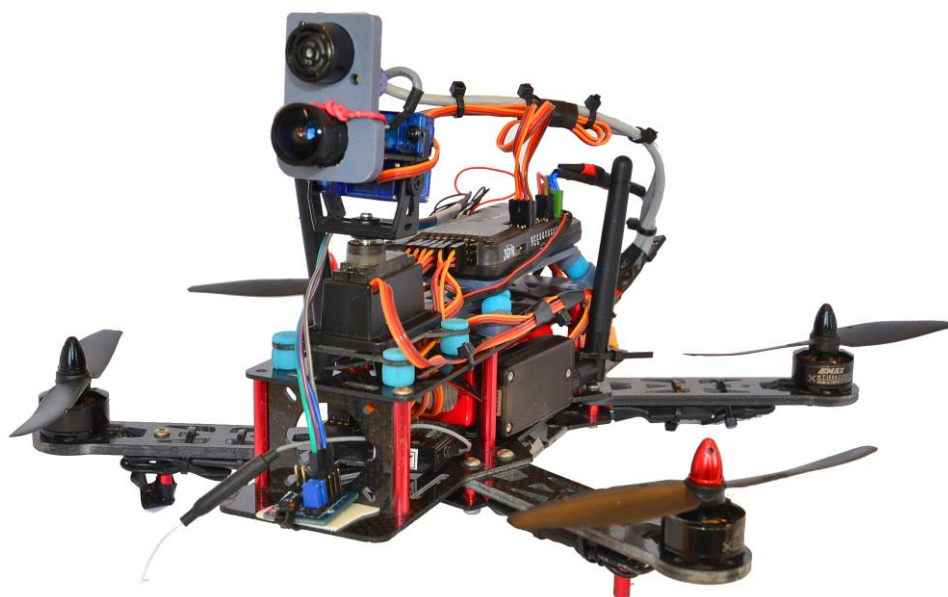




CHALMERS



Autonom kortdistansnavigation i öppen miljö Utveckling av kameraföljningssystem med drönare och Oculus rift för tredjepersonsvy i realtid

Kandidatarbete inom Data- och informationsteknik

Albin Aronsson
Adrian Gashi
Björn Karlsson
Tobias Olausson
Mattias Patricks
André Wallström

Autonom kortdistansnavigation i öppen miljö

Utveckling av kameraföljningssystem med drönare och
Oculus rift för tredjepersonsvy i realtid

Albin Aronsson
Adrian Gashi
Björn Karlsson
Tobias Olausson
Mattias Patricks
André Wallström

Department of Computer Science and Engineering
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Göteborg, Sweden 2015

The Author grants to Chalmers University of Technology and University of Gothenburg the non-exclusive right to publish the Work electronically and in a non-commercial purpose make it accessible on the Internet.

The Author warrants that he/she is the author to the Work, and warrants that the Work does not contain text, pictures or other material that violates copyright law.

The Author shall, when transferring the rights of the Work to a third party (for example a publisher or a company), acknowledge the third party about this agreement. If the Author has signed a copyright agreement with a third party regarding the Work, the Author warrants hereby that he/she has obtained any necessary permission from this third party to let Chalmers University of Technology and University of Gothenburg store the Work electronically and make it accessible on the Internet.

Autonom kortdistansnavigation i öppen miljö

Utveckling av kameraföljningssystem med drönare och Oculus rift för tredjepersonsvy i realtid

ALBIN ARONSSON
ADRIAN GASHI
BJÖRN KARLSSON
TOBIAS OLAUSSON
MATTIAS PATRICKS
ANDRÉ WALLSTRÖM

© ALBIN ARONSSON, June 2015.

© ADRIAN GASHI, June 2015.

© BJÖRN KARLSSON, June 2015.

© TOBIAS OLAUSSON, June 2015.

© MATTIAS PATRICKS, June 2015.

© ANDRÉ WALLSTRÖM, June 2015.

Examiner: Arne Linde

Chalmers University of Technology
University of Gothenburg
Department of Computer Science and Engineering
SE-412 96 Göteborg
Sweden
Telephone + 46 (0)31-772 1000

Cover:

A picture of the quadcopter used in this project to emulate the virtual camera in third-person view.

Department of Computer Science and Engineering
Göteborg, Sweden June 2015

Sammanfattning

Med bakgrund i den utveckling som skett inom obemannade farkoster och digital underhållning var projektets syfte att utvärdera olika system för autonom kortdistansnavigation av en mindre drönare. Det avgränsade projekt målet var att implementera ett kameraföljningssystem, inspirerat av moderna videospel, med låg fördröjning som en viktig aspekt. En kvadrokopter (en fyrrotorig luftfarkost) följer efter och filmar en användare på ett bestämt avstånd och följer dennes huvudrörelser autonomt genom att rotera runt användaren. Videostömmen överförs i realtid till en huvudmonterad skärm så att användaren ser sig själv ur ett tredjepersonsperspektiv. Systemet är utvecklat för att användas i en öppen miljö utan hinder och använder bildbehandling, magnetometerar samt ultraljud för att bestämma kvadrokopterns position relativt användaren. Därefter används en iterativ navigationsmetod med enkel reglering för att styra kvadrokoptern. Tester av systemets olika komponenter visar att systemet löser projekt målet i teorin, men ytterligare tester och justeringar kan behövas för att kameraföljningssystemet ska fungera helt. Bildfördröjningen är 125 ms, vilket vi anser är för högt. De designval som gjorts har dock lett till låg fördröjning i de komponenter projektet har styrt över.

Nyckelord: autonom navigation, tredjepersonsvy, Oculus rift, drönare, ultraljud, kompass, bildbehandling

Abstract

The purpose of this project was to study alternative solutions for autonomous navigation of a small drone. The defined goal of the project was to implement a camera tracking system, inspired by modern video games, where low latency was of outmost importance. A quadcopter follows a user from a fixed distance and captures the user with a camera. The quadcopter autonomously follows the user's head movements by rotating around the user. The video stream is transmitted in real-time to a head mounted display, which is used to present a third person view to the user. The system is designed to be used in an open environment without obstacles. It uses image processing, magnetometers and ultrasound to determine the drone's position relative to the user. An iterative navigation method using simple control engineering is then used to navigate the drone. Tests of the individual parts of the system indicate that the system fulfills the goal of the project in theory. Further tests and adjustments of the system may be needed for the camera tracking system to be fully functional. The latency of the video stream has been measured to be 125 ms, which we consider too high. The design choices made by the group, however, has led to low latency in the components that were under the group's control.

Keywords: autonomous navigation, third person view, Oculus rift, drone, ultra sound, compass, image processing

Nomenklatur

Bildfält	Omfattningen av bilden som kameran fångar.
Bildpunkt	Element som utgör den minsta delen i en digitalt representerad bild.
Bildrutefrekvens	Den frekvens med vilken bildrutorna i en videosekvens uppdateras.
Bildrutefångare	Enhet som konverterar bildrutor från analogt till digitalt format.
Bildvinkel	Den vinkel som kameran kan se.
Flygdator	Den beräkningsenhet som är monterad på och styr kvadrokoptern.
Kvadrokopter	En luftfarkost som får sin lyftkraft från fyra motordrivna rotoror.
NMI	Nyans, mättnad och intensitet. Ett färgsystem för att blanda färger.
NTSC	Ett färgkodningssystem för analog video.
PAL	Ett färgkodningssystem för analog video.
RGB	Röd, grön och blå. Ett färgsystem för additiv färgblandning.
SDK	Engelska: <i>software development kit</i> , ungefär utvecklingskit. En samling verktyg som används för att framställa programvara.

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Tidigare forskning inom området	2
1.3	Syfte	2
1.4	Projekt mål	3
1.5	Avgränsningar	3
1.6	Metod	3
1.7	Rapportens disposition	3
2	Teoretisk bakgrund	5
2.1	Kvadrokofter	5
2.1.1	Frihetsgrader	6
2.1.2	Kvadrokofterns rörelser	6
2.2	Tredjepersonsvy i spel	7
2.3	Huvudmonterad skärm: Oculus rift	8
2.3.1	Skärm	8
2.3.2	Sensorer	8
2.3.3	Fördröjningskänslighet	9
2.4	Jordens magnetfält och kompassriktningar	9
3	Lösningsmetoder	10
3.1	Problemanalys	10
3.2	Möjliga lösningsmetoder	11
3.2.1	Centrering	11
3.2.2	Avstånd till användaren	11
3.2.3	Vinkel till användaren	12
3.2.4	Triangulering och trilateration	13
3.3	Vald lösningsmetod och systemöverblick	14
3.3.1	Centrering	14
3.3.2	Avstånd till användaren	14
3.3.3	Vinkel till användaren	14
3.3.4	Systemöverblick	15
4	Hårdvarudesign	16
4.1	Komponentöverblick	16
4.2	Val av kvadrokofter	16
4.3	Val av flygdator	17
4.4	Videosystem	17
4.4.1	Radiolänk för videoöverföring	18
4.4.2	Kamera	18
4.4.3	Kardanupphängare för kamerastabilisering	19
4.4.4	Störningseliminering med dämpning	19
4.5	Ultraljudssensor för avståndsmätning	19
4.6	Magnetometer för kompassriktning	20

5	Programvarudesign	21
5.1	Val av programspråk	21
5.2	Programstruktur	21
5.2.1	Programflöde	22
5.2.2	Mission planner: kommunikationslänken mellan kvadrokopter och dator	23
5.2.3	Huvudmodulen och programbiblioteket Oculus rift examples	24
5.3	Objektdetektering med Opencv	24
5.3.1	Konvertering av bild till NMI-kodning	24
5.3.2	Filtrering baserat på kulör	25
5.3.3	Brusreducering med morfologiska metoder	25
5.3.4	Objektdetektering i filtrerad bild	26
5.3.5	Avståndsberäkning ur filtrerad bild	27
5.4	Kompassdataextrahering från Oculus rift	28
5.5	Navigationsmodul med P-regulator	29
6	Verifieringsmetod	30
6.1	Kvadrokopterns acceleration	30
6.2	Objektdetektering i bild	30
6.3	Avståndsbestämning med ultraljud	31
6.4	Avståndsbestämning med objektdetekteringsfunktion	31
6.5	Avvikelse i kompassriktning	31
6.6	Fördröjning i videosystemet	32
6.7	Funktionalitetstest av navigationsmodul	33
7	Verifieringsresultat	34
7.1	Kvadrokopterns acceleration	34
7.2	Objektdetektering i bild	34
7.3	Avståndsbestämning med ultraljud	34
7.4	Avståndsbestämning med objektdetekteringsfunktion	35
7.5	Avvikelse i kompassriktning	35
7.6	Fördröjning i videosystemet	36
7.7	Funktionalitetstest av navigationsmodul	37
8	Diskussion	38
8.1	Kvadrokopterns prestanda	38
8.1.1	Kvadrokopterns acceleration	38
8.1.2	Kvadrokopterns stabilitet	38
8.2	Bildbehandling och sensorer	39
8.2.1	Objektdetektering	39
8.2.2	Avståndsmätning	39
8.2.3	Kompassriktning	40
8.3	Användarupplevelsen	40
8.3.1	Fördröjning i videosystemet	41
8.3.2	Total fördröjning i systemet	41
8.3.3	Bildkvalitet	43
8.3.4	Navigationsmodulen	44

8.4	Rekommenderad fortsättning	44
8.5	Tillämpningar	45
8.6	Etiska aspekter	45
9	Slutsatser	47
	Referenser	51
A	Vibrationstest	52
B	Fördröjning i avståndsmätning med ultraljud	53
C	Kompassberäkningens fördröjning	54
D	Testdata	56
E	Komponentlista	58
F	Komponentschema	59
G	Källkod för Lakitu	60

1 Introduktion

Kapitlet inleds med att presentera utvecklingen av de två teknikområdena digital underhållning samt autonom navigation och obemannade luftfarkoster, som ligger som bakgrund och sammanhang till projektet. Därefter redogörs för liknande projekt. Studiens vetenskapliga syfte presenteras följt av projektmålet och avgränsningar. Slutligen följer den övergripande arbetsmetodiken och en beskrivning av rapportens disposition.

1.1 Bakgrund

De senaste decennierna har visat ett stort uppsving för användandet av autonoma eller på distans styrda obemannade luftfarkoster, även kallade drönare. Som en reaktion på 11-september-attackerna har den amerikanska underrättelsetjänsten CIA, i en kontroversiell och uppmärksammas insats, använt drönare i bland annat Afghanistan, Pakistan, Somalia och Yemen både för att få underrättelse, men även för att attackera markmål [1]. Idag använder över 50 olika nationer drönare i militära sammanhang och många av de största internationella försvarsföretagen så som Boeing, General Atomics och Lockheed Martin har utvecklat egna produkter [2,3]. Inom den europeiska försvarsindustrin finns ett samarbete mellan bland annat Dassault, EADS, Saab och Ruag för att utveckla den gemensamma Neuron-plattformen som används för forskning på obemannade farkoster av de deltagande företagen och länderna [4].

Utvecklingen är dock inte begränsad till militära applikationer utan återfinns också i civilsamhället. Tyska tågmyndigheten planerade 2013 att använda drönare för att försöka förhindra klotter och sedan september 2014 är det tillåtet att använda drönare för filminspelning i USA [5,6]. Denna utveckling har drivits av allt billigare elektronik och mer avancerad reglerteknik [7]. För privatpersoner ses också en ökad användarvänlighet hos speciellt kvadrokoptrar (drönare med fyra rotoror) som en bidragande orsak till ett ökat intresse. De används bland annat till flygfotografering och till kappkörning för nöjes skull.

Konceptet med autonom navigation är även intressant inom andra teknikområden. Att göra det möjligt för farkoster att automatiskt förflytta sig mellan olika platser och undvika kollision är ett starkt växande forskningsområde som fått mycket uppmärksamhet på senare tid. Utan mänskliga förare kan logistikkostnader sänkas och säkerheten med transporter ökas [8]. En tillämpning där forskningen har kommit relativt långt är karavankörning med personbilar i ett led efter varandra [9,10].

Vid sidan av utvecklingen av drönare och autonom navigation har industrin kring digital underhållning vuxit fram. Under 2014 genomfördes exempelvis rekordinvesteringar inom spelindustrin med ett uppmärksammat exempel i det amerikanska mjukvaruföretaget Microsofts förvärv av den svenska spelstudion Mojang för 2,5 miljarder dollar (cirka 21 miljarder svenska kronor) [11]. Detta kan jämföras med Geelys förvärv av Volvo personvagnar för 1,8 miljarder dollar (15 miljarder kronor) [12].

För att simulera en ökad djupkänsla i tredimensionella spel har företaget Oculus VR utvecklat en huvudmonterad skärm med separat bildvisning för varje öga. Detta ger en mer omvälvande upplevelse för spelaren än traditionella bildvisningsmetoder

och tekniken benämns därför ofta som virtual reality (svenska: virtuell verklighet). Under 2014 förvärvades Oculus VR av Facebook för 2 miljarder dollar (cirka 17 miljarder SEK) [13].

Många av dagens videospel utspelar sig i ett tredjepersonsperspektiv med synvinkel från en virtuell kamera som följer spelkaraktären. En intressant tillämpning baserat på den utveckling som skett inom digital underhållning och obemannade farkoster vore därför att kombinera dessa. Genom att låta montera en kamera på en drönare kan användaren se sig själv i tredjeperson via en Oculus rift-enhet, och på så vis emulera de kameramodeller som används inom spelindustrin.

1.2 Tidigare forskning inom området

Ett projekt med samma projektbeskrivning som det denna rapport beskriver har bedrivits på Chalmers tekniska högskola ett tidigare år av Lindgren et al. [14]. Deras rapport beskriver ett navigationssystem baserat på bildbehandling. Användaren bar en ställning med tre sfärer som detekteras i kameran bild, och från detta kunde både riktning och position för användaren beräknas. Projektet lyckades dock inte nå projekt målet då systemet var känsligt för störningar i bilden, och därför inte kunde testas i autonomt läge. En viktig slutsats som författarna drog var att låg fördröjning av bilden från kamera till skärm var viktig för användarupplevelsen.

Företaget Helico aerospace industries säljer en kvadrokopter benämnd Airdog som autonomt följer efter användaren. På kvadrokoptern kan man fästa en kamera av modellen Gopro för att kunna filma användaren. Airdog spårar användaren med hjälp av ett armband användaren har på sig som utnyttjar bland annat GPS och accelerometrar för att bestämma positionen relativt användaren. Armbandet kommunicerar med kvadrokoptern via Bluetooth [15].

Mot slutet av projektets löptid introducerade även företaget Lily en autonom kvadrokopter, också med namnet Lily, som följer efter och filmar användaren med en inbyggd kamera [16]. Precis som med Airdog centreras kameran på användaren, i Lilys fall med hjälp av bildbehandling. Vid projektets slutförande fanns ännu varken Airdog eller Lily i färdig version.

Båda dessa produkter är tänkta att användas när användaren utför utomhusaktiviteter som skidåkning där det är svårt att själv filma aktiviteten. Båda produkterna saknar dock möjlighet att precist bestämma kvadrokopterns position i förhållande till användaren. Ingen av produkterna har heller möjlighet att strömma video till användaren i realtid.

1.3 Syfte

Syftet med projektet var att undersöka och utvärdera de olika alternativ som finns för att skapa ett system för autonom kortdistansnavigation av mindre drönare. Ett av alternativen valdes ut för att utvecklas och implementeras i hård- och programvara. Systemet utvecklades för att verka i en öppen miljö utan hinder.

1.4 Projektmål

Projektmålet var att realisera den virtuella kameran från ett tredjepersonsspel (se avsnitt 2.2) med hjälp av en kvadrokopter och det system för autonom kortdistansnavigation som väljs. Kvadrokoptern skulle autonomt följa efter och rotera kring användaren. Via en trådlös videoström skulle sedan bilden från en kamera monterad på kvadrokoptern visas på en huvudmonterad skärm av modellen Oculus rift. Slutprodukten skulle således bli en experimentell prototyp där användaren får uppleva världen ur ett tredjepersonsperspektiv, likt huvudkaraktären i ett modernt videospel.

Särskild vikt lades på användarvänlighet och på att systemet skulle ha snabb respons. Därför prioriterades låg fördröjning i många designval.

1.5 Avgränsningar

Projektets fokus låg på att utveckla kameraföljningssystemet och inte på att konstruera en kvadrokopter. Kvadrokoptern byggdes därför ihop av färdiga komponenter.

Då syftet med projektet var att utveckla ett system för användning i öppen miljö togs ingen hänsyn till eventuella hinder i miljön. Med projektetmålet att utveckla en experimentell prototyp togs inte heller hänsyn till att minimera och göra kringutrusting som dator och strömförsörjning portabel.

1.6 Metod

För att nå projektmålet delades huvuduppgiften upp i moduler där varje modul löser en deluppgift. Med tydligt definierade gränssnitt mellan modulerna kunde dessa utvecklas oberoende av varandra. Fördelen med detta tillvägagångssätt var att förseningar i en modul inte behövde påverka utvecklingen av andra moduler.

Varje modul behövde en egen litteraturstudie om vilka faktorer som påverkar dess genomförande. Allt eftersom en modul blev färdigställd och testad separat integrerades den med övriga färdiga moduler, och det färdiga systemet byggdes upp för att sedan testas i helhet.

1.7 Rapportens disposition

I kapitel 2 presenteras centrala koncept inom projektet, däribland vad som menas med tredjepersonsvy, olika aspekter av hur en kvadrokopter och Oculus rift fungerar. Därefter, i kapitel 3, definieras hur vi valt att formulera problemet och hur det kan delas upp i mindre beståndsdelar. Olika lösningar analyseras även till de identifierade delproblemen och till sist presenteras den valda lösningen och en överblick över hela systemet ges.

I kapitel 4 behandlas alla designbeslut och val som gjorts av mekaniska och elektriska komponenter samt den teori och andra faktorer som ledde till valen. Motsvarande sker därefter i kapitel 5 där alla programvaruimplementationer och lösningar redogörs för.

För att utvärdera slutprototypen utfördes en serie av verifieringstester som beskrivs i kapitel 6. Därefter listas resultaten av nämnda tester i kapitel 7. Slutligen

förs en diskussion av slutresultaten och ett bredare perspektiv ges av projektet i kapitel 8, och därpå presenteras projektgruppens slutsatser om kameraföljningssystemet i kapitel 9.

