

Petri Immonen

Mechatronics-lisälaitteiden käyttöönotto NI myRIO-1900 -kehitysalustalla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Automaatiotekniikka

Insinöörityö

4.5.2016

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Petri Immonen Mechatronics-lisälaitteiden käyttöönotto – NI myRIO-1900 -kehitysalustalla 36 sivua + 0 liitettä 4.5.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Automaatiotekniikka
Ohjaaja	Lehtori Timo Tuominen
<p>Opinnäytetyön tarkoituksena on ohjeistaa National Instrumentsin Mechatronics-pakkauksen lisälaitteiden käyttöönotossa National Instrumentsin myRIO-kehitysalustalla. Ohjeistus toteutetaan esittelemällä laitteiden ominaisuudet, toimintaperiaatteet ja ohjelmointi. Tarkoituksena on myös tuottaa suomenkielistä oppimateriaalia aiheesta, sillä sitä on tarjolla hyvin niukasti.</p> <p>Idea sai alkunsa opinnäytetyön tilaajalta Myyrmäen Metropolia Ammattikorkeakoulun yliopettaja Kari Vieriseltä keväällä 2015. Hänen aikomuksena on ostaa koululle NI myRIO -laitteita opetustarkoitukseen. Lehtori Timo Tuomisen kanssa rajattiin opinnäytetyön alue. Rajauksessa on otettu huomioon sisällön käyttö oppimateriaalina.</p> <p>Teoriaosuudessa käsitellään Mechatronics-pakkauksen sisältöä. Siihen kuuluu kuusi erilaista anturia, kolme moottoria ja yksi modulaattori. Jokaisen laitteen toimintaperiaatteeseen syvennytään tarkemmin erillisissä kappaleissa. LabVIEW-ohjelmistolla luotua lohkoaviota selitetään auki ja opastetaan kuinka ohjelmointeja tehdään. Käydään läpi tyypilliset anturityypit ja esitellään muutama koulutustarkoituksessa käytettävä kehitysalusta. Lopuksi kerrotaan tarkemmin NI myRIO-ohjausyksiköstä.</p>	
Avainsanat	NI myRIO-1900, LabVIEW, Mechatronics Kit, anturi, sensori

Author Title	Petri Immonen Commissioning of Mechatronics Kit on NI myRIO-1900 platform
Number of Pages Date	36 pages + 0 appendices 4th May 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automation Engineering
Instructor	Timo Tuominen, Senior Lecturer
<p>Purpose of the thesis was to create guidelines for commissioning Mechatronics Kit accessories of national Instruments with the myRIO reconfigurable programming platform. The guidelines consider the features of appliances, operation principles and programming. Also, the aim was to produce Finnish learning material about the topic, since there is only little information available.</p> <p>Idea for the study was initiated by Kari Vierinen, Principal Lecturer at Myyrmäki Metropolia University of Applied Sciences, in spring 2015. The intention is to purchase several NI myRIO platforms for education purposes. The subject of the thesis was determined together with Timo Tuominen, Senior Lecturer.</p> <p>In the theoretical part, the content of Mechatronics Kit is described. It contains six different sensors, three motors and one modulator. Each device is considered in term of its operating principle. Instructions are given on how a function block code is created with LabVIEW programming environment. Features of typical sensor models are described and a few education purpose programming platforms are introduced. Lastly, there is a more detailed overview of the myRIO programming unit.</p>	
Keywords	NI myRIO-1900, LabVIEW, Mechatronics Kit, Sensor

Käsitteet

Bittikenttä	Rekisterin oma muutostaulukko, joka sisältää bitit vasemmalta oikealle $b_7, b_6, b_5, b_4, b_3, b_2, b_1$ ja b_0 .
DC	Direct Current, tasavirta
FPGA	Uudelleen ohjattava piiri, joka on integroitu NI myRIO:n Xilinx Z-7010-prosessorin yhteyteen
HEX	Heksadesimaali, joka voidaan kirjoittaa muodossa (0xXX)
I ² C	I ² C on hieman SPI:tä vanhempi ja monimutkaisempi käyttöliittymäväylä (ks. SPI). I ² C-väylä sisältää kaksi signaalia, SCL:n ja SDA:n. SCL on kellosignaali ja SDA on datasiignaali. Monissa Mechatronics-pakkauksen antureissa voi valita I ² C:n ja SPI:n väliltä, kumpaa halutaan käyttää.
INT ₁ tai INT ₂	Keskeytyspinnit (Interrupt pins), jotka ovat työnnä-vedä, matalan impedanssin ulostulopinnejä.
LSB	Least Significant Bit, vähiten merkityksellinen bitti
Mikrokontrolleri	Mikroprosessorin, ohjelmamuistin, datamuistin ja sisääntulot sekä ulostulot sisältävä sulautettujen järjestelmien ohjainyksikkö
MSB	Most Significant Bit, merkityksellisin bitti
PWM	Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio
Raaka data	Mittalaitteelta saatavia sähköisiä impulsseja analogia- tai digitaalimuodossa, jota ei ole vielä käsitelty muotoon, jossa niitä voitaisiin oikeasti tulkita.
SPI	Serial Peripheral Interface Bus on käyttöliittymäväylä, jota käytetään lähinnä mikrokontrollereiden ja pienten oheislaitteiden datan siirrossa.
USB	Universal Serial Bus, sarjapääteläarkkitehtuuri
LabVIEW	NI myRIO:n ohjelmointiympäristö
While-kierto	While-loop on toiminto LabVIEW:ssa, joka toteuttaa ohjelmaa tietyllä päivitystaajuudella

Sisällys

Käsitteet

1	Johdanto	1
2	Automaatiotekniikan koulutusvälineet	2
2.1	Mechatronics-pakkauksen moottorit	2
2.1.1	Standardikierron- ja jatkuvan kierron servomoottorit	3
2.1.2	Tasavirtamoottori	4
2.2	Anturit	5
2.2.1	Lähestymisanturit ja -kytkimet	5
2.2.2	Paikoitusanturit	6
3	Mechatronics-pakkauksen lisäosat ja niiden käyttöönotto	7
3.1.1	Digitaalinen kompassi	7
3.1.2	Digitaalinen kiihtyvyysanturi	9
3.1.3	Digitaalinen gyroskooppi	12
3.1.4	H-Silta	14
3.1.5	Ympäriävän valon sensori	17
3.1.6	Infrapunaetäisyys sensori	18
3.1.7	Ultraäänisensori	22
4	Kehitysalustat	24
4.1	Arduino Uno	25
4.2	Raspberry Pi	25
4.3	Picaxe	27
5	National Instruments myRIO-1900	29
5.1	Indikaattorit, painikkeet ja liitännät	29
5.2	Sisään- ja ulostulot	30
5.3	Raaka data jännitteeksi	31
5.4	Ohjelmointiympäristö LabVIEW	33
6	Pohdinta	35
	Lähteet	37

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on käydä läpi National Instrumentsin Mechatronics-pakkauksen lisälaitteita. Samalla perehdytään NI myRIO-ohjausyksikköön ja LabVIEW-ohjelmistoon. Joidenkin lisäosien kohdalla ohjelmoinnin vaiheet selitetään ja toisten kohdalla kerrotaan, kuinka ohjelmoinnin voi tehdä. Tarkoituksena on myös antaa ohjeistusta opiskelijoille lisälaitteiden käytöstä. Ohjeistus toteutetaan esittelemällä laitteiden ominaisuudet, toimintaperiaatteet ja ohjelmointi. Työssä esitellään Digilentin Mechatronics-pakkauksen sisältämiä komponentteja NI myRIO:n omassa ohjelmointiympäristössä.

Opinnäytetyön tilaaja on Myyrmäen Metropolia Ammattikorkeakoulun yliopettaja Kari Vierinen. Hänen aikomuksena on hankkia NI myRIO-laitteita opetuskäyttöön Myyrmäen toimipisteelle. Koska aiheesta on saatavilla vain niukasti suomenkielistä tietoa, on opinnäytetyö käytettävissä osana oppimateriaalia.

Teoriaosuudessa keskitytään pääsääntöisesti Mechatronics-pakkauksen lisälaitteisiin. Pakkaus sisältää laitteita, joilla voidaan mitata maan magneettikenttää, kiihtyvyyttä, kaltevuutta, valoisuutta ja etäisyyksiä. Sähkömoottoreita on kolme erilaista. Automaatiotekniikassa käytetään paljon sähkömoottoreita ja anturitekniikkaa, joten insinööriyden aihe puoltaa hyvin opinsuuntausta. Työssä nostetaan esiin myös kolme muuta opetuskäyttöön tarkoitettua kehitysalustaa: Arduino Uno, Raspberry Pi ja Picaxe.

2 Automaatiotekniikan koulutusvälineet

National Instruments on komponenttialalla tunnettu nimi lähinnä LabVIEW-ohjelmointiympäristön johdosta, jota käytetään erilaisten alustojen ohjelmointiympäristönä (Keuru-lainen 2016). NI myRIO on kyseisen valmistajan oma alusta, joka toimii samaisessa LabVIEW-ympäristössä (NI myRIO).

Mechatronics-pakkaus on erillisesti ostettava kokoelma, joka sisältää kuusi erilaista anturia, kolme moottoria ja yhden modulaattorin. Komponentteja ovat digitaalinen kompassi, digitaalinen gyroskooppi, H-Silta, kiihtyvyyssanturi, infrapunaetäisyys sensori, ultraäänisensori ja ympäröivän valon sensori. Lisäksi sen moottoreita ovat tasavirtamoottori, standardi servomoottori ja jatkuvasti pyörivä servomoottori. (NI myRIO).

Laite on suunniteltu opetuskäyttöön ja sen mukana tulleet komponentit on valikoitu tuotanto- ja tehdasautomaation haasteita silmällä pitäen. Työskentely komponenttien kanssa LabVIEW-ympäristössä simuloi automaatiossa käytettävien lisälaitteiden ohjelmointia tehtaissa käytettävien logiikoiden kanssa – vieläpä samalla ohjelmointikielellä. (NI myRIO.)

2.1 Mechatronics-pakkauksen moottorit

Automaatiossa käytetään usein servo- ja askelmoottoreita. Servomoottorin vahvuus on paikoituskyvyn tarkkuus ja sen kyky tehdä nopeita kiihdytyksiä ja jarrutuksia. Tarvittaessa suurta momenttia käytetään usein servomoottoria. Askelmoottoreiden eduiksi voidaan lukea tarkka liikenopeus ja loppuaseman määrittäminen. Askelmoottorit soveltuvat pienille momenteille digitaalisen ohjauksen yhteyteen. (Doering 2016.)

Paketista löytyy kaksi ulkoisesti identtistä servomoottoria ja yksi tasavirtamoottori. Nämä servomoottorit eroavat toisistaan käytössä, sillä toinen on jatkuvasti pyörivä (continuous rotation) servomoottori ja toinen standardi-servomoottori. Standard-malli pyörii 215 astetta ja jatkuva voi pyöriä nimensä mukaisesti jatkuvasti. (myRIO Mechatronics Accessory Kit.)

2.1.1 Standardikierron- ja jatkuvan kierron servomootorit

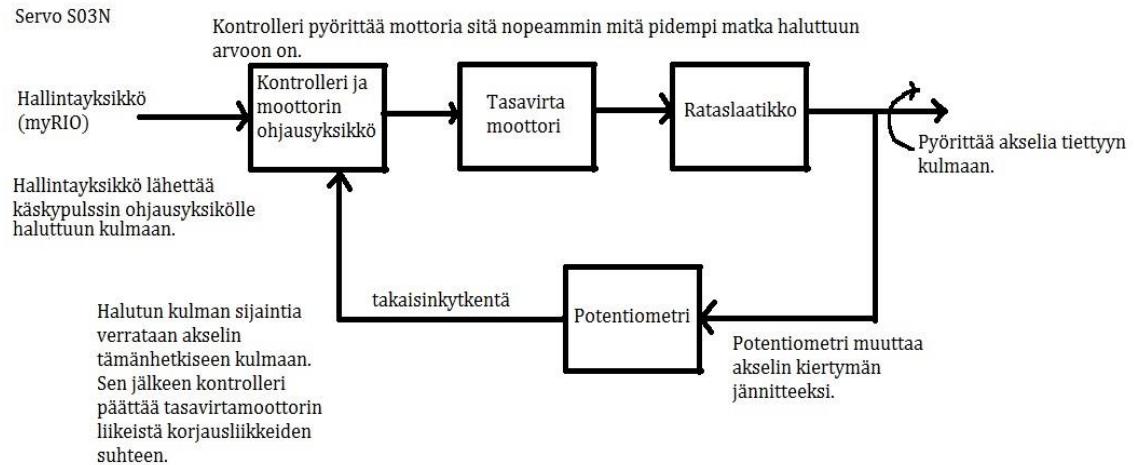
Servojärjestelmä eli servo on kierron kontrollointisysteemi. Moottori kääntää akselin haluttuun ohjelmoituun kulmaan. Sitä käytetään sovelluksissa, joissa moottorilta vaaditaan suurta momenttia raskaiden kohteiden ohjaamiseen. Servotekniikkaa käytetään toki myös pienten kappaleiden käsittelyyn. Tämän mahdollistaa moottorin rakenne, joka pysyy erittäin pieniin liikkeisiin. Servojärjestelmä perustuu niin sanottuun voimaa vahvistavaan tekniikkaan. Se tarkoittaa, että järjestelmän rattaisto on välityssuhteeltaan suuri, jolloin myös momentti on suuri ja kierrosnopeus pieni. Riippuen servojärjestelmän käyttötarkoituksesta ne nimetään yleisesti säädettävän suureen mukaisesti asema-, momentti-, nopeus- tai voimaservoksi. (Doering 2016.)

Takaisinkytkentä on servojärjestelmien erityinen ominaisuus. Tällä menetelmällä voidaan mitata lähtösuure, jota verrataan moottorin ohjauksesta tulevaan dataan. Järjestelmästä saadaan ulos tietoa erilaisilla työkaluilla. Potentiometriä tai pulssianturia käytetään tavallisesti aseman mittaamiseen, ja takogeneraattorilla saadaan selville nopeus. Takaisinkytkennän ideana on saada tietoa, jotta moottori voitaisiin säätää mahdollisimman tarkasti toimivaksi, vähin häiriöin. Tämä toteutuu, mikäli asetusarvo ja muokatut takaisinkytkennän arvot ovat yhtä suuret ja erosignaali on nolla. (Doering 2016.)

