

CHALMERS



Inertial Measurement Unit

Av miniatyrformat med CAN-interface

CARL-JOHAN HÄLL

JOEL OLOFSSON

Examensarbete

Högskoleingenjörsprogrammen för data- och elektroteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Institutionen för data- och informationsteknik

Göteborg, Sverige, 2013

Innehållet i detta häfte är skyddat enligt Lagen om upphovsrätt, 1960:729, och får inte reproduceras eller spridas i någon form utan medgivande av författaren. Förbudet gäller hela verket såväl som delar av verket och inkluderar lagring i elektroniska och magnetiska media, visning på bildskärm samt bandupptagning.

© Carl-Johan Häll, Joel Olofsson, Göteborg 2013

Abstract

CPAC Systems develops systems and equipment for heavy equipment vehicles. CPAC Systems aims to develop equipment for measuring the position and orientation of a body. Units with this characteristics are often referred to as an Inertial Measurement Unit or simply IMU. The IMU developed in this thesis work should be able to acquire the orientation and movement of heavy construction equipment. This will be accomplished by fusing information from three different types of sensors: an accelerometer, a gyroscope and a magnetometer. The IMU should provide a CAN bus interface for external communication, including re-programming of the unit. This will require sophisticated hardware and software design. The unit should also be able to cancel disturbance from surrounding materials and movement. The unit is developed for construction equipment, but could be placed on any object where determination of orientation is desired.

Sammanfattning

CPAC Systems utvecklar system och apparatur för entreprenadmaskiner. CPAC Systems önskar att utveckla ett mättdon för att kunna positionera en kropp. Målet med examensarbetet är att skapa ett sådant mättdon, komplett med utveckling av kretskort och mjukvara. Mättdon med de här egenskaperna brukar benämnas Inertial Measurement Unit, eller förkortat IMU. IMUn som har utvecklats under det här examensarbetet skall kunna presentera mätdata som kan visualisera rörelse och rotation. Detta möjliggörs genom att sammanställa värden från tre olika sensorer: en accelerometer, ett gyroskop och en magnetometer. IMUn skall även kunna möjliggöra programmering av IMUn via en CAN-buss, detta kräver i sin tur sofistikerad hårdvara och mjukvara. Enheten skall även kunna filtrera bort störningar från material och rörelse. IMUn är konstruerad för entreprenadmaskiner, men kan egentligen placeras på ett godtyckligt objekt för att kunna mäta kroppens rörelse och rotation.

Förord

Den här rapporten är en del av vårt examensarbete för högskoleingenjörsprogrammet för Elektro- och Datateknik vid Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. Examensarbetet är om 15HP. Arbetet har pågått under tio veckor under våren 2013 hos uppdragsgivaren CPAC Systems.

Handledare hos CPAC Systems har varit Peter Forsberg. Handledare på Chalmers Tekniska Högskola via Institutionen för data- och informationsteknik har varit Sakib Sisteck.

Vi skulle först vilja tacka Peter Forsberg, vår handledare på CPAC Systems för all hjälp, samt CPAC Systems för att ha erbjudit oss chansen att genomföra detta examensarbete. Vi skulle även vilja tacka Magnus Johansson, Bo Eriksson och Fredrik Karlemon som har tagit sig tid att besvara våra frågor och väglett oss vid vår hårdvarukonstruktion. Även ett stort tack till Martin Jangeberg som har givit oss nyttiga tips om fallgropar vid uppstart av ett mjukvaruprojekt.

Sist vill vi tacka Sakib Sisteck för all den energi och motivation han givit oss under examensarbetets gång.

Carl-Johan Häll
Joel Olofsson

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
1.3	Mål	2
1.4	Avgränsningar	2
2	Teknisk bakgrund	3
2.1	Inertial Measurement Unit (IMU)	3
2.1.1	Accelerometer	3
2.1.2	Gyroskop	3
2.1.3	Magnetometer	3
2.2	Mikrokontroller	4
2.3	Sensorer	4
2.3.1	Val av sensorer	4
2.3.2	MPU-6050	7
2.3.3	HMC5883L	7
2.4	Standarder	8
2.4.1	CAN	8
2.4.2	I ² C	11
3	Genomförande	15
3.1	Hårdvarukonstruktion	15
3.1.1	Strömförsörjning	15
3.1.2	CAN-hantering	17
3.1.3	I ² C	18
3.1.4	Sensorer	20
3.1.5	Mikrokontroller	20
3.1.6	Kretskortslayout	21

3.2	Mjukvaruutveckling	23
3.2.1	Huvudprogram	23
3.2.2	CAN	23
3.2.3	I ² C	23
3.2.3.1	MPU-6050	25
3.2.3.2	HMC5883L	26
3.2.4	Läsning av data	26
3.2.5	Beräkning av data	27
3.2.5.1	Kalman filter	27
3.2.5.2	Vinkelberäkning	29
4	Resultat	31
4.1	Hårdvara	31
4.2	Mjukvara	31
4.3	Verifiering	32
5	Slutsats	33
5.1	Resumé	33
5.2	Generaliseringar	33
5.3	Kritisk diskussion	34

Beteckningar

ACK	Acknowledgement
AD	Analog to Digital
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
CAN	Controller Area Network
GPS	Global Positioning System
I ² C	Inter-Integrated Circuit
IMU	Inertial Measurement Unit
LSB	Least Significant Bit
PCB	Printed Circuit Board
RISC	Reduced Instruction Set Computer
RMS	Root Mean Square (effektivvärde)
SCL	Serial CLock
SDA	Serial DAta line
SPI	Serial Peripheral Interface
TVS	Transient Voltage Suppression
TWI	Two Wired Interface

Kapitel 1

Inledning

1.1 Bakgrund

CPAC Systems är ett fristående företag inom Volvogruppen. De arbetar bland annat med systemintegration av säkerhetskritiska system för fordonsindustrin. CPAC Systems önskar att utvärdera möjligheten att utveckla ett mätdon för att kunna presentera en kropps positionering och orientation. På entreprenadmaskiner kan denna positionering t.ex. ske med hjälp av GPS samt beräkning över den egna geometrin till önskad del. Tillsammand med detta förfaringssätt kan information från en position ges i önskad del i arbetsmekaniken, vilket kan göras med hjälp av ett antal sofistikerade Inertial Measurement Units, hädanefters benämnt IMU. Det är då viktigt att kunna motverka de dynamiska effekterna, det vill säga att kunna indikera en sann inklinations vinkel under alla förhållanden.

1.2 Syfte

Syftet med det här examensarbetet är att konstruera en liten IMU med full kompensering av drift. Drift är en felvisande effekt i sensorer, som är en konsekvens av den grundläggande tekniken i sensorerna.

Enheten skall ge en korrekt vinkelanvisning gentemot horisontalplanet. Enheten skall sköta all kommunikation via CAN.

1.3 Mål

- Designa kretskort för IMU
- Utvärdera komponenter för konstruktion av hårdvara
- Använda tillgänglig design av hårdvara och mjukvara i så stor utsträckning som möjligt, men förbättra där det behövs
- Bygga in i tåligt chassi för montering på entreprenadmaskin
- Testa färdig konstruktion av IMU på en entreprenadmaskin

1.4 Avgränsningar

Avgränsningar som är uppsatta av uppdragsgivaren är följande:

- All kommunikation skall ske via CAN
- Programmering av styrenhet via CAN
- Utdata skall presenteras som rådata från sensorer såväl som behandlad data

Kapitel 2

Teknisk bakgrund

2.1 Inertial Measurement Unit (IMU)

En IMU är en elektronisk enhet som kan bestå av accelerometrar, gyroskop och magnetometrar. Med hjälp av dessa sensorer kan hastighet, positionering och gravitation beräknas. Vanliga tillämpningar är allt från sensorer i mobiltelefoner till flygindustrin [19, 5].

2.1.1 Accelerometer

En accelerometer mäter accelerationen den utsätts för. Inuti accelerometern finns en massa som flyttar sin tyngdpunkt och massa då den accelererar, den skapar då ett tryck på det hölje som omsluter massan. Genom att mäta trycket på höljet kan accelerationen från sensorn utläsas [19].

2.1.2 Gyroskop

Ett gyroskop mäter rotationen på var axel. Detta gör den genom att mäta rörelsemängdsmomentet hos en kropp. Genom att kombinera alla dessa axlar kan kroppens alla vinklar urskiljas [19].

2.1.3 Magnetometer

En magnetometer mäter ett magnetiskt fälts styrka på var axel i ett tredimensionellt rum. Fältstyrkan på alla axlar beräknas sedan till en resultant för att visa magnetisk riktning och styrka [11, 25].

