

Pekka Kauppinen

**BLACKFIN-PROSESSOREIDEN KÄYTTÖ KEHOTÄRINÄMITTAUKSISSA**

Insinööriö  
Kajaanin ammattikorkeakoulu  
Tekniikan ja liikenteen ala  
Tietotekniikan koulutusohjelma  
Kevät 2009



**Kajaanin  
ammattikorkeakoulu**

## OPINNÄYTETYÖ TIIVISTELMÄ

Koulutusala Tekniikka ja liikenne	Koulutusohjelma Tietotekniikka
Tekijä(t) Pekka Kauppinen	
Työn nimi Blackfin-prosessorien käyttö kehotärinämittauksissa	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Mittaustekniikka	Ohjaaja(t) Pentti Romppainen  Toimeksiantaja Kajaanin ammattikorkeakoulu
Aika 30.03.2009	Sivumäärä ja liitteet 29 + 0
<p>Insinööriä tehtiin Kajaanin ammattikorkeakoululle. Työn tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa ADSP-BF537-prosessorikortille LabVIEW-koodi, jota voidaan hyödyntää kehotärinämittauksissa. Mittaamiseen käytettiin kahta Kionix KXPS5-2050-kiihtyvyyssanturia. Kiihtyvyyssarvoja mitattiin kolmedimensionaalisesti.</p> <p>Koodi koostui kahdesta osasta. Toinen osa koodista sijaitsi prosessorikortilla ja toinen PC:llä. Prosessorikortilla ajettavaan koodiin toteutettiin ensimmäiseksi kiihtyvyyssantureiden tiedonsiirtoon käytettävä SPI-väylän sekvenssi. Väylän toiminta tutkittiin käyttämällä logiikka-analysaattoria. Kun antureiden havaittiin mittaavan arvoja oikein, toteutettiin TCP/IP-liikenne prosessorikortin ja PC:n välille. Tätä väylää käytettiin sekä mittausarvojen lähettämiseen PC:lle että mittausasetusten lähettämiseen prosessorikortille. Lasketut kiihtyvyyssarvot esitettiin näytöllä ja tallennettiin tekstitiedostoon.</p> <p>Laitteiston testaus suoritettiin Kajaanin ammattikorkeakoulun elektroniikan testauslaboratoriossa sijaitsevalla täristinlaitteistolla. Testien perusteella nähtiin, että laitteistolla ei voida vielä tehdä kovin pitkiä mittauksia luotettavasti, koska näytteistystaajuus muuttui mittausajan pidentyessä. Näytteistystaajuuden muuttuminen johtui todennäköisesti mittauksen hidastumisesta, joka olisi voitu estää toteuttamalla puskurointi oikeoppisesti. Käytettävissä olevan ajan puutteen ja vähäisten esimerkkikoodien takia tämä jätettiin toteuttamatta. Koodia voidaan kuitenkin käyttää hyvänä pohjana seuraavalle kehitysversiolle, sillä lyhyitä mittauksia tehtäessä arvot olivat oikeanlaisia. Lisäksi SPI-väylä ja TCP/IP-väylä toimivat luotettavasti.</p>	
Kieli	Suomi
Asiasanat	Kehotärinän mittaaminen, Blackfin, LabVIEW
Säilytyspaikka	<input type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun Kaktus-tietokanta <input type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto

School School of Engineering	Degree Programme Information Technology
Author(s) Pekka Kauppinen	
Title Measuring Human Exposure to Whole-Body Vibration with Blackfin Processor Cards	
Optional Professional Studies Measurement Systems	Instructor(s) Pentti Romppainen
	Commissioned by Kajaani University of Applied Sciences
Date 30 March 2009	Total Number of Pages and Appendices 29 + 0
<p>This Bachelor's thesis was commissioned by the Kajaani University of Applied Sciences. The purpose of the thesis was to develop a program which can be used to measure human exposure to whole-body vibration. The program was made using the LabVIEW language. The hardware consists of the ADSP-BF537 embedded processor card and a tri-axis digital accelerometer.</p> <p>The program consisted of two different parts. The first part was loaded to the memory of the processor card and the second part was loaded to the memory of a PC. The first stage was to develop a code for the SPI-bus. The SPI-bus was used to transfer data from the accelerometer to the processor card. The second stage was to develop a code for the TCP/IP-bus. The TCP/IP-bus was used to transfer data from the processor card to the PC. Finally, the calculated data was saved into a file and viewed on the screen.</p> <p>The system was tested with a device which can generate different kinds of vibration frequencies and amplitudes. This device is located in the electronics testing laboratory of the Kajaani University of Applied Sciences. As a result, it was found out that the system could not measure longer periods of time, because the sampling rate was changing. This fault could have been fixed by using the buffering of the data correctly. The program can, however, be used as a good starting point for the next version, because it works well at short measurement times. The SPI-bus and the TCP/IP-bus were also working well.</p>	
Language of Thesis	Finnish
Keywords	Measuring Human Exposure to Whole-Body Vibration, Blackfin, LabVIEW
Deposited at	<input type="checkbox"/> Kaktus Database at Kajaani University of Applied Sciences <input type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

## ALKUSANAT

Tämä insinöörityö tehtiin Kajaanin ammattikorkeakoululle. Haluan kiittää suuresti Pentti Romppaista hyvästä insinöörityön aiheesta ja työn ohjauksesta.

Kajaanissa 30.03.2009

Pekka Kauppinen

## SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 KEHOTÄRINÄN MITTAAMINEN	2
3 KÄYTETTÄVÄ LAITTEISTO JA OHJELMOINTIKIELI	4
3.1 Prosessorikortti	4
3.2 Kiihtyvyyssanturit	5
3.3 Liitäntäkortti	7
3.4 Ohjelmointikieli	8
4 OHJELMISTON TOTEUTUS	10
4.1 Vaatimusten määrittely	10
4.2 Toiminnallisuus	11
4.2.1 Käyttöliittymän toiminnot	12
4.2.2 Asetusten lähettäminen prosessorikortille	14
4.2.3 SPI-väylän toiminta	16
4.2.4 Tuloksien lähetys prosessorikortilta PC:lle	18
4.2.5 Kalibrointi ja kiihtyvyyssarvojen laskeminen	19
4.2.6 Tuloksien käsittely, esitys ja tallennus PC:llä	21
5 TESTAUS	22
6 TESTAUSTULOKSIEN ANALYSOINTI	24
7 YHTEENVETO	28
LÄHTEET	29
LIITTEET	

## SYMBOLILUETTELO JA TERMIEN SELITYS

MISO	Master in, slave out. Yksi SPI-väylän datalinjoista, jossa pää-asema vastaanottaa ja ala-asema lähettää.
MOSI	Master out, slave in. Yksi SPI-väylän datalinjoista, jossa pää-asema lähettää ja ala-asema vastaanottaa.
RMS	Root mean square. Neliöllinen keskiarvo.
SPI-väylä	Serial peripheral interface. Sarjamuotoinen väylä, jossa on kaksi datalinjaa ja kaksi kontrollilinjaa.
TCP/IP-protokolla	Transmission Control Protocol / Internet Protocol. Tiedonsiirtoväylä, joka toimii perustana internet-liikenteelle.

## 1 JOHDANTO

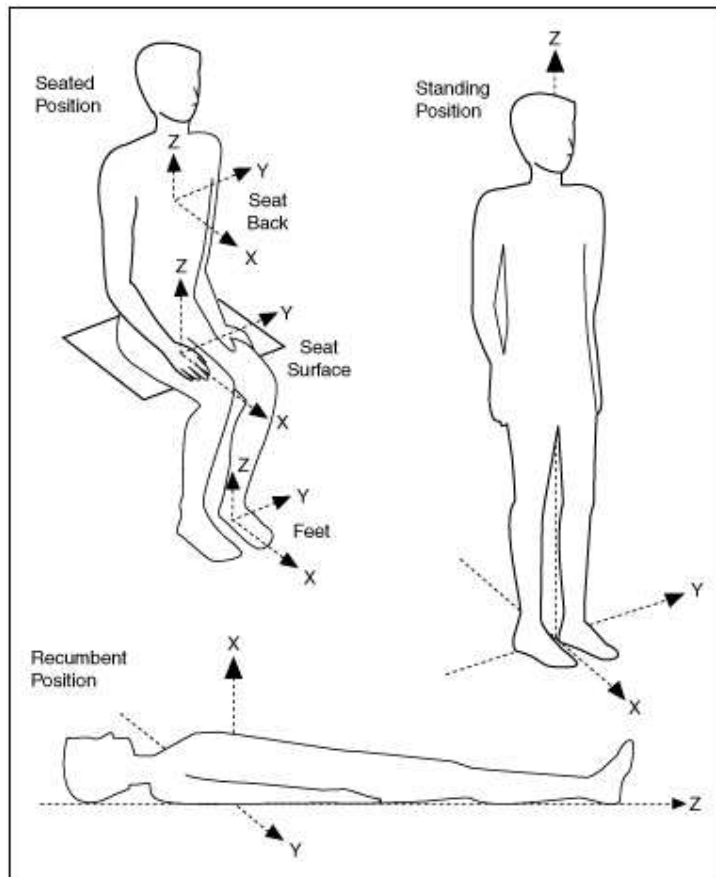
Kehotärinä on tärinää, joka työntekijän koko kehoon välittyessään aiheuttaa haittaa tai vaaraa hänen terveydelleen tai turvallisuudelleen, erityisesti alaselän sairauksia tai selkärangan vammoja [1, s. 9]. Lisäksi tärinälle altistuminen lisää stressiä ja huonontaa tarkkaavaisuutta. Nämä osaltaan lisäävät tapaturmariskiä. Tärinän haitallisuuteen vaikuttavat muun muassa siihen liittyvä kiihtyvyys, taajuus ja iskumaisuus, tärisevän laitteen ja kehon välinen yhteys, altistusaika ja tauotus, työasento ja lihasjännitys, sää sekä työntekijän yksilölliset ominaisuudet [1, s. 5].