2 Teoretisk bakgrund

Följande kapitel beskriver den teoretiska bakgrund som behövs för att förstå flera centrala begrepp i denna rapport. Kapitlet inleds med en beskrivning av kvadrokoptern och hur den fungerar. Därefter följer en genomgång av tredjepersonsvy i videospel och ett avsnitt om den huvudmonterade skärmen Oculus rift. Kapitlet avslutas med kompassteori då det används för navigation av kvadrokoptern i den implementation som beskrivs i denna rapport.

2.1 Kvadrokopter

En flygfarkost som genererar sin lyftkraft med fyra rotoror kallas på engelska för *quadcopter*, vilket på svenska ungefär kan översättas till kvadrokopter. Avancerad reglerteknik gör att kvadrokoptrar både kan vara väldigt stabila och samtidigt lättmanövrerade i flera riktningar. De har en förhållandevis enkel mekanisk konstruktion och lämpar sig därför mycket väl som små radiostyrda enheter. I Fig. 1 visas en bild av en mindre, radiostyrd kvadrokopter.



Fig. 1: En typisk utformning av mindre, radiostyrd kvadrokopter. Denna modell har en kamera monterad på undersidan för att ta flygfoto och ett uppfällt landningsställ. Extern utrustning likt dessa är något som de flesta radiostyrda kvadrokoptrar stödjer. Från [17], CC-BY-SA.

Den komplicerade aerodynamiken som följer av turbulent luft från rotorerna och vindar ställer höga krav på stabiliseringen. För att kunna stabilisera farkosten används därför reglerteknik för att styra de fyra rotorernas samverkan [7]. Kvadrokoptrar är därför utrustade med tröghetsmätningseinheter bestående av accelerometrar och gyroskop som mäter kvadrokopterns orientering kring de tre rotationsaxlarna. Beräkningar utförs sedan av en flygdator för att hålla kvadrokoptern i önskat läge.

En god egenskap hos kvadrokoptrar är att de likt en helikopter kan hålla sig på en bestämd höjd utan att driva iväg, till skillnad från till exempel ett flygplan som behöver ha en hastighet för att behålla lyftkraften.

För att motverka att kvadrokoptern roterar okontrollerat runt sin egen giraxel är rotorerna konfigurerade så att två av rotorerna roterar medsols och två motsols. Diagonalt monterade rotoror roterar alltid åt samma håll.

2.1.1 Frihetsgrader

De fyra rotorerna gör att kvadrokoptern kan röra sig i valfri riktning. En kvadrokopter kan använda sina rotorerna för att rotera kring tre rotationsaxlar som benämns roll-, tipp- och giraxeln (se Fig. 2).

Kvadrokoptern har även tre translationsfrihetsgrader, en längs varje koordinataxel. Translationsrörelser längs med horisontalplanet åstadkoms genom att kvadrokoptern roterar åt det håll den skall färdas. Detta gör att rotorerna lutar i önskad rörelseriktning och en del av lyftkraften istället används för att förflytta kvadrokoptern [7].

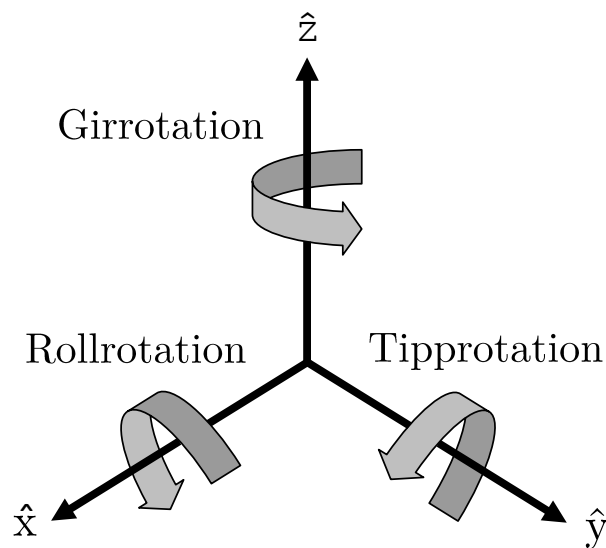


Fig. 2: Beskrivning av kvadrokopterns sex frihetsgrader. Den har tre translationsfrihetsgrader längs riktningen av de tre koordinataxlarna $\hat{x}$, $\hat{y}$ och $\hat{z}$ med $\hat{x}$ -riktningen i kvadrokopterns framåtriktning. Rotation kring varje axel kan åstadkommas och ger ytterligare tre rotationsfrihetsgrader. Rotationerna kallas rollrotation, tiprotation och girrotation.

2.1.2 Kvadrokopterns rörelser

Rotation kring respektive axel skapas genom att öka effekten på två av motorerna samtidigt som effekten sänks på de två andra. För att erhålla tiprotation framåt ökas hastigheten på de två bakre rotorerna och minskas på de två främre. Tvärtom gäller för att istället rotera bakåt. Rollrotation erhålls genom att minska effekten på de två rotorerna på den sida åt vilket håll luftfarkosten ska rotera och öka den på de andra två. Girrotation, då kvadrokoptern roterar kring den lodräta axeln och således svänger vänster eller höger, fås genom att öka effekten på de två rotorerna som roterar åt samma håll som den önskade girriktningen och minska effekten på de andra två.

Användaren skickar endast roll-, tipp- eller girkommandon till kvadrokoptern och behöver därför inte känna till hur rotationen åstadkoms. Flygdatorn omvandlar automatiskt dessa styrkommandon till styrsignaler till motorerna.

2.2 Tredjepersonsvy i spel

Ett videospel där spelaren ser huvudkaraktären som om en virtuell kamera filmade karaktären sägs ha en tredjepersonsvy, och kallas för ett tredjepersonsspel. En kontrast till detta är en förstapersonsvy där spelaren ser spelvärlden genom huvudkaraktärens ögon. Ett populärt exempel på ett modernt tredjepersonsspel är spelet *The witcher 3: wild hunt* från 2015 som avbildas i Fig. 3.



Fig. 3: Skärmbild från spelet *The witcher 3: wild hunt*. Huvudkaraktären som spelaren styr ses från ett tredjepersonsperspektiv, i det här fallet bakifrån. Från [18], återgiven med tillstånd.

Hur tredjepersonsvyn och den virtuella kameran implementeras kan skilja mellan olika tredjepersonsspel. Ett sätt är att placera den virtuella kameran på en bestämd position och flytta kameran endast när spelarens karaktär lämnar synfältet. Ett vanligare alternativ är att, som i Fig. 3, låta kameran kontinuerligt följa efter spelarens karaktär. Det kan göras från antingen ett låst läge i förhållande till karaktären eller med möjlighet att rotera kameran i en cirkelbana med karaktären i centrum.

Det finns också variation i hur rotationen representeras i olika spel. I vissa spel kan spelaren rotera kameran utan att karaktären rör sig. I andra spel är karaktären och kameran direkt kopplade så att kameran följer karaktärens riktning.

Givet en radie r och en periodtid T kan den centripetalacceleration a_c som skulle krävas för att hålla kameran i en cirkelbana beräknas enligt

$$a_c = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r = \frac{4\pi^2 r}{T^2}. \quad (1)$$

Rotationshastigheten kan vara närmast oändlig i spelvärlden eftersom den inte begränsas av fysiska parametrar, men den begränsas ofta för att underlätta för spelaren. Ett exempel är det moderna spelet *Grand theft auto 5* där kameran befinner sig på motsvarande cirka tre meters avstånd och kan rotera ett varv runt spelaren på en sekund. Detta ger att kameran måste ha en centripetalacceleration på $a_c = 120 \text{ m/s}^2$.

2.3 Huvudmonterad skärm: Oculus rift

Oculus rift är en skärm för virtuell verklighet under utveckling av Oculus VR. Skärmen monteras på användarens huvud och täcker helt användarens synfält. En bild på den andra versionen av utvecklargåvan av Oculus rift-skärmen kan ses i Fig. 4.



Fig. 4: En bild på den andra utvecklarutgåvan av Oculus rift. Huvudskärmen omsluter hela synfältet och presenterar en bild för användaren. Från [19], CC-BY-SA.

2.3.1 Skärm

Enheten använder sig av en högupplöst skärm med minimerad effekt av kvarhängande bild. För att skapa ett stereoskopiskt perspektiv som omsluter användarens synfält är två linser placerade framför skärmen. Linserna gör så att varje öga enbart kan se halva bildskärmen. Om varje halva av bildskärmen visar en bild som är skapad utifrån ett perspektiv förskjutet med ögonens avstånd får användaren känslan av en tredimensionell bild. Linserna i kombination med skärmen skapar ett synfält med en diagonal synvinkel på 110 grader [20].

Oculus rift är en passiv skärm utan möjlighet att generera bild själv. Bilden som skall visas behöver därför genereras i en dator. Datorn måste också korrigera den skapade bilden för den distorsion som linserna skapar.

2.3.2 Sensorer

Enheten är utrustad med tre uppsättningar sensorer: gyroskop, accelerometrar och magnetometrar. Mätningarna från sensorerna sammanställs i datorn till en beräknad orientering för användarens huvud.

Andra versionen av utvecklarutgåvan av Oculus rift levereras även med en extern kamera som spårar infraröda dioder på enhetens framsida. Detta gör att användarens rörelse i rummet kan spåras med mycket bättre precision än vad som är möjligt med enbart sensorerna monterade på skärmen [21]. Huvudskärmen måste dock befinna sig inom 2,5 m från kameran för att positionering med denna metod skall vara möjlig [21].

2.3.3 Fördröjningskänslighet

När hela synfältet upptas av den virtuella verkligheten kan användaren bli illamående om olika sinnen skickar olika signaler till hjärnan. Detta fenomen benämns ibland som simulatorsjuka, och är närbesläktat med sjösjuka.

Simulatorsjukan uppstår när det uppstår en fördröjning från att användaren rör huvudet till att användarens representation i bilden som visas i Oculus rift rör sig. För en bra virtuell upplevelse rekommenderar Oculus VR att fördröjningen inte bör överstiga 20 ms. Redan vid 60 ms är fördröjningen så pass stor att obehag uppstår. Dessa siffror gäller både i förstapersonsvy och tredjepersonsvy [22].

2.4 Jordens magnetfält och kompassriktningar

Jordens magnetfält är orienterat ungefär i nord-sydlig riktning. Det är dock varken homogent eller orienterat längs med jordytan. Istället har magnetfältet en lutning i förhållande till jordytan, inklinationen, som är beroende av var på jorden man befinner sig [23].

Utöver inklinationen har magnetfältet även geografiskt lokala avvikelser i både styrka och riktning, deklinationen. Dessutom varierar både deklination och inklinations över tid. Ytterligare en komplikation är att de magnetiska polerna är förskjutna i förhållande till jordens rotationsaxel. Det är dock rotationsaxeln som används som referens för den geografiska kompassriktningen då den inte förändras över tid [24].

För att beräkna den korrekta riktningen mot jordens geografiska nordpol behöver den uppmätta riktningen kompenseras med faktorer som är specifika för platsen och tidpunkten där riktningen mäts. Matematiska modeller i kombination med noggranna mätningar från satelliter och jordbaserade mätstationer används för att generera kartor över magnetfältet som även förutspår hur det kommer ändras i framtiden [24].

Mätningar av magnetfält påverkas också av lokala faktorer såsom magnetiska objekt i omgivningen eller magnetfält genererade av elektrisk utrustning. Dessa avvikelser är svårare att kompensera för med statistiska faktorer. Istället behöver metoder som beräknar de lokala avvikelserna användas för att i realtid räkna ut den korrekta kompassriktningen [25].

3 Lösningsmetoder

Följande kapitel inleds med en analys av hur projektmålet kan indelas i tre mindre problem. Därefter följer förslag till tänkbara lösningar på respektive problem. Kapitlet avslutas med att beskriva den helhetslösning som valdes på en övergripande nivå. I kapitel 4 samt 5 beskrivs lösningen sedan i detalj.

3.1 Problemanalys

För att uppfylla projektmålet måste en specifik implementation av den virtuella kameran som beskrivs i avsnitt 2.2 väljas ut och realiseras. Projektgruppen har valt att realisera en virtuell kamera som följer användaren på ett konstant avstånd och roterar på en cirkelbana med användaren i centrum. Kameran, monterad på kvadrokoptern, riktas åt samma håll som användaren har vridit huvudet och centreras på användaren. Om kameran hålls på konstant höjd kan det tredimensionella problemet reduceras till att enbart behöva lösas i det tvådimensionella planet, vilket gör problemet enklare att modellera. I Fig. 5 visas en bild på hur hela systemet är tänkt se ut under användning.



Fig. 5: En bild av hur det kan se ut när systemet används. Användaren har på sig en huvudmonterad skärm och kvadrokoptern flyger bakom användaren.

Om ett relativt koordinatsystem med användarens position som origo införs kan kvadrokopterns position entydigt bestämmas med polära koordinater. Kvadrokoptern förväntas då befinna sig på en cirkelbana med kameran centrerad på användaren. När användaren flyttar sig jämfört med marken flyttas origo i koordinatsystemet. Efter att ha experimenterat med olika avstånd valde projektgruppen att låta

kameran hålla ett avstånd på 3 m från användaren eftersom det överensstämmer med de spel som efterliknas.

Tack vare att kvadrokoptern kan hålla sig stilla i luften kan positioneringen delas in i tre moment: att centrera kameran på användaren, att bestämma avståndet mellan användare och kvadrokopter samt att bestämma vinkeln till användaren.

3.2 Möjliga lösningsmetoder

Detta stycke listar de metoder som projektgruppen identifierat för att lösa de tre delproblemen centrering, avståndsmätning och vinkel till användaren. Vi beskriver även två metoder som kan lösa hela det övergripande problemet. För- och nackdelar med varje metod presenteras också för att ge en grund till de val som presenteras i efterföljande avsnitt.

3.2.1 Centrering

Eftersom kvadrokoptern är utrustad med en kamera kan den utnyttjas till att detektera användaren i bilden. Detektion kan exempelvis utföras genom att filtrera ut ett objekt från bilden med avseende på färg eller form. En fördel med att använda den befintliga kameran är att systemet blir enkelt att realisera. Videosekvensen från kameran behöver, för att kunna visas på huvudskärmen, passera genom en dator. Metoden tillför alltså inte någon hårdvara. En nackdel är dock att metodens fördröjning blir beroende av videosystemets fördröjning eftersom varje bildruta som skall analyseras behöver levereras till datorn innan analys är möjlig.

En alternativ metod vore att montera en infraröd kamera på kvadrokoptern och en infraröd diod på användaren. Metoden har fördelen att de ljusförhållanden som råder på platsen där systemet används inte påverkar möjligheten till detektion i samma utsträckning som för detektion med befintligt ljus. Det tillför dock komplexitet till systemet både i form av extra hårdvara och extra vikt på kvadrokoptern.

3.2.2 Avstånd till användaren

Avståndet till användaren kan bestämmas med flera olika metoder. I detta avsnitt beskrivs de primära metoder som projektgruppen identifierat: beräkna absolut positionsskillnad, bildbehandling, skillnad i signalstyrka och att använda dedikerade sensorer.

I ett absolutpositionssystem skulle det vara möjligt att beräkna avståndet som en skillnad mellan kvadrokopterns och användarens positioner. Exempelvis skulle GPS kunna användas för detta. Precisionen på GPS kan dock endast garanteras till 7,8 m längs markplanet [26], även om precisionen i bättre förhållanden troligen hade varit närmare 2,5 m [27].

För att öka precisionen vore det även möjligt att skapa ett lokalt, platsberoende, positionssystem liknande GPS. Det skulle kunna göras med kameror placerade på master eller längs vägarna i ett rum. Ett sådant system skulle dock begränsa rörligheten till det området där systemet är installerat.

Ett relativt positionssystem skulle istället exempelvis kunna använda skillnad i radiosignalsstyrka för att bestämma avståndet. Genom att utrusta både använ-

dare och kvadrokopter med Bluetoothenheter är det teoretiskt möjligt att beräkna avståndet eftersom signalstyrkan hos radiosignaler minskar kvadratisk med avståndet [28]. Dock påverkar andra faktorer så som interferens, utbredningsmedium och hindrande objekt. Det kan därmed vara svårt att beräkna ett exakt avstånd med denna metod [29].

Det är möjligt att utnyttja bildrutor från kameran för att beräkna avståndet. Genom att mäta hur stor yta ett objekt av känd storlek fäst på användaren upptar i bilden kan man räkna ut hur långt ifrån kameran det befinner sig. En fördel med denna metod är att den inte kräver någon extra hårdvara. Nackdelen är att noggrannheten begränsas av kvaliteten på videoströmmen.

Det är även möjligt att bestämma avståndet med dedikerade sensorer. Med en lasermätare sker det optiskt och med mycket hög precision till en specifik punkt på användaren. Lasermätaren måste dock vara exakt riktad mot användaren för att mäta rätt värde vilket ger små marginaler för fel. Det innebär att man måste veta användarens position med hög precision för att kunna rikta lasern. Dessutom är lasermätare dyra och otympliga.

Ett billigare och kompaktare alternativ vore att bestämma avståndet med ultraljud. Genom att skicka en ljudpuls mot användaren och mäta tiden tills ekot mottas blir den uppmätta tiden proportionell mot avståndet. Styrkan av reflektionen påverkas dock av vilket klädmaterial användaren bär, vilket kan begränsa det maximalt uppmätta avståndet [30]. Metoden är även känslig för störningar orsakade av att till exempel ett annat objekt eller marken reflekterar ljudpulsen.

För att undvika att fel objekt reflekterar pulsen kan avståndsbestämningen med ultraljud istället involvera både en sändare och en mottagare. På ett liknande sätt mäts tiden från att sändaren skickar en pulssignal tills att mottagaren detekterar den. Då behöver kvadrokoptern bära en sändare eller mottagare medan användaren bär den andra.

Utöver att lösningen med sändare och mottagare för ultraljud skulle innebära att användaren fick bära extra utrustning är mottagarkretsen svår att implementera. Då mottagaren inte nödvändigtvis kommer att vara riktad mot ljudkällan upptäcktes efter tester att den mottagna pulsens signalstyrka varierar kraftigt med även små skillnader i avstånd och riktning. Styrkan kan skilja flera magnituder inom avstånd upp till tre meter och det betyder att en mottagarkrets med en fast förstärkning inte är tillräcklig. För att lösa problemet skulle en avancerad mottagarkrets, eventuellt med dynamisk förstärkning av inkommande signaler, behövas. Då ingen sådan komponent kompatibel med vår lösning kunde hittats hade den behövt utvecklas.

3.2.3 Vinkel till användaren

Som beskrivits i avsnitt 2.1 och 2.3 använder både kvadrokoptern och den huvudmonterade skärmen gyroskop och accelerometrar för att bestämma orienteringen kring de tre rotationsaxlarna. Det vore alltså möjligt att från mätvärdena beräkna respektive utrustnings riktning. Med ett gemensamt koordinatsystem skulle det då vara möjligt att beräkna skillnaden i riktning mellan dem. Dessvärre minskar precisionen i mätvärden som beräknats utifrån accelerometrar med tiden [31].

Ett annat alternativ vore att använda Oculus rifts magnetometrar och accelerometrar för att beräkna kompassriktningen för användarens huvud. Om en kompass

även monteras på kvadrokoptern kan vinkeln mellan kvadrokoptern och användaren jämföras och kvadrokopterns riktning relativt användaren bestämmas.

Kompasser är känsliga för störningar från bland annat elektronik och lokala variationer i magnetfältet (se avsnitt 2.4). I områden där magnetfältet varierar såpass lite att det inte finns en märkbar differens mellan störningarna på användarens och kvadrokopterns plats kan magnetfältet approximeras till att vara homogent. Störningarna kommer därmed inte påverka differensen mellan riktningarna som mäts upp.

3.2.4 Triangulering och trilateration

Projektgruppen har identifierat två separata metoder som båda löser alla delproblemen i positioneringen: bildbaserad triangulering och ultraljudsbaserad trilateration.

Genom att utnyttja den kamera som redan finns i systemet är det möjligt att med hjälp av triangulering beräkna kvadrokopterns relativa position till användaren. Om en ställning med kända punktformade objekt placeras på användaren kan dennes orientering och position bestämmas utifrån objektens placering i bilden. Samma metod skulle även kunna användas med IR-dioder och IR-kamera vilket skulle innebära extra utrustning på kvadrokoptern men eliminera behovet av bildbehandling.

