



**CHALMERS**  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

---



# **Autonom informationsinhämtning med quadcopter**

Funktioner för autonom detektering och identifiering av  
markörer i avsökningsområde

Kandidatarbete

JACOB KARMEHAG  
SIMON KINDSTRÖM  
FREDRIK SCHYUM  
SIMON WIEDE

---

Institutionen för Signaler och System  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2016



KANDIDATARBETE 2016

# Autonom informationsinhämtning med quadcopter

Funktioner för autonom detektering och identifiering av markörer i  
avsökningsområde

JACOB KARMEHAG

SIMON KINDSTRÖM

FREDRIK SCHYUM

SIMON WIEDE



**CHALMERS**  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institutionen för signaler och system  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2016

Autonom informationsinhämtning med quadcopter  
Funktioner för autonom detektering och identifiering av markörer i avsökningsområde

JACOB KARMEHAG  
SIMON KINDSTRÖM  
FREDRIK SCHYUM  
SIMON WIEDE

© JACOB KARMEHAG, 2016.  
© SIMON KINDSTRÖM, 2016.  
© FREDRIK SCHYUM, 2016.  
© SIMON WIEDE, 2016.

Handledare: Patrik Bergagård, Signaler och system  
Examinator: Martin Fabian, Signaler och system

Kandidatarbete 2016  
Institutionen för signaler och system  
Chalmers tekniska högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Telephone +46 31 772 1000

Framsida: Parrot AR.Drone 2.0 publicerad med tillstånd av företaget Ingeniörsfirman M.Sjöberg AB.

## Sammandrag

Utvecklingen av drönare, även kallade obemannade luftfarkoster eller *UAVs*, har de senaste åren gått fort framåt. Den snabba utvecklingen har lett till att antalet användningsområden har ökat och forskning pågår för att dra nytta av teknikens möjligheter i flertalet samhällsområden.

Kandidatarbetet är en del av det större projektet *RObot-based Autonomous Refuse handling (ROAR)* initierat och lett av AB Volvo i samarbete med Renova. Syftet med *ROAR* är att möjliggöra autonom sophämtning. Detta möjliggörs genom att med hjälp av en drönare genomföra autonom avsökning av fördefinierade områden, detektera och positionsbestämma avfallsbehållare. En sopbil utrustad med en markgående robot tar sig till de platser quadcoptern detekterat sopbehållare. Den markgående roboten tömmer avfallsbehållaren, ställer tillbaka den och är sedan redo att ta sig till nästa detekterad avfallsbehållare.

Kandidatarbetets syfte var att utveckla funktioner för att med en drönare kunna genomföra avsökning av områden samt detektering och positionsbestämning av markörer i utomhusmiljö. Autonom navigering i en dynamisk utomhusmiljö kräver en robust metod för positionsbestämning, varför en metod för navigering med hjälp av GPS undersökt. Dessutom har implementering av så kallade förbjudna flygzoner gjorts för att kunna definiera mer detaljerade avsökningsområden, undvika statiska hinder och respektera de regelverk som finns gällande flygning av obemannade luftfarkoster. Den metod varmed drönarens rutt beräknas har anpassats för att respektera förbjudna flygzoner.

På grund av hårdvaruproblem, i synnerhet gällande GPS-enheten, har inte alla de uppsatta målen uppfyllts. Därför utvecklades, i slutskedet av projektet, en metod för att i efterhand bestämma markörers positionering genom analys av positionsdata och, av quadcoptern, inspelad film. Syftet med metoden var att undersöka möjligheterna för framtida vidareutveckling med mer tillämpbar hårdvara.

Nyckelord: drönare, quadcopter, robotik, automation, UAV, ROAR.

---

---

## Abstract

The development of drones, also called *UAV*, has in recent years quickly advanced. The rapid development has led to an increasing number of applications and further research is being done to take advantage of the potential of the technology in different areas of society.

The bachelor thesis is a part of the larger project, RObot-based Autonomous Refuse handling (*ROAR*) initiated and managed by AB Volvo in collaboration with Renova. The purpose of *ROAR* is to enable autonomous waste collection. This is being done by the use of a drone, enabling autonomous scanning of predefined areas to detect and determine the position of waste containers. Waste trucks equipped with grounded robots make it to the places of waste containers detected by the drone. The robot empties the waste container, brings it back, and is thereafter ready to move to the next waste container.

The purpose of the bachelor thesis was to develop functions for scanning areas in outdoor environments as well as detection and localisation of markers with a drone. Autonomous navigation in a dynamic outdoor environment requires a robust method for pose prediction, wherefore a method for navigation by GPS has been researched. Furthermore, the possibility to define restricted airspace areas has been implemented to define more detailed areas, avoid static obstacles and respect the laws regarding *UAV*:s. The method used for determine the path of the drone is adapted to respect the defined restricted airspace areas.

Due to hardware related problems, especially regarding the GPS unit, not all the goals of the thesis have been met. Therefore, at the end of the project, a method for determination of a position of a pose afterward the scanning of the area was completed has been implemented. The method requires logged data for position and a recorded movie of the flight. The purpose of the method is to be used with more appropriate hardware in further developments of the project.

Keywords: UAV, quadcopter, autonomous, AR.Drone, drone, ROAR.



## Förord

Först och främst vill vi rikta ett stort tack till vår projekthandledare Patrik Berggård som genom sina värdefulla synpunkter och ifrågasättanden drivit och utvecklat vårt arbete framåt.

Vi vill också tacka Markus Lindelöw, Henrik Olsson, Dominik Widmann och Lukas Wikander som utvecklat den mjukvara för markördetekteringen som använts i projektet.

Slutligen vill vi också tacka Carl Johan Carlsson och Hans Malmström, på avdelningen för fackspråk och kommunikation på Chalmers Tekniska Högskola, för värdefulla åsikter om rapportens utformning.

Jacob Karmehag

Simon Kindström

Fredrik Schyum

Simon Wiede

Göteborg, Maj 2016



# Innehåll

Figurer

Tabeller

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
1.1	Drönarens användningsområden . . . . .	1
1.2	Autonom informationsinhämtning med quadcopter . . . . .	1
1.3	Syfte . . . . .	2
1.4	Projekt mål . . . . .	3
1.5	Avgränsningar . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Teknisk Specifikation</b>	<b>4</b>
2.1	En quadcopters uppbyggnad . . . . .	4
2.2	Parrot AR.Drone 2.0 . . . . .	4
2.2.1	Processor . . . . .	5
2.2.2	Motorer . . . . .	5
2.2.3	Accelerometer . . . . .	5
2.2.4	Gyroskop . . . . .	5
2.2.5	Magnetometer . . . . .	5
2.2.6	Frontkamera . . . . .	6
2.2.7	Markkamera . . . . .	6
2.2.8	GPS . . . . .	6
2.2.9	Ultraljud . . . . .	6
2.2.10	Trycksensor . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Matematiska beräkningar och metoder</b>	<b>7</b>
3.1	GPS . . . . .	7
3.2	Minsta-kvadratmetoden . . . . .	8
3.3	Positionsbestämning av markörer . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Tidigare utvecklad mjukvara</b>	<b>10</b>
4.1	ROS . . . . .	10
4.2	roar_quad . . . . .	10
4.2.1	roar_quadcopter . . . . .	11
4.2.2	tum_ardrone . . . . .	11
4.3	PTAM . . . . .	12
4.4	ArUco . . . . .	13

4.5	Konvertering av GPS-koordinater . . . . .	13
4.6	Systemöversikt . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Utvecklad mjukvara</b>	<b>16</b>
5.1	Ruttplanering och förbjudna flygzoner . . . . .	16
5.1.1	Hantering av förbjudna flygzoner . . . . .	17
<b>6</b>	<b>Utformning av tester</b>	<b>21</b>
6.1	Sensorprecision och positionsestimering . . . . .	21
6.1.1	PTAM i utomhusmiljö . . . . .	21
6.1.2	Höjdbegränsning för detektering av markörer . . . . .	21
6.1.3	Precision av höjdbestämmning . . . . .	22
6.1.4	Precision för GPS . . . . .	22
6.1.4.1	Test i stillastående läge . . . . .	23
6.1.4.2	Test i rörelse . . . . .	23
6.1.4.3	Test mot DGPS-uppmätta koordinater . . . . .	23
6.2	Verifiering av mål . . . . .	24
6.2.1	Definiering av avsökningsområde och förbjudna flygzoner . . . . .	24
6.2.2	Ruttplaneringens hänsyn till förbjudna flygzoner . . . . .	24
6.2.3	Förflyttning av noder med hänsyn till förbjudna flygzoner . . . . .	25
<b>7</b>	<b>Testresultat</b>	<b>26</b>
7.1	PTAM i utomhusmiljö . . . . .	26
7.2	Höjdbegränsning för detektering av markörer . . . . .	26
7.3	Precision av höjdbestämmning . . . . .	27
7.4	Precision för GPS . . . . .	28
7.4.1	Test i stillastående läge . . . . .	28
7.4.2	Test i rörelse . . . . .	29
7.4.3	Skalets inverkan på positionsestimeringen . . . . .	31
7.4.4	Höjdens inverkan på positionsestimeringen . . . . .	32
7.4.5	GPS:ens drifttidsinverkan på positionsestimeringen . . . . .	33
7.4.6	Andra begränsningar för positionsbestämning med GPS . . . . .	34
7.5	Ruttplanering och förbjudna flygzoner . . . . .	35
<b>8</b>	<b>Utvidgning av projekt</b>	<b>36</b>
<b>9</b>	<b>Diskussion</b>	<b>37</b>
9.1	Navigationismetoder . . . . .	37
9.1.1	PTAM som navigationsmetod . . . . .	37
9.1.2	GPS som navigationsmetod . . . . .	38
9.1.3	Andra navigationsmetoder . . . . .	40
9.2	Ruttplanering och förbjudna flygzoner . . . . .	41
9.3	Avsökningshöjd . . . . .	41
9.4	Förbättringsförslag . . . . .	42
9.4.1	Navigationismetoder . . . . .	42
9.4.2	Ruttplanering och förbjudna flygzoner . . . . .	42
9.4.3	Hårdvara . . . . .	43

---

9.4.4 DJI Phantom 3 Advanced . . . . .	43
<b>10 Slutsats</b>	<b>44</b>
<b>Litteraturförteckning</b>	<b>45</b>
<b>A Flytt av nodplacering</b>	<b>I</b>



# Figurer

2.1	<b>Parrot AR.Drone 2.0.</b> Quadcoptern som användes i projektet. I figuren visas de fyra symmetriskt placerade motorerna samt det skyddande skalet. Publicerad med tillstånd av företaget Ingeniörsfirman M Sjöberg AB. . . . .	5
3.1	<b>Illustration av beräkning av horisontellt avstånd mellan quadcopter och markör.</b> Quadcoptern identifierar en markör. Sträckan $x$ motsvarar det horisontella avståndet mellan quadcoptern och centrum på markören och beräknas ur ekvation 3.2. . . . .	8
4.1	<b>Användargränssnittets fönster för kartan.</b> Fönstret för kartan i vilken quadcopters position samt <i>PTAM</i> :s referenspunkter visas. De röda prickarna i kartan visar referenspunkter medan den gröna linjen visar quadcopters förflyttning . . . . .	12
4.2	<b>Skärmdump av PTAM.</b> <i>PTAM</i> använder sig av referenspunkter för att representera en 3D-bild genom en 2D-bild. . . . .	13
4.3	<b>En typ av ArUco-markör.</b> . . . . .	13
4.4	<b>Flödesschema för systemet.</b> . . . . .	15
5.1	<b>Den ruttplanering som användes i tidigare genomfört masterprojekt.</b> . . . . .	16
5.2	<b>Noders placering utifrån de förbjudna flygzonernas position.</b> Noder har skapats i den yta som ska avsökas. Området som ska avsökas har grön kontur. Alla noder kontrolleras gentemot de förbjudna flygzonerna. De noder som ska flyttas har markerats i svart färg och de som ska tas bort har markerats i röd färg. I bilden längst till höger visas nodernas placering efter flytt och borttagning av noder. . . . .	18
5.3	<b>Förflyttning av noder beroende på placering av interfererande förbjudna flygzoner.</b> . . . . .	19
5.4	<b>Metod för nodplacering.</b> Metoden för nodplacering hanterar mer komplexa kombinationer av förbjudna flygzoner i en nod. . . . .	19
5.5	<b>Noders placering samt flygvägar mellan noder får anpassas för att respektera förbjudna flygzoner.</b> . . . . .	20
6.1	<b>Exempel på två ArUco-markörer.</b> . . . . .	22
6.2	<b>Förbjuden flygzon.</b> En förbjuden flygzon placerad centralt i avsökningsområdet. . . . .	25