Kajaanin ammattikorkeakoulu on ollut mukana vuonna 2006 alkaneessa Tärviö-projektissa (Tärinän mittaus ja vaikutusten arviointi työkoneissa), jossa pyrittiin kehittämään kehotärinän mittaukseen liittyvää teknologiaa. Tämän jälkeen vuonna 2008 aloitettiin jatkotutkimusprojekti (MEWEX), jossa tutkimusta laajennettiin ja tarkennettiin mukana olleiden tahojen toiveiden mukaisesti. Projekteissa (Tärviö ja MEWEX) on käytetty Kionixin digitaalisia kiihtyvyyssantureita, jotka käyttävät tiedonsiirtoon SPI-väylää. Laboratoriomittauksia varten tarvittiin järjestelmä, jossa mittauksia voitiin tehdä kahdella tällaisella anturilla. Insinööriyön tavoitteena oli kehittää tähän tarkoitukseen soveltuva laitteisto. Sen toteuttamiseksi olisi ollut useita vaihtoehtoja, mutta tässä työssä valittiin käytettäväksi Blackfin-prosessorikortti, jota ohjelmoitiin LabVIEW:lla. Kajaanin ammattikorkeakoululla on perinteisesti käytetty LabVIEW:ta mittaussovellusten toteuttamiseen.

## 2 KEHOTÄRINÄN MITTAAMINEN

Kehotärinän haittavaikutusten lieventämiseksi ja eliminoinimiseksi on säädetty EU-direktiivi. Tämä direktiivi perustuu ISO 2631-1 -standardin mukaiseen tärinän mittaamiseen kolmiulotteisesti. Direktiivin pohjalta on Suomessa säädetty Valtioneuvoston asetus 48/2005. Tämän asetuksen tarkoituksena on työntekijöiden suojeleminen työssä esiintyviltä vaaroilta ja haitoilta, jotka aiheutuvat tai saattavat aiheutua altistumisesta tärinälle [1, s 11]. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että työnantajan tulee voida mitata ja valvoa kussakin työtehtävässä saatavaa altistusta.

Kehoon kohdistuvaa tärinää mitattaessa joudutaan mittaamaan kiihtyvyyttä kolmesta eri suunnasta. Suunnat on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Mittauksessa käytettävät suunnat. [2]



Mittaustuloksista lasketaan taajuuspainotetut kiihtyvyyden RMS-arvot (kullekin suunnalle), jotka suhteutetaan kahdeksan tunnin työaikaan. Vaakasuuntaiset (suunnat x ja y) RMS-arvot kerrotaan luvulla 1,4. Suurinta neliöllistä keskiarvoa kutsutaan A(8)-arvoksi, jolla altistus ilmoitetaan. Asetuksessa määriteltiin kehotärinäaltistuksen raja-arvoksi kahdeksan tunnin vertailu-aikaan suhteutettuna  $1,15 \text{ m/s}^2$  ja toiminta-arvoksi vastaavasti  $0,5 \text{ m/s}^2$  [1, s. 11].

Asetuksen mukaan raja-arvon ylittyessä on työnantajan viipymättä ryhdyttävä toimenpiteisiin tärinän alentamiseksi. Jos taas toiminta-arvo ylitetään, on työnantajan laadittava tärinäntorjuntaohjelma. Tässä ohjelmassa on selvitettävä syyt arvojen ylittymiseen ja määriteltävä ne keinot, joilla altistusta saadaan vähennettyä. [1, s 6] Arvioijan ja mittaaajan tulee olla työterveyshuollon asiantuntija tai muu henkilö, jolla on riittävät tiedot ja taidot tärinän mittaamiseen. Tarvittaessa työnantajan on käytettävä mittauksessa ulkopuolista asiantuntijaa. [1, s. 5].

Altistuksen toiminta-arvoja sovelletaan kaikkeen tärisevillä laitteilla ja koneilla tehtävään työhön. Ennen 6. heinäkuuta 2007 hankittuihin koneisiin, joiden tärinää ei ole mahdollista saada alle raja-arvon, ylittymisen edellyttämiä toimenpiteitä vaaditaan vasta 6. heinäkuuta 2010 alkaen. Maa- ja metsätalouden työvälineiltä vastaavaa vaaditaan 6. heinäkuuta 2014 alkaen. [1, s. 5].

### 3 KÄYTETTÄVÄ LAITTEISTO JA OHJELMOINTIKIELI

#### 3.1 Prosessorikortti

Sulautetun järjestelmän alustaksi valittiin ADSP-BF537-prosessorikortti, koska tämä oli todettu parhaiten soveltuvaksi sekä tutkimus- että opetuskäyttöön (kuva 2). Myös kortin manipuloisuus oli otettu huomioon sulautetun järjestelmän alustaa valitessa. Kyseiselle alustalle voidaan toteuttaa koodia sekä C-kielellä että LabVIEW-ohjelmointia käyttäen. Seuraavassa esiteltynä lyhyesti prosessorikortin pääominaisuuksia:

- 600 MHz kellotaajuudella toimiva prosessori
- muistit: 64 MB SDRAM ja 4 MB flash
- väylät: Ethernet, CAN, PPI, SPORT, SPI, UART, TWI, I<sup>2</sup>C ja USB
- debugausmahdollisuus USB:n tai JTAG:n kautta.



Kuva 2. ADSP-BF537-prosessorikortti. [4]

### 3.2 Kiihtyvyyssanturit

Kehotärinän mittaukseen liittyvän teknologian kehittämisessä on päädytty käyttämään Kionixin valmistamaa KXPS5-2050 -kiihtyvyyssanturia, koska se on todettu hyväksi jo edellisissä mittausjärjestelmissä. Anturi kykenee mittaamaan +- 2 g kiihtyvyyksiä kolmesta eri suunnasta. Kuvassa 3 on esitetty käytetty anturi.



Kuva 3. Kionix KXPS5-2050 -kiihtyvyyssanturi. [5]

Tuloksen anturi antaa 16-bittisenä digitaalisena arvona. Näistä 16:sta bitistä kuitenkin 4 kappaletta on ”täytebittejä”. Tulos ilmoitetaan siten, että negatiivinen maksimiarvo eli siis -2 g vastaa arvoa 0. Positiivista maksimiarvoa vastaa luku 4096. Näiden lukujen puoliväli eli siis arvo 2048 vastaa 0 g kiihtyvyyttä. Kunkin suunnan tulos on luettavissa omista rekistereistään. Esimerkiksi x-akselin tulos on luettavissa kahdessa osassa rekistereistä XOUT\_H ja XOUT\_L. Näiden rekisterien osoitteet ovat 80 hex (heksadesimaali) ja 81 hex. Taulukossa 1 on esitetty rekistereiden tarkoitus.

Taulukko 1. Kiihtyvyyssanturin käyttämät rekisterit. [3]

Register Name	Type Read/Write	Read Address		Write Address	
		Hex	Binary	Hex	Binary
XOUT_H	R	0x80	1000 0000	xxxx	xxxx xxxx
XOUT_L	R	0x81	1000 0001	xxxx	xxxx xxxx
YOUT_H	R	0x82	1000 0010	xxxx	xxxx xxxx
YOUT_L	R	0x83	1000 0011	xxxx	xxxx xxxx
ZOUT_H	R	0x84	1000 0100	xxxx	xxxx xxxx
ZOUT_L	R	0x85	1000 0101	xxxx	xxxx xxxx
Reset_write	W	xxxx	xxxx xxxx	0x06	0000 0110
FF_INT	R/W	0x88	1000 1000	0x08	0000 1000
FF_DELAY	R/W	0x89	1000 1001	0x09	0000 1001
MOT_INT	R/W	0x8A	1000 1010	0x0A	0000 1010
MOT_DELAY	R/W	0x8B	1000 1011	0x0B	0000 1011
CTRL_REGC	R/W	0x8C	1000 1100	0x0C	0000 1100
CTRL_REGB	R/W	0x8D	1000 1101	0x0D	0000 1101
CTRL_REGA	R	0x8E	1000 1110	xxxx	xxxx xxxx

Anturi kommunikoi käyttäen SPI-väylää. Tämä väylä ei ole standardimuotoinen, kuten esimerkiksi USB- tai RS232-väylä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että väylän voi konfiguroida tilanteen mukaan. Esimerkiksi käytettävä nopeus ja tiedonsiirtoon käytettävien bittien määrä voi vaihdella paljonkin sovelluksen mukaan. Toisaalta tämä tarkoittaa myös sitä, että väylään löytyy vähemmän valmiita esimerkkikoodeja ja ohjeita.

