

Konsta Kaukonen

# ÄLYKELLOJEN JA PUETTAVIEN LAITTEIDEN ANTURIT

Kandidaatintyö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastaja: Katja Laine  
Kesäkuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Konsta Kaukonen: ÄLYKELLOJEN JA PUETTAVIEN LAITTEIDEN ANTURIT  
Kandidaatintyö  
Tampereen Yliopisto  
Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma  
Kesäkuu 2024

---

Äly- ja urheilukellojen sekä muiden puettavien laitteiden markkina on osoittanut vahvan kasvunsa lähivuosina, kun etenkin älykellot ovat yleistyneet arkikuvassa perinteisempien urheilijapiirien lisäksi. Jokapäiväisen äly- tai urheilukellon käyttäjän tarpeet kuitenkin asettavat laitteen suunnittelulle ja komponenttivalinnoille hyvin erilaiset tavoitteet, kuin pääasiassa urheilun seurantaan suunnitellulla laitteella. Tämä jako pidempiaikaisen arjen seurannan, sekä hetkellisemmän urheilun seurannan välillä on työssä keskeisenä yksityiskohtana, joka johdattaa tarkastelua käyttökohteista laitteiden antureihin ja niiden luotettavuuteen. Työssä tutkitaan kirjallisuuskatsauksen muodossa äly- ja urheilukellojen käyttäjälleen tarjoamia ominaisuuksia, näiden taustalla olevia mittausteknologioita sekä mittausten luotettavuutta. Aiheen rajaamiseksi luotettavuuden ja etenkin tulevaisuuden kehityssuuntien tarkastelussa keskitytään pääasiassa niihin antureihin, joiden mittaustarkkuudessa löydettiin selkeästi parannettavaa. Lisäksi työssä vertailtiin älykellojen antureita esimerkiksi lääketieteellisessä käytössä oleviin antureihin, joita voitaisiin mahdollisesti hyödyntää tulevaisuuden puettavissa laitteissa.

Laitteiden käyttökohteita ja antureiden mittaustarkkuutta tarkasteltaessa selvisi nopeasti, että vaikka urheilun ja arjen seurannassa käytetään suurimmaksi osaksi samoja antureita, käyttökohteet asettavat varsin erilaiset vaatimukset kellon suunnittelulle. Arjen ja terveyden jatkuva-aikaisessa seurannassa korostuvia ominaisuuksia ovat muun muassa akunkesto ja laitteen käyttömukavuus, kun taas lyhyempiaikaisessa urheilusuorituksen seurannassa etenkin mittaustarkkuudella on suuri merkitys. Mittaustarkkuuden korostumisen urheilun seurannassa aiheuttaa lähinnä seurannan lyhytaikainen luonne, jossa käyttäjä voi olla kiinnostunut jopa yksittäisistä mittaustuloksista ja mitatuista ääriarvosta kuten enimmäisyksiköistä. On myös melko tyypillistä, että laitteet analysoivat suurella tarkkuudella urheilussa tapahtuvia yksittäisiä toistoja, kuten työssä käsitellyssä juoksuvalmennusesimerkissä.

Tulevaisuudessa kellon käyttömukavuutta etenkin arjen seurannassa tulevat parantamaan muun muassa akku- ja näyttöteknologioiden kehitys, sekä komponenttien tehonkulutuksen ja fyysisen koon pieneneminen. Näiden lisäksi hyvin todennäköinen kehityskohde tulevaisuudessa on tekoälyn käyttö datan analysoinnissa. Tekoälymallit nimittäin soveltuvat erityisen hyvin analysoimaan pieniä muutoksia suuressa määrässä dataa. Voisikin esimerkiksi olla mahdollista, että tulevaisuuden puettavat laitteet pystyisivät tunnistamaan käyttäjän sairastumisen, tai muun poikkeuksellisen muutoksen terveydentilassa aiemmin kuin käyttäjä sitä itse havaitsee.

Avainsanat: älykello, urheilukello, puettava laite, mittaustarkkuus, terveyden seuranta.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

# ALKUSANAT

Tämä kandidaatintutkielma tehtiin kirjallisuuskatsauksena Tampereen Yliopistolle keväällä 2024. Erityisesti haluan kiittää kaikkia vastuuhenkilöitä selkeästi järjestetystä ja ohjeistetusta kandiseminaarikurssista.

Tampereella, 8.6.2024

Konsta Kaukonen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	5
2. MITÄ PUETTAVILLA LAITTEILLA MITATAAN? .....	7
2.1 Urheilun seurannan perusmittaukset .....	7
2.1.1 Liikuntasuorituksen vaativuuden arviointi .....	7
2.1.2 Fyysisen kuormituksen arviointi .....	9
2.2 Jatkuvat arjen ja hyvinvoinnin seurantamittaukset .....	10
2.3 Muiden puettavien laitteiden tuomat edut .....	12
3. YLEISIMPIEN MITTAUSTEN LUOTETTAVUUS .....	14
3.1 Sykemittaus .....	14
3.2 Veren happitason mittaus .....	14
3.3 Liikeantureiden mittaustarkkuus .....	15
3.4 Satelliittipaikannuksen tarkkuus .....	16
3.5 Unen ja virkeystason mittaus .....	17
3.6 Mittaustarkkuuden haasteet .....	18
3.7 Tarkemmat mittausmenetelmät .....	19
4. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT .....	21
4.1 Tulevaisuuden anturitekniikat ja mittausmenetelmät .....	21
4.2 Kehityksen avaamia mahdollisuuksia .....	22
5. YHTEENVETO .....	24
LÄHTEET .....	26

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

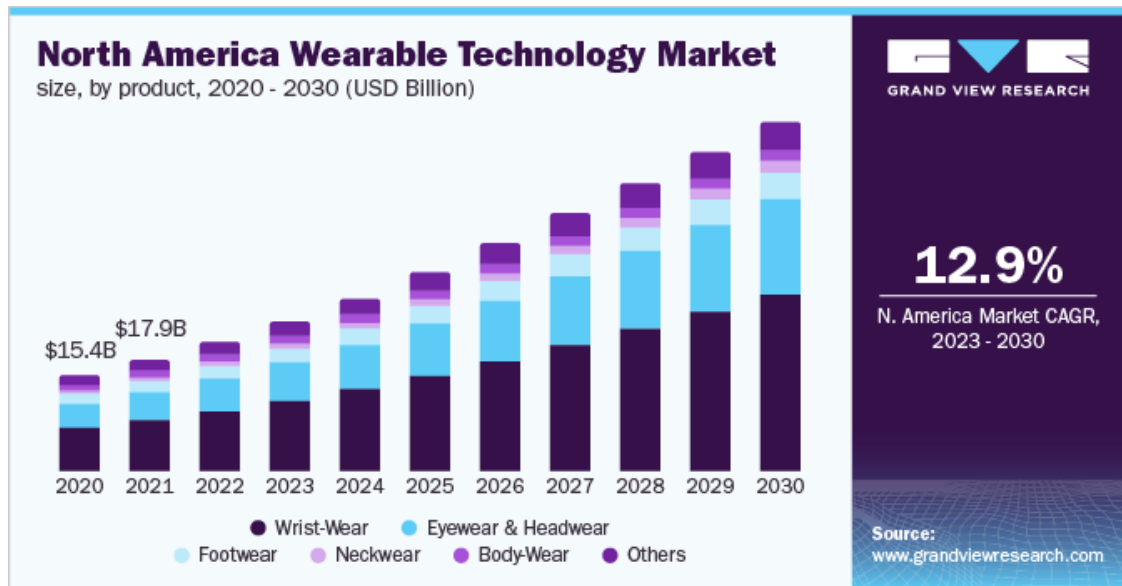
CPU	Central processing unit
EKG	Elektrokardiogrammi (eng. ECG, electrocardiogram)
GNSS	Global navigation satellite system
GPU	Graphics processing unit
IC	Integrated circuit
LCD	Liquid crystal display
MEMS	Micro-electromechanical system
OLED	Organic light emitting diode
PPG	Photoplethysmography
SaO <sub>2</sub>	Arterial oxygen saturation
SoC	System on Chip
SpO <sub>2</sub>	Peripheral oxygen saturation

# 1. JOHDANTO

Älykellojen nopeasti kasvanut suosio on jo useita vuosia ollut melko selkeästi näkyvässä ihmisten jokapäiväisessä arjessa. Kadulla vastaan tulevat ihmiset vilkuilevat ilmoituksia tai vastaavat puheluihin älykelloaan käyttäen. Toiset puolestaan käyttävät äly- tai urheilukellon mittauksia ja valmennusominaisuuksia urheilusuorituksiensa tahdittamiseen ja parantamiseen. Toisaalta älykellojen ja muiden laitteiden tarkoitus ei välttämättä olisi näkyä arjessa. Äly- ja urheilukellojen, sykevöiden, älysormusten ja muiden puettavien laitteiden tärkeimmäksi rooliksi voidaan ajatella älypuhelinien oheislaitteena toimiminen sekä passiivinen datan kerääminen ilman käyttäjältä erikseen vaadittavaa huomiota.

Nykyisessä muodossaan älykellojen yleistymisen voidaan katsoa alkaneen vuosien 2010–2015 välillä, kun useat suuret teknologiayritykset kuten Sony, Samsung ja Apple julkaisivat omat versionsa älykelloista. Toisaalta ensimmäisten älykellojen voidaan katsoa tulleen markkinoille jo 1990-luvun puolella, kun digitaalisiin kelloihin kehitettiin muun muassa integraatiota tietokoneiden kanssa sähköpostien ja kalenterimerkintöjen lukemiseksi. Nykypäivän äly- ja urheilukellojen erityispiirteitä ovat muun muassa tiivis integraatio älypuhelinien kanssa, laajat sovellusekosysteemit sekä urheilun ja yleisen terveyden, kuten unen ja sykkeen seuranta.

