



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

TONI TAMMI, KARI MARTTILA JA JUUSO LEHTONEN

Piezoelektronisien anturien käyttö etäisyyden arvioinnissa

2025



**Euroopan unionin
osarahoittama**



Johdanto

Tämän tutkimusraportin tavoitteena on tutkia piezoelektronisten antureiden käyttöä etäisyyden arvioinnissa. Piezoelektroniset anturit perustuvat ilmiöön, jossa tiettyihin materiaaleihin kohdistettu mekaaninen rasitus synnyttää sähkövarauksen. Tämän ominaisuuden ansiosta anturit ovat hyödyllisiä sovelluksissa, joissa halutaan mitata tarkasti iskujen tai värähtelyjen intensiteettiä ja sijaintia.

Raportin taustalla on tarve kehittää tarkempia ja kustannustehokkaampia menetelmiä mekaanisten iskujen paikantamiseen erilaisilla alustoilla. Tässä yhteydessä piezoelektronisten antureiden suorituskykyä arvioidaan erityisesti tilanteissa, joissa iskujen etäisyys anturista vaihtelee, mutta tippuva kappale pysyy vakiona. Tämä tieto on keskeistä antureiden tarkkuuden ja sijoittelun määrittelyssä sekä niiden käytön optimoinnissa erilaisissa käyttötarkoituksissa, esimerkiksi teollisuuden ja robotiikan sovelluksissa, joissa tarkka, reaaliaikainen ja kustannustehokas värähtelyjen tai iskujen paikannus on kriittistä sovelluksen toiminnan tai sen tilan, poikkeamien ja kunnon tarkkailemiseksi.

Tutkimuksessa hyödynnettiin sekä mittauksia että niistä tehtyjä korrelaatioanalyyskejä että neuroverkkopohjaista analyyskejä ja järjestelmiä, joiden avulla pyrittiin selvittämään, missä määrin yhden anturin tuottamat signaalit mahdollistavat etäisyyden arvioinnin tiputuskappaleen ja -korkeuden ollessa vakio.



Prizztech

samk



KEKSINTÖSÄÄTIÖ
Foundation for Finnish Inventions

SISÄLLYS

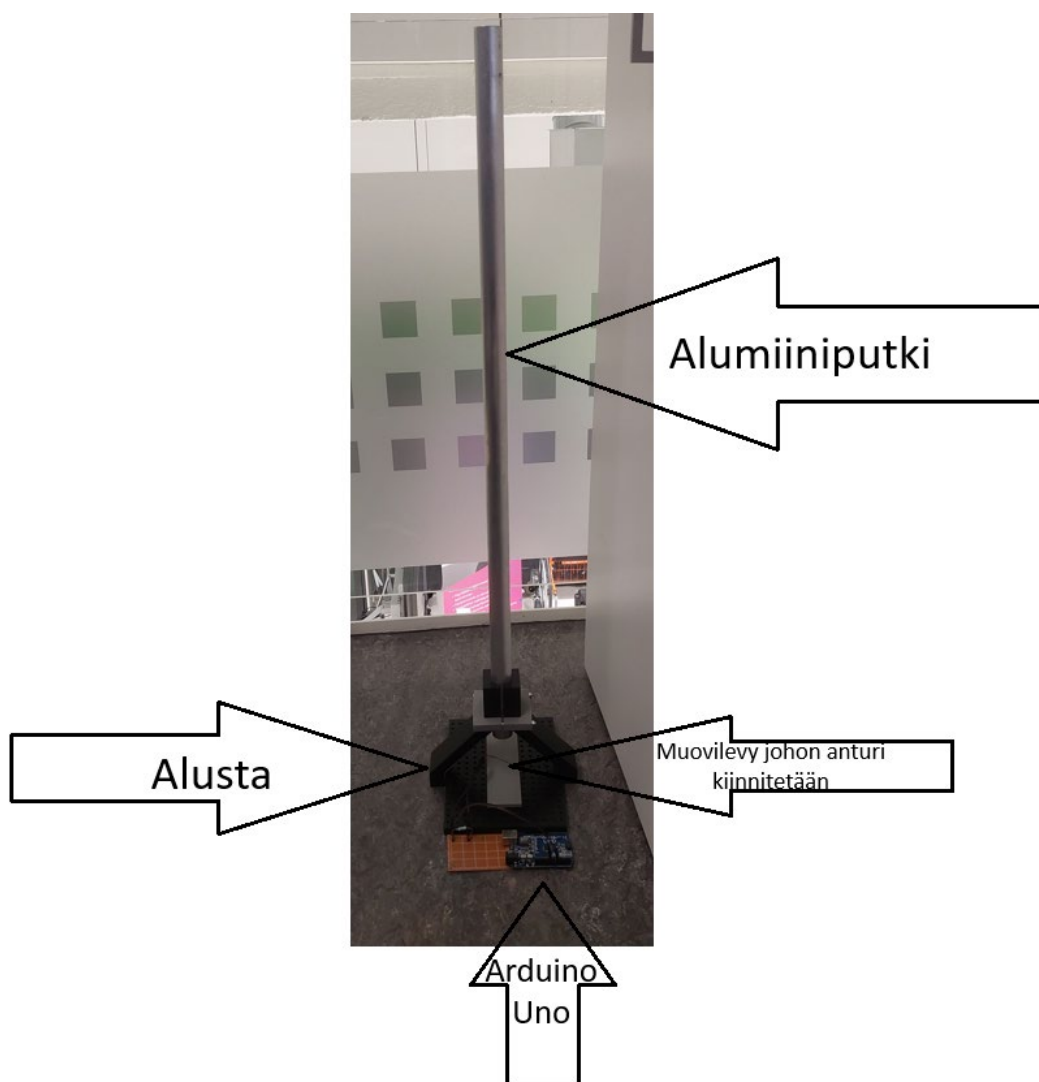
1 TUTKIMUSVÄLINEET	4
1.1 Anturi	6
1.2 Arduino Uno	6
1.3 Vastus	7
1.4 Muovilevy	7
1.5 Alusta	7
1.6 Alumiiniputki	9
1.7 Pudotuskappale	10
2 MITTAUKSET	10
2.1 Mittauksen toteutus	10
2.2 Tulokset	11
3 ETÄISYYDEN ARVIOINTI NEUROVERKOLLA	12
3.1 Neuroverkon rakenne	12
3.2 Toteutus	13
3.3 Tulokset	14
4 LOPPUPOHDINTO	15
5 LIITTEET	16