NI myRIO Mechatronics -pakkauksen mukana tulleissa pienissä servoissa tämä kaikki on toteutettu kontrollointi- ja moottorinohjauspiirillä. Ohjauspiiriä voi käyttää vain pienillä jännitteillä. Pakkauksen sisältämät servot perustuvat GWS S03N STD (Standardi) ja GWS S35+ -malleihin. Servomootoreilla on monia erilaisia käyttökohteita. Niitä käytetään muun muassa autojen rateissa. (Doering 2016.) Lisäksi esimerkiksi teollisuusrobotit, työstökoneiden akselit ja laserleikkauskoneet käyttävät servomootoria (Servomootorit AC).

GWS S03N:n jakaa sisäisesti kontrollointi- ja moottorin ohjauspiiri, jolloin voidaan jakaa servo etu- ja takaosaan. Takaosa, joka näkyy ensimmäisenä kun päälliskuori irrotetaan, koostuu tasavirtamoottorista sekä sen johdotuksesta. Jännitejohto on punainen ja musta johto on maadoitusjohto. Etuosasta löytyy kolmen rattaan rattaisto, josta löytyy myös akseli ja moottorin vetopyörä. Vetopyörän asentoa aistii voltteina potentiometri. (Doering 2016.)

Molempien servomoottorien sijainnin määrittäminen toimii pulssianturilla. Se lähettää 50 Hz:n välein uuden pulssin, välillä 1–2 ms. Mitä nopeampi pulssiväli on, sitä nopeammin ja enemmän servo voi kääntyä. Pulssi toimii 3–5 V jännitteellä. Käyttöjännite servolla on 4,8–6,0 V. Nopeus on 4,8 V:lla 0,23 s/60° ja vääntö 3,4 kg/cm, sekä 6,0 V:lla 0,18 s/60° ja vääntö 4,0 kg/cm. (Doering 2016.)



Kuvio 1. Servomoottorin toimintaperiaate

Servot S03N ja S35+ ovat muuten täysin samanlaisia, mutta S35+ on suunniteltu jatkuvaa pyörimisliikettä varten. Jatkuvan pyörimisliikkeen servomoottorissa (continuous rotation servo) ei ole takaisinkytkentää, muuten toimintaperiaate on lähes sama. Kuviossa yksi määritetään S03N:n toimintaperiaatetta. Moottori on aina oletuksellisesti neutraalissa tilassa, eli nolla-kulmassa, kunnes sille asettaa kulma-arvon. Annetaan käsky 50°, niin kontrolleri kääntää moottoria pyörimään ja löytämään kyseisen asteluvun. Ilman takaisinkytkentää kontrolleri luulee olevansa joka kierroksen jälkeen neutraalissa tilassa pyörittäen moottoria loputtomasti. Mitä suurempi kulma asetetaan, sitä kauempana kontrolleri luulee olevansa neutraaliarvosta. (Doering 2016.)

2.1.2 Tasavirtamoottori

DC-moottori eli tasavirtamoottori on yleinen ja erittäin kustannustehokas pyörimisliikkeen muodostamiseen. Kestomagnetisoitu moottori on DC-moottoreista yleisin, mutta alalajeja on muitakin. Moottorin toiminta perustuu yksinkertaisimmillaan päälle/pois-periaatteeseen. Moottori pyörii kelojen saadessa virtaa ja pysähtyy, kun virtaa ei tule. Pulssinleveysmoduloinnilla voidaan säätää tasavirtamoottorin pyörimisnopeutta. NI myRIO:n

oma DC-moottori on 19:1 hammasratasmoottori. (Doering 2016.) Tasavirtamoottoria käsitellen tarkemmin H-silta-osiossa.

2.2 Anturit

Rajakytkimet ja anturit toimivat tunnustellen järjestelmän tilaa. Tilan muuttuessa anturi lähettää impulssin ohjausjärjestelmälle, joka edelleen ohjaa toimintaa haluttuun suuntaan. Impulssi on yleensä sähköinen, mutta se voi syntyä myös esimerkiksi ilmapirrasta, jolloin sitä kutsutaan pneumaattiseksi impulssiksi. Toimilaitteen impulssiksi voidaan tarvita usean anturin tietoja. Järjestelmän tilaa kuvaavat muun muassa mekaaninen liike, lämpötila, voima, paine, teho ja sähkövirta. Rajakytkin ja anturi eroavat toisistaan toimintaperiaatteiltaan. Anturi reagoi yleensä sähköisten suureiden, kuten valonsäteen tai ilmanpaineen, muuttuessa. Rajakytkin puolestaan reagoi yleensä mekaaniseen kosketukseen. (Ansaharju 2009: 102.)

Koska NI myRIO -laitteessa ei käytetä kytkimiä, keskitytään tässä kappaleessa enimmäkseen antureiden toimintaan. Anturi voi toimintatapansa mukaan joko kytkeä tai sammuttaa ohjausvirran. Antureiden täytyy täyttää tietyt vaatimukset, jotta laitteisto toimisi oikein. Esimerkiksi tarkkuus, luotettavuus ja lujuus ovat tärkeitä kriteerejä. Lisäksi nopeus, herkkyys, ohjauskyky sekä helppo asennettavuus ja säädettävyys ovat tärkeitä ominaisuuksia toimivuuden kannalta. (Ansaharju 2009: 102.)

2.2.1 Lähestymisanturit ja -kytkimet

Lähestymisanturit ja -kytkimet reagoivat siihen kappaleen lähestyessä anturia. Lähestymisantureita ovat kapasitiivinen anturi, induktiivinen anturi, magneettianturi ja optinen anturi. Kapasitiivisessa anturissa tuntopinnan ympärille on muodostunut sähkökenttä. Mikä tahansa aine muuttaa impulssia lähestyessään sähkökenttää. Tässä on huomiotava erilaisten aineiden vaikutus säädettäessä kytkimen etäisyyttä aineesta. (Ansaharju 2009: 102.) Mitä suurempi dieletrisyysarvo kappaleella on, sitä kauempaa se pystytään tunnistamaan. Kapasitiivinen anturi pystyy tunnistamaan luotettavasti esimerkiksi metallia, puuta, muovia ja nesteitä. (Kapasitiiviset kytkevät anturit.)

Induktiivisessa anturissa sähkövirta muodostaa magneettisen kentän anturin tuntopinnan ympärille (Ansaharju 2009: 103). Induktiivinen anturi tunnistaa metalliset kappaleet, kuten raudan, alumiinin ja pronssin (Induktiivinen anturi). Metallisen esineen lähestyessä

kenttä vaimenee ja tämä saa anturin lähettämään signaalin eteenpäin. Magneettianturi on niin sanottu REED-kytkin, jonka magnetisoituva ferromagneettinen kosketinpari sijaitsee ilmativiissä kotelossa. Lähestyvä kestopagneetti magnetisoi kosketinparin, jonka kytkeytyessä anturi lähettää impulssin eteenpäin. Optisen anturin toiminta perustuu diodin (esimerkiksi LED) lähettämään valoon. Fototransistori toimii valon vastaanottimena eli virtaimpulssin kulku riippuu siitä, osuuko valo fototransistoriin. (Ansaharju 2009: 103.)

2.2.2 Paikoitusanturit

Paikoitusantureita ovat muun muassa lineaarisesti liikkuvat anturit ja pyörivät anturit. Nämä jaotellaan vielä analogisiin ja digitaalisiin antureihin. Analogisen anturin toiminta perustuu lähtöjännitteeseen, joka on verrannollinen siirtymään. Digitaaliset anturit ovat pulssi- tai koodiantureita. Pulssianturin muodostama pulssijono ja koodianturin tuottama digitaalisana pystytään muuttamaan lineaarisiirtymäksi. Analogisten antureiden käyttö on vähenemässä digitaalitekniikan yhä kehittyessä. (Keinänen ym. 2001: 186–187.)

Anturit voivat olla myös inkrementaali- tai absoluuttiantureita. Absoluuttianturi tunnistaa nollakohtansa eli niin sanotun kotiasemansa. Inkrementaalianturi puolestaan määrittää asemansa esimerkiksi laskurin avulla. Potentiometrianturi koostuu resistiivisestä vastuselementistä ja mittakärkeen kiinnitetystä liukukoskettimesta. Niitä käytetään tasa- ja vaihtojännitteellä, ja ne ovat helposti liitettävissä analogiakomponentteihin. Yksi potentiometrianturin käyttötarkoitus on työstökoneiden mittalaitteiden mitoitussauvat. (Keinänen ym. 2001: 187, 190.)

3 Mechatronics-pakkauksen lisäosat ja niiden käyttöönotto

NI myRIO mechatronics -pakkaus sisältää 6 erilaista anturia ja yhden modulaattorin. Käyn läpi jokaisen laitteen ominaisuudet, muutamia käyttötarkoituksia ja pintapuolisesti ohjelmoinnin. Mikäli laitteiden nimissä esiintyy sana "Pmod", se tarkoittaa, että komponentti liitetään myRIO:on Pmod-pinneillä. Kalibroinnissa käytän National Instruments:in LabVIEW -tietokoneohjelmaa, josta käyttäjä saa visuaalisen informaation laitteen toimivuudesta. Antureiden asetukset määritetään rekistereiden avulla, joita säädetään LabVIEW-ympäristössä. (myRIO Mechatronics Accessory Kit.)

3.1.1 Digitaalinen kompassi

NI myRIO:n Mechatronics-pakkauksen kompassi on PmodCMPS 3-axis Digital Compass. Se perustuu Honeywell:n HMC5883L piiriin. Kompassin käyttötarkoituksia ovat muun muassa navigointi, sillä se aistii maan magneettisen kentän sekä ilmansuunnat. On otettava huomioon napapiirien maantieteellisten ilmansuuntien kallistuskulmat. Komponenttia on mahdollista käyttää myös magneettisen kentän kartoituksessa. (3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.)

PmodCMPS 3-axis Digital Compass nimensä mukaisesti toimii kolmella tasolla (X, Y ja Z). Kun kompassipiiri asetetaan tasaiselle pinnalle, niin että tekstit ovat luettavissa oikeinpäin, ovat tasot niin ikään seuraavat: X-taso on piirilevystä oikealle, Y-taso eteenpäin ja Z-taso ylöspäin. Sen ominaisuuksiin kuuluu myös 12-bitin resoluutio eli käytännössä $2^{12} = 4096$ bittiä. Laite antaa valita $\pm 0,88$ – $\pm 8,1$ G eli gaussin väliltä magneettivuon tiheyden. Maan magneettinen kenttä on noin 0,3–0,7 G, eli laite on erittäin herkkä. Päivitystaajuuden voi valita 0,75–75 Hz:n väliltä. Tuotteen käyttöohjeen mukaan myös 160 Hz:n taajuus on mahdollinen, mutta LabVIEW:ssa valitsemalla päivitystaajuuden yli 120 Hz:n ohjelma kaatui. Laitteesta löytyy myös I²C-väylä, joka kommunikoi esimerkiksi LabVIEW:n kanssa kertoen tietoja kiinnitetystä laitteesta. Se toimii heksadesimaaliosoitteessa 0x1E ja nopeuksilla 100 kbit/s (standardinopeus) tai 400 kbit/s (pikanopeus). Laite toimii 2,16–3,6 V jännitteellä. (3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.)

On hyvä tietää kompassin toiminnasta hieman ennen siihen syventymistä ja ennen datan keräämistä. Mikäli kompassi on maapallon inkliinaatiokulmaan nähden yhdensuuntainen, Z saa negatiivisen maksimiarvonsa, tässä tapauksessa X ja Y saivat arvon nolla. Kun

sensori on yhdensuuntainen maahan nähden, Z:n arvo on vielä korkea. Y ei liiku minnekään, joten se on vieläkin nolla, mutta X:n arvo muuttuu. X-akselin maksimiarvo osoittaa suoraan magneettiseen pohjoiseen. (3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.)

Ymmärtääkseen kuinka kompassi toimii, käytetään apuna kolmijalkaista kamerajalustaa, johon komponentti kiinnitetään. Tämä mahdollistaa tasaisen mittaustuloksen. Siirrytään LabVIEW:n pariin, jossa kompassin lähettämä data siirtyy diagrammiin. Siinä näkyy X:n, Y:n ja Z:n arvot ajalta, kun kamerajalustaa pyöräytetään tasaisella nopeudella Z-akselin ympäri 360° ja takaisin. Kerätään diagrammiin siirtyvä data, josta lasketaan X:n ja Y:n minimi- ja maksimiarvot muodostuneista sin-aalloista. Z:n arvoa ei lasketa, sillä sen arvo kuuluisi pysyä muuttumattomana. Seuraavaksi lasketaan keskiarvot $(X_{\max}+X_{\min})/2$ ja $(Y_{\max}+Y_{\min})/2$. Tämän jälkeen vähennetään X:n ja Y:n keskiarvo mitatuista X- ja Y-arvoista. Näiden arvojen perusteella voidaan laskea deklinaatiokulma. Deklinaation itäisellä puolella kulmaksi tulee positiivinen ja läntisellä negatiivinen. Seuraavaksi lisätään deklinaatiokulman korjaus. Tämä riippuu, missä päin maapalloa sijaitsee.

