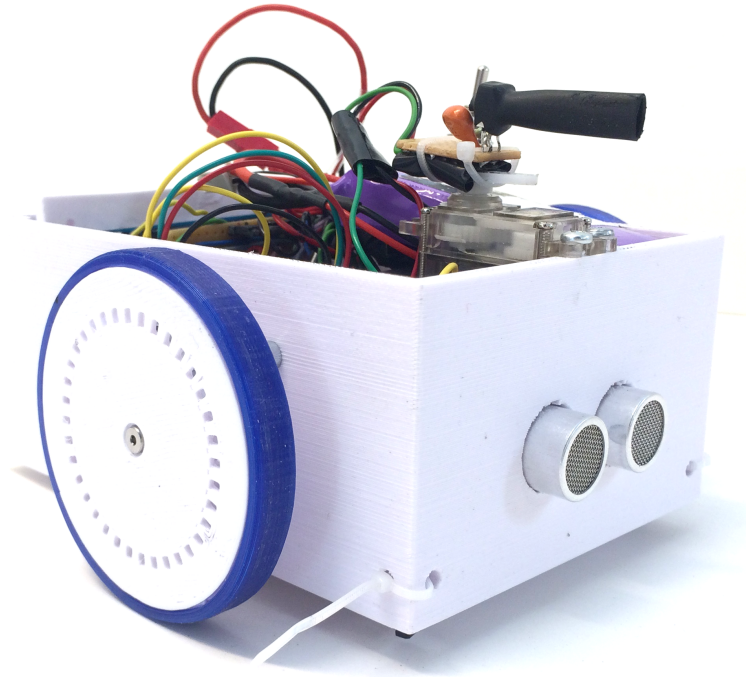




CHALMERS

UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



AGV-system för minifabrik

Kandidatarbete i Industri- och Materialvetenskap

Henrik Bernhartz, Martin Hill, Samuel Jönsson,
Jerry Liu, Gustav Ljungquist, Philip Wallman

AGV-system för minifabrik

Henrik Bernhartz, Martin Hill, Samuel Jönsson, Jerry Liu, Gustav Ljungquist, Philip Wallman

© Henrik Bernhartz, Martin Hill, Samuel Jönsson, Jerry Liu, Gustav Ljungquist, Philip Wallman, 2017.

Handledare: Per Nyqvist, Industri- och materialvetenskap

Examinator: Henrik Kihlman, Industri- och materialvetenskap

Kandidatarbete 2017:05

Institutionen för Industri- och materialvetenskap

Produktionssystem

AGV

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Telefon +46 31 772 1000

Institutionen för Industri- och materialvetenskap

Göteborg, Sverige 2017

Sammandrag

I rapporten undersöks olika tekniker som kan användas i en AGV (*Automated Guided Vehicle*) med en enkortsdator (Arduino UNO) som styrenhet. Kravspecifikation och avgränsningar sätts utifrån problemdefinitionen: ”*Systemet ska klara av att navigera från position A till B samt positionera sig vid önskad position*”.

Med en gallring av de tillgängliga teknikerna valdes ett urval ut för noggrannare tester. Några av de tekniker som undersöks är omgivningsavläsning och positionering med QR-kod och kamera, positionsbestämning med tröghetsmodul ljusfyrslokalisering med laserljus, vinkelmätning och ljusfyrslokalisering med IR(*infraröda*)-sensorer och IR-sändare. Med resultat från testerna av de olika teknikerna gjordes en konceptgenerering följt av eliminering av koncept till endast ett koncept återstod. Det slutgiltiga konceptet som valdes för att implementeras som prototyp bestod av IR-ljusfyr på stationen och en IR-sensor monterad på en servomotor för svepning efter IR-ljuskällor, ultraljud som avståndskontroll, optokopplare till dockning och stegmotorer för förflyttning.

Testning av prototypen genomfördes i enlighet med kravspecifikation, resultatet visade på alla krav men inte alla önskemål uppfylldes. Rapporten visar att en fungerande AGV kan byggas med kostnadseffektiva tekniker men kräver en hel del förbättringar för att uppnå industristandard. Den visar också de inneboende brister hos de billigare teknikerna som undersöktes.

Abstract

In this report different technologies that allows an AGV (*Automated Guided Vehicle*) to interpret its surroundings and be controlled by a single-board microcontroller (Arduino UNO) are studied and evaluated. Specifications and boundaries are set with the problem definition: "*The system needs to be able to navigate from point A to B and position itself at B according to specification*".

Starting with a assessment of the available technologies a few are chosen for futher evaluation. Some of the technologies are positioning with QR-codes and a camera, positioning with an inertial measurement module and localization by laserbeams and lightbeacons. Based on the results of the techonlogy evaluation a concept generating process is conducted in which through an elmination process a final concept is chosen. The final concept, on which the prototype is built, consists of a IR (*Infra Red*) light beacon and a IR-sensor on top of a servo motor as a seeker, ultrasound as distance control, optocoupler for docking and a couple of steppermotors driving the wheels.

The tests of the prototype were conducted in accordance with the specification and boundaries, the results showed that all the demands, but not all desired properties were met. The report shows that a functional AGV can be constructed by using cost-effective methods but a number of improvements are required to reach industrial standard. Moreover it shows the inherent shortcomings of the evaluated low-cost technologies.

Nyckelord: AGV, IR-ljusfyr, QR-kod, ultraljud, lidar, tröghetsmodul

Keywords: AGV, IR-beacon, QR-code, ultrasound, lidar, inertial sensor

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	3
1.2	Syfte	3
1.3	Problemdefinition	3
1.4	Avgränsningar	4
1.5	Kravspecifikation	4
2	Teori och tester	7
2.1	Enkortsdatorer för styrning samt behandling av sensordata	7
2.2	Optokopplare för mätning av golvmarkering	8
2.3	Ultraljudssensor för avståndsmätning	10
2.4	Lidarsensor för avståndsmätning	12
2.5	Ljusfyrslokalisering med infrarött ljus	14
2.6	Ljusfyrslokalisering med laserljus	17
2.7	Odometri och drivmotorer	19
2.8	Avläsning av QR-kod med kamera	21
2.9	Absolut orienteringssensor, tröghetsplattform	23
3	Genomförande	29
3.1	Konceptgenerering utifrån teori och tester	29
3.2	Eliminering av koncept mot kravspecifikation	30
3.3	Slutgiltigt val av koncept utifrån önskemål i kravspecifikationen	31
4	Resultat	35
4.1	Chassi	35
4.2	Elektronik och sensorer	37
4.3	Styrning och databehandling	38
4.4	Testning och verifiering	42
5	Diskussion	47
5.1	Vidareutveckling av system	48
5.2	Jämförelse med industrilösningar	49
6	Slutsats	51
A	Bilagor	57
A.1	Mätdata för Lidar	57
A.2	Kravspecifikation	58

A.3	Mätningar för Ultraljudssensorn SFR05	59
A.4	Python kod för QR avläsning	60

1

Inledning

Automated guided vehicles (AGV) är ett förarlost system för intern och extern materialtransport, inomhus såväl som utomhus. För interna transportsystem används AGV-system vanligtvis vid monteringsstationer i produktionsanläggningar, i lagermiljö, distributionscentraler och vid lastningsterminaler. Traditionellt har AGV:er använts främst inom tillverkningsindustrin [1–3].

AGV-system introducerades under 1950-talet [3, 4]. De tidiga vägledningssystemen för AGV:er inom industrin använde fixerad vägledning [1] via induktiv kabel i golvet med en specifik frekvens som fordonen kunde följa. I detta skede var navigationen i en AGV relativt lågteknologisk då endast impulser följdes [2].

Sedan introduktionen har användningen av AGV-system ökat dramatiskt och nya användningsområden, mer nischade fordonstyper samt system för större flottor utvecklats [3, 4]. Efter att kostnaden för mikroelektronik sjönk utvecklades AGV:er som kunde navigera på ett mer intelligent sätt. Genom sparade ruttinstruktioner samt beslutstagande under färd kunde AGV:er införlivas i det övergripande systemets trafikreglering. Med hjälp av trådlösa vägledningssystem så som tröghetsnavigering och laser blev AGV:erna frirörliga och därmed ökade systemens flexibilitet och nya förändringar i miljön kunde på ett enklare sätt hanteras [2].

I miljöer med repetitiva transportmönster bedöms implementering av AGV-system löna sig. Exempelvis lämpar sig AGV:er väl för transporter mellan bulkfraktfordon, så som fartyg och tåg, och terminaler. Dessa miljöer är några utav de mest ineffektiva och kostsamma när de är icke automatiserade. Nuförtiden används AGV-system även till upprepade transportsysslor inom andra områden så som i lager, container-terminaler och underjordiska transportsystem. I omgivningar där masstransporter förekommer kan 100-tals AGV:er användas tillsammans. [3].

I tillverkningsindustrin används färre AGV:er per anläggning och relativt låg brukningsgrad för att transportera ett mindre antal kollar över korta sträckor med få plock- och avlämningsstationer. För masstransport vid tillverkning är det mer lönsamt att använda transportband snarare än stora AGV-flottor [3].

AGV-system som utvecklas idag kräver kontroll över navigation, vägledning, ruttplanering, trafikkontroll, lastöverföring och systemledning. Flexibilitet är den avgö-

rande faktorn vid val av system, eftersom industrin i större och större utsträckning automatiseras måste AGV:erna kunna anpassas i realtid för produktionsförändringar, förändrad produktionsvolym samt kompensera för maskinhaveri genom att ändra rutt på ett smidigt sätt [2].

Dagens punkt till punkt navigering kan delas upp i två kategorier, de äldre fasta banorna och de nyare med öppen bana. De fasta banorna implementeras med äldre, traditionella metoder så som induktiv kabel, färgade eller magnetiska linjer i golvet. När dessa måste justeras görs mer eller mindre stora ingrepp i transportmiljön. Dock finns fördelen att navigationen blir enkel med endast en sensor för vägledning. Vid implementering av den nyare, öppna banmodellen nås ökad flexibilitet, men en karta måste skapas och sparas in hos AGV:n samt en metod för att uppfatta sin egen position. I detta fall kan i teorin vilken rutt som helst följas mellan punkter i miljön. I kommersiella system är rutterna för lastöverföring förbestämda. Oftast planeras ruttvägledningen för AGV:erna genom upprepade manuella körningar vilket leder till en extremt tidskrävande fas vid installation om stationerna är många eller om golvytan är stor. Efter att de manuella körningarna är sparade kan en centralenhet dela ut körinstruktioner. När en körorder tas emot kommer AGV:n att ta ett beslut och följa den rutt som bedöms som mest optimal. I den öppna lösningen måste AGV:n pausa för att kunna kalkylera vilken rutt som är bäst, ofta den kortaste. Denna paus bidrar dock inte till mer dödtid än i en lösning med fast bana [2]. I de nyaste AGV-systemen gör robotarna själva val av rutt vilket traditionellt skötts via centralenheter. Detta leder till anpassningsbara självlärande styrsystem och är därmed lämpliga för stora, komplexa system med många AGV:er och stor potential för störningar mellan dess enheter. Denna utveckling leder inte till att äldre beslutsproblem är avklarade utan leder snarare till nya utmaningar för forskningen [1].

Majoriteten av den forskning som producerats hittills berör anläggningar där golvplaner samt hämt-och avlämningsstationer är fasta [1] samt AGV:er som hanterar ett kolli åt gången. Men det finns indikationer på att lösningar som transporterar flera kollin samtidigt reducerar storleken på AGV-flottan och resulterar i minskad total genomströmningstid [3]. Ju mer komplexa lösningarna blir med ökande mängd fordon som används desto svårare blir bedömningen av systemprestandan. Mycket forskning pågår [4] för att hantera konstruktion-och regleringsproblem. De största är ruttvägledning, optimalt antal AGV:er, schemaläggning, lägespositionering för vilande fordon, batterihantering, dödlägeshantering, trängsel, ruttplanering samt fördröjningar under begränsad planeringstid. [1,3]

Många av nyckelproblemen med autonoma system är idag lösta, dock återstår system som klarar av att dynamiskt reagera på osäkra omgivningar så som att kunna navigera frirörligt utomhus i exempelvis hamnmiljö med containerhantering. För att slippa infrastruktur i omgivningen har vissa prototyper designats med inkorporerad syn (kamera).

Servicerobotar har inte lyckats implementeras på ett smidigt sätt. (Servicerobotar utför monotona arbetsuppgifter) [2]. Ett problem för stora AGV-flottor är den långa beräkningstider som krävs för att styra systemen. [3]

1.1 Bakgrund

Institutionen för Industri- och materialvetenskap vid Chalmers Tekniska Högskola forskar bland annat på kommunikation mellan maskiner i ett produktionssystem. De har därför byggt en "minifabrik" där sådan kommunikation kan studeras. Det saknas dock en transportlösning i fabriken. Ett AGV-system är intressant och tekniker så som *infraröda ljusfyrar* samt *tröghetsplattform* föreslås för navigering. Minifabriken är tänkt att kunna visas upp på olika mässor för att demonstrera vad institutionen arbetar med och måste därför vara portabel.

1.2 Syfte

Syftet med rapporten är huvudsakligen att beskriva utvecklingen av ett portabelt AGV-system. Det utvecklade systemet testas sedan gentemot kravspecifikation och jämförs med befintliga lösningar på marknaden. Rapporten kommer även utvärdera en så kallad "tröghetsplattform", *BNO055* [5] och dess prestanda.

1.3 Problemdefinition

En problemdefinition som sammanfattar de viktigaste funktionerna som systemet ska kunna genomföra har formulerats enligt:

"Systemet ska klara av att navigera från position A till B samt positionera sig vid önskad position."

Problemdefinitionen består av två huvudproblem. Det ena är navigation från punkt A till punkt B och det andra positionering av AGV:n vid dockning.

1.4 Avgränsningar

Krav specificerade av uppdragsgivaren ligger till grund för de avgränsningar som valts. Andra har krävts när metoder har implementerats efter det att ytterligare krav och önskemål ställts.

- Väldigt dyra tekniker har uteslutits och därmed har alternativ med komponenter som har lägre pris valts. Detta eftersom budgeten är begränsat.
- Då projektet måste kunna förflyttas och visas upp relativt snabbt förlitar sig inte lösningen på allt för svårörliga delar eller metoder som kräver stort förarbete vid demonstration.
- Eftersom människor kommer att befinna sig i nära anslutning till systemet med omgivning har inte tekniker med potentiella hälsofaror använts.
- De tekniker som förlitar sig på komponenter med långa leveranstider har inte tagits i beaktning för att möjliggöra test och verifiering i god tid innan slutdatum.
- Lastning och avlämning har inte tagits upp då huvudproblemet som ska lösas är robotens färd mellan stationerna och inte vad som sker vid dem.
- Lösningen implementeras i en kontrollerad miljö och behöver inte klara av de eventuella problem som kan uppstå i en verklig industrimiljö. Exempelvis placeras inga hinder mellan start- och slutpunkt under navigering.

1.5 Kravspecifikation

En kravspecifikation utformades för att definiera vad som krävs och önskas av den slutgiltiga prototypen, den kan studeras i bilaga A.2. Kraven och önskemålen utformades delvis efter samtal med uppdragsgivaren och utifrån ett studiebesök hos AGV-tillverkaren "AGVE" [6]. Resonemang och uppskattning ligger till grund för de resterande krav och önskemål som ställts.

Alla krav under kategorin "Noggrannhet" är framtagna med utgångspunkt att säkerställa att lastning och avlämning är möjlig vid en dockningsstation. De önskemål som ställts under denna kategori har samma syfte som motsvarande krav, exempelvis krav 1.a och önskemål 1.b angående positionering vid dockning. Önskemålen är till för målsättning för prototypen men används även vid jämförelse av olika tekniker.

Alla krav under kategorin "Prototyp" har satts för att specificera hur utformningen och valen av AGV:ns komponenter får lov att påverka funktionalitet och användning. Två önskemål sattes. Det ena för att undvika felfortplantning vid användning av odometri, önskemål 2.c sladd på hjul, eftersom det snabbt blir problematiskt

att använda om hjulen inte har tillräckligt hög friktion mot underlaget när AGV:n förflyttar sig. Det andra, önskemål 2.f inbromsning, sattes för att bedöma AGV:ns behov av eventuell inbromsning vid databehandling eller i klartext behovet av ökad processorkraft.

Kraven under kategorin "Säkerhet" har ställts för att AGV:n inte ska utgöra en potentiell fara för människor och inte haverera under demonstration.

De fyra önskemålen under kategorin "Konstruktion" sattes för att begränsa prototypens komplexitet. Dessa berör hur komplexa beräkningar som tillåts för databehandling samt svårigheten för programmeringen av styrsystem. Önskemålen berör även komplexiteten vid konstruktionen av AGV:n.

Viktningen som skett av önskemålen har satts efter diskussion kring vad som är mest signifikant för prototypens funktion. Alla önskemål i kravspecifikationen har viktats 1-5 där 5 är av störst vikt.

2

Teori och tester

Arbetsgången för teori och testning av potentiella tekniker genomfördes via studier av positionering-och navigationssystem. På detta sätt valdes intressanta tekniker ut. Dessa testades sedan och jämfördes gentemot kravspecifikationen. Testerna genererade underlag för bedömning av vilka tekniker som ansågs rimliga samt deras för- och nackdelar.

För att fylla det syfte specificerat i kapitel 1.2 behövde AGV:n förses med indata från sensorer samt generera utdata för styrningen, exempelvis impulser till motorer för förflyttning. Härfter följer en presentation av de möjliga tekniska lösningar eller del-lösningar som utvärderats med avseende på navigerings-/positioneringsproblemet.

2.1 Enkortsdatorer för styrning samt behandling av sensordata

För att hantera data från olika sensorer och med hjälp av dessa styra AGV:n krävs en beräkningsenhet. Då storleken på AGV:n är mindre än en traditionell PC krävs en enkortsdator. Det finns många modeller på marknaden med olika beräkningskraft och formfaktor. De två typer som valdes ut som alternativ var *Raspberry Pi 2 model B* [7] och *Arduino UNO* [8], fortsättningsvis förkortade *Raspberry Pi* samt *Arduino*.