1 TUTKIMUSVÄLINEET

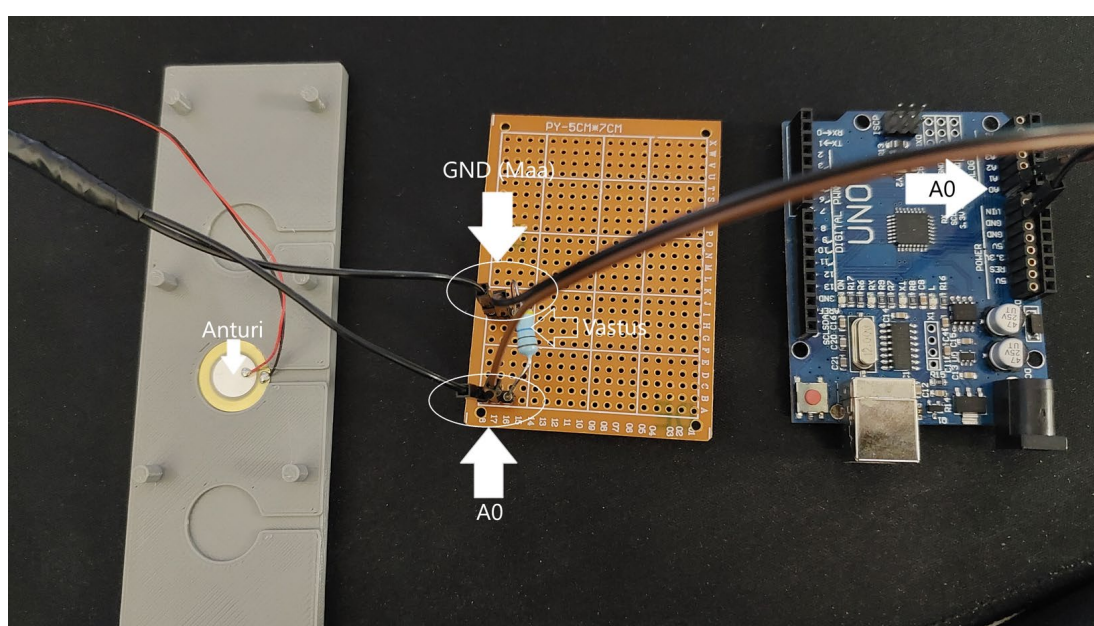
Välineistö:

- Piezoelektroninen anturi: 7BB-15-6L0
- Arduino Uno mikrokontrollerialusta
- Sähkövastus
- Muovilevy, johon anturi kiinnitetään
- Alusta, johon muovilevy kiinnitetään
- Alumiiniputki, joka kiinnitetään alustaan
- Pudotuskappale

Anturi kytketään Arduino Unon Analogiseen lähtöön A0 yhdessä vastuksen kanssa. Mittaukset suoritetaan vastuksen arvoilla: $1\text{M}\Omega$, $2,4\text{M}\Omega$, $3,9\text{M}\Omega$, $4,8\text{M}\Omega$, $8,2\text{M}\Omega$ ja $10\text{M}\Omega$. Kuvassa 1. on esitetty koko mittausvälineistö. Kuvassa 2. on esitelty anturin kytkentä Arduinoon.