7.1	<b>Diagram över höjdsensorns fel.</b> Felet för ultraljudssensorn ökar med höjden. Testerna utfördes på höjderna 1,07 meter, 2,415 meter, samt 4,04 meter. . . . .	27
7.2	<b>GPS:ens positionsuppskattning under stillastående test.</b> Quadcoptern står still på markhöjd utan skal. Koordinatsystemet utgår från ett känt origo. . . . .	29
7.3	<b>GPS:ens precisionsuppskattning under rörelse.</b> . . . . .	30
7.4	<b>Jämförelse av GPS:ens precision för rutt runt två olika rektanglar med sidlängderna 3 och 4 meter respektive 8,4 och 4 meter.</b> . . . . .	30
7.5	<b>Test av GPS i område med kända koordinater.</b> Quadcoptern förflyttats runt en rektangel. Origo, hörnpunkten och viapunkten representerar de koordinater som är uppmätta med <i>DGPS</i> . . . . .	31
7.6	<b>Jämförelse av GPS:ens precision då den placeras på marknivå respektive 2,55 meter över marken.</b> . . . . .	32
7.7	<b>GPS:ens positionsuppskattning vid stillastående test 2,55 meter över marken samt på marknivå.</b> . . . . .	33
7.8	<b>Resultat beroende på drifttid i stillstående läge samt i rörelse.</b>	34
7.9	<b>Offset och frysningar vid test av GPS under rörelse.</b> . . . . .	35
7.10	<b>Rutt i rektangel då GPS-enheten har stora avvikelser i sin positionering.</b> . . . . .	35
A.1	<b>Flygfria zoner interfererar med en mindre del av en nod.</b> . . .	II
A.2	<b>Flygfria zoner interfererar med en större del av en nod.</b> . . .	III

# Tabeller

7.1	<b>Vektorn <math>\tilde{x}</math> visar signifikans av fel för olika ordningsgrader vid höjdestimering.</b> . . . . .	27
7.2	<b>Beräknad avvikelse för ultraljudssensorn vid mätning av quadcopters höjd vid 1,50 respektive 2,00 meter.</b> . . . . .	27
7.3	<b>Höjduppskattningens inverkan på positionsbestämning av markörer.</b> Hur mycket felet för höjduppskattningen påverkar positionsbestämningen av markörer vid olika höjder och vinklar. Siffrorna är framtagna med ekvation 3.2. . . . .	28



# Förkortningslista

DGPS - Differential Global Positioning System  
FPS - Frames Per Second  
GPRS - General Packet Radio Service  
GSM - Global System for Mobile Communications  
HD - High Definition  
PTAM - Parallel Tracking and Mapping  
QR - Quick Response  
QVGA - Quarter Video Graphics Array  
ROAR - Robot based Autonomous Refuse handling  
ROS - Robot Operating System  
RPM - Revolutions Per Minute  
RTK - Real Time Kinematics  
SLAM - Simultaneous localization and mapping  
UAV - Unmanned Aerial Vehicles



# 1

## Inledning

Automation är ett fokusområde inom stora delar av industrin [1]. Nya och mer effektiva metoder skapas och implementeras för att minska kostnader, slitage och miljöpåverkan samt för att öka tidseffektivitet och driftsäkerhet. Samtidigt växer marknaden för så kallade smarta maskiner, vilket bidragit till att autonoma lösningar tillämpas inom flertalet områden [2]. I linje med denna utveckling har även antalet användningsområden för drönare kraftigt ökat under det senaste decenniet [3].

### 1.1 Drönarens användningsområden

Drönare är benämningen för obemannade luftburna fordon som styrs av en extern styrenhet eller genom trådlös direktstyrning med kontroll. Historiskt sett är drönare ofta förknippade med krigföring och militär verksamhet, men antalet användningsområden har under de senaste åren ökat markant [3][4][5][6]. En kameraförsedd drönare kan filma eller fotografera områden som kräver stora resurser, eller är rent av omöjliga, för människor att nå. Filmning av djur, på nära håll och på svårtillgängliga platser, samt folksamlingar vid evenemang är två vanliga användningsområden där drönarens flexibilitet kan komma till nytta [7][8].

Flygs drönaren inom synhåll, utan kommersiellt syfte och utanför förbjudna områden krävs dessutom inget flygtillstånd, något som annars alltid krävs för användning av exempelvis helikoptrar [9][10]. Drönarens storlek och goda möjlighet för framkomlighet används idag även för uppdrag som hade medfört stora risker för människor, så som att inspektera vindkraftverk ute till havs [11]. Det finns även potential för drönare att i framtiden snabbt kunna bistå personer i nöd med första hjälpen eller hjärtstartare i svårtillgängliga områden så som i vildmarken eller till havs [12].

### 1.2 Autonom informationsinhämtning med quadcopter

I kandidatprojektet användes en typ av drönare som kallas för quadcopter. En quadcopter, även kallad quadrocopter eller multicopter, består av en kropp med fyra nedåtriktade rotoror symmetriskt placerade. En stor fördel med denna typ av drönare är att den med rätt manövrering kan stiga vertikalt, förflytta sig i alla riktningar samt hovra. Att hovra innebär att quadcoptern står stilla i luften vilket görs

möjligt genom att olika rotorerna roterar åt olika håll. En förflyttning av quadcoptern genereras genom att ändra hastigheten varmed de olika rotorerna roterar. För att på olika sätt mäta omgivningen är quadcoptern utrustad med ett flertal sensorer för att avläsa höjd, rotation och acceleration [13].

Kandidatprojektet Autonom informationsinhämtning med quadcopter är en del av det större projektet RObot based Autonomous Refuse handling (*ROAR*). *ROAR* är ett projekt, initierat och lett av AB Volvo i samarbete med Renova, vars syfte är att hantera avfallshämtning automatiskt. Tanken med *ROAR* är att en drönare söker av ett fördefinierat område för att inom området detektera och positionsbestämma avfallsbehållare som ska tömmas. Avfallsbehållarnas positioner skickas sedan till sopbilen som manövreras av en förare. Från sopbilen skickas en autonom markgående robot för att hämta behållarna och transporterar dem till sopbilen för tömning. Efteråt ställs behållaren tillbaka av samma robot. Sopbilen och roboten kan därefter köra vidare till nästa registrerade position för att tömma en annan behållare.

I *ROAR* deltar förutom Chalmers Tekniska Högskola, även Mälardalens Högskola och Pennsylvania State University som Preferred Academic Partners till AB Volvo.

Chalmers Tekniska Högskola ansvarar för utvecklingen av den autonoma detektionen av avfallsbehållare, och kandidatarbetet behandlade drönarens funktioner; avsökning av område, detektering av sopbehållare och rapportering av behållarnas positioner. Ett masterarbete, Marker detection and autonomous flight using quadcopter mounted cameras, utfördes 2015 och resulterade i en fungerande markördetektering för rektangulära ytor inomhus [14]. I det projektet användes till stor del en färdig autopilot medan huvudfokus låg på bildavläsning och ruttplanering. Kandidatprojektet tog vid där [14] slutade och fokus låg på att förbättra systems prestanda vid utomhusnavigering. En stor del i kandidatprojektet var att använda en GPS-mottagare för positionsbestämning. Utöver detta utvecklades ruttplaneringen för en mer verklighetstrogen anpassning genom att också ta hänsyn till förbjudna flygzoner. Utformningen av avfallsbehållare kan variera, samtidigt som objektigenkänning är mer komplex än identifiering av markörer. Under utvecklingen har därför avfallsbehållare representerats av markörer.

### 1.3 Syfte

Projektet syftade till att utveckla autonoma funktioner tillämpade för att, inom ett fördefinierat område, detektera markörer och med en quadcopter bestämma deras positioner. Rapporten presenterar arbetsgång, metodval samt tester för att verifiera och analysera prestanda. Vidare diskuteras svårigheter med valda lösningar och även förslag på förbättringar av projektets utformning.

## 1.4 Projekt mål

Det huvudsakliga målet med projektet var att med en quadcopter avsöka ett fördefinierat område för att inom området identifiera och positionsbestämma markörer. För att valet av ytor ska verklighetsanpassas till *ROAR*-projektets syfte ska projektet även utveckla möjligheten till att definiera zoner i avsökningsområdet som quadcoptern inte får flyga i, så kallade förbjudna flygzoner. Bestämning av färdväg vid avsökning ska anpassas för att respektera de förbjudna flygzoner som definierats.

De mål projektet strävade mot att uppnå redovisas nedan.

- Utföra positionsestimering, med en felmarginal på maximalt 1 meter, av markörer utomhus.
- Implementera ruttplanering som respekterar de förbjudna flygzoner som definierats av användaren.

## 1.5 Avgränsningar

Den quadcopter som används är en Parrot AR.Drone 2.0. Enligt [14] har denna hårdvara inte de egenskaper som krävs för att vid varierande väderförhållanden prestera i linje med projektets mål. Syftet är inte att anpassa funktionerna till en statisk värld men då hårdvarans funktionalitet, i varierande miljöer, bedöms vara begränsad har ett fåtal avgränsningar ändå antagits:

- Vindhastighet om maximalt 3 m/s.
- Ingen nederbörd.
- Dagsljus.

Projektet avgränsas till att uppnå projektmålen vid angivna väderförhållanden. Vid tillfredsställande resultat kan hårdvaran uppgraderas för att kunna användas även i varierande väderförhållanden.

Avfallsbehållare varierar i utseende och utformning och representeras därför i projektet av markörer.

På grund av begränsningar i biblioteket för markördetektering krävs det att markörerna är i optimalt skick. Markörerna antas vara hela, torra, ej vikta, matta och vågrätt placerade.

# 2

## Teknisk Specifikation

I kapitlet förklaras en quadcopters utformning och prestanda. Avsnitt 2.1 behandlar en quadcopters uppbyggnad samt hur den fungerar. Mer ingående beskrivs, i avsnitt 2.2, hur den quadcoptern som användes i projektet, en Parrot AR.Drone 2.0, är uppbyggd och vilka egenskaper och prestanda den besitter.

### 2.1 En quadcopters uppbyggnad

En quadcopter består av fyra symmetriskt placerade motorer runt en kropp. Kroppen består av en styrdator och sensorer. Det finns fyra axlar vars inre ändar är festsatta på kroppen och de yttre ändarna är fästpunkter för quadcopters motorer. Dessa axlar är i relation med kroppens längdriktning symmetriskt placerade med  $\pm 45^\circ$  och bildar tillsammans ett kryss [13]. En quadcopter visas i Figur 2.1.

Quadcoptern förflyttar sig genom att ändra hastigheten på motorerna. För att förflytta sig rakt uppåt ökar quadcoptern hastigheten proportionerligt för alla fyra motorerna. För att förflytta sig åt ett håll minskas hastigheten på de motorer som är i färdriktningen samtidigt som de övriga motorernas hastigheter ökas. För att rotera ökas hastigheten på de motorer som roterar mot den önskade rotationsriktning och de andra minskas. Alla hastighetsförändringar på motorerna är marginella. Små förändringar ger relativt stora förflyttningar [13].