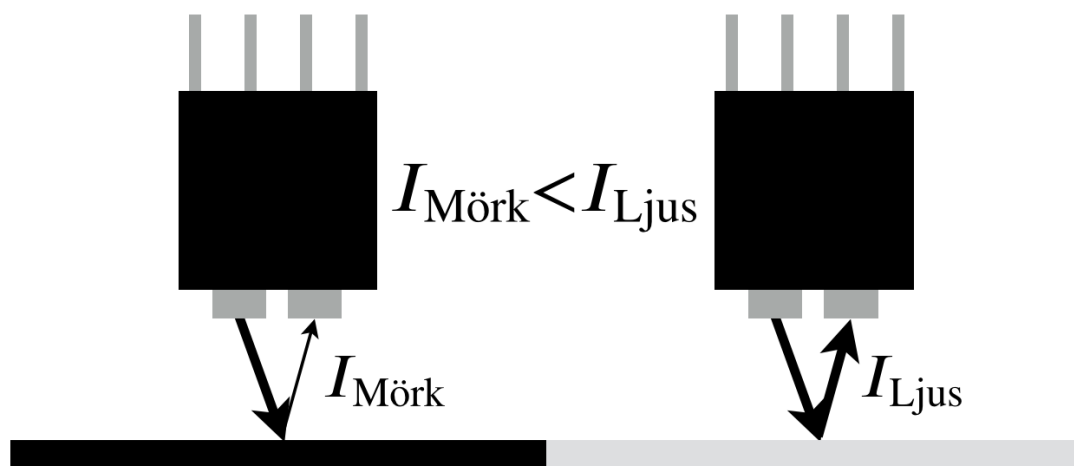
Dessa valdes på grund av tidigare erfarenhet samt tillgänglighet. Arduino är en enkortsdator baserad på *ATmega328P* vilken är en 8-bitars mikrokontroller [8, 9]. Raspberry Pi är baserad på en *ARMv7* [10] processor och kan därför köra ARM¹ kompatibla operativsystem så som Linux [11]. *ARMv7* är en 32-bitars processor med fyra kärnor [10]. Detta gör att Raspberry Pi har betydligt större beräkningskapacitet gentemot Arduino. Däremot är Arduino lättare att programmera då det finns många färdigskrivna bibliotek² som är till för just styrning av exempelvis servon eller avläsning av sensorvärden [12]. Den är även mer lämplig vid realtidsstyrning då det inte krävs ett operativsystem som kan fördröja beräkningar. Därför användes Arduino i största möjliga utsträckning.

¹Processorarkitektur utvecklad av ARM Holdings.

²En samling färdigskrivna kod.

2.2 Optokopplare för mätning av golvmarkering

TLP621 är en enkel komponent som består av en fototransistor och en IR-emitterande galliumarsenid-diod [13]. IR-dioden och fototransistorn sitter intill varandra och är riktade åt samma håll, således mäter komponenten styrkan på det reflekterade ljuset från ytan den riktas mot och kan därför avgöra skillnader mellan exempelvis svarta och vita ytor, se figur 2.1.



Figur 2.1: Optokopplare detekterar intensitet på reflekterat ljus vilket illustreras i figuren.

Metod: Testning av sensorn var enkelt utformad och innefattade mätning mellan olika nyanser på ytor, avstånd till ytan samt olika ljussättningar av testmiljön.

Resultat: Den mätdata som testerna producerade visade en distinkt skillnad då sensorn riktades mot svart respektive vit yta på ett avstånd mindre än 10 mm, där hade ljussättning av testmiljön liten/obetydlig inverkan på resultaten. Därmed kunde tydliga gränsvärden bestämmas. Vid avstånd större än 10 mm hade ljussättningen av testmiljön större betydelse och genererade mer brus i datan. Mätningarna visade även viss skillnad beroende på om den svarta ytan var matt eller blank, en matt yta är att föredra då detta genererar större kontrast i mätdata.

Analys & Diskussion: Mätningarna visade att sensorn kan utföra den uppgift den är avsedd för på AGV:n. Det vill säga detektera ett mönster på golvet. Ett problem med sensorn är att signalen skiljer sig mellan de olika sensorer som testades även i en kontrollerad testmiljö, de riktas mot samma yta och hålls på samma avstånd. Detta gör att gränsvärdet mellan svart och vitt kan variera mellan olika

sensorer, lösningen till problemet var att hitta två sensorer med så lika värden som möjligt för att minska differensen och därmed kunna sätta ett gemensamt gränsvärde för detektion.

Slutsats: Utvärderingen av sensorn visade att den är lämplig eftersom den kan mäta skillnaden mellan vita och svarta ytor på ett tillförlitligt sätt och är dessutom enkel att implementera.

2.3 Ultraljudssensor för avståndsmätning

Högfrekvent ljud som analysverktyg utvecklades för att detektion och bestämma position för objekt under vatten där elektromagnetiska vågor är olämpliga då de breder ut sig för snabbt. Ultraljud är tryckvågor med frekvenser som överstiger 18 - 20 kHz och kan inte höras av människor [14]. En ultraljudsgenerator fungerar som en elektroakustisk transduktor. Tillförd elektrisk energi omvandlas till mekaniska vågrörelser och vice versa med hjälp av piezoelektriska material (ofta kvartskrystaller). Därmed fylls funktionen som både sändare och mottagare [14]. Genom eko-detektion kan avstånd mätas.

Testning utförs med ultraljudssensorn SRF05 [15]. Sensorn är avsedd att mäta avstånd till föremål framför AGV:n. Sensorn returnerar den tid som passerat från att signalen skickats till att ekot kommer tillbaka, denna tid kan sedan användas för att beräkna avstånd då hastigheten för ljud genom luft är känd.

Metod: Sensorn kopplades till en Arduino för styrning och avläsning av data. För att aktivera sensorn skickas en puls med en längd på 10 μs . Då skickar modulen ut åtta ultraljuds signaler. Ultraljuds signalerna studsar på det som är framför sensorn och återvänder med en fördröjning mellan 100 μs och 25 ms . Fördröjningen är proportionell mot avståndet enligt ekvation 2.1.

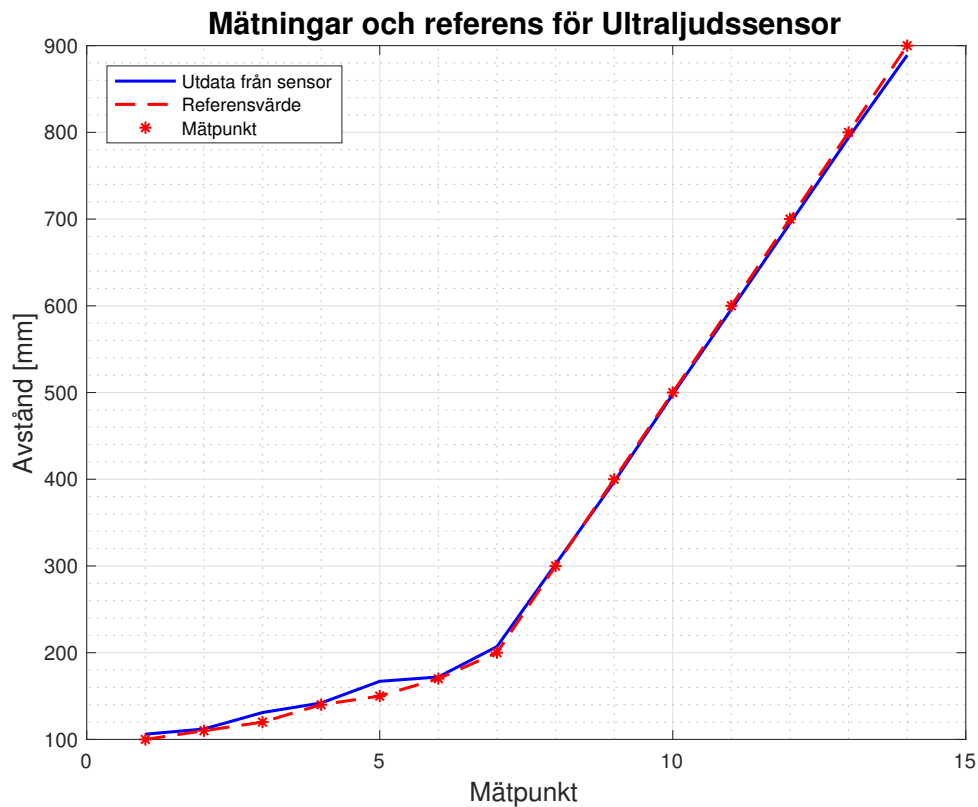
$$d = \frac{\mu s}{58} \quad (2.1)$$

Där d är avståndet i centimeter och μs ekopulsens längd i mikrosekunder [15]. För att få fler värdesiffror på avståndet ändrades formeln från ekvation 2.1 med cm som resultat till en ekvation som istället gav avståndet i mm som resultat i ekvation 2.2.

$$d = \frac{\mu s}{5.8} \quad (2.2)$$

Då kunde avståndet, d , utläsas i millimeter. En linjal placerades på en horisontell yta som referens. Ena änden på linjalen placerades mot en vertikal plan yta (vägg). Därefter placerades sensorn på olika avstånd från ytan. Linjalens referensvärde samt datan från sensorn fördes in i en tabell, se bilaga A.3. För att mäta repeterbarheten gjordes två markeringar längs linjalen, en vid 100 mm och en vid 150 mm . Sedan placerades sensorn 10 gånger vid vardera markering och utdatan fördes in i en tabell, se bilaga A.4.

Resultat: Testning visade att de uppmätta värdena från sensorn stämmer bra överens med de faktiska avstånden till ytan. Den största avvikelser som noterades var 10 mm och det maximala avståndet sensorn kunde uppmäta var 1210 mm . Figur 2.2 visar data och referens från mätning.



Figur 2.2: Mätningar med ultraljudssensorn som visar att sensorns utdata stämmer väl överens med referensen.

Analys & Diskussion: Enligt kravspecifikationen, tabell A.2, krävs att prototypen ska kunna positionera sig vid sökning med en noggrannhet $\pm 10 \text{ mm}$. Detta krav uppfyller ultraljudssensorn.

Slutsats: Ultraljudssensorn har tillräckligt hög noggrannhet, bra räckvidd och god repeterbarhet för projektets ändamål. Därför kan ultraljudssensorn vara en lämplig lösning att implementera.

2.4 Lidarsensor för avståndsmätning

Traditionell laser består av ett aktivt medium³, exempelvis halvledare där en ström tillförs för att generera en inverterad population⁴. När en foton emitteras spontant ger den vid interaktion med en exciterad atom upphov till att ännu en foton genereras med samma fas, riktning, frekvens och polaritet vilket benämns stimulerad emission. Detta leder till en kaskadeffekt och ger upphov till koherent strålning i laserns spektrum mellan synligt rött ljus och infrarött. Placerat i ett reflektivt utrymme kommer laserstrålen genereras när förstärkningen från den stimulerade emissionen överstiger de förluster som uppstår vid absorption och spridning som spegelytan ger upphov till [16].

Lidar ("light detection and ranging") som används till bland annat insamling av topografidata. Men metoden kan även användas till enbart avståndsmätning. Genom att skicka ut pulser av ljus och mäta fördröjningen tills det att en reflektion detekteras kan ett avstånd beräknas. Metoden kan liknas vid radar, men istället för radiovågor används ljus. Då en exakt ljuspuls krävs används en laser vilken skapar koherent ljus. Den väldefinierade ljuspulsen i kombination med noggrann tidtagning ger en effektiv sensor. [17]

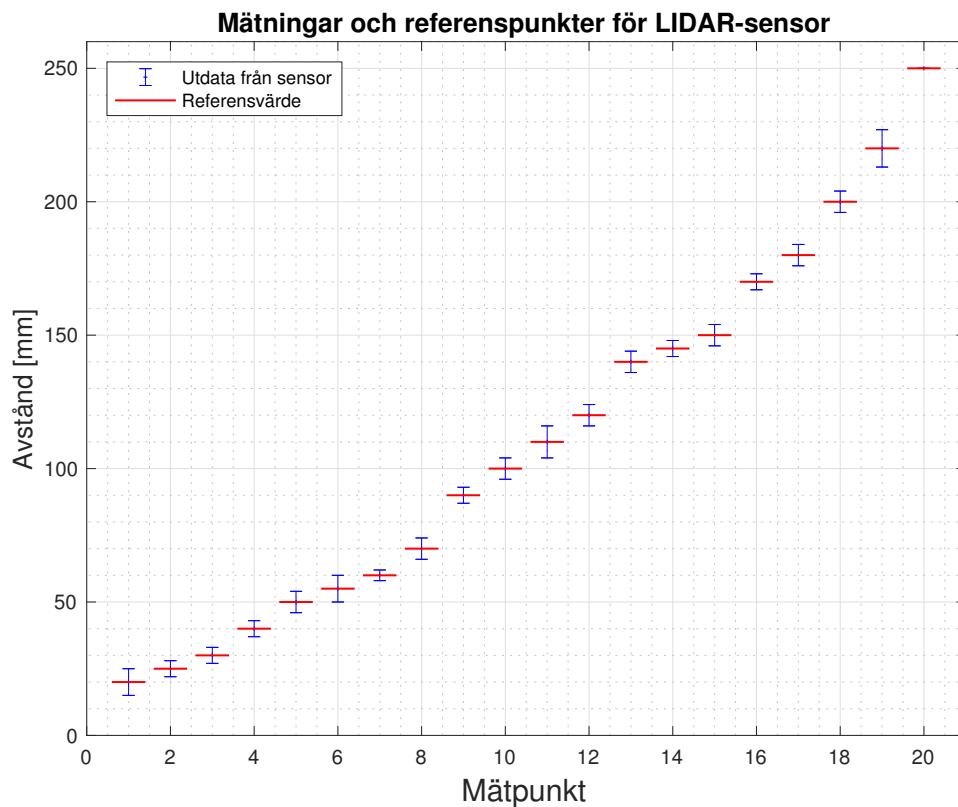
Testning utfördes med lidarsensorn *VL6180X* [18]. Denna sensor är avsedd för att mäta avstånd till objekt inom 0 till 10 *cm*. Sensorn använder infrarött ljus. [18]

Metod: Lidarsensorn kopplades ihop med en Arduino för dataavläsning med hjälp av Arduinos färdiga bibliotek [19] för analoga indataavläsning. Med en linjal som referens placerades sensorn på olika avstånd från en vit vertikal plan yta (en vägg). Referensvärdet samt sensorns utdata fördes in i en tabell, se bilaga A.1.

Resultat: I de mätningar som utfördes uppvisade lidarsensorn sämre precision än vad som beskrivs i databladet [18]. Den maximala avvikelser som uppmättes var 15 *mm* ~20 % fel. Det uppdagades också problem vid avläsning av mätdata. Då det visade sig att värdena fluktuerar kraftigt i ett intervall på 5-10 *mm* beroende på avstånd till mätobjektet. Detta kan studeras i figur 2.3.

³elektrisk komponent som kan generera optisk förstärkning

⁴fler elektroner befinner sig i ett exciterat tillstånd än icke exciterat tillstånd



Figur 2.3: Mätningar med lidarsensorn som visar referens samt hur mätdata fluktuerar kring denna.

Analys & Diskussion: Enligt datablad för lidarsensor VL6180X ska sensorn klara av de krav gällande maximalavvikelse oberoende av reflektion från mätobjektet [18]. Däremot visar de mätningarna som utförts att lidarsensorn inte har en godtagbar maximalavvikelse enligt projektets kravspecifikation. En hypotes om varför datablad och testning inte korrelerar med varandra kan vara att det testade exemplaret av lidarsensor inte höll måttet. Beroende på en begränsad projekttid fanns det inte möjlighet till ytterligare testning av sensortypen. Däremot kan det vara av intresse att göra ytterligare mätningar med ett annat exemplar eller variant av lidarsensor.

Slutsats: Efter testning och utvärdering av lidarsensorn blir slutsatsen att prestandan inte är tillräckligt bra för projektets ändamål samt att lidarsensorn inte är avsedd för att mäta avstånd längre än 100 mm.