Reilun kymmenen vuoden historiasta huolimatta älykellot muiden puettavien terveyden-seurantalaitteiden kanssa ovat osa melko uutta ja kasvavaa markkinaa. Yhtenä nykymuotoisten älykellojen yleistymisen alkutekijöistä ja samalla indikaattorina kasvavasta kysynnästä voidaan pitää Pebble-älykelloa, joka täysin uuden yrityksen tuotteena onnistui keräämään 10 miljoonan dollarin rahoituksen joukkorahoituspalvelu Kickstarterissa [1]. Kuten kuva 1 havainnollistaa, tällä hetkellä puettavien älylaitteiden markkinan ennustetaan kasvavan lähitulevaisuudessa reilusti, lähes kaksinkertaisella vuositahdilla kypsempään älypuhelinmarkkinaan verrattuna [2][3].



**Kuva 1.** Kuvaaja puettavien laitteiden Pohjois-Amerikan markkinoiden kehitysnusteesta [2].

Todennäköisesti markkinan jatkuva kasvu kannustaa entistä enemmän uusia yrityksiä kilpailuun mukaan, mutta myös isoja yrityksiä sijoittamaan lisää laitteiden kehitykseen. Täten on mahdollista, että laitteiden ominaisuudet ja tärkeimmät kehityksen kohteet tulevat muuttumaan laitteiden yleistyessä etenkin jokapäiväisessä kuluttajakäytössä. Jokapäiväisessä käytössä korostuvat erityisesti laitteiden käyttömukavuus, akunkesto sekä kerätyn datan analysointi ja selkeä esittäminen yksittäisten mittausten tarkkuutta enemmän.

Työssä keskeisimpänä selvityksen kohteena on se, mikä rajoittaa nykyisten antureiden mittausten tarkkuutta, ja miten nämä rajoitukset voidaan kiertää tulevaisuudessa. Työssä keskitytään tarkastelemaan nykymuotoisten älykellojen käyttökohteita, antureiden ja mittausten luotettavuutta sekä tulevaisuuden näkymiä kirjallisuuskatsauksen muodossa. Lisäksi työssä sivutaan muita urheilun ja terveyden seurantaan käytettyjä kuluttajaelektronikkalaitteita, kuten sykevöitä ja älysormuksia. Näkökulmaa laajennetaan muihin teknologioihin ja toteutuksiin vertailemalla älykellojen antureita jo tällä hetkellä lääketieteellisessä käytössä oleviin antureihin niin mittaustarkkuuden, kuin puettaviin laitteisiin soveltuvuuden kannalta. Aiheen käsittelyn selkeyttämiseksi käsittely aloitetaan luvussa 2 esittelemällä yleisimmät laitteiden käyttökohteet sekä niitä varten tehtävät mittaukset. Näiden perustana oleviin antureihin sekä niiden mittatarkkuuteen ja puettaviin laitteisiin soveltuvuuteen syvennytään luvussa 3. Luku 4 keskittyy puolestaan tarkastelemaan puettavien laitteiden tulevaisuuden kehityssuuntia ja eri teknologisten kehitysten tuomia mahdollisuuksia.

## 2. MITÄ PUETTAVILLA LAITTEILLA MITATAAN?

Yksittäisten antureiden sijaan lähdetään tässä luvussa tarkastelemaan asiaa kerättävän datan ja siitä käyttäjän saaman informaation näkökulmasta. Käyttäjän älykellosta tai muusta puettavasta laitteesta saama informaatio voidaan jakaa välittömästi hyödynnettävään ja pidemmältä aikaväliltä kerättävään informaatioon. Suurin osa urheilunseurantaominaisuuksista voidaan ajatella välittömiksi, tai ainakin lyhyeltä aikaväliltä dataa kerääviksi, kun taas esimerkiksi unenlaatu- ja vireystasoanalyysit perustuvat selkeästi pidemmältä ajalta kerättyihin mittaustuloksiin. Toisena erona näissä on se, että suuressa osassa välittömiä tai lyhytaikaisia mittauksia käyttäjä on kiinnostunut suoraan mitattavasta suureesta ja useissa tapauksissa jopa yksittäisistä mitatuista arvoista, kun taas pidempiaikaisissa mittauksissa kiinnostuksen kohde on usein trendit ja hitaammat muutokset. Vaikka lyhytaikaisia mittauksia kuten sykettä ja askelmäärää hyödynnetään pohjana esimerkiksi energiatason tai päivän aikana poltetun kalorimäärän arviointiin, on lopullinen käyttäjälle annettava informaatio usein analyysi tai ikään kuin yhteenveto useamman anturin datasta pitkältä ajalta.

Kumpikin kategorioista asettaa myös eri vaatimukset laitteelle ja antureiden mittaustarkkuudelle. Koska lyhytaikaisissa mittauksissa ollaan kiinnostuneita mahdollisesti jopa yksittäisen mittauksen arvosta, laitteen mittaustarkkuudella on huomattavasti suurempi merkitys kuin pitkäaikaisessa mittauksessa. Jatkuva-aikaisissa mittauksissa myös laitteen käyttömukavuudella ja akunkestolla on suurempi merkitys.

### 2.1 Urheilun seurannan perusmittaukset

Suurimmalle osalle käyttäjistä urheilun seurannan tavoitteita ovat urheilusuorituksen vaatavuuden seuranta sekä suorituksen aikainen kehon kuormittuneisuuden tarkkailu. Kerättyä dataa voidaan pidemmällä aikavälillä hyödyntää urheilijan suorituskyvyn kehitystä seurattaessa. Myös suorituksen aikana tehtävät mittaukset jakautuvat melko luonnollisesti suorituksen vaatavuuden, kuten pituuden ja vauhdin mittaamiseen sekä urheilijan fyysisen kuormituksen mittaamiseen.

#### 2.1.1 Liikuntasuorituksen vaatavuuden arviointi

Itse liikuntasuorituksen vaatavuuden arvioimiseksi tärkeimmät mitattavat suureet ovat yleensä kuljettu reitti, toistojen, kuten askelten määrä sekä tietysti liikunnan muoto, kuten juoksu tai pyöräily. Näistä yhdessä käyttäjän itsestään antamien, tai käyttäjistä kerättyjen

tietojen avulla saadaan muodostettua yleisen tason arvio liikuntasuorituksen kuormittavuudesta. Tällä ikään kuin objektiivisella liikuntasuorituksesta tehdyllä analyysillä ei voida kuitenkaan tarkasti arvioida yksittäisen käyttäjän kokemaa räsitusta. Esimerkiksi ammattiuurheilijalle kevyt lenkki voi olla hyvin kuormittava keskivertokuntoiselle ihmiselle.

Kuljetun matkan seuraamiseen käytetään lähes jokaisesta älykellosta, urheilukellosta tai muusta puettavasta älylaitteesta löytyviä gyro- ja kiihtyvyyssantureita sekä satelliittipaikannusjärjestelmää. Satelliittipaikannuksen avulla saadaan yleensä tarpeeksi hyvällä tarkkuudella selvitettyä niin kuljettu matka kuin korkeuden vaihtelut esimerkiksi kartta-palvelusta. Paikannustarkkuuden parantamiseksi ja satelliittipaikannuksen tehonkäytön pienentämiseksi voidaan kuitenkin hyödyntää esimerkiksi ilmanpaineanturia, jota käytetään korkeuserojen ja niistä johtuvan paikannusvirheen mittaamiseen [4][5]. Kiihtyvyyssanturia voidaan puolestaan käyttää täydentämään satelliittipaikannuksen epätarkkuuksia siinä tapauksessa, jos esimerkiksi käyttäjän keskimääräinen askeleenpituus on tiedossa.

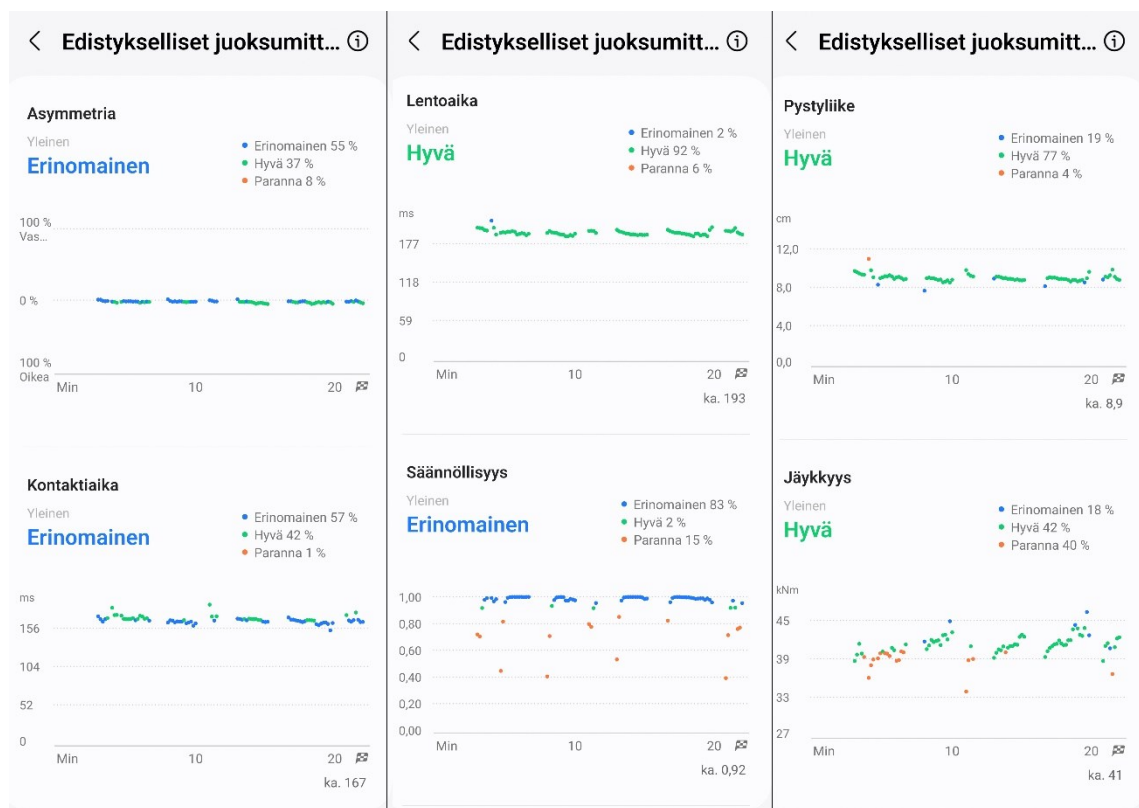
Askelten tai muiden liikunnassa tapahtuvien toistojen seuranta onkin yksi gyro- ja kiihtyvyyssantureiden tärkeimmistä käyttötarkoituksista. Kiihtyvyyssanturi mittaa kiihtyvyyden muutoksia, kun taas gyroanturi mittaa kulmanopeuden eli lopulta laitteen asennon muutoksia. [6]

