelimella hyödyntää usein optisia sensoreita ja kameran PPG-teknologiaa. Näiden teknologioiden yhdistäminen ohjelmistoihin, jotka analysoivat kerättyä dataa, tekee älypuhelimesta monipuolisen työkalun terveyden seurannassa. Tämä tarkoittaa, että pelkästään sormen asettaminen puhelimen kameran päälle voi antaa käyttäjälle arvokasta tietoa oman sydämen toiminnasta ja verenpaineesta.

Anturien ja edistyneiden algoritmien avulla älypuhelimet voivat tulevaisuudessa

tarjota entistä tarkempia terveysmittauksia, mikä tekee niistä houkuttelevan vaihtoehdon perinteisille mittauslaitteille. Tässä luvussa esitellään jo olemassa olevia tai tutkittuja älypuhelintoteutuksia, jotka mahdollistavat verenpaineen mittaamisen. Toteutukset perustuvat aiemmissa luvuissa esiteltyihin teknologioihin.

5.1 Seismo: PTT-pohjainen mittaus älypuhelimen sensoreilla

Eräs kehitetyistä älypuhelintoteutuksista verenpaineen mittaamiseen on ohjelmistopohjainen sovellus Seismo. Seismon mittausperiaate perustuu sen ajanjakson mittaamiseen, mikä kuluu aorttaläpän avautumisesta siihen, että pulssi saavuttaa sormenpään hiusvaltimon. Älypuhelimen kiihtyvyysanturia hyödynnetään sydänliikkeiden mittaamiseen ja kameralla havaitaan pulssi sormen päästä. Seismo on täysin älypuhelimen sisäisillä sensoreilla toteutettu ratkaisu.

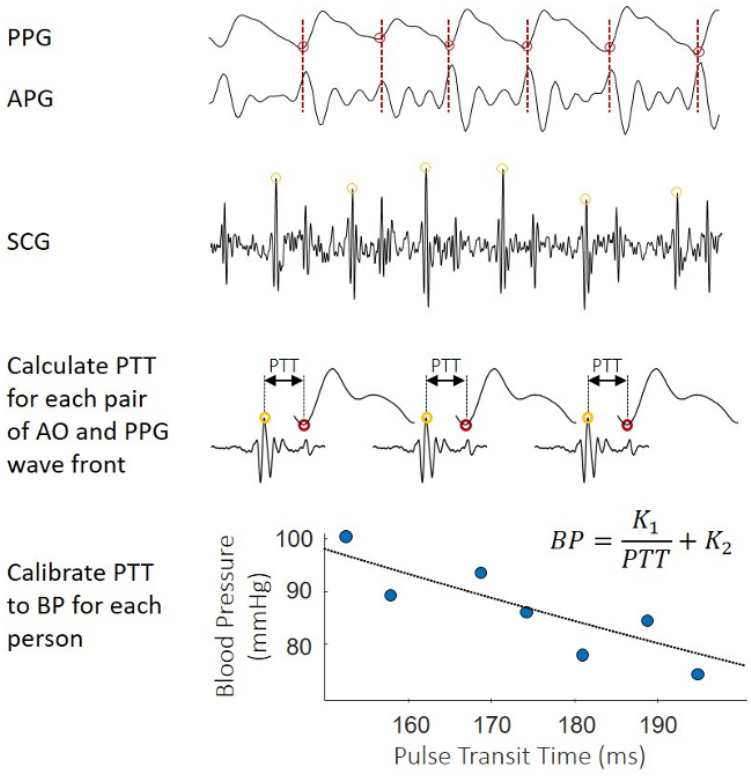
Seismo on tarkoitettu kotikäyttöön ja siksi sovelluksen on ohjeistettava sen käyttäjää. Mittaus Seismolla tapahtuu seuraavasti; käyttäjä asettaa kännykän rintaansa vasten vasemmalle niin, että takakamera peitetään samaan aikaan sormella. Täten proksimaalinen ja distaalinen pulssin ajoitus saadaan mitatuksi yhdellä mittauslaitteella. Älypuhelin tulisi asettaa rintakehälle kohtuullisen tarkasti joko rintalihasten alapuolelle rintalastalle tai rintalihasten yläpuolelle solisluiden alle. Sovelluksella mitataan olkavarsimittauksen kaltaisia lyhyitä mittauksia. Mittaus tulisi suorittaa istuma-asennossa, ja mittauksen etuna on se, että käyttäjä voi pitää paidan päällä.

Seismo hyödyntää SKG:lla ja PPG:llä saatua pulssin kulkuaikaa laskentansa perustana. Seismokardiografian ansiosta PTT saadaan laskettua tarkemmin, koska tarkka mitraalisen läpän sulkeutumisaika ja aorttaläpän aukeamisaika saadaan kiihtyvyysanturilla tietoon. Jotta mittaus on mahdollisimman hyvä, sovellus arvioi saadun signaalin laatua. Mikäli älypuhelin on asetettu rinnalle väärin, sovellus tun-

nistaa sen ja ohjaa käyttäjää asettamaan älypuhelimen paremmin. SKG hyödyntää kiihtyvyysanturin y-akselin dataa, joka vastaa puhelimen pituusakselin suuntaista liikettä. Tämä akseli on kohtisuorassa rintakehää vasten. PPG mitataan käyttäen kameran dataa. Mittaussormi tulee asettaa niin, että koko kamera ja salamavalo peittyvät.

PTT:n laskeminen alkaa erottamalla sydämen syke PPG-signaalista. Syke erotetaan käyttämällä FFT-taajuusanalyysiä (engl. Fast Fourier Transform). [23] FFT-taajusanalyysissä signaalin sisältämät eri taajudet erotellaan ja esitetään spektrinä. Analyysin avulla voidaan analysoida paljonko kutakin taajuutta signaalissa on. [25] Saatua sykettä käytetään ennalta määrittämään minimiväli peräkkäisten pulssien välillä. Todellinen pulssiaallon ajoitus lasketaan käyttämällä PPG-signaalin toista derivaattaa, kiihtyvyysfotopletysmogrammia APG. APG:n huippu korostuu pulssin saapuessa sormeen paremmin kuin alkuperäisestä PPG-signaalista. Sykkeen toimiessa minimivälinä, signaaliin hyödynnetään yleisesti käytössä olevia algoritmeja, joilla APG:n huiput saadaan tunnistettua.