### 2.2 Parrot AR.Drone 2.0

Den typ av quadcopter som användes för alla tester, Parrot AR.Drone 2.0, visas i Figur 2.1. Quadcoptern är utrustad med de sensorer som krävs för användas som prototyp i projektet samtidigt som priset för quadcoptern är relativt låg jämfört med likvärdiga quadcopters. Den är tillgänglig på privatmarknaden och har en väldokumenterad *SDK* som medför att det blir lättare att skriva bibliotek anpassade till den. Av samma orsak finns det även många bibliotek tillgängliga. Quadcoptern är förprogrammerad att hovra om inga styrsignaler för förflyttning tas emot.



**Figur 2.1: Parrot AR.Drone 2.0.** Quadcoptern som användes i projektet. I figuren visas de fyra symmetriskt placerade motorerna samt det skyddande skalet. Publicerad med tillstånd av företaget Ingeniörsfirman M Sjöberg AB.

Quadcopterns sensorer presenteras nedan med beskrivning av funktioner samt användningsområde. Samtliga data är hämtade från Parrots produktspecifikation [15].

### 2.2.1 Processor

Den processor som AR.Drone 2.0 är utrustad med är en 1 GHz 32-bit ARM Cortex A8 processor med 800 MHz video DSP TMS320DMC64x.

### 2.2.2 Motorer

Motorerna är fyra stycken borstlösa vattenresistenta motorer på 14,5 watt vardera. Maxvarvtalet är 28 500 *RPM*.

### 2.2.3 Accelerometer

Med hjälp av sin treaxliga accelerometer kan quadcopterns acceleration bestämmas i tre riktningar vars riktningsvektorer är vinkelräta mot varandra. Noggrannheten för dessa sensorer är +/- 50 mg. I detta fall står g för tyngdaccelerationen som varierar beroende på geografisk position.

### 2.2.4 Gyroskop

Ett treaxligt gyroskop mäter förändringen i rotation kring axlarna. Det specifika gyroskop som används i denna drönare mäter förändringar upp till 2000° per sekund.

### 2.2.5 Magnetometer

En magnetometer mäter styrkan i magnetfältet. Med hjälp av denna sensor kan quadcoptern bestämma hur den är vinklad relativt jordens magnetfält. Noggrannheten för magnetometern är +/- 6°.

### 2.2.6 Frontkamera

Den framåtriktade kameran är en 720p kamera som har en upptagningsfrekvens på 30 *FPS*. Vidvinkeln på bilden uppgår, från specifikation, till 92° på diagonalen. Kameran kan streama film direkt till styrenheten via Wi-Fi eller till ett anslutet USB-minne.

### 2.2.7 Markkamera

Den nedåtriktade kameran har en upptagningsfrekvens på 60 *FPS* med 240p upplösning. Enligt [14] är upptagningsvinkeln för markkameran 35° vertikalt och 45° horisontellt.

### 2.2.8 GPS

Den GPS-mottagare som används är en Parrot Flight Recorder GPS och väger 31 gram. Typen är anpassad till en Parrot AR.Drone 2.0, den quadcoptern som används. Noggrannheten för positionsbestämning uppgår till +/- 2 meter och informationen sänds med frekvensen 5 Hz.

### 2.2.9 Ultraljud

Ultraljudssensorn används för att mäta avståndet till marken. Avståndet mäts genom att skicka ut en signal, i form av högfrekventa ljudvågor, och registrera den tid det tar för signalen att färdas till marken och tillbaka. Tidsskillnaden kan jämföras med ljudvågors hastighet genom luft och en sträcka erhålls. Med denna teknik uppnås en precision motsvarande +/- 0,25 m [14].

### 2.2.10 Trycksensor

För att bestämma på vilken höjd drönaren befinner sig används en trycksensor. Sensorns noggrannhet är +/- 10 Pa, vilket ungefär motsvarar sträckan +/- 0,85 m.

# 3

## Matematiska beräkningar och metoder

Metoder och beräkningar som funktioner och hårdvara i projektet baserar sina resultat på beskrivs i kapitlet. I avsnitt 3.1 beskrivs hur en GPS-mottagare använder signaler från satelliter för att kunna bestämma sin position. I avsnitt 3.2 beskrivs den teori som approximationen av mätfehlen för ultraljudssensorn baserats på. Resultatet av approximationen redovisas i avsnitt 7.3. I avsnitt 3.3 beskrivs den matematiska modell för hur en markör positionsbestäms i en bild.

### 3.1 GPS

Global Positioning System (GPS) är ett navigationsystem som använder sig av signaler från 24 satelliter som förflyttas i kända banor runt jorden på cirka 20 000 km höjd [16].

Vid positionering använder GPS-mottagare en metod kallad trilateration som innebär att mottagarens position bestäms via signaler från tre olika satelliter. Detta görs genom att bestämma skärningspunkten mellan tre sfäriska ytor som motsvarar avståndet från respektive satellit [16]. Genom att jämföra mottagarenhetens klocka, som korrigeras med tidsdata från en fjärde satellit, med sändningstiderna från de satelliter som används vid trilaterationen är det möjligt för mottagaren att bestämma sin exakta position. Den fjärde satelliten som korrigerar mottagarens interna klocka är nödvändig eftersom satelliter befinner sig på stora avstånd från mottagaren, vilket innebär att små felaktigheter i tid orsakar ett betydande fel av mottagarens position [16].

Signalerna som skickas från satelliterna kallas L1 och L2. Båda signaltyperna färdas med ljusets hastighet från satelliterna till mottagaren, där L1 är den signal som används av allmänheten medan L2 historiskt sett varit förekommande vid militära ändamål [17]. Under senare år har L2-signalen också tillämpats för andra ändamål så som *RTK* [18]. Skillnaden mellan signaltyperna är frekvensen där L1 har 1575,42 MHz och frekvensen för L2 är 1227,6 MHz. De olika frekvenserna utsätts för olika störningar i atmosfären. Genom att använda båda signaltyperna skapas redundans i systemet som således blir mindre känsligt för störningar [17]. På senare tid har även nya signaltyper, L2C och L5, utvecklats för att förbättra allmänt användande [19].

### 3.2 Minsta-kvadratmetoden

Minsta-kvadratmetoden kan användas för att approximera en funktion till en uppsättning mätdata. Användaren definierar själv av vilken grad svarsfunktionen ska vara. Syftet med metoden är att bestämma de konstanter som definierar funktionens utseende. Om användaren önskar få ett svar av första graden bestäms konstanterna  $a_0$  och  $a_1$  till ekvationen  $y = a_1 \cdot x + a_0$ . Om användaren önskar få ett svar av n:te graden, där  $n$  är ett positivt reellt heltal, bestäms konstanterna  $a_0 \dots a_n$  till ekvationen  $y = a_n \cdot x^n + a_{n-1} \cdot x^{n-1} + \dots + a_1 \cdot x^1 + a_0 \cdot x^0$ .

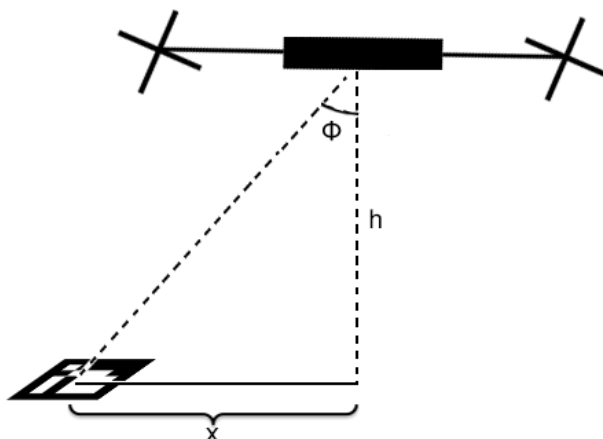
Metoden minimerar summan av avstånden från de uppmätta punkterna till den approximerade funktionen enligt ekvation (3.1) och den funktion vars totala skillnad blir minst anses vara den bästa approximationen.

$$\sum_{i=1}^n (a_n \cdot x_i^n + a_{n-1} \cdot x_i^{n-1} + \dots + a_1 \cdot x_i + a_0 - y_i)^2 \quad (3.1)$$

Minsta-kvadratmetodens ursprungliga användning är att projicera en vektor  $\bar{y}$  på kolonrummet för en matris  $Z(\text{Col}(Z))$ . Av att lösa ekvationen  $Z\tilde{x} = p$ , där  $p$  är projektionen, erhålls en lösning  $\tilde{x}$ .  $a_0$  väljs till första elementet i  $\tilde{x}$ ,  $a_1$  väljs till andra elementet i  $\tilde{x}$  och  $a_n$  väljs till sista elementet i  $\tilde{x}$  [20].

### 3.3 Positionsbestämning av markörer

Markörens position och läge i bilden bestäms genom att använda en funktion i ArUco-biblioteket, se avsnitt 4.4. Funktionen identifierar vilka pixlar i kamerabilden som upptas av markören, där positionen för markören beräknas med trigonometri, se Figur 3.1 och ekvation 3.2.



**Figur 3.1:** Illustration av beräkning av horisontellt avstånd mellan quadcopter och markör. Quadcoptern identifierar en markör. Sträckan  $x$  motsvarar det horisontella avståndet mellan quadcoptern och centrum på markören och beräknas ur ekvation 3.2.

$$x = \tan(\phi) \cdot h \quad (3.2)$$

Även quadcopters position i sökområdet måste beaktas. Quadcopters läge kan beskrivas enligt en så kallad kvartenion  $\mathbf{K}$ . Med quadcopters position i sökarean och markörens position i kamerabilden, kan markörens position i sökarean beräknas enligt nedan.

$$\mathbf{K} = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3]^T.$$

Med användandet av Van Elfrinkhofs formel ger  $\mathbf{K}$  en rotationsmatris  $\mathbf{R}$  [21].

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) & x \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & y \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Genom multiplikation av rotationsmatrisen  $\mathbf{R}$  och markörens position i kamerabilden,  $P_q^{\text{markör}}$ , beskrivs vektorn  $P_{\text{sökarean}}^{\text{markör}}$  för markörens position i sökarean enligt ekvation 3.3 [14].

$$P_{\text{sökarean}}^{\text{markör}} = R \cdot P_q^{\text{markör}} \quad (3.3)$$

Felmarginalen för markörens position i kamerabilden,  $P_q^{\text{markör}}$  är beroende av hur stor markyta en pixel motsvarar [14]. Storleken av pixlarna beror i sin tur på vilken höjd quadcoptern befinner sig på, samt på kamerans upplösning. Bottenkamerans upplösning på 320x240 pixlar ger totalt 76 800 pixlar. Upptagningsvinkeln för kameran är 45° i horisontalled,  $\theta_x$ , och 35° i vertikalled,  $\theta_y$ . Med denna data kan pixelstorleken beräknas genom ekvation 3.4.

$$\delta = \frac{2 \cdot h \cdot \tan(\frac{\theta_x}{2}) \cdot \tan(\frac{\theta_y}{2})}{76800} \quad [m^2] \quad (3.4)$$

Enligt [14] är felet för positionsestimering av en markör med hjälp av denna beräkningsmodell inom en pixels storlek.

# 4

## Tidigare utvecklad mjukvara

Kapitlet beskriver den mjukvara som använts i projektet. Till stor del används samma mjukvara som i [14]. Flera olika bibliotek har använts för att utnyttja redan färdigskrivna metoder och funktioner. Ett bibliotek är en uppsättning av kod som kan inkluderas i ett annat program. I avsnitt 4.6 förklaras hur systemets olika delar samarbetar för att genomföra en hel flygrutt.