Kuva 1. Mittausvälineet



Kuva 2. Anturin kytkentä Arduinoon.

1.1 Anturi

7BB-15-6L0 on Murata Electronicsin valmistama piezoelektrinen värähtelyanturi, joka on suunniteltu havaitsemaan mekaanisia värähtelyjä ja iskuja. Anturi perustuu piezoelektroniseen ilmiöön, jossa materiaalin altistuessa mekaaniselle rasitukselle syntyy sähkövaraus. Tämä tekee siitä ihanteellisen sovelluksiin, joissa tarvitaan tarkkaa värähtelyn tai iskujen mittausta.

1.2 Arduino Uno

Arduino Uno on suosittu ja helppokäyttöinen mikrokontrollerialusta, joka perustuu ATmega328P-siruun ja on suunniteltu elektroniikan ja ohjelmoinnin opetteluun sekä prototyyppien rakentamiseen. Se tarjoaa 14 digitaalista I/O-pinniä, 6 analogista tuloa, USB-liitännän koodin lataamiseen sekä 5 V käyttöjännitteen. Uno ohjelmoidaan Arduino IDE -ympäristössä käyttäen yksinkertaista C/C++-pohjaista kieltä, ja laajan yhteisön tukemat kirjastot tekevät antureiden, näyttöjen ja toimilaitteiden käyttöönotosta vaivatonta. Kompakti ja monipuolinen Arduino Uno sopii niin aloittelijoille kuin kokeneille kehittäjille monenlaisiin projekteihin, kuten robotiikkaan, automaatioon ja IoT-sovelluksiin. Kuvassa 3. Arduino Uno.



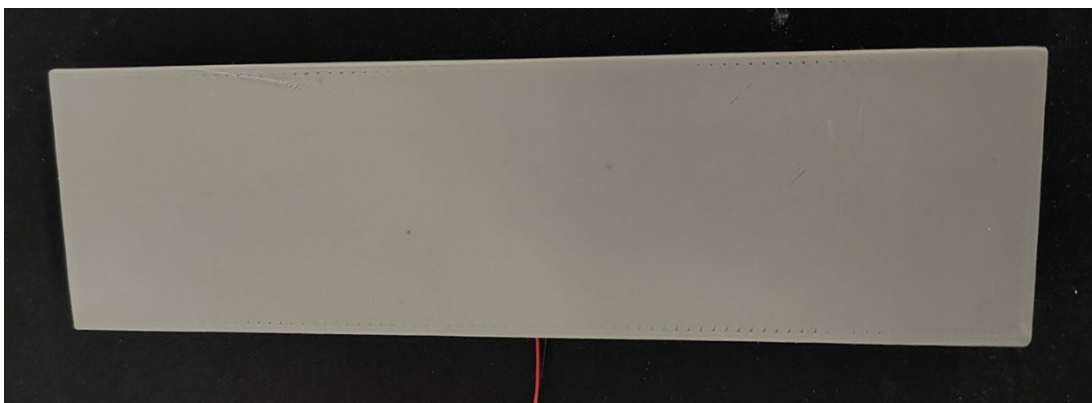
Kuva 3. Arduino Uno.

1.3 Vastus

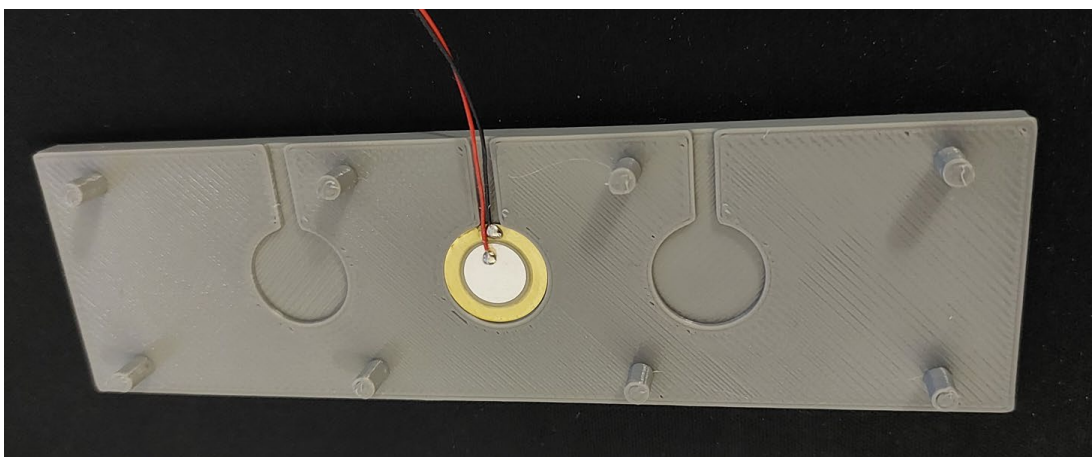
Mittauksissa käytetään mittaussvastuksia välillä $1\text{M}\Omega - 10\text{M}\Omega$.