Laitteella on kolme asetusaluetta, joissa on mahdollista tehdä muutoksia: Configuration register A (0x00), configuration register B (0x01) ja mode register (0x02). Heksadesimaali osoitteesta 0x00, eli rekisteri A:sta, löytyy bitit 0, MA₁, MA₀, DO₂, DO₁, DO₀, MS₁ ja MS₀. Suluissa on asetuksen bittikoodi, jolla asetukset valitaan. MA₁ ja MA₀ käsittelevät, kuinka monta otosta laite kerää per ulostulo. Vaihtoehdot ovat 1 (00), 2 (01), 4 (10) ja 8 (11) otosta. DO₂, DO₁ ja DO₀ käsittelevät datan ulostulon taajuutta. Tässä valitaan taajuus 0,75 Hz (000) - 75 Hz (110) väliltä. MS₁ ja MS₀ ovat mittaustavan valintaa varten. 00:lla valitaan normaali mittaus menetelmä ja 01:llä tai 10:lla valitaan oma testi. Ensimmäinen bitti nolla on harmaa bitti, jonka tulee olla aina 0. On suotavaa ottaa vain yhtä otosta per ulostulo (00). Taajuuden kannattaa olla kohtuullinen, esimerkiksi 15 Hz (100), niin pystyy seuraamaan muutosta, eikä data päivity liian nopeasti. Lopuksi valitaan mittaustasetukseksi normaalitesti (00). Tällöin bittikenttä on 0 00 100 00, eli lyhyesti HEX 10. Heksadesimaalista HEX 01 eli rekisteri B:stä löytyvät bitit GN₂, GN₁, GN₀, 0, 0, 0, 0 ja 0. GN₂, GN₁ ja GN₀ bitit käsittelevät toimintaväliä. 1370 LSB/G (000)–230 LSB/G (111). Jos halutaan arvon gausseina, tulee jakaa ulostulosta saatu data paunoilla. Loput bitit ovat nollia eli harmaita bittejä, tällöin niihin tulee merkitä vain nolliat, jotta asetukset toimii. Suurinta tarkkuutta käytettäessä, eli 1370 LSB/G, tuli tarkin arvo. Tällöin bittikentässä on pelkkiä nollia eli 0x00.

Viimeiseksi on HEX 02 eli mode register. Tämän bitit ovat HS, 0, 0, 0, 0, 0, MD₁ ja MD₀. HS tarkoittaa High speed -moodia eli tässä tapauksessa I²C-moodia. Nollat ovat harmaita eikä niitä kannata muuten huomioida kuin jättämällä ne nolliksi. MD₁ ja MD₀ määrittävät datan keruun. Vaihtoehdot ovat continuous (00), single (01) ja idle (1x). Continuous eli jatkuva tila pitää laitteen laskemassa jatkuvasti. Single-tila puolestaan ottaa vain yhden otoksen ja menee sen jälkeen toimeentomaan eli idle-tilaan. Tällöin laite pysyy valmiustilassa, muttei tee mitään. I²C:tä en suosittele pitämään päällä, sillä ohjelmisto tuntui kaatuvan useammin, ja jatkuva otos on ainoa keino saada dataa kunnolla ulos, eli bittikartaksi asetetaan HEX 00. Continuous-tilassa on käytettävä ”DRDY” eli data ready -pinniä. Luetaan samasta väylästä kaikki kuusi bittiä tässä järjestyksessä, eli X MSB, X LSB, Z MSB, Z LSB, Y MSB, Y LSB – huomioidaan, että Z ja Y ovat eri järjestyksessä. Liitetään kaikkien ylä- ja alarajat 16 bitin merkitylle kokonaisluvulle (signed integer). Signeerattua kokonaislukua on käytettävä, koska data on i16-muotoa. Näiden jälkeen tehdään edellä mainitut korjaukset deklinaation suhteen, jolloin X-akseli osoittaa todelliseen pohjoiseen.

3.1.2 Digitaalinen kiihtyvyyssanturi

Ni myRIO -pakkauksen kiihtyvyyssanturi on Digilentin PmodACL. Se perustuu Analog Devices:in ADLX345 Digital Accelerometeriin. (Digital Accelerometer.) Kiihtyvyyssanturin toimintaperiaate perustuu $F = ma$ kaavaan, jossa F on voima (N), m on massa (kg) ja a on kiihtyvyys ($\frac{m}{s^2}$). Komponentissa on kiinnitettynä neljällä kiinnikkeellä seisminen massa. Näihin kiinnikkeisiin kohdistuu voimaa massan kiihtyessä. Kun tietää massan ja voiman, anturi laskee kiihtyvyyden kaavasta $a = \frac{F}{m}$.

Kiihtyvyyssanturia käytetään staattisen eli jatkuvan ja dynaamisen kiihtyvyyden mittaamisessa. Staattisissa käyttötarkoituksissa sensoria käytetään muun muassa pudotus-, suuntaus-, taso- ja kallistumasensorina. Dynaamiset käyttötarkoitukset ovat esimerkiksi liike-, isku- ja värinäsensori. (Doering 2016.)

ADLX345:n ominaisuuksiin kuuluu 10 - 13 bitin resoluutio ja neljä g-voiman etäisyysalueita ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g ja ± 16 g. Tällöin huippu ylä- ja ala-arvon väli on 32 g, joten tarkkuus on maksimissaan $32 \text{ g} \div 2^{13} = 3,906$ milligravitaatiota per LSB. Laite on 3-akselinen eli J1-pinnien osoittaessa vasemmalle X-akseli osoittaa oikealle, Y-akseli eteenpäin ja Z-akseli ulos piirilevystä. Taajuus alueita on 16 erilaista 0,1 Hz:n ja 3200 Hz:n välillä. Voi

valita I²C:n tai SPI:n väliltä kumman kautta laite kommunikoi. Laitteen heksadesimaali ID on 1D ja käyttöliittymän datanopeus on normaali nopeudessa 100 kbit/s ja pikanopeudessa 400kbit/s. Käyttöohjeiden mukaan laite tunnistaa erilaisia skenaarioita, esimerkiksi vapaapudotuksen, onko laite käytössä vai ei. Komponentista löytyy kaksoiskeskeytyspinnit. Käyttöjännite on 2,0 - 3,6 V. (Digital Accelerometer.)

Komponentin kalibroinnissa on ominaispiirteitä, joita on hyvä tietää. Ensiksi huomaa, että lähes kaikki laitteen asetukset siirtyvät nollatilaan eli oletusasetuksille virran katkaisun jälkeen. Päivitystaajuus jää laitteen muistiin, mutta lähes kaikki muut asetukset nollaan-tuvat. Mitä nopeampi päivitystaajuus, sitä tarkemmin nopeat pienet liikkeet erottuvat kiihtyvyyden vaihteluina. Toiseksi, rekistereiden avaaminen välillä 0x01 - 0x1C ei ole suotavaa, ne on varattu valmistuksen testausta ja kalibrointia varten. (Digital Accelerometer.)

Seuraavaksi esitellään mittausskenaario LabVIEW'illa, jossa valitaan komponentille mit-tausta varten asetukset. Asetetaan päivitystaajuudeksi 400 Hz, sillä halutaan tarkkailla kiihtyvyyden tasaisuutta. Valitaan mittaussväliksi ± 8 g ja ulostulon resoluutioksi täydet 13 bittiä. Ei kosketa I²C:n, eikä INT₁ tai INT₂ datan siirtoon vaan pidetään ne vakiona. Va-kioasetus keskeytyspinneille on aktiivinen yläraja (Active high). Keskeytys käynnistyy, kun kiihtyvyys menee alle alarajan. Asetetaan kertanapautuksen (single-tap) asetus INT₂:lle ja vain x-akselille, eli havaitsemaan ensimmäisen kiihtyvyyden lopusta seuraavaan kiihtyvyyden alkuun. Alarajaksi asetetaan 3 g ja keskeytyksen maksimikestoksi 10ms. INT₁:lle luodaan data-valmis (DATA READY) -toiminto. Tarkoituksena on ottaa mittauksia ja kertanapautuksia.

Valitaan aluksi rekisteristä BW_RATE ne bitit, jotta saan 400 Hz:n päivitystaajuus kom-ponentille. Normaali 100 Hz:n taajuus on bittikartassa 0001010 ja 400 Hz on 0001100. Biteillä b₃, b₂, b₁ ja b₀ vaikutetaan päivitystaajuuteen. Seuraavaksi valitaan kiihtyvyyden mittaussväliksi ± 8 g ja 13 bitin resoluution DATA_FORMAT rekisteristä. Bitti b₃ mahdol-listaa täyden 13 bitin resoluution. Bitit b₁ ja b₀ vaikuttavat mittaussväliin, joka saadaan aikaiseksi jättämällä b₁ nolaksi ja b₀ ykköseksi. ± 8 g:n väli ja resoluutio saavutetaan siis biteillä 0001010. Bitti b₆:lla valitaan SPI:n ja I²C. Nolla on I²C, jota tullaan käyttämään.

Seuraavaksi asetetaan kertanapautuksen (single-tap) havaitseminen X-akselille. Aluksi mennään rekisteriin THRESH_TAP (0x1D), joka on niin sanottu etumerkitön kokonais-luku (unsigned integer). Tämä tarkoittaa, että arvo joudutaan sijoittamaan suoraan ilman

bittikarttaa. Kaavasta $\frac{T}{16\text{ g}} * 256$ joudutaan laskemaan THRESH_TAP:lle arvo, joka myöhemmin muutetaan heksadesimaali muotoon. T on alaraja, joka halutaan olevan 3 g. Sijoitetaan 3 g kaavaan $\frac{T}{16\text{ g}} * 256$, jolloin saadaan tulokseksi 48 eli HEX 30 (0x30). Hyvä vinkki tähän on, että valitsee sitten minkä tahansa g arvon, voi sen laittaa suoraan heksadesimaalin jälkeen, jonka jälkeen lisätään nolla perään. Esimerkiksi 6 g olisi 0x60 ja 8 g on 0x80. Samalla valitaan keskeytyksen maksimikesto rekisteristä DUR (0x21), jolle ei myöskään löydy omaa bittikenttää. Sijoitetaan 10 ms kaavaan $\frac{D}{160\text{ ms}} * 256$, jossa D on 10 ms ja josta tulee tulokseksi 16 eli HEX 10 (0x10). Kertanapautus X-akselille tehdään rekisteristä TAP_AXES (0x2A). Tässä rekisterissä kolme viimeistä bittiä ovat järjestyksessä TAP_X, TAP_Y ja TAP_Z, eli karttaan laitetaan siis 00000100 (0x04).

Tämän jälkeen generoidaan keskeytys INT₁:n ja INT₂:n kautta. Se tapahtuu INT_SOURCE (0x30) vain luku (read only) rekisterissä. Tästä rekisteristä asetetaan itse kertanapautus b₆:sta (0x40). Huomaa, että INT_SOURCE rekisterissä b₇ (DATA READY), b₁ (WATER_MARK) ja b₀ (OVER_RUN) ovat aina päällä, mutta vain suora luvussa (read directly). Jos näihin bitteihin laitetaan ykköset, saadaan ne näkyviin myös ulostulossa. Mikäli halutaan luku- ja kirjoitusmahdollisuus, (read and write) on käytettävä rekisteriä INT_MAP (0x2F), jossa kertanapautus (single-tap) on samassa paikassa b₆. DATA_READY -bitti on b₇, joka jätetään nolllaksi. Se mahdollistaa pääsyn INT₁:n kautta. Lopuksi sallitaan keskeytykset pinnille. Se tapahtuu rekisterissä INT_ENABLE (0x2E), jossa aktivoidaan bitit b₇:n (DATA READY) ja b₆:n (SINGLE TAP), eli bitti kuvioksi tulee 11000000 (0xC0).

Seuraavaksi käydään läpi mittauksien toteuttaminen. Laite on oletuksellisesti aina lepotilassa, niinpä se on asetettava mittaustilaan. Se tehdään rekisterissä POWER_CTL (0x2D). Tässä bittikartassa b₃ on mittausta, joka pitää laittaa ykköseksi. Rekisteriin kirjoitetaan siis 0x08 (00001000). Tämän jälkeen odotetaan, että INT₁ (DATA_READY) muuttuu aktiiviseksi. Kirjoitetaan DATA_X0 rekisteriin osoite 0x32, sillä tarkastellaan vain X-akselia. Tämä välivaihe löytyy data-arkista (datasheet). Seuraavaksi luetaan kuusi bittiä samasta tapahtumasta I²C-väylästä, eli järjestyksessä DATA_X0, DATA_X1, DATA_Y0, DATA_Y1, DATA_Z0, DATA_Z1. Datan luku tyhjentää DATA_READY -keskeytyksen. DATA_n0, on vähiten merkitsevä bitti (least significant bit) ja DATA_n1 on eniten merkitsevä bitti. Yhdistetään nämä bitit 16 bitin merkitylle kokonaisluvulle (signed integer), vaikka vain 13 bitillä on merkitystä. Konvertoidaan data $\frac{DATA_n}{256} * 1\text{ g} = A_n$, josta saadaan data g arvona

X, Y tai Z suuntaan. Enää vain odotetaan aktiivisuutta INT₂-pinniltä, jotta saadaan tarkastella napautuksia. On muistettava liittää rekisteri INT_SOURCE (0x30) lukemaan SINGLE_TAP-keskeytys, jotta se nollautuu.

3.1.3 Digitaalinen gyroskooppi

NI myRIO:n gyroskooppi Mechatronics-pakkauksessa on nimeltään Digilent Pmod-GYRO. Se perustuu STMicroelectronics:n L3G4200D 3-Axis Gyroscopeseen. L3G4200D:n toimintaperiaate perustuu kulmanopeuden havaitsemiseen akselin ympärillä. Kyseisessä komponentissa on X-, Y- ja Z- akselit. Kun sensori kiertää vastapäivään tietyn akselin ympäri, antaa se sen positiivisia arvoja. Kiertoliike rekisteröi siis tietyn arvon, ja integroimalla tämä saadaan kulman siirtymä. Tästä saadaan tietoon myös suunta. Gyroskoopit ovat herkkiä kierrolle mutta epäherkkiä lineaariselle liikkeelle sekä suhteellisen heikkoja iskuille ja värinälle. (MEMS motion sensor.) Gyroskooppeja käytetään laitteissa, jotka lentävät, esimerkiksi lentokoneissa, joissa on tärkeää havaita keinuuko, kääntyykö tai pyöriikö kone (Doering 2016).