SKG:n signaalista on erotettava aorttaläpän avautumispiste (AO) jokaiselle sydämen lyönnille. AO:n tunnistamiseen auttavat seuraavat SKG-signaalin ominaisuudet: AO-piste on ennen PPG-signaalin nousua ja AO on havaittavissa isovolumetrisen hetken (IM) jälkeen, jolla on suurin negatiivinen amplitudi signaalissa ennen seuraavaa distaalista pulssia. PPG-signaalia hyödynnetään AO-pisteen löytämiseen, koska pisteen voidaan olettaa sijaitsevan kahden APG-piikin välissä. Useimmissa tapauksissa AO-piste on isovolumetrisen hetken jälkeen, joten AO:n hetkeksi valitaan positiivinen piikki joka seuraa isovolumetristä hetkeä. Lopulta PTT saadaan laskemalla AO:n ja APG:n piikkien aikaviive. Kuvassa 5.1 on esiteltynä verenpaineen laskenta signaaleista. Todellisen verenpaineen saamiseksi vaaditaan kuitenkin yksilöllistetty kalibrointi jokaisen käyttäjän kohdalla. [23]



Kuva 5.1: Seismon laskenta-algoritmin toimintaperiaate (kuva lähteestä [23]).

5.2 Pulssimuodon analyysi koneoppimisella

Tutkimuksessa [26] verenpainetta arvioidaan hyödyntämällä älypuhelimen kameran PPG-ominaisuutta ja dataohjattua koneoppimismenetelmää. Mittaus perustuu yksittäisen PPG-signaalin tallentamiseen sormenpäästä.

Mittauksen aikana koehenkilö istuu käden levätessä pöydällä sydämen korkeudella, jotta hydrostaattisen paineen vaikutus minimoidaan. Mittaus toteutetaan asettamalla vasemman käden etusormi kameran linssille. Lisäksi mittauksessa käytetään pulssioksimetriä kameralla mitatun signaalin vertailuun. Pulssioksimetrin tuottamaa signaalia hyödynnetään myös koneoppimismallin kouluttamisessa ja sovelluksen validoinnissa. PPG-signaali tallennetaan ja analysoidaan tutkimusta varten kehitetyllä sovelluksella. Mittaus kesti 120 sekuntia. Ensimmäiset 60 sekuntia kuitenkin hylättiin, koska mittauksen alussa sormi oli vaikeaa pitää vakaana.

Signaalin analysoinnissa käytettään vihreää kanavaa, koska se tarjoaa tutkimuksessa selkeimmän signaalin. Mittausdata käsitellään koneoppimismenetelmällä, jossa hyödynnetään diskreettiä aaltomuunnosta (engl. discrete wavelet transform, DWT) ja tukivektorikonemallia (engl. support-vector machine, SVM). Diskreetin aaltomuunnoksen avulla tunnistetaan PPG-signaalin olennaiset piirteet koneoppimismallin rakentamista varten. Tukivektorikonemallia käytetään signaalista valittujen piirteiden regressioanalyysiin, jonka avulla lopulta arvioidaan koehenkilön systolinen ja diastolinen verenpaine.

5.3 Oskillometrinen sormenpainallustekniikka voima-anturilla toteutettuna

Tutkimuksessa [2] on kehitetty älypuhelinpohjainen ratkaisu verenpaineen mittaamiseen hyödyntäen oskillometrista sormenpainallustekniikkaa. Tutkimuksessa luotiin kotikäyttöön sovellus, jossa käyttäjä tuottaa tarvittavan paineen sormellaan. Toteutusta varten kehitettiin 3D-tulostettu älypuhelimen kuori, joka sisältää tarvittavat sensorit ja linkin kommunikoivaan sovellukseen. Vaikka toteutuksessa on hyödynnetty lisäkomponentteja, ratkaisu nojaa älypuhelimen vakiovarustukseen mittauksen perusperiaatteiden toteuttamisessa. [2] Samoja sensoreita ja tekniikkaa hyödyntäen on kehitetty ja testattu myös iPhone 11:een kohdennettu sovellus, jossa sisäänrakennettu venymäliuska-anturimatriisi mittaa näyttöön kohdistettua voimaa [18]. Tutkimuksen ovat toteuttaneet pitkälti samat tutkijat kuin tutkimuksessa [2]. Uusimmat Applen puhelimet eivät kuitenkaan tällä hetkellä sisällä 3D-kosketusominaisuutta.

Oskillometrisessa sormenpainallustekniikassa käyttäjä painaa sormellaan älypuhelimen mittauskohtaa, lisäten painetta vähitellen. Tämän aikana sensorit mittaavat sekä painallusvoiman suuruutta että sormenpään valtimossa syntyvän veren tilavuuden muutoksista johtuvien värähtelyjen amplitudia. Tekniikka mukailee olka-

varsimittausta, jossa ulkoinen paine valtimoon kohdistetaan mansetin avulla.

3D-tulostettuihin kännykkäkuoriin on merkitty viivat, jotka ohjaavat sormen oikean asettamisen sensorille. Sormi asetetaan niin, että kynnen tyvikohta on linjassa ensimmäisen viivan kanssa, ja sormen pituussuuntainen akseli asetetaan toisen viivan mukaan. Tällä tavoin mittaus saadaan kämmenen poikittaisesta valtimokaaresta. Käyttäjää ohjeistetaan myös laskemaan sormen ensimmäinen nivel kännykkäkuoren päälle, jotta voima kohdistuu normaalisuuntaisesti pintaan nähden. Mittauksen aikana älypuhelin pidetään sydämen korkeudella, jotta hydrostaattinen paine ei vääristä tulosta. Kun sormi on oikein asetettu ja älypuhelin oikealla korkeudella, käyttäjä alkaa kasvattamaan sormen kohdistamaa painetta näyttöön. Sovelluksen käyttöliittymä opastaa käyttäjää pitämään ulkoisen paineen sopivissa rajoissa. Sovellus laskee käyttäjän systolisen, diastolisen ja keskimääräisen verenpaineen tai kehottaa käyttäjää suorittamaan mittauksen uudestaan.