Kuten aiemmin todettiin, urheilusuorituksen seurannan kannalta oleellinen tieto on myös liikuntamuoto. Perinteisesti liikunnan seuranta on pitänyt aloittaa manuaalisesti valitsemalla laitteesta tietyn urheilulajin seurantaohjelma, jolloin laite pystyy ennalta määriteltujen mallien perusteella seuraamaan haluttuja yksityiskohtia liikkeistä ja kokonaissuorituksesta. Moderneissa laitteissa yleinen ominaisuus on kuitenkin urheilulajin automaattinen tunnistus, joka todennäköisesti perustuu juuri laitteen liikkeessä tapahtuvien toistuvien kuvioiden tunnistamiseen antureiden avulla. Artikkelissa ”Sport-related human activity detection and recognition using a smartwatch” käytetään varsin hyvällä menestyksellä signaalinkäsittelyn keinoja eri aktiviteettien tunnistamiseen älykellon liikeantureiden datasta [7]. Kun liikuntamuoto on tiedossa, voidaan liikeantureista mitata muun muassa toistojen kuten askelten tahtia, tai esimerkiksi liikkeiden symmetriaa. Kellolla tehty mitaus ei kuitenkaan aina ole yhtä luotettava kuin toivottaisiin, sillä esimerkiksi käden liikkeet ja tärinä voivat aiheuttaa häiriötä tulokseen.

## 2.1.2 Fyysisen kuormituksen arviointi

Yksilön kokemaa kuormitusta voidaan puolestaan paremmin arvioida urheilijan elintoi-  
mintoja ja kehoa mittaamalla. Soveltuvia mittauksia ovat esimerkiksi syke-, veren happi-  
taso-, ja hengityksen tiheysmittaukset. Näistä tällä hetkellä eniten käytetty ja tärkein on  
sykkeen mittaus, jota hyödynnetään suurimmassa osassa mittausominaisuuksia. Syke-  
mittauksen suuresta roolista kertoo myös se, että etenkin urheilussa kellojen lisäksi tyy-  
pillisesti käytetään erillisiä sykevöitä, jotka mittaavat sykkeen käyttäjän vartalon alueelta,  
joka parantaa anturin kontaktia ihon kanssa ja samalla mittaustarkkuutta. Erikoistuneem-  
mat mittaukset, kuten hengityksen seuranta ovat puolestaan nykypäivänä lähinnä huip-  
puluokkaisten urheilukellojen ominaisuuksia. [8][9]

Palataan hetkeksi kuitenkin tarkastelemaan kellon liikeantureita, sillä niitä voidaan käyt-  
tää myös urheilijan suoriutumisen ja jopa fyysisen väsymyksen seurantaan. Osalla laite-  
ja ohjelmistovalmistajista on nimittäin eri lajeihin valmennustoimintoja, jotka seuraavat  
muun muassa liikkeen symmetriaa ja voimakkuutta antaakseen palautetta urheilutekni-  
kasta. Alla olevassa kuvassa 2 on esimerkkinä Samsung Galaxy Watch 4 -älykellon ke-  
räämä valmennusdata 3,75 km mittaiselta juoksulenkillä.



**Kuva 2.** Juoksuvalmennusdata Samsung Galaxy Watch 4 -älykellosta.

Kuvassa esitetyn kaltaista tarkempaa liikkeen seuranta voidaan hyödyntää palautteena käyttäjälle, tässä tapauksessa juoksutekniikan parantamiseksi. Toinen käyttökohde on kuitenkin fyysisen kuormituksen, ja sen vaikutusten seuranta. Kuvan 2 tapauksessa voidaan havaita, kuinka jokaisen juoksujakson aikana esimerkiksi askelten välinen lentoaika kääntyy selkeään laskuun juoksijan väsymisen myötä. Kellojen käyttämät data-analysointialgoritmit ja -tekniikat ovat kuitenkin lähes poikkeuksetta liikesalaisuuksia. Todennäköisesti kuvan 2 kuvaajat eivät myöskään edusta antureiden raakaa dataa, vaan jollain tapaa valmiiksi käsiteltyjä tuloksia. Tällaisten ominaisuuksien yleistyminen kuitenkin kertoo liikeantureiden monikäyttöisyydestä, ja jopa niiden hyvästä mittaustarkkuudesta.

Muita edistysellisiä, joskin hieman pienemmässä roolissa olevia fyysisen kuormituksen arviointiin käytettäviä mittauksia ovat hengitystiheyden mittaus ja veren happitason mittaus. Kumpaakin käytetään lähinnä kestävyyskunnan ja hapenottokyvyn arviointiin.

Kuten mainittu, yksi keskeisimmistä suorituksen aikana mitattavista suureista on urheilijan syke. Sykkeen tahdista urheilusuorituksen aikana, sekä urheilun jälkeisestä normaalitasolle palautumisen nopeudesta voidaan melko luotettavasti tehdä päätelmiä suorituksen kuormittavuudesta sekä käyttäjän kestävyyskunnosta. [10]

Lähes jokaisen urheilusuorituksen arvioimiseksi halutaan tietää mahdollisimman tarkasti liikuntamuoto, kuljetun reitin ominaisuudet sekä kehon fyysistä kuormitusta kuvaavat tiedot. Näitä keskenään vertailemalla voidaan esimerkiksi antaa arvio käyttäjän kestävyyskunnosta ja kokemasta rasituksesta keskimääräisen liikkujan vastaavaan suoritukseen verrattuna. Etenkin tavallisille ihmisille älykellot ja muut liikunnan seurantalaitteet mahdollistavat entistä helpomman ja tarkemman tavan oman aktiivisuuden ja kestävyyskunnan vertailemiseksi. Suoritusten arviointia helpottaa etenkin se, että vertailu on mahdollista osallistumatta kilpailuihin tai urheilematta juuri samaan aikaan samassa paikassa vertailukohteen kanssa. Voidaan ajatella, että älykellot ja muut seurantalaitteet pystyvät ikään kuin normalisoimaan jokaisen urheilusuorituksen niiden vertailun helpottamiseksi. Urheilusta ja laajemmin elämäntavoista saadulla palautteella on puolestaan laajalti todettu olevan positiivisia vaikutuksia käyttäjän haluun parantaa suorituksiaan ja kehittää terveyttään [11][12].

## 2.2 Jatkuvat arjen ja hyvinvoinnin seurantamittaukset

Toinen yleisimmistä äly- ja urheilukellojen käyttökohteista on passiivinen arjen ja elämäntapojen seuranta. Yksinkertaisin esimerkki arjen seuraamiseksi tehtävästä mittauksesta on päivittäisen askelmäärän seuranta fyysisen aktiivisuuden arvioimiseksi. Toinen

hyvin yleinen seurattava asia myös tässä tapauksessa on käyttäjän syke, päivän aikana kertyneestä datasta voidaan päätellä tyypillinen leposyke ja arvioida kulutettujen kalorien määrää. Yleensä merkittävästi virtaa kuluttavia mittauksia, kuten sykemittausta tehdään urheilusuoritusten ulkopuolella vain tietyin väliajoin akunkeston parantamiseksi.

Nykylaitteiden edistyneemmät anturit mahdollistavat kuitenkin monipuolisempia ja yksityiskohtaisempia mittauksia myös jatkuvamuotoisessa arjen seurannassa. Yleisiä modernien kellojen hyvinvoinnin seuranta ominaisuuksia ovat muun muassa unen, leposykkeen, sekä esimerkiksi kuukautiskierron seuranta. Näiden lisäksi etenkin urheilukelloissa yleinen ominaisuus on käyttäjän rasiustilan ja urheilusta palautumisen seuranta, joka yhdistää tietoja muun muassa liikunnasta, unesta ja sykkeestä yksinkertaisemman yleiskuvan muodostamiseksi. Yksi tunnetuimpia yleisen rasituksen tai jaksamisen seurantaominaisuuksia on urheilukellovalmistaja Garminin patentoima ”Body Battery” -ominaisuus, mikä esittää käyttäjän energiatason ikään kuin akun varaustasona. Ihmisen jaksamisen rinnastaminen laitteiden akkuun tekee ominaisuudesta erityisen helposti ymmärrettävän, sillä lähes jokainen käyttäjä on jo tottunut seuraamaan eri elektronikkalaitteidensa akun varaustasoa. [9][13]

Vastaavien, suuren datamäärän analysoimiseen pohjautuvien ominaisuuksien voidaan odottaa yleistyvän tulevaisuudessa antureiden virrankulutuksen pienentyessä, kellojen laskentatehon kasvaessa ja mahdollisesti jopa tekoälyn hyödyntämisen myötä. Tekoälyyn perustuvat ominaisuudet voisivat olla erityisen hyödyllisiä juuri arkista hyvinvointia seurattaessa. Urheilusuorituksen seurannassa mitattavat suureet, kuten maksimisyke, askelmäärä ja kuljettu matka ovat puolestaan usein konkreettisempia kuin arjesta mitattavat asiat, jotka vaativat enemmän datan analysointia ja muotoilua. Arkea seurattaessa mittausten tarkkuus ei myöskään ole yhtä kriittistä, sillä suurimmaksi osaksi analysoidaan mittausten keskiarvoja ja pidemmän aikavälin muutoksia.