Beräkningar gjordes på hur mycket ställningen behöver röra sig från det önskade avståndet på 3 m för att ge upphov till en storleksförändring i kamerabilden motsvarande en bildpunkt. Med den bildupplösning som är möjlig med analog överföring av video skulle en 30 cm hög ställning behöva röra sig mer än 30 cm i djupled innan förändringen motsvarar en bildpunkt. Om ställningens storlek ökas till 50 cm blir noggrannheten istället 5 cm. Vid rotation ger en ställning som är 50 cm bred endast en upplösning på 10 grader.

Precisionen kan höjas om klot med känd radie används istället för punktformade objekt så som gjordes av Lindgren et al. Genom att mäta objektens storlek i bilden kan avståndet till varje objekt beräknas vilket gör att noggrannheten för rotation ökar kraftigt [14].

Oculus rift har ett positioneringssystem som använder IR-dioder och en IR-kamera för att uppnå hög precision (se avsnitt 2.3). Metoden går i teorin att använda även för att positionera kvadrokoptern relativt användaren. Kameran behöver då placeras på kvadrokoptern för att alltid kunna se användaren. Detta gör att datan från kameran behöver överföras trådlöst, vilket inte är trivialt då det rör sig om stora mängder data. Räckvidden är dessutom begränsad till 2,5 m.

Den andra helhetslösningen, trilaterering, utförs genom att använda flera ultraljudsenheter, varav en är sändare och resterande är mottagare. Sändaren skickar en ultraljudspuls som mottagarna lyssnar efter. Om tidpunkten då pulsen skickades respektive mottogs av varje mottagare är känd kan avståndet mellan sändaren och de individuella mottagarna beräknas. Om dessutom mottagarnas avstånd och placering till varandra är känd kan kvadrokopterns position relativt användaren beräknas med trilateration. Samma problem med förstärkning som konstaterades i avsnitt 3.2.2 uppstår dock även här.

3.3 Vald lösningsmetod och systemöverblick

För att bestämma vilken lösning som borde användas har framförallt följande parametrar tagits i beaktning: precision, låg fördröjning och användarvänlighet.

På grund av för dålig precision är trianguleringsmetoden som använder punktformade objekt inte tillämpbar. Precisionen för triangulering med sfärer är okänd, men lösningen valdes bort då den kräver att användaren bär en relativt stor ställning. Detta påverkar användarvänligheten negativt både i att det blir otympligt för användaren men också för att ställningen skulle uppta en del av den bild som användaren ser och därigenom minska inlevelsen. Trilaterering med ultraljud bedömdes vara för avancerad för att kunna implementeras inom projektiden och valdes därför också bort.

Då båda helhetslösningarna valdes bort stod det klart att en kombination av centrering, avståndsmätning och vinkelmätning behövde väljas.

3.3.1 Centrering

För att centrera kvadrokoptern valde vi att använda bilden från den befintliga kameran för att detektera ett objekt fäst på användaren. Denna metod valdes då den inte kräver någon extra hårdvara, och den dator som används för att driva Oculus rift kan användas för att utföra bildbehandlingen.

3.3.2 Avstånd till användaren

Avståndsmätning med GPS har för dålig precision för att kunna användas på de avstånd som används i detta projekt. Lokala positioneringssystem skulle kunna användas för att öka precisionen, men de valdes bort då de begränsar användandet till en specifik plats, samt är svåra att implementera. Lasermätning valdes bort då metoden ställer för höga krav på precisionen i riktningssystemet, samt är dyr och otymplig. Ultraljudsmätning med sändare och mottagare valdes bort då det tar mer tid i anspråk än vad som fanns tillgängligt i projektet att designa mottagarkretsen.

För att bestämma avståndet till användaren valde vi istället att använda två parallella metoder. Dels används ultraljud med eko då det är en väl beprövad metod som dessutom har inbyggt stöd i den flygdator som används. Dessutom beräknas avståndet med bildbehandling genom att mäta hur stort objektet är i bilden och därigenom beräkna avståndet.

Mätmetoderna kompletterar varandra bra då ultraljudsmätningen har hög noggrannhet och stabilitet, medan bildbehandlingsmetoden har bredare synfält och därför även kan se användaren när denne befinner sig utanför ultraljudssensors uppsagningsområde. Denna synergi ger en mycket högre robusthet i avståndsmätningen.

3.3.3 Vinkel till användaren

För att beräkna vinkeln till användaren valde vi att använda magnetometrarna i Oculus rift och en kompass monterad på kvadrokoptern för att kunna beräkna skillnaden i kompassriktning. Eftersom sensorerna i Oculus rift uppdateras med en frekvens på 1 kHz möjliggör det en snabb uppdatering av användarens riktning för

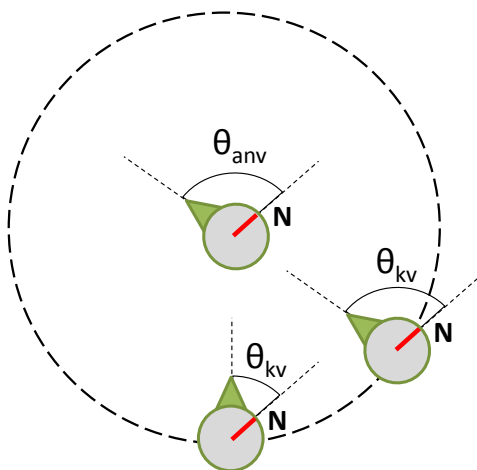


Fig. 6: En skiss över hur den tänkta lösningen skall fungera. Avståndet bestäms med ultraljud och kameran centreras på användaren med bildbehandling. Riktningen bestäms genom att jämföra användarens och kvadrokopterns avvikelse från norr, θ_{anv} och θ_{kv} , och justera kvadrokopterns riktning på cirkelbanan.

kameraföljningssystemet. Dessutom kräver lösningen ingen extra utrustning monterad på användaren vilket är bra för användarvänligheten.

3.3.4 Systemöverblick

Den kompletta lösningsmetoden använder således de tre mätvärdena för rotation, avstånd och centrering för att beräkna kvadrokopterns position relativt användaren enligt Fig. 6. När användaren rör sig ger det utslag i att något eller flera av mätvärdena förändras då kvadrokoptern inte längre befinner sig på önskad position relativt användaren. Navigationssystemet tar baserat på mätvärdena beslut om vilken rörelse kvadrokoptern behöver utföra för att förflytta sig till rätt position.

4 Hårdvarudesign

Följande kapitel beskriver de olika hårdvarukomponenter som har valts och ger resonemang för de olika valen. Här beskrivs även implementationen av varje komponent och dess roll i det slutliga systemet.

4.1 Komponentöverblick

I Fig. 7 visas en överblick över kameraföljningssystemets hårdvarukomponenter. Video från kameran, samt sensordata från ultraljudsmätare och kompass, skickas från kvadrokoptern till en markstation bestående av en datorenhet. Den trådlösa kommunikationen sker över olika frekvenser för de olika delarna av systemet. Videoströmmen från kameran konverteras från analogt till digitalt format innan den behandlas av datorn. Datornheten visar bildrutorna från videoströmmen på Oculus rift efter att först ha korrigerat dem för den distorsion linserna framför skärmen ger (se avsnitt 2.3). Datornheten extraherar sensorvärden från den monterade huvudskärmen och skickar även styrsignaler till kvadrokoptern.

En fullständig beteckningslista finns i Appendix E och schematisk kopplingsskiss över enheterna på kvadrokoptern hittas i Appendix F.

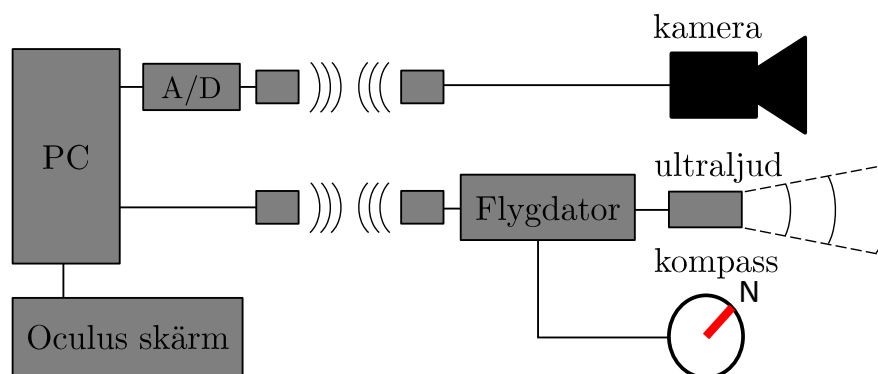


Fig. 7: En överblick över hårdvarukomponenterna i kameraföljningssystemet. Notera att videoströmmen skickas över separat radiolänk. Videoströmmen konverteras från analogt till digitalt format innan den når datorn.

4.2 Val av kvadrokopter

Som tidigare nämnts är fördröjning av bilden en ytterst viktig faktor för användarvänligheten. Att ha låg fördröjning var ett viktigt projekt mål och prioriterades vid valet av kvadrokopter. När användaren vrider på huvudet måste kvadrokoptern kunna förflytta sig till en position bakom användaren så snabbt som möjligt. Liten vikt och stark motorkraft ansågs därför vara de viktigaste faktorerna för vår kvadrokopter.

Då kvadrokoptrars prestanda generellt är bristfälligt dokumenterad har det varit svårt att välja komponenter som söker uppnå specifika prestanda. Istället har valen fått göras utifrån observationer och rekommendationer från erfarna användare. Stor

inspiration togs från tävlingskvadrokoptrar som är speciellt utformade för att vara lätta och snabba.

En liten, lätt och stark ram av kolfiber valdes som grund till kvadrokoptern. För att skapa en så snabb kvadrokopter som möjligt valdes de mest kraftfulla motorer som var kompatibla.

4.3 Val av flygdator

Som tidigare nämnts i kapitel 2.1 är en flygdator nödvändig för att stabilisera en kvadrokopter. Flygdatorn är utrustad med en tröghetsmätningseenhet bestående av accelerometrar och gyroskop som mäter kvadrokopterns orientering kring de tre rotationsaxlarna. Flygdatorn beräknar därefter de signaler som måste skickas till motorerna för att hålla kvadrokoptern stabil.

Det finns många olika flygdatorer med olika för- och nackdelar tillgängliga på marknaden. I det här projektet valdes Ardupilot mega version 2.6 tillverkad av 3D robotics. Denna flygdator har många I/O-portar för externa komponenter så som ultraljudsmätare och kompass, vilka är nödvändiga för att navigera kvadrokoptern autonomt med den metod vi valt. Den har även en inbyggd barometer för höjdkänning och ett förprogrammerat läge som håller kvadrokoptern på en bestämd höjd som kan översättas till höjdhållningsläge. Dessutom är den väl dokumenterad vilket underlättar utvecklingsarbetet.

För att minska vibrationerna i ramen vilka kan störa tröghetsmätningseenheten monterades flygdatorn på en vibrationsdämpande ställning. Med vibrationsdämpande ställning hölls vibrationerna inom rekommendationen för flygdatorn. Testet med resultat beskrivs i Appendix A.

För att stabilisera kvadrokoptern använder Ardupilot mega PID-regulatorer för de tre rotationsaxlarna. Regulatorerna används för att omsätta reglerfelet mellan nuvarande rotation och önskad rotation till styrsignaler för motorerna¹.

För att bestämma parametrarna för regulatorn användes Ziegler-Nichols metod med samma parametrar för tipp- och rollrotation [32]. De deriverande och integrerande faktorerna nollställdes och den proportionella förstärkningen stegades upp tills dess att kvadrokoptern oscillerade med konstant amplitud. Periodtiden för oscillationen mättes och regulatorparametrar valdes ur tabell. För att öka stabiliteten justerades därefter parametrarna något i efterhand.

4.4 Videosystem

Videosystemet kan ha en mycket stor inverkan på den totala fördröjningen som användaren upplever. Särskild hänsyn har därför tagits till detta vid valet av videokomponenter. Detta avsnitt beskriver de olika delarna av videosystemet och varför de valdes.

¹En PID-regulator är en regulatortyp som tar hänsyn till både nuvarande avvikelse från börvärdet samt derivatan och integralen av avvikelserna. Detta gör att statiska fel i regleringen elimineras samtidigt som förändringar kan förutsägas.

4.4.1 Radiolänk för videoöverföring

Videoöverföringen har särskild betydelse för videosystemet som helhet då det till stor del bestämmer övriga komponenter. I huvudsak finns två alternativ: analog eller digital överföring. Om analog överföring väljs så behöver videoströmmen omvandlas till digitalt format för att kunna behandlas av datorn för objekt-detektering och visning på Oculus rift.

En nackdel med analoga videosystem är att de använder PAL- eller NTSC-format vilket begränsar vilken upplösning som är möjlig att använda. PAL-formatet har en upplösning på 720×576 bildpunkter och en bildruteffrekvens på 50 Hz och NTSC-formatet har en upplösning på 720×480 bildpunkter och en bildruteffrekvens på 60 Hz [33]. Detta kan jämföras med upplösningen i Oculus rift som är 1920×1080 bildpunkter med en bildfrekvens på upp till 75 Hz.

Överföring med analog radio har dock låg fördröjning och kostar relativt lite. Det är möjligt att använda Bluetooth eller Wi-Fi för att överföra video med högre upplösning än vad som är möjligt med analoga system, men de flesta system för digital överföring av video som vi kunde hitta när detta projekt inleddes hade stor fördröjning och valdes därför bort. De digitala överföringssystem med låg fördröjning som kunde hittas vid projektets start var antingen för kostsamma för att rymmas i projektets budget, eller krävde att en dator användes på sändande sidan för att koda informationen [34].

Till videoöverföringen valdes därför analog radiokommunikation, på grund av dess låga fördröjning och pris. En sådan radiosändare monterades därmed på kvadrokoptern.

Eftersom en analog kamera används så behöver den analoga videosignalen konverteras till en digital signal innan den kan hanteras av en dator för visning på Oculus rift. För att åstadkomma detta används en enkel bildruteffångare av modell Terratec grabby, som konverterar den analoga videosignalen till ett digitalt format och sänder det till datorn via USB-ingången.

4.4.2 Kamera

Det finns två huvudtyper av kamerasystem: analoga och digitala. Analoga kameror har generellt lägre fördröjning än digitala på grund av avsaknaden av bildbehandlingskretsar. De är oftast även billigare. Eftersom låg fördröjning prioriterades i projektet, och överföringen sker analogt, valdes därför en analog kamera av modellen Fat shark 600TVL.

En begränsning i analoga videosystem är som beskrivs i avsnitt 4.4.1 att de är användar PAL- eller NTSC-format vilket begränsar upplösningen. Även om PAL-upplösningen är aningen högre än den hos NTSC användes NTSC i projektet på grund av den högre bildruteffrekvensen. Den högre frekvensen minskar responstiden för systemet genom att den ger snabbare uppdatering av bildrutor till centrering-funktionen som beskrivs i avsnitt 5.3.

För att bildrutorna från videoströmmen ska kunna visas direkt när de är färdigbehandlade av datorn utan att någon särskild synkronisering med Oculus rift behöver göras valdes även bildruteffrekvensen i Oculus rift-skärmen till samma som kameran, 60 Hz.

Kameran har en diagonal bildvinkel på 100 grader med bildförhållande 5:4 [35] medan Oculus rift har en diagonal bildvinkel på 100 grader med bildförhållandet 16:9 [21]. Detta innebär att Oculus rift har en horisontell bildvinkel på 87 grader och kameran 78 grader. För att kamerans bildfält helt skall täcka det som syns i Oculus rift används därför en lins som ökar kamerans diagonala bildvinkel till 120 grader vilket ger en horisontell bildvinkel på 94 grader.

4.4.3 Kardanupphängare för kamerastabilisering

En kvadrokopter förflyttar sig som beskrivs i avsnitt 2.1 genom att rotera i den riktning den skall röra sig. Vi vill dock att användarens synfält inte skall rotera utan fixeras i horisontellt läge. Därför är kameran monterad på en motoriserad kardanupphängare med tre rotationsfrihetsgrader. Flygdatorn beräknar automatiskt, baserat på nuvarande lutning, hur kardanupphängaren skall rotera kameran för att den skall behålla sin horisontella orientering.

4.4.4 Störningseliminering med dämpning

För att motverka problem där synkroniseringen mellan videoströmmen och bildskärmen tappas på grund av för stark signal från kamera till videosändare vid vissa ljusförhållanden behöver signalen dämpas. Detta görs med en potentiometer placerad före sändaren. Genom att justera potentiometern kan signalens spänning dämpas till nivåer där problemet inte längre uppstår. Denna lösning utgick från en diskussion med Lars Svensson, docent i datorteknik på Chalmers tekniska högskola.

4.5 Ultraljudssensor för avståndsmätning

Vid valet av ultraljudssensor för avståndsmätning togs hänsyn avståndet till reflektionsytan och materialet den består av. Ultraljudsavståndssensorn MB1000 från Maxbotix valdes eftersom den enligt databladet lämpar sig väl för att mäta avstånd till människor och för att det längsta mätbara avståndet på 6 m väl stämmer överens med avståndet kvadrokoptern skall befinna sig på i förhållande till användaren [36].

MB1000 ger det uppmätta avståndsvärdet på tre olika sätt: en analog signal där spänningen motsvarar avståndet, en signal där pulsbredden motsvarar avståndet samt en I2c-port som kan ge avståndet via busskommunikation. Upplösningen på sensorn är enligt tillverkare ca 1 tum (2,54 cm) med en maximal uppdateringsfrekvens på 20 Hz. Eftersom programvaran som används för att kommunicera med kvadrokoptern (se avsnitt 5.2.2) är anpassad för att läsa den analoga signalen valdes den metoden över de andra alternativen.

Eftersom analoga signaler är mer känsliga än digitala för elektromagnetiska störningar från exempelvis motorerna behöver detta tas i särskilt beaktande vid konstruktion av kvadrokoptern. För att minimera effekten av sådana störningar samt instabiliteter i kraftförsörjningen till sensorn valde gruppen att använda ett passivt lågpassfilter på strömporten av sensorn. Filtret hindrar främst störningar från att påverka sensorn via strömporten och påverkar inte signalkabeln som skickar avståndsinformationen till flygdatorn.

För att skydda signalkabeln från elektromagnetisk störning användes en skärmad kabel.

För att ultraljudssensorn alltid skall vara riktad mot användaren fästes den i kameran med en egendesignad fästplatta tillverkad med 3D-utskrivning. Fästplattan ser till att kameran och sensorn alltid befinner sig med samma avstånd från varandra samt alltid är parallella. Fästplattan har konstruerats för att ha minimal storlek och vikt för att minska påverkan på kardanupphängningen av kameran.

4.6 Magnetometer för kompassriktning

För att se till att kvadrokoptern är riktad åt samma håll som användaren används en kompass. Eftersom kameran på kvadrokoptern alltid pekar framåt medför även detta att kameran alltid är riktad mot användaren. För att underlätta digitalavläsning och portabilitet implementerades kompassen med en elektronisk magnetometer. Kompassmodulen som införskaffades var av modellen Digilent Pmodcmps som har ett magnetometerkretskort av modell Honeywell HMC5883L.

Kompassen placerades så långt från radiosändare, flygdator och motorer som möjligt för att minimera störningarna på kompassmätningarna. Detta resulterade i en placering i kvadrokopterns frontkant. De tester som utfördes på systemet visade att kompassen med denna placering inte stördes av vare sig motorer eller sändare.

Kompassen skickar magnetfältets styrka i tre ortogonala riktningar sekventiellt över I2c. Flygdatorn använder dessa värden tillsammans med den uppmätta orienteringen av kvadrokoptern för att beräkna kompassriktningen.

5 Programvarudesign

Följande kapitel beskriver de olika modulerna som utgör programvaran. Kapitlet inleds med en redogörelse för valet av programspråk. Därefter följer en beskrivning av hela programvarusystemets övergripande struktur och funktion. Slutligen beskrivs varje programmodul och de designval som format dem i mer detalj.

5.1 Val av programspråk

För att kommunicera med Oculus rift används den uppsättning programvaruutvecklingsverktyg som Oculus VR skapat, Oculus SDK (engelska: *software development kit*, kan översättas till utvecklingskit). Det finns inget alternativ till Oculus SDK för utveckling av program för Oculus rift. Utvecklingskittet är programmerat främst i programspråket C++. Den dokumentation som Oculus VR tillhandahåller utgår från att de program som använder Oculus rift också skrivs i C++ [21].