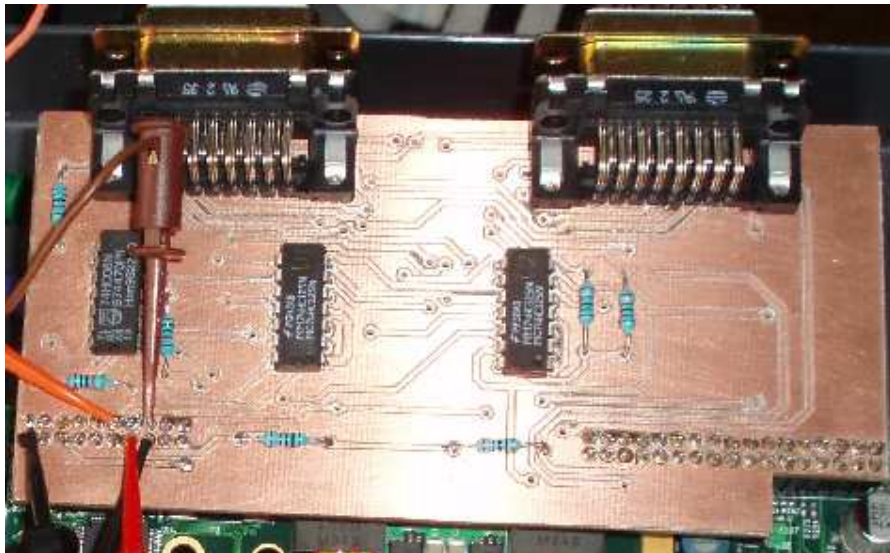
SPI-väylä koostuu neljästä eri linjasta. Nämä ovat MISO, MOSI, piirivalinta ja kellolinja. Nimitys MISO tulee englannin kielestä ja tarkoittaa master in slave out. Siis SPI-väylässä isännäksi valittu laite vastaanottaa ja orjalaite lähettää. MOSI toimii taas päinvastoin. Tässä työssä prosessorikortti toimii isäntänä ja kiihtyvyyssanturit orjina. Piirinvalinnalla valitaan käytettävä laite. Linja on nolla-aktiivinen, eli piiri on valittu, kun linja on loogisessa nolatilassa.

Kellolinja toimii samalla kun tietoa lähetetään tai vastaanotetaan. Tieto lähetetään tai vastaanotetaan siis kellolinjan tahdissa. Yhden kellojakson aikana lähetetään tai vastaanotetaan yksi bitti tietoa. Samalla kellolinja määrää, miten nopeasti tietoa voidaan siirtää. Toisaalta anturin tarvitsemat viiveet hidastavat toimintaa. Kuitenkin tässä tapauksessa varsinaisia koodia hidastavia viiveitä ei tarvinnut luoda, sillä koodi itsessään aiheutti jo niin paljon viivettä.

### 3.3 Liitäntäkortti

Kiihtyvyyssanturit pystytään liittämään suoraan prosessorikortin SPI-väylään. Sovelluksessa oli tarkoitus liittää kaksi kappaletta antureita. Lisäksi oli tärkeää, ettei väärinkytetty tai viallinen anturi pääse vahingoittamaan prosessorikorttia. Tämän takia anturit kytkettiin liitäntäkortille, joka kytkettiin prosessorikorttiin.

Kullekin anturille oli oma piirinvalintalinjansa prosessorikortin SPI-väylässä. Liitäntäkortilla ensimmäisen anturin piirinvalinta kytkettiin prosessorikortin portin F nastaan 10. Toisen anturin piirinvalinta kytkettiin prosessorikortin portin J nastaan 11. Kuitenkin ohjelmaa kehitettäessä huomattiin, että jostakin syystä tätä nastan tilaa ei saatu vaihtumaan. Ongelma voi joutua joko kytkennässä tai koodissa olevasta virheestä. Koska ongelman syytä ei saatu selville, se ratkaistiin kytkemällä prosessorikortin piirinvalintalinja 2 ja 4 yhteen hyppylangalla. Tämän jälkeen käytettiin ohjaukseen piirinvalintalinjaa 4, joka oli portin F nastassa 6. Liitäntäkortti on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Liitäntäkortti

### 3.4 Ohjelmointikieli

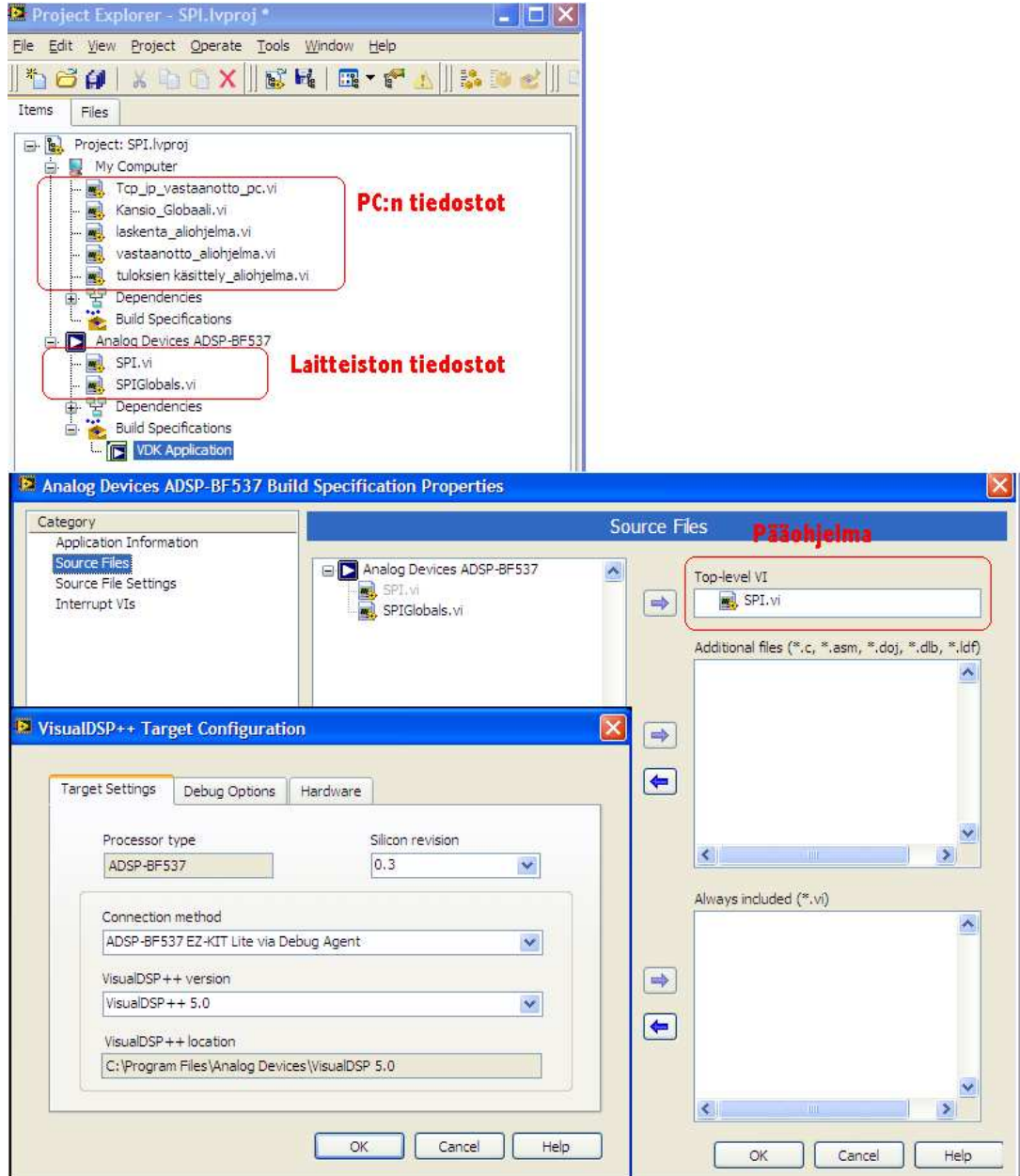
Yksi insinööriyön vaatimuksista oli, että se toteutettaisiin LabVIEW-ohjelmointia käyttäen. Ohjelmointikieli valittiin, koska käytettävä laitteisto tukee parhaiten tätä kieltä. Lisäksi suurin osa Kajaanin ammattikorkeakoululla käytettävistä mittausjärjestelmistä on toteutettu LabVIEW-ohjelmointia käyttäen.

LabVIEW-ohjelmointiympäristö on täysin graafinen, toisin kuin esimerkiksi C-kielen ohjelmointiin käytettävät työkalut. Tämä mahdollistaa helpomman lähestymistavan koodin kehittämiseen, koska koodi itsessään ”kommentoii” itseään.

LabVIEW-ohjelmointiympäristö koostuu kahdesta ”ikkunasta”. Ne ovat etupaneeli ja vuokaavioikkuna. Etupaneeliin kootaan ohjelman käyttöliittymä ja vuokaavioon varsinaiset ”kytkennät” funktioiden välille. Etupaneeliin voidaan luoda lukuisia erilaisia indikaattoreja ja kontroleja. Lisäksi ohjelmointiympäristössä voidaan ajaa C-kieltä ja käyttää kaikkia C-kielestä tuttuja ehtolauseita. Myös aliohjelmien, globaalien muuttujien ja paikallismuuttujien luonti onnistuu.