2.2 Mikrokontroller

För kommunikation och beräkning av rådata behövs en styrenhet. Styrenheten skall ta emot rådata från sensorerna samt utföra beräkningar på dessa för att kunna presentera användbar data till en huvudstyrenhet. Styrenheten kommunicerar med andra enheter på hjullastaren med hjälp av en CAN-buss. Styrenheten behöver möta kraven för kommunikation med digitala sensorer, CAN-kommunikation samt att vara lämplig för tillämpningar inom fordonsindustrin.

Som styrenhet har STM32F107RC från STMicroelectronics önskats av uppdragsgivaren, detta på grund av att utvecklingsverktyg har funnits tillgängliga. STM32-serien har en 32-bitars processorer med ARM-arkitektur. Kretsfamiljen STM32 kännetecknas av ett gediget utbud av möjligheter till kringutrustning och mjukvarubibliotek.

STM32-serien kännetecknas av:

- Låg kostnad ur ett pris/prestanda perspektiv
- Stort utbud av hårdvarufunktioner med ARM Cortex-M3 Core
- Låg energiförbrukning
- Snabb minneshantering
- Hög prestanda

STM32F107RC är lämpad för den här applikationen då den har stöd för två av varandra oberoende CAN-bussar. Den stödjer även gränssnitten för I²C och SPI som används digital kommunikation på kretsnivå [22].

2.3 Sensorer

2.3.1 Val av sensorer

Vid val av sensorer undersöktes marknaden efter liknande funktion, kostnad samt tillgänglighet. Efter det att ett begränsat urval av sensorer tagits fram, ställdes dessa mot varandra där egenskaper som mätnoggrannhet, inställningsmöjlighet samt tillgänglig dokumentation och information om enheten från tillverkaren prioriterades.

Accelerometer De tre accelerometrarna som sållades ut var från tillverkaren InvenSense (MPU-90x0 och MPU-60x0) och STMicroelectronics (LSM303d). De tre sensorerna hade likvärdiga egenskaper gällande mätområde och stöttålighet, dock erbjöd InvenSense lättillgänglig och mer grundlig dokumentation om sina produkter.

Accelerometer	MPU (-60x0 & -90x0) [5, 6]	LSM303d [23]	Enhet
Mätområde	$\pm 2, \pm 4, \pm 6, \pm 8, \pm 16$	$\pm 2, \pm 4, \pm 6, \pm 8, \pm 16$	g
Känslighet	0.061, 0.122, 0.244, 0.488	0.061, 0.122, 0.183, 0.244, 0.732	mg/LSB
Störningsdensitet	400@1kHz	150@100Hz	$\frac{\mu g}{\sqrt{Hz}}$
Stöttålighet	10k	10k	g

Tabell 2.1: Jämförelse av accelerometrar

Gyroskop Då val av gyroskop utvärderades återfanns även här tillverkarna InvenSense (MPU-90x0 och MPU-60x0) och STMicroelectronics (L3GD20). I detta fall visade sig större olikheter mellan de olika tillverkarnas produkter. InvenSense produkter utmärkte sig med större mätnoggrannhet och lägre störningskänslighet.

Gyroskop	MPU (-60x0 & -90x0) [5, 6]	L3GD20 [24]	Enhet
Mätområde	$\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000$	$\pm 250, \pm 500, \pm 2000$	$^{\circ}/s$
Känslighet	7.6, 15, 30.7, 61	8.75, 17.5, 70	$\frac{m^{\circ}/s}{LSB}$
Störningsdensitet	0.005	0.03	$\frac{^{\circ}/s}{\sqrt{Hz}}$
Stöttålighet	10k	10k	g

Tabell 2.2: Jämförelse av gyroskop

Magnetometer Vid val av magnetometer återfanns tre enheter. Honeywell (HMC5883L), STMicroelectronics (LSM303D) och AsahiKASEI (AK8975). AK8975 är implementerad av InvenSense i deras MPU-9xx0 serie. Efter kontakt med tillverkaren av denna krets kunde begränsad dokumentation uttrönas. Tillverkaren av kretsen avrådde även från implementering av sensorn AK8975 för fordonsapplikationer [16]. Då Honeywell enligt produktblad för HMC5883L erbjuder mjukvarufilter för motverkan av störningar från hårt och mjukt järn sågs här en möjlighet för noggrannare mätvärden.

Magnetometer	HMC5883L [2]	LSM303D [23]	AK8975 [1]	Enhet
Mätområde	$\pm 1, \pm 2, \pm 4, \pm 8$	$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 12$	± 12	gauss
Känslighet	0.73(MIN) 4.36(MAX)	0.080, 0.160, 0.320, 0.479	3 (MAX)	mgauss/LSB
Störningsdensitet	2	5	-	mgauss/RMS
Känslighet vid korsade axlar	± 0.2	± 1	-	%FS/gauss
Maximal fältstyrka	-	10000	-	gauss
Maximalt magnetiskt störfält	-	20	-	gauss
Chocktolerans	-	10k	-	gauss

Tabell 2.3: Jämförelse av magnetometrar

Slutsats Slutligen återfanns tre alternativ:

- MPU-60x0 (accelerometer och gyroskop) med HMC5883L
- MPU-90x0 (accelerometer, gyroskop samt magnetometer)
- LSM303D (accelerometer och magnetometer) med L3GD20 (Gyroskop)

Enligt avrådande från tillverkaren InvenSense lämpade sig MPU-90x0 ej för vår implementation på grund av en för stor störningskänslighet i den integrerade magnetometern (AK8975) [16].

Eftersom dokumentationen kring MPU-6xx0 var god och ett mer noggrant gyroskop gentemot andra tillverkare valdes MPU-60x0. MPU-60x0 erbjuder även enkel implementation av en extern magnetometer i form av en extern I²C-buss och en intern ASIC med beräkningsfunktioner.

2.3.2 MPU-6050

MPU-6050 är en ytmonterad mikroelektromekanisk krets som består av en treaxlig gyrometer samt en treaxlig accelerometer tillsammans med en ASIC som tillverkas av InvenSense. Dessa två sensorers data ges som indata till den inbyggda ASICen för att kunna ge en mer precis utdata än vad en enkel accelerometer eller gyrometer kan ge. Gyroskopet stödjer mätning från $\pm 250^\circ/\text{s}$ till $\pm 2000^\circ/\text{s}$ och accelerometern har ett mätområde från $\pm 2\text{g}$ till $\pm 16\text{g}$ beroende på krav på upplösning vid samplingen. Med hjälp av MPU-6050 kan rådata hämtas och beräkningar utföras på ovan nämnda styrenhet. MPU-6050 kan kommunicera med andra enheter i ett datorsystem via en I²C-buss. MPU-6050 har även en extra extern I²C-buss. Den externa I²C-bussen är enligt tillverkaren till för att ge möjligheten att kommunicera med en 3-axlig magnetometer. MPU-6050 kan då ställas till ett I²C-master läge och på så sätt ta emot data kontinuerligt från den externa magnetometern och placera den i ett eget lokalt register. På så sätt kan hämtning och beräkning underlättas då kommunikationen mellan styrenhet och MPU-6050 endast består av två noder [5].

2.3.3 HMC5883L

HMC5883L är en ytmonterad digital treaxlig magnetometer som består av magnetoresistiva sensorer som tillverkas av Honeywell. Med hjälp av HMC5883L kan den magnetiska riktningen av koordinatsystem beräknas. Tillsammans med den beräknande rådatan från MPU-6050 kan en riktning i förhållande till jordens magnetfält bestämmas av det erhållna koordinatsystemet. HMC5883L kommunicerar med andra enheter via en I²C-buss [2].