För att kunna använda andra programspråk tillsammans med Oculus rift finns två huvudalternativ: antingen behöver tolkningsbibliotek mellan C++ och det andra programspråket användas eller så kan den delen av programmet som behöver kommunicera med Oculus rift skrivas i C++, och övriga delar i andra programspråk. I det senare fallet behöver kommunikationskanaler mellan de olika programdelarna skapas programmatiskt vilket kan vara icke-trivialt om stora mängder data skall överföras.

Programmet Mission planner, se avsnitt 5.2.2, som används för att kommunicera med kvadrokoptern kan exekvera skript skrivna i programspråket Python. Det finns inget publikt gränssnitt för C++ för att kommunicera direkt med Mission planner. Däremot är Mission planners källkod öppen så därigenom finns möjlighet att lägga till de funktioner som önskas. Mission planner är skrivet i programspråket C#.

Eftersom utvecklingskittet för Oculus rift och dess dokumentation är anpassat för C++ framstod det som ett uppenbart alternativ för majoriteten av programvaruutvecklingen i projektet. Vi bedömde att det var lättare att implementera navigationsmodulen som ett Pythonskript än att modifiera Mission planners källkod för att kommunicera med C++. För att minimera mängden data som behöver överföras programmatiskt mellan olika programmoduler minimerades antalet exekverbara filer genom att enbart låta navigationsmodulen använda ett annat språk än C++.

5.2 Programstruktur

Programvaran har flera primära funktioner som var och en är direkt kopplad till en av uppgifterna från lösningsmetoden (se avsnitt 3.3). För att möjliggöra parallell utveckling är programvaran även den, som nämnts i avsnitt 1.6, uppdelad i moduler där varje modul hanterar en av dessa uppgifter. Förutom de moduler som är direkt kopplade till de primära funktionerna innehåller programvaran även hjälpmoduler för bland annat kommunikation mellan programdelar.

Majoriteten av modulerna är implementerade som klasser i C++ efter tydligt definierade gränssnitt. Varje modul har försetts med en uppsättning publika metoder som är direkt kopplade till den primära funktionen. De delar av programmet som

är skrivna i C++ finns implementerade i ett program som fått namnet Lakitu².

De moduler som svarar mot primära funktioner i programvaran står listade i Tab. 1.

Tab. 1: Modulerna som utgör programvaran i projektet

Modul	Beskrivning
Huvudmodul	Sammanlänkar övriga moduler samt renderar bild på Oculus rift
Kompassmodul	Extraherar mätvärden från Oculus rift och beräknar kompassriktningen
Objektdetekteringsmodul	Beräknar koordinater till ett objekt i videoströmmen
Navigationsmodul	Beräknar kvadrokopterns relativa position och skapar styrsignaler till motorerna

5.2.1 Programflöde

Detta avsnitt beskriver översiktligt programmets flöde. Fig. 8 visar en schematisk bild över programflödet.

När programmet startas initieras kompassmodulen, videoströmshanteringen och kommunikationen mellan programmen. De tre modulerna utför kontinuerligt sina respektive processer i egna trådar så länge programmet exekverar.

Huvudmodulen hämtar en bildruta från kameraströmmen och visar den på Oculus rift. En kopia av bildrutan skickas samtidigt till objektdetekteringsmodulen som beräknar koordinaterna till ett objekt i förhållande till bildrutan.

Navigationsmodulen beräknar baserat på den beräknade kompassriktningen, koordinaterna till objektet i bildrutan samt kvadrokopterns sensordata hur denne bör röra sig. Resultatet av beräkningen omvandlas till styrsignaler som sänds till kvadrokoptern.

Huvudmodulen skapar också två fönster på datorns skärm. Det ena består av en serie skjutreglage som används för att i realtid ställa in parametrarna för objektdetekteringsfunktionen. Det andra fönstret visar den senast hämtade bildrutan, antingen så som den kommer från kameran eller efter den filtrering som beskrivs i avsnitt 5.3.1. Genom att studera bilden kan man med skjutreglagen anpassa detekteringsfunktionen efter olika storlekar och kulörer på objekt samt olika omgivningsförhållanden för att uppnå bästa möjliga noggrannhet.

Då alla utom en av modulerna är implementerade i Lakitu sker kommunikationen mellan dem med publika metoder i de klasser som utgör varje modul. Navigationsmodulen är dock implementerad i Python och körs som ett skript i Mission planner (se avsnitt 5.2.2). Därför upprättas en socketförbindelse mellan Lakitu och navigationsmodulen. Data skickas enbart från Lakitu till navigationsmodulen, ej i andra

²Lakitu är namnet på en karaktär i tredjepersonsspelet Super Mario 64. Karaktären följer hela tiden efter och filmar huvudkaraktären så att den virtuella spelkameran som används i själva verket är Lakitu som filmar, mycket likt det system vi presenterar i denna rapport.

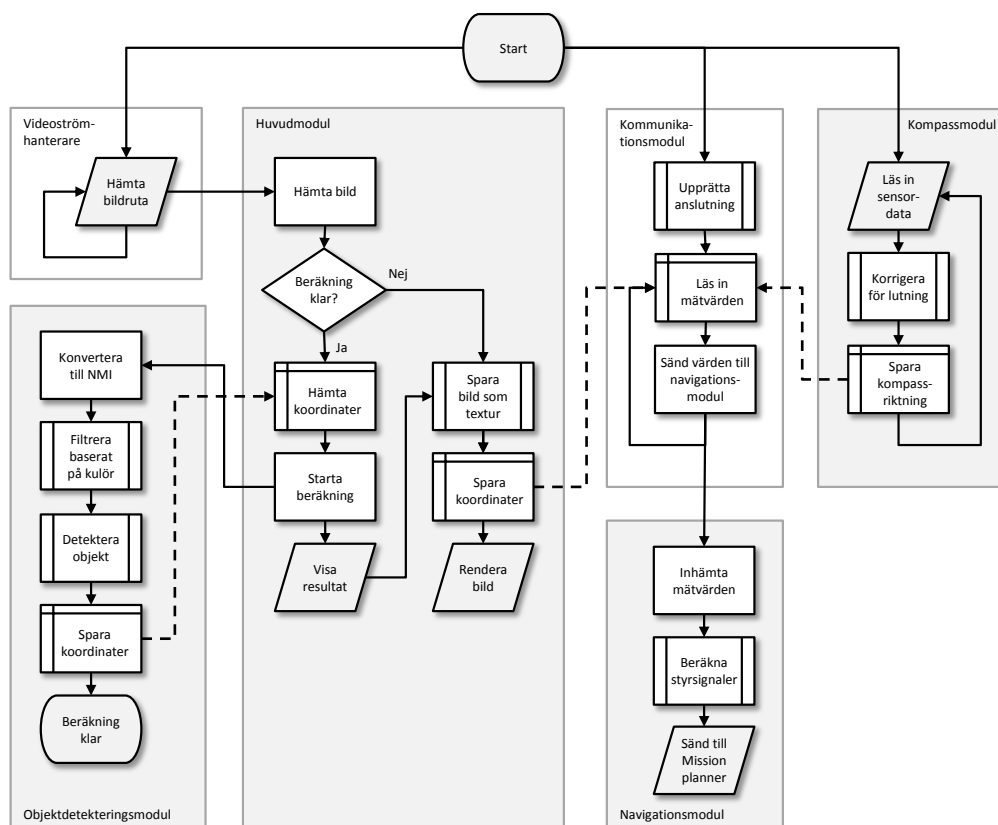


Fig. 8: Flödesschema för programvarusystemet. Schemat inkluderar samtliga programmoduler som skrivits under projektet, men ej de externa verktyg som används. Flödet från att programmet startas till att styrkommandon skapats i navigationsmodulen visas. De gråfärgade modulerna beskrivs ingående i kapitel 5.

riktningen. Detta grundar sig inte i något designval utan beror helt enkelt på att Lakitu inte behöver ha tillgång till sensordata från kvadrokoptern.

5.2.2 Mission planner: kommunikationslänken mellan kvadrokopter och dator

För att kommunicera med kvadrokoptern har vi valt att använda ett externt program som abstraherar de underliggande kommunikationsprotokollen vilket underlättar utveckling. Det finns flera alternativ till sådana kommunikationsprogram, men vi har valt att använda Mission planner [37] då det har alla funktioner vi söker samt är relativt väldokumenterat. Programmet läser sensordata samt sänder styrkommandon via radiolänken.

Styrkommandona skapas av navigationsmodulen som implementerats i form av ett Pythonskript som körs från Mission planners grafiska gränssnitt. Skriptet använder sig av metoder som exponeras av Mission planner för att extrahera sensordata och rotera kvadrokoptern längs dess rotationsfrihetsgrader.

5.2.3 Huvudmodulen och programbiblioteket Oculus rift examples

Grunden till huvudmodulen i Lakitu är tagen från programbiblioteket Oculus rift examples skapade av Brad Davis et al. [38]. Det är ett programbibliotek som skapats för att illustrera exempel från boken Oculus rift in action [39]. Biblioteket innehåller flera exempelprogram av varierande komplexitet, samt ett mindre bibliotek av programrutiner gemensamma för alla exemplen för exempelvis kommunikation med Oculus rift.

Biblioteket har tillgängliggjorts på Github och licensierats under Apache-licensen. Licensen tillåter användande och modifikation av programvaran för privata och kommersiella syften så länge all använd kod tillskrivs dess skapare [40] och är därmed tillräckligt medgivande för användande av biblioteket i projektet.

Specifikt utgår huvudmodulen i Lakitu från exempel 13.2, Simple webcam demo. Detta exempel valdes som utgångspunkt då det redan utför rendering av en virtuell 3D-skärm framför användaren via Oculus rift. Vi ansåg inte att rendering tillhörde det essentiella i projektet, och då 3D-rendering är ett stort och komplicerat område var en lämplig avgränsning att låta detta skötas av ett befintligt programbibliotek. Istället fokuserade vi kodningen på de projektspecifika problemen.

Den kod i huvudmodulen som är tagen från exemplet initierar Oculus rift, videoströmshanteringen samt renderingssystemet. Därefter projicerar bilden från videoströmmen på en virtuell skärm i luften framför användaren i huvudskärmen. Projektgruppen har sedan modifierat och byggt ut exempelkoden för att kunna använda de metoder och rutiner som är specifika för projektet, och som beskrivs i efterföljande avsnitt.

5.3 Objektdetektering med Opencv

För att detektera huruvida användaren befinner sig i centrum av bildfältet eller inte används, som beskrivs i avsnitt 3.3, objektigenkänning för att detektera ett objekt placerat på användarens rygg. För att kunna åstadkomma detta används metoder från biblioteket Opencv. Resultatet av funktionen är koordinaterna till det detekterade objektet i förhållande till bildrutan.

Opencv är ett omfattande programvarubibliotek med öppen källkod för bildbehandling. Namnet kommer från engelskans *Open source computer vision* som betyder ungefär "datorseende med öppen källkod". Förutom rutiner för bildbehandling och bildanalys innehåller biblioteket även stödfunktioner för bland annat maskininläring och inläsning från filer och enheter [41].

5.3.1 Konvertering av bild till NMI-kodning

Bildrutorna från videoströmmen är kodade i RGB-format (engelska: *red, green and blue*; röd, grön och blå). Objektdetekteringsens första steg är att konvertera bilden från RGB till NMI (nyans, mättnad och intensitet). Observera att nyans i sammanhanget NMI-kodning inte betyder "närliggande färg" utan "kulör". Det senare är begreppet som kommer användas fortsättningsvis i texten.

I en bild kodad i RGB bestäms färgen på varje bildpunkt av en kombination av färgerna röd, grön och blå. En gul bildpunkt har således ett RGB-värde som

främst består av komponenter för röd och grön. Om samma bildpunkt görs ljusare kommer den behålla samma förhållande mellan färgkanalernas värden men med högre absolutvärden. Inget värde behålls alltså konstant.

I färgformatet NMI kodas istället varje bildpunkt efter dess kulör, mättnad och intensitet. En bildpunkt som görs ljusare eller mörkare behåller samma kulörvärde, men får förändrat mättnadsvärde. Om man känner till vilken färg ett objekt har känner man alltså till dess kulörvärde i NMI-kodning.

Värdet kommer i praktiken inte vara helt konstant då olika ljusförhållanden bland annat kan påverka en kameras exponeringsinställningar och interna färgkorrigering, samt att ljuset i miljön kan ha olika färgskjutningar. Men jämfört med RGB där inga värden hålls konstanta blir det fortfarande betydligt enklare att filtrera ett objekt med en viss kulör med NMI-kodning.

5.3.2 Filtrering baserat på kulör

Det första steget i processen att detektera objektet i en bildruta är en filtrering baserat på detektionsobjektets kulör. Alla bildpunkter som faller mellan valda filterparametrar färgas vita, medan övriga bildpunkter färgas svarta.

Filterparametrarna väljs så att samtliga bildpunkter som motsvarar objektet i bildrutan blir vitfärgade. Parametrarna kan ställas in på förhand eller justeras i realtid via de skjutreglage som nämndes i avsnitt 5.2.1. Resultatet blir en binär bild där samtliga bildpunkter är antingen svarta eller vita.

Det har vid test visat sig att kameran som används i projektet har en tendens att överexponera bilden. När detta sker blir naturligt ljusa objekt färgade vita i bildrutan. Objektet som skall detekteras behöver vara så pass ljust att det syns tydligt mot en mörk bakgrund. Detta gör att även det blir färgat vitt vid förhållanden som leder till överexponering. Därför görs en extra filtrering på en kopia av originalbilden för att filtrera ut de bildpunkter som är nästan eller helt vitfärgade i bilden. Denna binära bild adderas till den filtrerade bilden från föregående steg.

Det är inte möjligt att skapa ett objekt med en kulör som inte existerar i någon miljö där systemet kan användas. Detta innebär att det inte går att välja parametrar som gör att enbart bollen filtreras ut. Resultatet blir att den binära bilden kan innehålla både det objekt som söks, men även många andra objekt av samma kulör. För att detektera rätt objekt behöver vi därför även utnyttja att vi känner formen på objektet vilket beskrivs i avsnitt 5.3.4.

5.3.3 Brusreducering med morfologiska metoder

Brus genererat i kameran eller videolänken kan ge upphov till att bildpunkter i områden som skulle varit mörka i den filtrerade bilden istället blir vita och tvärtom. Detta gör att en bild filtrerad enligt avsnitt 5.3.1 kommer att få svarta bildpunkter i områden som skall vara vita och tvärtom.

Detta kan i sin tur leda till att detektionsobjektet inte filtreras ut som ett sammanhängande fält utan som en serie mindre områden separerade av enskilda bildpunkter vilket illustreras i Fig. 9. För att åtgärda detta används två steg av så kallade morfologiska operationer.



Fig. 9: Filtrerad bild före morfologiska operationer. Notera att det vita fältet som representerar objektet som söks även innehåller enskilda svarta bildpunkter vilket inte gör detektion möjligt.

Först utförs en morfologisk öppning för att ta bort enskilda vita bildpunkter från de svarta områdena i en binär bild. Detta görs genom att först låta sammanhängande objekt krympa med ett antal bildpunkter. Storleken på öppningen bestäms av användaren genom skjutreglagen i huvudmodulen. De objekt som efter krympning får storlek noll försvinner från bilden. Därefter expanderas de kvarstående objekten med samma antal bildpunkter. De objekt som försvann i första steget kommer inte att kunna expanderas så resultatet blir att enskilda, små vita bildpunkter tas bort från bilden medan resterande objekt återfår ungefär sin originalstorlek [42].

Därefter utförs en morfologisk stängning, vilket består av samma två metoder i omvänd ordning [42]. Denna process resulterar i att enskilda svarta bildpunkter tas bort från de vita områdena enligt samma princip.

Målet med filtreringen är att den resulterande bilden skall innehålla ett sammanhängande fält av vita bildpunkter motsvarande bollens position.

5.3.4 Objektdetektering i filtrerad bild

En bild som filtrerats i enlighet med avsnitt 5.3.2 skall bestå av ett vitt sammanhängande fält som representerar objektet som skall detekteras. Eftersom överexponerade objekt ser vita ut för kameran kommer även dessa att finnas med i bilden. För att detektera rätt objekt utnyttjas därför en detekteringsmetod från Opencv för att hitta enbart den form vi söker.

Detekteringsmetoden söker igenom bilden efter alla objekt som motsvarar valda parametrar för storlek och cirkelformighet. Eftersom storleken på objektet i bilden är

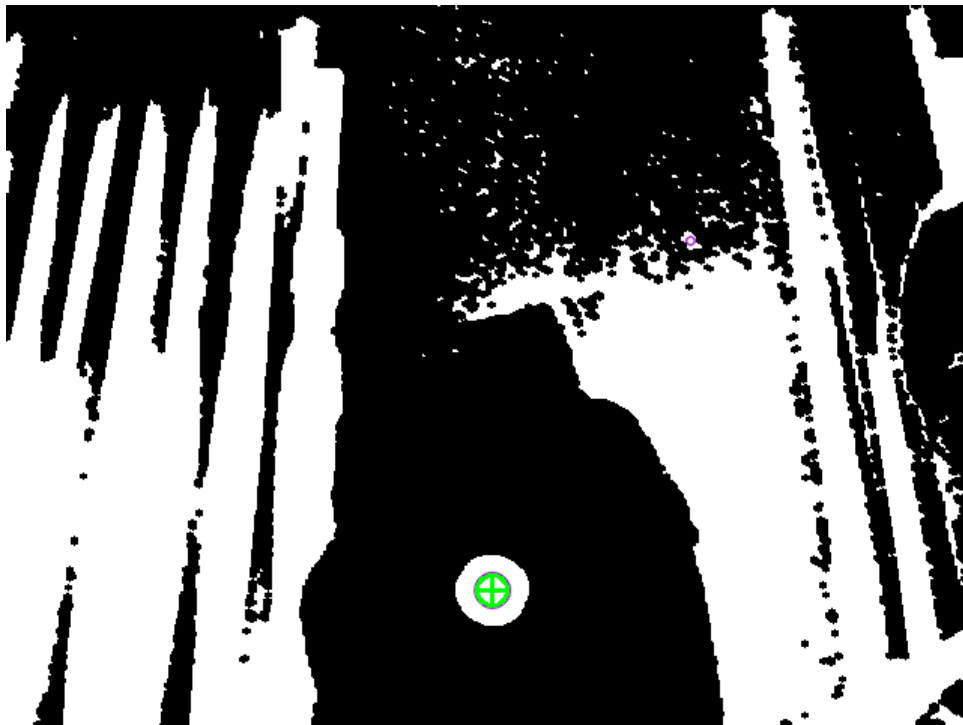


Fig. 10: Filtrerad bild efter morfologiska operationer. Notera att de svarta bildpunkterna i de vita fälten har försvunnit, liksom de vita bildpunkterna i bakgrunden. Då det sökta objektet har detekterats har detta markerats med ett grönt kryss av programmet.

känt då vi vet på vilket avstånd från användaren kvadrokoptern kommer befinna sig, kan vi bestämma ett intervall av storlekar det kommer uppta i bilden. Det behöver dock lämnas marginal för att kvadrokoptern tillfälligt kan befinna sig på fel avstånd från användaren.

Metoden kan ibland detektera fler objekt än det sökta. Programmet behöver därför göra en analys av resultatet och välja det mest troliga objektet bland de detekterade.

Eftersom kameran fångar bildrutor 60 gånger per sekund (se avsnitt 4.4 för en beskrivning av videosystemet) kommer användarens position förändras relativt lite mellan varje bildruta. Det mest sannolika är därför att det korrekta objektet befinner sig på kort avstånd från vad det gjorde föregående bildruta. Det objekt som detekterats närmast föregående koordinater antas därför vara det korrekta.

Om bara ett objekt detekteras sparas dess koordinater oavsett avståndet till de senast beräknade koordinaterna. Om objektet inte kan detekteras alls behålls de senast beräknade koordinaterna, men de markeras som ej giltiga.

5.3.5 Avståndsberäkning ur filtrerad bild

Storleken detektionsobjektet upptar i bilden är proportionellt mot avståndet till det, vilket kan användas för att beräkna avståndet till användaren. Eftersom storleken på det fysiska objektet och kamerans horisontella bildvinkel är kända är det möjligt att beräkna hur långt från kameran objektet finns. Detta beräknade avstånd är inte lika stabilt som det som beräknas med ultraljud, då det påverkas av brus och andra

störningar av bilden.