Perehdytään tarkemmin L3G4200D:n ominaisuuksiin. Komponentissa on siis X-, Y- ja Z- akselit, jotka on sijoitettu niin, että X-akseli on liitäntä pinneistä poispäin, Y-akseli eteenpäin ja Z-akseli suoraan ylöspäin komponentista. Jokaisella akselilla on 16-bitin resoluutio, joka on LabVIEW:ssa tarjolla merkityllä kokonaisluvulla (signed integer). Laite tukee kolmea tarkkuusväliä: 250 dps, 500 dps ja 2000 dps eli astetta per sekunti (degrees per second). Ulostulonopeuksia on neljää erilaista: 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz ja 800 Hz. Passiivisena ominaisuutena komponentista löytyy 32-tasoinen FIFO (First in First out). FIFO on datan tallennuksessa käytettävä puskuri, jolla vähennetään päälaitteen prosessointia. Se myös vähentää yleisesti virrankulutusta. Keskeytyksiä voidaan generoida raja-arvoilla, FIFO:lla sekä fyysisillä kaksinkertaisilla keskeytysulostulopinneillä. Laitteessa on kahdeksanbittinen lämpötila-olostulo, ja mahdollisuus alaläpäisy- (low pass) ja yläläpäisy-suodatukseen (high pass). I²C ja SPI ovat tuettuja, joissa on 100 kb/ps ja 400 kb/ps tilat. Laitteen osoitteet ovat 0x68 tai 0x69, jossa jälkimmäisestä saa suoraan vähiten merkityksellisen bitin datan. Käyttöjännite (V_{DD}) on 2,4–3,6 V. (MEMS motion sensor.)

Tarkastellaan PmodGYRO:n tärkeimmät pinnit, jotka ovat kahdessa pääliittimessä. J2-liittimessä on ylhäältä alaspäin katsottuna SCL- ja SDA-pinnit, jotka ovat I²C pinnejä, seuraavaksi tulevat maan (GND) ja virta (V_{CC}) -pinnit. On muistettava, että kaikki pinnit

ovat pareja ja niistä tulee sama signaali. J1-liittimessä, jota tarkastellaan komponentin sivusta ylhäältä alaspäin, pinnit ovat komponentin vasemmalla sivulla. Vasemmalla päällimmäisenä oleva ensimmäinen pinni on CS-pinni, joka jätetään irralliseksi, kun käytetään I²C:tä. Sen vasemmalla puoleinen pinni on INT₁, jossa on ohjelmoitava keskeytys. INT₂ -pinni on heti seuraavaksi sen alla, jossa on DATA READY -tila. Toiseksi alimmat pinnit, ovat maadoituspari sekä alimmat kaksi ovat virtapinnejä (V_{CC}). (MEMS motion sensor.)

Käydään läpi gyroskoopin muutamia ohjelmallisia rekistereitä. Tehdään laitteella konfiguraatioesimerkki, jossa käydään rekisterit lävitse. Huomioithan, ettei avata rekistereitä välillä 0x00 - 0x0E ja 0x10 - 0x1F, sillä ne ovat varattuja valmistajan kalibrointia ja testausta varten. Näihin rekistereihin kirjoittaminen voi tehdä pysyvää vahinkoa laitteelle. Valitaan 500 dps (degrees per second eli astetta per sekunti) herkkyys. Generoidaan keskeytys INT₁:lle, kun X-akselin taso ylittää 8192 LSB:in (least significant bit) käyttäen niin sanottua komparaattori moodia. Seuraavaksi generoidaan DATAREADY -keskeytykselle INT₂:lle. Datan päivitystaajuudeksi valitaan 200 Hz, ja hyväksytään kaikki mittaukset kaikilla akseleilla. (MEMS motion sensor.)

Aloitetaan valitsemalla 500 dps:n herkkyys rekisteristä CTRL_REG4 (0x23). Bittikentässä b₅:ssä ja b₄:ssä, eli FS1:llä ja FS0:lla valitaan herkkyys 250 dps (oletus), 500 dps ja 2000 dps väliltä. Haluttu 500 dps:n nopeus saadaan aktivoimalla bitti FS0:ssa, eli 00010000 bittikentän heksadesimaali on 0x10. Seuraavaksi generoidaan keskeytykset INT₁ ja INT₂. Näiden molempien konfigurointiin tarvitsee käydä läpi kolme eri rekisteriä. Valitaan rekisteri INT_THS_XH, joka vastaa X-akselin yläarvosta. Tähän rekisteriin kirjoitetaan 8192 LSB:n (least significant bit) heksadesimaaliarvo, joka lasketaan $\frac{8192}{256} = 32 \rightarrow 0x20$. Siirrytään rekisteriin INT1_CFG (0x30), jossa sallitaan yläkynnysarvo laittamalla XHIE-bitti ykköseksi. Samasta rekisteristä löytyy myös komparaattorimoodi eli (b₆) LIR-bitti (latch interrupt request), joka on päällä asetusarvollisesti, vaikka bitti on nolla. Tämän rekisterin heksadesimaaliksi tulee 0x02. Tämän jälkeen sallimme itse keskeytykset rekisteristä CTRL_REG3 (0x22). Bitti b₇ (I1.Int1) aktivoi INT₁:n ja b₃ (I2.DRDY) aktivoi DATAREADY -toiminnon. Nämä molemmat bitit muutetaan ykkösiksi, ja bittikentäksi tulee tällöin 10001000 (0x88).

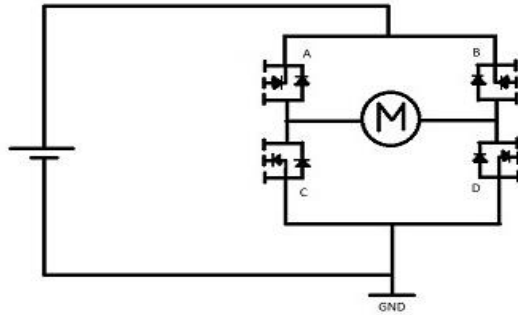
Seuraavaksi asetetaan rekisterissä CTRL_REG1 (0x20) 200 Hz:n datan päivitysnopeus ja sallitaan mittaukset kaikissa akseleissa. Tässä rekisterissä on oletuksellisesti kolme viimeistä bittikentän bittiä ykkösenä. Nämä viimeiset bitit aktivoivat X-, Y- ja Z- akselit.

Bitit b_7 (DR1) ja b_6 (DR0) hallinnoivat päivitystaajuutta. Oletukseltaan päivitysnopeus on 100 Hz, ja 200 Hz:ksi se saadaan muuttamalla b_6 nolasta ykköseksi. Jotta saadaan mittaus aikaiseksi kaikilla akseleilla (X, Y ja Z) samanaikaisesti, on hyväksyttävä aktiivinen mittausasetus päälle. Se on b_3 :ssa (PD) eli nolla oletuksella virta alas (power down) -asetus ja ykkösellä aktiivinen mittausasetus. Bittikentästä tulee tällöin kaikki bitit yhdessä 01001111 (0x4F).

Jotta saadaan mittaustuloksia ulos laitteesta, on odotettava INT₂:n aktivoitumista DRDY -pinniltä. Seuraavaksi kirjoitetaan ensimmäisen ulostulorekisterin osoite, jossa sen merkittävin bitti (MSB) asetetaan sallimaan auto-indeksointi (auto-indexing). Auto-indeksointi mahdollistaa monibittiluvun tai -kirjotuksen. Akseleiden rekistereitä ovat järjestyksessä OUT_X_L (0x28), OUT_X_H (0x29), OUT_Y_L (0x2A), OUT_Y_H (0x2B), OUT_Z_L (0x2C) ja OUT_Z_H (0x2D), jossa L (low) tarkoittaa alinta bittiä ja H (high) ylintä bittiä. Dataa halutaan kaikista kuudesta ulostulosta. Täten OUT_X_L:n binäärikoodiin on tehtävä muutos, jotta ohjelma ymmärtää aloittaa auto-indeksoinnin. Rekisterin binäärikoodi on 00101000 (0x28). Haluamme auto-indeksoinnin alkavan tästä, joten muutetaan ensimmäinen nolla ykköseksi, joten koodiksi tulee 10101000 (0xA8). Tämä kirjoitetaan 0x28 rekisterin tilalle. Se mahdollistaa, että kuusi bittiä luetaan samasta I²C-väylästä edellä mainitussa rekistereiden järjestyksessä. Rekisterin alin ja ylin arvo muodostetaan yhtenäiseksi 16 bitin kokonaisluvuksi (integer), joita tulee siis kolme. Ulostulevan datan yksikkö on LSB (least significant bit), joka halutaan muuttaa dps-yksiköksi, eli astetta per sekunti (degrees per second). Manuaalin mukaan 500 dps:n herkkyyttä käytettäessä kerrotaan ulostuleva data (LSB) $17,50 \times 10^{-3} \frac{dps}{LSB}$:lla.

3.1.4 H-Silta

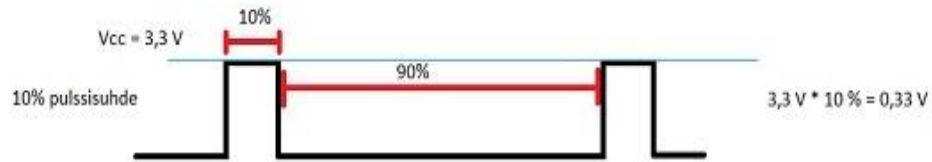
Digilent'in PmodHB5 on 2 A H-silta, joka on tarkoitettu käytettäväksi pienien ja keski-suurten tasavirtamoottoreiden kanssa. PmodHB5:ssä on liitin, joka käy suoraan Mechatronics-pakkauksen mukana tulleeeseen tasavirtamoottoriin. Piiriä käytetään moottorin kontrollerina. Sillä voidaan muuttaa moottorin pyörimissuuntaa ja -nopeutta. Moottoreiden suunnanvaihdossa tätä samaa toimintaperiaatetta käytetään muun muassa sähköporakoneista ja sähköautoihin, ja monissa samankaltaisissa tapauksissa. (Doering 2016.)



Kuvio 2. H-sillan kytkentäkaavio.

H-sillan toimintaperiaate yksinkertaisesti selitettynä on neljän transistorin aikaansaannos. Kuvassa A, B, C ja D ovat transistoreita, M on moottori ja GND maadoitus. Aluksi kytketään pois transistorit B ja C, ja laitetaan sähkövirta kulkemaan transistorin A läpi moottorille, josta se jatkaa D:n läpi maahan (GND). Sovitaan, että tällöin moottori pyörii myötäpäivään. Se saadaan pyörimään vastapäivään vaihtamalla sähkövirran suuntaa. Virran suunta vaihdetaan laittamalla sähkövirta kulkemaan transistorin B läpi moottorille, josta se taas jatkaa C:n läpi maahan. Mikäli kaikki transistorit ovat kytkettynä, tulee sähkövirrasta liian suuri. Se tuhoaa transistorit, polttaa johdot ja tekee vahinkoa moottorille. PmodHB5:ssä on sama periaate. Suunta-pinni (Direction pin) on ohjelmoitava kytkin, ja jos sallipinniltä (Enable pin) tulee jännitettä suunnan vaihdon aikana, se tuottaa oikosulun komponentissa. (Doering 2016.)

Ohjelmointi on PmodHB5:lle yksinkertainen. Valitaan aluksi staattinen pyörimissuunta. Suunta-pinnille tuleva jännite-ero määrittää pyörimissuunnan; alhainen jännite taaksepäin ja korkea eteenpäin. Moottorin pyörimisnopeutta on mahdollista säätää, pulssin leveysmodulaattorilla (PWM). Kyseisellä ominaisuudella manipuloidaan moottorille tulevan jännitteen pulssin leveyttä, eli niin sanottua pulssisuhdetta (duty cycle). Yksi pulssisuhde täydellä 100 % käytöllä on 3,3 V. Tällöin virtalähde antaa tasaisen jännitesyötön moottorille. PWM:n avulla voidaan tauottaa jännitteen syöttö moottorille. Esimerkiksi kymmenen prosentin pulssisuhde tarkoittaisi, että moottori saisi $3,3\text{ V} \times 10\% = 0,33\text{ V}$ koko pulssisuhteen ajalta. Moottori saa 3,3 V mutta vain 10 % koko pulssisuhteen aikana, loput 90 % jännitteen syöttö on nollassa, eli moottori on käytännössä pois päältä. Pulssin taajuus on kuitenkin pidettävä niin suurena, ettei moottorin pyöriminen pysähtele vaan pysyy tasaisena ja jotta sitä voidaan ohjata digitaalisella logiikalla. (PmodHB5 Reference Manual.)

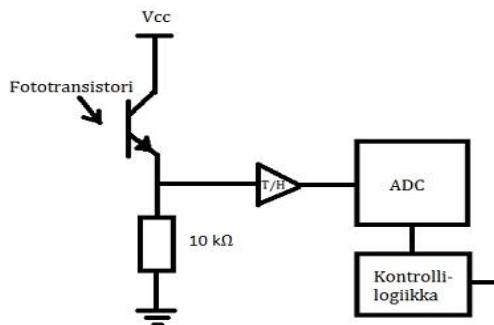


Kuvio 3. H-sillan pulssin leveysmodulaatio kymmenen prosentin jännitesyötöllä

Tätä piiriä voidaan käyttää jopa 12-volttien moottoreiden kanssa. PmodHB5:n kanssa käytettävän ulkopuolisen virtalähteen tulee olla 2,7–5.25 V välillä, on kuitenkin suositeltavaa, että H-siltaa käytetään 3,3 V jännitteellä. Referenssimanuaalissa käytetään 2 kHz taajuutta pulssin laajennusmoduulia käytettäessä. (PmodHB5 Reference Manual.)

3.1.5 Ympäröivän valon sensori

Digilent PmodALS on Mechatronics-pakkauksen sisältämä ympäröivän valon sensori. Se perustuu Vishay Semiconductorsin TEMT6000X01-fototransistoriin ja Texas Instrumentsin ADC081S021-analogi-/digitaalimuuntimeen. Sensoria käytetään yleisesti havaitsemaan valaistusolosuhteita. Sillä voidaan myös jäljittää ja seurata valon lähdettä. (PmodALS Reference Manual.)