Tutkimuksen esittämä mittausratkaisu on toteutettu PPG- ja paineanturilla. PPG-anturia ei löydy älypuhelimista valmiina, mutta kameraa ja salamaa voidaan käyttää vastaavasti. Tutkimuksessa sensorit ovat asennettu päällekkäin yksiköksi kännykkäkuoriin ja ne muodostavat halkaisijaltaan 10 millimetrin alueen sormen painamiselle. Sensoriyksikkö on liitetty signaalinkäsittelypiirin, jossa mitattu signaali muun muassa vahvistetaan, suodatetaan ja muutetaan digitaaliseen muotoon. Mittausdata siirretään Bluetoothin välityksellä älypuhelimeen ja tutkimusta varten luotuun sovellukseen.

Sovellus arvioi mittausdatan laadun määriteltyjen raja-arvojen mukaan ja laskee verenpainearvot. Sovelluksen toimintakaavio on esitetty kuvassa 5.2. Käyttäjälle esitettävässä käyttöliittymässä ohjeistetaan mittauksen suorittaminen ja sen taustalla toimivat algoritmit laskevat mittaustuloksen.

Sovellus saa syötteenä veren tilavuuden sekä kohdistetun paineen suuruuden. Ensiksi tarkistetaan, että kohdistettu paine on raja-arvojen sisällä. Jos paine on liian

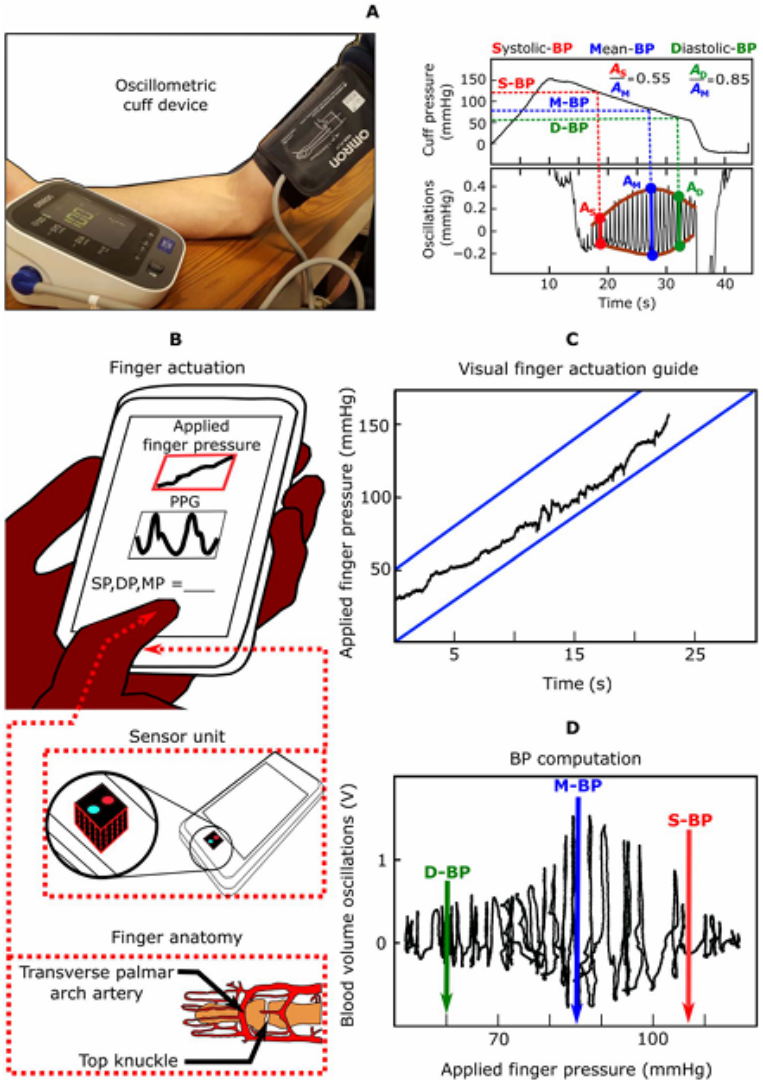
korkea tai matala, käyttäjää ohjeistetaan toistamaan mittaus. Sen jälkeen verrataan veren tilavuus enimmäismäärään. Mikäli molemmat arvot ovat hyväksyttäviä, sydämen syke määritetään veren tilavuuden spektristä. Seuraavaksi tunnistetaan sydämen lyönneistä syntyvät piikit. Spektrin ja piikkien perusteella saatujen sykkeiden tulisi vastata toisiaan. Jos sykkeet ovat yhteensopivia, kohdistetun paineen kuvaaja sovitetaan kolmannen asteen polynomikaavaan. Tämän jälkeen muodostetaan diskreetti oskillogrammi parametrisen mallin avulla. Lopuksi lasketaan verenpainearvot niille tarkoitetuilla kaavoilla ja esitetään lopputulos käyttäjälle. [2]

iPhone 11 -sovellutus hyödyntää kännykkäkuoritutkimuksen tapaan oskillometrista sormenpainallustekniikkaa verenpaineen mittaamiseen. iPhone 11 sisältää sisäänrakennetun venymäliuska-anturimatriisin ja sen kosketusnäyttö kattaa käytännössä koko etuosan pinta-alan etukameraa lukuun ottamatta.

Ensimmäisellä käyttökerralla käyttäjä asettaa sormensa näytölle, jolloin sovellus mittaa sormen mitat ja antaa ohjeita sen oikeaan asetteluun. Mittauksen aikana sormi asetetaan etukameran kohdalle, jossa sijaitsee PPG-sensori. Käyttäjä kasvattaa sormen painetta vähitellen näyttöä vasten, ja 3D-kosketusnäyttö mittaa kohdistetun painallusvoiman. Mittaus suoritetaan sydämen korkeudella optimaalisen tarkkuuden varmistamiseksi. [18]

5.4 Oskillometrinen sormenpainallustekniikka ilman voima-anturia

Tutkimuksessa [27] hyödynnetään jälleen oskillometrista tekniikkaa verenpaineen mittaamiseen asettamalla sormi PPG-sensorin ja näytön päälle. Koska voima-anturia ei ole mukana, painallusvoimaa ei voida mitata suoraan. Tämän vuoksi käyttäjä suorittaa käsien noston alhaalta ylös mittauksen aikana, jolloin sovellus määrittää hydrostaattisen paineen muutoksen. Mittaus perustuu PPG-sensorin ja kapasitiivi-