### 2.3 Muiden puettavien laitteiden tuomat edut

Suuremmaksi ongelmaksi kellojen mittaustarkkuus muodostuukin yleensä liikuntasuorituksia tai muita nopeita suureiden vaihteluita seurattaessa. Tämä johtuu siitä, että mitausten virheet ikään kuin korostuvat, kun esimerkiksi urheilua seurattaessa halutaan tarkkailla suureiden hetkellisiä ääriarvoja, jolloin mahdollisia virheellisiä tuloksia ei saada poistettua esimerkiksi ottamalla tietyltä aikaväliltä mitausten keskiarvo. Myöskään näytteenottotaajuuden kasvattamisesta ei yleensä olisi suurta hyötyä, sillä usein syke mitataan optisesti sydämenlyöntien mukaisista veren liikkeistä ihon alla. Suurellakaan mitaustaajuudella ei saada merkittävästi lisäinformaatiota, nimittäin mittauksen pitää ikään kuin odottaa yksi tai useampi sykejakso tahdin määrittämiseksi. Optista mittausta, eli PPG (photoplethysmography) -mittausta käytetään yleensä sen yksinkertaisuuden ja toimintavarmuuden vuoksi. Saatavien tulosten luotettavuus voi kuitenkin riippua esimerkiksi siitä, kuinka selkeästi verisuonet ovat esillä käyttäjän ranteessa. Toinen yleinen sykkeen mittaukseen käytetty tekniikka on sähköinen mittaus eli EKG (Electrocardiogram). Sähköisen mittauksen suurimpana etuna on se, että voidaan mitata sydämen sykkeen eri vaiheita ohjaavia hermosignaaleita, kun taas PPG-mittauksessa pienin mitattava yksikkö on yleensä kokonainen sydämen sykähdyksijakso. EKG-mittauksen huonona puolena on kuitenkin se, että mittaus vaatii hyvän sähköisen yhteyden ihon kanssa. Tämän lisäksi käyttäjän sähköinen potentiaali voi vaihdella esimerkiksi liikkeen ja hankaussähkön vuoksi, aiheuttaen mittauksiin virhettä. [14]

Kummankin sykemittaustavan yhteisenä heikkoutena on yksinkertaistettuna se, että laitteella pitää olla tarpeeksi kiinteä kontakti ihon kanssa. Tähän kelloille tuttu paikka käyttäjän ranteessa ei kuitenkaan ole paras mahdollinen, suurimmassa osassa aktiviteeteistä kädet liikkuvat jatkuvasti. Liikkeen lisäksi ranne on melko luinen, jolloin kello ei aina pysy täysin ihossa kiinni. Tämän vuoksi sykkeen seuraamiseksi käytetäänkin usein sykevöitä, joilla saavutetaan kelloa parempi mittaustarkkuus. Sykevyö kiristetään käyttäjän vartaloa vasten kuvan 3 mukaisesti, jolloin mittauksia häiritsevä liike ja värinä on pienempää, ja kontakti ihon kanssa parempi.



**Kuva 3.** Esimerkki sykevyön käytöstä [15].

Myös sähköinen EKG-mittaus hyötyy sykevyön sijainnista, mitattavat signaalit ovat sitä vahvempia ja tulokset luotettavampia mitä lähemmäksi sydäntä mittari saadaan. Sykevyön suurempi koko ja akun kapasiteetti mahdollistavat myös suuremmat ja tehokkaammat anturit. Sähköinen sykemittaus hyötyy myös sykevyön mahdollistamasta suuremmasta anturiparin välisestä etäisyydestä.

## 3. YLEISIMPIEN MITTAUSTEN LUOTETTAVUUS

Nykypäivän kehittyneistä antureista ja datan analysointialgoritmeista huolimatta älykelloissa joudutaan tekemään kompromisseja mittaustarkkuuden suhteen. Etenkin puettavissa laitteissa pieni koko ja tarve mahdollisimman vähän virtaa kuluttaville antureille saattaa rajoittaa mittaustarkkuutta ja luotettavuutta. Tässä luvussa tarkastellaankin nykyisten puettavien laitteiden antureiden mittausten luotettavuutta, sekä verrataan sitä esimerkiksi lääketieteessä käytettäviin tarkempiin mittalaitteisiin. Tarkastelu keskittyy kuitenkin lähinnä niihin antureihin ja mittauksiin, jotka eivät nykyisissä älykelloissa ole vielä tarpeeksi luotettavia tai ovat muuten ongelmallisia.

### 3.1 Sykemittaus

Sykkeen seuranta on luonteeltaan melko monipuolinen toimenpide, sillä esimerkiksi arkea ja yleistä terveyttä mitatessa ollaan kiinnostuneita sekä pidemmän ajan aikana tapahtuvista muutoksista, että keskiarvoista kuten leposykkeestä. Vaativimpia sykemittauksen kohteita ovat etenkin maksimisykkeen mittaus urheillessa.

Sykemittauksen virheeksi on jo muutamia vuosia vanhoilla älykelloilla todettu hieman alle kymmenen prosenttiyksikköä lääketieteellisiin EKG-sykemittareihin verrattuna [16][17]. Maksimisykkeen tai matalimman leposykkeessä kohdalla virhe kuulostaa melko suurelta muiden antureihin virheiden suuruuksiin verrattuna. On syytä kuitenkin muistaa, että ranne on fyysisiltä ominaisuuksiltaan huono paikka sykkeen mittaamiseksi, eikä tarkempikaan anturi välttämättä tuottaisi samaa tulosta kuin vartalolle useampaan eri kohtaan kiinnitettävä EKG-anturi. Mittauksen epätarkkuuden takia on kuitenkin ymmärrettävää miksi esimerkiksi ammattiuurheilijat usein käyttävät sykevoimia tai muita tarkempia laitteita. Säännöllisessä harjoittelussa esimerkiksi maksimisykkeen kehityksen analysoimisesta paremmallakin kuin 10 % tarkkuudella on hyötyä, etenkin jos urheilusuoritukset ovat tarpeeksi vertailukelpoisia.

### 3.2 Veren happitason mittaus

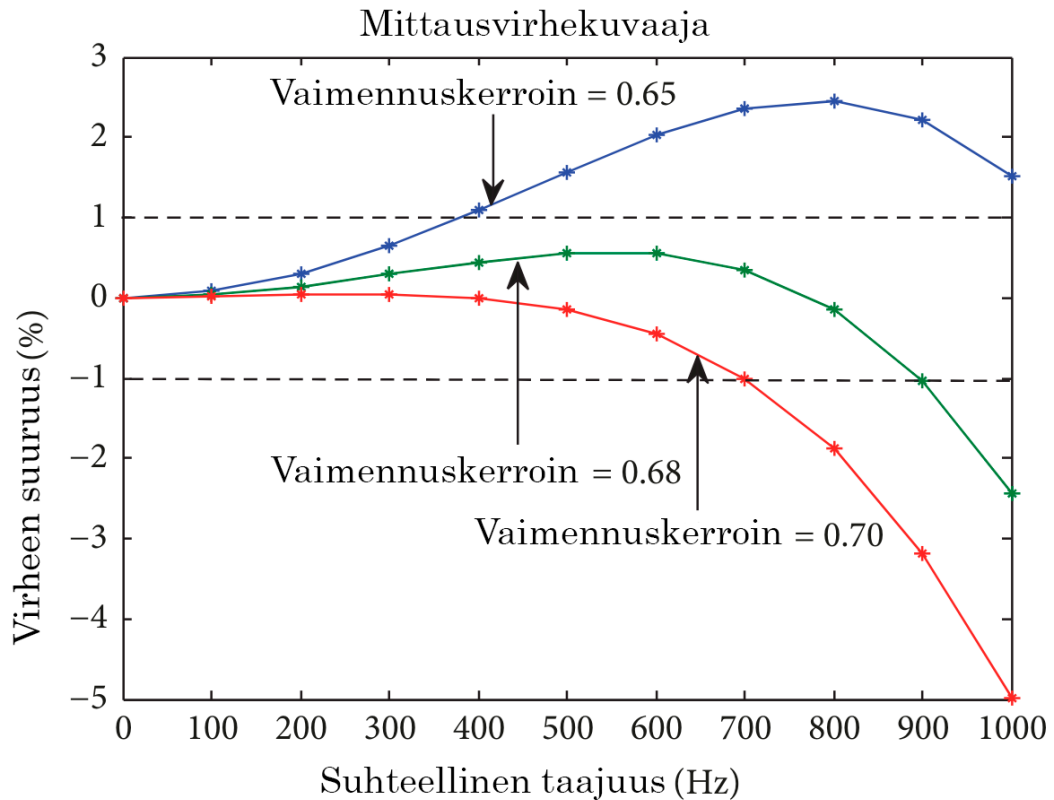
Veren happitason mittaus puettavissa laitteissa tehdään yleensä optisesti, niin sanotulla SpO<sub>2</sub> (peripheral oxygen saturation) -mittauksella. Mittausta kuvaava sana "Peripheral" tarkoittaa, että mittaus tehdään käyttäjän ääreisverenkierrosta. Yleensä tämä tarkoittaa

sormen päätä, mutta älykellon tapauksessa mittaus tapahtuu ranteen verisuonien kohdalta. Vertailukohteena SpO<sub>2</sub>-mittaukselle voidaan pitää niin sanottua SaO<sub>2</sub>-lukemaa, eli valtimoiden veren happitasoa (arterial oxygen saturation). Vaikka SaO<sub>2</sub> ja SpO<sub>2</sub> ovat eri suureita, on niillä kuitenkin lineaarinen riippuvuus, ja SpO<sub>2</sub>-lukemaa voidaan käyttää veren yleisen happitason arviointiin. [18]

Happitason mittaus on altis samoille ongelmille kuin ranteesta sykkeen mittaaminen. Haasteellista siitä tekee etenkin liikkuesssa huono kontakti ihon kanssa, yksilöllisyys verisuonten sijainnissa käyttäjien välillä, sekä jopa vaihtelut ihon värissä [19]. Ideaalinen paikka optiseen happitason mittaukseen olisi verisuoni tasaisen luun päällä, josta anturin valo heijastuisi tasaisesti. Ranteessa mittaus voidaan pahimmassa tapauksessa joutua tekemään kahden luun välistä, mikä heikentää tulosten luotettavuutta. Tämän lisäksi mittauksen luotettavuusvaatimuksia kasvattaa se, että veren happitason suhteen ollaan kiinnostuneita maksimiarvoista, eikä vain suhteellisesta vaihtelusta. Tämä tarkoittaa, että antureiden täytyy olla riittävän tarkkuuden lisäksi kalibroituja.