Kuvio 4. Ympäröivän valon sensorin kytkentäkaavio

Kuvassa on PmodALS:n toimintaperiaate. Fototransistori saa käyttöjännitteen suoraan, joten silloin jännite on suurempi valoisassa ja pienempi pimeässä ympäristössä. Jos vastus ja fototransistori vaihtaisivat paikkoja, niin jännite olisi valoisassa pieni ja pimeässä suuri. Analogia-digitaalimuuntimen sisällä on havaitse ja pidä (Track & Hold) -laite, joka joko vain havaitsee analogisen jännitteen tai pitää sen halutussa tasossa. Kyseinen analogia-digitaalimuunnin on niin sanottu peräkkäisten likiarvojen (successive approximation converter) muunnin, joka antaa sen tulokset 8-bitin otoksissa. Piiristä löytyy myös sisäänrakennettu kontrollilogiikka ja SPI, joka syöttää datan NI MyRIO:lle. (PmodALS Reference Manual.)

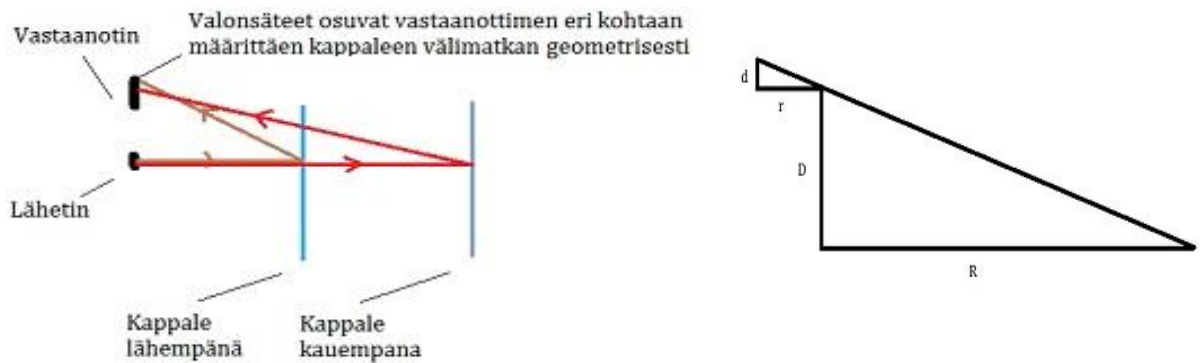
PmodALS:n ominaisuuksiin kuuluu siis 8-bitin resoluutioinen analogia-digitaalimuunnin, joka muuttaa jännitteen muutoksen valoisuuden arvoksi asteikolla 0–255, missä 0 on pimeä ja 255 kirkas. Sensori voi ottaa jopa miljoona otosta per sekunti. Piirille voi antaa 2,7–5,25 V käyttöjännitettä, vaikkakin 3,3 V suositellaan käytettäväksi. Sen SPI toimii 25 kHz–20 MHz taajuuksilla, myRIO toimii vain 40 Hz–4 MHz, joten on löydettävä oikea toimintaväli datan siirrolle. Analogia-digitaalimuuntimen taattu suorituskyky on 50000–200000 otosta sekunnissa SPI:n ollessa 1–4 Mhz. Tarkkoja tuloksia saadaan myös alhaisemilla taajuuksilla. (PmodALS Reference Manual.)

Tehdään yksinkertainen ohjelma LabVIEW:ssa arvojen tarkastelua varten. Aluksi soviteetaan while-kierto, jonka raamien sisään tehdään lohkokaaavio. Kiinnitetään sensori myRIO:n B-porttiin, digitaaliulostuloportti nollaan (pinni 11). Digitaaliulostulolohkoon kiinnitetään epätosi -vakion (F). Lohkon virhe ulos (error out) -sarake kiinnitetään SPI-lohkon virhe sisään -sarakeeseen. Tehdään SPI-lohko, joka lukee 16 bitin arvoja. SPI-lohkoa tuplaklikkaamalla saadaan esiin asetukset. On tarkistettava, että valitaan sama kanava kuin portti, eli B-kanava. Asetetaan sensori vain luku-tilaan, koska tässä esimerkissä ei kerätä dataa. Sensorin lukutaajuudeksi laitetaan 1 MHz. Nämä ovat oletusarvoja ja tässä esimerkissä niitä ei tulla muuttamaan. Ainoat muutokset tehdään edistyneissä asetuksissa (advanced options), jossa asetetaan kellojakso (clock phase) jäljittämään (trailing) ja kello polariteetti korkealle (high). SPI-lohkosta siirrytään tekemään datan lukua (frames read) 16 bitin etumerkittömällä kokonaisluvulla (unsigned integer). Aluksi kiinnitetään SPI "Index-array"-lohkoon, joka ottaa lohkoista yksittäisen arvon. Edellisen lohkon perään kiinnitetään looginen vaihto (Logical Shift), joka niin sanotusti erottelee asiaan kuulumattomat bitit. Tämä yhdistetään "unsigned Byte integer" -lohkoon, joka muuntaa 16 bitin arvon 8 bitin arvoksi, jotta analogia-digitaalimuunnin ymmärtää datan. SPI:n virhe ulos -sarakeeseen yhdistetään digitaaliulostulon virhe sisään -sarakeeseen. Tämä on sama digitaaliulostulo pinniltä 11 kuin aluksi, mutta nimeksi asetetaan "ulostulo2" ja epätosi -vakion tilalle laitetaan tosi-vakion. Ulostulo2:n virhe ulos -sarake kiinnitetään riko kierto (break loop) -lohkoon, joka keskeyttää kierron vian tapahtuessa tai painiketta ESC-painikkeella, sekä jälleen while-kiertoon. While-kierto kiinnitetään yksinkertaiseen vikojen käsittelijään (Simple Error Handler) ja nollaukseen (Reset). While-kierto asetetaan kymmenen hertsin näytteenotolle.

3.1.6 Infrapunaetäisyysensori

Digilent'in infrapunaetäisyysensori perustuu SHARP'in GP2Y0A21YK0F-malliin. Infrapunasensoria käytetään enimmäkseen etäisyyden mittaamiseen, mutta sitä käytetään myös rajakytkimenä ja läheisyysensorina. Sensorin muodostuu infrapunalähtimestä (ulkonevampi) ja vastaanottimesta (sisempi). Sen toimintasäde on 10–80 cm. Analogiulostulon tyypillinen jännite on 2,3 V (10 cm) –0,4 V (80 cm). Jännite on suurimmillaan kymmenen sentin läheisyydessä ja pienimmillään maksimietäisyydellä. Käyttöjännite on 4,5–5,5 V, jossa on noin 30 mA:n virta. Mittausaika on $38,3 \pm 9,6$ ms, ja 5 ms:n viive ulostulojännitteen päivityksessä. Digilentin mallissa on mukana liitinkaapeli, joka kiinnittyy JST-kiinnityksellä sensoriin. Toisessa päässä on Futaba-tyyppinen liitin, jota ei suo-

raan voi kiinnittää myRIO:on, mutta siihen on hyvä liittää erilliset johdot, joka mahdollistaa kiinnittämisen. Kaapelissa on myös sarjakytketty diodi suojaamaan väärinkytkenältä. Kaapelin johdot ovat irralliset ja merkitty värein. Keltainen on signaalijohto (V_0), punainen on käyttöjännitejohto (V_{cc}) ja musta on maadoitus. (GP2Y0A21YK0F Datasheet.)



Kuvio 5. Infrapunaetäisyysensensorin toimintaperiaate ja mallinnus

$R = \text{etäisyys kappaleeseen}$

$$\frac{d}{D} = \frac{r}{R} \rightarrow R = \frac{rD}{d} = \frac{rD}{kV_0} \rightarrow \frac{rD}{k} \times \frac{1}{V_0} \rightarrow R = \frac{K}{V_0}$$

$$d = kV_0$$

$$K = \frac{rD}{k} = \text{Kalibrointivakio, joka saadaan kalibrointimittausten perusteella.}$$

Etäisyyden mittaussensori perustuu infrapunavalon heijastumiseen kappaleesta vastaanottimen tiettyyn osaan. Kalibrointivakio jaetaan signaalijännitteellä, ja saadaan laskettua etäisyys. Kalibroinnin voi tehdä kahdella oikealla tavalla. Mikäli kalibroitaisiin suoraan referenssi manuaalin arvoilla, eli käytetään analogiaulostulon V_0 arvoja 0,4 V (80 cm) ja 2,3 V (10 cm), se ei olisi kovinkaan tarkka metodi. (Doering 2016.)

$$R = \frac{K}{V_0} \rightarrow 80 \text{ cm} = \frac{K}{0,4} \rightarrow K = 32 \text{ cm} \times V$$

$$R = \frac{K}{V_0} \rightarrow 10 \text{ cm} = \frac{K}{2,3} \rightarrow K = 23 \text{ cm} \times V$$

Kalibrointi tehdään käyttäen mittanauhaa ja laatikkoa. Asetetaan pahvilaatikko 10 cm, 30 cm ja 80 cm:n etäisyydelle anturista, ja katsotaan jännitteet LabVIEW:sta. Otetaan 10

cm:n ja 80 cm:n tulokset ja verrataan niitä referenssimanuaalin arvoihin. On huomattavaa, kuinka paljon todelliset mittaustulokset poikkeavat manuaalin antamista arvoista.

$$R = \frac{K}{V_0} \rightarrow 10 \text{ cm} = \frac{K}{2,59} \rightarrow K = 25,9 \text{ cm} \times V$$

$$R = \frac{K}{V_0} \rightarrow 30 \text{ cm} = \frac{K}{0,91} \rightarrow K = 27,3 \text{ cm} \times V$$

$$R = \frac{K}{V_0} \rightarrow 80 \text{ cm} = \frac{K}{0,48} \rightarrow K = 39,2 \times V$$

Paras kalibroitiratkaisu on ottaa useita mittauksia käyttäen tiettyä algoritmia. Tehdään LabVIEW:ssa lohkodeigrammin, joka perustuu kaavaan $R = K_x \left(\frac{1}{V_0}\right) + K_o$, eli suoran yhtälöön $y = kx + b$. Kaavan tarkoituksena on saada useiden mittauspisteiden keskiarvo. K_x on kulmakerroin eli kalibroitivakio ja K_o tarkkuutta tuova korjausluku. Mittaus toteutetaan työntämällä pahvilaatikkoa tasaisesti kohti infrapunaetäisyysensoria. Sensori ottaa mittaustulokset 50 ms:n välein. Siirretään arvot koordinaatistoon analogiaulostulon jännitteen (V_0) Y-akselille ja etäisyyden X-akselille (cm). Tuloksista havaitaan, että sensori on herkimmillään karkeasti 20–50 cm alueella. Vaihdetaan tulokset uuteen diagrammiin, jossa etäisyys on Y-akselilla ja analogiaulostulon jännite tulee käänteislukuna X-akselille. Seuraavaksi valitaan diagrammista mahdollisimman lineaarisen otosten rypäs, johon sovitetaan suora, joka kuvastaa pisteiden keskiarvoa. Suora on $y = 28,211x - 1,2563$, eli se voidaan sijoittaa kaavaan $R = K_x \left(\frac{1}{V_0}\right) + K_o \rightarrow R = 28,2 \times \left(\frac{1}{V_0}\right) + 1,26$, jolloin ei tarvitse sijoittaa kuin jännitteen arvo sensorilta, jotta saataisiin etäisyys.

Kun toimilohkoja tehdään LabVIEW'illa, kiinnitetään analogiasisääntulolohko vaihto- ja tasavirta-arvioijaan (AC & DC Estimator). Arvioijan jälkeen invertoidaan V_0 :n arvo ennen K_x -kalibroitivakion kanssa kertomista. Viimeiseksi summataan vain K_o , joka liitetään numeeriseen indikaattoriin. Indikaattori kertoo etäisyyden senttimetreinä. Tämä kaikki on while-kierron sisällä. Analogiasisääntulo liitetään virhe ulos (error out) -valinnan keskeytykseen, joka on ESC-nappulassa. Sama virhe ulos -valinta kiinnitetään while-kiertoon yksinkertaisen vikakäsittelijän (Simple Error Handler) ulkopuolelle, ja myRIO:n resettiin (Reset myRIO).

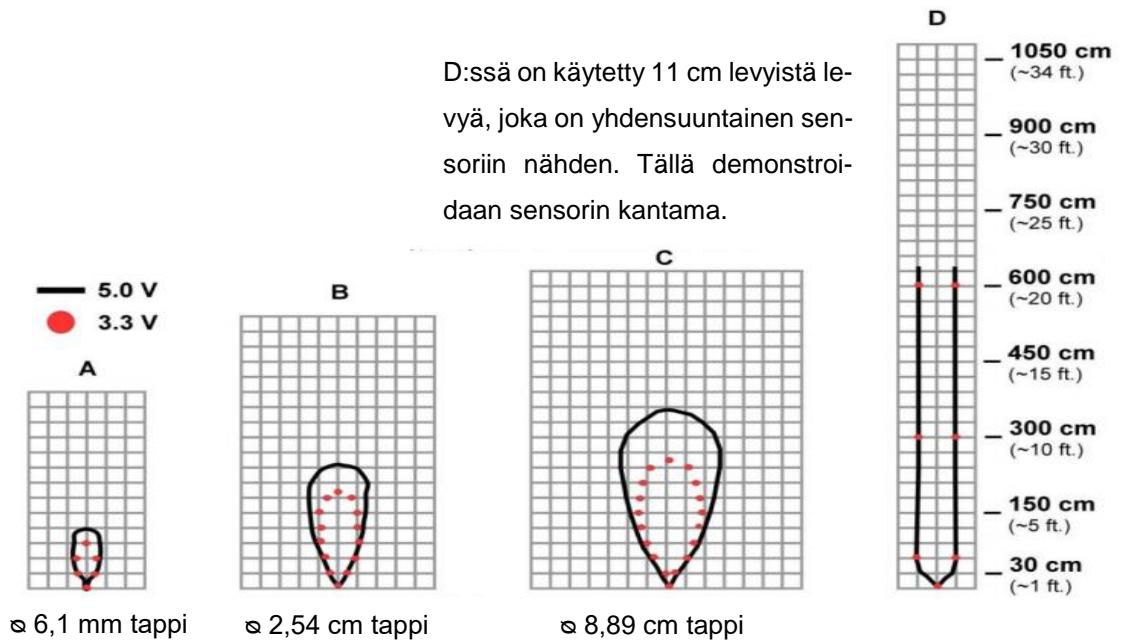
Jos laatikon työnsi lähemmäksi kuin 10 cm, jännite nousi noin 8 cm:n kohdalla 3,1 volttiin, jonka jälkeen jännite alkoi laskea. Esimerkiksi 10 cm ja 5 cm olivat yhtä suuria jännitteeltään, noin 2,6 V. Kannattaa varmistaa, ettei mitattavaa asiaa tuoda alle kymmenen senttimetrin päähän.