2.5 Ljusfyrslokalisering med infrarött ljus

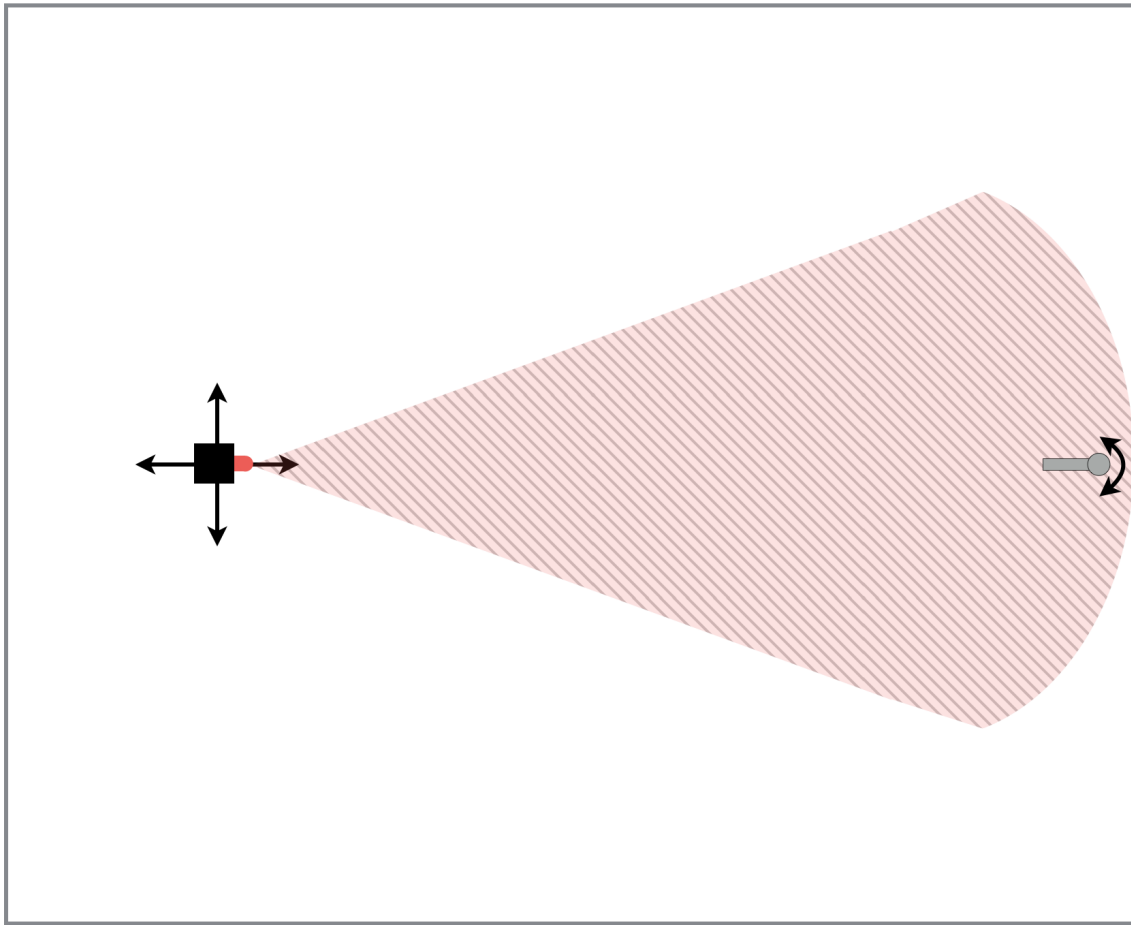
Avancerade sensorer för vinkelmätning ger hög precision och en stor mängd insamlad data. Dessvärre är dessa kostsamma och komplexa. Laserbaserade lösningar innefattar dyra apparater som dessutom beroende på klassning kan vara hälsofarliga [20] medan lösningar som utnyttjar bildbehandling kräver stor beräkningskapacitet. För att undvika dessa problem kan ljusfyrar användas, nackdelen är ljusfyrarnas krav på fast placering och därmed krav på större ingrepp i miljön och minskad flexibilitet [21].

En ljusfyr är ett synbart objekt i omgivningen, vilken kan vara passiv eller aktiv. Det finns flera tekniker som kan användas i ljusfyrar men för mindre robotar inomhus med snävare budgetkrav är infraröda ljusfyrar en lämplig lösning. Systemet klarar sig med endast en infraröd kommunikationskanal och kräver ingen synkronisering mellan fyrarna och roboten. Eftersom infraröda mottagare och sändare är både billiga och små [21] upptar sensor- och ljusfyrmodulerna väldigt liten volym jämfört med andra system. Ljusfyrarnas enda aktiva komponent består av en IR-diod [20].

Ljusfyrarna kan placeras var som helst tack vare sin låga vikt och lilla storlek, men inte flyttas efter installation. En modul med en IR-mottagare som sveper omgivningen efter ljusfyrar skall placeras ovanpå robotens chassi. Dess mål är att mäta upp vinkeln mellan robotens referensvinkel och ljusfyren (Bäring) [20]. Så länge ljusfyrarna inte är dolda bakom ett annat objekt kan den svepande IR-mottagaren detektera dem förutsatt att de är placerade inom räckvidd från roboten. Nackdelen med infrarött ljus är att endast information om bäringen ges och ingen om hur roboten är orienterad [21].

Ett välanvänt koncept som ger flexibilitet och tillförlitlighet är triangulering med hjälp av aktiva ljusfyrar [20]. Med ultraljud eller laser används ibland odometri tillsammans för att lokalisera eller navigera en robot. Sådana system använder en rutnätsskarta som ofta fungerar väl, men hög upplösning bidrar direkt till ökade krav på utrustning [22]. Med infraröda ljusfyrar kan bäringsvinklarna för minst tre fyrar transformeras till kartesiska koordinater. Vid användning av en karta för omgivningen samt ofta ett *Bayesiskt filter*⁵ kan dessa ge väldigt korrekta skattningar av robotens placering. Med *Utökade Kalmanfilter (EKF)* har det visat sig att endast information om bäringen räcker för att lokalisera en robot samt beräkna dess orientering [20, 21].

⁵rekursivt filter som utnyttjar sannolikhet för skattningar av i detta fall robotposition [21]



Figur 2.4: Figuren visar hur test av ljusfyrslokalisering med infrarött ljus utförts

Metod: Del ett av utvärderingen var att placera ut en ljusfyr, med icke-kodat IR-ljus, godtyckligt i testmiljön. En IR-mottagare monterades ovanpå en servomotor som placerades på en fast position i testmiljön, se figur 2.4. Konceptet var att servomotorn svepte 180° för att söka igenom testmiljön efter en IR-signal.

För att kunna avgöra vilken bäringsvinkel ljusfyren har i relation till mottagaren sparas alla servovinklar där IR-signal detekteras. Det beräknade medelvärde av dessa ger bäringen

$$\sum_{i=1}^n \frac{\phi_i}{n} = \phi_{bäring} \quad (2.3)$$

Där n är antalet vinklar där IR-ljus detekterats efter ett givet svep.

Del två av testningen bestod i en snarlik procedur med skillnaden att IR-ljuset ifrån ljusfyren var kodat. Detta innebar att spänningskällan och IR-dioden kopplades till en mikroprocessor som skickade ut ett bitmönster för identifiering av ljusfyren.

Resultat: Gemensamt för båda testerna var att under svepning med IR-mottagaren detekterades vissa vinklar där IR-ljus inte skulle förekomma. Denna problematik eliminerades i stort sätt helt genom att montera avskärmning på IR-mottagaren för att minska potentiella störningskällor.

Ett problem som endast uppkom i testerna för kodatljus var att vissa ”bitar” i bitmönstret föll bort. Detta ledde till problematik i mjukvaran då det förväntades komma ett specifikt värde ifrån ljusfyren men felaktiga och oregelbundna värden detekterades.

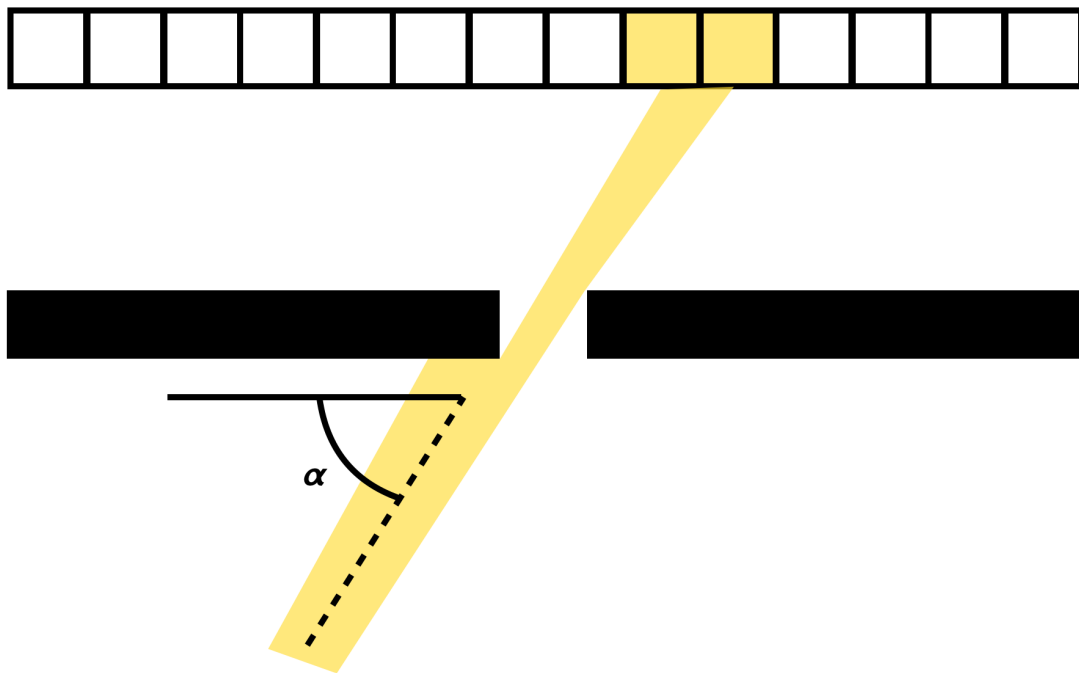
Ett annat problem med testningen av kodat IR-ljus var en Arduino inte har tillräcklig beräkningskraft för att styra servomotorn, göra avläsningar samt filtrera och beräkna vinkel samtidigt. Detta uppdagades genom att servomotorn ryckte kraftigt kring önskad position när kodat IR-ljus detekterades. Detta löstes genom att separera styrning och avläsning via två olika Arduino, vilket eliminerade problemen.

Analys & Diskussion: Efter att de största felkällorna i vinkelmätningarna eliminerats samt mjukvaran förfinats uppvisade konceptet med IR-ljusfyrar både en god precision samt repeterbarhet. Däremot uppnåddes inte de önskade resultaten med kodade IR-ljusfyrar. Eventuellt hade problemet med fel avläsning kunnat lösas med en filtrering i mjukvaran, alternativt använder man bitmönster som skiljer sig så mycket att det blir svårt att misstolka datan även om någon bit faller bort. Exempelvis symmetriska bitmönster (10000001,01000010,00100100,00011000).

Slutsats: Infraröda ljusfyrar kan vara en lämplig teknik för att mäta bäringsvinkel samt att ge körsimpulser till AGV:n. Metoden erbjuder tillräckligt bra precision och kräver inte allt för mycket av den beräkningskraft som finns att tillgå. Dessutom är tekniken enkel vilket underlättar implementering.

2.6 Ljusfyrslokalisering med laserljus

När laserljuset träffar en linjesensor (en rad med 128 ljussensorer) med hög känslighet för laserns våglängd, kan en spänningsökning mätas. När ljuset passerar en spalt på känt avstånd till sensorn ges information om infallsvinkeln utifrån vilka sensorer i raden som detekterar laserljus, se figur 2.5.



Figur 2.5: Linjesensors metod för beräkning av infallsvinkel.

Exempel på hur ljusets infallsvinkel avgör vilka av ljussensorerna som träffas av ljuset. En förenklad version av linjesensorn syns längst upp i figuren och de gula området representerar ljusets spridning genom spalten. De svarta cirkelarna längst ner representerar ljuskällan som är till vänster om sensorns centrum i den vänstra bilden och till högre i den högra. Vilka av sensorerna i sensorraden som träffas används för att beräkna α i detta fall $\alpha_1 < \alpha_2$.

Metod: För att testa hur väl lösningen uppfyllde kraven utformades en testmiljö som skulle tillåta upprepade mätningar med liten till ingen verklig variation med avseende på vinklar till laserkällan. Variation i mätdata skulle därför bara kunna grunda sig i metodens medförda osäkerhet, omfattningen av denna variation skulle sedan ligga till grund för beslutet om vidare tester.

Resultat: Baserat på denna initiala testning, de restriktioner som måste följas angående klassning av laser och sensors oförmåga att reagera på det lågintensiva ljuset från dessa lågt klassade laserkällor tas beslut om att inte fortsätta testningen med denna typ av ljusfyr.

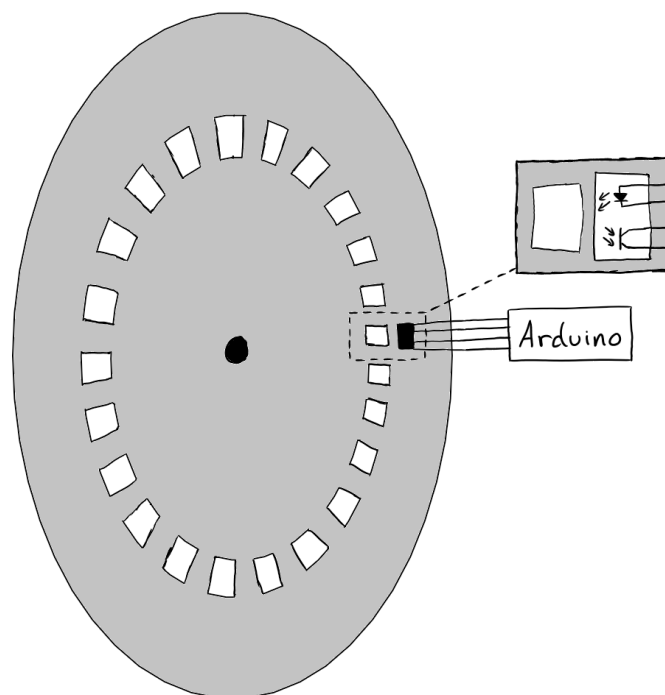
Analys och diskussion: Resultaten efter testning är goda och lösningen fungerar som ämnat. Problemet är att laserns ljus inte sprider sig, ljuskägla är extremt smal och därav är det lätt att ljussensorerna inte alls träffas om AGV:n hamnar lite fel. För att komma runt problemet med spridningen på ljusstrålen placeras en lins mellan laser och sensor nära lasern så att spridningen kan justeras i viss mån. När avståndet mellan ljuskällan och sensorn ökas innebär spridningen att ljusets intensitet blir allt för låg. Den ökade spridningen utan ökad effekt leder till att ljusets intensitet blir lägre än den lägsta intensitet sensorerna kan detektera. Eftersom även laser med förhållandevis låg effekt (1-5 *mW*) anses farlig finns strikta restriktioner kring dess användande. Dessa restriktioner innebär att laserns effekt inte kan ökas tillräckligt mycket för att sensorn skall uppnå en robust avläsning på de avstånd som krävs.

Slutsats: Eftersom effekten hos den laser som finns att tillgå är såpass låg och effekten inte kan ökas på grund av strålningsföreskrifter avslutas utvärderingen.

2.7 Odometri och drivmotorer

En odometer mäter avstånd med hjälp av ett hjul genom att räkna antal rotationer [16]. Hjulets omkrets multiplicerat med antal rotationer ger avståndet. Detta kan mätas via kugghjul kopplade till hjulaxeln, i mer moderna utförande där hjulens rotation är proportionell mot överförd effekt härleds avståndet därifrån. Odometern är idag ett av de mest använda mätinstrumenten på grund av bilens spridning, då varje bil i normala fall (bil utrustad med låsningsfria bromsar) har fyra odometrar ombord [23]. Genom dessa sensorer får styrenheten information om hjulens individuella rotation, som används till allt ifrån antisladdsystem till hastighetsmätning.

Metod: Inledningsvis bestod testutrustningen av ett färdigt kit, med två kontinuerliga servomotorer som drivmotorer, i form av en Boe-Bot från Parallax [24]. Problemet med denna typ av servomotorer är att de är väldigt svåra att justera så att de roterar med samma hastighet. Problemet kvarstår även om de kopplas till samma styrsignal. För att kringgå detta problem försågs vardera hjul med en optokopplare, som kan läsas mer om i kapitel 2.2, som betraktade hjulet, mer specifikt det område på hjulet som försetts med spalter för detta ändamål, via dessa sensorer fick Arduinon information om hur snabbt hjulen roterade. Se figur 2.6 för illustration. Med denna information skulle Arduinon justera styrsignalerna för att uppnå samma rotationshastighet på båda drivhjulen. Efter utförlig testning visade det sig att det var svårare än väntat att få Boe-Boten att gå rakt framåt utan att avvika åt något håll. Därför togs beslutet att överge servomotorerna och istället övergå till stegmotorer.



Figur 2.6: Figuren visar hur opokopplaren används för odometri

När drivmotorerna byttes passade inte det ursprungliga chassit längre, ett nytt chassi konstruerades för att passa de nya motorerna och 3D-printades. Att övergå till stegmotorer ledde till att exakt kontroll av förflyttning möjliggjordes. Genom detta kunde roboten färdas rakt fram utan att avvika åt något håll om detta önskades, vilket inte var fallet med de servomotorer som roboten inledningsvis använde som drivmotorer. Genom stegmotorernas höga precision (200 *steg/varv*) [25] kan robotens rörelse kontrolleras mycket exakt, dess position, riktning och hastighet kan beräknas och användas för att navigera utan stöd från andra sensorer. Största skillnaden mellan stegmotorerna och de servomotorer som inledningsvis användes är att stegmotorerna vrider stegvis, därmed överensstämmer förväntad och faktisk vridning av hjulet. Testning gjordes genom att en penna fästes på roboten som sedan fick köra på en whiteboard-tavla, mönstret som resulterade gav insikt i repeterbarhet samt återkoppling på vilka förändringar som behövde göras.

Resultat: Det första som testades var att köra rakt fram vilket visade sig väldigt enkelt efter viss finjustering av momentbegränsning samt steglängd. Det första problemet som uppstod var att uppnå mjuk acceleration och deceleration, detta gjordes genom att tidsfördröjningen mellan varje steg ökades eller minskades stegvis. Genom denna metod kunde hjulens glid mot underlaget minimeras. För att ta reda på hur många steg som motsvarade vilken förflyttning eller vridning gjordes flera tester med varierande antal steg och tidsfördröjningar.

Analys & Diskussion: Odometri är ett utmärkt verktyg för att exempelvis mäta rotationshastighet på ett hjul, det ämnar sig mindre väl som huvudsakligt navigationsmedel. Problemet är att alla förutsättningar omöjligvis kan vara kända. Man kan ha ett stabilt och väl konfigurerat system som trots detta kan störas av variationer i underlaget vilket kan leda till att roboten vrider sig någon eller några grader mindre vid en rotation. Effekten av ett sådant fel mellan den verkliga positionen och den förväntade positionen är svår att kompensera för. En lösning är att ha fasta synkroniseringspunkter där eventuella fel mellan den förväntade/beräknade-och den verkliga positionen kan korrigeras.

Slutsats: Odometri är ett bra verktyg men är inte tillräckligt robust för att användas som huvudsaklig navigationsmetod, det finns lösningar som kan kompensera för dess brister. Odometri lämpar sig väl för kombination med andra navigationsmetoder.