### 4.1 ROS

Linuxbaserade *ROS* är en samling ramverk för mjukvara och bidrar med kommunikationshantering. Program i *ROS* byggs upp av flertalet processer, så kallade noder. Kommunikation mellan noder sker med två olika metoder, antingen med en Publish/Subscribe-modell eller med en Request/Response-modell.

I Publish/Subscribe-modellen kan noder publicera data till topics [22]. En topic hanterar kommunikation som berör ett specifikt ämne. Ett ämne kan exempelvis vara positioner, var quadcoptern är på väg och hur fort den rör sig. Noder som är intresserade av information kring ämnet väljer att prenumerera på datan från den topic som hanterar kommunikation för ämnet, och kallas för subscribers. De som vill publicera data till en topic kallas för publishers. Datat som publiceras till en topic kommer sedan skickas till alla noder som prenumererar på denna topic, alltså till de som registrerats som subscribers. En nod kan välja att prenumerera på ett valfritt antal topics och kan även publicera till ett valfritt antal topics. Begreppet nod i sammanhanget har inte samma betydelse som i kapitel 5 och ruttplanering och förbjudna flygzoner.

Request/Response-modellen kompletterar den ovanstående modellen väl ty information kan, vid behov, erhållas direkt. Request/Response-modellen består av två delar, en klient och en server. En server publicerar att den är villig att delge viss information, kallad en service. När en klient har behov av data som delges via en service, kan klienten skicka en begäran till servern och erhålla ett svar när det finns tillgängligt.

### 4.2 `roar_quad`

`roar_quad` är namnet på biblioteket som utvecklats i [14] och fortsättningsvis i detta projekt. Bibliotekets syfte är att positionsestimera drönaren och markörer, hantera

ruttplanering samt autonom styrning enligt den planerade ruten. Biblioteket består av två delar, `roar_quadcopter` och `tum_ardrone`, vars ansvar presenteras nedan. För att kommunicera med quadcoptern används biblioteket `ardrone_autonomy`, vilket är en brygga mellan officiell programvara från Parrot och *ROS*.

### 4.2.1 `roar_quadcopter`

`roar_quadcopter` är den del av biblioteket `roar_quad` som hanterar ruttplanering och positionsbestämning av markörer. Ruten som skapas skickas vidare till autopiloten som har ansvaret att ruten följs.

Ruttplaneringen som tidigare utförts var väldigt enkelt implementerad med det enda syftet att minimera antal riktningsändringar. I projektet utökades `roar_quadcopter` för att möjliggöra implementering av flygfria zoner. En djupare diskussion om ruttplanering presenteras i avsnitt 5.1.

Identifiering och positionsbestämning av markörer sker med hjälp av biblioteket `ArUco` som beskrivs i avsnitt 4.4. Genom att låta `ArUco` analysera en bild kan information angående en potentiell markörs id, position och rotation i bilden uthämtas. Denna information tillsammans med vetskapen om drönarens position möjliggör positions- och rotationsbestämning hos markören.

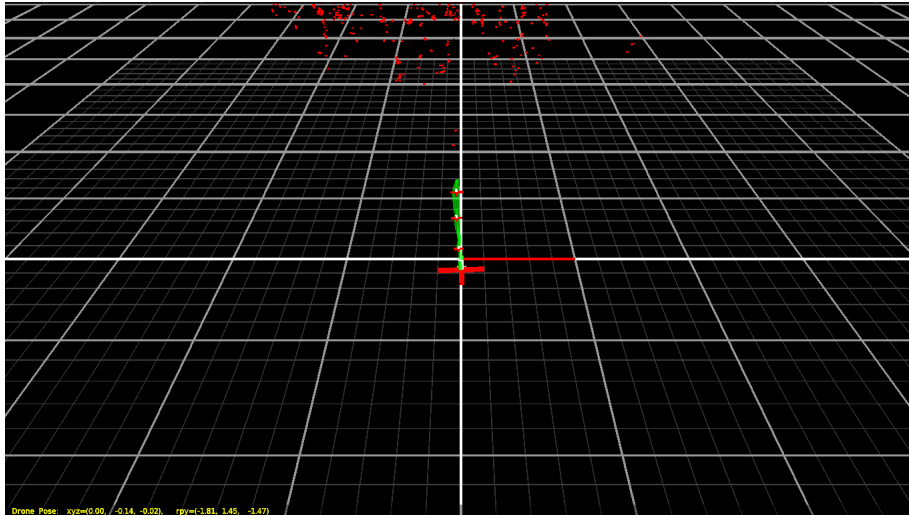
En del i detta kandidatarbete var att implementera positionsbestämning med GPS, vilket utökade ansvarsområdet för `roar_quadcopter` markant, och skulle vid goda resultat helt kunna ersätta `tum_ardrone`, som beskrivs i avsnitt 4.2.2. Dock har Parrot inte officiellt stöd för avläsning av data från GPS-mottagaren, men utvecklare av `ardrone_autonomy` har skapat en experimentell implementation för avläsning av GPS-data.

### 4.2.2 `tum_ardrone`

Biblioteket `tum_ardrone` bestämmer drönarens position. För att positionsbestämma quadcoptern använder sig biblioteket av *PTAM*, se avsnitt 4.3, tillsammans med ett utökat Kalman-filter [23]. Utöver att bestämma drönarens position innehåller `tum_ardrone` även ett användargränssnitt och en autopilot.

Användargränssnittet är uppbyggt av tre fönster. Det ena fönstret innehåller kamerabilder från quadcoptern och visas i Figur 4.2. Det är även i detta fönster de referenspunkter som skapats genom *PTAM* representeras.

I det andra fönstret som visas i Figur 4.1 visas en graf över quadcopterns position och förflyttning. I fönstret visas även quadcopterns nuvarande position och läge.



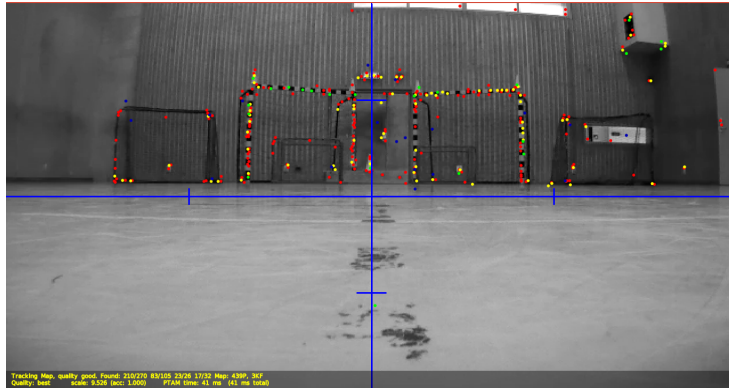
**Figur 4.1: Användargränssnittets fönster för kartan.** Fönstret för kartan i vilken quadcopterns position samt *PTAM*:s referenspunkter visas. De röda prickarna i kartan visar referenspunkter medan den gröna linjen visar quadcopterns förflyttning

Det tredje fönstret är uppdelat i två delar. Den ena delen innehåller status för nodkommunikation, autopilot samt status för quadcopterns läge och batterinivå. Den andra delen av fönstret är ett kommandofönster som används för att skicka kommandon till quadcoptern så som take-off, goto och land.

Autopiloten har flera konfigurationsmöjligheter, bland annat bestämning av drönarens hastighet, definiering av en punkt i rutten, hur nära en punkt drönaren behöver vara för att den anses vara nära nog samt hur länge drönaren ska stanna vid en punkt.

### 4.3 PTAM

*PTAM* är ett verktyg för att quadcoptern, med hjälp av frontkameran, ska kunna lokalisera sig i rummet. En stor fördel med *PTAM* är att det inte krävs någon kännedom om området i förväg, vilket innebär att inga kartor, markörer eller annan fördefinierad data krävs. *PTAM* använder istället referenspunkter som skapas genom att bilder tas med frontkameran vid olika höjder. Detta sker genom att quadcoptern för hand placeras på höjden där första bilden tas för att sedan långsamt lyftas upp till den position där andra bilden tas. På detta sätt skapas ett tredimensionellt rum med hjälp av tvådimensionella bilder. I Figur 4.2 har *PTAM* initierats och referenspunkter i rummet skapats.



**Figur 4.2:** Skärmdump av PTAM. *PTAM* använder sig av referenspunkter för att representera en 3D-bild genom en 2D-bild.

## 4.4 ArUco

ArUco är ett bibliotek för detektering av en specifik sorts markörer. Den typ av markör som kan detekteras av ArUco kallas för ArUco-markörer. ArUco-markörer kan liknas med förenklade *QR*-koder. En *QR*-kod kan maximalt innehålla 7089 tecken som kan kombineras på varierande vis, medan en ArUco-markör enbart kan skapas i 1024 olika kombinationer [24][25]. Anledningen till att just ArUco-markörer används i projektet är att varje kvadrat i markören får en större fysisk storlek, vilket gör det lättare att tolka innehållet på längre avstånd. En ArUco-markör visas i Figur 4.3. Markörerna varierar i utseende där varje unik form innehåller unik information. Markörer som ska positionsestimeras i projektet är kvadratiska med sidlängden 0,3 meter. Det finns möjlighet att använda ArUco-markörer av olika storlekar.



**Figur 4.3:** En typ av ArUco-markör.

## 4.5 Konvertering av GPS-koordinater

Då GPS-mottagaren anger sin position utifrån ett geografiskt koordinatsystem och quadcoptern anger sin position relativt sin startposition finns ett behov att skapa ett gemensamt referenssystem. Alla koordinater mäts relativt en specifik koordinat och resultatet omvandlas till meter. Omvandlingen görs med hjälp av LibGeographic [26] som baserar sina uträkningar från geografiska koordinater till relativa positioner med metoder från [27]. Med hjälp av formeln kan avstånd mellan två positioner på en sfär eller ellipsoid bestämmas med en noggrannhet på mindre än sju nanometer [28]. Således kan felmarginalen i konverteringen av positioner betraktas som försumbar.

## 4.6 Systemöversikt

När batteriet kopplas in i quadcoptern aktiveras dess Wi-Fi-nätverk. *ROS*-noden *ardrone\_autonomy* startas för att hantera kommunikation mellan resterande noder i *ROS* och quadcoptern. När *ardrone\_autonomy* skapat en länk till drönaren börjar statusmeddelanden skickas från drönaren innehållande batteristatus, sensoravläsning samt bildupptagning. När länken skapats kan noderna i *roar\_quad* startas. Då *tum\_ardrone* aktiverats lyssnar den på alla data som, via *ardrone\_autonomy*, skickas från drönaren för att kunna utföra positionsestimering. Noderna i *roar\_quadcopter* utför ännu ingenting, utan väntar på data angående avsökningsområde och om den ska börja avsökningen.