3.1.7 Ultraäänisensori

Mechatronics-pakkauksen ultraäänisensori on nimeltään LV-MaxSonar EZ1, malliltaan MB1010. Kyseistä mallia on tarkoitettu käytettäväksi sisätiloissa ja väliaineena on vain ilma. Ultraäänianturin toimintaperiaate perustuu lähettimen luoman ääniaallon kulkemaan aikaan heijastua esineestä takaisin sensorin vastaanottimeen. Sensori siis laskee äänen kulkeman ajan, kun äänennopeus on ilmassa $343 \frac{m}{s}$, saadaan laskettua välimatka kaavalla $s = \frac{v}{t}$.

MB1010 LV-MaxSonar-Ez1 on MaxSonarin suosituin sisäkäyttöön tarkoitettu ultraäänisensori. Spesifisesti sitä suositellaan käytettäväksi ihmisten havaitsemisessa, turvallisuussovelluksissa, liikkeen tunnistuksessa, opetus- ja harrastusrobotiikassa sekä törmäyksen välttämiseksi. MB1010:aa voidaan käyttää jopa paristojen kanssa, sillä se on erittäin energiatehokas. (LV-MaxSonar-EZ Series.)

Yleisesti LV-MaxSonar -Ez -mallisto pystyy havaitsemaan kappaleen nolla-etäisyyksiltä, mutta ei pysty tunnistamaan etäisyyttä lähempänä kuin 15,24 cm (6 tuumaa). Niiden maksimaalinen havaintoetäisyys on 645 cm (254 tuumaa). Anturin käyttöjännite on 2,5 V (2 A)–5,5 V (3 A), ja mittauksen lukutaajuus on 20 Hz. Sensori toimii 42 kHz:n taajuuksella. Sensoreilla on omat kalibroidut sädekuviot, joita on neljä erilaista (A, B, C ja D). Sädekuvion etäisyys nousee niin, että A:n etäisyys on pienin ja D:n suurin. D-kuvio eroaa muista olemalla lähes täysin lineaarinen. Laite alkaa kalibroida itseään, kun siihen kytetään virta. Sensori käyttää tallennettua dataa itsensä kalibroimiseen. On tärkeää, ettei anturin edessä ole mitään alle 17,78 cm (7 tuuman) etäisyydellä tai parhaan tuloksen saamiseksi 35,56 cm (14 tuuman) etäisyydellä kalibroimissyklin aikana. (LV-MaxSonar-EZ Series.)



Kuvio 6. Ultraäänisensorin lähettimien sädekuvioita

Otosten tulokset mitatuista sädekuvioista ovat näkyvillä 30 cm ruudukossa (Kuvio 6). Havainnointikuvio esittää antureiden eteen laitettuja erikokoisia tappeja. A- ja B-asetuksia voidaan käyttää ihmisten tunnistamiseen. (LV-MaxSonar-EZ Series.)

Ultraäänisensorin käyttö LabVIEW'illa on todella yksinkertaista, ainakin käyttäessä analog-pinniä. MB1010:ssa voi valita kolme ulostuloa yksinajoa varten: analogia (analog), pulssinleveys (pulse width) ja sarja-RS232 (serial RS232). KytKentä eroaa ainoastaan yhden pinnan erolla. Kaikissa kytketään pinnit kuusi (+5V Vcc) ja seitsemän (GND). Pinnissä kolme sijaitsee analogiaulostulo (AN), jonka skaalautuva kerroin (scaling factor) on $\frac{V_{CC}}{512}$ per tuuma, eli 5 V jännitettä käytettäessä $\frac{5V}{512} \approx 9,8 \frac{mV}{in}$. (LV-MaxSonar-EZ Series.) Ei käytetä ollenkaan kalibroinnin korjauslukuja vaan laite kalibroi itse itsensä, niin laite operoi tarkasti. Etäisyyden saa suoraan, kun LabVIEW'n analogiasisääntulosta siirtää jännitteen skaalaus kertoimelle ja siitä numeeriselle indikaattorille. Testausvaiheessa ei saatu digitaalisia sarja-RS232:sta eikä pulssinleveysmittauksia toimimaan. Tämä voisi johtua liitäntäpinneistä. Yhteys katkesi NI myRIO:n ja sensorin välillä jatkuvasti.

4 Kehitysalustat

Kehitysalusta on sulautettu järjestelmä, eli piiri jota ohjaa yleensä tietokone. Piirille syötetään käskyt, joiden perusteella se osaa ohjata siihen liitettyjä lisäosia, kuten moottoreita ja antureita. Raspberry Pi tekee tässä poikkeuksen, sillä se on verrattavissa tietokoneeseen. Siitä löytyy liitännät, joilla voi suoraan ohjata laitteistoja. Siihen voi liittää näppäimistön ja hiiren sekä näytön HDMI-kaapelilla. (Raspberry-Pi Technical Data Sheet.) Arduino on astetta yksinkertaisempi alusta. Sen ohjelmoiminen on joustavaa, sillä siihen löytyy monia ohjelmointilisäosia, esimerkiksi ArduBlock, joka toimii toimilohkoilla. Arduinosta löytyy myös monia eri versioita eri ominaisuuksineen. (Arduino UNO & Genuino UNO.) Picaxe sopisi ehkä parhaiten itse tekeväälle, koska alusta kootaan itse. Se on suunniteltu koulukäyttöön, mutta vaatii perehtymistä, sillä järjestelmä rakennetaan itse valmiin mikroprosessorin ympärille. (What is PICAXE?) Suositujen kehitysalustojen etuna voi nähdä niiden ympärille kehittyneet internetyhteisöt. Yhteisöjen aktiiviset foorumit antavat apua uusille auttaen heitä tutustumaan laitteeseen paremmin ja tehden kokemuksesta mielekkäämpää. Erityisesti Arduinon ja Raspberryn yhteisöt ovat vilkkaita. Niiden foorumeilta saa paljon valmiita ohjelmia ja kytkentöjä. Useimmat kehitysalustat toimivat mikrokontrollereilla joissa on mikroprosessori. Kehitysalustoja on kuitenkin satoja moneen eri makuun, ja hyvinkin yksinkertaiset alustat voivat ajaa asiansa hyvin.

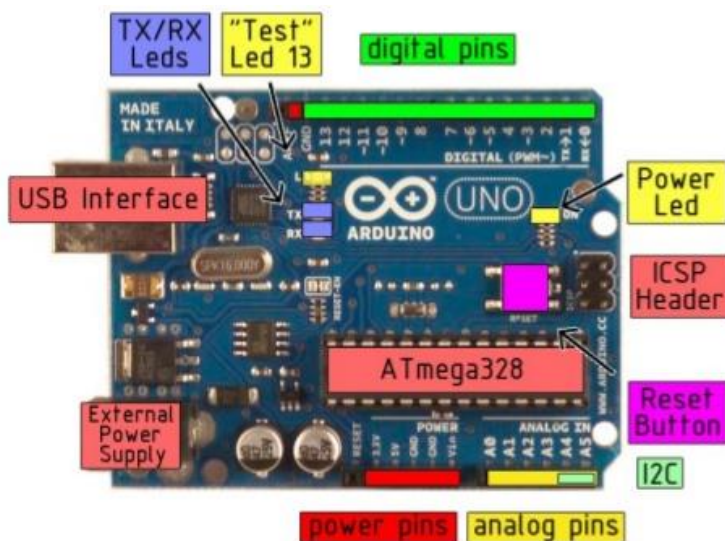
NI myRIO on suhteellisen arvokas verrattaessa muihin kehitysalustoihin. Se maksaa valmistajan sivuilla 1120 euroa ja ohjelmointiympäristö LabVIEW:n lisenssi 995 euroa (Buy LabVIEW). Raspberryn kallein malli on alle 50 euroa ja käyttöjärjestelmä kuuluu laitteen hintaan (Raspberry Pi). Arduino Uno maksaa 30 euroa (Arduino UNO kehitysalusta) ja Picaxe ovat alta 10 euron (Picaxe). Mikä myRIO:ssa maksaa? Hinta nousee, mitä suuremman projektin ohjaamiseen ohjausyksikköä voidaan käyttää. Siinä on huimasti enemmän tuloja ja lähtöjä eri jännitealueille. National Instrumentsin foorumit ovat myös todella aktiiviset. Ohjelmisto rajoittuu LabVIEW-käyttöliittymään, joka toimii lohko-kaavio-periaatteella. Muilla laitteilla voi käyttää useita ohjelmointi menetelmiä avoimen lähdekoodin ansiosta. NI myRIO:lla voi silti tehdä kaiken mitä halvemmillä alustoilla, ja paljon enemmänkin. Hinta voi kuitenkin yksittäiskäytössä olla hankinnan ratkaiseva tekijä.

Käyn läpi pintapuolisesti Raspberry Pin ja Arduino Unon, joita olemme käyttäneet Metropolia Ammattikorkeakoulussa. Otan myös käsittelyyn Picaxen, joka on edullinen opiskelijoille suunnattu kehitysalusta, aivan kuten NI MyRIO:kin.

4.1 Arduino Uno

Arduino on italialaisvalmisteinen avoimeen lähdekoodiin perustuva kehitysalusta. Arduino Uno on Arduino-kehitysalustojen referenssimalli. Malleja on lukuisia. Arduino perustuu yksinkertaiseen piirilevyyn, josta löytyy 14 kappaletta digitaalisia ulostuloja/sisääntuloja, joista kuusi on PWM-ulostulo/sisääntuloja. Analogiasisääntuloja on myös kuusi. Sen käyttöjännite on 5 V ja prosessorina toimii ATmega328P 16 MHz:n kellotajuudella. (Arduino UNO & Genuino UNO.)

Arduino Uno on mikrokontrolleripohjainen alusta. Tämä rajoittaa laitteen projektit suppeammiksi. Sen 3,3 V ulostulo ei anna myöskään paljoa varaa kytkentä variaatiolle. Esimerkiksi, useiden moottoreiden käyttäminen on lähes mahdotonta ilman erillistä virtalähdettä. Alusta liitetään USB-portin avulla tietokoneeseen, jonka avulla sitä ohjelmoidaan. (Arduino UNO & Genuino UNO.) Arduino on loistava koulukäyttöön ja vasta-alkajille, sillä internetistä löytyvät yhteisöt tarjoavat paljon apua vasta-alkajille.

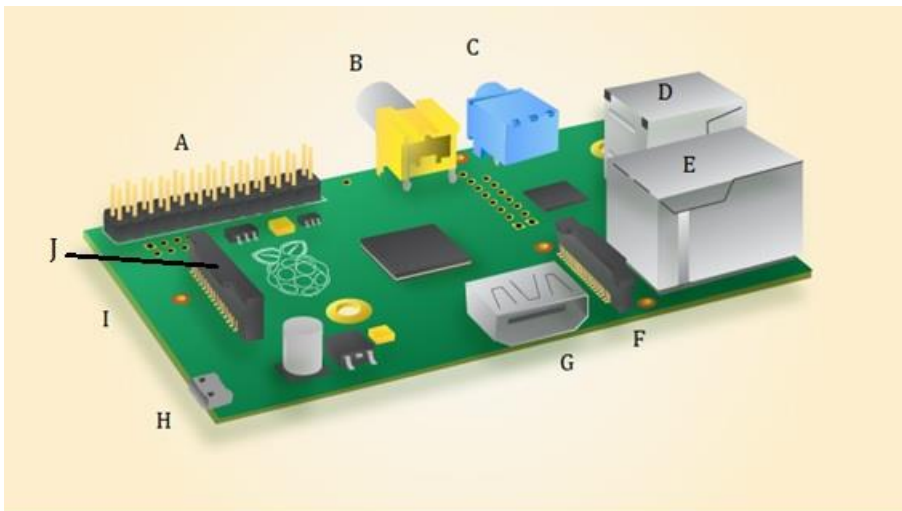


Kuvio 7. Arduino UNO:n sisään- ja ulostulot ja indikaattoreita (Arduino UNO)

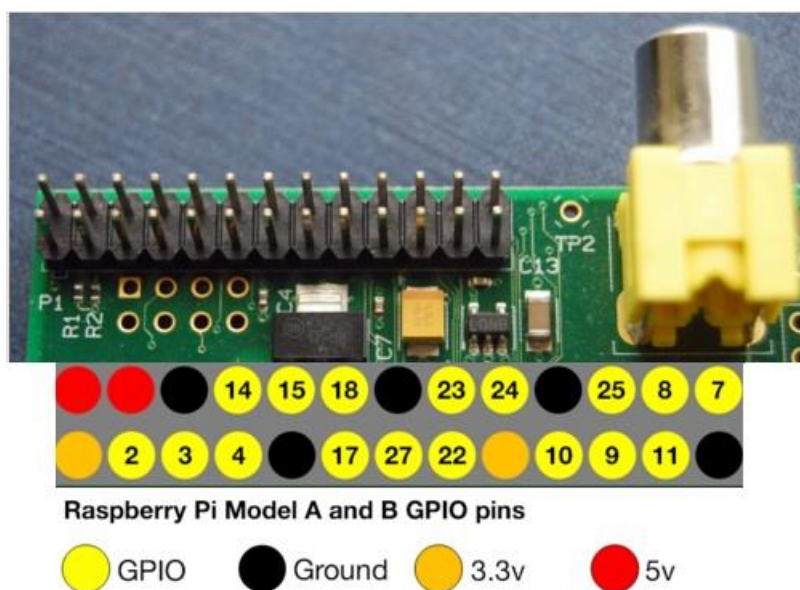
4.2 Raspberry Pi

Raspberry Pi on brittiläisen Raspberry Pi Foundationin kehittämä yhden piirilevyn tietokone. Raspberry:n idea on saada lapset innostumaan ohjelmoinnista. Tällä hetkellä tietokoneesta on saatavilla neljää eri versiota. Raspberry Pi 1 on näistä ensimmäinen, se julkaistiin vuonna 2012. Sen prosessori on yksiytiminen, ARM11, jonka taajuus on 700

MHz. Kehittyneempi versio Raspberry Pi 2 julkaistiin helmikuussa 2015, ja tällä on 900 MHz:n moniydinprosessori, ARM Cortex-A7. Samana vuonna marraskuussa 2015 julkaistiin myös Raspberry Pi Zero, joka on versioista kaikkein edullisin. Siinä on yksiytiminen, 1 GHz:n ARM11-prosessori. Kehittynein ja uusin versio Raspberry Pi 3 julkaistiin helmikuussa 2016. Siinä on myös moniydinprosessori, ARM Cortex-A53 1,2 GHz:n taajuudella. Kaikki muut versiot ovat 32-bittisiä, paitsi viimeisin Raspberry Pi 3 on 64-bittinen. OpenGL ES2.0 tuki mahdollistaa 1080p:n videoiden katselun. Ethernet-väylää ei ole Raspberry Pi A -versiossa, mutta kaikista muista se löytyy vakiovarusteena. (Quick Start Guide.)