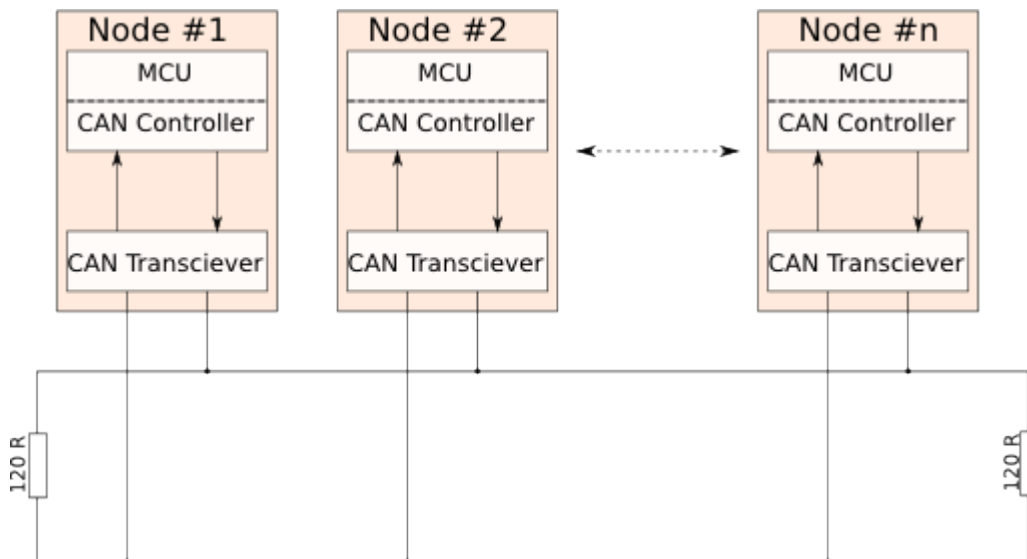
2.4 Standarder

2.4.1 CAN

CAN-bussen (Controller Area Network) är en buss där kommunikationen sker seriellt. Data skickas ut på bussen vid behov och möjlighet finns. En nod på CAN-bussen kan även begära data av andra noder. Bussen togs fram av Bosch och Intel under 80-talet då man såg ett behov av en buss för att kommunicera med all elektronik och mikroprocessorer som börjat ta plats i fordon. Som utgångspunkt för utvecklingen siktade man på att all elektronik i ett fordon skulle kunna styras via den nya bussen [18].

CAN-bussen kännetecknas av dess, i förhållande, höga hastighet, samt dess flexibilitet. Då det i ett system existerar en CAN-buss är det möjligt att ansluta en ny nod, utan att på andra sätt ändra konfiguration hos andra redan anslutna noder [18].

CAN-bussen är en så kallad "multi-master" buss, vilket innebär att det inte finns någon hierarkisk arkitektur utan alla noder anslutna till bussen kan sända och begära data [18]. För att undvika kollisioner på bussen använder sig CAN-bussen av prioritering i form av arbitrering [18]. Var nod ansluten till bussen erhåller en unik adress. Då en nod vill sända ett meddelande på bussen skickas först en Start of Frame, detta följt av en adress. Om flera noder vill sända meddelande på bussen samtidigt tilldelas bussen till en av noderna. Detta sker genom så kallad arbitrering. Båda nodernas adresser kommer då att jämföras bit för bit, till dess att noden med lägst adress erhållits. Noden med lägst adress kommer då att tilldelas bussen för att få sända sitt meddelande. Noden med den högre adressen slutar då att sända sitt meddelande och väntar tills bussen blivit ledig för att då återigen försöka sända sitt meddelande [18].



Figur 2.1: Exempel på en CAN-buss

CAN-bussen specificerades i en ny version, 2.0, av Bosch 1991. Version 2.0 finns i två format, standard (2.0a) och extended format(2.0b). Standardformatet använder sig av adresser på 11-bitars längd, medan extended format använder sig av 29-bitars adresser, således erbjuder CAN 2.0b möjlighet att adressera fler noder [10].

På CAN-bussen kan fyra olika typer av meddelanderamar tillämpas [18, 10]:

- Data Frame
- Remote Frame
- Overload Frame
- Error Frame

Data Frame är det vanligaste meddelandet. I detta meddelande skickar en nod ett meddelande innehållande information till andra noder, det är alltså data frame som används för dataöverföring. Remote frame används för att av en mottagarnod efterfråga information av en sändarnod. Error frame skickas av noder som upptäcker ett protokollfel på bussen. Overload frame skickas av

en nod som av någon anledning inte klarar av att ta emot alla meddelande som skickas.

Ett meddelande av data frame-typ är uppdelad i sju delar

SOF – Start of frame 1-bit lång, skall alltid vara en logisk 0. Används för att synkronisera noder på bussen [18, 10].

ARB – Arbitration Arbitreringsfältet skiljer mellan standardformatet samt det utökade formatet.

Standardformatet innehåller identifierare om 11-bitar samt en bit, remote transmission request (RTR). RTR-biten talar om huruvida meddelandet är av typen data frame eller remote frame.

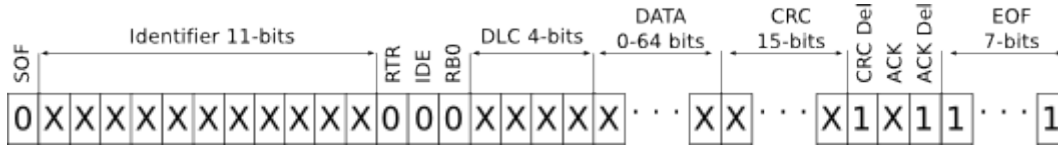
Om ett meddelande är av det utökade formatet ersätts RTR-biten av en SRR-bit. SRR, substitute remote request. Detta används för att göra meddelandet kompatibelt med noder som endast använder sig av standard-meddelanden. För det utökade formatet läggs även IDE-biten (se CTRL) i arbitreringsfältet, detta för att meddela noder att meddelandet är av det utökade formatet. Sist tillkommer de sista 18 adresser [18, 10].

CTRL – Control I kontrollfältet skiljs det utökade och standardformat för data frames åt. För standardformat återfinns här IDE-biten (Se arbitreringsfältet för utökat format), samt en reserverad bit r0. För det utökade formatet finns ytterligare en reserverad bit, detta för att ersätta IDE-biten som flyttats till arbitreringsfältet. I båda formaten kommer fyra bitar DLC, data length code. Dessa bitar anger hur många byte datafältet kommer att innehålla [18, 10].

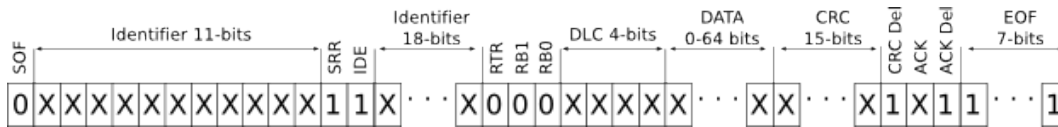
CRC – Cyclic redundancy Check CRC är en kontrollsumma för fälten som redan sänts. Summan används av mottagaren för att säkerställa att alla bitar nått fram. Summan består av 15-bitar samt en avgränsningsbit [18, 10].

ACK – Acknowledge Acknowledgefältet används av mottagare för att meddela sändare att meddelandet är mottaget [18, 10].

EoF – End of Frame I slutet av ett meddelande skickar sändaren sju bitar för att indikera att sändning är slutförd [18, 10].



Figur 2.2: “Standard” format för en data frame

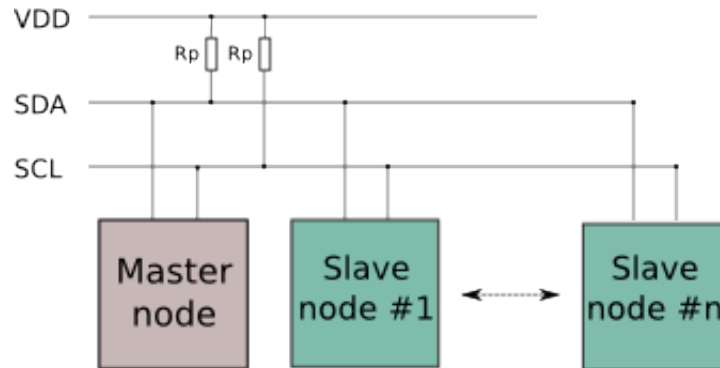


Figur 2.3: “Extended” format för en data frame

2.4.2 I²C

I²C (inter-integrated circuit) är en multimaster-buss för kommunikation mellan integrerade kretsar. Standarden utvecklades av Philips under 1980-talet [4, 17]. I²C bussen är ett TWI (two wired interface), där data skickas synkront seriellt på två ledare, SDA och SCL. SDA är ledaren där data skickas på och SCL är den klockbärande signalen för att göra kommunikationen synkron [4].

Bussen består förutom av de två ledarna minst en master-nod och minst en slav-nod samt två så kallade pull-up resistorer. Antalet slavnoder begränsas av adressutrymmet som antar adresser om 7- eller 10-bitar samt av att bussens kapacitans ej får överstiga 400pF [3, 13, 17]. Fler noder medför ökad kapacitans på bussen då varje nod på bussen bidrar till den totala kapacitansen. Varje nod ansluten på bussen har av tillverkaren en förprogrammerad adress, dock så erbjuder vissa tillverkare möjligheten att manipulera en eller flera adressbitar för att möjliggöra flera noder av samma typ på samma buss. Pull-up resistorerna används för att säkerställa att rätt nivå för logisk hög nivå erhålls. Logisk hög nivå specificeras enligt I²C-protokollet till $0.7 \times V_{dd}$ och logisk låg nivå till $0.3 \times V_{dd}$.