1.4 Muovilevy

3D-Mallinnettu PLA-levy, jossa on 3 paikkaa anturin kiinnittämiseen. Lisäksi levyssä on 8 kpl ulokkeita, jotta se voidaan asettaa tutkimusalustalle tukevasti ja oikeaan paikkaan. Kuvassa 4. on esitetty levy kuvattuna siltä puolelta, johon pudotuskappaleen on tarkoitus osua. Kuvassa 5. on kuvattu levy anturin puolelta.



Kuva 4. Muovilevy ylhäältä päin.

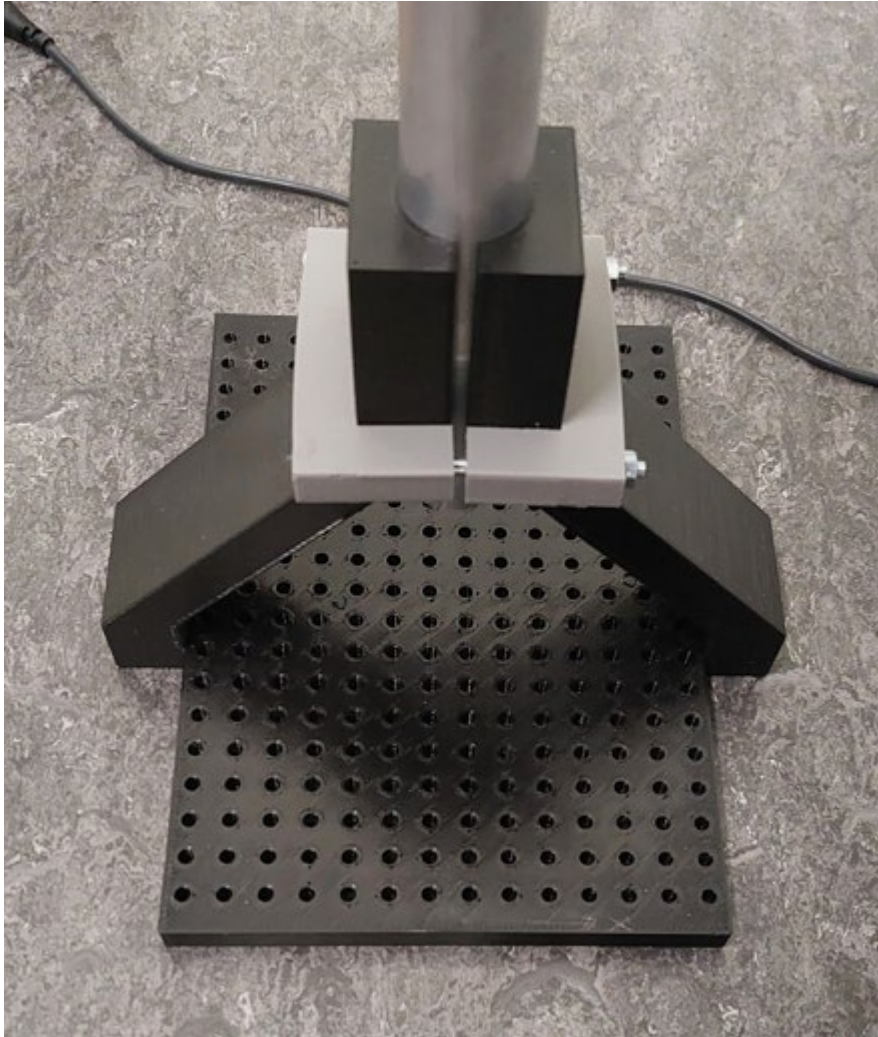


Kuva 5. Muovilevy Anturin puolelta.