Under vissa förhållanden är filtreringsmetoden tillräckligt bra för att det ska vara möjligt att detektera objektet, men inte tillräckligt bra för att fullständigt filtrera ut samtliga bildpunkter objektet skall uppta i bilden. När detta inträffar kommer det filtrerade området uppta ett mindre antal bildpunkter än vad det egentligen borde göra på det avstånd det befinner sig. På liknande sätt kan brus eller andra störningar göra så att bildpunkter i anslutning till objektet ser vita ut för kameran och därför filtreras ut tillsammans med objektet. Resultatet blir att den filtrerade ytan i stället tar upp för många bildpunkter. Båda dessa problem kommer orsaka att ett felaktigt avstånd beräknats.

Båda dessa typer av avvikelser i storlek på det detekterade objektet tenderar att vara kortvariga. För att lösa problemet med att fel avstånd kortvarigt beräknas jämnas variationerna i det beräknade avståndet ut med ett lågpasfilter.

5.4 Kompassdataextrahering från Oculus rift

För att beräkna hur kvadrokoptern skall gira behöver vi veta hur användarens och kvadrokopterns rotation förhåller sig till varandra. Vi har valt att göra detta genom att jämföra riktningen från en kompass monterad på kvadrokoptern med riktningen beräknad från Oculus rifts magnetometrar.

Magnetometeruppsättningen i Oculus rift består av tre ortogonalt monterade magnetometrar vilket beskrivs i avsnitt 2.3. Varje magnetometer mäter magnetfältets styrka i någon av riktningarna. Vektorsumman av alla magnetometrars utslag ger riktningen och styrkan på magnetfältet. Magnetometervärdena är förkompenserade för den magnetfältspåverkan som elektroniken i Oculus rift orsakar [21].

Jordens magnetfält är orienterat i nord-sydlig riktning. Om man orienterar två av magnetometrarna så att de mäter fältstyrkan i horisontalplanet kan man med enkel trigonometri räkna ut vinkeln mot jordens magnetfält. Dock så är inte magnetometrarna i Oculus rift alltid orienterade i horisontalplanet eftersom användaren kan rotera huvudet fritt. När så sker behöver mätvärdena från magnetometrarna roteras tillbaka till horisontalplanet för att rätt kompassriktning skall kunna beräknas.

Genom att använda accelerometrar för att mäta magnetometernas lutning i förhållande till jordytan är det möjligt att beräkna magnetfältets verkliga riktning. Oculus rift mäter konstant denna rotationsvinkel via inbyggda accelerometrar [25, 43].

I Fig. 11 ses en förenklad bild av hur magnetometrarna ser ett magnetfält när Oculus rift roterats. Magnetfältet är orienterat i x-led, men både x- och y-axeln på magnetometern ser ett magnetfält av betydande styrka. En vanlig vektorsumma utifrån mätvärdena i figuren skulle ge en felaktig vinkel på magnetfältet. Eftersom vi känner till θ kan vi dock räkna ut det verkliga magnetfältets styrka och riktning med enkla trigonometriska formler [25].

För att motverka att brus på magnetometrarnas och accelerometrarnas mätvärden ger utslag på den beräknade riktningen appliceras ett lågpasfilter på denna. Filtret har justerats så att en kompromiss mellan stabilitet i mätvärdet och snabb respons på förändringar uppnås.

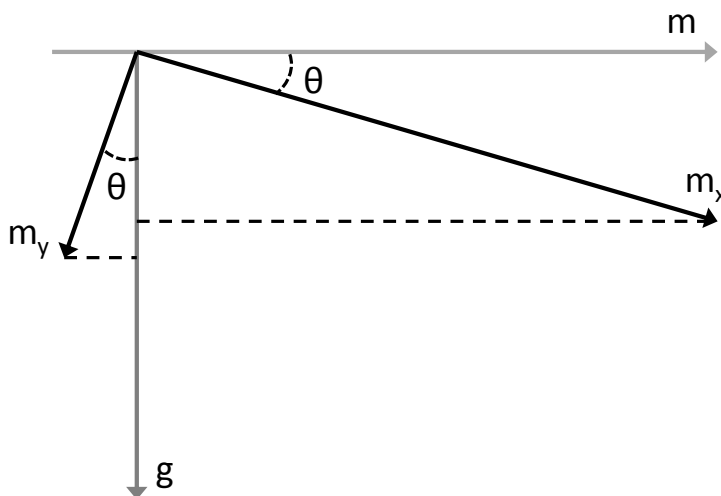


Fig. 11: Magnetometeraxlarna m_x och m_y när Oculus rift har roterats med vinkel θ i förhållande till gravitationsriktningen g . Magnetfältet m ses både av m_x och m_y

5.5 Navigationsmodul med P-regulator

Navigationsmodulens uppgift är att, baserat på indata från sensorer och de andra programvarumodulerna, skicka styrkommandon till kvadrokopterns flygdator för att kvadrokoptern ska befinna sig på tänkt position. Uppgiften innefattar att hålla avsedd höjd till marken och avstånd till användaren, samt att se till att kameran är centrerad på användaren. Navigationsmodulen sammanlänkar således alla de tidigare beskrivna mätsystemen, både i hård- och programvara, för att åstadkomma autonom navigation.

Kompassriktningen för användarens huvud samt koordinaterna som objektet på användarens rygg får i bilden sänds från Lakitu till navigationsmodulen. Dessa värden sänds med en frekvens på 100 Hz, även om vissa värden så som de från kompassmodulen har andra uppdateringsfrekvenser internt inom Lakitu. Utöver värdena från Lakitu läses kvadrokopterns kompassriktning, avstånd till användaren samt höjd över marken in från Mission planner (se avsnitt 5.2.2). Navigationsmodulens beräkningar är synkroniserade med Lakitus sändningsfrekvens.

För att beräkna styrsignaler baserat på data från Lakitu och kvadrokoptern implementerar navigationsmodulen en P-regulator, vilket innebär att styrkommandona är en linjär skalning av reglerfelet.

Styrkommandon för olika translationsriktningar skickas till flygdatorn oberoende av varandra. Exempelvis kan maximal hastighet framåt och åt sidan sändas samtidigt, även om de är beroende av gemensamma rotorerna. Flygdatorn räknar ihop samtida styrkommandon och skalar om dem så att styrsignalerna till motorerna hålls inom tillåtna värden.

6 Verifieringsmetod

Följande kapitel beskriver de verifieringstester som utförs för att testa systemets egenskaper i förhållande till de kriterier som har satts upp. Här presenteras testernas metoder och de beräkningar som genomförts.

6.1 Kvadrokopterns acceleration

För att få ett mått på hur snabbt kameraföljningssystemet svarar på en rörelse hos användaren gjordes ett test av kvadrokopterns acceleration. Detta syftade till att ge en fingervisning om vad kvadrokoptern förmår prestera.

Accelerationen mättes upp genom att låta kvadrokoptern hovra i höjdhållningsläget vid startpunkten av en kontrollsträcka med längden 6,6 m. Sedan fick kvadrokoptern flyga med maximal acceleration mot slutpunkten och tiden för förflyttningen registrerades. Viss osäkerhet fanns dock i hur nära startpositionen kvadrokoptern var då den startade sin acceleration. Den lilla avvikelser från startpunkten fick uppskattas.

Kontrollsträckan valdes till en relativt kort sträcka så att kvadrokoptern inte skulle hinna nå sin topphastighet utan istället ha konstant acceleration utmed hela sträckan. Om approximationen görs att accelerationen har formen av en stegfunktion (vilket inte stämmer i verkligheten då viss tid behövs för att rotera kvadrokoptern innan rörelsen kan startas) kan medelaccelerationen beräknas med formeln

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2} \Rightarrow \{v_0 = 0\} \Rightarrow a = \frac{2s}{t^2}, \quad (2)$$

där v_0 är starthastigheten vilken i testet var noll.

För att säkerställa korrektheten i testet repeterades proceduren flera gånger och ett medelvärde togs av resultaten.

6.2 Objektdetektering i bild

Precisionen av objektdetekteringsfunktionen mättes. Syftet med mätningen var att undersöka detekteringsfunktionens precision under olika ljusförhållanden samt med olika detektionsobjekt.

Som detektionsobjekt användes en gul sfär, en rosa sfär samt tre röda cirkulära plattor. Detektionsobjekten fästes på en svart ryggsäck för att skapa kontrast mellan objekten och bakgrunden i enlighet med avsnitt 3.3.

För att undersöka hur olika ljusförhållanden påverkar precisionen i funktionen filmades objekten i ett rum med stora fönster längs ena väggen vilket skapade stora kontraster i ljussättning beroende på kamerans riktning.

Vid filmningen hölls kameran på det optimala kameraavståndet så som det definierats i avsnitt 3.3, och rördes i en halvcirkelbana för att fånga objekten i både med- och motljus.

För att få en indikation på om videosystemets egenskaper påverkar precisionen i detektionen filmades objekten med två olika kameror. Dels användes det videosystem som beskrivits i avsnitt 4.4. Dessutom användes en högpresterande systemkamera. Systemkameran antas ha bättre egenskaper vad gäller automatisk exponering och

dynamiskt omfång. Systemkameran ställdes in så att den använde samma bildupplösning samt bildrutefrekvens som kvadrokopterns videosystem för att utesluta att dessa faktorer påverkade jämförelsen.

För var och en av de resulterande filmerna justerades sedan detekteringsfunktionens parametrar för att ge bästa möjliga detektion. Filmerna läts passera detektionsfunktionen bildruta för bildruta och antalet bildrutor där objektet detekterades noterades. Genom att ta kvoten av antalet bildrutor där detekteringsfunktionen hittade rätt objekt och totala antalet bildrutor i filmen skapades en procentsats som representerar funktionens precision.

6.3 Avståndsbestämning med ultraljud

Två aspekter av avståndsmätaren testades: hur noggrant mätvärdet är och hur stabilt det är.

Noggrannheten hos sensorn testades genom att placera kvadrokoptern 2 m över marken och 3 m från användaren. Noggrannheten utvärderades därefter genom att användaren flyttades till olika avstånd från originalläget och sensorns uppmätta avstånd samt det verkliga avståndet noterades. Stabiliteten kontrollerades samtidigt genom att observera om mätvärdet var stabilt när användaren var stillastående.

I enlighet med projektavgränsningarna utfördes testerna i ett öppet rum utan några objekt i närheten av kvadrokoptern och användaren för att inte registrera avstånd till fel objekt.

Eftersom sensorn använder ultraljudseko för att bestämma avståndet, kan olika material på mätobjektet påverka hur ljudpulsens reflekteras och därmed också påverka det uppmätta avståndet. Ljudvågor reflekteras i allmänhet bättre mot hårda jämna ytor medan mjuka ytor absorberar mer. Detta innebär att olika klädmaterial och även huvudbonad kan ge olika resultat.

För att testa hur olika material reflekterar ultraljud utfördes därför tre olika tester: en testomgång utfördes med mjukt klädmaterial i form av en bomullströja, en med ett hårdare klädmaterial i form av en skinnjacka och en sista omgång med en kvadratisk metallplatta med sidan 20 cm fäst på ryggen för maximal potential till stark reflektion.

6.4 Avståndsbestämning med objekt-detekteringsfunktion

För att testa noggrannheten och stabiliteten i avståndsbestämningen med objekt-detekteringsfunktionen placerades kvadrokoptern på fem fasta avstånd från detektionsobjektet. Parametrarna för objekt-detekteringen och avståndsbestämningen justerades för användande av kvadrokopterns kamerasystem och en röd cirkel som detektionsobjekt. Det beräknade avståndet och dess stabilitet noterades för varje avstånd.

6.5 Avvikelse i kompassriktning

Jordens magnetfält varierar påtagligt mellan olika platser på jordklotet, men lokala variationer förekommer också som beskrivits i avsnitt 2.4. Avvikelsen kan innebära

problem för projektets tillämpning av magnetometrar för att bestämma kamerans riktning. För att undersöka hur mycket magnetfältet kan variera testades den inbyggda magnetometern i Oculus rift på olika platser i Göteborg. Inomhus i större hall och utomhus på ett öppet fält.

Enheten placerades i centrum av testområdet med mät datorn så avlägset placerad som möjligt. Därefter roterades enheten 90 grader åt gången och värdet antecknades. Genom att utnyttja referenslinjer i omgivningen flyttades enheten 4 m åt gången med bibehållen geografisk kurs i fyra riktningar (A, B, C och D) med 90 graders skillnad och testet upprepades.

6.6 Fördröjning i videosystemet

Fördröjningen i den kompletta videokedjan från kvadrokopterns kamera till Oculus rift testades. Denna kedja inkluderar både det videosystem som beskrivs i avsnitt 4.4, datorn som kör programvaran samt Oculus rifts skärm. Som beskrivs i avsnitt 2.3.3 är det viktigt att uppnå en så låg fördröjning i svarshastigheten hos hela systemet som möjligt för att få en god användarupplevelse. Då är det även viktigt att fördröjningen i videoströmmen är låg.

I testet användes en digital klocka som kunde visa millisekunder i sin tidsmätning samt det videosystem som var under test med radiosändare, radiomottagare, en bildruteångare och en dator för att visa den skickade videoströmmen på Oculus rift. Klockans skärm filmades med kvadrokopterns kamera och bilden sändes via radiosändaren och radiomottagaren till bildruteångaren och visades upp på skärmen via programvaran som utvecklats för systemet. En oberoende filmkamera med en bildrutefrekvens på 120 Hz användes sedan för att filma klockan och skärmen i Oculus rift samtidigt. Hela testupställningen är schematiskt uppritad i Fig. 12.

Genom att analysera filminspelningen i efterhand går det att räkna ut fördröjningen. Då uppdateringsfrekvensen på Oculus rift-skärmen är vald till 60 Hz, och den klocka som filmades har okänd uppdateringsfrekvens, var det inte möjligt att avgöra fördröjningen genom att läsa av tidsskillnaden mellan klockan som visades i Oculus rift och den verkliga klockan. Då den oberoende filmkamerans bildrutefrekvens var känd till 120 Hz kunde fördröjningen istället beräknas genom att stega bildruta för bildruta från det ögonblick då en siffra dök upp på den verkliga klockan tills siffran dök upp på Oculus rift-skärmen. Den tid som förflyter mellan varje bildruta i filmen fås som

$$t_{ruta} = \frac{1}{f_{kamera}} = \frac{1}{120} \text{ s} \approx 8,33 \text{ ms}, \quad (3)$$

där f_{kamera} är den oberoende filmkamerans bildrutefrekvens. Totala fördröjningen i videoöverföringen ges då av

$$t_{fördröjning} = t_{ruta} \cdot N, \quad (4)$$

där N är antalet bildrutor från att en siffra presenteras på den verkliga klockan till att den visas på skärmen i Oculus rift.

För att utreda fördröjningsbidraget från olika komponenter i videosystemet gjordes även ett test där videoströmmen visades på en analog tv-skärm efter att ha

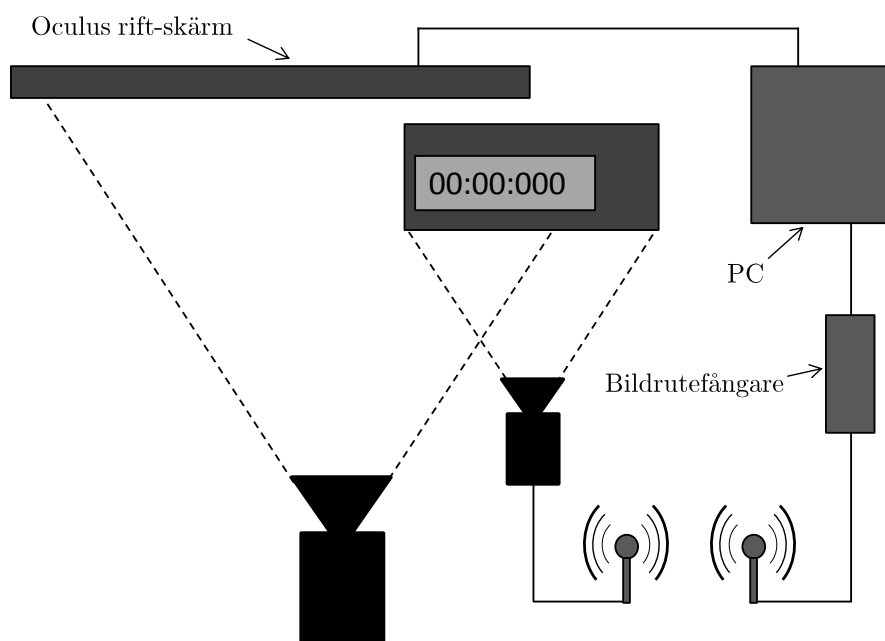


Fig. 12: En schematisk beskrivning av den försökupställning som användes för test av fördröjningen i videoöverföringen. I uppställningen användes en digital klocka som kunde visa millisekunder, en kamera och det videosystem som testades med radiosändare, radiomottagare, bildruteångare, dator och Oculus rift-skärm.

skickats trådlöst över radiolänken. Från föregående försökupställning ersattes då bildruteångaren, datorn och Oculus rift med en analog tv-skärm. I övrigt utfördes samma mätprocedur.

Vi mätte även fördröjningen i programvaran. Detta test utfördes genom att placera två brytpunkter i programvaran. Den ena brytpunkten placerades precis innan inläsning av en bildruta påbörjas. Den andra brytpunkten placerades precis efter att bildrutan lagts i videominnet för att visas vid nästa uppdatering av skärmen. Genom att använda utvecklingsmiljöns inbyggda verktyg kunde tiden mellan de två brytpunkterna mätas.

6.7 Funktionalitetstest av navigationsmodul

Navigationsmodulens korrekthet med avseende på olika insignaler från de olika mät-systemen testades. Höjreglering samt kameracentrering testades genom att placera en röd cirkulär platta framför kameran för att sedan förflytta kameran så att plattan hamnade i alla extrempunkter på bilden. Med extrempunkter syftas på mitten, toppen, botten och båda kanterna av bilden. Den beräknade styrsignalen för samtliga extrempunkter noterades.

Riktningsanpassningen testades genom att vrida Oculus rift ett helt varv samtidigt som kvadrokoptern hölls stilla. Värdet för styrsignalen som beräknades genom hela varvet noterades.

I båda testerna undersöktes huruvida styrsignalerna som sensorvärdena gav upphov till var proportionella mot reglerfelet, vilket ska vara fallet för en P-regulator.

7 Verifieringsresultat

I följande kapitel presenteras resultaten av verifieringstesterna. Alla moduler som ingår i kameraföljningssystemet är testade och resultatet av deras individuella prestationer ger en sammantagen bild av hela produkten. I de fall då större mängder mätdata samlats in presenteras kompletterande data för den intresserade i Appendix D.

7.1 Kvadrokopterns acceleration

Accelerationstestet repeterades fem gånger. Genom att använda ekvation (2) från avsnitt 6.1 räknades medelaccelerationen ut för varje individuellt test och ett medelvärde av accelerationerna togs därefter. Medelaccelerationen blev då $6,1 \text{ m/s}^2$ med en standardavvikelse på $1,7 \text{ m/s}^2$.

7.2 Objektdetektering i bild

De tre filmerna skapade med kvadrokopterns videosystem analyserades. Samtliga tre filmer innehöll störningar som tydligt orsakats i den analoga delen av videokedjan. Under de bildrutor då bilden var förvrängd av störningar kunde inte det sökta objektet ses. Dessa bildrutor räknades separat.

Under analysen justerades parametrarna för detekteringsfunktionen för att ge så bra detektion som möjligt i respektive film. Därefter stegades samtliga filmer igenom och antalet bildrutor där objektet detekterades korrekt noterades. Därefter räknades precisionen ut som kvoten mellan detta tal och det totala antalet bildrutor med förvrängda bildrutor borträknade.

Den rosa sfären detekterades korrekt i 73,4 % av bildrutorna. Den gula sfären detekterades korrekt i 72,2 % av bildrutorna. De röda cirkelarna detekterades korrekt i 94,8 % av bildrutorna.

I filmerna som skapats med den högpresterande systemkameran var det möjligt att välja parametrar som gjorde att samtliga objekt detekterades korrekt i samtliga bildrutor.