Figur 2.4: Exempel på en I²C-buss

Värdet på pull-up resistorerna bestäms av matningsspänningen, den totala kapacitansen samt inströmmen vid logisk hög nivå och beräknas enligt algoritm 1:

I²C-protokollet kan tillämpas med en master/slave hierarki samt även med en multi-master hierarki. De olika hierarkierna beskrivs nedan.

Master-Slave Hierarki Master-slave hierarkin struktureras genom att en Master-nod sänder en klocksignal samt initierar kommunikationen med slav-noderna. Slav-noderna i sin tur mottar klocksignalen och besvarar den initierade kommunikationen från Master-noden [17].

För att en slav-nod skall få sända data börjar master-noden med att sända ett start-meddelande och sedan adressen till den nod master-noden vill kommunicera med. Vill master-noden skriva till en slav-nod sätter den biten följt av adressen till "noll" och lägger sedan ut datan som skall skrivas till noden. Slav-noden svarar sedan med ett ACK-meddelande, i form av en "etta" på bussen, därefter sänds eventuellt fler meddelanden. Vill en master-nod istället läsa från en slav-nod skriver mastern en "etta" på biten som följer efter adressen. Master-noden svarar sedan med ett ACK-meddelande efter

Algorithm 2.1 Formler för dimensionering av pull-up resistorer [26, 13]

$$R_p \geq \frac{V_{dd} - V_{ol}}{i_{ol}}$$

$$V_{ol} = \begin{cases} 0.4V & \text{då } V_{dd} > 2V \\ 0.2V & \text{då } V_{dd} \leq 2V \end{cases}$$

$$R_p \leq \frac{T_r}{(T_2 - T_1) \times C_{bus}}$$

T_r = Maximala stigtiden

C_{bus} = Bussens totala kapacitans

T_1 = Stigtiden för att nå logisk låg nivå

T_2 = Stigtiden för att nå logisk hög nivå

T_1 och T_2 beräknas enligt:

$$T_2 = -RC \times \ln 1 - \frac{0.7 \times V_{dd}}{V_{dd}} \rightarrow T_2 = RC \times 1.20397$$

$$T_1 = -RC \times \ln 1 - \frac{0.3 \times V_{dd}}{V_{dd}} \rightarrow T_1 = RC \times 0.356675$$

varje meddelande. En sändning termineras av att en master-nod sänder en stoppbit [17].

Multi-Master Hierarki I²C är en multi-master buss vilket innebär att flera noder anslutna till bussen kan agera master, alltså bestämma vilken eller vilka anslutna slav-noder som får sända och när de/den skall sända [13].

Då en buss har flera master-noder är det av stor vikt att kollisioner ej uppstår. För att undvika detta använder sig I²C av två metoder, Synkronisering av klocka och arbitrering av bussen [13].

I²C-bussen kan implementeras i fem olika hastigheter:

- Standard-mode upp till 100 kbit/s
- Fast-mode upp till 400 kbit/s

- Fast-mode plus upp till 1 Mbit/s
- High-speed mode upp till 3.4 Mbit/s
- Ultra fast-mode upp till 5Mbit/s (Unidirectional) [13]

Samtliga lägen är bakåtkompatibla utom Ultra fast-mode, detta då denna endast stöder enkelriktad kommunikation medan de övriga stödjer dubbelriktad kommunikation [13]. Enheter och kretsar med stöd för kommunikation via I²C-bussen har av tillverkaren ofta en förutbestämd maxhastighet.

Kapitel 3

Genomförande

3.1 Hårdvarukonstruktion

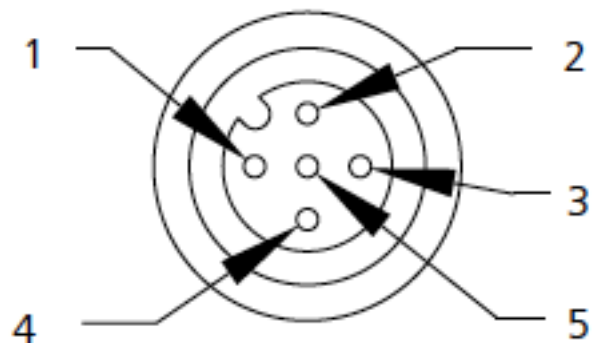
Enligt uppdragsgivarens krav skall kretsen kunna hantera en extern matningsspänning i intervallet 6V till 36V.

Första steget i hårdvarukonstruktionen var att skapa en schemaritning av kretsen, detta gjordes med hjälp av mjukvaran OrCAD Capture från Cadence. Efter en undersökning vilken komponenter som behövdes för att möjliggöra konstruktionen placerades komponenterna ut. Det resulterade i en uppdelning av kretskortet i fyra block.

3.1.1 Strömförsörjning

Kretsen får sin matningsspänning via kontaktdonet för CAN som är en M12-kontakt. Kontaktdonet för även med sig kommunikationsportar för Hög och Låg CAN-signal..

De integrerade kretsar på kortet kräver likriktade spänningsnivåer på både 5V och 3.3V vilket medför att den externa matningsspänningen från CAN-bussen måste regleras då den externa matningsspänningen ligger inom intervallet 6V till 36V.



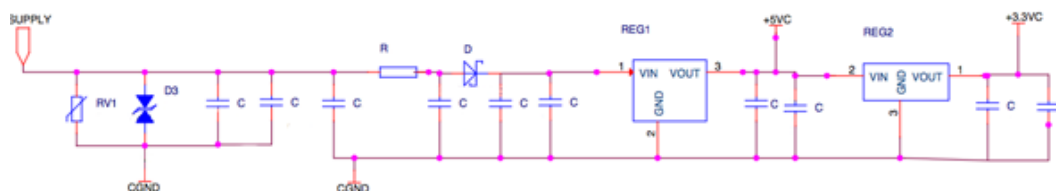
Figur 3.1: M12-kontakt

Kretsen är även tvungen att klara av spänningspikar och transienter [27]. Det hanteras genom att placera en varistor samt en transientdiod parallellt vid inloppet av den externa matningsspänningen. Kondensatorer och en seriekopplad Schottkydiod har även placerats för att möjliggöra en jämn och likriktad spänning som är skyddad mot eventuella överslag i spänning och ström.

En regulator är placerad efter spänningsskyddssteget som tar den externa matningsspänningen och regulerar den ner till en nivå på 5V.

5V spänningen passerar sedan ytterligare kondensatorer för att eliminera eventuellt rippel från spänningsomvandlingen. Därefter kan en referensspänning på 5V erhållas. 5V spänningen matar i sin tur en ytterligare regulator för att få ner den till en nivå på 3.3V. Även denna regulator filtreras med hjälp av kondensatorer för att erhålla en rippelfri referensspänning på 3.3V.

Kondensatorerna är placerade enligt tillverkarnas datablad och givna värden från uppdragsgivaren.



Figur 3.2: Schemaritning av spänningssteg

3.1.2 CAN-hantering

Hanteringen av CAN finns för att reglera CAN-trafiken så att den kan behandlas av kretskortets mikrokontroller.

Det är även nödvändigt att placera ut skydd för att begränsa transienter och elektrostatiska laddningar då hårdvarukonstruktioner inom fordonsindustrin utsätts för störningar och transienter [27]. För att skydda mikrokontroller från störningar finns flera förhållningssätt att ta ställning till.

Twisted Pair (TP) Twisted pair är vanligt förekommande vad gäller de flesta hårdvarugränssnitt och återfinns ibland annat i Ethernet-standarderna. TP motverkar magnetfält från en ledare genom att tvinna två stycken ledare vilket medför att de två ledarnas magnetfält motverkar varandra [8, 9, 12].

Filter För att eliminera ytterligare störningar på CAN-bussen används låg-pass filter. Filtret släpper alltså igenom signaler, medan högfrekvent brus som kan misstolkas och störa andra signaler elimineras. Filter används i fördel tillsammans med TP [8, 9, 12].

CAN Choke Med en CAN Choke kan Common Mode Rejection Ratio (CMRR) höjas för signalerna till CAN-transcievern. CAN-choken kommer att höja impedansen för spänningskillnaden vid ett recessivt (logisk etta) tillstånd, samt sänka densamma vid ett dominant (logisk nolla) tillstånd [8, 9, 12].