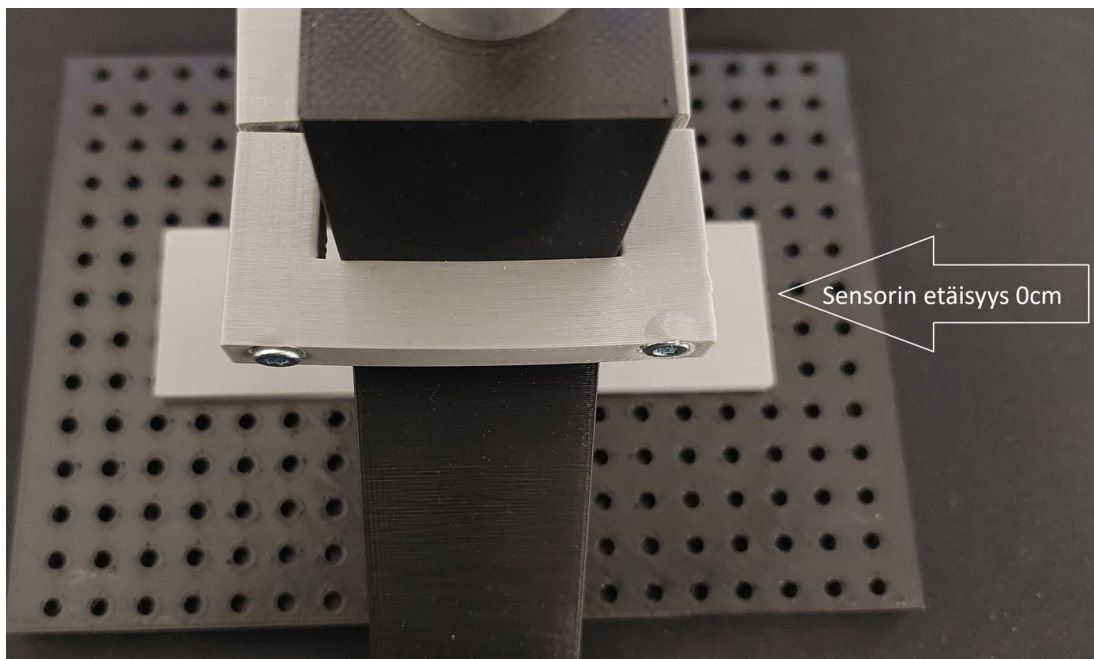
1.5 Alusta

3D mallinnettu alusta, jossa on rei'itys levyn asettamiseksi oikeaan kohtaan. Alustaan on lisäksi mallinnettu mekanismi, jolla alumiiniputki saadaan

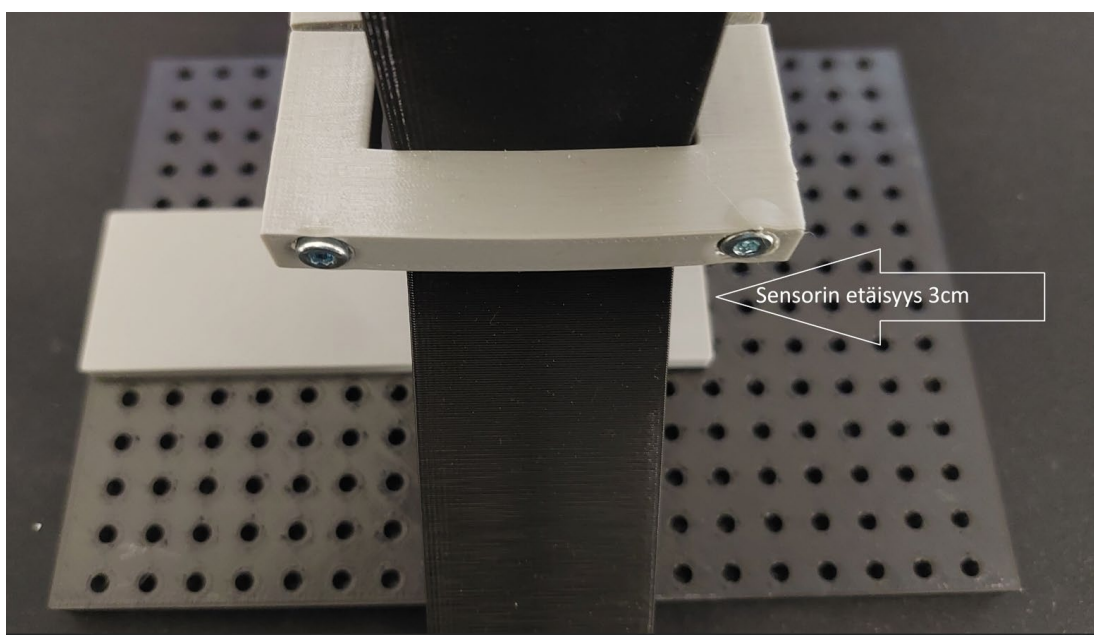
kiinnitettyä alustaan. Alusta on esitetty kuvassa 6. Kuvassa 7. on kuva alustasta, jossa anturi on paikassa 0 cm. Kuvassa 8. on kuva alustasta, jossa anturi on paikassa 3 cm.



Kuva 6. Mittauksissa käytetty alusta.



Kuva 7. Kuva alustasta, johon levy on asetettu niin että kappale putoa suoraan anturin päälle.



Kuva 8. Kuva alustasta, johon levy on asetettu niin että kappale putoaa 3 cm päähän anturin keskipisteestä.

1.6 Alumiiniputki

Alustaan kiinnitettävä putki, jossa on reikä. Tämän putken tarkoitus on saada pudotuskappale putoamaan tarpeeksi korkealta oikeaan kohtaan alustalle.