Kuvio 8. Raspberry Pi 1 Model B (Raspberry Pi 1 Model B)
 A: GPIO-pinnit
 B: RCA-video -ulostulo
 C: Audio-ulostulo
 D: 2x USB 2.0
 E: Ethernet-ulostulo
 F: CSI-liitin
 G: HDMI-ulostulo
 H: Micro-USB (5 V, 1 A)
 I: SD-kortin paikka
 J: DSI-liitin näytölle

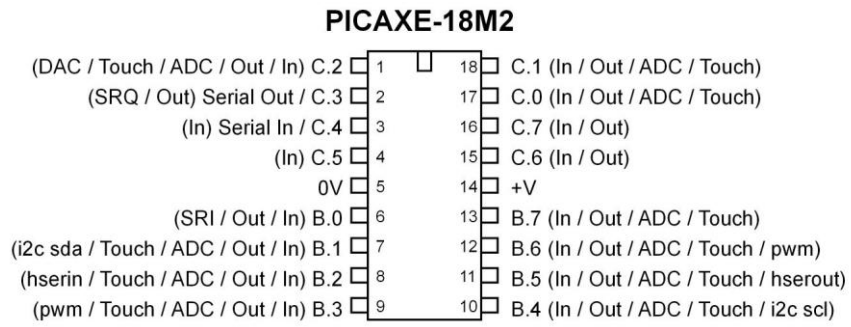


Kuvio 9. A- ja B-mallien pinnit (GPIO: Raspberry Pi Models A and B)

Raspberry Pi:n käyttöympäristö muistuttaa mielestäni Windows:in aloitusnäyttöä, jossa on pikakuvakkeet sovelluksia varten. Siinä tulee Python-, C-, C++-, Java Scratch- ja Ruby-ohjelmointikielien esiasennettuina. Pythonin käyttöä suositellaan valmistajan sivuilla. GPIO (General Purpose Input/Output) -pinneillä voidaan ohjelmoida vain digitaalisia signaaleja. Analogiapinnien puuttuminen rajoittaa joidenkin anturisovellusten käytön.

4.3 Picaxe

Picaxe mikrokontrolleri on suunniteltu opetuskäyttöön, mutta sitä käyttää myös sadat tuhannet harrastelijat. Ne ovat edullisia ja niiden ohjelmisto on ilmainen. Picaxe:lle on monia piirikokoja (8-, 14-, 18-, 20-, 28- ja 40-pinnisiä), joilla saadaan joustavuutta käytettävyyteen. Lähes kaikki pinnit voidaan asettaa 'a olemaan sekä ulostulo että sisääntulo, jopa analogiasisääntulo. Picaxen ohjelmointi tapahtuu BASIC-nimisellä kielellä, graafisilla lohkoilla tai vuokaaviolla. Sen käyttöjännite on 3 V, 4,5 V tai 5 V. Kolmella AA-paristolla saadaan 4,5 V, joka on yleisin tapa käyttää laitetta. (What is PICAXE?)



Kuvio 10. 18-pinnisen Picaxen sisään- ja ulostulot (What is PICAXE?)

5 National Instruments myRIO-1900

NI myRIO on uudelleen ohjelmoitava sisääntuloista ja ulostuloista muodostuva laite (reconfigurable input/output (RIO) device). Se on suunniteltu opiskelijoita varten, jotta he voisivat harjoitella robotiikkaan ja mekatroniikkaan liittyviä ohjelmointeja. Laitteella on runsaasti sisään- ja ulostuloja. Siitä löytyy analogiset (AI ja AO) -ja digitaaliset (DIO) sisään-/ulostulot. Äänisisään- ja -ulostulot sekä sähköulostulo sisältyvät myös laitteeseen. NI myRIO liitetään isäntätietokoneeseen käyttäen USB-kaapelia tai 802.11 (2,4 GHz) langattomalla verkolla. Langattomalle verkolle luvataan 150 m:n kantama, mikäli yhdistetyt laitteet ovat toistensa näköpiirissä. NI myRIO:ssa on kaksi USB-porttia, toinen on isäntätietokonetta varten ja toinen on muille laitteille. Alustassa on myös oma sisäänrakennettu kolmen (X, Y, Z) akselin kiihtyvyyssanturi. Sen dataa voi tarkastella erilliseltä rekisteriltä. NI myRIO-1900:sta löytyy 677 MHz Xilinx Z-7010-tyyppinen tuplaydinprosessori, johon on myös integroitu laitteen FPGA. Laitteesta löytyy myös sisäänrakennettu kiihtyvyyssanturi. Tallennustilaa on 256 Mb ja DDR3 muistia 512 Mb 533 MHz taajuudella. Kehitysalusta painaa ilman kaapeleita 193 g. (NI myRIO-1900 User Guide and Specifications.)

NI myRIO ja sen käyttöliittymä LabVIEW ovat nykyaikaisia ohjelmoinnin koulutusvälineitä. Näiden työkalujen avulla voidaan toteuttaa niin laajoja projekteja kuin oppimiseen olennaisia pienimuotoisia tehtäviä. Olennaisinta kuitenkin on se, että LabVIEW on ohjelma, jota käytetään yleisesti komponenttivalmistajien toimesta. Sillä tehdään muun muassa komponenttien sekvenssikaavioita. Opiskelijat hyötyvät tästä, jos he oppivat käyttämään ohjelmistoa kouluaikana ennen töihin siirtymistä. (NI myRIO-1900 User Guide and Specifications.)

5.1 Indikaattorit, painikkeet ja liitännät

Edestäpäin katsottuna NI myRIO:ssa on läpinäkyvä ikkuna, josta näkee piirilevyn. Ikkunan oikealla puolella on seitsemän LED-valoa. Ylhäältä alas järjestyksessä tulevat virtapäällä-LED, joka palaa virran ollessa kytkettynä. Statusta indikoiva LED palaa käynnistyksen aikana, jolloin laite suorittaa POST-testin (power-on self test). Status-LED myös vilkkuu, spesifisten vikatilojen johdosta. WLAN-yhteyden LED on seuraavaksi, ja neljä viimeisintä lediä ovat LED0, LED1, LED2 ja LED3, jotka ovat ohjelmoitavia ledejä. Laitteen takana on tasaiselle alustalle kiinnitystä varten suunniteltu kolme reikää. (NI myRIO-1900 User Guide and Specifications.)

NI myRIO:n vasen puoli on nimeltään (NI myRIO Expansion Port) MXP-puoli. Tällä puolella on liitännät A ja B, jotka ovat identtisiä signaaleiltaan. Molemmissa A- ja B-liitännöissä on 34 pinniä, ja jotkut pinnit saattavat sisältää myös toissijaisen funktion.

Oikea puoli on nimeltään (Mini System Port, Connector C) MSP-C-puoli. Tällä puolella on 20 liitinpaikkaa, kuudessa näistä on toissijainen funktio. Tältä puolelta löytyy myös äänisisään ja -ulos, jotka ovat $\pm 2,5$ V analogialiittimiä. (NI myRIO-1900 User Guide and Specifications.)

Laitteen yläosasta löytyy laitteen kaksi edellä mainittua USB-porttia. Tietokone ja NI myRIO kommunikoivat toisessa ja toiseen voi liittää vaikka muistitikun tai Web-kameran. Samalla puolella on myös laitteen virtajohdon sisääntulo ja nollaus-nappula. Nappi uudelleen käynnistää laitteen ja pakottaa sen menemään vikasetotilaan. Laitteen alaosasta löytyy WLAN-yhteyden käynnistyspainike ja ohjelmoitava painike nimeltä Button0. (NI myRIO-1900 User Guide and Specifications.)

5.2 Sisään- ja ulostulot

Analogisia sisääntuloliittimiä on molempien, MSP-C:n ja MXP:n puolella. Kaikki analogialiittimien sisääntulot menevät saman analogia-digitaalimuuntimen (ADC) läpi, myös äänisisääntulo. MXP:n liittimillä, A:lla ja B:llä, on neljä analogia sisääntuloa AI0:sta AI3:een. Näillä voidaan mitata 0 V–5 V signaaleita. MSP-C-liittimellä on kaksi korkean impedanssin analogiasisääntuloa, joilla voidaan mitata ± 10 V:n signaaleita. Ne ovat nimeltään AI0 ja AI1. (NI myRIO-1900 User Guide and Specifications.)

Analogisia ulostuloja on myös molemmilla puolilla. Kaikki analogialiittimet menevät oman analogia-digitaalimuuntimen läpi, jotta ne päivittyisivät samanaikaisesti. Analogia-digitaalimuuntimia ohjaa kaksi sarjayhteydenpitoväylää FPGA-piiriltä (Field-Programmable Gate Array). Yksi yhteydenpitoväylä on MXP:n liittimille ja toinen MSP-C:n liittimille sekä ääniulostulolle. MXP:n A- ja B-liittimillä on kaksi analogiaulostuloa per liitinryhmä. Ne ovat nimeltään AO0 ja AO1. Niillä voidaan tuottaa 0 – 5 V signaaleja. MSP-C-liittimillä on myös kaksi analogiaulostuloa jotka ovat nimeltään samat. Niillä kuitenkin voidaan tuottaa ± 10 V signaaleja. (NI myRIO-1900 User Guide and Specifications.)

MyRIO:n digitaaliset sisään-/ulostulolinjat (DIO) ovat jännitteeltään 3,3 V. Niitä on molemmissa, MSP-C- ja MXP-liittimissä. MXP:llä niitä on 16 per liitännäryhmä, ja MSP-C:llä

niitä on kahdeksan. MXP:n 0–13-liittännöissä on 40 kΩ vastus ja 14–15-liittännöissä on 2,2 kΩ vastus 3,3 V saakka. MSP-C:n jokaisella sisään-/ulostulolla on 40 kΩ vastus. Digitaalimaata (DGND) suositellaan käytettäväksi kaikkien DIO-linjojen kanssa. Jokainen linja voidaan yksilöllisesti ohjelmoida joko sisääntuloksi tai ulostuloksi. Digitaalisten sisään-/ulostulojen toissijaisia funktioita ovat muun muassa SPI, I²C ja PWM. (NI myRIO-1900 User Guide and Specifications.)

5.3 Raaka data jännitteeksi

Seuraavilla kaavoilla voidaan muuttaa raa'an datan arvoja volteiksi:

$$V = \text{Raa'an datan arvo} \times \text{LSB:n määrä}$$

$$\text{LSB:n määrä} = \frac{\text{Jännite huipusta huippuun}}{2^{\text{ADC:n resoluutio}}}$$

Raa'an datan arvo tulee FPGA-piiriltä, analogia-digitaalimuuntimen (ADC) resoluutio on 12 ja jännite huipusta huippuun tarkoittaa käytettävän jännitteen ylintä ja alinta rajaa. (NI myRIO-1900 User Guide and Specifications.)

AI- ja AO-väylien (0 V – 5 V) MXP-liitännät:

$$\text{LSB:n määrä} = \frac{5 \text{ V}}{2^{12}} = 0,001220703125 \text{ V} \approx 1,221 \text{ mV}$$

$$\text{Maksimaalinen jännite} = 4095 * 0,001221 = 4,999995 \text{ V}$$

AI- ja AO-väylien (±10 V) MSP-liitännät:

$$\text{LSB:n määrä} = \frac{20 \text{ V}}{2^{12}} = 0,0048828125 \text{ V} \approx 4,883 \text{ mV}$$

$$\text{Maksimaalinen positiivinen jännite} = 2047 \times 0,004883 \text{ V} = 9,995501 \approx 9,995 \text{ V}$$

$$\text{Maksimaalinen negatiivinen jännite} = -2048 \times 0,004883 \text{ V} = -10,000384 \text{ V} \\ \approx -10,000 \text{ V}$$

Audio sisään/ulos:

$$\text{LSB:n määrä} = \frac{5 \text{ V}}{2^{12}} = 0,001221 \text{ V} \approx 1,221 \text{ mV}$$

$$\text{Maksimaalinen positiivinen jännite} = 2047 \times 0,001221 \text{ V} = 2,499387 \text{ V} \approx 2,499 \text{ V}$$

$$\text{Maksimaalinen negatiivinen jännite} = -2048 \times 0,001221 \text{ V} = -2,500608 \text{ V} \\ \approx -2,500 \text{ V}$$

Kiihtyvyyksanturille:

$$\text{LSB: } n \text{ määrä} = \frac{16 \text{ g}}{2^{12}} = 0,00390625 \text{ g} \approx 0,003906 \text{ g}$$

$$\text{Maksimaalinen positiivinen arvo} = 2047 \times 0,003906 \text{ g} = 7,995582 \text{ g} \approx 7,996 \text{ g}$$

$$\text{Maksimaalinen positiivinen arvo} = -2048 \times 0,003906 \text{ g} = -7,999488 \text{ g} \approx -8,000$$

(NI myRIO-1900 User Guide and Specifications.)