LabVIEW-ohjelmointiympäristöön saa monia lisäosia, joilla on mahdollista toteuttaa esimerkiksi sovelluksia reaaliaikajärjestelmiin, sulautettuihin järjestelmiin, konenäkösovelluksiin tai mittausteknisiin järjestelmiin. Ohjelmointiympäristö tukee myös ennen lisäosien asennusta lukuisia eri väyliä ja laitteita.

Uudet LabVIEW-versiot (versio 8.5) käyttävät laitteistojen ohjelmointiin projektityökalua. Tämän tarkoitus on muuttaa LabVIEW-koodi laitteiston ymmärtämään muotoon. Lisäksi työkaluvalikossa on perusfunktioiden lisäksi ainoastaan raudan tukemat funktiot. Näin saadaan työkaluvalikon selkeyttä parannettua. Projektityökalulla voidaan muuttaa laitteiston asetuksia ja liittää käytettävät tiedostot projektiin. Kuvassa 5 on esimerkki projektin tiedostoista ja asetuksista.



Kuva 5. Projektityökalu ja projektin asetukset

## 4 OHJELMISTON TOTEUTUS

### 4.1 Vaatimusten määrittely

Sulautetun mittauslaitteiston vaatimukset olivat seuraavia:

- kiihtyvyyssarvojen mittaus kahdelta anturilta
- viiveiden minimointi eri suuntien välisissä mittauksissa
- viiveiden minimointi eri antureiden välisissä mittauksissa
- näytteistystaajuuden säätäminen välillä 256-1024 Hz
- antureiden kalibrointi
- valinta sille, käytetäänkö yhtä vai kahta anturia
- viimeisimpien mittaustuloksien esitys ohjelman etupaneelissa
- tuloksien tallennus tekstitiedostoon.

Näistä vaatimuksista varsinkin viiveiden minimointi mittausten ja suuntien välillä oli tärkeää, koska haluttiin saada mahdollisimman samanaikaisia tuloksia. Lisäksi sulautettuun järjestelmään koodia kehitettäessä piti muistaa, että ei käyttänyt paljon muistia varaavia rakenteita tai funktioita, sillä ne hidastavat ohjelman ajoa merkittävästi. Esimerkiksi case-rakenne on juuri tällainen. Vastaava toiminto oli parempi toteuttaa useilla LabVIEW:n select-funktiolla.



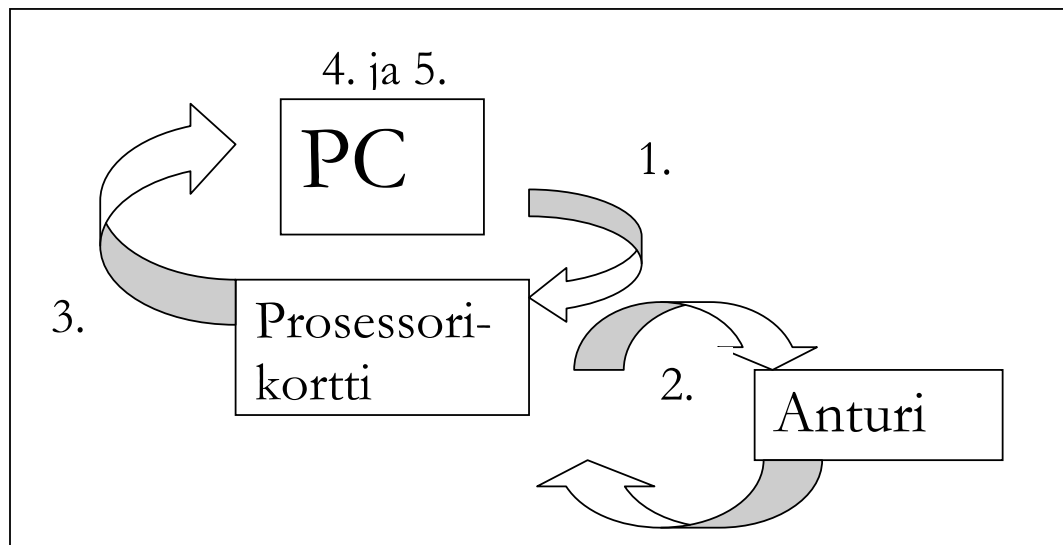
## 4.2 Toiminnallisuus

Tärinän mittaamiseen käytettävä ohjelma koostuu kahdesta osasta. Ensimmäinen osa koodista vietään prosessorikortin muistiin. Tämä ohjelma mittaa anturilta saatavat arvot SPI-väylää käyttäen. Kun anturilta on saatu kaikki arvot, lähettää prosessorikortti ne TCP/IP-protokollaa käyttäen PC:lle.

Toinen osa koodista koostuu PC:llä olevasta ohjelmasta, joka vastaanottaa arvot TCP/IP-protokollaa käyttäen. Näistä arvoista suoritetaan lopullinen tietojen käsittely ja kiihtyvyyssarvojen laskeminen. Kiihtyvyyssarvot tallennetaan lopuksi tiedostoon.

Kiihtyvyyssarvojen mittaamiseen käytettävän ohjelman toiminta voidaan jakaa viiteen eri osaan. Kuvassa 6 ovat esitettyinä nämä osa-alueet:

1. Asetusten lähetys PC:ltä prosessorikortille TCP/IP-protokollaa käyttäen.
2. Prosessorikortin ja anturin välisen SPI-väylän liikenne.
3. Tuloksien lähetys prosessorikortilta PC:lle TCP/IP-protokollaa käyttäen.
4. Kiihtyvyyssarvojen laskeminen.
5. Tuloksien käsittely, esitys ja tallennus PC:llä.



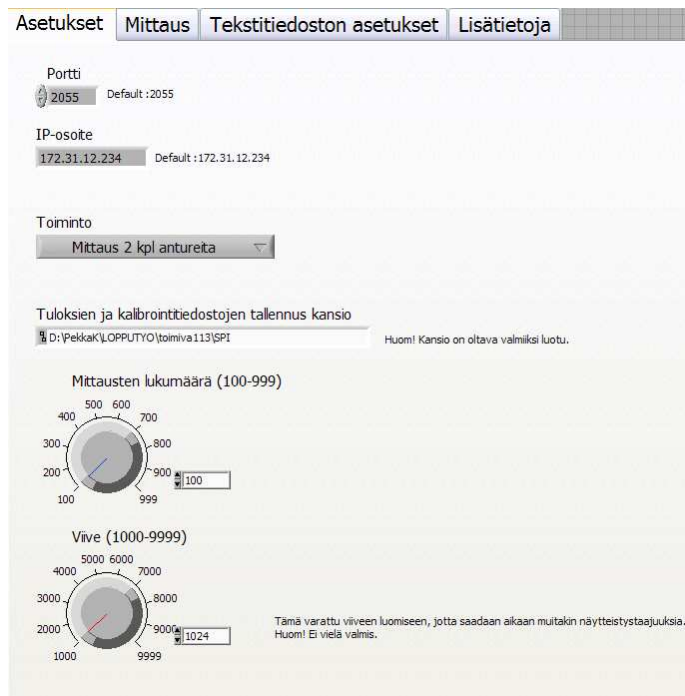
Kuva 6. Ohjelman rakenne

#### 4.2.1 Käyttöliittymän toiminnot

Pääohjelmassa sijaitseva ohjelman käyttöliittymä koostuu välilehdistä. Nämä välilehdet on esitetty kuvassa 7.

Jotta ohjelman käyttäminen olisi ollut mahdollisimman yksinkertaista, suunniteltiin kaikkia mittausasetuksia hallittavan PC:llä yhdellä käyttöliittymän välilehdellä (kuva 7). Mittausasetukset olivat:

- TCP/IP-asetukset (portti ja IP-osoite)
- käytettävien antureiden lukumäärä (1 tai 2 anturia)
- tuloksien tallennuskansio
- mittausten lukumäärä
- viive (käytettiin eri näytteistystaajuuksien luontiin).



Kuva 7. Käyttöliittymän asetukset

Mittaus-välilehdeltä voitiin mittausten aloittamisen lisäksi tarkastella mittauksen etenemistä ja saatuja tuloksia (kuva 8). Graafisilta näytöiltä nähdään muutamia viimeisimpiä tuloksia. Histogrammeja käytettiin, jotta voitiin havaita, millainen jakauma arvoista syntyy. Näistä jakau-  
mista voitiin helposti havaita mahdollisesti muista poikkeavat arvot, jotka ovat voineet syntyä jostakin virhetilanteesta.