Putkessa olevaan reikään voidaan asettaa sokka, jonka vapauttamalla kappale putoaa.

1.7 Pudotuskappale

Pudotuskappaleen muoto on pyritty valitsemaan niin että se tippuisi alustalle mahdollisimman tarkasti suunniteltuun paikkaan. Kuvassa 9. pudotuskappale.



Kuva 9. Pudotuskappale.

2 MITTAUKSET

2.1 Mittauksen toteutus

Mittauksia suoritettiin etäisyyksillä 0 cm, 1 cm ja 3 cm, sekä vastuksen arvoilla 1M Ω , 2,4M Ω , 3,9M Ω , 4,8M Ω , 8,2M Ω ja 10M Ω . Jokaisella vastuksen ja etäisyyden yhdistelmällä mitattiin 20 mittausta. Tavoitteena oli selvittää millä

vastuksen arvolla korrelaatio etäisyyden kanssa olisi vahvin ja mittaustulosten keskihajonta mahdollisimman pieni ja olisiko se riittävä, jotta anturien sijoittelulla saataisiin määriteltyä kappaleen osumakohta. Mittauksia kertyi yhteensä 360 kappaletta. Mittaustulokset ovat liitteessä 1.

Mittauksessa tiputuskappale pudotettiin samalta korkeudelta testialustalle 0, 1 ja 3 cm etäisyyksillä anturista. Anturin tuottamia arvoja (0–1023) tallennettiin ensimmäisestä anturin tuottamasta arvosta 10 millisekunnin välein niin kauan kuin se havaitsi värinää.

2.2 Tulokset

Mittauksissa ei löytynyt selkeää korrelaatiota mittausotannan keskiarvon tai maksimin ja etäisyyden välillä. Korrelaatiot nähtävillä taulukossa 1. Mittaustuloksia tarkastellessa kävi ilmi, että kaikilla muilla paitsi 4,8 MΩ vastuksella tehdyissä mittauksissa 1 cm etäisyydeltä otetun mittausotannan kaikkien tulosten keskiarvo oli suurempi kuin vastaava 0 cm etäisyydeltä. Tämä saattaa johtua koeasetelmasta, jossa anturi on upotettuna levyyn ja saattoi vaimentaa iskusta syntyvää värinää, jonka takia 0 cm etäisyydeltä saadut arvot olivat suhteessa pienempiä kuin muilta etäisyyksiltä.

Vastus (MΩ)	Keskiarvo	Maksimi	Keskihajonta
1	0,254	-0,057	0,008
2,4	0,143	-0,131	-0,045
3,9	0,399	0,137	0,235
4,8	-0,129	-0,031	-0,002
8,2	0,088	0,114	0,147
10	0,108	0,091	0,153

Taulukko 1. Korrelaatiot etäisyyden ja muuttujien välillä eri vastusarvoilla 0–3 cm etäisyyksillä.

Korrelaatiot laskettiin uudestaan siten, että niissä ei huomioitu 0 cm etäisyydeltä otettuja mittauksia, jolloin paras korrelaatiokerroin saatiin 10 MΩ vastuksella ($r=0.763$). Huomattavissa taulukossa 2. Koska etäisyyksiä oli käytössä vain kaksi, tästä ei voitu päätellä onko etäisyyden ja keskiarvon välillä

todellisuudessa lineaarista tai epälineaarista suhteesta, mutta sen perusteella voitiin olettaa, että etäisyyden arvioinnissa 10MΩ vastuksella saataisiin paras tarkkuus. Tätä tuki myös se, että vastuksen kasvaessa keskihajonta pieneni ($r=-0,70587$), joka ilmenee taulukossa 3.

Vastus (MΩ)	Korrelaatiokerroin
1	-0,077
2,4	-0,644
3,9	-0,654
4,8	-0,715
8,2	-0,684
10	-0,763

Taulukko 2. Korrelaatiot keskiarvon ja etäisyyden välillä (etäisyydet 1 cm ja 3 cm)

	Vastus (MΩ)	Keskiarvo	Keskihajonta	Summa	Otosten määrä
Vastus (MΩ)	1	0,78858	-0,70587	0,99894	0,922201
Keskiarvo	0,78858	1	-0,134442	0,7615	0,498721
Keskihajonta	-0,70587	-0,134442	1	-0,73224	-0,891365
Summa	0,998937	0,761497	-0,732237	1	0,938923
Otosten määrä	0,922201	0,498721	-0,891365	0,93892	1

Taulukko 3. Korrelaatiot vastuksen ja muiden muuttujien välillä.