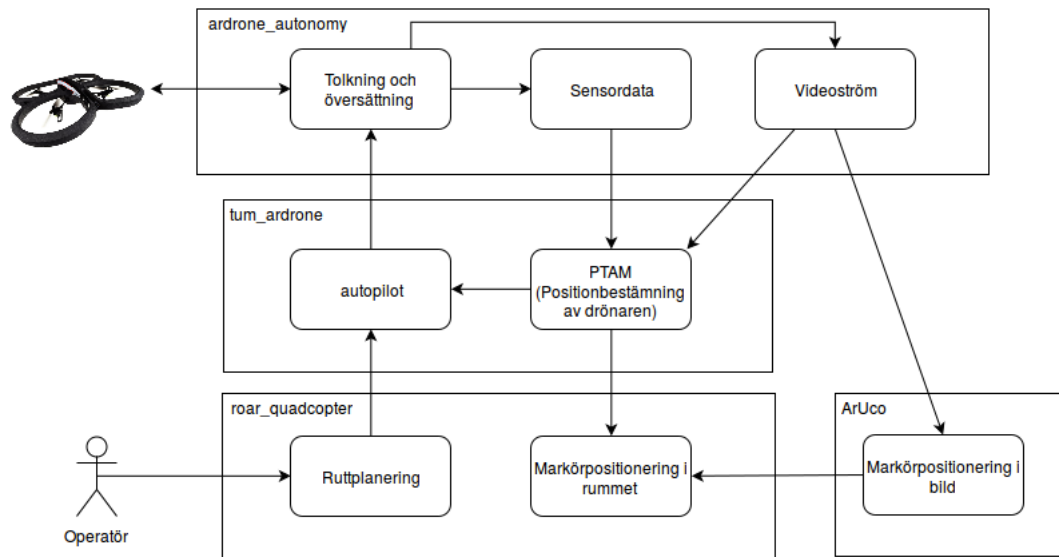
För bästa resultat vid flygning initieras *PTAM* manuellt innan flygning genom att lyfta quadcoptern till midjehöjd, ta en referensbild, och sedan lyfta den en meter till för att ta en ytterligare en referensbild. Initieringen av *PTAM* kan även ske autonomt direkt efter start, men ger markant försämring av positionsestimering. När referenspunkterna skapats börjar bildströmmen växla mellan den framåtriktade och den nedåtriktade kameran, då Ardrone 2.0 endast kan skicka en bildström i taget. För att möjliggöra detektering av markörer lyssnar *roar\_quadcopter* på den bildström som genereras av den nedåtriktade kameran. Utöver bildströmmen tar *roar\_quadcopter* även del av den positionsestimering som sker i *tum\_ardrone*. Då ett kommando för att starta avsökning skickas till *roar\_quadcopter* beräknas vilken rutt quadcoptern ska färdas för att avsöka hela området och förbereder de kommandon som ska skickas till autopiloten.

*roar\_quadcopter* kommenderar autopiloten i *tum\_ardrone* att starta körning, vilket vidarebefordrar kommandot till *ardrone\_autonomy*, och quadcoptern lyfter. Fortsättningsvis skickas de tidigare uträknade positionerna i rутten till autopiloten. När hela rутten har utförts reser quadcoptern tillbaka till utgångspunkten och landar.

Under hela körningen fortsätter bildströmmen att växla mellan den framåtriktade och nedåtriktade kameran för att säkerställa att hela avsökningsområdet fångas på bild samtidigt som framåtkameran krävs för positionsestimering. Om *PTAM* förlorar sina referenspunkter under flygning slutar bildströmmen att växla och endast framåtkameran används för att försöka rädda positionsestimering. Om detta ej är möjligt kommer quadcoptern hovra till ett landningskommando skickas eller en ny initiering sker.

ArUco-biblioteket analyserar varje bildruta i videoströmmen för att undersöka huruvida det finns en markör. Om en markör upptäcks positionsestimeras denna först i bilden, och sedan i rummet, se avsnitt 3.3.

I Figur 4.4 nedan visas hur de olika delarna i systemet kommunicerar med varandra under avsökning av en fördefinierad yta.



Figur 4.4: Flödesschema för systemet.

# 5

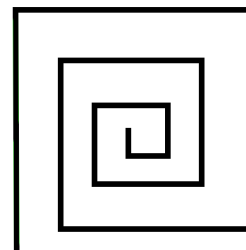
## Utvecklad mjukvara

En förbjuden flygzon är en yta quadcoptern inte får befinna sig i. Förbjudna flygzoner kan användas för olika syften. Det kan till exempel vara ytor som är onödiga eller olämpliga att avsöka eller som inte får avsökas. Onödiga områden kan vara områden som består av stora byggnader eller som man vet inte innehåller sopbehållare. Att avsöka områden som innehåller privata tomter eller ligger i anslutning till badplatser kan anses vara olämpligt eftersom det kan kränka personers integritet. Områden där en större mängd folk vistas i, så som shoppinggator och torg, samt nära svenska flygplatser är det förbjudet att flyga. En förbjuden flygzon kan definieras över dessa områden för att undvika avsökning på dessa ställen. Om en förbjuden flygzon definieras i ett område som ska avsökas kommer avsökning ske i hela avsökningsområdet förutom i den förbjudna flygzonen.

För att definiera hur quadcoptern ska avsöka en yta skapas ett antal noder, där varje nod är en position. Varje nod har en tänkt avsökningsyta. Om quadcoptern befinner sig på positionen, alltså på noden, kommer den se den tänkta avsökningsytan för noden. Genom att kommandera quadcoptern att åka till flera noder efter varandra kan en hel yta avsökas. Från varje nod kan man flyga till andra närliggande noder. En modell för att beskriva en uppsättning noder och de möjliga vägarna emellan kallas för en graf.

### 5.1 Ruttplanering och förbjudna flygzoner

Den ruttplanering som utvecklades i [14] accepterade en rektangulär yta och minimerade antal riktningssändringar som quadcoptern behövde utföra under avsökning av den definierade ytan, se Figur 5.1. Denna algoritm valdes eftersom riktningssändringar är kostsamma på grund av att quadcopters hastighet måste reduceras avsevärt vid svängar, och således ökar avsökningstiden. En annan ruttplanering som diskuteras i [14] var att maximera antalet långa sträckor, för att på så vis möjliggöra längre accelerationssträckor. En sådan ruttplanering har dock lågt värde då quadcopters maximala hastighet måste hållas låg för att säkerhetsställa att bildupptagningen hinner med att fota hela avsökningsarean.



**Figur 5.1:** Den ruttplanering som användes i tidigare genomfört masterprojekt.

Den tidigare ruttplaneringen fungerade väl för det tänkta syftet. Den är dock inte applicerbar när förbjudna flygzoner implementeras. För att förenkla implementeringen av förbjudna flygzoner omvandlas avsökningsarean till en graf. Noderna placeras på positioner, sådana att om alla noder besöks så är hela sökarean avsökt. Algoritmen som utvecklades för att besöka alla noder i grafen behöll den grundtanke som fanns i den tidigare ruttplaneringen, nämligen att minimera antalet riktningsändringar. Med detta i åtanke placerades en högre prioritet på att behålla quadcopterns riktning jämfört med att minimera färdad sträcka, vilket kunde uppnåttas med en implementation av The Traveling Salesman Problem [29]. Psuedokod för den nya ruttplaneringen presenteras nedan.

```

visitedNodes ← set
noticedNodes ← stack
path ← list
currentNode = origo
while visitedNodes does not contain all nodes do
  for all neighbors of currentNode do
    noticedNodes.add(neighbor)
  end for
  if currentNode has unvisited neighbor in same direction then
    nextNode = neighbor in same direction
  else
    repeat
      if noticedNodes is empty then
        error(Graph not connected)
      end if
      nextNode = noticedNodes.front()
    until nextNode is not in visitedNodes

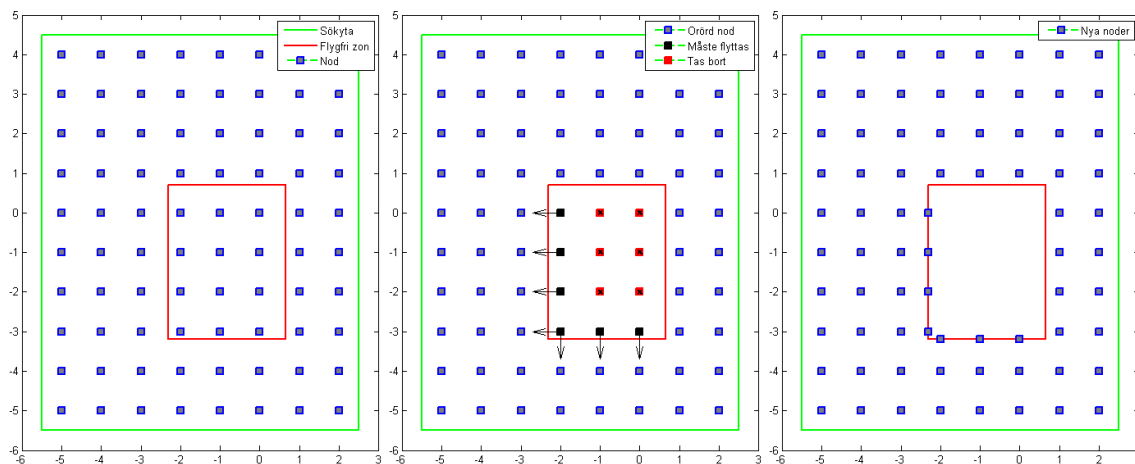
    for all nodes in path to nextNode do
      path.add(node)
    end for
  end if
  visitedNodes.add(currentNode)
  path.add(currentNode)
  currentNode = nextNode
end while

```

### 5.1.1 Hantering av förbjudna flygzoner

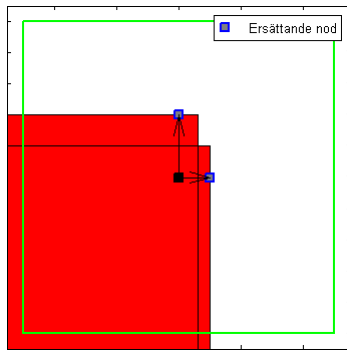
Noder skapas och placeras först utan hänsyn till förbjudna zoner. När hänsyn sedan tas till förbjudna flygzoner korrigeras antalet noder och deras positioner. Noder vars hela tänkta sökområde är täckt av förbjudna flygzoner tas bort. I Figur 5.2 har dessa noder markerats i rött. Om förbjudna flygzoner interfererar med en nodytas mittpunkt, samt med en del av dess tänkta sökområde ersätts noden av nya noder.

De nya noderna placeras om möjligt så att hela den yta som den ursprungliga noden skulle täcka fortfarande avses, fast på ett sätt så att de nya noderna inte interfererar med de förbjudna flygzonerna. Dessa noder har markerats i svart i Figur 5.2. Om de svarta noderna hade tagits bort istället för att flyttats hade en del av sökytan, nära högra kanten på förbjudna flygzonen, inte avsökts.

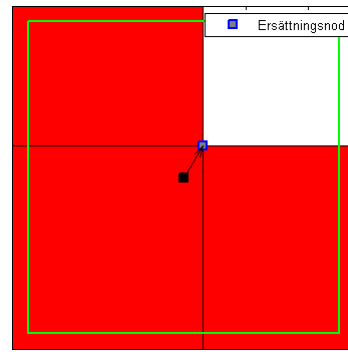


**Figur 5.2: Noders placering utifrån de förbjudna flygzonernas position.** Noder har skapats i den yta som ska avsökas. Området som ska avsökas har grön kontur. Alla noder kontrolleras gentemot de förbjudna flygzonerna. De noder som ska flyttas har markerats i svart färg och de som ska tas bort har markerats i röd färg. I bilden längst till höger visas nodernas placering efter flytt och borttagning av noder.

För vissa fall av interferens med förbjudna flygzoner kan en smartare placering av nya noder göras. Alla förbjudna flygzoner som interfererar delas in i kategorier: corner, two-corners och side. Corner innebär att ett hörn av nodens tänkta sökarea interfererar med zonen. Two-corners innebär att två hörn av nodens tänkta sökarea interfererar med zonen. Side innebär att zonen går in i noden från sidan utan att interferera med hörnen på nodens tänkta sökarea. I Figur 5.3 visas två olika nodförflyttningar. I Figur 5.3a skapas två nya noder för att täcka hela den kvarstående ytan som ska avsökas. I Figur 5.3b räcker förflyttning av den täckta noden för att avsöka resterande yta. Genom att ta hand om dessa fall specifikt minskar risken för att delar av nodens yta ej avses. Mer utförlig beskrivning av hur noder placeras vid olika kombinationer av förbjudna flygzoner finns i appendix A.