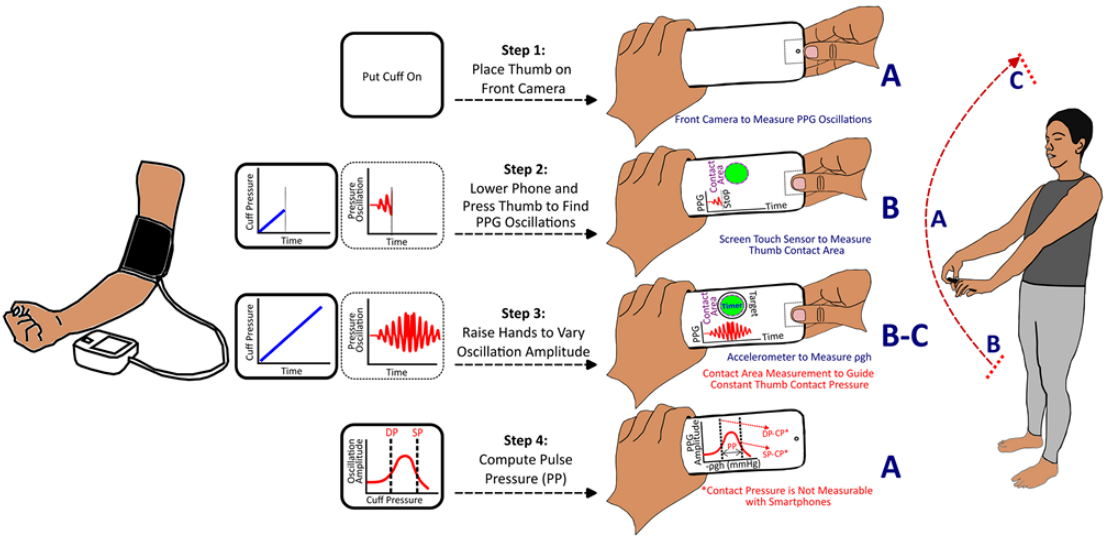
Kuva 5.2: (A) Perinteinen olkavarsimittari ja kaavio verenpaineen mittaamisesta (B) Ehdotettu oskillometrinen sormenpainallustekniikka verenpaineen mittaamiseen älypuhelimella. (C) Älypuhelinsovellus ohjeistaa käyttäjää sormen painamisen voimakkuudessa. (D) Systolisen, diastolisen ja keskiverenpaineen laskenta. (Kuva lähteestä [2])

sen kosketusanturin keräämiin tietoihin, sekä hydrostaattisen paineen muutokseen. Tällä menetelmällä voidaan arvioida käyttäjän absoluuttinen pulssipaine (systolinen paine – diastolinen paine). Pulssipaine korreloi systolisen verenpaineen kanssa ja sitä voidaan siksi käyttää korkean verenpaineen tunnistuksessa.

Käyttäjä asettaa sormensa etukameran ja näytön päälle. Sovellus auttaa sijoittamaan sormen oikein näyttämällä näytöllä nelikulmaisen alueen. Tämän jälkeen

käyttäjä laskee kätensä alas lattiaa kohti, pitäen sormen edelleen paikallaan. Samalla sormen painetta lisätään hieman, mikä vahvistaa veren virtauksen aiheuttamia värähtelyjä. Sovellus näyttää reaaliaikaisesti PPG-signaalin ja sormen kosketuspinta-alan. Kun signaali havaitaan, käyttäjää kehotetaan hiljalleen nostamaan kädet suorina ylös kohti kattoa, muodostaen liikkeellään U-kirjaimen. Tämä nostoliike kestää noin 30 sekuntia, ja sormen painetta säädellään sovelluksen ohjeiden mukaan. Mittauksen jälkeen sovellus näyttää käyttäjälle pulssipaineen arvon.

Kuvassa 5.3 on esitetty sovelluksen toimintavaiheet ja niiden vertailu perinteiseen olkavarsimittariin.



Kuva 5.3: Käyttäjän suorittama mittaus tutkimuksessa [27] verrattuna perinteiseen olkavarsimittaukseen (kuva lähteestä [27]).

Sovellus mittaa sormen painalluksen aiheuttamia värähtelyjä oskillometrisen tekniikan mukaisesti. PPG-signaalin aaltomuoto määritetään hyödyntämällä etukameran punaista kanavaa, ympäröivää valoa ja näytön valoa. Sormen kosketuspinta-ala mitataan kapasitiivisella kosketusanturilla, joka havaitsee kosketuksen mittaamalla sähkökapasitanssin muutoksia, kun johtava sormi lähestyy tai koskettaa anturin pintaa.

Hydrostaattisen paineen muutos (ρgh, missä ρ on veren tiheys, g gravitaatiovakio ja h on älypuhelimen etäisyys sydämeen nähden) mitataan käyttäjän nostaessa käsiään. Tätä varten sovellus hyödyntää akselometrin z-akselia. Sydämen ja puhelimen välinen etäisyys voidaan arvioida joko käyttäjän ilmoittaman käsien pituuden perusteella tai käyttäjän pituutta hyödyntäen.

Pulssipaine lasketaan tarkastelemalla värähtelyjen amplitudia suhteessa hydrostaattisen paineen muutokseen. Ensimmäiseksi PPG-signaalin huippujen sijainnit tunnistetaan. Näiden huippujen välisten amplitudien arvot normalisoidaan ja yhdistetään vastaaviin ρgh -arvoihin, jolloin muodostuu diskreetti oskillogrammi. Diskreetti oskillogrammi muunnetaan jatkuvaksi oskillogrammiksi. Pulssipaine määritetään tämän jatkuvan oskillogrammin derivaatan maksimi- ja minimiarvojen välisenä erona. Lisäksi sovelluksen algoritmi laskee käyttäjän sykkeen PPG-huippujen perusteella. [27]

6 Loppupäätelmät

Tämän kirjallisuuskatsauksen tavoitteena oli tutkia älypuhelimella tapahtuvaan verenpaineen mittaamiseen soveltuvia teknologioita. Ensimmäisessä tutkimuskysymyksessä selvitettiin, onko verenpaineen mittaaminen pelkästään älypuhelimella ylipäänsä mahdollista. Tulokset osoittavat, että tällaisia teknologioita on olemassa, ja niiden toteutustapoja on useita.