### **3.3 Liikeantureiden mittaustarkkuus**

Liikeantureiden hyvästä tarkkuudesta vihjaa jo niiden sovelletut käyttökohteet esimerkiksi urheilusuoritusien yksittäisten liikkeiden arvioinnissa, sekä jopa hengityksen seurannassa. Nykyisissä äly- ja urheilukelloissa käytetään pääsääntöisesti pietsosähköisiä kiihtyvyyssantureita, sekä MEMS (Micro Electro Mechanical System) -gyroskooppeja. Kyseisiä antureita voidaan valmistaa hyvin pieniin, IC (integrated circuit) -tyyppisiin pakkauksiin, mikä on mahdollistanut käytön hyvin pienissäkin laitteissa. Tämän lisäksi MEMS ja pietsosähköisten antureiden tarkkuuden ja luotettavuuden on todettu olevan varsin hyvällä tasolla. Kuva 4 esittää erään tutkimuksen keräämiä tuloksia kiihtyvyyssanturin suhteellisesta virheestä eri liikkeen taajuuksilla. [20][21]



**Kuva 4.** Mittausvirhe suhteellisen taajuuden funktiona kolmelle vaimennuskertoimen arvolle tapauksessa, jossa suhteellinen taajuus vaihtelee 0:sta 1000 Hz:iin. Muokattu lähteestä [20].

Kuvasta nähdään pietsosähköisen kiihtyvyyssanturin virheen suuruuden olevan reilusti alle prosentin luokkaa tavallisimpien urheilussa esiintyvien liiketaajuuksien kohdalla. Gyroskooppisten antureiden on puolestaan todettu pystyvän seuraamaan laitteen kulkemaa reittiä kymmenien sekuntien ajan ilman esimerkiksi urheilunseurannalle merkittävän suuruista virhettä [21]. Tämä on yleensä riittävä tarkkuus, jotta gyroanturin datalla voidaan korjata mahdollisia satelliittipaikannuksen aukkoja ja virheitä.

### 3.4 Satelliittipaikannuksen tarkkuus

Satelliittipaikannuksen tarkkuutta voidaan yleensä pitää kompromissina virrankäytön ja mittaustarkkuuden välillä etenkin olettaen, että paikannussatelliitteja on käytettävissä riittävä määrä. Satelliittipaikannuksen on kuitenkin todettu olevan merkittävä virrankuluttaja jopa puettavia laitteita suuriakuisemmissa älypuhelimissa [22]. Voidaan olettaa, että virrankäyttö sekä pienestä koosta johtuen antennien tarkkuuden suhde käytettyyn tehoon nähden on älykelloissa ja muissa puettavissa laitteissa vielä suurempi paikannustarkkuutta rajoittava ongelma.

Tästä huolimatta älykellojen GNSS-satelliittipaikannuksen virheen on todettu olevan keskimäärin noin 1,2 m vaakasuunnassa ja noin 1,5 m pystysuunnassa [23]. Mittaustarkkuus voi kuitenkin vaihdella esimerkiksi ympäristössä olevien esteiden vaikutuksesta, sekä sen mukaan missä päin maapalloa sijaintia yritetään mitata. Yleisesti muutaman metrin tarkkuutta voidaan pitää riittävänä urheilun seurantaan. Parempaa tarkkuutta saatettaisiin kuitenkin tarvita joihinkin lajeihin, kuten esimerkiksi maastajuoksuun tai -pyöräilyyn, jossa merkittävä määrä matkasta muodostuu pienistä käänöksistä, joita epätarkka paikannusjärjestelmä ei välttämättä huomioisi.

### 3.5 Unen ja virkeystason mittaus

Vaikka unenlaadun mittauksessa käytettävien liike- ja sykeantureiden tarkkuutta voidaan pitää riittävänä, unen ja virkeys- tai energiatason mittauksissa vaikuttaa usein olevan merkittävää vaihtelua ja epäluotettavuutta [24][25]. Yön aikana mittaamatta jääneiden useamman tunnin jaksojen, tai uneksi tulkitun sängyssä puhelimen selailun olen itsekin huomannut toistuvaksi ilmiöksi itselläni käytössä olevan Galaxy watch 4:n kanssa. Todennäköisesti unen mittauksessa, ja etenkin unen vaiheiden tunnistettavuudessa on eroja myös henkilöiden ja nukkuma-asentojen välillä.

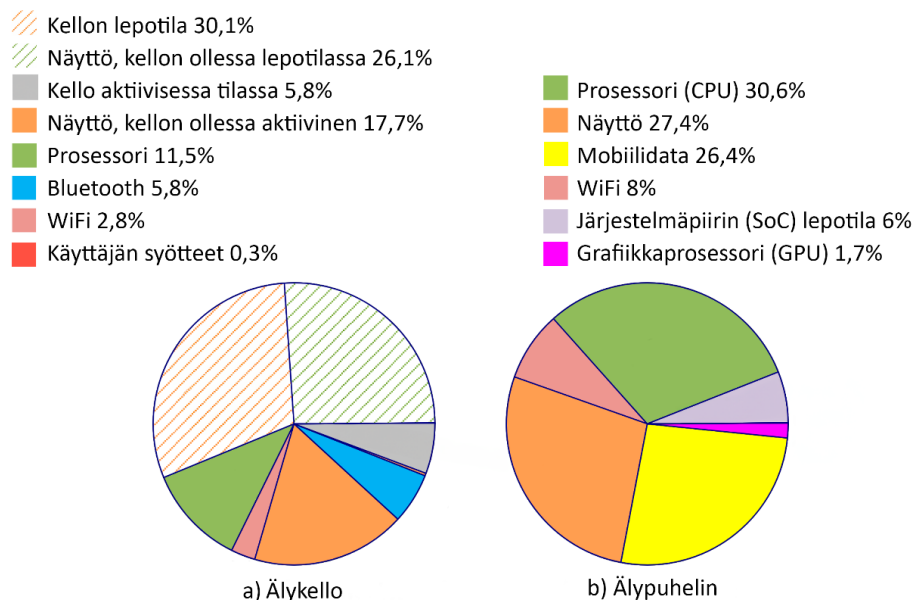
Vielä hankalampi arvioitava on joidenkin kellojen tarjoama arvio käyttäjän energisyydestä. Vaikka laitteet todennäköisesti päättelevätkin energiatason jollain lineaarisella algoritmilla, se on kuitenkin asia, jota ei voida suoraan mitata. Myöskään käyttäjien omat arviot eivät yleensä ole tarpeeksi tarkkoja mittauksen virheen arvioimiseksi.

Unen ja energiatason mittauksissa mittaustarkkuus, tai pikemminkin analyysin luotettavuus on kuitenkin merkittävää sen vuoksi, että saaduilla arvioilla voi olla yllättävän suuri rooli käyttäjän arkeen jopa alitajuntaisesti lume-efektin vuoksi. On yleistä tietoa, että lume-efektin vuoksi henkilö voi kokea positiivisia terveysvaikutuksia jo luullessaan saavansa lääkettä tai muuta hoitoa, vaikka näin ei olisi. Puettavien laitteiden mittauksissa tällä voisi kuitenkin olla negatiivinen vaikutus. Esimerkiksi jos älykello kertoo käyttäjän nukkuneen huonosti, vaikka todellisuudessa tämä olisi väärä tulkinta, saattaa tuloksen näkeminen vaikuttaa negatiivisesti käyttäjän virkeyden tunteeseen jopa käyttäjän itse sitä tiedostamatta. Muita erityisesti unen mittauksen haasteita ovat laitteen käyttömukavuus, sekä riski mahdollisten mittauksista aiheutuvien suorituspaineen vaikutus unenlaatuun tai nukahtamiseen. [26][27]

### 3.6 Mittaustarkkuuden haasteet

Varsinaisen käyttömukavuuden ja laitteen ominaisuuksien ohella kellon tai muun älylaitteen valinnassa merkittävä tekijä on laitteen akunkesto. Puettavien laitteiden kohdalla tämä on ehkä jopa suuremmassa roolissa kuin muussa elektroniikassa, sillä puettavien laitteiden lataaminen on yleensä hitaampaa ja vaatii laitteen käytön lopettamisen latauksen ajaksi.

Tarkimpien antureiden suurehko tehonkulutus ja iso koko on todettu merkittäväksi ongelmaksi puettavissa laitteissa. Nämä ovatkin keskeisimpiä anturivalintoja ohjaavia tekijöitä muun muassa älykellojen suunnittelussa, sillä antureiden tehonkulutus on melko suuri osa pienestä kellon akunkestosta [14]. Älypuhelinien tehonkulutukseen verrattessa selkeän eron laitteiden välillä tekee se, että äly- ja urheilukellojen antureilla on yleensä huomattavasti suurempi käyttöaika kuin näytöllä. Suurimmassa osassa etenkin vanhempia älykelloja näyttö sammuu aikaviiveellä ja palautuu takaisin päälle käyttäjän liikuttaessa kättään kellon katsomiseksi. Uudemmissa malleissa puolestaan aina päällä olevat näytöt ovat yleistyneet, mutta nekin sammuvat esimerkiksi nukkuessa tai hihan peittäessä kellon. Oletettavasti kuvan 5 ja tutkimuksen älykellossa on ollut tällainen aina päällä oleva näyttö. [28]



**Kuva 5.** (a) Älykellojen energiankulutuksen erittely käyttäjätutkimuksesta, ja (b) älypuhelinien energiankulutuksen erittely aiemmasta tutkimuksesta, muokattu lähteestä [28].