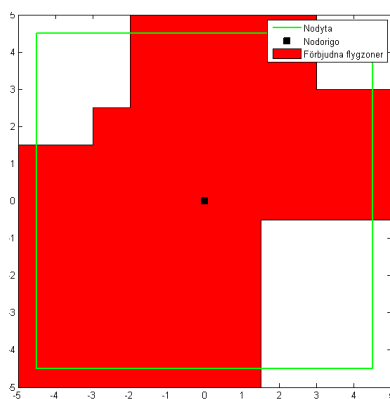
(a) Förbjudna flygzoner interfererar med nodens origo. Flera förbjudna flygzoner interfererar med nodens origo från väster nederkant.



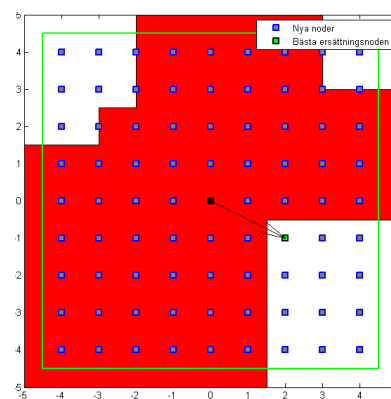
(b) Förbjudna flygzoner interfererar med nodens origo. Flygzoner interfererar med nodens origo från höger samt vänster nederkant. Även two-corners från höger samt från nederkant behandlas.

**Figur 5.3: Förflyttning av noder beroende på placering av interfererande förbjudna flygzoner.**

Då antalet förbjudna flygzoner ej är begränsat leder detta till att eventuell korrigering av nodplaceringar försvåras. Vissa specialfall omhändertas för att få optimal placering, medan andra fall hanteras av en mer generell lösning. I denna lösning delas nodytan upp i noder placerade 0.1 meter från varandra, och benämns framöver som nodnät. Upplösningen 0.1 meter väljs då målet för quadcopters positionsbestämning är av en högre grad. Noden i nodnätet med kortast distans till utgångsnoden, och som ej är placerad i en förbjuden zon, väljs som ersättningsnod, se Figur 5.4.



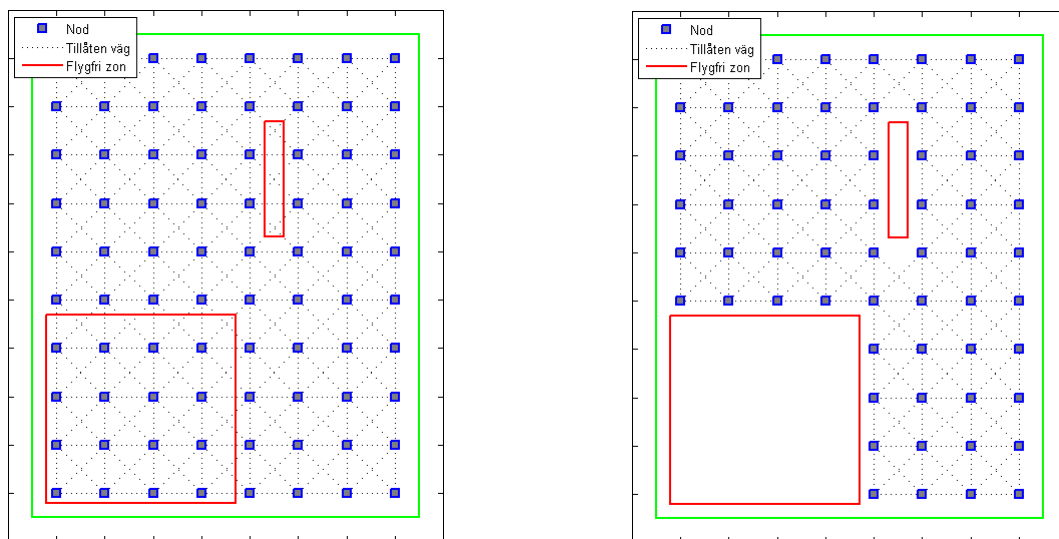
(a) Flera förbjudna flygzoner täcker delar av nodytan och dess origo.



(b) Ersättningsnod väljs. Metoden för nodplacering kan inte ta hänsyn till kombinationen av förbjudna flygzoner. Ett nät av nya noder skapas och den närmst den ursprungliga noden väljs som ersättare.

**Figur 5.4: Metod för nodplacering.** Metoden för nodplacering hanterar mer komplexa kombinationer av förbjudna flygzoner i en nod.

Om det finns en giltig flygväg mellan två närliggande noder kallas detta nodpar för grannar. Då en förbjuden flygzon kan bli placerad var som helst finns möjligheten att den förbjuder en tidigare tillåten väg mellan två noder, vilket leder till potentiell förändring av noders grannar. Inverkan som förbjudna flygzoner har på noders uppsättning av grannar visas i Figur 5.5. För att en flygväg mellan två noder ska brytas krävs det att sträckan mellan de två nodytornas mittpunkter överlappas av en förbjuden flygzon.



(a) **Förbjudna flygzoner påverkar möjliga flygvägar mellan noder.** Den förbjudna flygzonen nere i vänstra hörnet interfererar både med noders placering samt flera vägar mellan grannar. Den förbjudna flygzonen upp till höger är smal och placerad på ett sådant sätt att den endast interfererar med vägar mellan noder och dess grannar.

(b) **Borttagning av noder och flygvägar.** För att kompensera för den förbjudna flygzonen nere till vänster har noder och flygvägar mellan grannar tagits bort. För att kompensera för den förbjudna flygzonen upp till höger har endast flygvägar mellan grannar tagits bort.

**Figur 5.5:** Noders placering samt flygvägar mellan noder får anpassas för att respektera förbjudna flygzoner.

# 6

## Utformning av tester

Kapitlet beskriver de tester som genomfördes i projektet. Under varje rubrik beskrivs testets syfte och utformning. Det framgår även med vilken metod resultatet har bedömts. De tester som genomförts har delats upp mellan tester för att utvärdera precisionen från sensordata samt tester för att verifiera uppsatta mål. De tester som avser precisionen för de olika sensorerna beskrivs i avsnitt 6.1. I de fall då testerna ska verifiera om mål har uppfyllts beskrivs även det förväntade resultatet. Dessa tester beskrivs i avsnitt 6.2.

### 6.1 Sensorprecision och positionsestimering

Avsnittet beskriver hur tester utfördes för att bestämma precisionen av positionsestimering samt eventuella begränsningar för den hårdvara som används. Resultatet redovisas i kapitel 7.

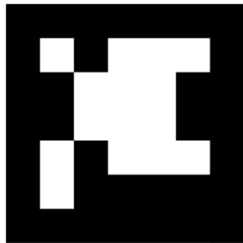
#### 6.1.1 PTAM i utomhusmiljö

För att undersöka om *PTAM* är funktionellt även i utomhusmiljöer genomfördes tester under olika förhållanden. I de tester som utfördes varierades ljusförhållanden och placering av referensobjekt i bilden vid initiering av *PTAM*, initieringen beskrivs i Avsnitt 4.3. Initiering vid motljus, samt olika mängd och utformning av referensobjekt undersöktes. Då funktionen tillämpas i en dynamisk omgivning i linje med konceptets verkliga syfte riskerar flertalet referensobjekt flyttas. Med anledning av detta utfördes också tester med rörliga referensobjekt för att se hur väl initieringen lyckades i dessa förhållanden. Testet utvärderades genom att studera användargränssnittet för *PTAM* för att se förändringar av mängden referenspunkter samt placering av dessa.

#### 6.1.2 Höjdbegränsning för detektering av markörer

För att undersöka hur högt quadcoptern kan befinna sig och fortfarande lyckas detektera markörer av den storlek som användes i projektet genomfördes ett höjdttest. I [14] används 1,50 meter som avsökningshöjd utan att det anges någon motivering till varför. Vid högre höjd får bottenkameran ett större upptagningsområde vilket medför att avsökningsrutten kan kortas. Dessutom minskar risken att krocka med markgående hinder.

Quadcoptern placerades, för hand, på en höjd som mättes med måttband. Två olika ArUco-markörer användes för att undersöka om markörens utformning påverkade vilken maximal höjd som kan användas och fortfarande möjliggöra identifiering. De markörer som användes i testet var ArUco-markörer med ID #500 och ID #600, båda med sidlängden 0,3 meter, se Figur 6.1.



(a) ArUco-markör med ID #500.



(b) ArUco-markör med ID #600.

**Figur 6.1: Exempel på två ArUco-markörer.**

Testet påbörjades på 4 meters höjd. Därefter ökades höjden med en decimeter i taget för varje test tills quadcoptern inte längre lyckades identifiera markörerna. Vid denna höjd approximerades maximala höjden genom att utföra tio tester, för respektive markör, där quadcoptern långsamt sänktes ned tills den höjd då quadcoptern lyckades identifierade markören.

### 6.1.3 Precision av höjdbestämning

Quadcopterns höjd mäts med en ultraljudssensor, beskriven i avsnitt 2.2.9. Höjden påverkar *PTAM*:s positionsestimering, och används i biblioteket ArUco när markörers position i en bild bestäms med trigonometri, se avsnitt 3.3. Höjden avgör hur stor del av sökarean som fångas per bild vilket påverkar avsökningstiden. Det är därför viktigt att höjdestimeringen har god precision, samt att kunna avgöra hur mycket denna avviker från det faktiska värdet.

Under testet placerades quadcoptern på olika höjder som mättes med måttband och hölls på denna position till ultraljudsensorns värden stabiliserats. Den höjd som quadcoptern angav att den befann sig på registrerades och jämfördes med det uppmätta värdet. För att få ett tillförlitligt medelvärde upprepades testet tio gånger för respektive höjd. Testet utfördes för tre olika höjder; 1,50, 2,415 samt 4,04 meter. I [14] användes enbart avsökningshöjden 1,50 meter. Syftet med mätningarna på höjderna 1,07 meter samt 2,415 meter var att bestämma hur god höjdestimeringen var i det normala arbetsspannet. Syftet med mätningarna på 4,04 meters höjd var att upptäcka om precisionen försämrades exponentiellt samt att lättare uppskatta eventuella proportionella fel.

### 6.1.4 Precision för GPS

I [14] bestämdes quadcopterns position med *PTAM*. Vid avsökning utomhus tillkommer faktorer som medför att *PTAM* inte är tillämpligt, framför allt är det den

dynamiska miljön som bidrar till dålig navigering, se avsnitt 7.1. Genom att istället bestämma quadcopterns position med hjälp av en GPS möjliggörs navigering utomhus. Då en ny ruttplanering ska utformas är det viktigt att veta med vilken precision GPS:en bestämmer quadcopterns position för att säkerställa att hela arean avsöks och för att quadcoptern inte ska avsöka samma område flera gånger. GPS:ens precision är även viktig för att quadcoptern ska ta hänsyn till de förbjudna flygzoner som eventuellt definierats. Testerna syftade också till att avgöra om quadcopterns höjd, dess hastighet och om ett skyddande skal, som visas i Figur 2.1, påverkar GPS-signalen och dess kvalitet. Eventuella fel och avvikelser eftersträvas att detekteras för att kunna motverkas med en styrande algoritm.

#### 6.1.4.1 Test i stillastående läge

Vid start och vid svängar måste quadcoptern hovra eller hastigheten reduceras. Hur GPS-signalen ändras då quadcoptern är stillastående påverkar därför den angivna startpositionen samt markörers och quadcopterns positionestimering.

Quadcoptern placerades på en position under 30 sekunder. Testet utfördes på marknivå samt 2,55 meter över marken med och utan skal. Samtliga kombinationer testades fem gånger. Eftersom quadcopterns avsökninghöjd var 1,50 meter i [14] undersöktes en högre höjd för att utvärdera om vidare tester skulle utföras för andra höjder mellan markhöjd och 2,55 meter.