2.8 Avläsning av QR-kod med kamera

QR-kod som står för *Quick Response code* är en teknik som utvecklades av det Japanska företaget *Denso* för att enkel och snabb visuell avläsning. Koden användes i början för märkning av komponenter i bilindustrin under tillverkningsprocessen men har i dagens samhälle anammats för länkning till hemsidor på annonser eller skyltar [26]. Det finns 40 olika storlekar på rutnätet för QR-koder, där den minsta har ett rutnät på 21x21 och den största med 117x117. Själva koden kan innehålla upp emot 4 296 alfanumeriska tecken [27].

Med en kamera och QR-koder fästa på stationer i höjd med kameran, kan QR-kodsavläsning möjliggöras. QR-koden kan i sin tur innehålla information om exempelvis stationen som den är fäst på eller fungera som en vägskylt och ge ruttinstruktioner. Användningen av tekniken är väldigt beräkningstung. Python används som det primära programmeringsspråket för test då ett äldre bildbehandlingsbibliotek som heter Zbar finns tillgängligt för avläsning av QR-kod. [28]

Metod: Det första målet med testet är att känna igen en QR-kod, vilket gick väldigt smidigt med högnivåfunktionen "Processor" från Zbar. Koden som användes finns i bilaga A.4.

Datahantering sker via funktionen `data_handler` där `symbol.data` innehåller den avlästa kodens, i detta fall QR-kodens, data. `symbol.location` ger positionen på kodens alla hörn i pixel-koordinater, på så vis kan kodens position i kamerans vy bestämmas, därav också kodens pixel-area med kryssprodukt.

En QR-kod med måtten 5,8x5,8 cm skrevs ut på ett A4-ark och ett måttband placerades vinkelrätt från kameran. Den kamera som användes i testet har upplösningen 640x480 pixlar. QR-koden avlästes vid alla fyra hörn av kamerans vy för att bestämma koordinatsystemet. Därefter fördes QR-koden från en meters avstånd mot kameran för att se när kameran kunde avläsa koden, mätningen gjordes två gånger.

Resultat:

Tabell 2.1: Två efterföljande mätningar för det längsta avståndet som QR-koden kunde avläsas för respektive pixelarea.

Avstånd [cm]	Relativ pixelarea
72	2551
84	1764

Analys & Diskussion: Precisionen på avläsningen av QR-koden beror på kameran upplösning samt ljusförhållande vid mätningen. Från tabell 2.1 innehållande två mätningar i samma ljusförhållanden med små vinkelförändringar (i QR-kodens orientering), ger väldigt olika avstånd för avläsning. Tabellen beskriver hur stor pixelarea, som kameran uppfattar vid ett givet avstånd, som behövs för att kunna tyda en QR-kod med den nuvarande metoden.

QR-kodavläsning kräver mycket beräkningskraft relativt andra metoder som undersökts. Detta framkom när samma kod kördes på en Raspberry Pi med tillhörande *Camera v 2.1* modul. [29] Avläsningen tog så lång tid att prestandan Raspberry Pi kunde tillhandahålla var otillräcklig. Det betyder att en del optimeringar krävs för att få den att fungera på en enkortsdator. Kameran till Raspberry Pi saknade även en funktion för auto-fokus vilket minskar flexibiliteten för varierande avstånd.

De enklaste optimeringarna som kan göras är exempelvis att endast avläsa svartvita bilder eller begränsa Zbar till att endast söka efter QR-koder. Själva kodbiblioteket uppdaterades senast 15:e oktober 2012, så ett nytt kodbibliotek kan eventuellt innehålla optimerad kod gentemot Zbar.

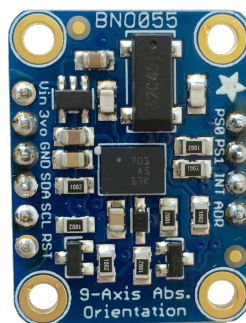
Slutsats: Metoden är flexibel och kan användas till att samla olika typer av information. Men kräver hög beräkningskapacitet och kommer att kräva arbete och optimeringar för att implementeras på ett bra sätt. Den kan dock fungera tillfredsställande efter optimering av programvara därför fortsatte utvärderingen.

2.9 Absolut orienteringssensor, tröghetsplattform

Tröghetsnavigering utvecklades som en ny form av navigering i USA och Sovjetunionen under Kalla kriget efter det att raketingenjörer från det besegrade Tyskland införlivades i militära forskningsprojekt. Fördelen med denna form av navigering var att ingen extern data krävdes, förutsatt att initial tid och position angetts, för att bestämma ett fordonns egen position. Därmed var dessa navigeringssystem inte känsliga för fiendens yttre störningsförsök. Endast USA och Sovjet hade de finansiella muskler som krävdes för att utveckla denna då helt nya teknik [16]. Ett tröghetsnavigeringssystem mäter acceleration och erhåller hastighet via enkelintegration samt position via dubbelintegration. Traditionellt har accelerometern placerats på en plattform vars orientering stabiliserats med gyroskop via komplexa servomekanismer [16].

Ett nyckelproblem är att avgöra vad som är acceleration från jordens gravitation och vad som är acceleration från fordonets rörelse. Om plattformens orientering inte är konstant blir detta omöjligt. Avvikelserna i orientering ackumuleras under färden och förhindrar korrekt mätdata från att produceras. För att förhindra detta problem har accelerometrar och gyroskop utvecklats kraftigt. Kraftfulla datorer har möjliggjort icke-mekaniska gyroskop så som lasergyroskop [16].

Kommersiella system började användas under tidigt 1970-tal, men tröghetsnavigering har alltid varit en av många tekniker för att bestämma position. Tröghetsnavigering har fortsatt en given användning för uppgifter med höga säkerhetskrav som exempelvis ballistiska kärnstridsspetsar medan moderna flygplan har börjat gå över till GPS och andra positioneringsmetoder [16]. Efter hand som mikrotröghetsmätare utvecklats och fallit i pris har nya användningsområden tillkommit inom konsumentelektronik, så som för smarta telefoner och spel samt inom robotik [30].



Figur 2.7: Tröghetsmodulen BNO055 med måttet 2x2,7 cm

Adafruit's "BNO055 - Absolute Orientation Sensor" med 9-frihetsgrader ger mätdata enligt tabell 2.2. Tröghetsmodulen innehåller ett gyroskop samt accelerometer i tre axlar och en geomagnetisk sensor, alla i MEMS⁶-format. Dessa sitter monterade på ett litet mikrochip. Detta mikrochip sammankopplat med *Bosch sensortec*

⁶Micro Electrical-Mechanical System

sensor fusion mjukvara och en *ARM Cortex-M0* baserad processor sitter på ett litet kretskort enligt figur 2.7 [5, 31]. Tillsammans utgör dessa en tröghetsmätare och navigationsapparat i miniatyrformat. I de mätningar som utförs räknas inte användningen av BNO055 som tröghetsnavigering eftersom ingen information om initialposition anges. Med hjälp av GPS-data kan detta problem lösas men inomhus är det inte en lämplig metod, då signalerna kan blockeras av byggnaden. ”Sensor fusion” mjukvaran har till syfte att underlätta tolkningen av orienteringsdata samt via kombination av olika mätdata korrigera för ”offset” från exempelvis gravitation i accelerometerdatan och minska brus. Tröghetsmätare i mikroformat är inte lika noggranna som konventionella tröghetsmätare utan fördelen är främst lägre kostnad samt storlek. En del mikrotröghetsmätare använder sig inte utav riktiga gyroskop utan ”virtuella” som består av en samling kombinerade accelerometrar vilket leder till lägre kostnad men högre brus [32].

Tabell 2.2: Specifikation av utdata från BNO055 [5, 31]

Datatyp:	Form:	Enhet:	Uppdateringsfrekvens [Hz]:	Sensor fusion:
Absolut orientering	Eulervektorer	° grader	100	Ja
Absolut orientering	Kvaternion	4-punkts kvaternion	100	Ja
Vinkelhastighetsvektor		rad/s	100	Ja
Accelerationsvektor	Gravitation + linjär rörelse	m/s^2	100	Nej
Magnetisk fältstyrkevektor		μT	20	Nej
Linjär accelerationsvektor	Acceleration – gravitation	m/s^2	100	Ja
Gravitationsvektor		m/s^2	100	Ja
Temperatur		° C	1	Nej

Metod: BNO055 kopplades ihop med en Raspberry Pi som sedan skickade data via serialporten med en uppdateringsfrekvens på 100 Hz, mätdata sparades till en fil och analyserades i efterhand med Matlab [33].

Ett flertal mätningar gjordes för positionsberäkning. Tröghetsplattformen monterades på en ABB-robotarm *IRB 1600 M2004* [34] som programmerades för rörelse i ett förkonfigurerat mönster. Den första mätningen rörde BNO055:s linjäracceleration och förmågan att beräkna position utifrån denna. Robotarmen rörde sig inledningsvis framåt och bakåt i en axel, därefter testades en kombination av två axlar. Sist testades linjäraccelerationen i alla tre axlar. För att tolka accelerationen som sträcka används en summering, se ekvation 2.4, för varje diskret mätpunkt

$$s_n = \frac{a_n t^2}{2} + v_{n-1} t \quad (2.4)$$

där t är tiden mellan varje mätning, a_n är linjäraccelerationen för respektive mätpunkt, v_{n-1} är föregående mätpunkts beräknade hastighet. Start och slutpunkt för rutinen var samma position och då avvikelser mellan start och slut uppträdde gjordes antagandet att brus kunde ge upphov till dessa. Då låga frekvenser ger upphov till den kraftigaste bruspåverkan [35] konstruerades ett Butterworth lågpasfilter i

Matlab via `designfilt` av tolfte ordningen samt `filtfilt` för nollfasfiltrering, men kvalitativt kvarstod problemet. Resultatet kan ses i figur 2.8.

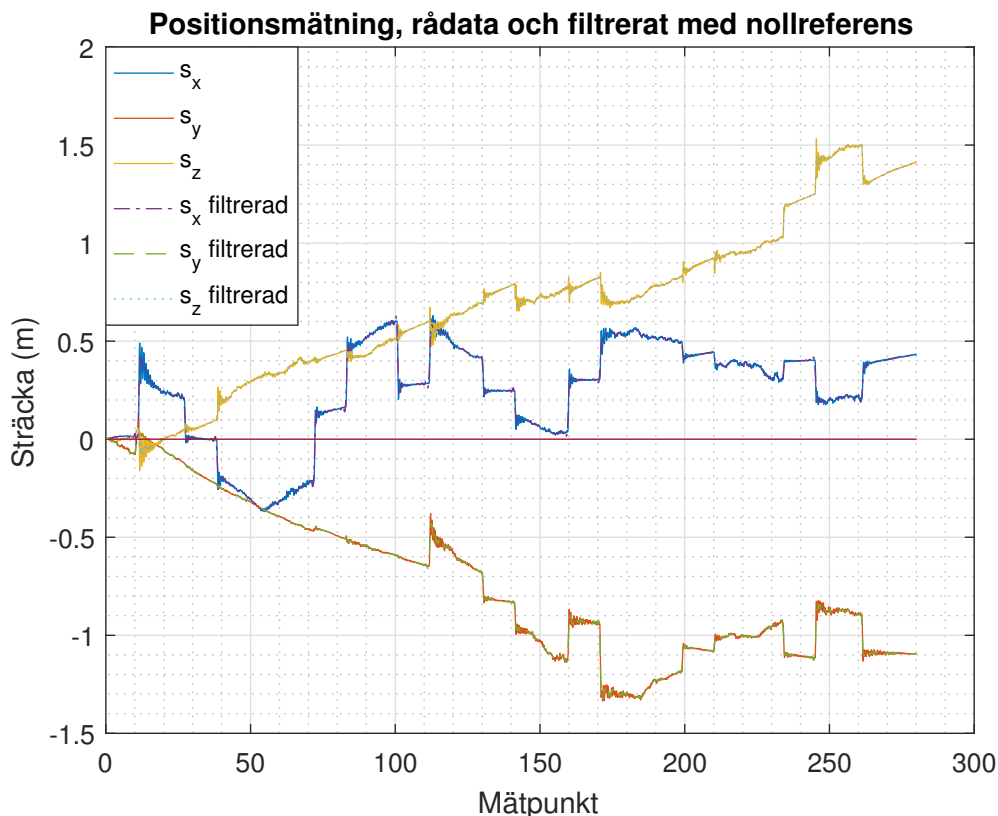
En mätning gjordes med en magnet. Den magnetiska fältstyrkan mättes utefter positioner på en linjal, vid elva punkter med ett avstånd från 0-20 cm se figur 2.9. De uppmätta värdena tycks stämma väl överens med den fysikaliska teorin

$$B \propto \frac{1}{r^2} \quad (2.5)$$

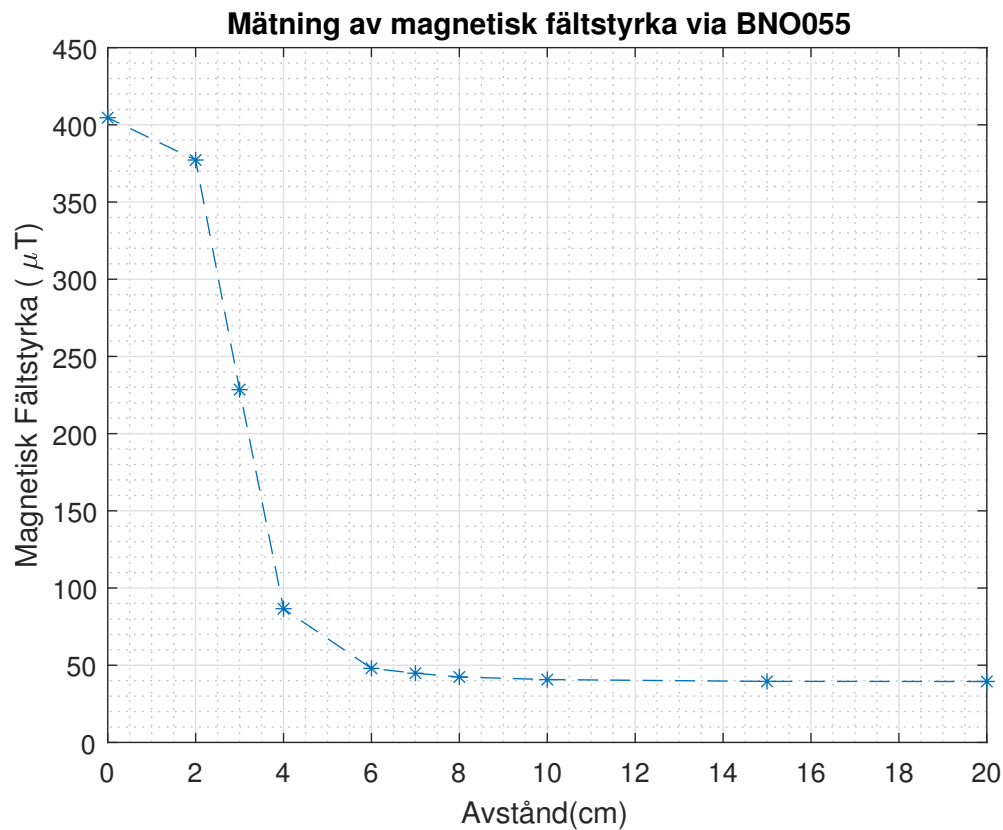
den magnetiska fältstyrkan avtar kvadratisk med hänsyn på avståndet till källan. Magnetsensorn visar också ett basvärde för fältstyrkan kring $50 \mu T$ det kommer från jordens magnetfält, vilket betyder att den också kan användas som kompass.

Flera vinkelmätningar vid rotation utfördes med förbestämda rotationsrörelser för olika axlar och avvikelser uppträdde för samtliga. Efter upptäckten att robotarmens koordinatsystem inte överensstämde med tröghetsplattformens justerades detta och nya mätningar gjordes vilket resulterade i förbättringar.

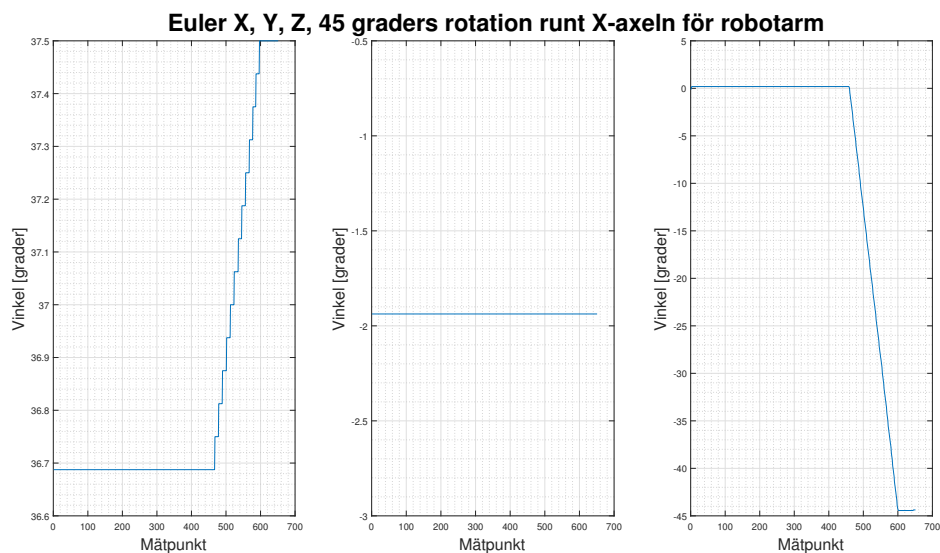
Resultat:



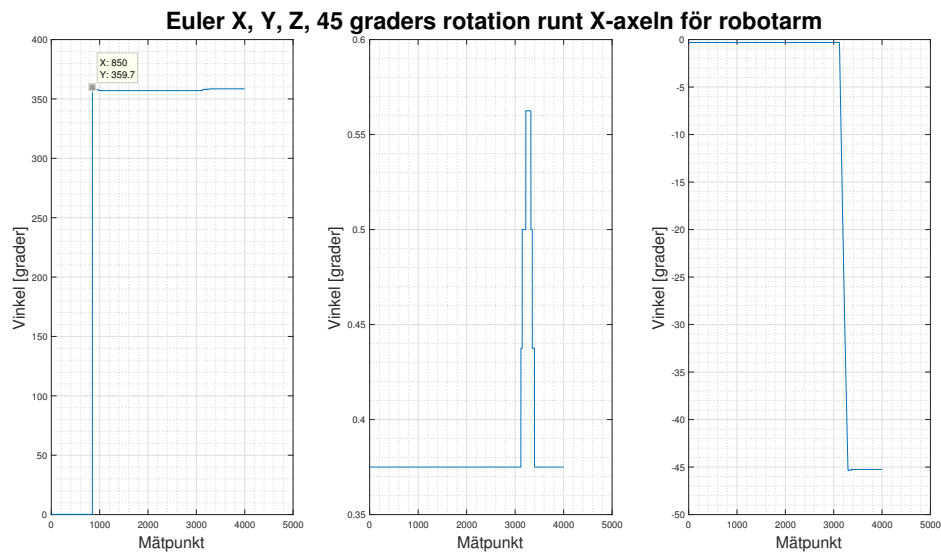
Figur 2.8: Positionsberäkning ur linjär accelerometerdata, både för rådata och efter lågpasfiltrering. Eftersom start och slutpunkt är samma position borde inte de stora avvikelser från nollnivån uppträda. Lågpasfiltreringen som implementerats löser inte problemet.