3 ETÄISYYDEN ARVIOINTI NEUROVERKOLLA

3.1 Neuroverkon rakenne

Etäisyyksien ennustamiseen koulutettiin luokittelumalli. Toteutettu neuroverkko koostuu syötekerroksesta (X), neljästä piilokerroksesta (H1, H2, H3 ja H4) ja ulostulokerroksesta (Y). Syötekerros ottaa vastaan 1 x 300 matriisin. Ensimmäinen piilokerros (H1) koostuu 128 yksiköstä, joissa käytetään aktivaatiofunktiona ReLU-funktiota. Toinen piilokerros (H2) koostuu 64

yksiköstä ja aktivaatiofunktiona käytetään Sigmoid-funktiota. Kolmas piilokerros (H3) koostuu 32 yksiköstä ja aktivaatiofunktiona käytetään Sigmoid-funktiota. Neljäs piilokerros koostuu 7 yksiköstä ja aktivaatiofunktiona käytetään Softmax-funktiota, joka luokittelee syötteet ja painot haluttuihin arvoihin välillä 0–6. Ulostulokerros tuottaa arvon 0, 1, 2, 3, 4, 5 tai 6, joka vastaa ennustettua etäisyyttä senteissä. Neuroverkon rakenne on kuvattu kaaviossa 1 ja käytettyjen aktivaatiofunktioiden matemaattiset kaavat taulukossa 4.



Kaavio 1. Käytetyn neuroverkon rakenne.

Aktivaatiofunktio	Matemaattinen kaava
ReLU	$f(x) = \max(0, x)$
Softmax	$f_i(x) = e^{x_i} / \sum_j^n e^{x_j}$
Sigmoid	$f(x) = 1 / (1 + e^{-x})$

Taulukko 4. Neuroverkossa käytettyjen aktivaatiofunktioiden matemaattiset kaavat.

3.2 Toteutus

Neuroverkko toteutettiin ja koulutettiin Node.js-ympäristössä käyttäen TensorFlow-kirjastoa. Optimointifunktiona käytettiin Adam-funktiota ja häviöfunktiona Sparse Categorical Crossentropy -funktiota. Aktivaatiofunktiot kuvattu edellä neuroverkon rakenteen yhteydessä.

Koulutusta varten kerättiin kokonaisuudessaan 350 näytettä, eli 50 näytettä per etäisyys. Jokainen näyte sisälsi 300 anturin tuottamaa arvoa, jotka kerättiin n. 5 millisekunnin välein alkaen ensimmäisen havaitusta osumasta. Näyteistä 80 % (280 näytettä) käytettiin neuroverkon koulutukseen ja 20 % (70 näytettä) jätettiin koulutetun neuroverkon testaamiseen. Neuroverkon koulutukseen käytetyistä näytteistä 80 % (244/280 näytettä) käytettiin

kouluttamiseen ja 20 % (36/280 näytettä) koulutuksenaikaiseen validointiin. Koulutukseen käytetty anturidata liitteessä 2.

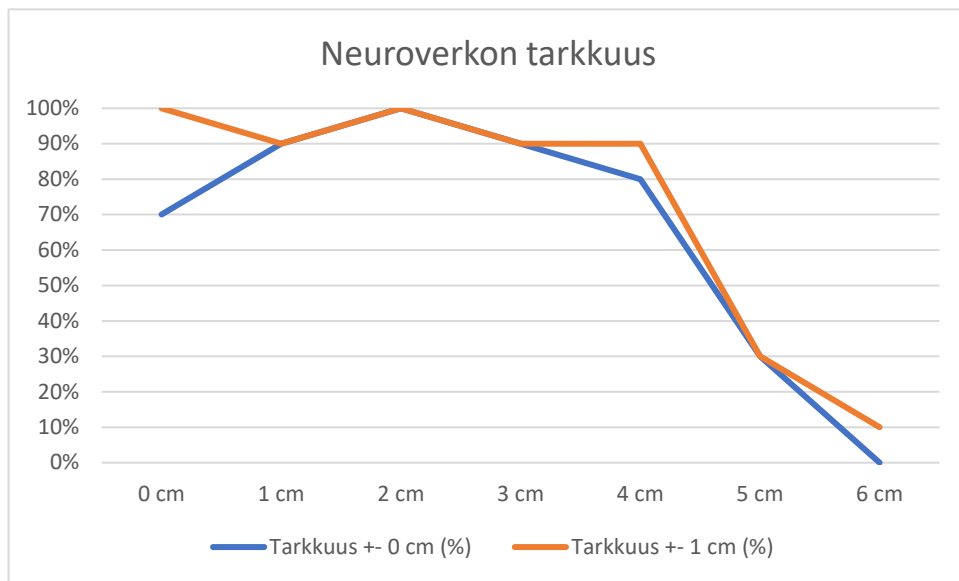
3.3 Tulokset

Koulutettu neuroverkko testattiin 70 näytteellä, joita ei käytetty neuroverkon koulutuksessa. Näytteitä oli 10 kappaletta per etäisyys. Neuroverkko kykeni ennustamaan piezoelektorisien antureiden syötteestä osuman etäisyyden täysin oikein 65,7 % tarkkuudella. ± 1 cm virhemarginaalilla neuroverkon tarkkuus oli 72,86 %. Absoluuttisen virheen (Δx) keskiarvo oli 1 cm ja suhteellisen virheen (δx) keskiarvo 14,5 %. Tulokset nähtävissä taulukossa 5.