Merkittävä huomio tuloksista on kellon lepotilan suuri 30,1 % tehonkäyttö, tämän voidaan päätellä johtuvan pääasiassa juuri antureiden tehonkulutuksesta. Yleensä kellon ollessa lepotilassa tehdään etenkin arjen ja unen seurantamittauksia, joihin käytettyjen syke- ja veren happitasoantureiden voidaan päätellä olevan todennäköisesti suurimpia virrankuluttajia kellon ollessa lepotilassa esimerkiksi käyttäjän nukkuessa [28]. Juuri tämän vuoksi osa kelloista mahdollistaa mittaustiheyden muuttamisen unta seurattaessa, tällä on havaittu olevan huomattava vaikutus akunkestoon tukien päätelmää mittausten suhteessa suuresta virrankulutuksesta

### 3.7 Tarkemmat mittausmenetelmät

Jo aiemmissa luvuissa esiin tulleissa tutkimuksissa ja vertailuissa puettavien laitteiden antureita ja niiden mittaustarkkuutta verrattiin lääketieteessä käytettäviin mittalaitteisiin. Eniten löytyneissä lähteissä lääketieteellisiin antureihin vertailtiin älykelloista juuri sykeantureita, veren happitasoantureita sekä mahdollisia EKG-ominaisuuksia. Ongelma ei näiden kohdalla kuitenkaan aina ole nykyisten antureiden mittaustarkkuudessa, vaan yleisimmin antureiden koon, virrankulutuksen ja mittauspaikan tuomissa rajoituksissa.



a) Lääketieteessä käytetty EKG mittalaite



b) Lääkinnälliseksi laitteeksi hyväksytty pulssioksimetri

**Kuva 6.** Lähteissä vertailukohteina käytettyjen kaltainen lääketieteellinen EKG-laite (kuva a) [29], sekä pulssioksimetri (kuva b) [30].

Erityistä mielenkiintoa herätti osassa vertailuista, kuten lähteessä [17] älykellon mittauksille vertailukohteena käytetyt, kuvan 6 b) mukaiset lääketieteelliseksi laitteeksi hyväksytyt pulssioksimetrit. Tämänkaltaisille laitteille valmistaja väittää mittausten virhemarginaaliksi usein vain muutaman sydämenlyönnin epätarkkuutta. Esimerkiksi kuvassa 6 näkyvän pulssioksimetrin tarkkuudeksi valmistaja kertoo  $\pm 2$  lyöntiä minuutissa [31]. Tällainen mittalaite perustuu kuitenkin samaan teknologiaan kuin useimpien älykellojen, urheilukellojen ja jopa älysormusten sykemittaus. Täten on syytä pohtia, johtuuko mittaus-tarkkuuden ero vain vahvemmassa kontaktista ihon kanssa, sekä ohjeistuksesta olla liik-kumatta mittauksen aikana.

EKG-mittalaitteet toimivat luonnollisesti myös suorana vertailukohteena äly- ja urheilukellojen tarjoamille sydänkäyrän mittausominaisuuksille. Kummallakin laitteella mittaus perustuu elektrodien välillä mitattavaan jännite-eroon. Kellojen kohdalla ongelmana on kuitenkin se, että mittauksella saadaan mitattua vain elektrodien välisiä signaaleita. Sydämen sykkeen sähköinen signaali näkyy kuitenkin hyvin heikkona ranteessa, joka on kaukana sydäimestä. Tämän lisäksi elektrodien etäisyys on hyvin pieni, heikentäen mit-taustarkkuutta. Lääketieteellisissä laitteissa ongelma on ratkaistu asettamalla useita elektrodeja potilaan rintaan. Tämä mahdollistaa parhaassa tapauksessa myös sydämen eri lihasten toiminnan tarkastelun, sillä eri elektrodien välille piirtyy eri hermojen signaalit. [32]

Esimerkiksi liikeantureita ei vertailtu muihin, jollain tapaa tarkempiin antureihin, vaan lähinnä oikeasti tapahtuneeseen liikkeeseen. Lähteitä lukiessa kuitenkin selvisi, että liike-antureiden tarkkuus on jo älykelloissakin riittävän tarkka lähes kaikkiin käyttökohteisiin [20].

Satelliittipaikannusjärjestelmistä puolestaan löytyy todella paljon eri tarkkuudella ja luotettavuustasolla toimivia toteutuksia, esimerkiksi halvoista avainrenkaista aina lentokoneiden paikannusjärjestelmiin. Parhaimpien ammattitason satelliittipaikannusjärjestelmien tarkkuus on järjestään alle metrin luokkaa, mutta laitteet ovat myös huomattavasti suurempia kuin puettavat laitteet. Äly- ja urheilukelloilla sekä älypuhelimilla paikannus-tarkkuus on yleensä muutaman metrin luokkaa. Osassa käyttökohteita puettavien laitteiden paikannustarkkuudessa olisi kehittämisen tarvetta, mahdollisiin kehityskohteisiin pa-lataan luvussa neljä. [23][33]

## 4. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

Tämän luvun tavoitteena on tarkastella nykyisten, esimerkiksi lääketieteessä käytettävien tarkempien antureiden ja mittaustekniikoiden soveltuvuutta tulevaisuuden älykelloihin, sekä tarkastella mahdollisuuksia pienentää antureiden kokoa ja virrankulutusta. Tämän lisäksi luvussa tutustutaan puettavien laitteiden komponenttien kehityksen, sekä tietojenkäsittelymenetelmien, kuten tekoälyn tuomiin mahdollisuuksiin äly- ja urheilukelloissa.

### 4.1 Tulevaisuuden anturiteknologiat ja mittausmenetelmät

Kellon muoto ja koko ovat siis suurimpia anturivalintoja rajoittavia tekijöitä, joten ominaisuuksien kehittämiseksi tarvitaan luovia ratkaisuita. Eräänä esimerkkinä voisi olla hyödyllistä laittaa toinen EKG-mittauksen elektrodeista kellon rannehihaan, jolloin näiden välinen etäisyys olisi suurempi parantaen tarkkuutta. Tämän lisäksi esimerkiksi sykevyön ja kellon välinen langaton kommunikointi voisi mahdollistaa ikään kuin langattoman elektrodiparin. Myös muiden mittausten osalta useamman, eri paikassa olevan anturin tuloksia voitaisiin verrata esimerkiksi virheen poistamiseksi tai tulosten tarkkuuden parantamiseksi. Oikealla laitteiden ja antureiden asettelulla, sekä eri laitteiden tai antureiden välisellä kommunikaatiolla saatettaisiin pystyä parantamaan useiden eri mittausten tarkkuutta merkittävästi [33].

Elektroniikan integraatio kellojen rannehihaan voisi auttaa myös satelliittipaikannuksen tarkkuuteen. Kuten luvussa 3.4 selvisi, on satelliittipaikannus usein kompromissi antennien koon ja paikannustarkkuuden väliltä. Suuremmat ja metallisen kellon kotelon ulkopuolella hihnassa olevat antennit saattaisivat osaltaan parantaa ainakin tarkkuutta sekä mahdollisesti vaadittavaa tehoa. Huono puoli hihnoin integroiduissa komponenteissa olisi kuitenkin se, että hihnojen vaihtaminen olisi huomattavasti vaikeampaa, tai ainakin tuottaisi haasteita kellon ja hihnan suunnittelussa. Nykyiset kellojen hihnat ovat kulutusosia, jotka on suunniteltu helposti vaihdettavaksi kulumisen vuoksi, tai jopa käyttäjän haluaman tyylin mukaiseksi. Hihnan irroituskonstruktiot kuitenkin vaikeuttavat antennien tai sykeantureiden sähköisten yhteyksien muodostamista kellon ja hihnan välillä. Lisäksi hihnoin integroidut komponentit kasvattaisivat hihnojen hintaa entisestään. Tämä voisi kuitenkin olla kannattava kompromissi, jos integroitujen komponenttien tuomat edut ovat tarpeeksi suuria. [33]

Kellon antureiden todennäköisimpinä kehityssuuntina voidaan pitää pieniä, iteratiivisia parannuksia mittaustarkkuuteen kuin myös virrankulutuksen, sekä antureiden koon pienenemistä. Joidenkin antureiden kohdalla virrankulutus on kuitenkin jo nykyisellään hyvin pientä, joten esimerkiksi akkuteknologian kehittymisellä olisi näissä tapauksissa suurempi merkitys. Kelloissa käytettävien litiumioniakkujen energiatiheys on kasvanut melko tasaisesti ainakin viimeisen kymmenen vuoden ajan, joten vastaavanlainen kehitys kasvattaisi älykellojenkin akunkestoa merkittävästi myös tulevaisuudessa [35]. Myös uusien akkuteknologioiden markkinoille tuleminen voi tuoda parempia ratkaisuja puettavien laitteiden akunkeston ja latausnopeuden osalta. Toisaalta myös kasvanut tehobudjetti voitaisiin käyttää tehokkaimpiin ja tarkempiin antureihin nykyisten sijaan.