Fotopletysmografia nousi kirjallisuudessa esiin merkittävimpänä menetelmänä, sillä se on yleisesti käytössä myös lääketieteellisesti hyväksytyissä perinteisissä verenpainemittareissa. Lisäksi katsauksessa tarkasteltiin seismokardiografian ja voima-antureiden roolia verenpaineen mittaamisessa.

Valitut mittaustekniikat ovat jo pitkälti toteutettavissa useimmissa älypuhelinmalleissa. PPG-anturia ei kuitenkaan sellaisenaan löydy integroituna älypuhelimiin. Koska teknologiaa sovelletaan puettavissa laitteissa laajasti, on potentiaalista, että tällaisia puuttuvia sensoreita integroidaan älypuhelimiin tulevaisuudessa vielä lisää.

Toinen tutkimuskysymys keskittyi älypuhelimella suoritetun verenpainemittauksen tarkkuuteen. Käsitellyissä tutkimuksissa tuotiin selkeästi esiin eri teknologioiden haasteita juuri mittaustarkkuuden näkökulmasta. Tarkkuuden uskotaan paranevan, kun käytetään räätälöityjä sensoreita ja kehittyneempiä laskenta-algoritmeja. Esimerkiksi tutkimuksessa [2] kehitettiin erityisesti mittaustarkkuuden parantamista varten 3D-tulostetut kännykkäkuoret, jotka mahdollistivat kustomoitujen sensorien tarkkuuden mittaamisen [2].

Seismo-sovelluksen tutkimuksessa oli mukana yhdeksän henkilöä, joilta arvioitiin veren kulkuajan ja diastolisen verenpaineen välistä yhteyttä. Osallistujista viisi oli naisia, ja koehenkilöiden ikä vaihteli välillä 26–66 vuotta. Verenpainemittaukset suoritettiin pyöräilyn aikana sykkeen noustessa. Jokaiselta osallistujalta mitattiin verenpaine yhteensä seitsemän kertaa: kerran levossa, viisi kertaa pyöräilyn jälkeen ja kerran kahden minuutin levon jälkeen. Mittaukset toteutettiin sekä Seismo-sovelluksella että standardimittarilla, joiden tuloksia verrattiin keskenään.

Hyväksyttäviä mittaustuloksia saatiin lopulta seitsemältä osallistujalta. Yhden miehen mittaukset hylättiin, koska tärisevät kädet estivät luotettavan SKG-signaalin saamisen. Toisen osallistujan, naisen, mittaukset jouduttiin hylkäämään heikon signaalin vuoksi. Lopullisessa analyysissä oli mukana 196 verenpaineen ja PTT:n mittausparia.

Tuloksissa keskimääräinen diastolinen verenpaine oli (88 ± 11.5) mmHg. Mittausvirhe diastoliselle verenpaineelle oli (5.2 ± 2.0) mmHg. Systolista tai keskiverenpainetta ei tutkimuksessa tutkittu.

Tulokset osoittivat kohtalaista korrelaatiota Seismo-sovelluksen ja referenssilaitteen verenpainemittausten välillä. Tutkimuksen haasteeksi nousi kuitenkin referenssimittarin epäsoveltuvuus nopeasti muuttuvan verenpaineen mittaamiseen, mikä saattoi vaikuttaa sen mittaamien tulosten tarkkuuteen. [23]

Tutkimuksessa [26] sovellusta testattiin 65 vapaaehtoisen voimin, joista 40 oli miehiä ja 25 naisia. Kellään osallistujista ei ollut aiempaa sairaushistoriaa sydän- tai verisuonitaudeista. Mittauksia kerättiin yhteensä 78 tallennetta.

Tuloksissa diastolisen verenpaineen mittausvirhe oli (4.6 ± 4.3) mmHg ja systolisen verenpaineen (5.1 ± 4.3) mmHg, kun koneoppimismalli hyödynsi älypuhelimella kerättyä PPG:tä. Vastaavat arvot olivat (4.3 ± 3.7) mmHg ja (4.9 ± 4.9) mmHg pulssioksimetrin avulla kerätyllä PPG:llä. Koneoppimismalli hyödynsi muuttujina esimerkiksi sukupuolta, muttei sykettä.

Dataohjatun koneoppimismallin saavuttama mittaustarkkuus oli lupaava. Pelkällä älypuhelimella kerätty signaali sisälsi häiriöitä ja tarkkuus jäi hieman referenssimittausten ulkopuolelle. Tutkimuksen muut mittaustavat olivat tarkempia, joten kasvattamalla koneoppimismallin koulutusaineistoa voisi mahdollisesti kehittää älypuhelinpohjaisen toteutuksen tarkkuutta.

Tutkimuksessa [2] kännykkäkuorimittausta testattiin 30 uudella ja viidellä kokeneella käyttäjällä. Kaikki osallistujat olivat miehiä ja iältään noin 30-vuotiaita. Kaikki käyttäjät suorittivat useamman mittauksen. Kokeneet mittaajat pitivät mittalaitetta tarkoituksella selkeästi sydämen alapuolella. Oskillometristä sormenpainallustekniikkaa verrattiin standardiin olkavarsimittariin, ja vertailutulokset saatiin 32 käyttäjältä. Älypuhelinpohjaisen mittauksen virheet olivat systolisessa paineessa (3.3 ± 8.8) mmHg ja diastolisessa paineessa (-5.6 ± 7.7) mmHg verenpainealueen ollessa 40-50 mmHg.

Älypuhelinpohjaisen mittauksen suurimmat haasteet olivat laitteen asettaminen oikealle korkeudelle sekä laskentatehon riittävyys. Kehitetyn mittausratkaisun tuottamat verenpainearvot tutkimuksen otannalla olivat kuitenkin lupaavia. [2]

iPhone-sovelluksen tarkkuuden mittaaminen toteutettiin 20 käyttäjän avulla, joista neljä oli kokeneita käyttäjiä. Osa mittauksista tehtiin oikein, mutta osassa mittauksista pyrittiin tarkoituksella saamaan virheellisiä tuloksia pitämällä älypuhelinta väärässä tasossa. Lopulliset mittaustulokset saatiin 18 käyttäjältä, sillä huonon sormikontaktin vuoksi osa mittauksista jouduttiin hylkäämään. Mittauksen virheet olivat systolisessa paineessa (-4.0 ± 11.4) mmHg ja diastolisessa paineessa (-9.4 ± 9.7) mmHg verenpainealueen ollessa 40-50 mmHg.