Etäisyys (cm)	ka. Δx (cm)	ka. δx (%)	Tarkkuus ± 0 cm (%)	Tarkkuus ± 1 cm (%)
0	0,3	4,3	70	100
1	0,3	4,3	90	90
2	0	0	100	100
3	0,3	4,3	90	90
4	0,4	5,72	80	90
5	2,8	40	30	30
6	3	42,86	0	10
Keskiarvo	1,01	14,50	65,7	72,86

Taulukko 5. Neuroverkon testauksen tulokset per etäisyys (0–6 cm).

Neuroverkon suoriutuminen oli huomattavasti heikompaa 5 ja 6 cm etäisyyksillä, joka ilmenee kaaviossa 2. Etäisyyksillä 0–4 cm neuroverkon tarkkuus ± 0 cm virhemarginaalilla oli 86,0 % ja ± 1 cm virhemarginaalilla 94,0 %. Absoluuttisen virheen keskiarvo oli 0,26 cm ja suhteellisen virheen keskiarvo 3,7 %. Suoriutuminen suoraan anturin päälle (0 cm) osuneiden tiputusten osalta oli hieman heikompaa virhemarginaalin ollessa ± 0 cm verrattessa muuhun suoriutumiseen 0–4 cm alueella. Tulokset ja keskiarvot 0–4 cm etäisyyksien osalta taulukossa 6.



Kaavio 2. Neuroverkon tarkkuus per etäisyys +/- 0 cm ja +/- 1 cm virhemarginaalilla.

Etäisyys (cm)	ka. Δx (cm)	ka. δx (%)	Tarkkuus +/- 0 cm (%)	Tarkkuus +/- 1 cm (%)
0	0,3	4,3	70	100
1	0,3	4,3	90	90
2	0	0	100	100
3	0,3	4,3	90	90
4	0,4	5,72	80	90
Keskiarvo	0,26	3,72	86,00	94,00

Taulukko 6. Neuroverkon testauksen tulokset per etäisyys (0–4 cm).

4 LOPPUPOHDINTO

Neuroverkko osoitti huomattavaa kykyä tunnistaa osuman etäisyyksiä yhden piezoelektronisen anturin syötteestä, kun tiputuskorkeus oli vakio ja tiputettava kappale vakio. Haasteet 5 ja 6 cm etäisyyksien tunnistamisessa saattavat johtua mm. antureiden herkkyydestä näillä etäisyyksillä, neuroverkon hyperparametreista, rakenteesta ja/tai heikosta kyvystä löytää sopivaa mallia kaikkien etäisyyksien tunnistamiseen, koulutusdatan pienestä määrästä ja sen laadusta. Koulutusdataa tuottaessa havaittiin lisäksi aistinvaraisesti suurempaa värinää 5 ja 6 cm etäisyyksillä, joka liittyi todennäköisesti mittauksissa ja koulutusdatan tuotannossa käytetyn alustan kiinnitykseen. Tämä

saattoi heikentää näillä etäisyyksillä tuotetun datan vertailukelpoisuutta pienemillä etäisyyksillä saatuun dataan.

Haasteet tarkassa etäisyyden tunnistamisessa 0 cm tuloksista ± 0 cm virhemarginaalilla suhteessa muihin tuloksiin välillä 0–4 cm saattavat johtua siitä, että anturi itsessään vaimensi iskun alustaan kohdistuvaa värinää. Tätä mahdollisuutta tukee myös aiemmissa mittauksissa havaittu ero 0 cm ja 1 cm keskiarvojen välillä.

Tutkimus osoitti piezoelektronisten antureiden potentiaalin etäisyyden arvioinnissa neuroverkon avulla, mutta sen tarkkuutta tulisi parantaa, jotta sillä olisi laajempaa käyttöä erilaisissa sovelluksissa. Lisäksi olisi oleellista kehittää ja testata menetelmiä, jotka yhdistävät useampia antureita samaan järjestelmään. Usean anturin verkosto voisi mahdollistaa osuman tarkan paikantamisen kolmiulotteisessa tilassa euklidisen etäisyyden avulla ja parantaa näin järjestelmän käytettävyyttä erilaisissa sovelluksissa ja tarkkuutta datapisteiden määrän kasvaessa.

5 LIITTEET

- Liite 1. [sensorimittaukset_eri_vastuksilla.csv](#)
- Liite 2. [sensormittaukset_10Mohm.csv](#)