7.3 Avståndsbestämning med ultraljud

Avståndssensorn kunde detektera användaren stabilt på ett avstånd upp till 3 m när en bomullströja användes. Med en läderjacka ökades avståndet där användaren kunde detekteras stabilt till 3,5 m och med en metallplatta placerad mitt på ryggen kunde också detektion ske vid maximalt 3,5 m. I alla fallen när användaren kunde detekteras var sensorn stabil i mätvärdena. Mätkurvan påvisade inte någon märkbar störning eller slumpmässiga avvikelser.

Fig. 13 illustrerar vilka uppmätta avståndsvärden som gavs när användaren befann sig på olika avstånd till sensorn. De olika staplarna representerar vilken typ av material användaren har på sig under mätningen, där de gröna staplarna motsvarar bomullströja, de ljusblå motsvarar skinnjacka och de mörkblå är med metallplattan på ryggen.

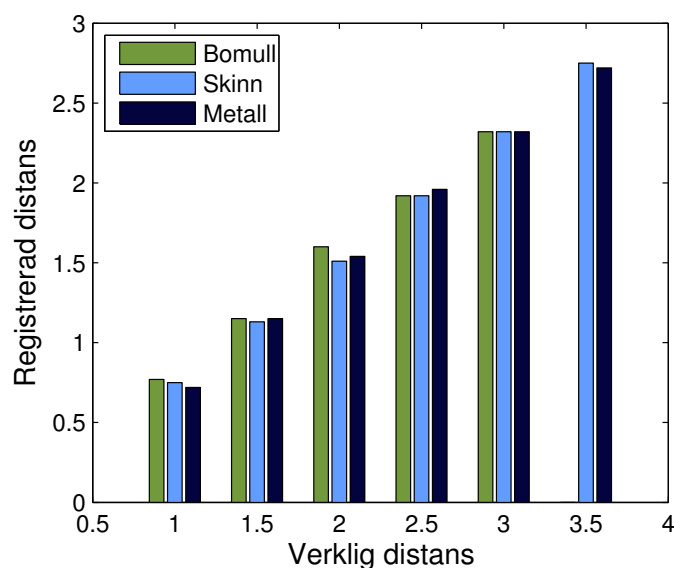


Fig. 13: Resultat från test av avståndsmätaren. Lodrät axel motsvarar av sensorn uppmätta värden och den vågräta är de riktiga avståndsvärdena. Olika färger på staplar motsvarar de olika materialen som användaren har på sig.

7.4 Avståndsbestämning med objektdekteteringsfunktion

De uppmätta avstånden och deras stabilitet noterades. De beräknade avstånden stämde inte överens med de verkliga avstånden, och differensen var inte en konstant faktor. Dock var differensen linjärt proportionell mot avståndet och gick därför att kompensera för helt.

Resultatet efter kompensation kan ses i Tab. 4.

Tab. 2: Mätvärden från avståndsbestämning med objektdekteteringsfunktion.

Verkligt avstånd	Uppmätt avstånd	Maximal avvikelse
2000 mm	2074 mm	± 34 mm
2500 mm	2622 mm	± 35 mm
3000 mm	2980 mm	± 71 mm
3500 mm	3574 mm	± 108 mm
4000 mm	3979 mm	± 146 mm

7.5 Avvikelse i kompassriktning

Tab. 3 visar hur stor avvikelsen i grader är från mätningens centrum för inomhusmätningen. När Oculus rift vreds 90 grader blev utslaget: 79 grader D till A, 80 grader A till B, 97 grader B till C och 104 grader C till D. Mätningningarna ligger 4 m respektive 8 m i referensriktningarna.

Tabellen för utomhusmätningen visas i Appendix D.

Tab. 3: Resultatet från inomhusmätningen av kompassen i Oculus rift. Tabellen visar avvikelser i antal grader från centrum av mätningen, O, i varje referensriktning. Mätpunkterna ligger 4 m i varje referensriktning från varandra.

Mätpunkt	A	B	C	D
O	0	0	0	0
A1	0	1	-2	-1
A2	4	2	5	6
B1	0	0	-3	0
B2	7	1	12	13
C1	2	5	3	1
C2	0	-5	1	4
D1	2	-2	-3	9
D2	2	0	1	6

7.6 Fördröjning i videosystemet

I det första testet av hela videosystemet analyserades filminspelningen och medelantalet bildrutor räknades. Vid 20 mätpunkter blev medelvärdet av antalet bildrutor 15. Genom att använda ekvation (4) från avsnitt 6.6 fick vi en fördröjning på $t_{\text{fördröjning}} = 125,0 \text{ ms}$ med en standardavvikelse på 10,1 ms.

I testet med presentation på analog tv-skärm räknades medelantalet bildrutor till 1,6 st vilket gav en fördröjning på $t_{\text{fördröjning,tv}} = 12,9 \text{ ms}$ med en standardavvikelse på 4,3 ms.

Mätningen av fördröjningen i programvaran gav efter 19 mätningar en genomsnittlig fördröjning på $t_{\text{fördröjning,L}} = 7,6 \text{ ms}$ med en standardavvikelse på 5,0 ms. En sammanställning av fördröjningskällorna finns i Fig. 14.

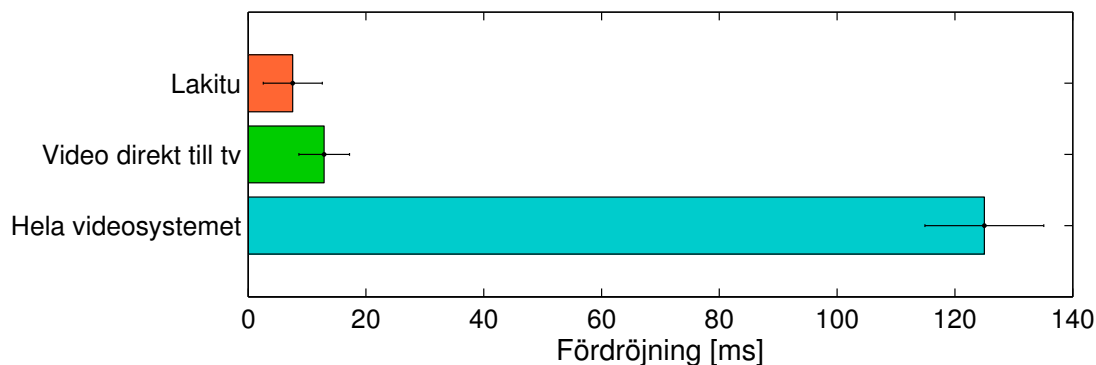


Fig. 14: Diagram över två kända fördröjningskällor i videosystemet ställda mot systemets totala fördröjning. Mätvärdenas standardavvikelser är också noterade i slutet på varje stapel.

7.7 Funktionalitetstest av navigationsmodul

Testning bekräftade att navigationsmodulen skickar styrsignaler proportionella mot reglerfelen som fås från bildbehandling, avståndsmätning och kompassdata. Styrkommandonas värden hålls dessutom inom flygdatorns tillåtna intervall.

8 Diskussion

I följande kapitel diskuteras resultaten av verifieringstesterna kopplade till projektet i sin helhet. Därefter ges förslag till potentiella förbättringar och utveckling av det befintliga systemet. Kapitlet avslutas med ett stycke om tänkbara tillämpningar för tredjepersonsvy och en analys av de etiska aspekterna av projektet.

8.1 Kvadrokopterns prestanda

I detta avsnitt diskuteras kvadrokopterns slutgiltiga prestanda och hur den relaterar till projektets mål.

8.1.1 Kvadrokopterns acceleration

Det rådde en stor onoggrannhet i det utförda accelerationstestet. Dels var det svårt att mäta tiden exakt då detta gjordes för hand med stoppur och dels var det mycket svårt att avgöra exakt hur lång den verkliga sträckan var som kvadrokoptern accelererade på under testet. Därför är värdet på accelerationen som erhöles, $6,1 \text{ m/s}^2$, inte helt tillförlitligt, men bör ändå vara någorlunda nära det sanna värdet.

Dessutom mättes enbart accelerationen i en riktning: framåt. I slutprodukten kommer kvadrokoptern behöva röra sig på en cirkel kring användaren och därför kan accelerationen i endast en riktning inte tala om hur snabbt hela kameraföljningssystemet är. Dock ger det en indikation på svarshastighet.

Under testet var höjdhållningsläget inställt på fabriksinställningar. Det går att justera parametrarna för läget för att förändra prestandan. Vidare finns andra lägen där hastighet har prioriterats och det är även möjligt att använda ett egetdesignat läge och justera regulatorparametrarna för önskad effekt.

Accelerationen $6,1 \text{ m/s}^2$ kan ställas i relation till den centripetalacceleration som krävs för att hålla kameran i ett tredjepersonsspel på en cirkelbana som är 120 m/s^2 (se avsnitt 2.2). Det kan dock ses som en orimlighet att försöka få något att rotera så fort i verkligheten då det skulle krävas stor precision i navigeringen och stora krafter från motorerna.

8.1.2 Kvadrokopterns stabilitet

Under projektets gång upptäcktes att kvadrokoptern har svårt att hålla den bestämda höjden i höjdhållningsläget. Det kan finnas olika förklaringar till detta. Eventuellt är reglertekniken inte tillräckligt precis, men mer troligt är att barometern inte har en tillräckligt hög precision.

Barometern mäter tryckskillnader för att bestämma höjden. Dessa värden fluktuerar över tid trots att kvadrokoptern står still. Flygdatorn låter mätvärdena från barometern passera ett lågpasfilter för att eliminera kortvariga förändringar. Men barometerens uppmätta värde sjunker stadigt under drift även med dessa kortvariga variationer bortfiltrerade. För att lösa detta problem skulle en ultraljudssensor riktad lodrätt nedåt kunna användas. Det extra mätvärdet skulle förutom bättre noggrannhet även ge ökad robusthet i höjdmätningen.

Ett vibrationstest, beskrivet i Appendix A, utfördes också för att se om starka vibrationer påverkar flygdatorn. Resultatet visar att vibrationerna med marginal är inom rekommenderade gränser och därmed inte borde störa höjdhållningsläget.

8.2 Bildbehandling och sensorer

I detta avsnitt diskuteras testerna av ultraljud- och kompassensorn samt objektdektetering med bildhandling. Avsnittet utvärderar av dem ur ett systemperspektiv.

8.2.1 Objektdetektering

Detektionsalgoritmens första steg går ut på att filtrera ut objekt baserat på dess kulör. Den analoga kamera som används i systemet tenderar dock att generera en överexponerad bild med låg mättnad. På grund av detta problem behöver särskild hänsyn tas för att välja ett objekt med en kulör som går att urskilja i bilden från kameran.

Objektdetektionen visade sig fungera utmärkt när ett detektionsobjekt väl anpassat till kamerans egenskaper valdes. Objekt kan detekteras pålitligt både i med- och motljus. Det är dock tydligt att kamerasystemet har stor inverkan på resultatet. Detta visar sig särskilt tydligt då detektion är möjligt nästan oavsett vilket detektionsobjekt som används när en mer högpresterande kamera används, medan enbart ett av objekten var pålitligt detekterbart med kvadrokopterns kamera.

8.2.2 Avståndsmätning

Avståndssensorn på kvadrokoptern fungerar funktionsdugligt när inga främmande objekt finns i närheten av dess upptagningsområde. Alltså fungerar den pålitligt i öppna miljöer, vilket stämmer överens med projektets ramar, men vilket skulle vara ett potentiellt hinder om systemet skulle vidareutvecklas för exempelvis kommersiella syften.

Mätningarna är också bara pålitliga om sensorn riktas mot användaren. Kameran skall alltid vara riktad mot användaren, och sensorn är fäst vid denna. Så länge kameran är centrerad på användaren uppstår alltså inget problem, men om kameran tappar användaren ur bild eller om något gör det omöjligt att optiskt spåra användaren så kommer avståndet inte längre vara tillgängligt för flygdatorn. Navigationsprogramvaran behöver kunna hantera detta scenario, exempelvis genom att låta den använda det senast registrerade avståndsvärdet tills dess att ett nytt värde mottas.

De uppmätta avstånden stämmer ej överens med de verkliga men har ändå ett linjärt beroende på avståndet. De korrekta värdena beräknas i navigationsmodulen genom att dra bort en konstant förskjutning och multiplicera resultatet med en skalningsfaktor.

Testerna visar på att sensorn får längre räckvidd och ger ett mer tillförlitligt resultat när ett hårdare material bärs av användaren. Detta beror på den större reflektionskonstanten hos de hårdare materialen vilken gör att mer av ultraljudspulsen reflekteras. Men även testet med bomullströjan, som gav svagast signaleko, visade att avståndet kan mätas stabilt upp till 3 m.

För att kunna använda kvadrokoptern på ett avstånd av 3 m skulle dock avståndsmätningen behöva ha längre räckvidd. Sensorn som valdes till projektet skulle enligt tillverkaren vara särskilt lämpad att mäta avstånd till människor, och ha ett maximalt avstånd på 6 m. I våra tester har vi inte lyckats uppnå sådan prestanda, men vi är ändå övertygade om att metoden i sig går att använda för detta användningsområde, men eventuellt med en annan sensor.

Systemet använder också en alternativ avståndsbestämning som använder objekt-detekteringsfunktionen för att beräkna avståndet till användaren. Denna metod används för att förlänga systemets totala räckvidd till 4 m. Metoden har en noggrannhet som är beroende av bildkvaliteten, men även med kvadrokopterns kamera är noggrannheten så pass bra att metoden går att använda som ett komplement till den mer noggranna ultraljudsmätningen.

Om projektet hade löpt under en längre tidsperiod hade det varit möjligt att ytterligare undersöka metoden där en ultraljudssändare och en eller flera mottagare används. Den metoden har fördelen att den alltid ger avståndet till användaren oavsett riktningen på sensorerna. Metoden rymdes ej i detta projekt då den kräver en avancerad mottagarkrets för att kompensera för variationer i signalstyrkan till följd av föränderliga avstånd och riktningar.

8.2.3 Kompassriktning

Som framgår av testet av avvikelser i magnetfältet varierar det något, då vridning 90 grader inte motsvarar 90 grader i utslagsskillnad. Dock verkar störningen vara relativt homogen över båda testområdena. Precisionen i testet kan diskuteras då det är svårt att rikta den huvudmonterade skärmen i den exakta geometriska riktningen då den saknar raka linjer. Felet kan uppskattas vara cirka ± 5 grader. Utomhustestet störs också av att de referenslinjer som användes hade ojämnheter på sina ställen.

En stor avvikelse återfanns i mätpunkt B2 i inomhustestet vilket är ett tecken på att en lokal avvikelse förekom. Detta hade troligen stört vårt system och förvridit kamerans riktning jämfört med användarens. Därmed är inte platsen ideal för användning av systemet. En generell fråga om hur mycket förvridning som krävs för att försämra upplevelsen uppstår. Troligen har inte en ± 5 grader-skillnad allt för stor betydelse.

Baserat på det här testet är därmed den magnetometerbaserade lösningen tillräckligt noggrann för att bestämma kompassriktningen ur projektillämpningens perspektiv. Fördelaktligen hade också testet utförts med magnetometern på kvadrokoptern. Till följd av att kontakten satt åt hårt skadades dock I2c-ingången på flygdatorn. Datastiftet får inte längre någon kontakt och magnetometern kan därmed inte användas.

8.3 Användarupplevelsen

I detta avsnitt diskuteras de faktorer som påverkar användarvänligheten i det färdiga systemet. De test som berör användarvänligheten samt den totala upplevelsen av systemet kommenteras också.

8.3.1 Fördröjning i videosystemet

För att få en så god användarupplevelse som möjligt bedömde vi det som mycket viktigt att fördröjningen i videoöverföringen är så låg som möjligt. Som beskrivits i avsnitt 2.3.3 är en fördröjning i svarshastigheten hos hela kameraföljningssystemet på under 20 ms önskvärd, och en fördröjning större än 60 ms kan ge användaren simulatorsjuka och illamående.

I projektet valdes ett analogt videosystem för att minimera fördröjningen. Den erhållna fördröjningen hos videosystemet inklusive den huvudmonterade skärmen var 125 ms, vilket är 40 % lägre än den tidigare studie av Lindgren et al. som beskrivs i avsnitt 1.2. Detta resultat visar att de val som gjorts under projektets gång har gett positiva resultat. Jämfört med de 20 ms som dokumentationen för Oculus rift rekommenderar för hela kameraföljningssystemet är resultatet dock en besvikelse.

Om videomottagaren kopplas in i en analog tv-skärm blir fördröjningen 12,9 ms. När fördröjningsbidraget från programvaran analyserades bestämdes fördröjningen från att programmet tar emot videoströmmen till att bilden visas korrekt på den huvudmonterade bildskärmen till 7,6 ms på utvecklingssystemet, som inte har anmärkningsvärt hög prestanda. Den analoga delen av videosystemet och programvaran bidrar alltså tillsammans bara med en liten del av den totala fördröjningen. Det är därför troligt att bildruteångaren upptar en stor del av den kvarvarande tiden.

Den bildruteångare som användes under projektet var inte specifikt inköpt för projektets ändamål, utan är designad för att digitalisera VHS-film där överföring i realtid inte är en viktig faktor. En dedikerad bildruteångare designad för realtidskonvertering hade eventuellt kunnat ge en lägre fördröjning. Systemet designades för att vara oberoende av vilken bildruteångare som används. Detta gör att en alternativ bildruteångare hade kunnat användas utan modifikation av systemet.

En undersökning om vilka alternativa bildruteångare som finns tillgängliga hade behövts göras. Givet att fördröjningen till en analog tv-skärm och fördröjningen i programvaran summerar till 20,5 ms blir det nog ändå svårt att optimera en framtida lösning så att total videofördröjning under 20,0 ms uppnås, oberoende av vilken bildruteångare som väljs.

8.3.2 Total fördröjning i systemet

Utöver videosystemets fördröjning, som diskuteras ingående i det föregående avsnittet, uppstår även fördröjningar i de olika mätsystemen och i navigationsmodulen. De faktorer som påverkar fördröjningen i de olika delarna av systemet är intressanta att analysera för deras påverkan på vår specifika implementation, men analysen kan även vara intressant ur ett mer generellt perspektiv då den ger en bild av hur metoderna som används skulle kunna fungera i andra system.

Den enskilt största okända faktorn som påverkar fördröjningen är kvadrokopterns respons på styrkommandon. Vi vet inte om det finns någon fördröjning från att ett styrkommando mottas av flygdatorn till dess att motorerna ändrar varvtal. Vi har inte heller en detaljerad bild av hur kvadrokopterns rörelser beror av styrsignalerna till motorerna, och därmed hur snabbt den kan flytta sig längs translationsaxlarna.

Vi har därför begränsat denna analys till att enbart studera fördröjningar fram till dess att ett styrkommando registreras i flygdatorn, samt fördröjningen från att kvadrokoptern flyttar sig till att användaren ser detta.

Fördröjningskällorna kan delas in i tre kategorier: tiden det tar för mätmetoden att upptäcka en rörelse, tiden det tar att omvandla rörelsen till ett styrkommando och sända det till flygdatorn på kvadrokoptern, och tiden det tar innan användaren kan se rörelsen i den huvudmonterade skärmen.

De tre olika mätmetoderna, objekt-detektering, kompass-extrahering och avståndsmätning, tar olika lång tid på sig att reagera på att användaren rör sig. Fördröjningen från det att användaren vrider huvudet till dess att rätt riktning sänds från Lakitu uppmättes till 12 ms (se Appendix C). Fördröjningen från att användaren rör sig i avståndsriktningen till att rätt avstånd registreras uppmättes till 40 ms (se Appendix B). Objekt-detekteringsens beräkningar tar exakt den tid en bildruta visas att slutföra. Med en bildfrekvens på 60 Hz blir fördröjningen alltså 16,7 ms.

En komplicerande faktor för objekt-detekteringen är att den är beroende av att användarens rörelse syns i bildrutan som behandlas. Men bildrutan måste då ha passerat videosystemet, och fördröjningen i funktionen är alltså beroende av videosystemets fördröjning. En lång fördröjning i videosystemet påverkar därmed systemet negativt både i att navigationsmodulen reagerar långsammare och i att bilden användaren ser blir fördröjd.

Efter att en rörelse registrerats behöver den omvandlas till en styrsignal i navigationsmodulen. Navigationsmodulen utför beräkningar med frekvensen 100 Hz. Om ett mätvärde förändras direkt efter att en beräkning påbörjats blir alltså behandlingen av mätvärdet fördröjd 10 ms. Det tar under 1 ms för ett styrkommando att tas emot och behandlas av flygdatorn på kvadrokoptern.