Figur 2.9: Magnetiska fältstyrkan vid de punkter som markerats i figuren.



Figur 2.10: Icke kartesiskt koordinatsystem för robot, ej samordnade axlar med BNO055. Observera att roboten och BNO055 inte har samma axelreferens. Tydlig offset i både Euler-X och Euler-Y dessa borde befinna sig på noll grader, Euler-X ger utslag på ungefär en grad. Endast Euler-Z borde ge utslag.



Figur 2.11: Kartesiskt koordinatsystem för robot, samordnade axlar med BNO055. Axelreferenserna stämmer inte överrens. Liten offset och små rotationsrörelser ut-
anför Euler-Z vilket tyder på ett förbättrat mätresultat. Euler-X befinner sig nära
noll grader och förändringen är enbart ett litet överslag.

Analys & Diskussion: Den diskreta form av dubbelintegral av accelerationen som användes för positionsbestämning utreds på flera trådar hos Adafruits forum, ett exempel är [36] där en supportmedarbetare beskriver att, eftersom såpass många fel kan krypa sig in i mätningarna bidrar dubbelintegralen till att felen snabbt samverkar så att positionsmätningen blir mycket opålitlig. Genom att tillhandahålla GPS-data eller data från andra sensorer kombinerat med tröghetsmätningar samt Kálman filtrera detta ges eventuellt position med hög upplösning och utan ackumulerade fel. Detta utfördes inte och har därför inte utretts. Potentiell vidareutveckling kan utnyttja detta.

Magnetometern gav tydlig data som överensstämmer med teoretiska antaganden och kan därför användas vid magnetiska referenspunkter eller magnetisk vägledning.

Vinkelmätningarna gav efter hand goda resultat och bör kunna användas för orienteringsinformation. Om så önskas kan BNO055 programmeras för att ändra axelreferens men utfördes inte då detta ansågs hålla låg prioritet. För information om hur detta implementeras se [5].

Slutsats: BNO055 lyckades inte leverera som ett verktyg för absolut positionering med hjälp av linjäracceleration enbart, men den har god potential som magnetfälts-sensor eller för vinkelmätning.

3

Genomförande

Efter testning och utvärdering av potentiella metoder skapades underlag för att generera koncept, eliminera de som ej uppfyller kraven samt välja ut den lösningskombination vars prestanda och implementeringsmöjlighet bedöms som mest fördelaktig.

3.1 Konceptgenerering utifrån teori och tester

För att ta fram koncept delades de tekniker som inte eliminerats tidigare upp i kategorier, dessa kan studeras i tabell 3.1. Kategorierna är sökare, kontroll och dockning. sökare är de tekniker som ska lokalisera dockningsstationen och ge körinformation åt AGV:n. kontroll är de tekniker som ska kontrollera att AGV:n åker åt rätt riktning och sträcka. dockning är de tekniker som navigera AGV:n till slutposition och ser till att lastning är möjlig. Vissa tekniker kunde placeras i flera olika kategorier.

Dessa olika tekniker kombinerades till koncept där alla koncept har en teknik för sökare, kontroll och dockning. Koncepten ska sedan utvärderas i en elimineringsmatris och sedan i en eller flera Pughs-matriser (se slutgiltigt val 3.3 för beskrivning) för att bestämma det slutgiltiga konceptet. Detta koncept ska appliceras på prototypen och användas för att lösa det problem som definierats i problemformuleringen.

Plattformarna Arduino och Raspberry Pi är inte med som dellösningar, de påverkar däremot viktningen av olika koncept genom att de tekniker som klarar sig med Arduino prioriteras över de som kräver Raspberry Pi. Alla koncept kommer att använda sig av den minst kraftfulla plattformen, så länge inte prestandan påverkas nämnvärt.

Tabell 3.1: Kategoriuppdelning Uppdelning av teknikerna i kategorierna sökare, kontroll och dockning.

sökare	
A	Ljusfyr IR
B	QR-kod (kamera)
C	Optokopplare
kontroll	
A	Ljusfyr IR
B	QR-kod (kamera)
C	Optokopplare
D	Tröghetsplattform
E	Odometri
F	Ultraljud
dockning	
C	Optokopplare
F	Ultraljud

3.2 Eliminering av koncept mot kravspecifikation

En elimineringsmatris användes för att sälla bort de koncept som inte uppfyllde kravspecifikationen. Elimineringmatrisen kan studeras i tabell 3.2 och kravspecifikationen i bilaga A.2.

Koncept 9 i tabell 3.2 som bestod av QR-kod som sökare, tröghetsmodul som kontroll och optokopplare som dockning elimineras mot krav 1.a Positionering. Detta koncept elimineras för att kameran som används för att läsa QR-koden inte klarar av att uppskatta avstånd och tröghetsmodulen inte är lämplig för att beräkna position. Tekniken är inte en självständig sökare. Kameran behöver något som kan uppskatta avstånd som t.ex. ultraljud.

Koncept 10 som innehåller QR-kod som sökare, tröghetsmodul som kontroll och ultraljud som dockning elimineras mot krav 1.i Hastighet. Detta för att den beräkningskapacitet som krävs för att driva både QR-kod och tröghetsmodul kommer göra att den Raspberry Pi (som behövs för att driva denna kombination av tekniker) blir överbelastad och kan därmed inte uppfylla kravet.

Tabell 3.2: Elimineringsmatris Koncept 9 elimineras mot krav 1.a, koncept 10 elimineras mot krav 1.i.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Krav:	Koncept:	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	C	C
		B	B	C	D	D	E	E	C	D	D	E	E	F	D	E
		C	F	F	C	F	C	F	F	C	F	C	F	C	F	F
1. a	Positionering vid sökning (avstånd)									X						
1. c	Positionering vid sökning (vinkel)															
1. e	Positionering vid dockning (avstånd)															
1. g	Positionering vid dockning (vinkel)															
1. i	Hastighet										X					
1. k	Avstånd för att uppfatta signal															
2. a	Energikälla															
2. b	Inkapsling															
2. d	Användarvänlighet															
2. e	Realiserbarhet															
3. a	Hälsosafarlighet															
3. b	Haveri															

3.3 Slutgiltigt val av koncept utifrån önskemål i kravspecifikationen

För att välja vilket koncept som är bäst användes Pughs-matriser för att på ett systematiskt sätt välja ut det bästa konceptet. Ett referenskoncept väljs ut som de andra koncepten kommer att jämföras med. Koncepten bedöms mot de olika önskemålen om de är bättre eller sämre än referenskonceptet. Sedan multipliceras önskemålen med ett om konceptet är bättre än referensen, med noll om det är lika bra och med minus ett om det är sämre. Därefter adderas dessa värden och skapar en viktad summa för konceptet. Ju högre viktad summa desto bättre. Referensens viktade summa är noll. Det gjordes två Pughs-matriser, den första för att gallra en del koncept och den andra för att välja det slutgiltiga konceptet.

I Pughs-matris 1, tabell 3.3, valdes koncept 7, AEF som referens. Detta koncept består av ljusfyr IR som sökare, odometri som kontroll och ultraljud som dockning. Efter att ha fört in alla koncept i Pughs-matris 1 och räknat fram en viktad summa för varje, eliminerades de koncept med viktad summa understigande noll.

3. Genomförande

Tabell 3.3: Pughs-matris 1 Koncept 7, AEF används som referens. Detta koncept består av ljusfyr IR som sökare, odometri som kontroll och ultraljud som dockning. Alla koncept som hade lägre viktad summa än noll togs bort. Det var sex koncept som gick vidare till matris 2.

	Koncept:	7	1	2	3	4	5	6	8	11	12	13	14	15
	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C
	E	B	B	C	D	D	E	E	C	E	E	F	D	E
Önskemål:	Vikt:	F	C	F	F	C	F	C	F	C	F	C	F	F
1.b Positionering (avstånd)	4	R E F E R E N S	+	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-
1.d Positionering (vinkel)	3		+	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-
1.f Positionering vid dockning (avstånd)	5		+	-	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+
1.h Positionering vid dockning (vinkel)	5		+	-	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+
1.j Hastighet	1		+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+
1.l Avstånd för att upfatta signal	3		0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-
2.c Sladd på hjul	3		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.f Inbromsning	1		-	-	0	0	0	0	-	-	-	-	0	0
4.a Beräkningskomplexitet	5		-	-	+	-	-	0	-	-	-	-	-	+
4.b Beräkningar	2		-	-	+	-	-	0	-	-	-	-	-	+
4.c Enkel programmering	4	S	-	-	+	-	-	0	-	-	-	-	-	+
4.d Enkel konstruktion	3		-	0	-	-	0	-	-	-	0	-	-	0
Antal +	0	5	1	8	4	0	5	4	2	0	2	2	6	
Antal -	0	5	8	1	5	7	1	7	9	10	9	8	3	
Viktad summa	0	3	-28	26	2	-29	15	-2	-16	-33	-16	-15	12	
Fortsätta?	Ja	Ja	Nej	Ja	Ja	Nej	Ja	Nej	Nej	Nej	Nej	Nej	Ja	

I Pughs-matris 2, se tabell 3.4, valdes koncept 1, ABC som referens. Detta koncept består av ljusfyr IR som sökare, odometri som kontroll och optokopplare som dockning. Detta koncept valdes som referens eftersom dess viktade summa var median från tabell 3.4 av de koncept som gick vidare.

Tabell 3.4: Pughs-matris 2 I Pughs-matris 2 valdes koncept 1, ABC som referens. Detta konceptet består av ljusfyr IR som sökare, odometri som kontroll och optokopplare som dockning. Det koncept som fick högst viktad summa i Pughs-matris 2 är koncept 3, ACF.

	Koncept:	1	3	4	6	7	15
		A	A	A	A	A	C
		B	C	D	E	E	E
Önskemål:	Vikt:	C	F	C	C	F	F
1.b Positionering (avstånd)	4	R E F E R E N S	+	-	0	-	-
1.d Positionering (vinkel)	3		+	-	0	-	-
1.f Positionering vid dockning (avstånd)	5		+	0	0	-	+
1.h Positionering vid dockning (vinkel)	5		+	0	0	-	+
1.j Hastighet	1		+	-	+	-	+
1.l Avstånd för att uppfatta signal	3		0	0	0	0	-
2.c Sladd på hjul	3		0	0	0	0	0
2.f Inbromsning	1		+	0	+	+	+
4.a Beräkningskomplexitet	5		+	-	+	+	+
4.b Beräkningar	2		+	-	+	+	+
4.c Enkel programmering	4		+	-	+	+	+
4.d Enkel konstruktion	3		0	0	0	+	-
Antal +	0		9	0	5	5	7
Antal -	0		0	6	0	5	4
Viktad summa	0		30	-19	13	13	10
Fortsätta?		Nej	Ja	Nej	Nej	Nej	Nej

Det koncept som fick högsta viktad summa i tabell 3.4 var koncept 3 ACF. Konceptet består av ljusfyr IR som sökare, ultraljud som kontroll och optokopplare som dockning. Detta koncept är det som bedöms ha störst möjlighet att uppfylla de krav som definierats i kravspecifikationen kombinerat med goda implementeringsmöjligheter och kommer att användas i en prototyp.

4

Resultat

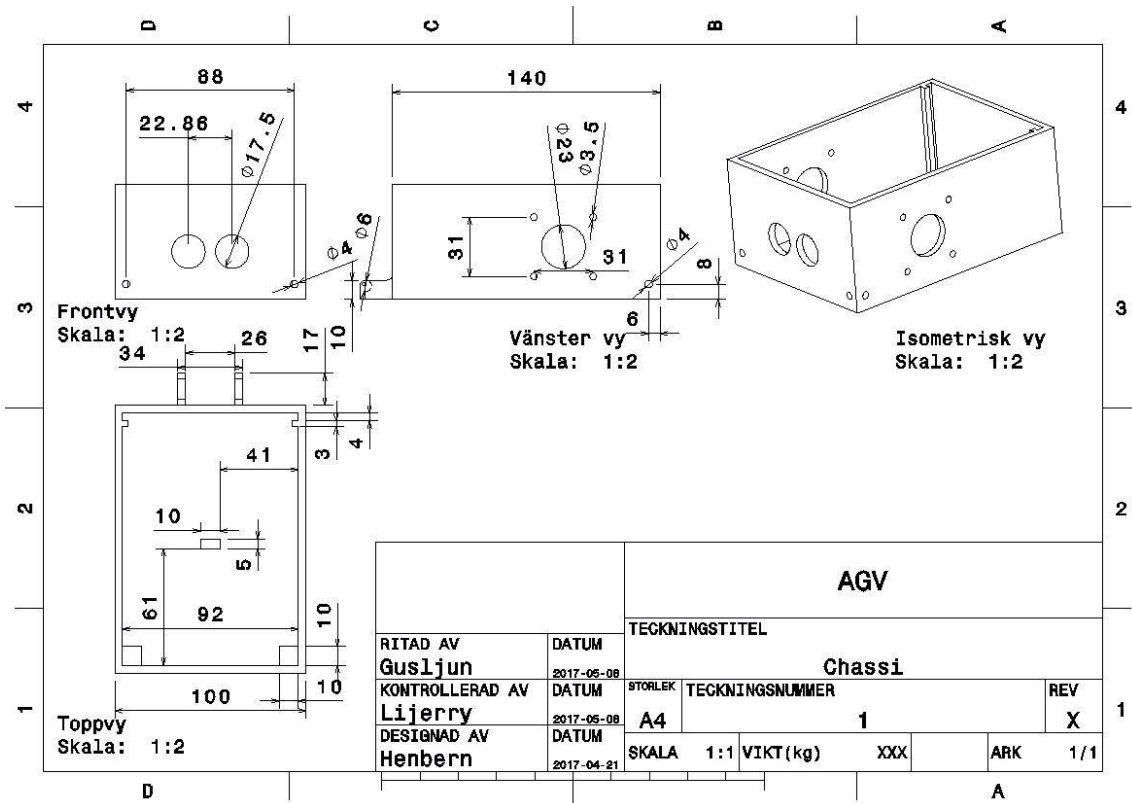
En prototyp har utvecklats med de sensorer och övrig utrustning som valts ut efter teknikförslag som utretts och testats samt kombinerats i koncept och valts ut. Det koncept som implementerats består av en infraröd svepande sensor för vinkelmätning mot ljusfyrar placerade i testmiljö, ultraljud för avståndsmätning samt optokopplare för att kunna detektera golvmarkeringar vid dockning. En beskrivning av dess uppbyggnad, styrsystem och funktion följer. Tester beskrivs som konstruerats för att bedöma om prototypen möter de krav och önskemål som ställts i kravspecifikationen.

4.1 Chassi

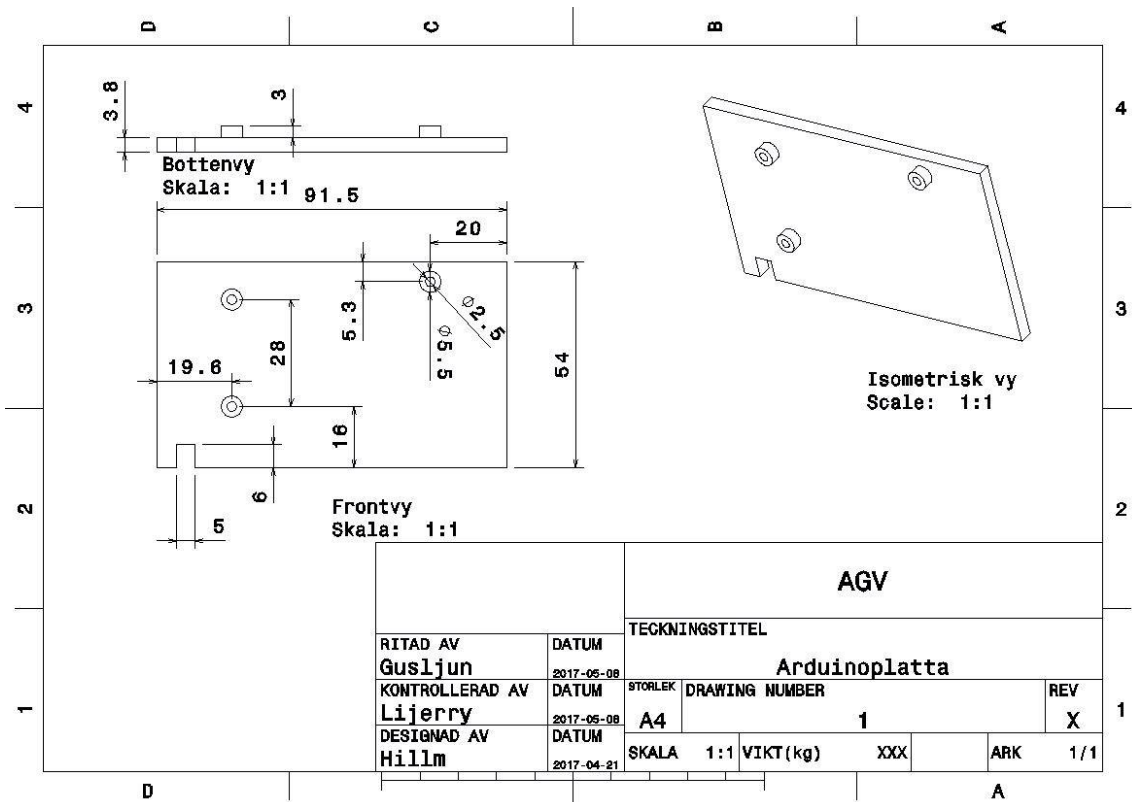
Ett chassi tillverkades för att de delar som utgör prototypen ska sitta ihop enkelt och lättåtkomligt, en ritning av chassit kan studeras i figur 4.1. Chassit är en 3D-printad modell som gjordes i Catia V5 [37].