Näyttöjen tehonkulutuksen havaittiin olevan merkittävä etenkin silloin, kun näyttöä halutaan pitää jatkuvasti päällä paremman käyttäjäkokemuksen tai ulkonäön vuoksi. Täten myös uudet ratkaisut ja näyttöteknologiat voisivat tuoda huomattavia parannuksia tehonkäyttöön. Nykyisissä keski- ja huippuluokan kelloissa selkeästi käytetyin näyttöteknologia on OLED (Organic Light Emitting Diode), etenkin koska teknologia ei juurikaan aseta rajoituksia valmistettavan näytön muodosta tai koosta. Lisäksi OLED-teknologia tarjoaa erinomaisen kontrastin myös pimeässä ympäristössä, sillä näytön mustat pikselit ovat kokonaan poissa päältä toisin kuin LCD-näytössä. OLED-näytön huono puoli on kuitenkin sen suurehko tehonkulutus. Nykyisiä ratkaisuja tähän ovat olleet esimerkiksi joissain kelloissa käytetyt E-ink- tai memory-LCD-tyyppiset näytöt, joiden etuna on se, että staattisen kuvan näyttäminen ei kuluta käytännössä ollenkaan energiaa. Yhtenä vahvana tulevaisuuden näkymänä on kuitenkin kehittyneemmät, mutta tällä hetkellä vielä kalliit micro-OLED-näytöt, joiden tehonkulutus on huomattavasti pienempää kuin tyypillisillä OLED-näytöillä. [36]

## 4.2 Kehityksen avaamia mahdollisuuksia

Varsinaisten mittausten tarkkuuden kehittämisen lisäksi kellojen käyttäjälleen antaman informaation luettavuutta ja luotettavuutta voidaan parantaa esimerkiksi kehittämällä kellojen algoritmeja ja data-analyysitekniikoita. Luonteeltaan tekoälyä ja koneoppimista hyödyntävät algoritmit ovat hyviä etenkin tunnistamaan pieniä trendejä tai muutoksia suuresta määrästä dataa. Tällainen analyysi on erityisen hyödyllistä pitkän ajan hyvinvoinnin seurannassa, kuten unenlaadun tarkastelussa [37]. On myös mahdollista, että oikein koulutettu koneoppimismalli pystyisi tunnistamaan esimerkiksi käyttäjän sairastumisen hyvin aikaisessa vaiheessa pienistä vaihteluista hyvinvoinnin mittareissa. Jo tällä hetkellä tekoälyalgoritmien ja erilaisten antureiden yhdistelmiä on käytetty esimerkiksi covid 19-tartuntojen tunnistamiseen [38].

Älykellolla, tai muilla puettavilla laitteilla eduksi nousee yksi näiden laitteiden perimmäisistä piirteistä, se että tehtävät mittaukset eivät vaadi käyttäjän erillistä huomiota. Täten käyttäjän olisi mahdollista jo aikaisessa vaiheessa saada tietoa esimerkiksi terveydentilansa muutoksista, sekä ohjeita niiden korjaamiseksi ilman, että käyttäjä olisi erikseen epäillyt muutosta ja sen vuoksi päättänyt tehdä mittauksia.

## 5. YHTEENVETO

Tässä työssä perehdyttiin kirjallisuuskatsauksena älykellojen ja puettavien laitteiden antureihin ja niiden luotettavuuteen. Selkeyden vuoksi asian käsittely aloitettiin siitä, mitä informaatiota puettavilla laitteilla halutaan saada urheilusta ja arkisesta elämästä. Tämän selvitettyä, siirryttiin tarkastelemaan itse mittauksia ja antureita, joilla tarvittava data kerätään. Lopulta työssä vertailtiin käytössä olevia mittausteknologioita erityisesti mittaus-tarkkuuden ja pieniin puettaviin laitteisiin soveltuvuuden kannalta. Mittaus-tarkkuuden osalta perspektiiviä haettiin vertailemalla kellojen antureita esimerkiksi lääketieteissä tai muissa ammattitason laitteissa oleviin antureihin.

Yleisenä trendinä puettavien laitteiden markkinan havaittiin olevan uutuutensa takia nopeasti kasvava ja tarjonnan osalta monipuolistuva. Etenkin älykellojen ja -sormusten kaltaisten laitteiden kohdalla on nähtävissä niiden yleistymisen jokapäiväisessä käytössä urheilukäytön lisäksi. Laitteita siis ostaa kasvavissa määrin tavalliset ihmiset, joille laitteen ulkonäöllä, käyttömukavuudella ja arjen seurannalla on enemmän merkitystä erikoistuneiden urheiluominaisuuksien sijaan.

Todennäköisesti osittain käyttökohteiden jatkuvan monipuolistumisen ja käyttäjien hintatietoisuuden takia suurin osa kellojen käyttäjälleen tarjoamasta terveyden ja liikunnan seurantainformaatiosta perustuu yllättävänkin pieneen valikoimaan eri antureita. Yleisimpiä ja lähes kaikista kelloista löytyviä antureita ovat erityisesti liikeanturit, sykeanturit ja satelliittipaikannusjärjestelmät. Etenkin syke- ja liikeantureita huomattiin käytettävän lähes kaikissa kellon mittausominaisuuksissa aina unenlaadusta juoksuvalmennukseen. Näiden lisäksi hieman erikoistuneempia, mutta kuitenkin melko yleisiä antureita ovat muun muassa veren happitaso- ja ilmanpaineanturit, sekä sydänpäivämittaavat EKG-anturit.

Antureiden tarkkuuden ja luotettavuuden osalta huomattiin puettavien laitteiden pienen koon ja käyttömukavuuden asettamien vaatimusten olevan keskeinen rajoittava tekijä. Ehkä parhaiten näihin laitteisiin jo nykyisellään soveltuvat liikeanturit, jotka ovat jo nykyään pieniä ja kuluttavat hyvin vähän virtaa, kelloissa voidaankin käyttää lähes huippuluokkaisia liikeantureita ilman erityisiä rajoitteita. Laitteen koon ja muotoilun rajoitteet puolestaan näkyivät erityisen paljon satelliittipaikannuksen luotettavuudessa. Pienen laitteen sisään ei saada kovinkaan isoja antenniteita, ja usein laitteen kotelo on signaalien kulkua haittaavaa metallia. Tämän vuoksi kellojen paikannustarkkuus ei aina ole riittävä

kaikkiin käyttökohteisiin. Ammattikäytössä olevat satelliittipaikannusvastaanottimet ovatkin huomattavasti isompia laitteita. Toinen toistuva ongelma äly- ja urheilukelloilla tehtävissä mittauksissa on se, että ranne ei ole kovinkaan hyvä mittauspaiikka etenkin sykkeen ja veren happitason mittaukselle sekä EKG-mittaukselle.

Mahdollisista tulevaisuuden kehityssuunnista saattaisi löytyä ratkaisu kellon muodon ja koon tuomille rajoituksille, jotka nykyisissä laitteissa heikentävät mittaustarkkuutta. Esimerkiksi satelliittipaikannukseen käytettävien antennien pieneen kokoon ratkaisuna voisi olla antennien integrointi kellojen hihnoihin, jolloin ne voisivat olla suurempia ja sijoitettuna metallikotelon ulkopuolella. Ranteen heikkouteen mittauspaiikkana puolestaan ratkaisun voi tuoda eri puuttavien laitteiden monipuolistuminen ja tiiviimpi kommunikointi keskenään.

Erittäin todennäköisinä kehityssuuntina voidaan pitää myös laitteiden akkukapasiteetin ja laskentatehon kasvamista teknologioiden kehittyessä, sekä tekoälyn integrointia vielä suuremmaksi osaksi kellon keräämän datan analysointia. Pidempi akunkesto parantaisi laitteiden käyttömukavuutta, toisaalta energiatehokkaammat akut saattaisivat mahdollistaa myös nykyistä pienemmät laitteet. Laskentatehon ja tekoälyn tuomat muutokset olisivat todennäköisemmin huomattavissa siinä, kuinka laite esittää kerätyn datan, ja siitä tehdyn analyysin käyttäjälle. Etenkin tekoälyalgoritmit ovat hyviä käsittelemään suuren määrän dataa ja tunnistamaan siitä pieniäkin normaalista poikkeavia muutoksia.

# LÄHTEET

- [1] Pebble: E-Paper Watch for iPhone and Android, Kickstarter joukkorahoituspalvelu, 2.11.2012, Saatavissa: <https://www.kickstarter.com/projects/getpebble/pebble-e-paper-watch-for-iphone-and-android>
- [2] Wearable Technology Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Head & Eyewear, Wristwear), By Application (Consumer Electronics, Healthcare), By Region (Asia Pacific, Europe), And Segment Forecasts, 2023 – 2030, Grand view research, Saatavissa: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/wearable-technology-market>
- [3] Smartphone Market Size [2022-2029] Exhibits 7.3% CAGR to Reach USD 792.51 Billion in 2029: As per the report by Fortune Business Insights, the global smartphone market size is projected to reach USD 792.51 billion in 2029, at a CAGR of 7.3% during the forecast period, 2022-2029. NASDAQ OMX's News Release Distribution Channel 3.11.2022. Saatavissa: <https://lib-proxy.tuni.fi/login?url=https%3A%2F%2Fwww.proquest.com%2Fwire-feeds%2Fsmartphone-market-size-2022-2029-exhibits-7-3%2Fdocview%2F2731350893%2Fse-2%3Faccountid%3D14242>
- [4] Suunto ohjesivu, ”Miten paineanturia käyttävät kellot mittaavat korkeutta?”. Saatavissa: <https://www.suunto.com/fi-fi/Tuki/faq-articles/ominaisuudet/miten-paineanturia-kayttavat-kellot-mittaavat-korkeutta/>
- [5] Ye H, Yang W, Yao Y, Gu T and Huang Z, "BTrack: Using Barometer for Energy Efficient Location Tracking on Mountain Roads," in IEEE Access, vol. 6, pp. 66998-67009, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2879311, Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8520860>
- [6] Cook DJ, Krishnan NC. Activity Learning: Discovering, Recognizing, and Predicting Human Behavior from Sensor Data. Newark: John Wiley & Sons, Incorporated; 2015. Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=1895908&ppg=35>
- [7] Zhuang Z, Xue Y. Sport-related human activity detection and recognition using a smartwatch. Sensors (Basel, Switzerland). 2019. Saatavissa: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_unpaywall\\_primary\\_10\\_3390\\_s19225001](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_unpaywall_primary_10_3390_s19225001)
- [8] Samsung ohjevideo, Galaxy Watch3: Getting personalized fitness coaching | Samsung, 21.6.2022, Saatavissa (viitattu 17.2.2024): <https://www.youtube.com/watch?v=sxDCoeXzs4E>
- [9] Garmin tuotesivu, Garmin fēnix® 7 Pro – Sapphire Solar Edition. Saatavissa (viitattu 17.2.2024): <https://www.garmin.com/fi-FI/p/866191#specs>
- [10] Watson A, Brickson S, Prawda E, Sanfilippo J. Short-Term Heart Rate Recovery is Related to Aerobic Fitness in Elite Intermittent Sport Athletes. Journal of Strength and Conditioning Research. 2017. [https://journals.lww.com/nsca-jscr/FullText/2017/04000/Short\\_Term\\_Heart\\_Rate\\_Recovery\\_is\\_Related\\_to.23.aspx](https://journals.lww.com/nsca-jscr/FullText/2017/04000/Short_Term_Heart_Rate_Recovery_is_Related_to.23.aspx)