Kuva 8. Käyttöliittymän Mittaus-välilehti

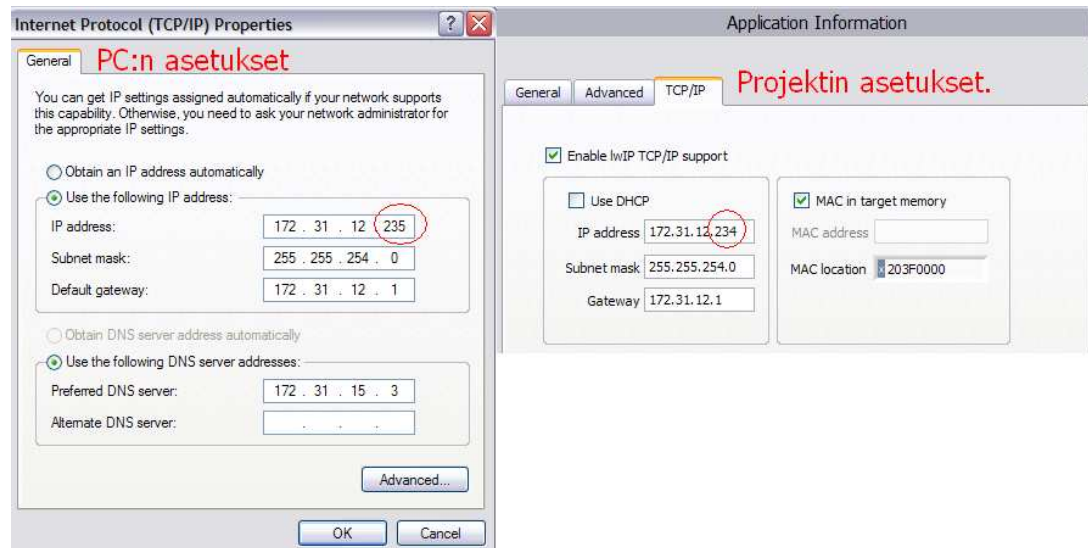
Tekstiedoston Asetukset-välilehdelle suunniteltiin tehtävän tekstiedoston ulkoasuun ja tallennettaviin tietoihin vaikuttavia asetuksia, mutta tätä ei keritty toteuttaa. Lisätietoja-välilehdeltä löytyy ohjelman tekijä ja päivämäärä.

#### 4.2.2 Asetusten lähettäminen prosessorikortille

Asetusten lähettämiseen käytettäväksi tiedonsiirtoväyläksi valittiin TCP/IP-protokolla, koska ohjelmointiympäristö ja prosessorikortti tukee tätä vaihtoehtoa parhaiten. Lisäksi valintaan vaikutti se, että TCP/IP-protokolla on myös todella nopea ja toimintavarma. Tätä väylää käytettiin kuvan 6 kohtiin 1 ja 3.

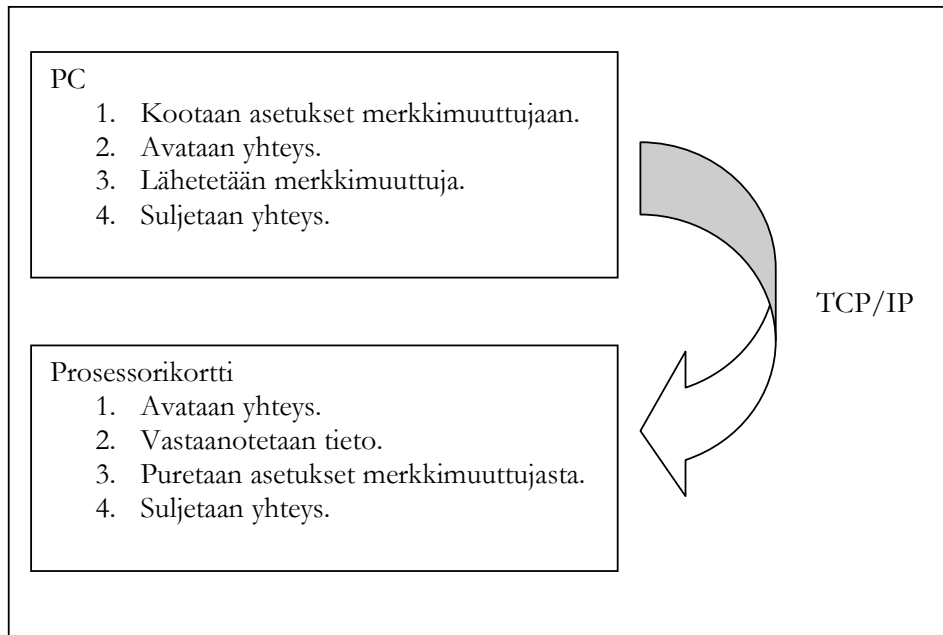
TCP/IP-liikennettä varten tarvittiin ohjelma sekä PC:lle että prosessorikortille; PC:lle lähettämään asetukset ja prosessorikortille vastaanottamaan asetukset. Kuvassa 7 on esitetty välilehdellä sijaitsevat asetukset. Näistä asetuksista mittausten lukumäärä, viive ja toiminto lähetetään prosessorikortille. IP-osoitteen ja portin asetuksia ei lähetetä.

Kuvassa 7 olevat IP-osoite ja portin asetukset säätävät PC:n TCP/IP-asetukset kohdalleen. Vastaanottavan laitteen eli prosessorikortin TCP/IP-asetukset on sijoitettu suoraan sekä projektin asetuksiin että kortille ladattavaan koodiin, joten niitä ei tarvitse lähettää. Prosessorikortin IP-osoite asetettiin yhtä lukua pienemmäksi, kuin PC:n osoite. Tällä varmistettiin yhteyden toimivuus. IP-asetukset on esitetty kuvassa 9. Portin asetukset olivat molemmissa samat (asetettu 2055).



Kuva 9. IP-asetukset

Asetusten lähettäminen ja vastaanottaminen voidaan esittää kuvan 10 mukaisesti.



Kuva 10. Asetusten lähettäminen ja vastaanottaminen

Tässä on kuitenkin huomioitava, että kuvan 10 toiminnot tapahtuvat osittain rinnakkaisesti. Esimerkiksi prosessorikortin yhteyttä ei suljeta, ennen kuin tieto on vastaanotettu.

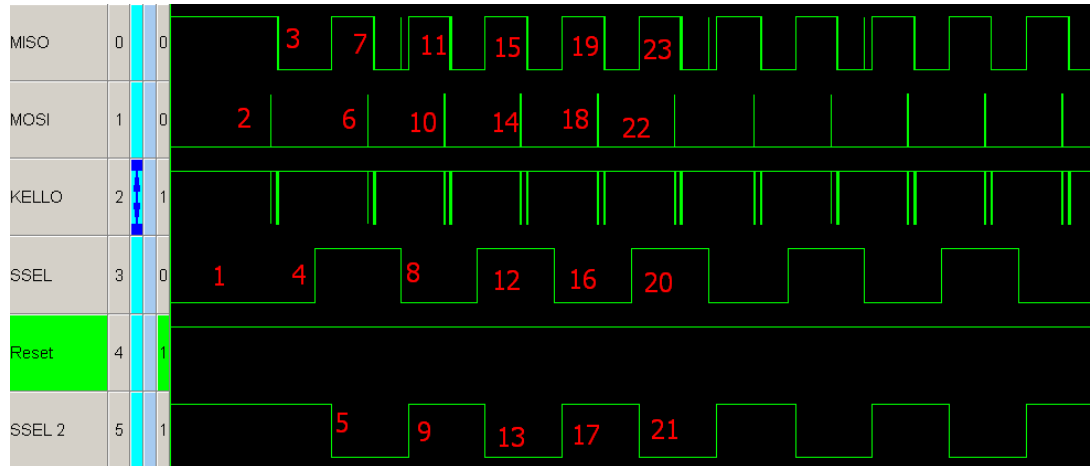
### 4.2.3 SPI-väylän toiminta

Kiihtyvyyssanturi käyttää tiedonsiirtoon SPI-väylää. Tällainen liitäntä löytyy myös prosessorikortilta. Koska SPI-väylän toimintaan ei löytynyt mitään valmiita koodiesimerkkejä, oli ryhdyttävä luomaan koodia pelkästään anturin datalehtien tietojen avulla. Kuvassa 11 on esitettynä kiihtyvyyssantureiden lukemiseen käytettävä sekvenssi. Kuvan numerointien mukaan sekvenssi on seuraava:

1. Piirivalinta 1 asetetaan aktiiviseksi (=nolla-aktiivinen).
2. Kirjoitetaan anturin kontrollirekisteriin arvo 80 Hex. Tämä vastaa anturin x-akselin arvojen lukemista.
3. Anturi 1 lähettää x-akselin tiedot SPI-väylään.
4. Piirivalinta 1 asetetaan pois päältä.
5. Piirivalinta 2 asetetaan aktiiviseksi (tämä piirivalinta toteutettu toiselle anturille).
6. Kirjoitetaan anturin kontrollirekisteriin arvo 80 Hex. Tämä vastaa anturin x-akselin arvojen lukemista.
7. Anturi 2 lähettää x-akselin tiedot SPI-väylään.
8. Piirivalinta 1 asetetaan aktiiviseksi.
9. Piirivalinta 2 asetetaan pois päältä.
10. Kirjoitetaan anturin kontrollirekisteriin arvo 82 Hex. Tämä vastaa anturin y-akselin arvojen lukemista.
11. Anturi 1 lähettää y-akselin tiedot SPI-väylään.
12. Piirivalinta 1 asetetaan pois päältä.
13. Piirivalinta 2 asetetaan aktiiviseksi.
14. Kirjoitetaan anturin kontrollirekisteriin arvo 82 Hex. Tämä vastaa anturin y-akselin arvojen lukemista.
15. Anturi 2 lähettää y-akselin tiedot SPI-väylään.
16. Piirivalinta 1 asetetaan aktiiviseksi.
17. Piirivalinta 2 asetetaan pois päältä.
18. Kirjoitetaan anturin kontrollirekisteriin arvo 84 Hex. Tämä vastaa anturin z-akselin arvojen lukemista.