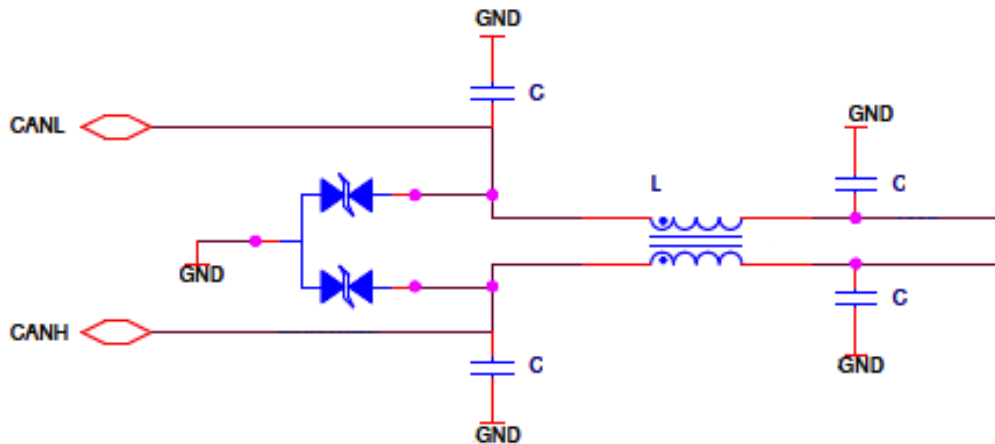
TVS-diod För att skydda CAN-transciever samt mikrokontroller från höga transienter i samband med anslutning till CAN-bussen kan en transientskyddsdiod placeras i anslutning till CAN-transcievern. Dioden har en

reaktionstid på en nanosekund och motverkar då snabbt transienter [8, 9, 12].

Då en kontrollenhet för CAN-gränssnittet finns inbyggt på mikrokontrollern behöver hårdvarukonstruktionen endast en CAN-transceiver för att kunna sända/mottaga på entreprenadmaskinens CAN-buss.

CAN-hanteringen är konstruerad sådan att de direkta signalerna från CAN-bussen först får passera ett transientskydd i form av en integrerad krets med två stycken transientdioder samt kondensatorer. Därefter går signalerna till en drossel för att strypa höga frekvenser och vidare via parallellkopplade kondensatorer.

Signalerna går därefter vidare till CAN-transceivern för att kunna bearbetas av mikrokontrollern.



Figur 3.3: Implementation av CAN-skydd

3.1.3 I²C

Då MPU-6050 har stöd för Standard-mode och Fast-mode dimensioneras R_p enligt följande. I fallet då matningsspänningen är 3.3V medför det $V_{ol} = 0.4V$ får båda fallen.

Algoritm 3.1 Beräkning av pull-up resistor

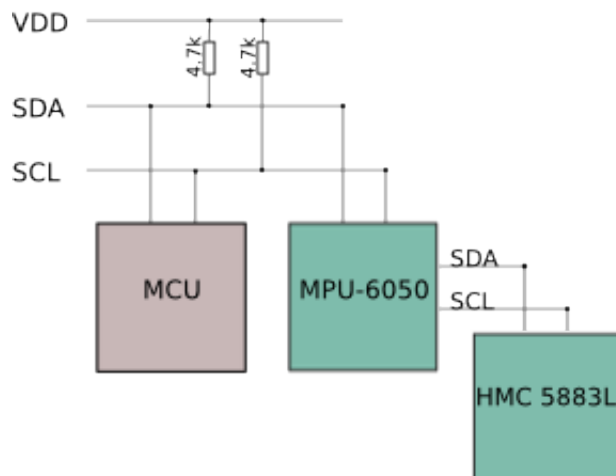
Standard-mode: $T_r = 1000ns$ [13]

$$R_p = \begin{cases} R_p \geq \frac{3.3-0.4}{3mA} = 966.7\Omega \\ R_p \leq \frac{1000ns}{(1.203970-0.35667) \times 10 \times 10^{-11}} = 118k\Omega \end{cases} \rightarrow 966.7\Omega \leq R_p \leq 118k\Omega$$

Fast-mode: $T_r = 300ns$ [13]

$$R_p = \begin{cases} R_p \geq \frac{3.3-0.4}{3mA} = 966.7\Omega \\ R_p \leq \frac{1000ns}{(1.203970-0.35667) \times 10 \times 10^{-11}} = 35.4k\Omega \end{cases} \rightarrow 966.7\Omega \leq R_p \leq 35.4k\Omega$$

Eftersom intervallet för pull-up resistorn i fallet för standard-mode är en del av intervallet för fast mode innebär det att ett värde inom intervallet $966.7\Omega \leq R_p \leq 35.4k\Omega$ möjliggör kommunikation i båda hastigheterna. I enlighet med gällande implementationer av I²C-bussen med STM32F107RC, datablad för STM32F107RC samt beräkningar har kretskortet bestyckats med två pull-up resistorer om $4.7k\Omega$ [22, 26].



Figur 3.4: I²C-implementation

3.1.4 Sensorer

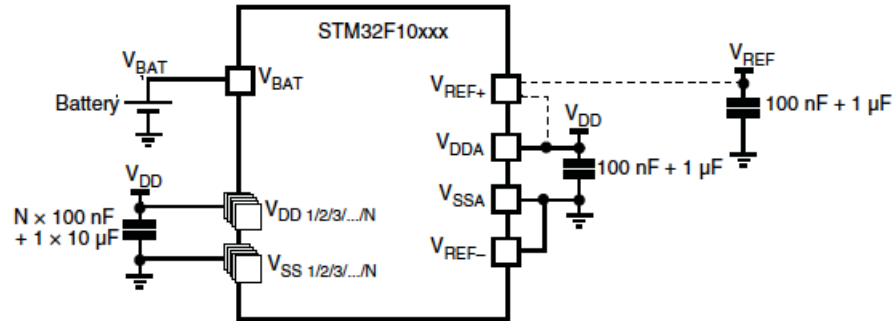
Sensorblockets funktion är att skicka rå mätdata från sensorer till mikrokontrollen för ytterligare beräkning. Kommunikation mellan MPU-6050 och mikrokontroller sker via en I²C-buss. MPU-6050 kommunicerar sedan i sin tur med HMC5883L via den externa I²C-bussen som finns tillgänglig på MPU-6050. MPU-6050 agerar då Master och läser data från HMC5883L och lagrar detta i ett register.

3.1.5 Mikrokontroller

Hårdvarukonstruktionen för mikrokontrollen består av komponenter för hantering av referensspänningar för logiska nivåer och AD-omvandlingar samt en extern oscillator.

Eftersom projektets implementation inte använder sig utav några referensspänningar förutom matningsspänningen till kretsen kopplas de oanvända re-

ferensspänningportarna enligt tillverkarens datablad. Referensdatabladet för mikrokontrollen anger att de oanvända portarna skall kopplas med parallellt med avkopplingskondensatorer som går från +3.3V till jord enligt angivna värden beroende på antalet oanvända portar [21].



Figur 3.5: Exempel för hantering av matningsspänning och referensspänning från datablad [21]

En kristall används för att skapa en stabil och tillförlitlig klocka till mikrokontrollen och de angivna belastningskapacitanserna är utsatta enligt producentens datablad.

3.1.6 Kretskortslayout

Kretskortets layout, eller PCB (Printed Circuit Board), för IMUn designades i CAD-verktyget Cadence Allegro PCB Editor. För att erhålla en så liten storlek som möjligt är kortet dubbelsidigt det är alltså komponenter placerade på båda sidor om kortet på ovan-och undersida. Kortet är kvadratisk med sidor om 32 millimeter, med 6 lager, varav ett för matningsspänning, jord och fyra stycken signalbärande lager. Mellan varje lager finns ett tunt isolerande skikt av laminerat glasförstärkt epoxy av typen FR-4.

Lager 1 - Top Top-lagret är ett signalbärande lager där komponenter är placerade med tillhörande komponenter. Lagret är designat för att klara högra spänningar och innefattar komponenter för strömförsörjning och CAN-hantering.

Lager 2 - Ground Helplanslager för jordnivå. De andra lagerna kommer åt detta lager med hjälp utav viahål. Detta lager fungerar även som avskärmning för andra mer känsliga signalbärande lager.

Lager 3 - IS1 IS1 är ett signalbärande som underlättar signaldragningen och platsbitsen på kortet. IS2 sköter kommunikation mellan komponenter som är placerade på top och bottom lagren.

Lager 4 - IS2 IS2 är likvärdigt IS1 och har samma funktion.