Vertailulaitteena käytettiin FDA:n hyväksymää sormimansettimittaria sekä standardia olkavarsimittaria. Kehitetyn sovelluksen mittaustulosten virheet olivat keskimäärin vain 2 mmHg korkeampia verrattuna sormimansettimittariin. Tutkimuksen haasteena oli riittämätön ohjeistus sormenpään oikeaan asettamiseen näytölle. Ko-

konaisuutena tutkimus viittaa siihen, että ilman mansettia ja kalibrointia toimiva verenpaineseuranta voi olla mahdollinen monilla nykyisillä ja tulevilla älypuhelimilla, hyödyntämällä niihin sisäänrakennettuja sensoreita. [18]

Viimeisessä käsitellyssä tutkimuksessa [27] mittaukseen osallistui 24 henkilöä, joista kahden tulokset jouduttiin hylkäämään. Noin puolet osallistujista oli naisia, ja 8 henkilöä oli kokeneita käyttäjiä. Sovelluksen mittausten korrelaatiokerroin oli 0.70 ja virhe (-1.0 ± 7.2) mmHg pulssipaineelle, kun verenpainealue oli noin 40 mmHg. Sovelluksen mittaustulosten virhe oli keskimäärin 8 mmHg pienempiä vertailulaitteeseen rinnastettuna. Tutkimuksessa haasteita tuotti erityisesti laskentaalgoritmin riittämättömyys. Mittausvaiheeseen osallistuneet henkilöt joutuivat suorittamaan mittauksen useasti saadakseen kolme onnistunutta mittausta. [27]

Lääketieteellisten laitteiden kliininen käyttö edellyttää arviointia vakiintuneiden validointiprotokollien mukaisesti. Verenpainemittareiden arviointi perustuu tiukkoihin ohjeistuksiin, jotka koskevat viiteverenpaineen mittauksia, osallistujaryhmiä, mittauksien aikarajoja ja arviointikriteerejä. Älypuhelinten osalta ei ole olemassa hyväksyttyä validointiprotokollaa verenpaineen mittaukseen. [28]

Tutkimuksien mittaustarkkuuksia voidaan kuitenkin tarkastella AAMI:n (Association for the Advancement of Medical Instrumentation) määrittämien rajojen viitekehyksessä. AAMI on luonut standardin verenpainelaitteiden validoimiseksi. Käsiteltyjen tutkimusten virherajat verrattuna standardimittareihin olivat lähellä AAMI:n standardin määrittämiä virherajoja, jotka ovat 5 ja 8 mmHg. On kuitenkin huomioitava, että esimerkiksi datankeräysprotokollaa ei seurattu tutkimuksissa.

Älypuhelinpohjaisen verenpainemittauksen mahdollisuuksia, toteutustapoja ja mittaustarkkuuksia on tutkittu laajasti myös tämän kirjallisuuskatsauksen käsittelemien tutkimusten ulkopuolella. Taulukkoon 6.1 on koottu keskeisimmät tulokset käsitellyistä tutkimuksista sekä kolme muuta samankaltaista tutkimusta kattavan arvioinnin tueksi.

Tutkimukset [29], [30] ja [31] perustuvat sormenpäästä mitattavaan PPG-signaaliin älypuhelimella. Näistä tutkimuksista [29] ja [30] erottuvat erityisesti suurempien osallistujamääriensä ansiosta, minkä vuoksi niiden mittaustarkkuustulokset ovat luotettavampia ja niille voidaan antaa enemmän painoarvoa. Huomionarvoista on kuitenkin, että vaikka tutkimuksessa [29] otoskoko oli suurin, saadut systolisen verenpaineen arvot osoittautuivat erittäin epäluotettaviksi suuren hajonnan vuoksi, mikä voi tehdä mittauksista jopa vaarallisia käytännön sovelluksissa. [18], [28]

Lähde	Osallistujien lkm	Suoritetut mittauskerrat per osallistuja	Mittaustekniikka	Mittauspiste	Käytetyt piirteet	Referenssilaite	Bland-Altman, ME±SD (mmHg)	Korrelaatio (Pearson r tai Spearman ρ)
[23]	7	7	rinnasta SKG + sormenpäästä PPG	rinta + sormenpää	PTT	Olkavarsimittari (Microlife bp3na1-1x)	SBP = N/A DBP = 5.2±2.0 (RMSE) PP = N/A	r(SBP) = N/A r(DBP) = 0.55 r(PP) = N/A
[2]	24	2-4	sormenpäästä PPG + voima-anturi	sormenpää	aikataso	Olkavarsimittari (BP7650N, Omron)	SBP = 3.3±8.8 DBP = -5.6±7.7 PP = N/A	r(SBP) = 0.76 r(DBP) = 0.79 r(PP) = N/A
[18]	20	4	sormenpäästä PPG + venymäliuska-anturimatriisi	sormenpää	derivaatta-pohjainen	Olkavarsimittari (BP786, Omron)	SBP = -4.0±11.4 DBP = -9.4±9.7 PP = N/A	r(SBP) = 0.79 r(DBP) = 0.78 r(PP) = N/A
[27]	24	3	sormenpäästä PPG + kapasitiivinen kosketusanturi + kiihtyvyysanturi	sormenpää	derivaatta-pohjainen	Olkavarsimittari (BP7100, Omron)	SBP = N/A DBP = N/A PP = -1.0±7.2	r(SBP) = N/A r(DBP) = N/A r(PP) = 0.70
[26]	65	1	sormenpäästä PPG	sormenpää	aikataso, taajuustaso	Olkavarsimittari (A&D UA-767PBT)	SBP = 5.1±4.3 DBP = 4.6±4.3 PP = N/A	N/A
[31]	13	20	sormenpäästä PPG	sormenpää	normalisoitu pulssin tilavuus, pulssin taajuus	Olkavarsimittari (DSK-1052, NISSEI)	SBP = 3.50±2.35 DBP = 4.40±3.09 (MAE) PP = N/A	r(SBP) = 0.968 r(DBP) = 0.844 r(PP) = N/A
[30]	51	7	sormenpäästä PPG	sormenpää	derivaatta-pohjainen	Olkavarsimittari (A&D UM-101)	SBP = -0.7±7.7 DBP = -0.4±4.5 PP = N/A	N/A
[29]	965	3	sormenpäästä PPG	sormenpää	aikataso, taajuustaso	Olkavarsimittari (Omron-HBP-1300)	SBP = -0.41±16.52 DBP = N/A PP = N/A	$\rho(SBP) = 0.426$ $\rho(DBP) = N/A$ $\rho(PP) = N/A$

Taulukko 6.1: Yhteenveto eri tutkimuksista, joissa on verrattu älypuhelinpohjaisten mittauksien mittaustarkkuuksia referenssilaitteisiin.