I chassit finns plats för att montera stegmotorerna, måttbeskrivning och utformning syns i "Vänster vy" i figur 4.1 De två hål i "Frontvy" är för montering av ultraljudsmodulens sändare och mottagare. De kvadratiske hålen som syns i "Toppvy" framtill på chassits undersida är utformade för montering av optokopplarna. Baktill på chassit finns en ställning som syns i "Toppvy" och används som fäste för ett hjul som stabiliserar prototypen. Chassit har en monteringsplatta för Arduino som kan studeras i figur 4.2.

4. Resultat



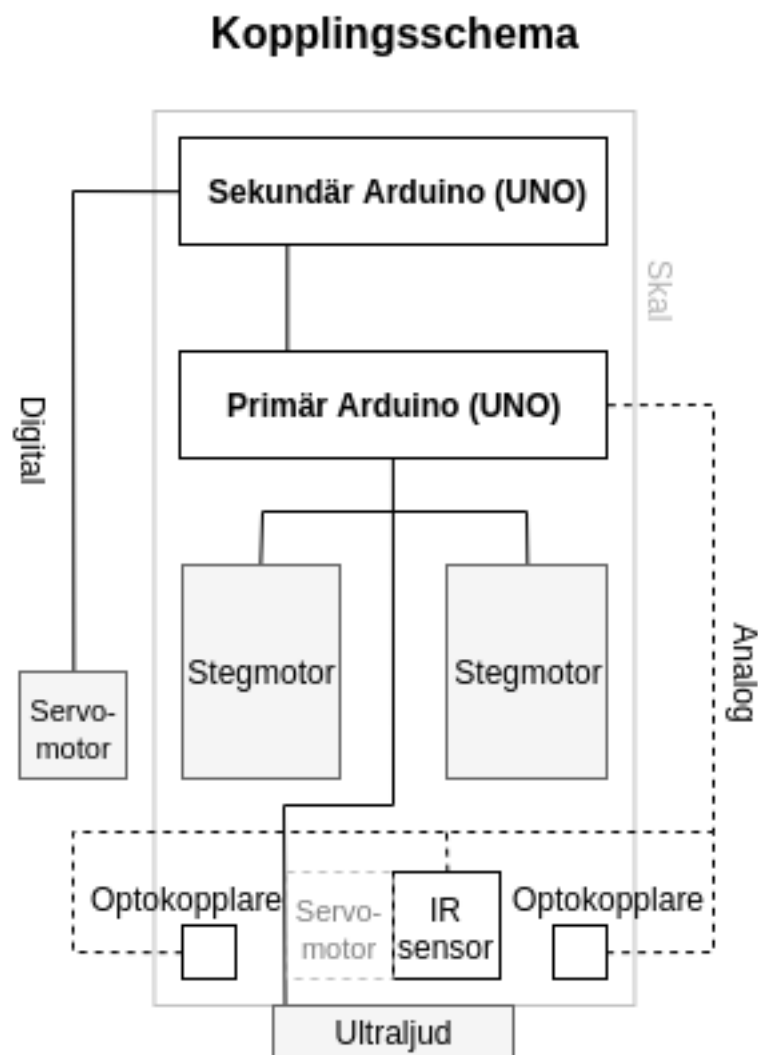
Figur 4.1: Prototypens chassi



Figur 4.2: Arduinoplatta: Platta för montering av Arduino.

4.2 Elektronik och sensorer

Prototypen behöver metoder för att tolka sin omgivning, förlytta sig och välja ut relevant sensordata beroende på vilket stadie av navigeringen den befinner sig i. Ett kopplingsschema över prototypen kan studeras i figur 4.3 och styrsystemets utformning och samt hur databehandlingen gått till beskrivs nedan.



Figur 4.3: Kopplingsschemat över prototypen. Servomotorn placeras i mitten under IR sensorn men har i figuren flyttats ut för att förtydliga kopplingen.

Prototypen är utrustad med två stycken Arduino, där den ena styr en servomotorn och den andra styr övrig logik som kontrollerar navigationen av prototypen. Anledningen till att en Arduino används enbart till styrning av servomotorn är styrlogiken för servomotorn, den fungerar genom att vinkeln skickas till servomotorn genom längden på en puls (1-2 *ms*) där en lång puls motsvarar hög vinkel och vice versa. Problemet med denna typ av styrning är att det ställer högre krav på styrkretsen, det blir därför en aktiv uppgift för Arduinon att försöka hålla servomotorn vid en

konstant vinkel. Det skapade stora problem när styrlogiken ökade i komplexitet och omfång. När servomotorn började rycka istället för att gå mjukt var det tydligt att en Arduino inte klarade av att göra alla beräkningar samtidigt. Därför flyttas servomotorstyrningen till en sekundär Arduino så att den primära endast sköter logiken och sedan skickar en vinkel till den sekundära Arduinon som styr servomotorn.

Stegmotorer har som namnet antyder ett antal steg per varv (200 steg/varv), att driva dessa är inte lika simpelt som för många andra elmotorer. Stegmotorerna har 4 ledare som sekvensiellt skall strömsättas i olika ordning och med varierande polaritet för att avgöra hur långa steg som tas och åt vilket håll motorn stegar. Istället för att koda sekvensen till motorerna användes avsedda drivkretsar A4988 [38] som dessutom har utökad funktionalitet som underlättar styrningen. Med dessa drivkretsar styr Arduinon motorerna. För framledes körimpuls förses ett av drivkretsens ben med en positiv impuls och ett annat ben för att kontrollera riktning.

För dockningsskvensen använder prototypen två optokopplare TLP621, dessa beskrivs i avsnitt 2.2. Sensorerna sitter monterade i vänster- och högerkant längst fram i prototypens färdriktning, se figur 4.3. När prototypen övergår till dockningsfasen blir sensorer den enda indata prototypen använder.

Ultraljudssensorn används som komplement till prototypens övriga sensorer, då de övriga inte har någon möjlighet att mäta avstånd. Ultraljudssensorn används även som en extra kontroll vid övergång från navigationsfasen till dockningsfasen så att inte dockningen påbörjas för tidigt vid störningar från optokopplarna. Ultraljudssensorns funktionalitet beskrivs mer utförligt i avsnitt 2.3 och dess monteringen på prototypen i figur 4.3.

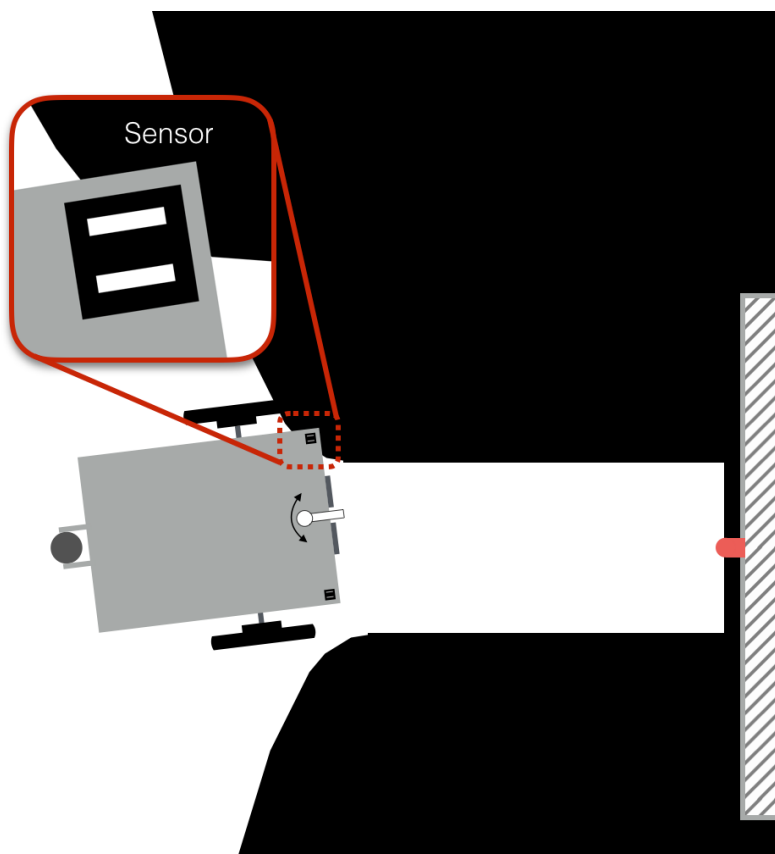
För att prototypen ska kunna navigera har den försetts med en metod för att lokalisera sin slutposition. Metoden bygger på en IR-diod som skickar ut modulerat ljus vars bärvåg har frekvensen $38,5\text{ kHz}$ och motsvarande mottagare. Sensorn som söker efter det modulerade ljuset sitter monterad på en servomotor på prototypen och ljuskällan är en IR-diod som sitter monterad ovanför dockningsstationen. Navigeringen sker genom att servomotorn stegvis går från 0° till 180° där sensorn som försetts med en avskärmning som enbart släpper in ljus framifrån söker efter det modulerade ljuset. Om ljus detekteras, beräknar prototypen spannet och justerar sin riktning eller position på passande sätt. Det ljus som skickas ut av IR-dioderna kan även kommunicera information till prototypen genom att skicka kodat ljus för identifiering. Att prototypen kan avgöra inte enbart vart ljuset kommer ifrån utan även vilken sändare det skickas från kan vara avgörande om prototypen skall följa en rutt där flera sändare är urskiljbara samtidigt.

4.3 Styrning och databehandling

Prototypen börjar med att söka efter ljusfyren med sin IR-sensor. Genom att vrida servomotorn som IR-sensorn är monterad på, från 0° till 180° och spara mätdata

vid varje vinkel kan den avläsa eventuella signaler framför den med en bredd på 180° . Om ingen signal upptäcks så roterar roboten 120° åt vänster för att göra en ny sökning.

Då en signal upptäcks, roterar prototypen så att framsidan är orienterad direkt mot signalkällan. Genom att göra en mätning med ultraljud kan avståndet till signalen bestämmas. Om avståndet till signalen är längre än dockningssträckan, dvs. längden på det markerade området, se figur 4.4 kommer prototypen att köra rakt mot den med en sträcka motsvarande avståndet till stationen med dockningssträckan subtraherad. Om signalen befinner sig längre än 100 cm bort, dvs. utanför ultraljudets räckvidd, kommer prototypen istället bara åka mot signalen med 20 cm . Efter att ha kört sträckan kontrolleras åter signalen från stationen och avståndet. Om ingen signal hittas görs ett nytt svep, annars görs en ny avståndsmätning. När avståndet är kortare än eller lika med dockningssträckan går prototypen in i dockningsläge.

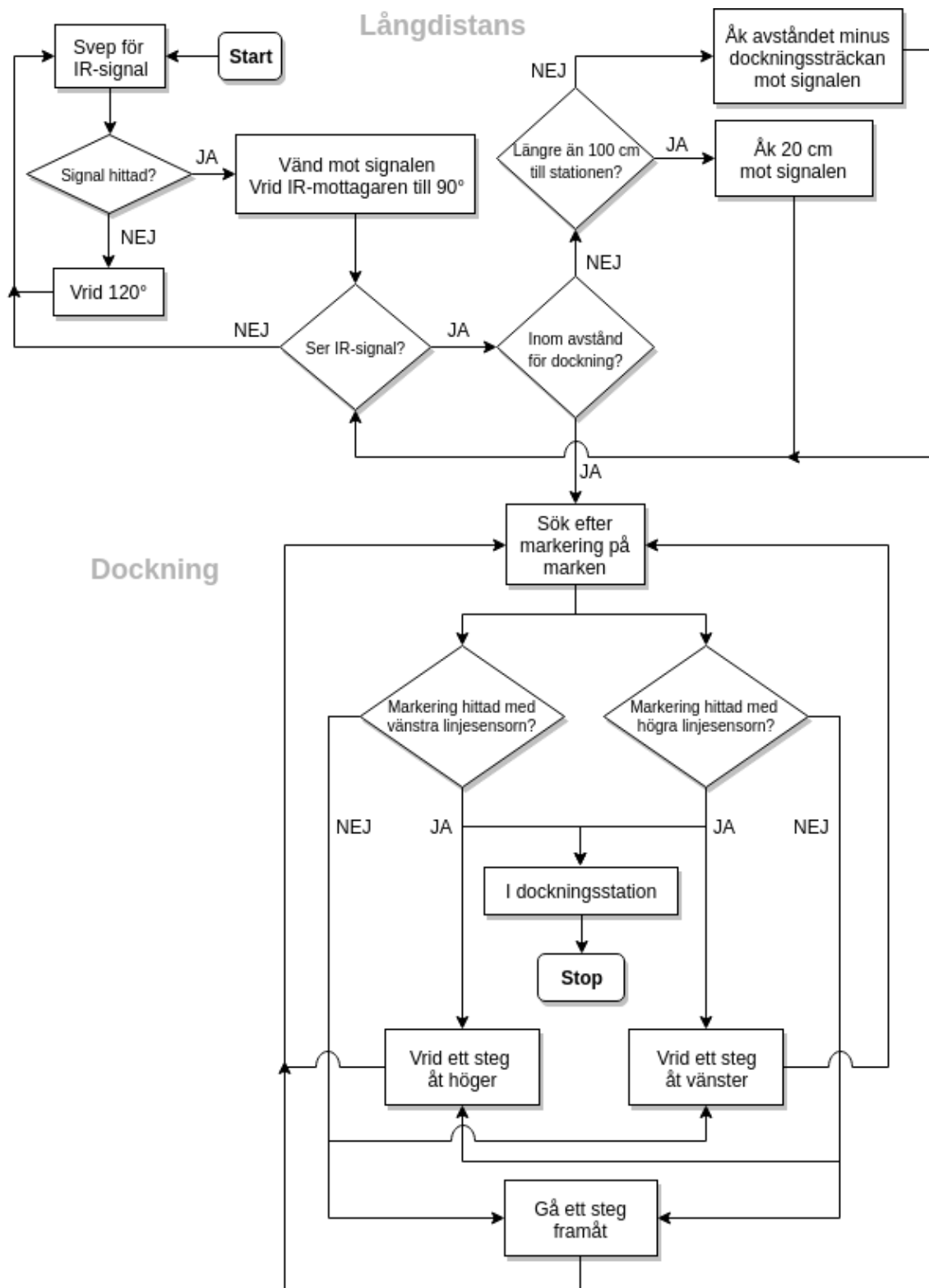


Figur 4.4: Dockningsprocessen där markeringar i golvet används för att styra roboten till rätt position.

I dockningsläge används endast de två optokopplare på prototypens framsida samt markeringar på golvet för att navigera. Om inget av sensorvärdena faller under ett visst tröskelvärde, specifikt för markeringen på golvet, kommer prototypen att köra rakt fram. Då endast en av sensorerna får ett värde lägre än tröskeln kommer prototypen att vridas åt motsatt riktning mot den som sensorn är monterad på, höger

sensor leder till vridning åt vänster och vice versa. När båda sensorerna ser markeringen tyder det på att den har nått slutet på dockningsstationen och navigeringen avslutas. Eftersom mätningar med optokopplare kan göras utan större fördröjningar görs en ny mätning för varje steg som tas med stegmotorn, detta för en så hög noggrannhet som möjligt. En illustration över dockningsprocessen kan studeras i figur 4.4.

Ett övergripande flödesdiagram över prototypens styrning kan studeras i figur 4.5.