Lager 5 - 3.3VC 3.3VC är ett helplanslager för matningsspänning. Då de flesta komponenter på kretsen använder en likriktad matningsspänning på just 3.3V är det praktiskt att använda ett helplanslager för implementationen. De resterande lagren kommer åt planet med hjälp av viahål.

Lager 6 - Bottom Bottom-lagret är ett signalbärande lager där känsliga komponenter såsom sensorer och mikrokontroller är placerade. Lagret är designat så att vår magnetometer inte har några strömförande ledare under sig då detta skapar mätfel på grund av alstrade magnetfält från ledare.

3.2 Mjukvaruutveckling

Mjukvaran skall uppfylla följande uppgifter:

- Omprogrammering av styrenhet via CAN
- Hämtning och beräkning av sensordata
- Sänding av beräknad data via CAN

Utveckling av mjukvara har skett i utvecklingsmiljön IAR Embedded Workbench for ARM från IAR. Programvaran har ett brett stöd för kretsar från STMicroelectronics, möjlighet till dissasemblering i realtid samt stöd för flertalet kända debuggers och programmerare. Möjlighet finns att skriva vår applikation i C89, C99 och C++, och i fallet för denna applikation valdes C99 då detta är standard hos uppdragsgivaren, samt att flertalet av standardbiblioteken tillhandahållna från STMicroelectronics är utvecklade i denna version av C.

3.2.1 Huvudprogram

Huvudprogrammets syfte i mjukvaruutvecklingen är huvudsakligen att initiera av hårdvara och avbrottshantering. Övriga funktioner hanteras av subrutiner som aktiveras av tidsbaserade avbrott, dessa avbrott genereras med hjälp av en realtidsklocka. Vid vissa tider så hoppar alltså huvudprogrammet till subrutiner som utför operation så som mätningar, CAN-kommunikation och CAN-programmering.

3.2.2 CAN

CAN-kommunikationen är uppbyggd kring STMicroelectronics standardbibliotek för CAN-kommunikation tillsammans med uppdragsgivarens egen standard för CAN-meddelanden. När ny data från sensorer behandlats kommer mikrokontrollern att skicka tre CAN-meddelanden innehållandes Yaw, Pitch och Roll.

3.2.3 I²C

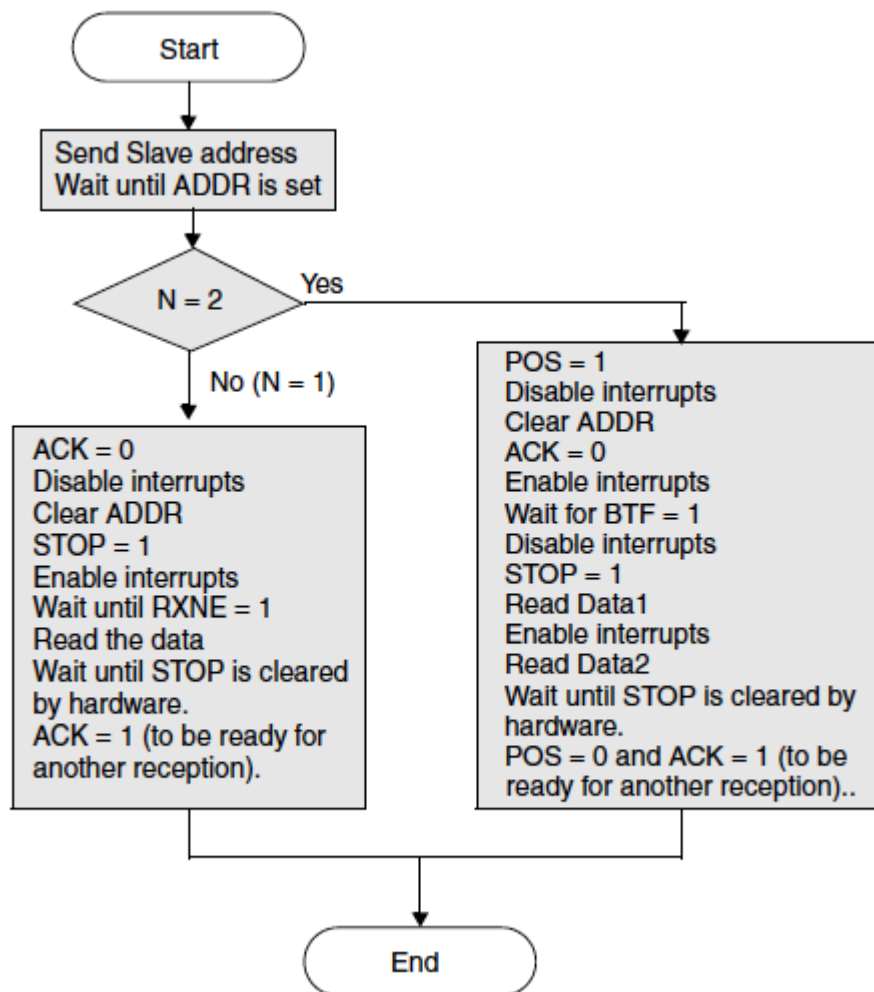
För att möjliggöra kommunikation via I²C-bussen har STMicroelectronics standardbibliotek för gränssnittet använts som mall. Utöver detta har fler-

talet metoder utvärderats för att möjliggöra ett stabilt och konsekvent tillvägagångssätt för att läsa och skriva till och från noder anslutna till bussen. STMicroelectronics beskriver flertalet av dess i styrdokumentet “AN2824”, och metoden “polling” har använts som utgångspunkt [20].

Metoden byggs upp runt flera kontroller för att testa att:

- I²C-bussen inte är upptagen
- Testa ifall flera master-noder är anslutna till bussen
- Begära master-läge
- Begära master-mottagning/sändningsläge

Metoden används för läsning till både MPU-6050 och HMC5883L



Figur 3.6: Flödesdiagram över läsning av 1-2 bytes från en nod [20]

3.2.3.1 MPU-6050

Innan kommunikation med MPU-6050 är möjlig måste ett av mikrokontrollerns två I²C-gränssnitt initieras. Vilken av dessa som skall initieras definieras av användare, vilket ger möjlighet till en mer flexibel konfiguration och tillämpning av uppbyggda bibliotek. När ett gränssnitt kopplats mot noden testas anslutningen genom att läsa från ett "Who Am I"-register, registret skickar ett ID från noden och på så sätt bekräftas anslutningen. När anslutningen bekräftats skrivs data till flertalet konfigurationsregister, dessa

skrivningar kan lätt manipuleras genom metदानrop för att ge en önskad karakteristisk. Exempel på konfigureringar är:

- Klockkälla
- Mätområde för accelerometer
- Mätområde för gyroskop
- Samplingsfrekvens för mätning
- Hantering av extern I²C-buss

3.2.3.2 HMC5883L

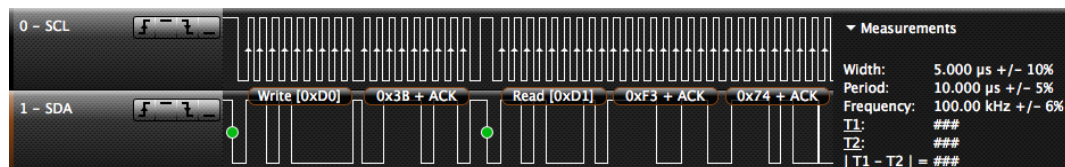
Likt MPU-6050 måste ett gränssnitt för HMC5883L väljas. I fallet för denna krets kommer samma gränssnitt som MPU-6050 användas för HMC5883L, men även här finns möjlighet att välja ett annat gränssnitt. När en anslutning upprättats mot HMC5883L ställs även utvecklaren här för en del valmöjligheter gällande konfigurering:

- Brusreducering
- I²C-konfiguration
- Samplingsfrekvens
- Mätområde

3.2.4 Läsning av data

Obehandlad data läses från sensorer av mikrokontroller då nya värden finns tillgängliga, samt då I²C-bussen är ledig. Genom en läsning av MPU-6050 erhålls samtliga vektorer från gyroskop och accelerometer. Var vektor är representerad i 2 byte, alltså läses totalt 12 byte från MPU-6050. Datan läses sedan in i en C-struct bestående av sex 16-bitars heltal med tecken, ett heltal för var riktning och sensor, för vinkelberäkning samt korrigering. På liknande sätt läses HMC5883Ls värden in i en C-struct, bestående av tre 16-bitar långa heltal med tecken. Även i fallet för HMC5883L läses vektorerna om två bytes vardera i en läsning av sensorn.