On selvää, että älypuhelinpohjaisten verenpainemittausten tarkkuudet eivät vielä ole riittäviä kliiniseen käyttöympäristöön. Suurempi potentiaali piilee ennakoivassa kotimittauksessa, jossa mittausten helppous ja saatavuus voivat merkittävästi tukea terveyden seurantaa. Luotettavan kotimittauksen mahdollistamiseksi tarvitaan kuitenkin lisätutkimuksia, jotka keskittyvät menetelmien validointiin ja yleiskäyttöisyyden varmistamiseen.

Jatkossa koehenkilöiden valinnassa tulisi painottaa monipuolisuutta, ja tutkimuksiin olisi sisällytettävä osallistujia erilaisista taustoista kattavamman näkökulman saavuttamiseksi. Lisäksi osallistujamäärien merkittävä kasvattaminen, erityisesti kirjallisuuskatsauksessa tarkasteltujen tutkimusten osalta, on välttämätöntä, jotta saadaan luotettavampia ja yleistettäviä tuloksia.

Kehitettyjä sovelluksia tulisi myös testata laajemmin eri älypuhelinmalleilla, sillä suorituskyky saattaa vaihdella malleittain. Suorituskykyjen ero voi näkyä esimerkiksi näytön kirkkaudessa. Lisäksi älypuhelimien sisäänrakennettujen sensorien laadut saattavat keskenään vaihdella vaikuttaen mittauksen tarkkuuteen.

Monet verenpaineen mittaamiseen liittyvät haasteet johtuvat käyttäjästä, vaikka laitteen käyttö olisi opetettu. Tärisevät kädet, kylmät sormet tai väärä mittausasento voivat heikentää mittauksen tarkkuutta. Näiden haasteiden ratkaisemiseksi sovellukset voivat ilmoittaa, mikäli mittaustulokset eivät täytä asetettuja raja-arvoja. Tämä lähestymistapa on käyttäjän näkökulmasta huomattavasti turvallisempi kuin virheellisen mittaustuloksen esittäminen. Kehittyneemmät algoritmit ja sensoriteknologiat voisivat tarkentaa virhetilanteiden havaitsemista, esimerkiksi ilmoittamalla, jos virhe johtuu kylmästä sormenpäästä, ja tarjoamalla ohjeita ongelman ratkaisemiseksi.

Verenpainemittauksen tarkkuus älypuhelimella riippuu pitkälti puhelinvalmistajien käyttämistä sensoreista ja niiden kehityksestä. Hyvänä esimerkkinä on iPhone 11:ssä hyödynnetty paineanturi-matriisi, joka mahdollisti painallusvoiman tarkan

mittaamisen, mutta Apple on sittemmin poistanut tämän ominaisuuden uudemmista malleistaan. Älypuhelinten ominaisuuksia kehitetään kuitenkin jatkuvasti, ja esimerkiksi puhelimien kamerateknologian kehittyminen on vähentänyt erillisten kameroiden tarvetta. Tämä osoittaa, että älypuhelimiin on mahdollista integroida monipuolisempia terveysteknologian toimintoja, jos valmistajat investoivat oikeanlaisiin sensoreihin.

Verenpainetta mitataan pääasiassa lääkärin vastaanotolla, mikä voi vääristää tuloksia valkotakki-ilmiön vuoksi [32], [33]. Älypuhelinpohjainen mittaus voi auttaa vähentämään näitä vääristymiä tarjoamalla käyttäjälle mahdollisuuden mitata verenpainetta omassa, stressittömässä ympäristössään. Älypuhelimet tarjoavat jatkuvasti saatavilla olevan ja helpon tavan seurata verenpainetta ilman erillisiä laitteita, mahdollistaen mittaukset arkiolosuhteissa ja tukien korkeiden verenpaineiden ennaltaehkäisyä. Älypuhelinvalmistajien osoittama kiinnostus terveystietojen tarjoamiseen avaa mahdollisuuksia laajempaan terveyden seurantaan, ja esitellyt teknologiat voivat tulevaisuudessa parantaa verenpaineen seurantaa sekä terveydenhuollon tukea, edistäen varhaisempaa diagnosointia ja tehokkaampaa hoitoa.

Lähdeluettelo

[1] S. L. D. ja Suomen Kardiologisen Seuran asettama työryhmä, *Kohonnut verenpaine. Käypä hoito -suositus.* https://www.kaypahoito.fi, Viitattu 9.10.2024, 2024.

[2] A. Chandrasekhar, C.-S. Kim, M. Naji, K. Natarajan, J.-O. Hahn ja R. Mukkamala, "Smartphone-based blood pressure monitoring via the oscillometric finger-pressing method", *Science Translational Medicine*, vol. 10, eaap8674, 2018. DOI: 10.1126/scitranslmed.aap8674.

[3] W. E. Forum, *Charted: There Are More Phones Than People in the World*, https://www.weforum.org/agenda/2023/04/charted-there-are-more-phones-than-people-in-the-world/, Viitattu 9.10.2024, 2023.

[4] E. Haug, O. Sand, Ø. V. Sjaastad ja K. C. Toverud, *Ihmisen fysiologia*, 1.-3. painos. 2007, s. 251–281.

[5] E. Ryödi, *Sydämen rakenne ja toiminta*, https://www.sydansairaala.fi/tietoa/asiantuntija-artikkelit/sydamen-rakenne-ja-toiminta/, Viitattu 11.12.2024, 2018.

[6] P. S. Lewis, "Oscillometric measurement of blood pressure: a simplified explanation. On behalf of the British and Irish Hypertension Society's Blood Pressure Measurement Working Party", *Journal of Human Hypertension*, vol. 33, s. 349–351, 2019. DOI: 10.1038/s41371-019-0196-9.

[7] T. N. ja Antti Jula, *Verenpaineen kotimittaus*, https://www.duodecimlehti.fi/duo98287, Viitattu 11.12.2024, 2009.