19. Anturi 1 lähettää z-akselin tiedot SPI-väylään.
20. Piirivalinta 1 asetetaan pois päältä.
21. Piirivalinta 2 asetetaan aktiiviseksi.
22. Kirjoitetaan anturin kontrollirekisteriin arvo 84 Hex. Tämä vastaa anturin z-akselin arvojen lukemista.
23. Anturi 2 lähettää z-akselin tiedot SPI-väylään. Tämän jälkeen sekvenssi alkaa alusta.

Lisäksi kellolinja aktivoituu aina kirjoitettaessa tai luettaessa. Näin saatiin siis luettua molempien antureiden arvot.



Kuva 11. SPI-sekvenssi

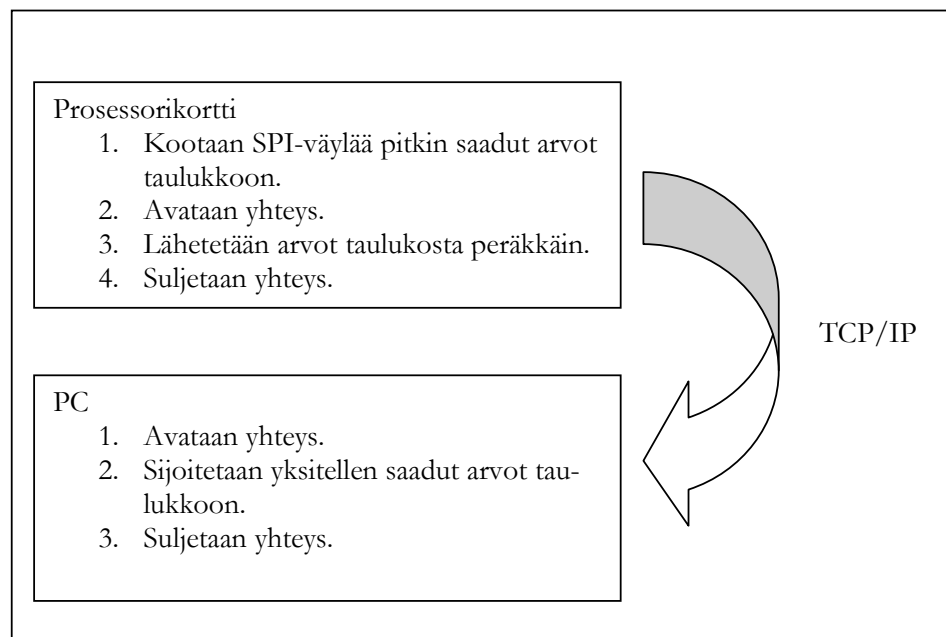
Viiheet eri luku- ja kirjoituskäskyjen välillä oli esitetty anturin datalehdillä, mutta näihin ei tarvinnut perehtyä, koska näin suuriin nopeuksiin ei päästy. SPI-väylän asetukset, kuten baudinopeus, bittien määrä ja muut asetukset, määriteltiin koodissa käyttämällä tähän tarkoitukseen luotua funktiota.

SPI-väylän sekvenssin luontiin käytettiin eniten aikaa, sillä samalla sekvenssi määrittelee maksiminopeuden näytteistystaajuudelle. Sekvenssin luontiin kului likimain puolet koko koodin suunnitteluun käytetystä ajasta. Syynä tähän oli esimerkkikoodien vähäinen lukumäärä. Lisäksi prosessorikortin valmistajan (National Instruments) tuotetusta ei saatu kovinkaan yksityiskohtaisia neuvoja.

SPI-sekvenssiä toteutettaessa törmättiin useasti ongelmiin viiveiden kanssa. Vaikka koodista karsittiin muistia vieviä funktioita, niin silti ohjelman suoritus oli hidasta. Sekvenssin nopeudeksi mitattiin noin 200 Hz, kun taas prosessorikortin valmistaja (National Instruments) vakuutti, että laitteistolla ei olisi mitään ongelmia päästä 500 Hz:n näytteistystaajuuksiin. Useiden muutosten ja kokeilujen jälkeen todettiin, että koodin hitaus johtui ohjelmointiympäristön virheellisistä projektin asetuksista. Tarkkaan ei tiedetä, miksi asetukset aiheuttivat viivettä koodiin. Kuitenkin lopuksi päästiin noin 2000 Hz:n nopeuteen, mikä riitti mittauksiin hyvin.

#### 4.2.4 Tuloksien lähetys prosessorikortilta PC:lle

Tuloksien lähettämiseen prosessorikortilta PC:lle käytettiin TCP/IP-protokollaa. Lähetyksen ja vastaanoton toiminta on hyvin samanlainen kuin kohdassa 4.2.2. Kuvassa 12 on esitetty lähetyksen ja vastaanoton toiminta.



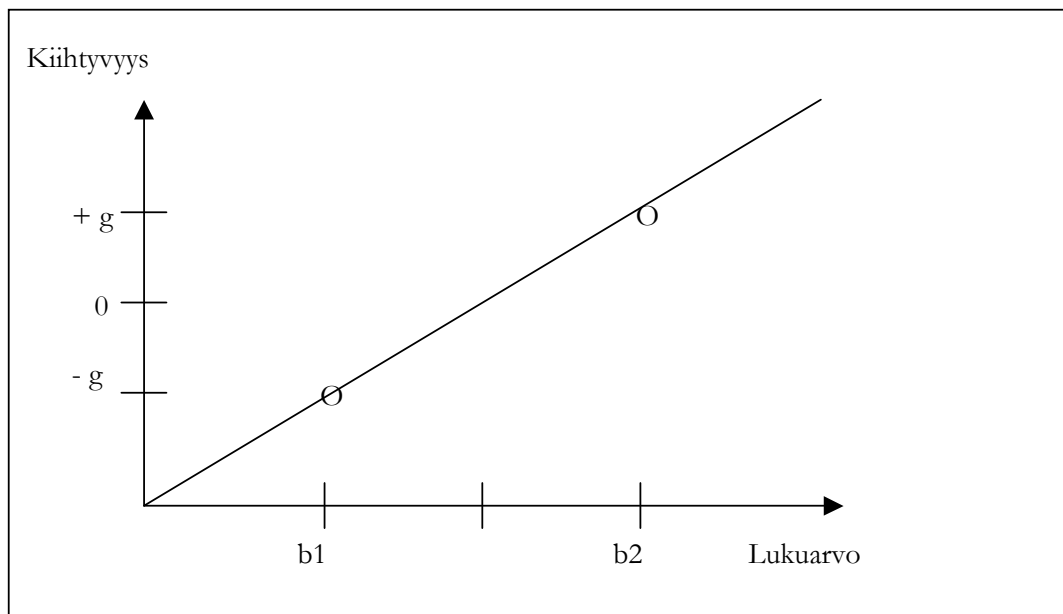
Kuva 12. Lähetyksen ja vastaanoton toiminta



#### 4.2.5 Kalibrointi ja kiihtyvyyssarvojen laskeminen

Koska eri kiihtyvyyssantureiden antamat tulokset vaihtelevat hieman keskenään, tarvittiin antureille kalibrointi. Kalibroinnissa hyödynnettiin maan vetovoiman kiihtyvyyttä, eli arvoa  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Ensin pääohjelman Asetukset-välilehdeltä valitaan kalibroitava anturi (anturi 1 tai 2), akseli (x, y tai z) ja suunta (+1 g tai -1 g). Tämän jälkeen anturi asetetaan siten, että akseliin kohdistuu +1 g, eli  $9,81 \text{ m/s}^2$  (b2 kuvassa 13). Saatu arvo tallennetaan tiedostoon. Tämän jälkeen anturi asetetaan niin, että akseliin kohdistuu -1 g, eli  $-9,81 \text{ m/s}^2$  (b1 kuvassa 13). Samat kalibroinnit suoritetaan myös kahdelle muulle akselille.

Arvoa 0 g vastaava lukuarvo sijoittuu kalibrointi-arvojen väliin, koska anturi toimii lineaarisesti (kuva 13).