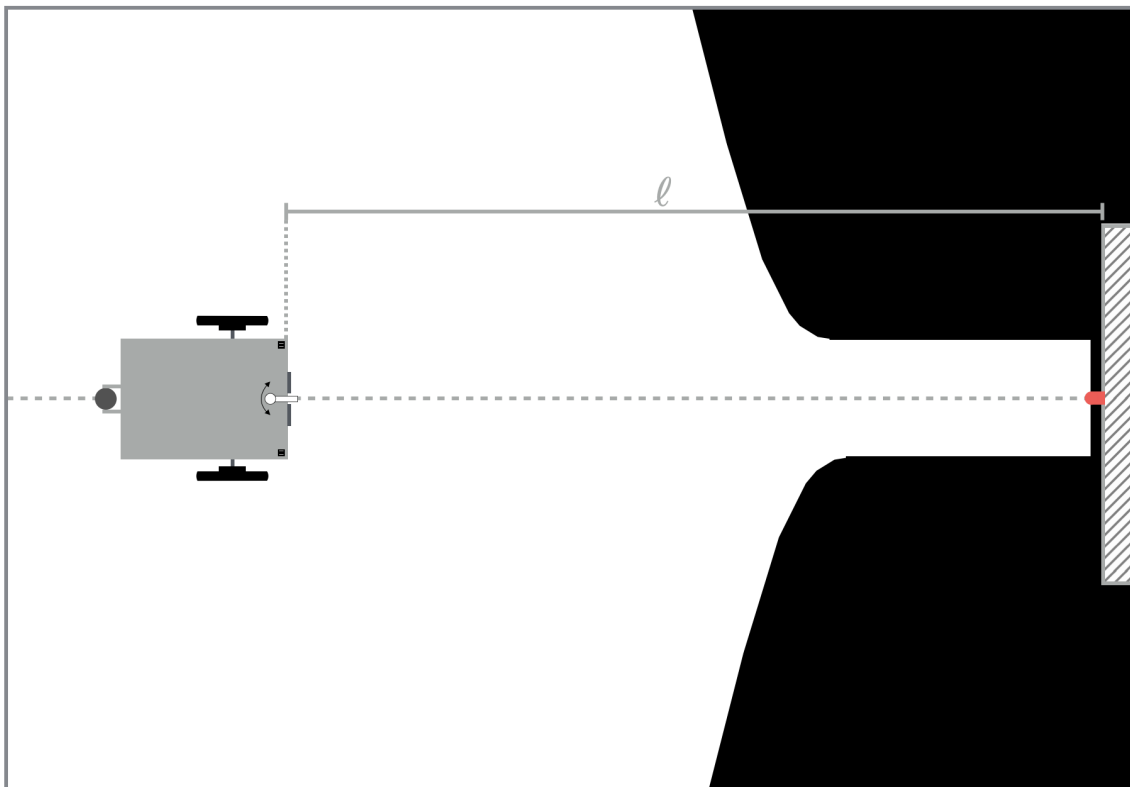
Figur 4.5: Övergripande flödesdiagram för prototypens navigering- och dockningslogik. För den faktiska koden se [39].

4.4 Testning och verifiering

För att bedöma prestandan hos den färdiga prototypen utformades testningsmetoder baserade på kravspecifikationen. Syftet med testerna var att redogöra för prototypens styrkor, svagheter samt vilka krav som uppfyllts.

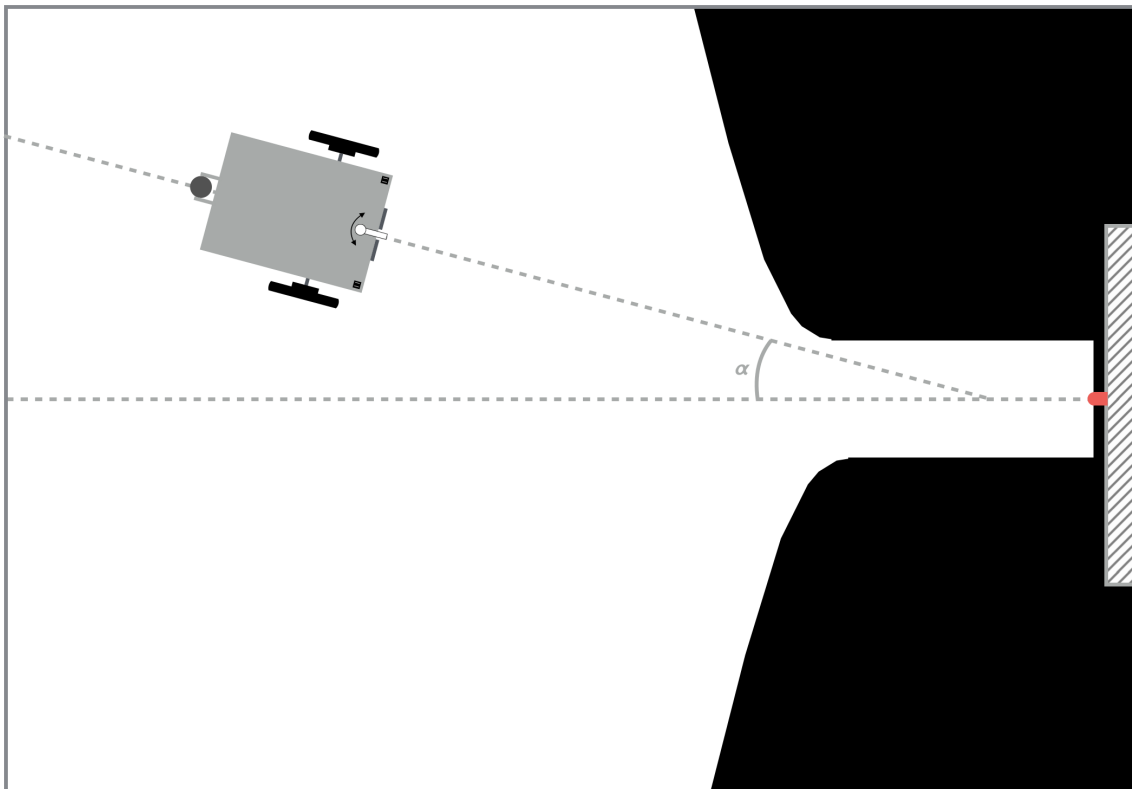
Metod: För att kunna bedöma prototypen utformades ett antal tester för att säkerställa att alla delar i kravspecifikationen uppfyllts. Testmiljön utformades med en dockningsstation och tillhörande IR-diod. Dioden monterades på samma höjd som IR-mottagaren på prototypen för att underlätta detektion. Dockningsstationen försågs med ett svart trättformat mönster på golvet se figur 4.6, för att göra dockningsprocessen möjlig. För att kunna genomföra några av testerna krävdes någon form av kontroll, de utfördes med hjälp av linjal, gradskiva och tidtagarur. Om inget annat anges utfördes varje test fem gånger. Värt att notera, alla tester genomfördes i kontrollerad miljö utan störningskällor.

- **Test 1:** *Vinkelavvikelse och noggrannhet vid sökning.* Syftet med testet var verifiering av krav och önskemål 1.a-1.d enligt kravspecifikation. Testet utfördes genom att en rät linje mellan prototypens startposition och dockningsstationen drogs. Därefter inleds sökning av prototypen efter IR-dioden. När prototypen upptäckt dockningsstationen roterar den och navigerar sedan i den uppfattade riktningen tills den färdats 20 cm i enlighet med flödesschemat i figur 4.5. Därpå ritades ytterligare en linje mellan prototypens startposition och slutposition. Vinkeln mellan de två linjerna och avståndet mellan prototypens start- och slutposition används som bedömningsunderlag.
- **Test 2:** *Maximalt avstånd mellan prototyp och dockningsstation för detektering.* Syfte med testet var verifiering av krav och önskemål 1.k och 1.l enligt kravspecifikation. Testet utfördes genom att prototypen placerades på en rät linje mot dockningsstationens IR-diod (servovinkel 90°) med ett initialt avstånd mellan dockningsstation och prototyp på 150 cm. Avståndet ökades sedan successivt med 25 cm för varje lyckad navigering till dockningsstationen. Testet avbröts då prototypen inte längre kunde lokalisera ljuset ifrån dockningsstationen, testet utfördes i enlighet med figur 4.6.



Figur 4.6: Konceptskiss av testmiljön, maximalt avstånd mellan prototyp och dockningsstation för detektering.

- **Test 3:** *Repeterbarhet, vinkelavvikelse och noggrannhet vid dockningsprocess.* Syfte med testet var verifiering av krav och önskemål 1.e-1.h enligt kravspecifikation. Testet var utformat som Test 2 med skillnaden att avståndet hölls konstant och den slutgiltiga positionen studerades mer noggrant. Testet utfördes tio gånger för att kunna studera hur den slutgiltiga positioneringen varierade.
- **Test 4:** *Maximal vinkel mellan robot och dockningsstation för detektering.* Syfte med testet var verifiering av krav 1.m enligt kravspecifikation. Testet var utfördes genom att två linjer ritades, en referenslinje från dockningsstationens centrum vidare rätvinkligt ut i testmiljön. Andra linjen ritades med start i prototypens slutposition och vidare med vinkel α från referenslinjen. Testet gick sedan ut på att α successivt ökas med 2° för varje lyckad körning. Testet avbröts då prototypen inte längre kunde lokalisera dockningsstationens IR-ljus. För att avgöra om prototypen har en likvärdig prestanda på båda sidor om referenslinjen testas också $-\alpha_{Max}$, test utfördes i enlighet med figur 4.7.



Figur 4.7: Konceptskiss av testmiljön, maximal vinkel mellan prototyp och dockningsstation för detektering.

- **Test 5:** *Medelhastighet mellan start och slutpunkt.* Syfte med testet var verifiering av krav och önskemål 1.i-1.j enligt kravspecifikation. Testet utfördes genom att prototypen placerades på referenslinjen riktad mot dockningsstationen med ett avstånd på 150 cm. Tiden som mättes var navigationstiden mellan prototypens start och slutposition. Testet upprepades tio gånger för att medelhastigheten skulle kunna beräknas.
- **Test 6:** *Behandlar avsnitt 2 i kravspecifikation, Fysiska prototypen.* Syfte med testet var verifiering av krav och önskemål 2.a-2.f enligt kravspecifikation. Delar som bedöms på prototypen är energikällans montering, inkapsling av elektronik, sladd på hjul, användarvänlighet, realiserbarhet och inbromsnings-tid.
- **Test 7:** *Behandlar avsnitt 3 i kravspecifikation, Säkerhet.* Syfte med testet var verifiering av krav 3.a och 3.b enligt kravspecifikation. Testet innerfattar bedömning av huruvida hälsofarliga tekniker används och prototypens risk för haveri.
- **Test 8:** *Behandlar avsnitt 4 i kravspecifikation, Konstruktion.* Syfte med testet var bedömning av önskemål 4.a-4.d enligt kravspecifikation. Testet innerfattar bedömning av prototypens beräkningskapacitet, komplexitet i programmering och konstruktion.

Resultat & Analys: En övergripande observation för alla tester var att vid körning med prototypen blev arduinon väldigt varm och batterierna laddade ur snabbt. En hypotes om varför problemet uppkommit är att det beror på någon form av hårdvarufel, troligtvis i drivkretsarna. Övrigt noterades från testerna att sensorernas placering var avgörande för att krav och önskemål skulle uppfyllas.

- **Test 1:** Resultatet från testet visade att efter 20 *cm* körning, är maximalfelet i längd mellan start- och slutposition 6 *mm* och vinkeln mellan linjerna maximalt 6°. Därmed uppfylls kraven 1.a och 1.c, men inte önskemål 1.b och 1.d.
- **Test 2:** Resultatet visade att prototypen klarade att navigera till dockningsstationen från avstånd upp till 325 *cm*. Enligt kravespecifikationen är kravet att prototypen ska klara 150 *cm* och önskemålet är 300 *cm*, slutsatsen blir att prototypen uppnår både kriterier 1.k och 1.l.
- **Test 3:** Resultaten av testningen var varierande. De första sju mätningarna dockade prototypen helt utan anmärkning, vilket resulterade i nästintill obefintlig vinkelavvikelse och en god akkuratess maximalt ± 2 *mm*. Vid sista tre mätningarna uppkom mindre problem, precis innan slutposition nåddes roterade prototypen något åt höger i färdriktningen. Konsekvensen blev att vinkelavvikelse uppmättes till mellan 8° – 12°. En teori om varför det inträffade var att under förflyttningen av prototypen mellan mätning sex och sju rubbades troligtvis en av optokopplarna. Den samlade slutsatsen från testerna är att krav 1.e och 1.g uppfylls men inte önskemål 1.f och 1.h. Problematiken i de sista tre körningarna hade kunnat åtgärdas med mer robust montering av optokopplarna.
- **Test 4:** Resultatet visar att vid ett konstant avstånd mellan dockningsstation och prototyp på 150 *cm* klarar prototypen av att detektera IR-ljus med $\alpha = \pm 18^\circ$ från dockningssationens referenslinje. Det medför att krav 1.m uppfylls. Resultatet i testet beror huvudsakligen på IR-diodens styrka och ljusspridning, inte på prototypen. Hypotesen är därför att den maximala vinkeln för detektion kan ökas med en starkare IR-diod med ett mer utbrett ljus.
- **Test 5:** Resultatet från testet visar att för 40 % av mätningarna tog färden 50 sekunder och resterande 60% 25 sekunder. Skillnaden i resultat beror på om prototypen hittar IR-ljuset under första svepet eller om den måste rotera 120° tre gånger för att hitta IR-ljuset, i enlighet med flödesschemat i figur 4.5. Medelvärdet av tiderna blir 35 sekunder, det innebär att medelhastigheten för testet blir 4,29 *cm/s*. Slutsatsen av testet blir att kravet på en lägsta medelhastighet av 2 *cm/s* uppfylls. Förbättringspotential finns om filtereringsfunktionen för IR-ljus förbättras så att prototypen hittar dockningsstaionen under första svepningen.
- **Test 6:** Krav och önskemål under Prototypen avsnitt 2 i kravespecifikationen bedöms alla vara uppfyllda, men med undantag till önskemål 2.f Inbromsning.

Detta önskemål uppfylldes inte på grund av att prototypen var tvungen att stå stilla för att lokalisera dockningsstation.

- **Test 7:** Då ingen hälsofarlig teknik använts på prototypen uppfylls krav 3.a i kravspecifikationen. Krav 3.b Haveri hurvida prototypen är robust nog för presentation. Under test 1-5 förekom några mindre problem både i hård-och mjukvaran, däremot har alla krav och nästintill alla önskemål uppfyllts. Den samlade bedömningen är att prototypen är tillräckligt robust nog för demonstration men inte för att köras kontinuerligt, på grund av problemet med överhettning.
- **Test 8:** Den samlade bedömningen är att prototypen uppfyller samtliga önskemål som finns i kravspecifikationen avsnitt 4 konstruktion. Motiveringen till varför önskemål 4.a-4.c uppfyllts beskrivs i avsnitt 4.3. Motiveringen till varför önskemål 4.d uppfyllts beskrivs i avsnitt 4.1.

Slutsats: Resultaten från testningen visar att prototypen uppfyller alla krav som har definierats i kravspecifikationen. Av önskemålen är det däremot bara sju av tolv som uppfyllts. Slutsatsen blir därför att prototypen är tillräckligt robust för demonstration men måste vidareutveckla, för att kunna köra kontinuerligt med hög precision.

5

Diskussion

Syftet och målet med denna studie kan sammanfattas som en fråga: Går det att skapa en miniatyr av en AGV-robot som är frirörlig och portabel som utnyttjar industrilika lösningar med billiga, enkla metoder och sensorer?

Metoden för vår studie är bred och uppdragsgivaren har gett oss ganska fria tyglar. Detta har lett till att många olika lösningar studerats och testats. Tips för möjliga tekniker var från början av projektet ljusfyrar och att använda tröghetsplattformen BNO055, men även ett önskemål om ett stort antal potentiella lösningar framfördes.

Det breda fokus som vår metod innebar gjorde att slutlösningen inte blev särskilt raffinerad trots att målet för projektet nåddes. Ett tydligare, snävare fokus på ett fåtal metoder hade underlättat denna typ av utveckling. Ett intressant område att studera hade varit navigering som förlitar sig på konturavläsning, något som nämndes som en metod under utveckling vid studiebesöket hos AGVE [6]. Men ytterligare en metod att utreda var inte möjligt i det skedet.

En form av ljusfyrsnavigering implementerades, men inte tröghetsplattformen. Tolkningen av tröghetsplattformens data tog lång tid och den typen av positionsberäkning vi ville genomföra gick inte att implementera utan mer raffinerade tekniker så som Kálmanfiltrering vilken kräver noggrann modellering för att fungera väl. Efter att denna form av navigering först förkastats men sedan utforskats ytterligare efter uppdragsgivarens önskemål rann dessvärre tiden iväg. Med ett smalare fokus inriktat kring tröghetsplattformen kunde den definitivt kunnat implementeras och den uppvisade god prestanda för orienteringsinformation och magnetiska mätningar. En översyn av plattformens prestanda finns i kapitel 2.9.

Alla de krav som ställts i kravspecifikationen är uppfyllda medan ett antal önskemål inte fullgjordes. I korthet innebär detta att målet för projektet nåddes, men prototypen lyckades inte överprestera. Två utav önskemålen som inte fullgjordes är 1.b och 1.d. Dessa rör positionering av roboten innan dockningsrutinen inleds. Eftersom testerna utförts i en kontrollerad miljö samt att inga hinder placerats ut får inte detta några allvarliga konsekvenser. Att positionen blir fel innan dockningsrutinen inleds leder i detta fall endast till en ny mätning och navigeringen mellan position A och B fortlöper. Önskemål 1.f och 1.h är relaterade till dockningen och innebär att om en mycket hög noggrannhet krävs vid lastning, kan detta potentiellt få mer allvarliga

konsekvenser. Dockningsrutinen är väldigt noggrann men ryckiga rörelser uppträder emellanåt i slutskedet orsakade av misstag i optokoplarnas montering. Deras montering gör dem delvis rörliga. Detta problem leder till att portabiliteten av systemet kan ifrågasättas. Om prototypen inte behandlas varsamt mellan demonstrationer kan optokopplarnas position förändras och ge upphov till mindre noggrann positionering. Eftersom prototypens styrning implementerades med växlingar mellan olika körrutiner samt mellan behandling av olika sensordata med distinkta stopp för att uppdatera dessa, leder detta till att önskemål 2.f inte kan uppnås. Inbromsning är nämligen ett krav för styrrutinen. Konsekvensen av detta är främst estetiskt då kontinuerlig körning förmodligen faller åskådarna mer i smaken vid en demonstration. Kraftfullare enkortsdator hade underlättat denna implementering.

Frirörligheten som återfinns i syftet kan även det ifrågasättas. Då golvmarkeringar använts vid dockningsstationerna har ingrepp i miljön gjorts. Dessa krävs för att dockningsrutinen ska fungera. Det bör dock poängteras att dessa markeringar är direkt kopplade till dockningsstationen och bör därför inte bedömas på samma sätt som linjemarkeringar eller andra former av mer omfattande ingrepp i miljön.