I figur 11 visas en läsning från MPU-6050-sensorn. I detta fall matas de två byte innehållande accelerometerns X-axel ut på bussen.



Figur 3.7: Läsning av data via I²C

3.2.5 Beräkning av data

För beräkning av obehandlad data har två tillvägagångssätt valts, Kalmanfilter för att estimerat ett så korrekt mätvärde som möjligt samt Eulervinklar för att sammanfoga och ge en sann bild av kretsens orientering. Eulervinklarna representeras av yaw, pitch och roll.

3.2.5.1 Kalman filter

Bakgrund Kalmanfiltret är ett rekursivt filter som tillämpas för att skapa ett så korrekt estimerat mätvärde ur en brusig miljö. Eftersom filtret är rekursivt betyder det att det använder sig av föregående värden för reella mätningar. Filtret tillämpas inom allt från signalbehandling till reglerteknik. Filtret grundar sig på publikationer av Rudolf E. Kálmán tillsammans med Richard S. Busy [7].

Algoritm 3.2 Konceptet av Kalmanfiltret [15]

$$\hat{X}_k = K_k \times Z_k + (1 - K_k) \times \hat{X}_{k-1}$$

$\hat{X}_k$ = Nuvarande estimation

K_k = Kalman ökning

Z_k = Mätvärdet

$\hat{X}_{k-1}$ = Tidigare estimation

k = Tillståndsnötering

Koncept

Visualisering Alla parametrar i ekvationen är kända förutom K_k , det är K_k som grunden till varför vi applicerar Kalmanfiltret. K_k kallas kalmanökningen och varierar beroende på brusförhållanden i mätningen. K_k är baserat på kovariansen i mätdatan, alltså samvariationen av två stycken mätvärden. Viktigt att nämna är att ovannämnda ekvation inte är ekvationen för filtret utan endast ett sätt att visualisera tankesättet runt Kalman filtret. Dessa komplicerade ekvationer kommer beröras i enkelhet, ytterligare fördjupning hänvisas till refererad litteratur.

Ekvationer Kalmanekvationerna kan delas upp i två steg, prediktionssteget och korrektionssteget.

Algoritm 3.3 De fundamentala ekvationerna av Kalmanfiltret [15, 14]

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1}$$

$$z_k = Hx_k + v_k$$

x_k är signalvärdet. x_k är resultatet av en linjär stokastisk ekvation där föregående mätning tillämpas som parametern x_{k-1} , kontrollsignalen u_k samt processens brus som w_{k-1} . Kontrollsignalen u_k tillämpas dock sällan. Den andra ekvationen avser att ta signalvärdet x_k och mätbruset v_k och kombinera dessa, och statistiskt fördela dessa eftersom mätvärdena anses vara inexakta. Där A, B och H generellt är matriser.

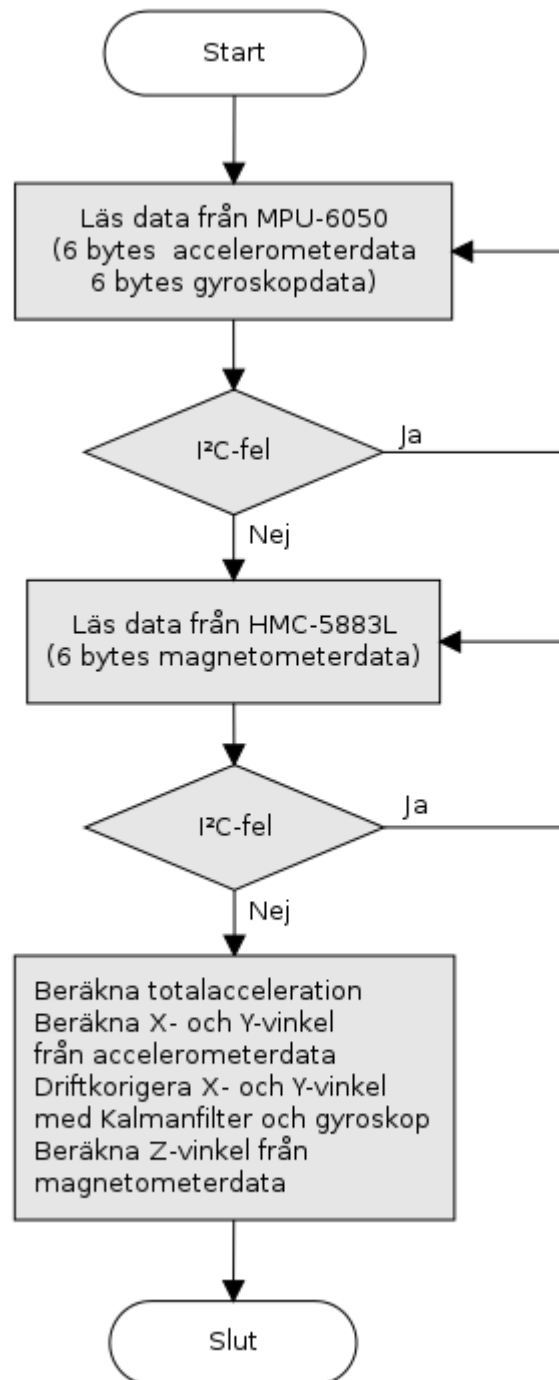
Algoritm 3.4 Kalmanfiltrets ekvationer [14]

Prediktion	Korrektion
$\hat{x}_k^- = A_{k-1} + Bu_k$	$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}$
$P_k^- = A P_{k-1} A^T + Q$	$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H \hat{x}_k^-)$
	$P_k = (I - K_k H) P_k^-$
$\hat{x}_k^-$ = Predikterade estimationer av signalvärdet	
P_k^- = Predikterade kovariansen av felet	
K_k = Kalmanökningen	

Ekvationerna itererar sedan från prediktionssteget till korrektionssteget för att estimerat ge ett korrekt estimerat mätvärde.

3.2.5.2 Vinkelberäkning

Enligt Figur 3.8 ses hämtning av obehandlad mätdata från samtliga sensorer till styrenhet. Styrenheten beräknar därefter totalacceleration samt drift-korrigerar X - och Y-värden från accelerometer och gyroskop med hjälp av kalmanfiltrering. Magnetisk riktning hämtas därefter från magnetometer och kalmanfiltreras tillsammans med gyroskopets Z-axel för att möjliggöra en vinkelangivelse i förhållande med jordens magnetfält.



Figur 3.8: Flödesschema över hämtning samt beräkning av sensorvärden

Kapitel 4

Resultat

4.1 Hårdvara

Under examensarbetets gång har ett kretskort konstruerats som skall klara en störningsfylld miljö. Kretskortet har även skydd för transienter på matningsspänning och ett störningsskydd för CAN-kommunikation. Hårdvaran som har designat har kvadratisk design och mäter 32x32 mm. Storleksmässigt kan enheten ses som minimal i förhållande till en entreprenadmaskins storlek. Enheten är även mindre i förhållande till enheter med samma karakteristik och prestanda som tillämpas idag. Kretskortet är även dubbelsidigt, kortet har alltså komponenter placerade på båda sidor. Placeringen av komponenter är genomförd på ett sätt som skapar minimal interferens mellan störningskänsliga komponenter och störningsskapande komponenter. Komponenterna är även placerade på ett sätt så att signalbanorna mellan kretsarna är så korta som möjligt.

4.2 Mjukvara

Då målsystemet ej har varit tillgängligt har mjukvaruutvecklingen istället skett på plattformar som liknar den hårdvara som utvecklats. Då den slutliga produkten ses som ett inbyggt system utan ett gränssnitt för användaren har stor vikt lagts på att systemet skall vara driftsäkert. Detta kan man se i en tydlig strukturering av utveckling där ett gränssnitt eller en tillbyggnad skall vara helt stabil innan ett nytt tillägg implementeras. Mjukvaran som har utvecklats mot testplattformen har gett önskad karakteristik vad gäller

sensorläsning, hantering av CAN-buss samt vinkelberäkning. Det finns därför en stor tilltro till att mjukvaran utvecklad för testplattform skall kunna implementeras på målsystemet.

4.3 Verifiering

Kretskortet är fortfarande under produktion då denna rapport sammanställts. Därför har ingen verifiering och testning av hårdvarukonstruktionen kunnat utföras. Då målsystemet inte varit tillgängligt har inte heller testning av mjukvara kunnat utföras i detta system. Resultat från utvecklingsplattformen och dess mjukvarufunktioner har dock givit indikationer på att korrekta mätvärden och funktionalitet har uppnåtts. En vidareutveckling av examensarbetet kommer även att utföras under följande månader där möjlighet till utförlig testning och verifiering av hårdvara och mjukvara kommer att ges.