[8] D. Giavarina, "Understanding Bland Altman analysis", *Biochem Med (Zagreb)*, vol. 25, s. 141–151, 2015. DOI: 10.11613/BM.2015.015.

[9] A. Dinh, Y. Choi ja S.-B. Ko, "A heart rate sensor based on seismocardiography for vital sign monitoring systems", teoksessa *2011 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering(CCECE)*, 2011, s. 000 665–000 668. DOI: 10.1109/CCECE.2011.6030536.

[10] J. Allen, "Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement", *Physiological Measurement*, vol. 28, R1, 2007. DOI: 10.1088/0967-3334/28/3/R01.

[11] O. T. Inan, P.-F. Migeotte, K.-S. Park et al., "Ballistocardiography and Seismocardiography: A Review of Recent Advances", *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 19, s. 1414–1427, 2015. DOI: 10.1109/JBHI.2014.2361732.

[12] G. S. Stergiou, R. Mukkamala, A. Avolio et al., "Cuffless blood pressure measuring devices: review and statement by the European Society of Hypertension Working Group on Blood Pressure Monitoring and Cardiovascular Variability", *Journal of hypertension*, vol. 40, s. 1449–1460, 2022. DOI: 10.1097/HJH.0000000000003224.

[13] A. A. Alian ja K. H. Shelley, "Photoplethysmography", *Best Practice and Research Clinical Anaesthesiology*, vol. 28, s. 395–406, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bpa.2014.08.006.

[14] M. Elgendi, R. Fletcher, Y. Liang et al., "The use of photoplethysmography for assessing hypertension", *NPJ Digital Medicine*, vol. 2, s. 60, 2019. DOI: 10.1038/s41746-019-0136-7.

[15] A. Taebi, B. E. Solar, A. J. Bomar, R. H. Sandler ja H. A. Mansy, "Recent Advances in Seismocardiography", *Vibration*, vol. 2, s. 64–86, 2019. DOI: 10.3390/vibration2010005.

[16] M. Pänkäälä, T. Koivisto, O. Lahdenoja et al., "Detection of atrial fibrillation with seismocardiography", teoksessa *2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2016, s. 4369–4374. DOI: 10.1109/EMBC.2016.7591695.

[17] M. S. Imtiaz, R. Shrestha, T. Dhillon et al., "Correlation between seismocardiogram and systolic blood pressure", teoksessa *2013 26th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2013, s. 1–4. DOI: 10.1109/CCECE.2013.6567773.

[18] A. Chandrasekhar, K. Natarajan, M. Yavarimanesh et al., "An iPhone Application for Blood Pressure Monitoring via the Oscillometric Finger Pressing Method", *Scientific Reports*, vol. 8, s. 13 136, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-31632-x.

[19] S. Keil, *Technology and Practical Use of Strain Gages: With Particular Consideration of Stress Analysis Using Strain Gages*. Wilhelm Ernst & Sohn, 2017. DOI: 10.1002/9783433606667.

[20] R. Block, M. Yavarimanesh, K. Natarajan ja et al., "Conventional pulse transit times as markers of blood pressure changes in humans", *Scientific Reports*, vol. 10, s. 16 373, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-73143-8.

[21] T. Panula, J.-P. Sirkiä, D. Wong ja M. Kaisti, "Advances in Non-Invasive Blood Pressure Measurement Techniques", *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 16, s. 424–438, 2023. DOI: 10.1109/RBME.2022.3141877.

[22] M. Elgendi, R. Fletcher, Y. Liang et al., "The use of photoplethysmography for assessing hypertension", *NPJ Digit Med*, vol. 2, s. 60, 2019. DOI: 10.1038/s41746-019-0136-7.

[23] E. J. Wang, J. Zhu, M. Jain et al., "Seismo: Blood Pressure Monitoring using Built-in Smartphone Accelerometer and Camera", teoksessa *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Association for Computing Machinery, 2018, s. 1–9. DOI: 10.1145/3173574.3173999.

[24] David Nield, *All the Sensors in Your Smartphone, and How They Work*, https://gizmodo.com/all-the-sensors-in-your-smartphone-and-how-they-work-1797121002, Viitattu 15.11.2024, 2020.

[25] C. Stoll, *Introduction to Fast Fourier Transform (FFT) Analysis*, https://vibrationresearch.com/blog/fast-fourier-transform-fft-analysis/, Viitattu 12.12.2024, 2023.

[26] S. C. Gao, P. Wittek, L. Zhao ja W. J. Jiang, "Data-driven estimation of blood pressure using photoplethysmographic signals", teoksessa *2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2016, s. 766–769. DOI: 10.1109/EMBC.2016.7590814.

[27] C. Landry, V. Dhamotharan, M. Freithaler et al., "A smartphone application toward detection of systolic hypertension in underserved populations", *Scientific Reports*, vol. 14, s. 15 410, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-65269-w.

[28] L. Frey, C. Menon ja M. Elgendi, "Blood pressure measurement using only a smartphone", *npj Digital Medicine*, vol. 5, s. 86, 2022. DOI: 10.1038/s41746-022-00629-2.

[29] M. Dörr, S. Weber, R. Birkemeyer et al., "iPhone App compared with standard blood pressure measurement - The iPARR trial", *American Heart Journal*, vol. 233, s. 102–108, 2021. DOI: 10.1016/j.ahj.2020.12.003.

[30] P. Schoettker, J. Degott, G. Hofmann et al., "Blood pressure measurements with the OptiBP smartphone app validated against reference auscultatory measurements", *Scientific Reports*, vol. 10, nro 1, s. 17 827, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-74955-4.

[31] T. Yamakoshi, P. Rolfe ja K. I. Yamakoshi, "Cuffless blood pressure estimation based on haemodynamic principles: progress towards mobile healthcare", *PeerJ*, vol. 9, e11479, 2021. DOI: 10.7717/peerj.11479.

[32] Eeva Juhanoja, Jouni Johansson, Ilkka Kantola, Antti Jula ja Teemu Niiranen, *Valkotakkihypertensio*, https://www.duodecimlehti.fi/duo13856, Viitattu 24.11.2024, 2017.

[33] Anja Kaisanlahti, *Verenpaineen kotimittaus poistaa valkotakki-ilmiön*, https://sydan.fi/artikkeli/verenpaineen-kotimittaus-poistaa-valkotakki-ilmion/, Viitattu 24.11.2024, 2019.