Kuva 13. Kiihtyvyyssarvojen ja lukuarvojen suhde toisiinsa

Kalibrointi-arvojen kautta voidaan piirtää suora. Kaikkien mittaustuloksien tulisi asettua tälle suoralle. Suoran kulmakertoimeksi saadaan

$$k = \frac{g - (-g)}{b_2 - b_1} = \frac{2 * g}{b_2 - b_1}, \quad (1)$$

jolloin suoranyhtälö on muotoa

$$\begin{aligned} (a - a_2) &= k(b - b_2) \\ a &= a_2 + k(b - b_2) \end{aligned} \quad (2)$$

missä  $a$  on kiihtyvyyssarvo ja  $b$  on mitattu lukuarvo. Kun sijoitetaan kulmakerroin yhtälöön, saadaan lopulliseksi muodoksi

$$a = 9,81 + \frac{2 * 9,81}{b_2 - b_1} * (b - b_2). \quad (3)$$

Laskutoimitus voisi olla esimerkiksi:

$$b = 2048$$

$$b_1 = 1024$$

$$b_2 = 3072$$

$$a = 9,81 + \frac{2 * 9,81}{3072 - 1024} * (2048 - 3072) = 0 \text{ m / s}^2$$

Koodissa laskenta tapahtui siten, että ensin kalibrointi-arvot haettiin tiedostoista. Näiden avulla laskettiin kiihtyvyyssarvot, jotka sijoitettiin kolmeen eri taulukkoon, kullekin akselille omaan taulukkoonsa. Lopuksi taulukot vietiin tuloksien käsittelyyn, esitykseen ja tallennukseen.

#### 4.2.6 Tuloksien käsittely, esitys ja tallennus PC:llä

Tuloksien käsittelyllä tarkoitetaan tässä kiihtyvyyssarvojen siirtämistä kolmesta eri taulukosta (jokaiselle suunnalle oma taulukko) yhteen taulukkoon, joka sisältää merkkitietoa. Näiden arvojen siirtäminen riippui käytettiinkö kahta vai yhtä anturia. Lopullisessa merkkitaulukossa tiedot olivat seuraavassa järjestyksessä.

- päivä ja kellonaika
- mittausten välinen aika
- anturin 1 X-arvo, Y-arvoja Z-arvo. Anturin 2 X-arvo, Y-arvo ja Z-arvo.

Tästä merkkitaulukko vietiin silmukkaan, josta arvot tallennettiin yksitellen tekstitiedostoon. Alkuperäisistä kolmesta eri taulukosta arvot siirrettiin myös graafisille näytöille ja histogrammeihin (kuva 8).

## 5 TESTAUS

Laitteiston testaus suoritettiin Kajaanin ammattikorkeakoulun elektroniikan testauslaboratoriossa sijaitsevalla tärstinlaitteistolla. Sillä kyetään saamaan aikaan sekä sinimuotoista että satunnaista tärinää. Processorikortilta saatavia arvoja verrattiin toisen mittauslaitteiston antamiin arvoihin. Myös tämän vertailuun käytettävän kiihtyvyyssanturin tiedot mitattiin LabVIEW-ohjelmaa käyttäen. Mittaukseen ei kuitenkaan käytetty tämän työn ohjelmaa, vaan aikaisemmin luotua järjestelmää. Seuraavassa on esitetty muutamia tärkeimpiä tietoja tärstimestä ja vertailuun käytettävästä anturista:

Tärstimen ominaisuudet:

- malli LDS V850
- taajuusalue 5-2500 Hz
- maksimikiihtyvyys (sinimuotoinen) 70 g
- sekä sinimuotoinen tärinä, että satunnainen tärinä.

Vertailuanturin ominaisuudet:

- malli KISTLER-8702B50M1
- mittausalue  $-50 \dots +50$  g
- herkkyys 99,8 mV/g.

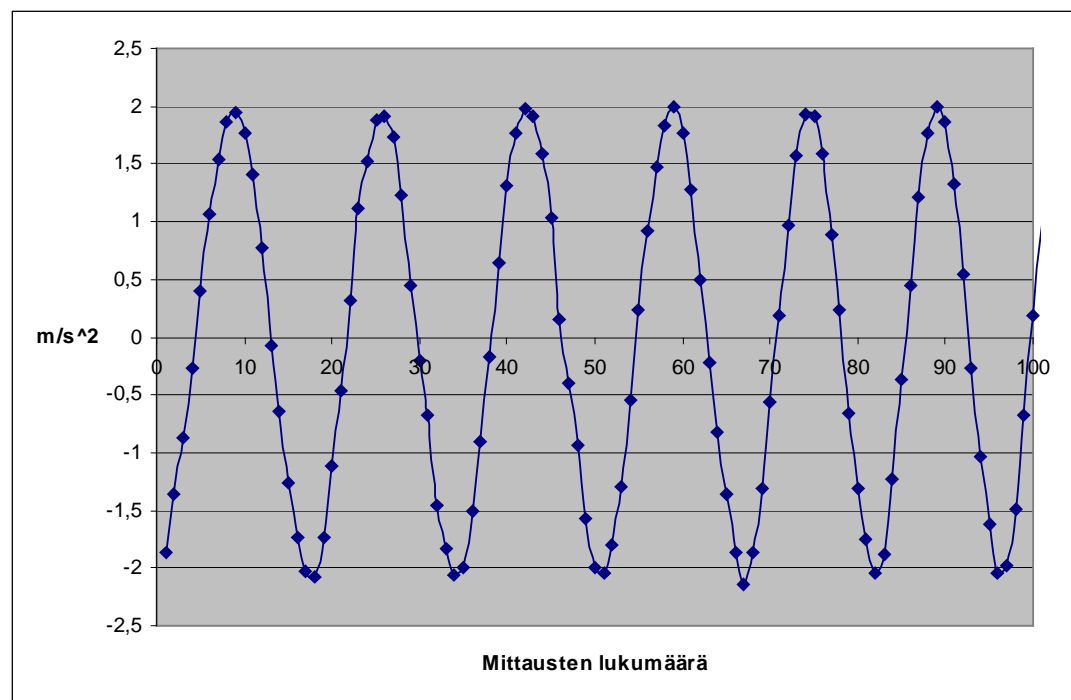
Itse testaus koostui kahdesta eri osiosta. Ensin tärstimä ajettiin eri taajuuksilla sinisignaaleilla (5 Hz, 10 Hz, 15 Hz ja 20 Hz) ja tämän jälkeen eri amplitudeilla (0,01 g, 0,05 g, 0,2 g ja 0,5 g). Taajuudet valittiin tarkoituksella alhaisiksi, koska processorikortilla toteutettu laitteisto ei kyennyt mittaamaan paljon arvoja (noin 5000), minkä vuoksi näytteistystaajuus jouduttiin valitsemaan alhaiseksi. Kuitenkin laitteisto kykenisi mittaamaan noin 2000 näytettä sekunnissa, mutta tällöin mittausaika jäisi todella lyhyeksi. Mittausaikana käytettiin viittä sekuntia. Tiedot mitattiin kahdelta anturilta, jolloin kokonaisnäytteistystaajuudeksi tuli 160 Hz. Näytteitä otettiin tällöin yhteensä 400 kappaletta (viiden sekunnin aikana) kanavaa kohden.

Kaikki anturit (2 kpl prosessorikorttiin kytkettyä ja 1 referenssi) kytkettiin tärhistimeen siten, että anturin z-akseliin kohdistui positiivinen maanvetovoiman kiihtyvyys. Referenssianturilta saatiin sekä raakadataa (ei suodatettua dataa) että RMS-arvoja (laskettu 512 kappaleelle näytteitä). Referenssianturin näytteistystaajuudeksi oli asetettu 512 Hz ja näytteitä mitattiin noin 15-30 sekuntia.

## 6 TESTAUSTULOKSIEN ANALYSOINTI

Ennen kuin vertailua lähdettiin suorittamaan, säädettiin tuloksien nollassa 1 g sijaan arvoon 0 g vähentämällä tuloksista arvo 1 g ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ). Samalla tulokset muutettiin  $\text{m/s}^2$ -yksikköön, koska vertailuanturilta saatavat tulokset olivat tässä muodossa. Ensimmäiseksi tuloksista ryhdyttiin tutkimaan, kuinka pieniä amplitudeja laitteisto voi mitata luotettavasti. Testattavat amplitudit olivat 0,01 g, 0,05 g, 0,2 g ja 0,5 g. Tässä amplitudilla tarkoitetaan huippuarvoa (siis ei huipusta huippuun -arvoa).

Kuvaa 14 tarkastelemalla voidaan havaita, että tulokset ovat lineaarisia. Tässä muutos on yhtä suuri sekä ylöspäin että alaspäin ( $2 \text{ m/s}^2$ ). Lisäksi kalibrointi onnistui todella hyvin, sillä nollassoksi saatiin noin  $0 \text{ m/s}^2$ .



Kuva 14. Tulokset ( $f = 5 \text{ Hz}$  ja  $A = 0,2 \text{ g}$ ).