5.4 Ohjelmointiympäristö LabVIEW

LabVIEW on National Instrumentsin oma graafinen ohjelmointiympäristö. Ohjelmaa tehdään toimilohkoilla. Osana opinnäytetyötä testattiin kaikki Mechatronics-pakkauksen mukana tulleet laitteet. LabVIEW tuli NI myRIO:n mukana levykkeellä, josta se asennettiin tietokoneelle. Uuden käyttäjän rekisteröinnin yhteydessä sai 15 päivän ilmaisen kokeilujakson. Ohjelmisto ei ole ilmainen. Lisenssi halvimpaan versioon maksaa lähes 1000 euroa. 15-päivän ilmaisen jakson käyttö aloitettiin kesäkuussa 2015. NI myRIO oli tuolloin reilun vuoden vanha laite. Isäntäkoneena toimi Sony Vaio Pro 13, jossa oli Windows 8.1 -käyttöjärjestelmä, ja ainoastaan USB 3.0 -portteja. LabVIEW:n asentaminen sujui hyvin ja ohjelmiston päivittäminen sujui sulavasti. Ennen kuin päästään ohjelmointiympäristöön, tutustutaan muun muassa NI myRIO:n sisäiseen kiihtyvyyssanturiin. Tässä kohtaa ohjelma kaatui lukuisat kerrat. Silloisessa ohjelmistoversiossa ei ollut työpöytä pikakuvaketta. LabVIEW käynnistyi vain silloin, kun NI myRIO kytkettiin tietokoneen USB-porttiin, eikä aina silloinkaan. Tämä antoi keskeneräisen tuotteen vaikutelman. Ohjelmisto asennettiin pöytäkoneeseen, jossa oli Windows 7 käyttöjärjestelmä. USB-kaapeli kytkettiin USB 2.0-porttiin niin laite saatiin toimimaan ilman kaatumisia, ja ongelma siis ratkesi.

Alun ongelmista huolimatta alkoi ohjelmisto tuntua mielekkäältä kun päästiin vihdoin ohjelmoinnin pariin. Käyttöliittymä koostuu kahdesta ikkunasta, joilla on selkeä funktio. Toiseen tehdään graafista käyttöliittymää ja toiseen lohkoakaaviota. Lohkoakaavion lohkot ovat selkeitä ja niiden yhdisteleminen muihin lohkoihin on sulavaa. Useat toiminnot ovat samoissa tutuissa paikoissa kuin muissa ohjelmointiympäristöissä. LabVIEW:lla oppiminen on visuaalisesti mielekäästä, sillä se ei tunnu vanhalle. Se on tuulahdus uuden sukupolven ohjelmointiympäristöä.

LabVIEW:n ohjelma on nimeltään VI (Virtual Instrument). VI koostuu kahdesta ikkunasta: etupaneelistä (front panel) ja lohkoakaaviosta (block diagram). Etupaneeli toimii käyttöliittymänä ohjelmalle. Lohkoakaavioon tehdään graafinen koodi lohkoilla. Etupaneeliin voidaan lisätä mittareita, nappeja, diagrammeja ja vaikkapa ledejä, joilla voidaan visualisoida NI myRIO:on kytkettyjen laitteiden toimintaa. Aina kun etupaneeliin lisätään jotain, tekee ohjelma automaattisesti lohkoakaavioon vastaavan lohkon siitä. Valikko tulee esiin klikkaamalla oikealla hiiren painikkeella tyhjää kohtaa etupaneelin harmaassa ruudukossa. Jos klikataan oikealla lohkoakaavion valkoiselta pohjalta, saadaan esiin ohjelmoin-

nin toiminnot, kuten matemaattiset ja numeeriset funktiot, ajastimet ja rakenteet. Lohko-kaaviossa lohkot yhdistetään toisiinsa vetämällä niiden välille ”johto”. Sen avulla siirretään dataa lohkoista toiseen.

6 Pohdinta

Olen lukiopohjalta, ja kehitysalustojen käyttäminen ja ohjelmointi tulivat ensimmäistä kertaa eteeni ammattikorkeakoulussa. Tutustuin vasta kolmosvuodenprojektissa Arduino-kehitysalustaan. Opettelimme ympäröivän valon sensoreilla säätämään huoneen valaistusta. Vaikka käytimme tässä työssä lohkokaaviomenetelmää, johon LabVIEW-ohjelmointiympäristökin perustuu, ei tietotaitoni riittänyt alkuunkaan NI myRIO:lla ohjelmoimiseen. Käytin useita tunteja uuden aiheen valmisteluun. Minun oli ymmärrettävä laitteen toimintaperiaate täysin ennen ohjelmoimista. Internetin selaus, etsien lyhenteiden merkitystä, ja suomi-englanti-suomi-sanakirjan internet-versio tulivat tutuiksi. Alku oli vaikeaa. Haastava projekti sai kuitenkin yritteliääksi. Kun oli opetellut tietyt termit, uusia ei juurikaan tullut. Oppitunneilla kuulleet asiat olivat mielessä pieninä palasina, jotka alkoivat nyt loksahda paikoilleen. Vapaa-aikana, jolloin en tehnyt opinnäytetyöhön liittyvää, kokeilin erilaisia funktioita ja vain painelin erilaisia painikkeita ohjelmointiympäristössä. Ohjelmiston käyttö alkoi muuttua mielekkääksi. Mielestäni tällöin koin niin sanotun "valaistumisen".

Tapahtumasarja komponentin, NI myRIO:n ja LabVIEW:n välillä muuttui kertaheitolla vieraasta tutuksi. Anturi ottaa vaikutteita ympäristöstä ja tulkitsee ne sähköjännitteen muutoksina, eli raakana datana. Raakaa dataa lukee NI myRIO, joka syöttää sen ohjelmistoympäristöni sisääntulolohkoon. Sisääntulolohkon liitän, riippuen ulostulosta, datan muutoksen tekevään lohkoon. Siitä ohjelmoitu algoritmi muuttaa sähköisen muodon halutuksi arvoksi. Tähän voidaan lisätä matemaattisia kaavoja, jotta päästään haluttuun yksikköön. Olin oppinut.

Olisin voinut tehdä pakkauksen lisälaitteista erilliset käyttöohjeet. Ne olisivat tavoittaneet opiskelijat paremmin. Ohjelmointiin liittyvät tehtävät olisivat olleet hyvä opetuskeino jatkossa, mikäli laite otettaisiin koulussa opetuskäyttöön. Käsittelimme asiaa Timo Tuomisen kanssa, mutta rajasimme sen pois. I2C- ja SPI-käyttöliittymäväylät olisivat olleet tärkeitä käsitellä kunnolla, sillä jokaisessa anturissa käytettiin jompaakumpaa.

Mechatronics-pakkaus sisälsi monta erilaista laitetta, joihin kaikkiin piti tehdä hyvin vaihtelevat ohjelmoinnit. Vaihtelevuus näkyy opinnäytetyön lisäosien ohjelmoinneissa. Ohjelmoinnin yksi mielenkiintoisimmista seikoista oli yleisesti bittikartat eli rekisterit. Niillä tehtiin digitaalisen kompassin, digitaalisen gyroskoopin ja kiihtyvyyssanturin datan kerää-

misen ominaisuuksiin muutoksia. Muutostaulukko oli yksinkertainen valikko, joissa sijoitettiin bitti tiettyyn sarakkeeseen. Komponentin ohjeista piti tarkasti katsoa, mihin sarakkeeseen bitti piti sijoittaa, jotta saatiin haluttu lopputulos. Ohjelmointi helpottui edellä mainittujen komponenttien jälkeen huomasti. Loput olivat suorastaan yksinkertaisia. Opin, että joko osataan ohjelmoida tai ei ollenkaan. Välimuoto on roimasti jommallekummalle puolelle kallistunut.

Lähteet

- 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L. 2013. Honeywell. Verkkodokumentti. <https://aerospace.honeywell.com/~media/aerospace/files/datasheet/3-axisdigitalcompassichmc5883l_ds.pdf>. Päivitetty helmikuu 2013. Luettu 11.4.2016.
- Ansaharju, Tapani 2009. Koneenasennus ja kunnossapito. Helsinki: WSOY.
- Arduino Products. 2016. Arduino. Verkkodokumentti. <www.arduino.cc/en/Main/Products>. Luettu 1.5.2016.
- Arduino UNO. 2016. LinkIn Corporation. Verkkodokumentti. <<http://www.slideshare.net/muhammadowais94043/arduino-uno-28044428>>. Luettu 2.5.2016.
- Arduino UNO & Genuino UNO. 2016. Arduino. Verkkodokumentti. <<http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>. Luettu 1.5.2016.
- Arduino UNO kehitysalusta. 2016. Verkkokauppa.com. Verkkodokumentti. <<https://www.verkkokauppa.com/fi/product/37517/dnsjj/Arduino-Uno-kehitysalusta>>. Luettu 2.5.2016.
- Buy LabVIEW. 2016. National Instruments. Verkkodokumentti. <<http://www.ni.com/labview/buy/>>. Luettu 2.5.2016.
- Digital Accelerometer. 2009-2015. Analog Devices. Verkkodokumentti. <<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ADXL345.pdf>>. Luettu 13.4.2016.
- Doering, Ed 2016. NI myRIO Project Essentials Guide. National Technology and Science Press. Verkkodokumentti. <<http://www.ni.com/academic/myrio/project-guide.pdf>>. Päivitetty 9.2.2016. Luettu 13.2.2016.
- GP2Y0A21YK0F Datasheet (PDF). 2016. Digilent. Verkkodokumentti. <<http://www.all-datasheet.com/datasheet-pdf/pdf/412635/SHARP/GP2Y0A21YK0F.html>>. Luettu 26.4.2016.
- GPIO: Raspberry Pi Models A and B. 2016. Raspberry Pi Foundation. Verkkodokumentti. <<https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/gpio/>>. Luettu 2.5.2016.
- GVS S03N Standard Servo. 2001–2016. Pololu Corporation. Verkkodokumentti. <<https://www.pololu.com/product/519>>. Luettu 7.11.2015.
- Hex to Decimal. 2016. Verkkodokumentti. <<http://hextodecimal.com/index.php>>. Luettu 14.3.2016.
- Induktiivinen anturi. 2016. Sensorola Oy. Verkkodokumentti. <<http://www.sensorola.fi/tuotteet/induktiivinen%20anturi>>. Luettu 29.4.2016.
- Kapasitiiviset kytkevät anturit. 2016. Sensorola Oy. Verkkodokumentti. <<http://www.sensorola.fi/tuotteet/146>>. Luettu 29.4.2016.
- Keinänen, Toimi – Kärkkäinen, Pentti – Metso, Tommi ja Putkonen, Kari 2001. Logiikat ja ohjausjärjestelmät. Vantaa: WSOY.

Keurulainen, Teemu 2016. Validointi-insinööri. Murata Electronics Oy. Haastattelu. 3.5.2016.

LV-MaxSonar-EZ Series. 2005–2015. MaxBotix Inc. Verkkodokumentti. <http://maxbotix.com/documents/LV-MaxSonar-EZ_Datasheet.pdf>. Luettu 28.4.2016.

MEMS motion sensor: ultra-stable three-axis digital output gyroscope. 2010. STMicroelectronics. Verkkodokumentti. <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/435303/STMICROELECTRONICS/L3G4200D.html>>. Luettu 2.4.2016.

myRIO Mechatronics Accessory Kit. 2016. National Instruments. Verkkodokumentti. <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/fi/nid/211722>>. Luettu 1.5.2016.

NI myRIO. 2016. National Instruments. Verkkodokumentti. <<http://www.ni.com/myrio/>>. Luettu 2.5.2016.

NI myRIO. 2016. National Instruments. Verkkodokumentti. <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/fi/nid/211694>>. Luettu 2.5.2016.

NI myRIO-1900 User Guide and Specifications. 2013. National Instruments. Verkkodokumentti. <<http://www.ni.com/pdf/manuals/376047a.pdf>>. Päivitetty elokuu 2013. Luettu 13.2.2016.

Picaxe. 2016. Picaxe Store. Verkkodokumentti. <http://www.picaxestore.com/index.php/en_gb/picaxe/project-boards.html?limit=all>. Luettu 2.5.2016.

PmodALS Reference Manual. 2016. Digilent. Verkkodokumentti. <https://reference.digilentinc.com/_media/pmod:pmod:pmodALS_rm.pdf>. Päivitetty 15.4.2016. Luettu 20.4.2016.

PmodCMPS Reference Manual. 2015. Digilent. Verkkodokumentti. <https://reference.digilentinc.com/_media/pmod:pmod:pmodCMPS_rm.pdf>. Päivitetty 17.8.2015. Luettu 13.4.2016.

PmodHB5 Reference Manual. 2016. Digilent. Verkkodokumentti. <https://reference.digilentinc.com/lib/exe/fetch.php?media=pmod:pmod:pmodHB5_rm.pdf>. Päivitetty 12.4.2016. Luettu 20.4.2016.

Raspberry Pi. 2016. RS Components for International Customers. Verkkodokumentti. <<http://fi.rsdelivers.com/catalogue/search.aspx?query=raspberry+pi>>. Luettu 2.5.2016.

Raspberry Pi 1 Model B. 2016. Raspberry Pi Foundation. Verkkodokumentti. <<https://www.raspberrypi.org/products/model-b/>>. Luettu 1.4.2016.

Servomootorit AC. 2016. SKS Group. Verkkodokumentti. <http://www.sks.fi/www/_ServomootoritAC>. Luettu 4.5.2016.

Quick Start Guide: The Raspberry Pi – Single Board Computer. 2014. Raspberry Pi & Wiki. Verkkodokumentti. <<https://www.element14.com/community/docs/DOC-65470//raspberry-pi-technical-data->>. Päivitetty 14.1.2014. Luettu 20.4.2016.

What is Arduino? 2016. Arduino. Verkkodokumentti. <www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Luettu 1.5.2016.