När kvadrokoptern förflyttar sig kan användaren se detta först när bilden på skärmen visar vyn från en ny position. Video fångad från den nya positionen behöver alltså passera genom hela videosystemet vilket som tidigare nämnts har en fördröjning på 125 ms. Detta innebär att videosystemets fördröjning ger ett värde på den minsta möjliga fördröjning som användaren kan uppleva för rörelser av kvadrokoptern.

Eftersom alla steg som studerats i detta avsnitt är direkt beroende av att föregående steg slutförs kan den totala fördröjningen, med kvadrokopterns rörelse exkluderad, beräknas genom att addera fördröjningarna från de olika stegen. Tab. 4 visar en sammanställning av den totala fördröjningen.

Tab. 4: Tabell över total fördröjning för rörelse i respektive led.

	Riktning	Avstånd	Centrering
Detektera rörelse:	12 ms	40 ms	142 ms
Sända styrsignal:	11 ms	11 ms	11 ms
Visa bild från ny vy:	125 ms	125 ms	125 ms
Total fördröjning:	148 ms	148 ms	276 ms

Som synes är videosystemets fördröjning den största kända källan till fördröjning i systemet. Särskilt långsamt är systemet på att svara på användarrörelser i sidled,

där videosystemets fördröjning får dubbel effekt. Låg fördröjning i videosystemet blir därför extra viktigt när bildbehandling används för att beräkna användarens position.

8.3.3 Bildkvalitet

Användarens helhetsupplevelse är mycket beroende av kvaliteten på bilden som presenteras. Det videosystem som valts har prioriterat låg fördröjning över bildkvalitet, och flera faktorer påverkar bildkvaliteten negativt.

En av faktorerna är upplösningen på videosystemet. Oculus rift har en upplösning på 1980×1080 medan kameran inställd på NTSC-format har en upplösning på 720×480 . Detta gör att det är svårt att urskilja text eller små objekt i bilden. I Fig. 15 som visar den vy som visas i Oculus rift kan man tydligt se att bildupplösningen är relativt låg vilket gör bilden grynig. Då de analoga videolänkar som finns tillgängliga använder NTSC- eller PAL-format går det inte att på något enkelt sätt välja en högre upplösning med ett analogt system.

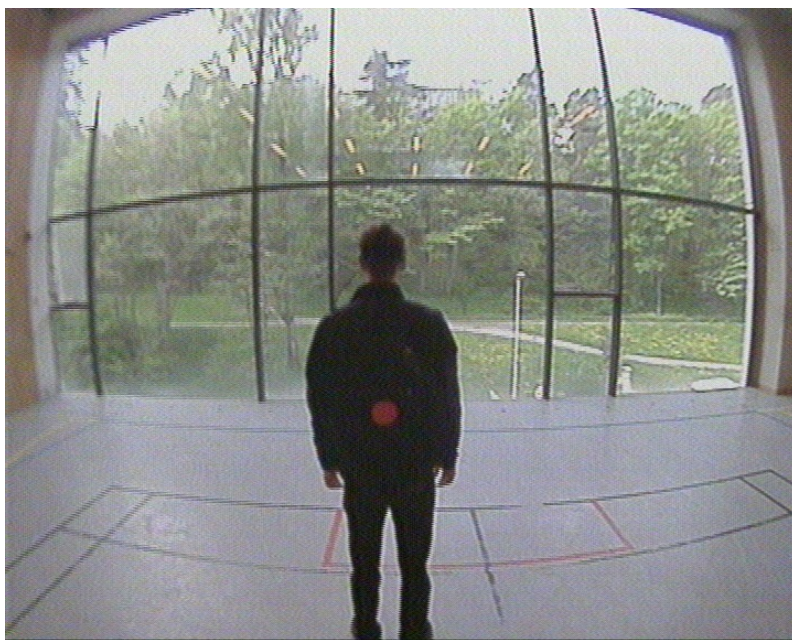


Fig. 15: Den vy som visas på användarens huvudskärm under användning av systemet.

Ett sätt att kompensera för en del av problematiken med den låga kameraupplösningen är att använda två analoga kameror. Det skulle dessutom göra det möjligt att skapa ett synfält i stereoskopisk 3D vilket kraftigt skulle öka den omvälvande känslan. Två analoga kameror inställda på PAL-format skulle tillsammans ge en upplösning på 1440×576 bildpunkter vilket är mycket närmre den maximala upplösning Oculus rift kan visa. Som nämnts tidigare behöver dock bildkvaliteten utöver upplösningen vara bra för att helhetsupplevelsen inte skall bli lidande.

Ett större problem är att kameran tenderar att överexponera bilden vid icke-optimala förhållanden, samt att bilden är färgfattig. Dessa faktorer gör att bilden upplevs som subjektivt mindre bra, och vi anser att det påverkar upplevelsen i större grad än upplösningen.

Att kvaliteten på bilden har större påverkan på upplevelsen än upplösningen kan visas genom att ansluta en högpresterande systemkamera till videolänken via kamerans analoga utgång. Bilden från systemkameran passerar då genom hela den analoga kedjan, och är därmed bunden av PAL- eller NTSC-formatets begränsningar. Trots dessa begränsningar upplevs bilden från systemkameran som mycket klarare och renare än bilden från kvadrokopterns kamera.

Det finns många tillverkare av analoga kameror för kvadrokoptrar och det är möjligt att andra kameror har bättre prestanda vad gäller färgmättnad och exponering. Oavsett vilken kamera som används kommer en analog videokedja alltid att begränsas av egenskaperna hos de analoga format som måste användas.

8.3.4 Navigationsmodulen

En nyckelkomponent i användarupplevelsen är den autonoma navigationen i navigationsmodulen som styr hur kvadrokoptern rör sig. Det är viktigt att förflyttningen sker smidigt för att generera en bra användarupplevelse.

Verifieringsresultatet av navigationsmodulen visar att den fungerar i teorin och skickar de styrsignaler som förväntas. Fördelaktigen hade hela kameraföljningssystemet också testats i praktiken om tidsutrymmet hade funnits. Detta innebär till exempel att påverkan från eventuella störningar så som vind inte har studerats. Med största sannolikhet måste regulatorns parametrar utvärderas för att hålla navigationen stabil och förhindra överslängar och oscillation. Det är även möjligt att en P-regulator är för simpel för att hantera navigationen, och att mer avancerade regulatorer behöver implementeras. För att undersöka detta måste alltså systemet testas i praktiken.

8.4 Rekommenderad fortsättning

Det befintliga systemet kan både förbättras samt utökas med funktioner utanför det ursprungliga projektmålet.

En framtida förbättring skulle kunna vara att göra systemet mindre känsligt för störningar. Det går exempelvis att göra objektdektionen mer noggrann genom att utnyttja att avståndet till användaren är känt. Med denna kunskap kan man minska intervallet över vilka storlekar på objekt som söks i bilden med ökad precision som följd. Man kan även använda en ultraljudssensor riktad nedåt för att mäta höjden som komplement till den barometerbaserad höjdmätning. På så sätt fås en ökad robusthet vilket minskar effekten av störningar.

Ett annat område där det finns potential för framtida förbättringar är kring användarupplevelsen. För närvarande används bara en kamera vilket inte drar nytta av Oculus rifts möjlighet att presentera olika bilder för varje öga. Genom att använda två kameror och visa en bild för varje öga kan man få en tredimensionell upplevelse vilket kan förbättra inlevelsen för användaren.

När det kommer till funktionalitet finns det potentiella fördelar med att låta användaren interagera med navigationen. Om användaren tillåts vissa begränsade styrsignaler finns en rad nya funktioner som skulle kunna implementeras. Under projektet har kvadrokoptern varit låst till att strikt följa användarens huvudrörelser på ett konstant avstånd. Förslagsvis skulle användaren tillåtas att förändra avståndet

till kvadrokoptern för att få en närmare vy av sig själv. Det hade också varit intressant att låta användaren styra kamerans riktning istället för att jämföra kompassvinklar. Det skulle ge en annan variant av hur tredjepersonsvy kan implementeras, där användaren till exempel skulle kunna filmas framifrån.

I sitt nuvarande stadie är systemet utformat för att enbart användas i öppna områden och saknar möjlighet att undvika exempelvis träd eller byggnader. Det ökar risken för kollision då det är svårt för användaren att själv veta vad som befinner sig runt kvadrokoptern. Genom att i framtiden ge kvadrokoptern möjlighet att undvika att kollidera med samt navigera runt objekt kan man åtgärda dessa problem. För detta ändamål finns många möjliga lösningar, exempelvis genom ultraljud riktade i flera riktningar eller avancerad bildbehandling.

När projektarbetet påbörjades så kunde inte några digitala överföringssystem med låg fördröjning hittas. Därför valdes ett analogt videosystem. Fördröjningen i videoöverföringen i det resulterande systemet var relativt låg, men konverteringen till digitalt format bidrog med stor fördröjning. En alternativ bildfångstenhet kan eventuellt användas för att minska denna fördröjning.

Parallellt med projektet som beskrivs i denna rapport bedrev ytterligare en projektgrupp ett projekt med samma projektbeskrivning. Ett av delresultaten i den andra projektgruppens arbete är ett helt digitalt överföringssystem med en fördröjning från kamera till bildskärm på 49 ms [44]. Lösningen som beskrivs har kapacitet för högre upplösning än vad som är möjligt med någon befintlig analog lösning. På grund av att mer avancerade kameror går att använda med systemet är också markant bättre bildkvalitet möjlig. Detta videosystem bör därför vara mycket intressant för framtida utveckling.

8.5 Tillämpningar

I det här projektet har ett positionssystem med tillhörande navigation utvecklats för tredjepersonsvy ur ett underhållnings- och upplevelseperspektiv, vilket kan ses som lättsamt. Konceptet bakom framtagningen av autonoma navigationssystem är dock inte enbart begränsat till kvadrokoptrar utan är även högaktuellt inom exempelvis bilindustrin och marina tillämpningar så som presenterats i introduktionen.

Det är också möjligt att tänka sig scenarion då den överblick tredjepersonsvyn ger kan vara användbar. Vid kravall- eller katastrofsituationer kan utryckningspersonal dra fördel av att kunna växla mellan sin egna blick och tredjepersonsvyn då det är enklare att få sig en uppfattning om omgiven därifrån. Det vore också användbart att kunna skicka iväg kvadrokoptern tillfälligt för att få sig en ännu större överblick av situationen.

8.6 Etiska aspekter

Det är lätt att glömma att ett arbete likt detta projekt även kan få oönskade effekter och i ett senare skede leda till en utveckling som inte var avsedd från början. En stor tillämpning är till exempel användandet av autonoma drönare för att attackera och skada människor i krigsliknande situationer. Ett arbete om autonom navigation av drönare kan alltså indirekt bidra till utveckling inom det området, även om detta

inte var huvudmålet med projektet.

En annan aspekt är att filminspelning med kvadrokopter kan kränka privatlivet hos privatpersoner genom att filma på allmän plats. I en tid då utsträckningen av övervakningen av den enskilde människan är mycket omdiskuterad blir det alltmer viktigt att skydda integriteten.

Även om vi under projektets gång reflekterat över de oönskade konsekvenser som arbetet skulle kunna medföra så är det inte något som vi kan ta ställning till. Vårt mål har varit att ta fram en bra produkt för privat bruk och kan endast hoppas på att det är detta som arbetet kommer att leda till.

9 Slutsatser

Flera potentiella lösningar till hur kvadrokoptern på nära håll ska kunna navigera i ett positionssystem kring användaren har identifierats och en lösning har valts ut. Baserat på verifieringsresultaten kan det föreslagna systemet användas för att uppnå projektmålet med de avgränsningar om öppen miljö och icke-portabel hårdvara som gjorts. Fler systemtester där de olika modulerna samverkar hade behövt göras. Med största sannolikhet behöver parametrarna i navigationsmodulen justeras för att undvika överslängar och andra oönskade effekter.

Kombinationen av ultraljud och bildbehandling för att bestämma avståndet och magnetometerlösningen för att bestämma riktningen ger tillräckligt med robusthet för vår applikation. Genom att använda ytterligare en ultraljudsmätare skulle potentiellt en mer pålitlig höjdhållning kunna uppnås, istället för den som fås av den inbyggda barometern.

Användarupplevelsen gynnas av att användaren slipper bära extra utrustning utöver den huvudmonterade skärmen, men begränsas av brister i videosystemet. Den omättade och överexponerade bilden var den största bidragande faktorn, men även bildfördröjningen sänkte upplevelsen. En snabbare bildrute fångare skulle drastiskt minska fördröjningen i videosystemet och förbättra användarupplevelsen. Likaså kan en annan kamera möjligtvis ge bättre bildkvalitet med övriga komponenter samma.

Referenser

- [1] M. J. Boyle, "The costs and consequences of drone warfare," *International Affairs*, vol. 89, nr. 1, ss. 1-29, jan. 2013; DOI: 10.1111/1468-2346.12002 [Hämtad: 30 maj 2015].
- [2] J. Horgan, "The drones come home," *National Geographic*, mar. 2013; <http://ngm.nationalgeographic.com/2013/03/unmanned-flight/horgan-text> [Hämtad: 30 maj 2015].
- [3] C. Harress, "12 companies that will conquer the drone market in 2014 and 2015," *International Business Times*, 10 jan. 2014; <http://www.ibtimes.com/12-companies-will-conquer-drone-market-2014-2015-1534360> [Hämtad: 30 maj 2015].
- [4] N. de Larrinaga, "Maiden flight for Europe's Neuron UCAV," *Jane's Defence Weekly*, vol. 50, nr. 1, dec. 2012; <http://search.proquest.com/docview/1221321705?accountid=10041> [Hämtad: 30 maj 2015].
- [5] S. Evans, "German railways to test anti-graffiti drones," *BBC News*, 27 maj 2013; <http://www.bbc.com/news/world-europe-22678580> [Hämtad: 30 maj 2015].
- [6] B. Barnes, "Drone exemptions for hollywood pave the way for widespread use," *New York Times*, 25 sep. 2014; http://www.nytimes.com/2014/09/26/business/media/drone-exemptions-for-hollywood-pave-the-way-for-widespread-use.html?_r=0 [Hämtad: 30 maj 2015].
- [7] S. Bouabdallah *et al.*, "Design and control of an indoor micro quadrotor," i *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on*, New Orleans, LA, USA, 26 apr.-1 maj, 2004, IEEE, ss. 4393-4398.
- [8] T. Statheros *et al.*, "Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques," *Journal of navigation*, vol. 61, nr. 1, ss. 129-142, 2008.
- [9] E. Chan *et al.*, "Cooperative control of SARTRE automated platoon vehicles," i *19th ITS World Congress - Smarter on the way*, Wien, Österrike, 22-26 okt., 2012.
- [10] J. Godoy *et al.*, "A driverless vehicle demonstration on motorways and in urban environments," *Transport*, jan. 2015. DOI: 10.3846/16484142.2014.1003406.
- [11] "Minecraft to join Microsoft," *Microsoft News Center*, 15 sep. 2014; <http://news.microsoft.com/2014/09/15/minecraft-to-join-microsoft/> [Hämtad 30 maj 2015].
- [12] "Ford Motor Company completes sale of Volvo to Geely," *The Ford Motor Company Mediacenter*, 2 aug. 2010; <https://media.ford.com/content/for>

- dmedia/fna/us/en/news/2010/08/02/ford-motor-company-completes-sale-of-volvo-to-geely.html [Hämtad 30 maj 2015].
- [13] "Facebook to acquire oculus," *Facebook Newsroom*, 25 mar. 2014; <http://newsroom.fb.com/news/2014/03/facebook-to-acquire-oculus/> [Hämtad: 30 maj 2015].
- [14] A. Lindgren *et al.*, "Third person immersion: vision-based autonomous target tracking for unmanned aerial vehicles," examensarbete för kandidatexamen, Chalmers tekniska högskola, Institution för data- och informationsteknik, 2014.
- [15] "Airdog - auto-follow drone for gopro camera," *Helico Aerospace Industries US LLC*; <https://www.airdog.com> [Hämtad: 30 maj 2015].
- [16] "Lily," *Lily Robotics, Inc*; <https://www.lily.camera/> [Hämtad: 30 maj 2015].
- [17] ZullyC3P, "Drone FOX-C8-HD altigator," 2014 [elektronisk bild]; http://commons.wikimedia.org/wiki/File:FOX-C8-HD_AltiGator_OnyxStar.jpg.
- [18] Cd project red, "Skärmbild från datorspelet The Witcher 3: Wild Hunt," 2015 [skärmbild].
- [19] Bagogames, 2014 [elektronisk bild]; <https://www.flickr.com/photos/bagogames/13300603614>.
- [20] "Development kit 2," *Oculus VR*, <https://www.oculus.com/dk2/> [Hämtad: 30 maj 2015].
- [21] *Oculus Developer Guide*, Oculus VR, 2015.
- [22] *Oculus VR Best Practices Guide*, Oculus VR, 2015, ss. 25-26.
- [23] N. A. Tsyganenko, "A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet," *Planetary and Space Science*, vol. 37, nr. 1, ss. 5-20, jan. 1989.
- [24] S. Maus *et al.*, "The US/UK world magnetic model for 2010-2015," British Geological Survey, 2010.
- [25] T. Ozyagcilar, "Implementing a tilt-compensated ecompass using accelerometer and magnetometer sensors," Freescale Semiconductor Inc., 2012.
- [26] "Global positioning system standard positioning service performance standard," *Pentagon*, 2 jun. 2008.
- [27] *LEA-6 series: u-blox 6 GPS, QZSS, GLONASS and Galileo modules*, u-blox, 2012; http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/LEA-6_ProductSummary_%28GPS.G6-HW-09002%29.pdf [Hämtad 30 maj 2015].
- [28] D. K. Cheng, *Field and wave electromagnetics*, uppl. 2, Harlow: Pearson Education Limited, 2014, ss. 640, ISBN: 1-292-02656-1.

- [29] G. Zhou *et al.*, "Impact of radio irregularity on wireless sensor networks," i *Proceedings of the 2Nd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, Boston, MA, USA, 6-9 jun., 2004, Red. New York: ACM, 2004, ss. 125-138.
- [30] Y. Shoshani och G. Rosenhouse, "Noise-insulating blankets made of textile," *Applied Acoustics*, vol. 35, nr. 2, ss. 129-138, 1992.
- [31] S. M. LaValle *et al.*, "Head tracking for the Oculus rift," i *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, Hong Kong, 31 maj-7 jun., 2014, IEEE, ss. 187-194.
- [32] T. Glad och L. Ljung, *Reglerteknik: grundläggande teori*, Lund: Studentlitteratur AB, 2006, ss. 56.
- [33] "Recommendation ITU-R BT.470-6: conventional television systems," ITU, 1998.
- [34] G. Bhat och J. McNair, "Delivering low latency video using TCP with network coding over wireless network," *International Journal of Computer Applications*, vol. 87, nr. 15, ss. 1-8, feb. 2014.
- [35] *600TVL FPV Tuned CMOS Camera: Specification Document REV B*, Fat Shark; <http://www.fatshark.com/uploads/pdf/1745-1.pdf> [Hämtad: 30 maj 2015].
- [36] *LV-MaxSonar-EZ Series: High Performance Sonar Range Finder*, MaxBotix Inc.; http://maxbotix.com/documents/LV-MaxSonar-EZ_Datasheet.pdf [Hämtad: 30 maj 2015].
- [37] M. Obourne, "Mission planner: ground station," 3D Robotics, 2015; <http://planner.ardupilot.com/> [Hämtad: 30 maj 2015].
- [38] B. A. Davis *et al.*, "Oculus rift examples," *GitHub repository*, GitHub, <https://github.com/OculusRiftInAction/OculusRiftInAction>, commit: daff9d29a90c2a520f6dc1115a2cd160a2cfab14.
- [39] B. A. Davis *et al.*, "Oculus rift in action," Manning Publications, 2015, ISBN: 9781617292194.
- [40] "Apache license version 2.0," The Apache Software Foundation, 2007; <http://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0.html> [Hämtad: 30 maj 2015].
- [41] OpenCV Developer Team, "Open source computer vision library," 2015; <http://opencv.org> [Hämtad 30 maj 2015].
- [42] R. M. Haralick *et al.*, "Image analysis using mathematical morphology," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. PAMI-9, nr. 4, ss. 532-550, jul. 1987. DOI: 10.1109/TPAMI.1987.4767941 [Hämtad: 30 maj 2015].