Efter studiebesöket hos AGVE [6] noterades att laser är en etablerad metod i industrin. Detta innebär att för stor vikt kan ha lagts vid försiktigheten gällande laseranvändning. Eftersom AGV:er i industrin med laser används där människor arbetar, lyckas laser uppenbarligen implementeras utan hälsofara. Dock hade en lågprismetod behövt utvecklas då kommersiella system ofta är väldigt dyra [20, 21]. Ytterliggare utvecklingstid hade då tagits i anspråk, samt att uppdragsgivaren avrådde från användningen av laser.

5.1 Vidareutveckling av system

Ett fortsatt utvecklingsarbete kan börja med att minimera hårdvaran till enbart det som behövs. Något som kan tas bort är den Arduino som styr servomotorn där IR-mottagaren sitter. Den Arduinon har endast en uppgift och skulle kunna ersättas med en separat mikroprocessor till exempel en ATmega328P [8, 9]. Även kodningsarbetet skulle fortgå så att problemen med avläsning av ljusfyrarnas identiteter skulle elimineras då detta enbart beror på att kodningen inte är tillräckligt optimerad och testad.

Styrningen av stegmotorerna skulle behöva förbättras för att uppnå en mjukare körning och undvika de skakningar som förekommer under dockningssekvensen. Testningen bör fortsättas för att kunna garantera systemets robusthet i mindre kontrollerade miljöer och även för att få identifieringen av ljusfyrarna att fungera. Utöver detta skulle resten av demonstrationsmiljön utformas så att prototypen blir kompatibel med de anordningar som ska placera och plocka objekt ifrån prototypen. De objekt som prototypen skall transportera skulle behöva definieras och en passande hållare för dessa skulle behöva kombineras med prototypens lock så att godset inte ramlar av under transport.

Det går att använda en bättre metod med ljusfyrarna. En mer raffinerad metod för ljusfyrar innefattar att prototypen navigerar mellan flera dockningsstationer under en rutt. Detta är möjligt med den prototyp som utvecklats. Det som möjliggör detta beskrivs i metoddelen av kapitel 2.5 och bygger på att ljusfyren kodar sin identitet i IR-ljuset den skickar ut. Prototypen kan därmed, då den får klar sikt till flera ljusfyrar, identifiera vilken den tar emot ljus ifrån och planera sin rutt därefter. Denna lösning är mer flexibel och har, om ljusfyrarna placerats korrekt, möjlighet till flera dockningsstationer och potentiella rutter i sin punkt till punkt navigering.

5.2 Jämförelse med industrilösningar

Det finns många typer av AGV-system på marknaden idag och navigationslösningarna ser olika ut från system till system. Som tidigare nämnt i inledningen, kapitel 1, används fixerad vägledning så som induktiva kablar i golvet eller färgade linjer. Det används även mer flexibla frirörliga lösningar så som laser och tröghetsplattformer. Den prototyp som utvecklats kan liknas mer vid den senare typen av navigering, vid dockningsprocessen används dock golvetmarkeringar vilket liknar den fixerade typen av vägledning.

Något som skiljer sig väsentligt jämfört med intelligenta frirörliga navigeringssystem är att dessa navigerar utifrån en intern karta av omgivningen. Med hjälp av ett system för att bestämma sin nuvarande position kan därmed AGV:n navigera. För att bestämma positionen används vanligtvis laser och reflexer placerade på bestämda punkter i omgivningen. Genom att mäta vinkeln till ett antal kända reflexer kan sedan AGV:n räkna ut sin position på kartan [2, 40]. Det utvecklade systemet använder däremot endast en referenspunkt vilken skickar ut ett infrarött ljus. AGV:n söker av omgivningen efter ljuset och kör sedan i riktning mot dess källa. Därför vet inte systemet vart AGV:n är positionerad vilket är känt när en karta används. Till skillnad från flera olika kända referenspunkter i form av reflexer använder det utvecklade systemet endast en. Denna referenspunkt är dessutom en aktiv komponent som måste vara fungerande för att systemet skall kunna navigera. Därmed finns en högre risk för avbrott jämfört med passiva referenspunkter. Ett viktigt prestandakrav för AGV-system är noggrannheten vid positionering. Detta för att en del av AGV:ns uppgifter kräver detta, exempelvis för positionering vid dockning. Med lasersystem kan en hög noggrannhet uppnås [2]. Det utvecklade systemet kan inte beräkna sin nuvarande position utan endast avgöra relativ riktning till ljusfyren. Därför klarar inte systemet av att undvika hinder eller köra annan rutt än den rakt till målet. I en verklig industrimiljö hade detta varit önskvärda funktioner. För exempelvis temporär omdirigering av trafiken till följd av ett haveri eller liknande.

Vid dockningsprocessen använder systemet golvmarkeringar som kan liknas vid de som linjeföljande AGV:er använder i industrin. Två sensorer detekterar en svart markering på golvet som leder AGV:n till rätt position vid dockningsstationen, se figur 4.4. De AGV:er som använder liknande teknik i industrin kan genom referens-

punkter längs linjen samt odometri veta sin position. Referenspunkter består ofta av magneter i golvet placerade på bestämda platser. Därmed får systemet kontinuerlig information om aktuell position. Detta skiljer sig från det system som utvecklats då det endast ändrar sin riktning beroende på vad de två sensorerna detekterar. Eftersom AGV:n endast följer impulser från omgivningen kan ingen skillnad göras mellan en korrekt och en felaktig rutt. Därmed blir komplicerade transportmönster mycket svåra att implementera utan fler ljusfyrar som referenspunkter.

6

Slutsats

Rapportens resultat visar på att det är möjligt att bygga en fungerande AGV-prototyp baserad på IR-ljus kombinerat med komplementära sensorer. De resultat som uppnåddes visade att IR-ljus kan fungera som navigationslösning under kontrollerade förhållanden. Det slutgiltiga systemet liknar delvis de industrilösningar det jämförts mot i form av en kombination av lösningar som är frirörliga och de med fixerade banor. För att uppnå en helt och hållet frirörlig lösning behöver ett system för AGV:n vidareutvecklas med en teknik för att uppfatta sin egen position. Där en rutnätsskarta måste skapas samt referenspunkter som placeras i AGV:ns miljö.

Alla krav som ställts har uppnåtts men en del önskemål har inte uppfyllts. Med vidare arbete av programmeringen och monteringen kan även alla önskemål uppnås och ge högre prestanda.

Ett snävare fokus på ett mindre antal potentiella lösningar hade lett till en mer raffinerad slutlösning.

Utvärderingen av tröghetsplattformen BNO055 leder till slutsatsen att den är väldigt väl lämpad för orienteringsmätningar och magnetiska mätningar. Dock måste positionsbestämning kompletteras med ytterliggare sensorinformation och databehandling där Utökade Kálman Filter rekommenderas. Det är brusnivån som gör accelerometerdatan opålitlig vid dubbelintegrering för att beräkna position.

Litteraturförteckning

- [1] T. Le-Anh and M. B. M. De Koster, "A review of design and control of automated guided vehicle systems," Rotterdam, pp. 1–23, 5 2006. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221705001840>
- [2] H. Martínez-Barberá and D. Herrero-Pérez, "Autonomous navigation of an automated guided vehicle in industrial environments," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 26, no. 4, pp. 296–311, 8 2010. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584509000994>
- [3] I. F. A. Vis, "Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems," pp. 677–709, 5 2006. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221704006459>
- [4] S. Berman, E. Schechtman, and Y. Edan, "Evaluation of automatic guided vehicle systems," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 25, no. 3, pp. 522–528, 6 2009. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S073658450800029X>
- [5] Bosch, "BNO055 Intelligent -axis absolute orientation sensor," 2015. [Online]. Available: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST_BNO055_DS000_12.pdf
- [6] J. Dannemark, "Studiebesök hos AGVE," Göteborg, 2017.
- [7] "Raspberry Pi 2 model B," 2017. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/>
- [8] "Arduino UNO & Genuino UNO," 2017. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
- [9] "ATmega48A," San Jose, CA, 2015. [Online]. Available: http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf
- [10] "Cortex-A7 Processor," 2017. [Online]. Available: <https://www.arm.com/products/processors/cortex-a/cortex-a7.php>

- [11] “Solution for ARM.” [Online]. Available: <https://www.embeddedarm.com/software/solutions-arm>
- [12] “Libraries.” [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/reference/libraries>
- [13] “TLP621.” [Online]. Available: <http://www.glyn.de/data/glyn/media/doc/TLP621.pdf>
- [14] J. Daintith, Ed., *A Dictionary of Physics*, 6th ed. Oxford: Oxford University Press Inc., 2009.
- [15] “SRF05 - Ultra-Sonic Ranger.” [Online]. Available: <https://www.robot-electronics.co.uk/htm/srf05tech.htm>
- [16] D. J. Bud, Robert; Warner, Ed., *Instruments of Science, An Historical Encyclopedia*. New York & London: Garland Publishing Inc., 1998.
- [17] J. B. Campbell, *Introduction to remote sensing*, 3rd ed. London: Taylor & Francis, 2002.
- [18] “Proximity and ambient light sensing (ALS) module,” 2016. [Online]. Available: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/c4/11/28/86/e6/26/44/b3/DM00112632.pdf/files/DM00112632.pdf/jcr:content/translations/en.DM00112632.pdf>
- [19] “analogRead().” [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Reference/analogRead>
- [20] V. Pierlot and M. V. Droogenbroeck, “A simple and low cost angle measurement system for mobile robot positioning,” *Workshop on Circuits, Systems and Signal ...*, pp. 251–254, 2009.
- [21] J. Krejsa and S. Vechet, “Infrared Beacons based Localization of Mobile Robot.” *Electronics & Electrical Engineering*, vol. 1, no. 1, 2012. [Online]. Available: <http://eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/view/1046/1127>
- [22] A. Argyros, K. Bekris, and S. Orphanoudakis, “Robot homing based on corner tracking in a sequence of panoramic images,” in *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001*, vol. 2, no. C. IEEE Comput. Soc, 2001, pp. II–3–II–10. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=990917http://ieeexplore.ieee.org/document/990917/>
- [23] “Anti-lock Brake System (ABS).” [Online]. Available: http://www.toyota-global.com/innovation/safety_technology/safety_technology/technology_file/active/
- [24] “Boe-Bot Robot Kit.” [Online]. Available: <https://www.parallax.com/product/28832>

- [25] “SM-42BYG011-25,” 2009. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/SM-42BYG011-25.pdf>
- [26] A. Carlsson, “QR.” [Online]. Available: <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/qr>
- [27] “Information capacity and version of the QR code.” [Online]. Available: <http://www.qrcode.com/en/about/version.html>
- [28] J. Brown, “Zbar bar code reader,” 2011. [Online]. Available: <http://zbar.sourceforge.net>
- [29] “Camera modul V2.” [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/camera-module-v2/>
- [30] Bosch sensortec, “Bosch Sensortec, Inertial Measurement Units.” [Online]. Available: https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/motion/imu/overview_imu
- [31] Adafruit, “Overview | Adafruit BNO055 Absolute Orientation Sensor | Adafruit Learning System,” 2017. [Online]. Available: <https://learn.adafruit.com/adafruit-bno055-absolute-orientation-sensor/overview>
- [32] N. N. America, “(2) Patent Application Publication (10) Pub . No .: US 2006 / 0236414A1,” 2006.
- [33] “The Language of Technical Computing.” [Online]. Available: <https://se.mathworks.com/products/matlab.html>
- [34] A. Robotics, “Product specification IRB 6660,” Västerås, Sweden, 2013. [Online]. Available: https://library.e.abb.com/public/818d1922d857a640c1257cc500449f38/ProductsSpecifications_IRB1600_3HAC023604-001_revM_en.pdf
- [35] Google Tech Talks;D.Sachs, “Sensor Fusion on Android Devices: A Revolution in Motion Processing,” 2010. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=C7JQ7Rpwn2k>
- [36] Adafruit support, “Forum Index > Electronics > General Project help: Integrating accelerometer data into position.” pp. 1–3, 2013. [Online]. Available: <https://forums.adafruit.com/viewtopic.php?f=8&t=81842&hilit=bno055+position&start=0>
- [37] “Catia V5.” [Online]. Available: <https://academy.3ds.com/en/software/catia-v5-student-edition>
- [38] “DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection.” [Online]. Available: https://www.pololu.com/file/download/A4988.pdf?file_id=0J450

- [39] J. Liu, “Kandidatarbete 2017: AGV-System,” 2017. [Online]. Available: <https://github.com/JerryLui/kandidat-robot>
- [40] “Laser Guidance.” [Online]. Available: <http://www.agvegroup.com/?s=laser>

A

Bilagor

A.1 Mätdata för Lidar

Tabell A.1: Tabell med uppmätta mätvärden samt referens

Referensvärde [mm]	Sensorvärde [mm]
20	10-15
25	13-16
30	17-20
40	28-31
50	37-41
55	40-45
60	47-49
70	55-59
90	75-78
100	85-89
110	94-100
120	107-111
140	124-128
145	130-133
150	134-138
170	154-157
180	164-168
200	180-184
220	197-204
250	255

A.2 Kravspecifikation

Tabell A.2: Kravspecifikation

	Kriterier	Målvärde (K/Ö)	K/Ö	Vikt	Verifiering	Referens (kravställare)
1.	Noggrannhet					
a	Positionering vid sökning (avstånd)	Hamna inom ± 10 mm från målpunkt	K		Mätning	Gruppen efter studiebesök på AGVE
b	Positionering vid sökning (avstånd)	Hamna inom ± 2 mm från målpunkt	Ö	4	Mätning	Gruppen, AGVEs mest noggranna positionering
c	Positionering vid sökning (vinkel)	Vinkel inom $\pm 18^\circ$ från hittad signal	K		Mätning	Gruppen, reglering under färd bör hantera detta, utrymme för servostyrning
d	Positionering vid sökning (vinkel)	Vinkel inom $\pm 4^\circ$ från hittad signal	Ö	3	Mätning	Gruppen, väldigt mjukt och stabilt önskvärt, inte mycket sicksack
e	Positionering vid dockning (avstånd)	Hamna inom ± 5 mm från målpunkt	K		Mätning	Gruppen, nära robotcellskant för att underlätta pot. lastning
f	Positionering vid dockning (avstånd)	Hamna inom ± 1 mm från målpunkt	Ö	5	Mätning	Gruppen, lastning utan några problem
g	Positionering vid dockning (vinkel)	Vinkel inom $\pm 18^\circ$ från målpunkt	K		Mätning	Gruppen, nära robotcellskant för att underlätta pot. lastning
h	Positionering vid dockning (vinkel)	Vinkel inom $\pm 4^\circ$ från målpunkt	Ö	5	Mätning	Gruppen, lastning utan några problem
i	Medelhastighet under färd	Minimum 0.02 m/s	K		Mätning	Gruppen, 2 cm/s, långsamt men uthärdligt för publik
j	Medelhastighet under färd	Minimum 0.1 m/s	Ö	1	Mätning	Gruppen, bra hastighet vid demo
k	Avstånd för att hitta stationenl	1,5 m	K		Mätning	Gruppen, minimera antal stationer" under färd
l	Avstånd för att hitta stationen	3 m	Ö	3	Mätning	Gruppen, minimera antal stationer" under färd
m	Vinkel för att hitta stationen	$\pm 10^\circ$	K		Mätning	Gruppen, minimera antal stationer" under färd
2.	Prototyp					
a	Energikälla	Energikällan ska sitta på roboten	K		Kontroll	Gruppen, frirörlig robot
b	Inkapsling	Inga lösa delar	K		Optisk analys	Gruppen, hållbarhet vid transport
c	Sladd på hjul	Hjulen glider inte	Ö	3	Felanalys odometri	Gruppen, undviker felfortplantning med odometri, färre kalibreringar
d	Användarvänlighet	Kunna använda roboten efter kort introduktion	K		Kontroll	Gruppen, för att slutanvändaren enkelt ska kunna demonstrera
e	Realiserbar	Kunna realisera prototypen	K		Kontroll	Gruppen, praktiskt gångbart
f	Inbromsning	Inte behöva sakta in för att läsa av data	Ö	1	Kontroll	Gruppen, mjukare färd, trevligare demo
3.	Säkerhet					
a	Hälsosafarighet	Inga potentiellt hälsofarliga tekniker	K		Mätning	Säkerhetsföreskrifter
b	Haveri	Ska inte haverera under normal användning	K		Kontroll	Gruppen, robusthet vid demonstration
4.	Konstruktion					
a	Beräkningar	Enkla	Ö	5	Bedömning	Gruppen, realtidsbehandling av data
b	Beräkningar	Minimera beräkningskraften roboten behöver	Ö	2	Test	Gruppen, begränsad beräkningskapacitet
c	Enkel programmering	Implementering av funktion, under 20 h	Ö	4	Bedömning	Gruppen, kunna avskriva för komplicerade lösningar, tidssparande krav
d	Enkel konstruktion	Konstruktion av robot, en modul max 1 h	Ö	3	Bedömning	Gruppen, begränsa monteringskomplexitet

A.3 Mätningar för Ultraljudssensorn SFR05

Tabell A.3: Tabell med uppmätta mätvärden samt referens

Referens [mm]	Avläsning [mm]
100	106
110	112
120	131
140	142
145	165
150	167
170	172
200	207
300	302
400	397
500	498
600	596
700	695
800	794
900	889

Tabell A.4: Mätning för att bestämma repeterbarhet

100mm	150mm
86-88mm	127mm
86-88mm	127mm
86-88mm	127mm
86-88mm	127mm
86-88mm	127(132)mm
86-88mm	127mm
86-88mm	128-132mm
86-88mm	127-132mm
86-88mm	127-132mm
86-88mm	132-133mm

A.4 Python kod för QR avläsning

```
#!/usr/bin/python
import zbar

# Creates processor instance
p = zbar.Processor()

# Enables all symbologies
p.parse_config('enable')

# Sets device address
p.init('/dev/video0')

# Processing of data
def data_handler(processor, image, closure):
    for symbol in image.symbols:
        print symbol.data
        print symbol.location

p.set_data_handler(data_handler)

# Initiates scanning
p.active = True

# Show preview window
p.visible = True
```