Kapitel 5

Slutsats

5.1 Resumé

Projektet “Inertial Measurement Unit (IMU) av miniatyrformat med CAN-interface“ handlar om att konstruera en så yteffektiv och mätnoggrann IMU som möjligt. IMUn skall kunna placeras på objekt av olika form och material och sedan beräkna och informera andra enheter om objektets position samt rörelse via en CAN-buss. I detta examensarbete syftar arbetet till att utvärdera samt konstruera både hårdvara och mjukvara för nämnda IMU. Hårdvaran måste förutom sensorer även klara Volvo ABs standarder för spänningsspikar och laster. Den måste även klara av störningar på CAN-bussen, detta då CAN-bussen är den valda kommunikationen med andra enheter. Mjukvaran utvecklad för denna plattform måste filtrera stora störningar i form av intensiva rörelser från till exempel en skakande grävmaskinsarm, samt drift av mätvärden från sensorer. Anledningen till att en IMU utvärderats är för att få möjligheten att själv välja mätdata samt datapresentation, något som ej är möjligt vid inköp och utvärdering av tredjeparts IMUer.

5.2 Generaliseringar

Möjligheterna för en IMU är idag stora. Till följd av intresset för enheter som denna har utveckling inom område ökat markant vilket fått till följd att fler och mer sofistikerade sensorer utvecklats. Enheter som den som utvecklats under detta examensarbete återfinns i många utförande och tillämpningar, allt från att möjliggöra en ny funktion i en mobiltelefon till att skapa förut-

sättningar till autonoma farkoster. Att för ett företag som uppdragsgivaren ha en sådan här plattform tillgänglig underlättar framtida implementationer inom olika fordonstillämpningar då kretsens konstruktion är generell. I ett arbetsmiljömässigt perspektiv kan den här enheten möjliggöra effektivisering och erbjuda en större användarvänlighet då enheten enkelt placeras på önskad del på en kropp och presenterar därefter mätdata.

5.3 Kritisk diskussion

Tidsramarna för examensarbetet har under projektets gång inte kunnat hållas. Detta främst då utveckling av hårdvara varit mer tidskrävande än förutspått. De verktyg som funnits tillgängliga hos uppdragsgivaren har varit avancerade och detta tillsammans med vår ovana att tillämpa dessa verktyg har lett till en oförutsedd inlärningsperiod. Verktygen har dock i slutändan erbjudit stora konfigurationsmöjligheter och möjlighet till god överblick över utvecklingen. Under projektets slutfas har leddiden av kretsproduktionen lett till vissa fördröjningar som ej har togs i beaktning vid tidsplaneringen.

Trots dessa förhinder har arbetet fullföljts till fullo och utvecklingen har istället testats mot testbänkar bestående av utvecklingsplattformar med likvärdiga komponenter. Detta har möjliggjort utveckling inom tidsplanens ramar, men utförliga tester av mjukvaran mot konstruerad hårdvara har inte kunnat utföras. Även tester som syftar till att enkom testa begränsningar hos den egenkonstruerade hårdvaran har inte kunnat fullgöras. Då testning utförts mot utvecklingsplattformen har detta resulterat i förväntade mätvärden och utdata från sensorer, mikrokontroller och CAN-buss. Vid förflyttning av sensorplattformen i givna vinklar förändras utdata från mikrokontrollern likvärdigt.

Detta examensarbete har givit oss god insikt hur det är utveckla hårdvara med hjälp av professionella verktyg samt att sedan tillämpa egenkonstruerad mjukvara.

Litteraturförteckning

- [1] AsahiKASEI. AK8975/AK8975B, 3-Axis Electronic Compass. <http://www.akm.com/akm/en/file/datasheet/AK8975.pdf> (Hämtad 2013-05-27), December 2009.
- [2] Honeywell. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L. http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf (Hämtad 2013-05-27) (Hämtad 2013-05-27), Februari 2013.
- [3] I2C-bus.org. I2C-Bus: Termination versus Capacitance. <http://www.i2c-bus.org/termination-versus-capacitance> (Hämtad 2013-05-27), Maj 2013.
- [4] I2C-bus.org. I2C-Bus: What's that? <http://www.i2c-bus.org> (Hämtad 2013-05-27), Maj 2013.
- [5] InvenSense. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3. <http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/PS-MPU-6000A.pdf> (Hämtad 2013-05-27), Maj 2012.
- [6] InvenSense. MPU-9150 Product Specification. <http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/PS-MPU-9150A.pdf> (Hämtad 2013-05-27), Maj 2012.
- [7] R. E. Kalman. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. <http://www2.elo.utfsm.cl/~ipd481/Papers%20varios/kalman1960.pdf> (Hämtad 2013-05-27), 1960.

- [8] B. Lepkowski, J. och Wolfe. EMI/ESD Protection solutions for the CAN Bus. http://www.can-cia.org/fileadmin/cia/files/icc/10/cia_paper_lepkowski.pdf (Hämtad 2013-05-27), 2005.
- [9] J. Lepkowski. EMI/ESD Protection Solutions for the CAN Bus. http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND8169-D.PDF (Hämtad 2013-05-27), November 2007.
- [10] Paolo Giusto Arkadeb Ghosal Marco Di Natale, Haibo Zeng. *Understanding and Using the Controller Area Network Communication Protocol*. Number 978-1-4614-0313-5. Springer, 2012.
- [11] A. B. Matsko. Viewpoint: All-optical compass based on the effect of electromagnetically induced transparency. <http://physics.aps.org/articles/v3/76/> (Hämtad 2013-05-27), September 2010.
- [12] Microchip. WebSeminar: CAN Protection. http://www.microchip.com/stellent/groups/SiteComm_sg/documents/Training_Tutorials/en528477.pdf (Hämtad 2013-05-27), Oktober 2006.
- [13] NXP. UM10204: I2C-bus specification and user manual. http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf (Hämtad 2013-05-27), Oktober 2012.
- [14] Grewal M. S. och Andrews A. P. Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB. Second Edition(0-471-39254-5), 2001.
- [15] Welch G. och Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter. http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf (Hämtad 2013-05-29), July 2006.
- [16] J. Paetau. Mail conversation with InvenSense. E-Mail, March 2013.
- [17] Philips Semiconductors. AN10216-01: I2C Manual. http://www.nxp.com/documents/application_note/AN10216.pdf (Hämtad 2013-05-27), Mars 2003.
- [18] R. Snedsbol, R. och Johansson. *Realtidssystem för högskolans ingenjörsutbildningar*. Number ISBN 91-89280-14-8. Goteborgs mikrovaror, 7 edition, 2002.

- [19] Starlino. A Guide to using IMU (Accelerometer and Gyroscope Devices) in Embedded Applications. http://www.starlino.com/imu_guide.html (Hämtad 2013-05-27) (Hämtad 2013-05-27), December 2009.
- [20] STMicroelectronics. AN2824: STM32F10xxx I2C optimized examples. http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application_note/CD00209826.pdf (Hämtad 2013-05-27), Juni 2010.
- [21] STMicroelectronics. AN2586: Getting started with STM32F10xxx hardware development. http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application_note/CD00164185.pdf (Hämtad 2013-05-27), November 2011.
- [22] STMicroelectronics. STM32F107xx: Connectivity line, ARM-based 32-bit MCU with 64/256 KB Flash, USBOTG, Ethernet, 10 timers, 2 CANs, 2 ADCs, 14 communication interfaces. <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00220364.pdf> (Hämtad 2013-05-27), Augusti 2011.
- [23] STMicroelectronics. LSM303D, Ultra compact high performance e-Compass 3D accelerometer and 3D magnetometer module. <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00057547.pdf> (Hämtad 2013-05-27), Juni 2012.
- [24] STMicroelectronics. L3GD20, MEMS motion sensor: three-axis digital output gyroscope. <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00036465.pdf> (Hämtad 2013-05-27), Februari 2013.
- [25] CT Systems. Magnetometer - the History. <http://www.ctsystems.eu/support/history-mag.html> (Hämtad 2013-05-31), Maj 2013.
- [26] W. Truchsess. Effects of Varying I2C Pull-Up Resistors. <http://dsscircuits.com/articles/effects-of-varying-i2c-pull-up-resistors.html> (Hämtad 2013-05-27), December 2010.

- [27] Volvo. STD 313-0003: Electro-magnetic compatibility, EMC. <http://www.tech.volvo.com/std/docs/515-0003> (Hämtad 2013-06-04), Oktober 2009.