#### 6.1.4.2 Test i rörelse

För att utvärdera hur GPS-positioneringen förändrades under rörelse utfördes tester då quadcoptern förflyttades, i en bana i form av en rektangel, för hand. Att använda en rektangulär form är lämpligt eftersom denna geometriska form innehåller och tillåter raksträckor, accelerationer, retardationer samt riktningssändringar. Rektangeln varierades i två olika storlekar för att lättare kunna avgöra i vilka stadier fel uppstår och varför. Alla testerna utfördes med de ungefärliga hastigheterna 0,5 m/s samt 1,0 m/s för att kunna utvärdera om hastigheten påverkar signalkvaliteten samt om det lämpar sig bättre att flyga i vissa hastigheter. Alla hastighet- och rektangelkombinationer testades med och utan skal. Alla kombinationer testades fem gånger. Den mindre rektangeln hade sidlängderna 3,0 meter respektive 4,0 meter och den större rektangeln hade sidlängderna 8,4 meter respektive 4,0 meter.

#### 6.1.4.3 Test mot DGPS-uppmätta koordinater

I tidigare projekt inom *ROAR* har mer exakta GPS-koordinater mätts upp längs med Chalmers Tvärgata. Dessa koordinater är uppmätta med en *DGPS* och har en avvikelse på endast ett par decimeter [30].

Under de tidigare utförda GPS-testerna har relativa positioner beräknats utifrån en godtyckligt vald punkt i testdatan. Med origo som en känd startposition går det att fastställa om GPS-mottagarens positionsuppskattning visar vissa tendenser när

positionsuppskattningen förändras, om det finns statistiska fel, eller om riktningen varierar.

Stilltest utfördes vid en av de uppmätta koordinaterna. Quadcoptern placerades då på den specifika punkten och GPS-data samlades in under 30 sekunder. Testet utfördes fem gånger på markhöjd utan skal. Quadcoptern fördes även i form av en stor rektangel som inkluderade tre kända punkter uppmätta med *DGPS*. Dessa placerades som startpunkt, hörnpunkt och viapunkt. Testerna utfördes fem gånger vardera för hastigheterna 0,5 m/s samt 1,0 m/s.

## 6.2 Verifiering av mål

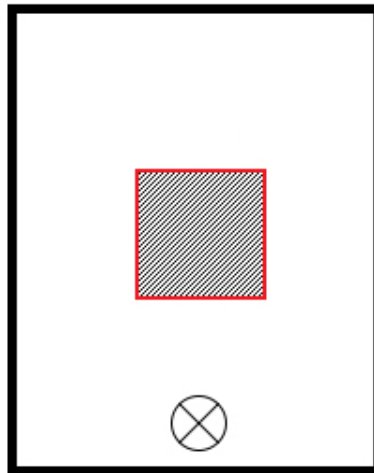
Avsnittet beskriver hur metoder och funktioner ska fungera för att uppsatta mål ska uppfyllas.

### 6.2.1 Definiering av avsökningsområde och förbjudna flygzoner

Implementering av förbjudna flygzoner ska utvärderas i samverkan med metoden för ruttplanering. Avsökningsområde samt förbjudna flygzoner ska kunna definieras i en textfil. Areorna ska läsas in av programmet och resultera i korrekt placerade noder som skickas till ruttplaneringsmetoden. Implementeringen ska på ett korrekt sätt klara av att hantera och redigera noders placering och flygvägar mellan noder. Implementering av förbjuden flygzon anses fungera om rätt zoner registreras som flygfria i metoden för ruttplanering. Noder som till viss del interfererar med flygfria zoner ska ersättas av noder som flyttats till lämpliga ställen. Då en flygfri zon är placerad mellan två närliggande noder ska det inte vara möjligt att åka direkt mellan dessa två noder. Testet utförs genom att registrera godtyckliga rektangulära förbjudna flygzoner i textfilen och undersöka om korrekt data registreras, hanteras och redigeras i metoderna för ruttplanering och nodflytt.

### 6.2.2 Ruttplaneringens hänsyn till förbjudna flygzoner

Ingen av de noder som ska besökas får vara placerade innanför en förbjuden flygzon. Inga färdvägar mellan noder får passera genom förbjudna flygzoner. Ett godtyckligt antal förbjudna flygzoner ska gå att definiera på valfria platser. Bedömning huruvida ruttplaneringen tar hänsyn till förbjudna flygzoner görs genom att kontrollera den väg mellan noder som quadcoptern ska åka och kontrollera så att inga vägar korsar förbjudna flygzoner. Notifiering ska även ske om den önskade ytan inte går att avsöka och avsökning ska då inte starta. I Figur 6.2 visas ett exempel på en flygfri zon.



**Figur 6.2: Förbjuden flygzon.** En förbjuden flygzon placerad centralt i avsökningsområdet.

### 6.2.3 Förflyttning av noder med hänsyn till förbjudna flygzoner

Om hela den tänkta yta som en nod ska avsöka är täckt av förbjudna flygzoner ska noden tas bort. Om endast en del av den tänkta yta som en nod ska avsöka är täckt av förbjudna flygzoner ska nya noder ersätta den gamla noden och om möjligt täcka kvarvarande yta som ska avsökas. Bedömning huruvida förflyttning och ersättning av noder tar hänsyn till förbjudna flygzoner görs genom att kontrollera varje nodförflyttning för sig och kontrollera så att de förflyttas alternativt ersätts på rätt sätt och att de nya noderna hamnar på rätt positioner. Kontroller ska ske för olika utformningar av förbjudna flygzoner. Korrekt placerade noder ska returneras till ruttplaneringsmetoden.

# 7

## Testresultat

Kapitlet presenterar uppmätta och observerade resultat av de tester som beskrivs i avsnitt 6.1. Kapitlet visar resultatet för testerna av positionsestimeringsmetoder samt av precisionen av de olika sensorerna.

### 7.1 PTAM i utomhusmiljö

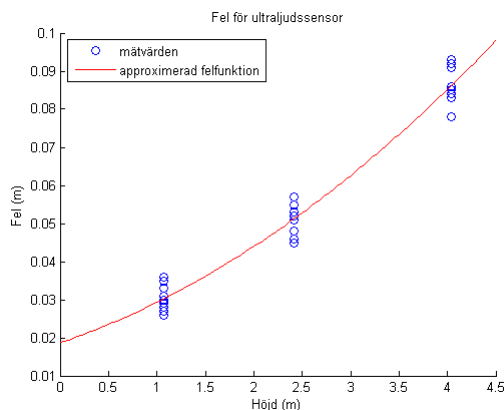
Genomförda tester visade på att *PTAM* hade stora svårigheter att initiera i utomhusmiljöer, och oftast gick det inte alls. Under genomförandet uppvisades sämst resultat då referensobjekten var plana, runda, eller saknade kanter och utstickande delar. Problem uppkom, troligtvis till följd av allt för stor ljusexponering, även då initiering gjordes i motljus. Då initiering istället genomfördes med solljus bakifrån reflekterades solljuset mot objektet vilket också försämrade resultatet. Även om referensobjekt på ett litet avstånd från quadcoptern ger en högre precision av *PTAM* krävs även objekt på ett längre avstånd eftersom djupet som skapas används för att beräkna quadcopterns förflyttning. Det är alltså inte optimalt att ha skilda objekt på ett och samma avstånd. Ju fler objekt *PTAM* kan skapa referenspunkter på desto bättre fungerade *PTAM*. Objekt ska helst placeras så de flesta objekten kan ses under hela rutten. Om ett objekt hamnar utanför vyn en kortare stund kan *PTAM* kvarhålla dess referenspunkter till dess att objektet återkommer i bilden. Vid längre tid utanför bilden tappas referenspunkterna kopplade till objektet. *PTAM* är anpassad för att verka i en statisk miljö. Om objekt förflyttas eller förändras blir beräkningen av positionen fel, eller så tappas referenspunkter som var fästa vid objektet. Det är alltså varken optimalt eller säkert att initiera *PTAM* mot objekt som senare riskerar att förflyttas eller förändras.

### 7.2 Höjdbegränsning för detektering av markörer

Quadcoptern placerades på 4 meters höjd, där markörerna snabbt detekterades. Höjden ökades sedan med en decimeter åt gången. Upp till 5,50 meter detekterades båda markörerna direkt, därefter tog det ett fåtal sekunder att identifiera markörerna. Vid 5,70 meter hittades inte längre markören med ID #600. Tio försök utfördes där quadcoptern sänktes långsamt från 5,70 meter. Den högsta höjden då markören med ID #600 lyckades identifieras uppmättes till 5,65 meter. På samma sätt utfördes tio tester för markör med ID #500. Denna markör lyckades quadcoptern identifiera från högst 5,75 meters höjd. Den maximala höjd som quadcoptern lyckades identifiera markörerna på skilde sig inte mer än en decimeter.

### 7.3 Precision av höjdbestämning

Quadcopterns höjd angavs vara 23,8 centimeter när den var placerad på golvet, men felet verkade inte påverka när den väl var i luften. I MATLAB användes funktionen *polyfit* för att approximera en funktion av andra ordningsgraden för ultraljudssensorns fel. Felet beräknades genom att subtrahera höjden angivet från sensorn med den uppmätta höjden, resultatet redovisas i Figur 7.1. *Polyfit* approximerar en funktion med minsta-kvadratmetoden som beskrivs i avsnitt 3.2.



**Figur 7.1: Diagram över höjdsensorns fel.** Felet för ultraljudssensorn ökar med höjden. Testerna utfördes på höjderna 1,07 meter, 2,415 meter, samt 4,04 meter.

Resultatet av felvektorn  $\tilde{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3]$  visas i Tabell 7.1 där  $x_1$  representerar inverkan av det kvadratiske felet,  $x_2$  det proportionella felet och  $x_3$  det statistiska felet. Det kvadratiske felet påverkar inte lika mycket som de andra felen eftersom quadcoptern endast flygs på relativt låga höjder. Felen och dess approximerade påverkan på höjderna 1,5 meter samt 2 meter redovisas i Tabell 7.2.

**Tabell 7.1: Vektorn  $\tilde{x}$  visar signifikans av fel för olika ordningsgrader vid höjdestimering.**

Kvadratisk fel ( $x_1$ ) [ $\frac{m}{m^2}$ ]	0.0020
Proportionellt fel ( $x_2$ ) [ $\frac{m}{m}$ ]	0.0087
Statiskt fel ( $x_3$ ) [ $m$ ]	0.0186

**Tabell 7.2: Beräknad avvikelse för ultraljudssensorn vid mätning av quadcopterns höjd vid 1,50 respektive 2,00 meter.**

Quadcopterns höjd [cm]	150	200
Kvadratisk fel ( $x_1$ ) [cm]	0,45	0,80
Proportionellt fel ( $x_2$ ) [cm]	1,30	1,73
Statiskt fel ( $x_3$ ) [cm]	1,86	1,86
Totalt fel [cm]	3,61	4,40

På höjderna 1,50 till 2,00 meter ger det kvadratiske felet en avvikelse mellan 0,45 till 0,80 centimeter. Det proportionerliga felet är större men liksom för det kvadratiske felet minskar dess relevans på grund av de låga höjderna quadcoptern flyger på i det här projektet. På höjderna 1,50 till 2,00 meter ger felet en avvikelse mellan 1,30 och 1,73 centimeter. Det finns även ett statistiskt fel på 1,86 centimeter som till viss del kan bero på att sensorn är placerad högre upp än quadcopterns ben. Totalt blir felet mellan 3,61 och 4,40 centimeter vid flygning på höjder mellan 1,50 och 2,00 meter. Observera att dessa värden är uppskattade med minsta-kvadratmetoden och det är antaget att inga fel med högre ordning än två finns. För låga höjder, som endast används i projektet, minskar fel av högre ordnings relevans men om höjden ska ökas är fel av högre ordning mycket relevanta. Så länge avsökningshöjden inte överstiger de testade höjderna kommer feluppskattningen av höjden endast påverka positionsbestämningen av markörerna med ett fåtal centimeter, se Tabell 7.3 och Figur 3.1.