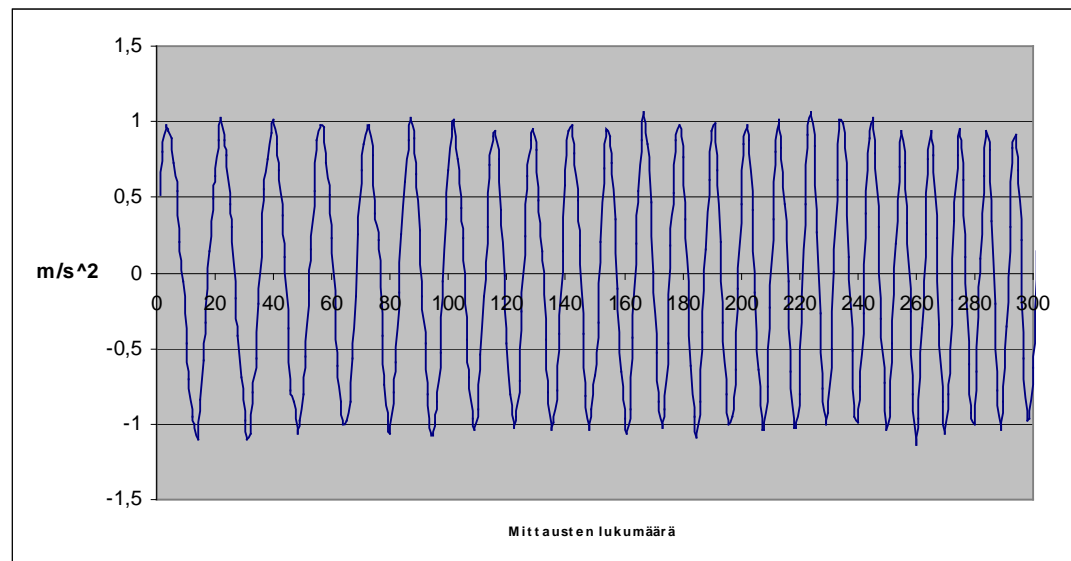
Eri amplitudien tutkimista varten tärstimellä asetetut amplitudit muutettiin yksikköön  $\text{m/s}^2$ . Taulukkoon 2 on koottu tärstimen asetetut amplitudit sekä referenssianturilla ja prosessorikortilla mitatut arvot.

Taulukko 2. Mitatut amplitudin muutokset.

TÄRISTIMELLE ASETETTU ARVO	REFERENSSIANTURIN ARVO m/s <sup>2</sup>	MITATTU ARVO m/s <sup>2</sup>
0,01 g = 0,0981 m/s <sup>2</sup>	0,15	0,175
0,05 g = 0,4905 m/s <sup>2</sup>	0,5	0,5
0,2 g = 1,962 m/s <sup>2</sup>	2	2
0,5 g = 4,905 m/s <sup>2</sup>	5	5

Kuten taulukosta 2 voidaan havaita, referenssianturin mitaamat amplitudit vastaavat suurimmaksi osaksi asetettuja arvoja. Ainoastaan pienimmällä amplitudilla tapahtuu virhettä. Prosessorikortilla mitatut arvot ovat kohtuullisen lähellä oikeita arvoja. Näiden tuloksien perusteella amplitudin mittaaminen onnistui hyvin.

Seuraavaksi tuloksista ryhdyttiin tutkimaan eri taajuuksilla toteutettuja mittauksia. Näistä tutkittiin erityisesti taajuuden pysymistä vakiona. Kuvaaja pürrettäessä huomattiin kuitenkin heti, että taajuus muuttui mittauksen edetessä. Noin sadan mitatun arvon (kanavaa kohden) jälkeen taajuus suurenee merkittävästi ja samalla kuvaaja vääristyy. Kuvassa 15 on esitetty mittaaminen taajuudella 5 Hz ja amplitudilla 0,1 g.



Kuva 15. Taajuuden muuttuminen

Kuten kuvasta 15 voidaan havaita, taajuus muuttuu mittausarvojen lisääntyessä. Tämä johtuu prosessorikortille toteutetun mittauslaitteiston toiminnan hidastumisesta, jolloin samaan määrään mittauksia mahtuu useampi jakso sinisignaalia. Esimerkiksi alueeseen 0–80 kappaletta mittausta mahtuu noin viisi jaksoa, kuten pitääkin olla, koska näytteistystaajuus on 80 Hz ja signaalin taajuus on 5 Hz. Alueeseen 200–280 mahtuu noin 8 mittausta, jolloin taajuus olisi 8 Hz. Taajuus muuttui siis todella merkittävästi. Taajuuden muutos havaittiin kaikilla testatuilla taajuuksilla. Taajuuden muutosta ei lähdetty tutkimaan tarkemmin esimerkiksi FFT-analyysillä, koska taajuuden muutos oli niin iso, että se huomattiin jo silmämääräisesti. Todennäköisesti spektri olisi ollut niin laaja, että siitä ei olisi saatu mitään merkittävää lisätietoa.

Viimeinen tuloksista tutkittava asia oli RMS-arvo. Neliöllinen keskiarvo laskettiin 100:lle arvolle. Vertailuanturilta saatavat RMS-arvot olivat laskettu 512:lle arvolle. RMS-arvot laskettiin käyttäen kaavaa

$$R(x) = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^N x_k^2}{N}} \quad (4),$$

jossa N on laskettavien arvojen lukumäärä ja k on laskettava arvo. Taulukkoon 3 on koottu vertailuanturilta saadut RMS-arvot ja prosessorikortilla mitatuista arvoista lasketut RMS-arvot.

Taulukko 3. RMS-arvot mittauksista

TÄRISTIMELLE ASETETTU ARVO	REFERENSSIAANTURIN ARVO RMS m/s <sup>2</sup>	MITATTU ARVO RMS m/s <sup>2</sup>
0,01 g = 0,0981 m/s <sup>2</sup>	0,11	0,12
0,05 g = 0,4905 m/s <sup>2</sup>	0,37	0,36
0,2 g = 1,962 m/s <sup>2</sup>	1,4	1,4
0,5 g = 4,905 m/s <sup>2</sup>	3,6	3,6

Taulukkoa 3 tarkastelemalla voidaan havaita, että mitatut arvot ovat hyvin lähellä referenssianturin arvoja, kuten taulukon 2 tuloksien perusteella voidaan olettaa.



Testaustulosten perusteella laitteisto ei ole vielä hyödyntämiskelpoinen. Jotta koodista olisi hyötyä, täytyisi sitä muuttaa siten, että sillä saataisiin mitattua pidempiä aikoja. Tämä voitaisiin saavuttaa toteuttamalla puskurointi oikeaoppisesti. Tällöin koodissa esiintynyt viivekin saataisiin eliminoidua. Lisäksi näytteistystaajuutta saataisiin suurennettua mittausajan kärsimättä. Kuitenkin käytettävissä olevan ajan puutteen ja vähäisten esimerkkikoodien takia tämä jätettiin toteuttamatta. Jos puskurointia olisi lähdetty toteuttamaan, olisi laitteistolle jouduttu tekemään myös laajoja suorituskykymittauksia. Tällöin olisi tiedettävä, kuinka paljon puskuuriin voidaan siirtää tietoa mittauksen hidastumatta. Koodia voidaan kuitenkin käyttää hyvänä pohjana seuraavalle kehitysversiolle, sillä lyhyitä mittauksia tehtäessä arvot olivat oikeanlaisia. Lisäksi SPI-väylä ja TCP/IP-väylä toimivat luotettavasti.

## 7 YHTEENVETO

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa prosessorikortille koodi, jota voitaisiin hyödyntää kehotäriämittauksissa. Laitteistolla haluttiin mitata kahdella anturilla kolmesta eri suunnasta kiihtyvyyssarvoja.

Ensimmäiseksi koodiin toteutettiin SPI-väylän sekvenssi, jota anturit käyttivät tiedonsiirtoon. Sekvenssin suunnitteluun kului suuri osa koko työhön varatusta ajasta. Tämä johtui siitä, että esimerkkikoodeja ei ollut kovinkaan paljon saatavilla. Tämän jälkeen voitiin keskittyä anturin antamien arvojen käsittelyyn ja tallennukseen. Ensin koodi käsitti vain yhden anturin mittauksen. Kun tämä saatiin toimimaan, laajennettiin koodia siten, että voitiin mitata kahdelta anturilta. Tämän jälkeen toteutettiin koodiin TCP/IP-liikenne prosessorikortin ja PC:n välille. Tätä tarvittiin sekä mittaustulosten lähetykseen PC:lle että asetusten lähetykseen prosessorikortille. Lopuksi laitteistolla suoritettiin testejä.

Testit suoritettiin ajamalla tärstimellä eri taajuuksia ja amplitudeja. Nämä mitattiin sekä prosessorikortin antureilla että vertailuanturilla. Arvoja verrattiin keskenään. Tuloksista havaittiin, että laitteisto ei ole vielä täysin valmis hyödynnettäväksi. Koodia voidaan kuitenkin hyödyntää pohjana seuraavalle kehitysversioneille, jossa puskurointi olisi toteutettava paremmin.

## LÄHTEET

- 1 Työsuojeluhallinto. Työsuojeluoppaita- ja ohjeita 43. [PDF-dokumentti]. [Viitattu 27.01.2009]. Saatavissa:  
<http://www.tyosuojelu.fi/upload/oppaita43.pdf>
- 2 NI Developer Zone. Overview of Human Vibration Weighting Filters. [WWW-dokumentti]. [Viitattu 28.01.2009].  
<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/6957>
- 3 Kionix KXPS5-2050-kiihtyvyyssanturin datasivut. [PDF-dokumentti]. [Viitattu 28.01.2009]. Saatavissa:  
<http://www.kionix.com/accelerometers/accelerometer-KXPS5.html>
- 4 NI LabVIEW Embedded Module for ADI Blackfin Processors Development Kit. [PDF-dokumentti]. [Viitattu 29.01.2009]. Saatavissa:  
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/202659>
- 5 Kionix accelerometers. [WWW-dokumentti]. [Viitattu 28.01.2009].  
<http://www.kionix.com/accelerometers/accelerometer-KXPS5.ht>