-
- [43] M. J. Caruso, "Applications of magnetic sensors for low cost compass systems," i *Position Location and Navigation Symposium, IEEE 2000*, San Diego, CA, USA, 13-16 mar., 2000, ss. 177-184.
 - [44] J. Allander *et al.*, "Tredjepersonsvy i verklig miljö: videoströmning från autonom luftfarkost," examensarbete för kandidatexamen, Chalmers tekniska högskola, Institution för data- och informationsteknik, 2015.

A Vibrationstest

Kvadrokopterns olika flyglägen är beroende av precisa accelerometervärden från flygdatorn. Därför är det viktigt att eliminera vibrationer som stör flygdatorn.

För att undersöka detta flögs kvadrokoptern på en konstant höjd under 30 s. Accelerometervärden loggades i flygdatorn och extraherades efter flygningen. Resultatet visas i Fig. 16.

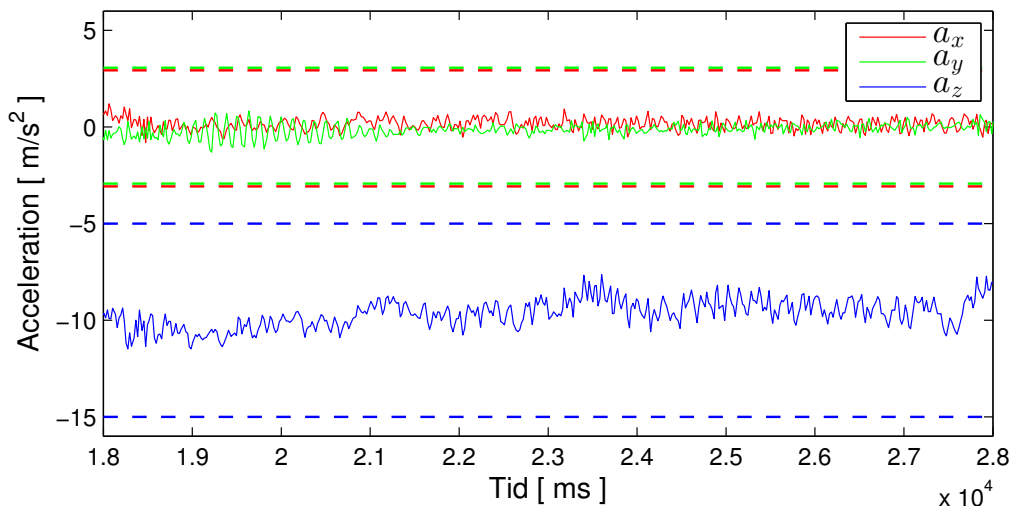


Fig. 16: Resultatet från vibrationstest i flygdatorn under flygning. Den röda linjen visar acceleration i $\hat{x}$ -riktning, den gröna i $\hat{y}$ -riktning och den blå i $\hat{z}$ -riktning. Utritad är även de gränsvärden som tillverkaren av flygdatorn specificerat i de olika riktningarna. Vibrationerna får ej överstiga $\pm 0,3g$ i $\hat{x}$ och $\hat{y}$ och $-g \pm 0,5g$ i $\hat{z}$, där g är tyngdaccelerationen.

Av resultatet framgår att vibrationerna är inom intervallet som rekommenderades av flygdatorns tillverkare. Accelerationen orsakad av vibrationer bör ej överstiga $\pm 0,3g$ i $\hat{x}$ och $\hat{y}$ och $-g \pm 0,5g$ i $\hat{z}$. Det framgår tydligt att så inte är fallet.

B Fördröjning i avståndsmätning med ultraljud

Metod för testet

För att mäta responstiden på ultraljudsmätningen hölls kvadrokoptern stilla med sensorn riktad mot en vägg. Därefter fördes kvadrokoptern snabbt bakåt så att avståndet mot väggen ändrades. Flygdatorn ställdes in så att den lagrade mätvärden för acceleration och uppmätt avstånd. Genom att utläsa skillnaden i tid från att accelerationen noterats till att det uppmätta avståndet förändrats gavs fördröjningen för ultraljudsmätningen.

Resultat av testet

Loggen från flygdatorn studerades och skillnaden mellan det första mätvärdet där kvadrokoptern registrerat en acceleration och det första mätvärdet där ultraljudssystemet registrerat ett nytt avstånd avlästes. Fördröjningen från att kvadrokoptern detekterat att den rört sig till att avståndsmätvärdet ändrats mättes vid testet till 40 ms.

Diskussion

Det är inte helt säkert att en acceleration detekteras direkt när den uppstår. Det är dock troligt att accelerationer registreras relativt snabbt av flygdatorn då snabb reglerteknik är en förutsättning för att en kvadrokopter skall kunna flygas stabilt.

C Kompassberäkningens fördröjning

Metod för testet

För att undersöka vilken effekt låpassfiltreringen av kompassmodulens mätvärden har på deras fördröjning testades kompassberäkningsfunktionen och dess låpassfilter. För att testa detta användes en speciell version av programmet Lakitu där de beräknade kompassvärdena tillsammans med de ofiltrerade skrevs till en fil.

Under testet fick Oculus rift först ligga helt stilla för att mäta hur stabil kompassriktningen är i stationärt tillstånd. Därefter roterades skärmen snabbt 90 grader för att se hur lång tid det tog för kompassriktningen att ställa in sig på rätt värde med olika brytfrekvenser i filtret.

Testet utfördes med tre olika brytfrekvenser: 1 Hz, 10 Hz och 30 Hz. Granskning av mätvärdenas variation under den stationära tiden gjordes för att se storleken på mätvariationerna. För den snabba rotationen studerades istället en graf över mätvärdena genom kurvan. Ur grafen kunde fördröjningen i de filtrerade värdena utläsas.

Resultat av testet

Effekten av de olika brytfrekvenserna för låpassfiltret för kompassvärdena från Oculus rift studerades.

Utan låpassfilter hade de beräknade filtervärdena en variation på ± 2 grader med Oculus rift liggande stilla. Med brytfrekvensen vald till 30 Hz fick variationerna samma omfång, men med mjukare toppar. Detta kan ses i Fig. 17.

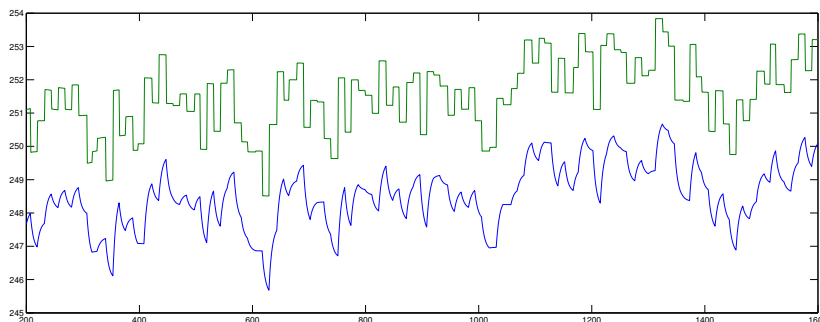


Fig. 17: Resultat av filter med brytfrekvensen 30 Hz. Blå kurva är filtrerad signal och grön är ofiltrerad.

Med brytfrekvensen vald till 10 Hz slätades topparna ut ytterligare. Omfånget för variationerna kvarstod dock. Se Fig. 18.

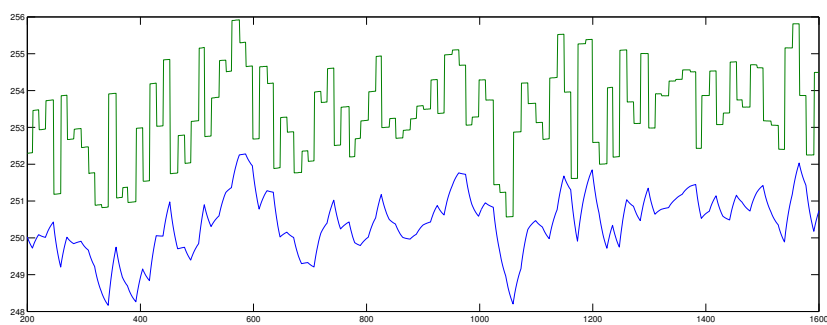


Fig. 18: Resultat av filter med brytfrekvensen 10 Hz. Blå kurva är filtrerad signal och grön är ofiltrerad.

Slutligen valdes brytfrekvensen 1 Hz. Resultatet kan ses i Fig. 19. Med denna brytfrekvens minskar storleken på variationerna till $\pm 0,5$ grader.

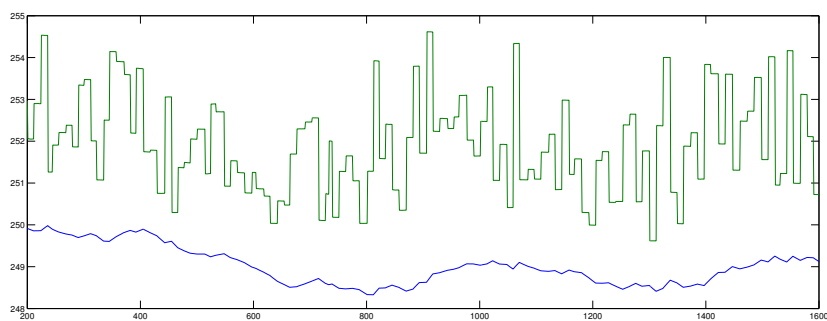


Fig. 19: Resultat av filter med brytfrekvensen 1 Hz. Blå kurva är filtrerad signal och grön är ofiltrerad.

Fördröjningen efter en vridning till dess att korrekt värde visades uppmättes till 12 ms med brytfrekvensen 30 Hz, 46 ms med brytfrekvensen 10 Hz och 647 ms med brytfrekvensen 1 Hz. Tiden från en rörelse till dess att värdet som visades var inom 3 grader från det korrekta var 2 ms, 27 ms respektive 366 ms.

Diskussion

Mätningarna visar på att magnituden på riktningsvariationerna inte går att minska utan att introducera avsevärd fördröjning på mätvärdet.

Det som inte syns i graferna presenterade i detta avsnitt är att mätvärdena under en vändning av Oculus rift får en mycket jämnare form även med lågpasfiltret inställt på 30 Hz. Detta har därför valts som standardinställning för lågpasfiltret.

D Testdata

Tab. 5: Resultatet av utomhusmätningen för kompassen i Oculus rift. Tabellen visar avvikelser i antal grader från centrum av mätningen, O, i varje referensriktning. Mätpunkterna ligger 4 m i varje referensriktning från varandra. Mätpunkter där mätning inte utfördes lämnas blanka.

Mätpunkt	A	B	C	D
O	0	0	0	0
A1	-3	-4	2	0
A2				
B1	-3	-5	3	1
B2	-1	-8	2	7
C1	2	-4	2	-1
C2	0	-6	3	-4
D1	-3	-6	1	3
D2		-7		6

På samma sätt som i inomhustestet skiljer det sig här 4 m mellan varje mätpunkt. När enheten vreds 99 grader blev utslaget: 100 grader D till A, 76 grader A till B, 85 grader B till C och 104 grader C till D. Då det fanns ont om referenslinjer i utomhustestet utgick A2 och D2.

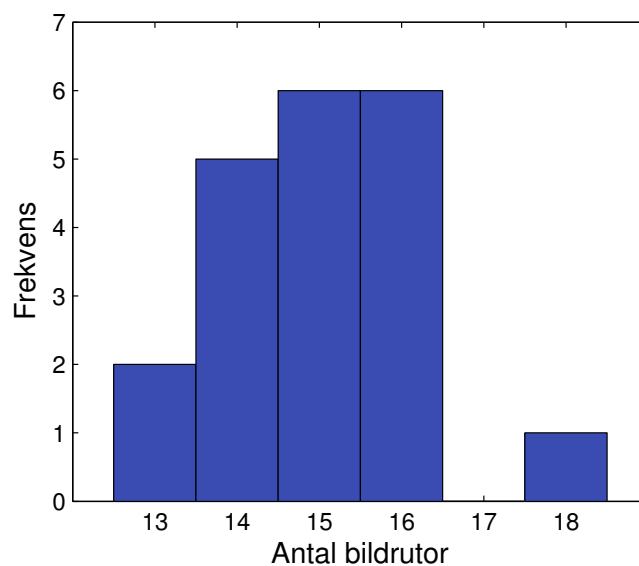


Fig. 20: Histogram över uppmätt antal bildrutor i videofördröjningstestet för hela videoöverföringssystemet.

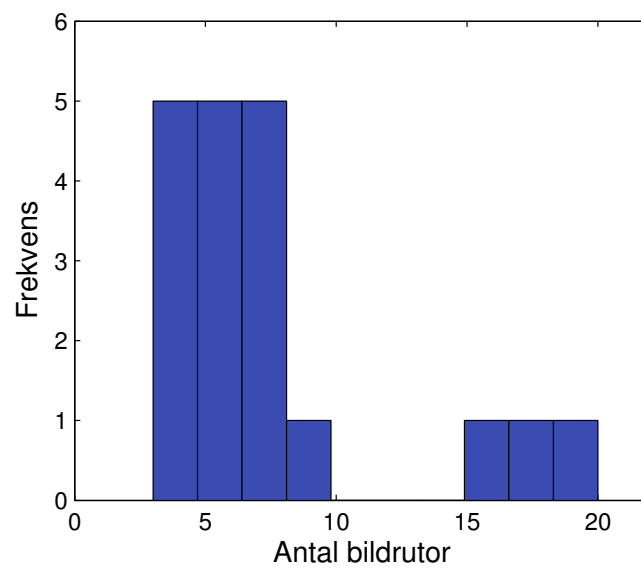


Fig. 21: Histogram över uppmätta värden på fördröjningen från läsning av bildruta till att bildrutan sparats i bildminnet.

Tab. 6: De mätvärden som togs i accelerationstestet. Kontrollsträckan var uppmätt till 6,6 m men eftersom det var svårt att hålla kvadrokoptern exakt i rätt position var en uppskattning nödvändig av avvikelsen från startläget och adderades till kontrollsträckans längd.

Sträcka [m]	Tid [s]
6,8	1,69
6,8	1,70
6,5	1,49
6,4	1,34
6,4	1,25

E Komponentlista

Tab. 7: Lista över de komponenter som utgör hårdvaran.

Batteri	Gravity 2200 mAh 3S 30-40 C LiPo
Bildruteångare	Terratec Grabby
Fartreglage	EMax SimonK Series 12 A BEC (x4)
Fjärrkontroll och mottagare	WFly WFT07 2.4 GHz 7-kanaler
Flygdator	3DRobotics ArduPilot Mega 2.6
Huvudmonterad skärm	Oculus Rift Development Kit 2
Kamera	Fat Shark 600TVL CMOS V1
Kardanupphängare	Fat Shark Pan Tilt Roll
Kompasssensor	Digilent PmodCMPS revision 2
Motorer	EMax Copter MT1806 2280 kv (x4)
Ram	ZMR 250 mm Mini Quad
Telemetriradio	3DRobotics Radio Set
Ultraljudssensor	MaxBotix MB1000
Videolänk	AH-5.8 GHz 200 mW

F Komponentschema

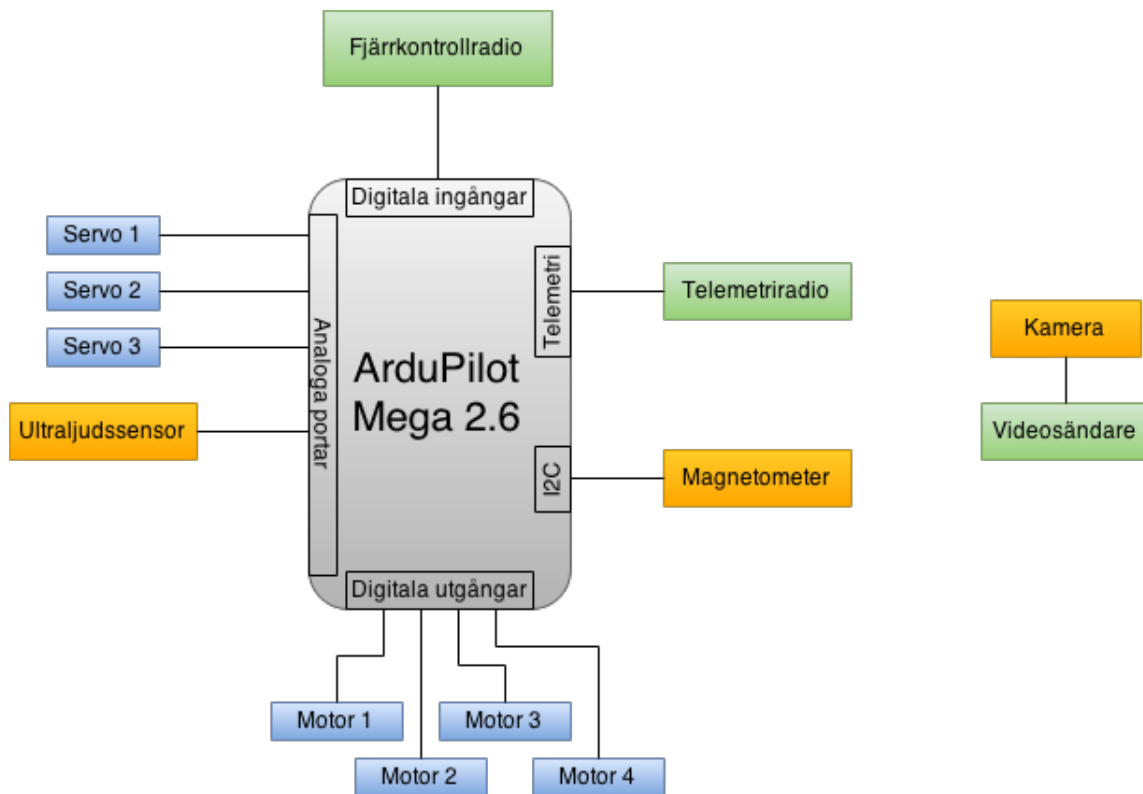


Fig. 22: En överblick av komponenterna som är monterade på kvadrokoptern. Svarta linjer representerar signalkablar och rektanglar är komponenter. Servo 1-3 tillhör kamerans kardanupphängare.

G Källkod för Lakitu

Detta avsnitt beskriver ytligt koden för programvaran.

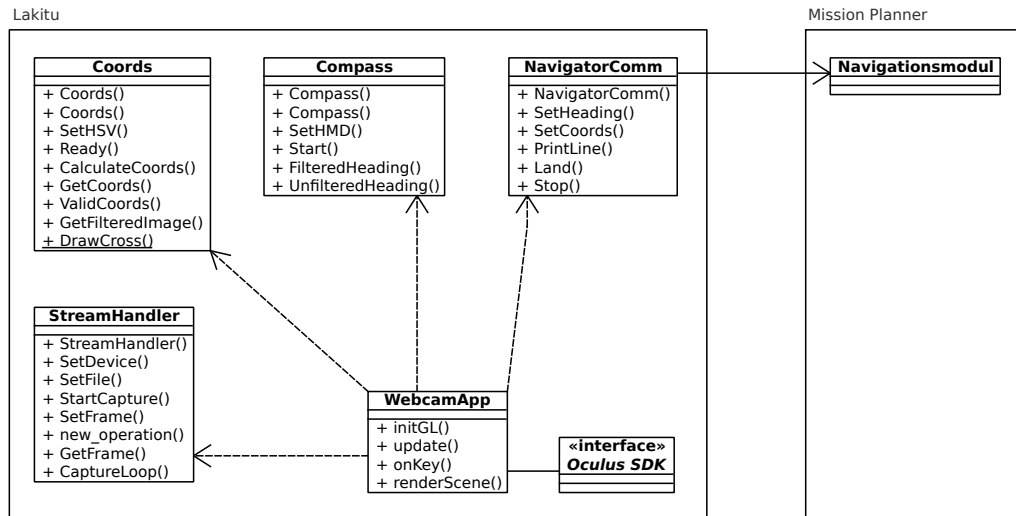


Fig. 23: Klassdiagram för Lakitu. Alla klasser med publika och privata metoder visas för samtliga delar av programvarusystemet som skrivits i C++.

Källkoden för Lakitu står att finna i denna länk: <https://github.com/adriang93/Kandidat/>.