- [11] Kaplan M, McKniff M, Holmqvist S, Simone S, Rosahl M, Chaturvedi R, et al. A - 04 Influence of Smartwatch Feedback on Perceived Health Behavior Change in Older Adults. *Archives of clinical neuropsychology*. 2023;38(7):1165–1165. Saatavissa: <https://doi.org/10.1093/arclin/acad067.022>
- [12] Silva A and Alturas B, "The benefits of the use of smartwatches in promoting regular physical activity," 2021 16th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), Chaves, Portugal, 2021, pp. 1-6, doi: 10.23919/CISTI52073.2021.9476473. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9476473>
- [13] Suunto tuotesivu, SUUNTO RACE All Black. Saatavissa (viitattu 26.2.2024): <https://www.suunto.com/fi-fi/Tuotteet/Urheilulaitteet-ulkoiluun/suunto-race/suunto-race-all-black/>
- [14] Kim I, Lai P, Lobo R, Gluckman B. Challenges in wearable personal health monitoring systems. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*. 2014. doi:10.1109/EMBC.2014.6944813, Saatavissa: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5502108/>
- [15] Suunto tuotesivu, Suunto Smart -sykevyö. Saatavissa (viitattu 1.3.2024): <https://www.suunto.com/fi-fi/Tuotteet/Sykevyot/suunto-smart--sykevyo/>
- [16] Meza, Claudia, Jesus Juega, Jaime Francisco, Alba Santos, Laura Duran, Maite Rodriguez, Jose Alvarez-Sabin, Laia Sero, Xavier Ustrell, Saima Bashir, and et al. 2023. "Accuracy of a Smartwatch to Assess Heart Rate Monitoring and Atrial Fibrillation in Stroke Patients" *Sensors* 23, saatavissa: <https://www.mdpi.com/2287596>
- [17] Spinsante S, Porfiri S and Scalise L, "Accuracy of Heart Rate Measurements by a Smartwatch in Low Intensity Activities," 2019 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA), Istanbul, Turkey, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/MeMeA.2019.8802216. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8802216>
- [18] Sirohiya P, Vig S, Pandey K, et al. A Correlation Analysis of Peripheral Oxygen Saturation and Arterial Oxygen Saturation Among COVID-19 Patients. *Cureus*. 2022;14(4):e24005. 10.4.2022. doi:10.7759/cureus.24005, Saatavissa <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9088087/>
- [19] Henry, Nicole R. DO, MPH1; Hanson, Andrew C MS2; Schulte, Phillip J PhD2; Warner, Nafisseh S MD3; Manento, Megan N MD4; Weister, Timothy J MS5; Warner, Matthew A MD4. Disparities in Hypoxemia Detection by Pulse Oximetry Across Self-Identified Racial Groups and Associations With Clinical Outcomes. *Critical Care Medicine* 50(2):p 204-211, helmikuu 2022. | DOI: 10.1097/CCM.0000000000005394, Saatavissa: [https://journals.lww.com/ccmjournalfulltext/2022/02000/disparities\\_in\\_hypoxemia\\_detection\\_by\\_pulse.5.aspx](https://journals.lww.com/ccmjournalfulltext/2022/02000/disparities_in_hypoxemia_detection_by_pulse.5.aspx)
- [20] Neves, M, Ghemari, Z, Salah, S and Bourenane, R Resonance Effect Decrease and Accuracy Increase of Piezoelectric Accelerometer Measurement by Appropriate Choice of Frequency Range. 2018, Saatavissa: <https://doi.org/10.1155/2018/5370438>

- [21] Capuano, Vincenzo, Liangchun Xu, and Jose Estrada Benavides. "Smartphone MEMS Accelerometer and Gyroscope Measurement Errors: Laboratory Testing and Analysis of the Effects on Positioning Performance." *Sensors (Basel, Switzerland)* 23.17 (2023): 7609-. Saatavissa: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_proquest\\_journals\\_2862732519](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_proquest_journals_2862732519)
- [22] Tawalbeh LA, Basalamah A, Mehmood R, Tawalbeh H. Greener and Smarter Phones for Future Cities: Characterizing the Impact of GPS Signal Strength on Power Consumption. IEEE access. 2016. Saatavissa: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_ieee\\_primary\\_7414387](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_ieee_primary_7414387)
- [23] Mikoś M, Kazmierski K, Wachulec N, Sośnica K. Accuracy of satellite positioning using GNSS receivers in sports watches. *Measurement: journal of the International Measurement Confederation*. 2024. Saatavissa: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_elsevier\\_sciencedirect\\_doi\\_10\\_1016\\_j\\_measurement\\_2024\\_114426](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_elsevier_sciencedirect_doi_10_1016_j_measurement_2024_114426)
- [24] Kainec KA, Caccavaro J, Barnes M, Hoff C, Berlin A, Spencer RMC. Evaluating Accuracy in Five Commercial Sleep-Tracking Devices Compared to Research-Grade Actigraphy and Polysomnography. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2024. Saatavissa: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_proquest\\_miscellaneous\\_2919743124](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_proquest_miscellaneous_2919743124)
- [25] Scott H, Lovato N, Lack L. 1199 The Accuracy Of A New Sleep Ring Device For Tracking Sleep And Wakefulness Overnight Using Actigraphy. *Sleep (New York, NY)*. 2020. Saatavissa: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_unpaywall\\_primary\\_10\\_1093\\_sleep\\_zsaa056\\_1193](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_unpaywall_primary_10_1093_sleep_zsaa056_1193)
- [26] Elina Kuosmanen, Aku Visuri, Saba Kheirinejad, Niels van Berkel, Heli Koskimäki, Denzil Ferreira, and Simo Hosio. 2022. How Does Sleep Tracking Influence Your Life? Experiences from a Longitudinal Field Study with a Wearable Ring. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.* 6, MHCI, Article 185 (syyskuu 2022), 19 pages. Saatavissa: <https://doi.org/10.1145/3546720>
- [27] Feng, Shan; Mäntymäki, Matti; and Salmela, Hannu, "SLEEP TRACKING AS A STRESSOR: EXPERIENCES FROM SMART RING USERS" (2023). *ECIS 2023 Research Papers*. 369. Saatavissa: [https://aisel.aisnet.org/ecis2023\\_rp/369](https://aisel.aisnet.org/ecis2023_rp/369)
- [28] Liu X, Qian F. Measuring and optimizing android smartwatch energy consumption: poster. In: *Proceedings of the 22nd Annual International Conference on mobile computing and networking*. ACM; 2016. p. 421–3. Saatavissa: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_acm\\_primary\\_2985259](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_acm_primary_2985259)
- [29] Anna Shvets. "ECG Monitor Behind Doctor Looking at Patient", kuva, Pexels, Saatavissa: <https://www.pexels.com/photo/ecg-monitor-behind-doctor-looking-at-patient-4483339/>
- [30] Prisma tuotesivu, Beurer PO35 pulssioksimetri. Saatavissa (viitattu 19.3.2024): <https://www.prisma.fi/tuotteet/110424199/beurer-po35-pulssioksimetri-110424199>

- [31] Amazon tuotesivu, "Beurer PO35 Pulse Oximeter, Determination of Heart Rate and Arterial Oxygen Saturation for Those with Medical Conditions". Saatavissa: <https://www.amazon.co.uk/Beurer-Oximeter-Determination-Saturation-Conditions/dp/B08L8H6ZZ6?th=1>
- [32] BarCharts I. EKGs / ECGs. 1st ed. Boca Raton: BarCharts Publishing, Inc; 2012. Saatavissa: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_askewsholts\\_vlebooks\\_9781423218807](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_askewsholts_vlebooks_9781423218807)
- [33] Schmid A. Advanced Galileo and GPS receiver techniques enhanced sensitivity and improved accuracy. New York: Nova Science Publishers; 2009. Saatavissa: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/1j3mh4m/alma9910682663405973](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/1j3mh4m/alma9910682663405973)
- [34] Wang J, Balz T, Liao M. Absolute geolocation accuracy of high-resolution spotlight TerraSAR-X imagery - validation in Wuhan. Geo-spatial information science. 2016. Saatavissa: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_crossref\\_primary\\_10\\_1080\\_10095020\\_2016\\_1258183](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_crossref_primary_10_1080_10095020_2016_1258183)
- [35] Ziegler M, Trancik J. "Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline", Royal society of chemistry, julkaistu 23.3.2021, Saatavissa: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/ee/d0ee02681f>
- [36] Huang, Y, Hsiang, EL, Deng, MY et al. Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives. Light Sci Appl 9, 105 (2020). Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0341-9>
- [37] Sathyanarayana A, Joty S, Fernandez-Luque L, Ofli F, Srivastava J, Elmagar-mid A, Arora T, Taheri S. Sleep Quality Prediction From Wearable Data Using Deep Learning, Saatavissa: [JMIR mHealth and uHealth - Sleep Quality Prediction From Wearable Data Using Deep Learning](https://www.jmir.org/2021/11/e26814/)
- [38] Belkacem AN, Ouhbi S, Lakas A, Benkhelifa E, Chen C. End-to-End AI-Based Point-of-Care Diagnosis System for Classifying Respiratory Illnesses and Early Detection of COVID-19: A Theoretical Framework. Frontiers in medicine. 2021. Saatavissa: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_swepub\\_primary\\_oai\\_DiVA\\_org\\_uu\\_515214](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_swepub_primary_oai_DiVA_org_uu_515214)