**Tabell 7.3: Höjduppskattningens inverkan på positionsbestämning av markörer.** Hur mycket felet för höjduppskattningen påverkar positionsbestämningen av markörer vid olika höjder och vinklar. Siffrorna är framtagna med ekvation 3.2.

Höjd [cm]	$\phi$ [°]	x, faktiskt höjd [cm]	x, uppskattad höjd [cm]	Differens [cm]
404	17,5	127,4	130,1	2,72
241,5	17,5	76,1	77,8	1,62
107	17,5	33,7	34,7	0,95
404	5	35,3	36,1	0,76
241,5	5	21,1	21,6	0,45
107	5	9,4	9,6	0,26

## 7.4 Precision för GPS

Resultatet för tester som utfördes för att utvärdera GPS-enhetens precision redovisas nedan. Resultaten är uppdelade i resultat som är betydelsefulla för flygning vid låga samt högre hastigheter och redovisas under respektive rubrik.

### 7.4.1 Test i stillastående läge

I avsnittet visas resultatet av tester då quadcoptern placerades stillastående och dess position registrerades i 30 sekunder. Samtliga tester tyder på en avsevärd variation av positionen. Trots att quadcoptern vid samtliga test placerades på samma punkt visar testdatan olika startpositioner.

I de testresultat som visas i Figur 7.6a, 7.6b, 7.7a och 7.7b är den faktiska positionen okänd, och det inte går att urskilja någon typ av statistiskt fel. Det går inte heller att urskilja trender för hur felet förändras. Felet varierar över en stor yta och spridningen är jämn. Quadcopterns position förändras i olika riktningar och olika avstånd, samtidigt som positionsuppskattningen driftade ständigt. Testerna utfördes

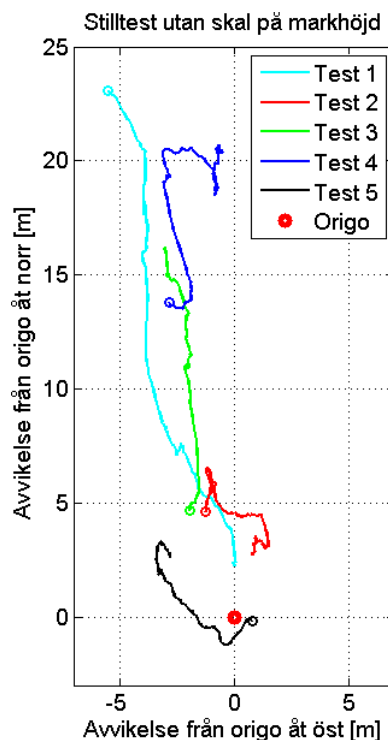
på en öppen yta på avstånd från annan elektrisk utrustning och bebyggelse för att erhålla en god signalstyrka för GPS-enheten samt att minska risken för störningar.

Test i stillastående läge utfördes även på en känd koordinat för att upptäcka generella trender och avvikelser från dess verkliga position. I Figur 7.2 visas resultatet för testet. För att indikera vilken ände som är testerna start- respektive slutpunkt har startpunkten markerats med en ring. Testet gav liknande resultat som de tidigare beskrivna i avsnittet. Det som kan uppmärksammas är att testerna ofta indikerade positionen för långt norr ut. Dessutom var spridningen i latitud större än spridningen i longitud för det här enskilda testet.

Stilltesterna med dessa koordinater visar att quadcoptern som längst driver iväg 23,71 meter från origo. Testresultaten från de fem genomförda testerna varierar dock mycket. För testet som avviker minst från origo är GPS:ens positionsuppskattning aldrig längre än 4,63 meter från origo. Den ovanligt stora avvikelser om 23,71 meter kan bero på signalstyrkan som varierade mellan testerna. För första testet, Test 1, registrerades de första positionerna med en signalstyrka på ungefär 29 dB  $[C/N_o]$  och de sista på ungefär 34 dB  $[C/N_o]$ . Dessa två signalstyrkor är den sämsta och den bästa som registrerats för alla utförda tester. Trots att testet avslutades med mycket god signalstyrka registrerades positionen för långt norr ut. Det kan också bero på att den korrekta positionen för quadcoptern inte varit känd i tidigare tester. Dock visar inte de tidigare utförda testerna på en större variation i latitud utan på en jämnare variation mellan longitud och latitud. En konstant offset är därför inte trolig.

#### 7.4.2 Test i rörelse

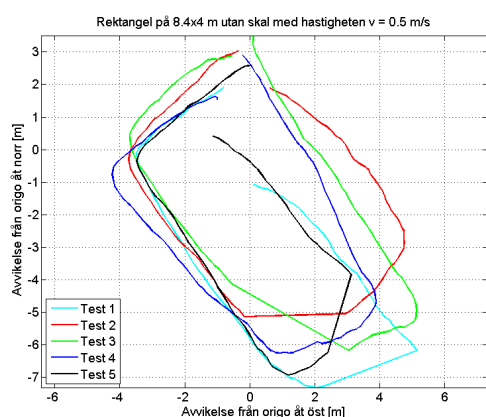
Även i rörelse avviker GPS-enhetens positionsangivelse från den faktiska positionen. Avvikelsen varierar såväl i nord-sydlig som öst-västlig riktning vilket försvårar kompensering. Testet utfördes i två olika hastigheter för att utvärdera om hastigheten påverkar precisionen. Resultatmässigt ses dock ingen markant skillnad avseende de olika hastigheterna. I Figur 7.3a och 7.3b visas resultatet då quadcoptern förflyt-



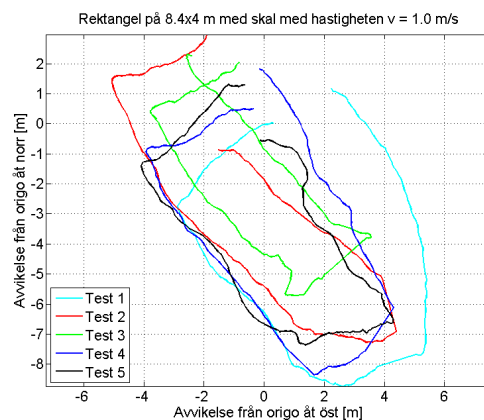
**Figur 7.2: GPS:ens positionsuppskattning under stillastående test.** Quadcoptern står still på markhöjd utan skal. Koordinatsystemet utgår från ett känt origo.

## 7. Testresultat

tas runt en rektangel med sidlängderna 8,4 respektive 4 meter med hastigheten 0,5 respektive 1 m/s.



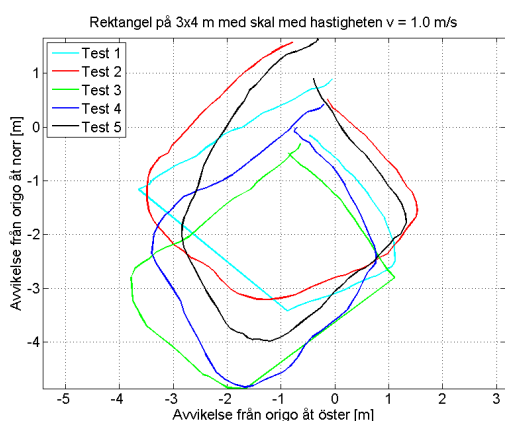
(a) GPS:ens positionsuppskattning under förflyttning med hastigheten 0,5 m/s. Quadcoptern förflyttas längs en rektangel, med sidlängderna 8,4 samt 4 meter. Alla tester har samma referenspunkt.



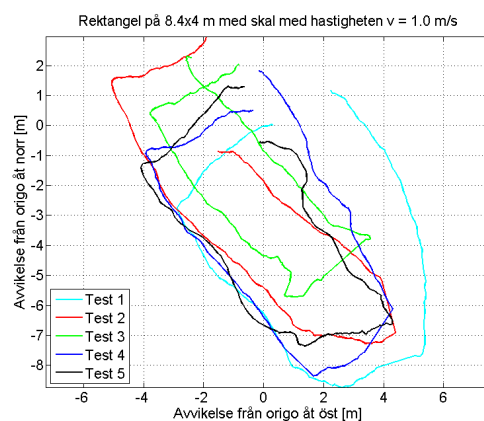
(b) GPS:ens positionsuppskattning under förflyttning med hastigheten 1 m/s. Quadcoptern förflyttas längs en rektangel, med sidlängderna 8,4 samt 4 meter. Alla tester har samma referenspunkt.

**Figur 7.3: GPS:ens precisionsuppskattning under rörelse.**

Även rörelsetesterna utfördes både med och utan skal, men som redovisas i avsnitt 7.4.3 påverkade det inte resultatet. Testet utfördes också för två olika storlekar på rektanglar för att utvärdera om precisionen påverkades av avsökningsarean samt avsökningstid. I Figur 7.4 visas resultatet från testerna då rektangeln hade sidlängderna 3 och 4 meter samt 8,4 och 4 meter. Det går inte att tyda någon skillnad vad gäller GPS:ens precision. Båda testerna är utförda i hastigheten 1 m/s.



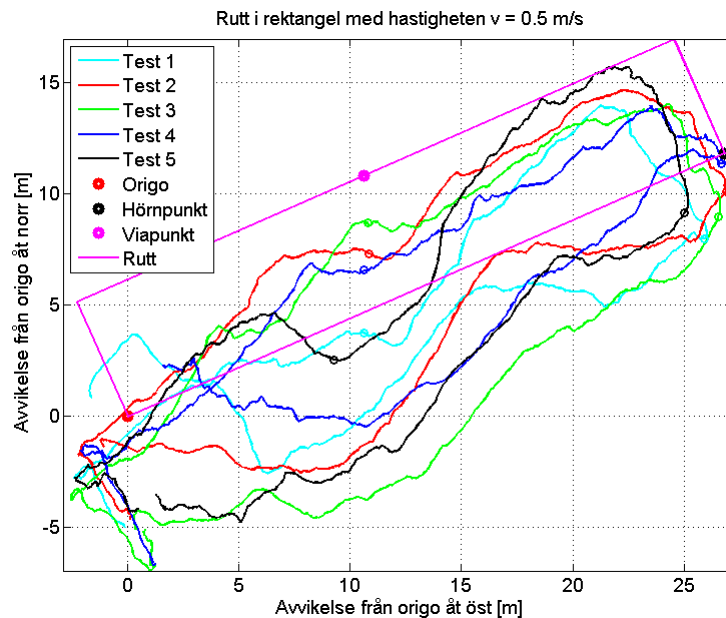
(a) GPS:ens precision under rörelse. Förflyttning i litet varv med hastigheten 1 m/s.



(b) GPS:ens precision under rörelse. Förflyttning i stort varv med hastigheten 1 m/s.

**Figur 7.4: Jämförelse av GPS:ens precision för rutt runt två olika rektanglar med sidlängderna 3 och 4 meter respektive 8,4 och 4 meter.**

Tester med de *DGPS*-utmätta koordinaterna utfördes även i rörelse. Tre positioner med fastställda koordinater utnyttjades för att utvärdera resultatet. De tre positionerna passerades då quadcoptern förflyttades i ett rektangulärt mönster. I Figur 7.5 visas resultatet. Den korrekta rektangeln är ritad i lila färg med de tre kända punkterna utmärkta. Två ringar har markerats på varje test för att representera den tid då quadcoptern befann sig över de kända positionerna.



**Figur 7.5: Test av GPS i område med kända koordinater.** Quadcoptern förflyttats runt en rektangel. Origo, hörnpunkten och viapunkten representerar de koordinater som är uppmätta med *DGPS*.

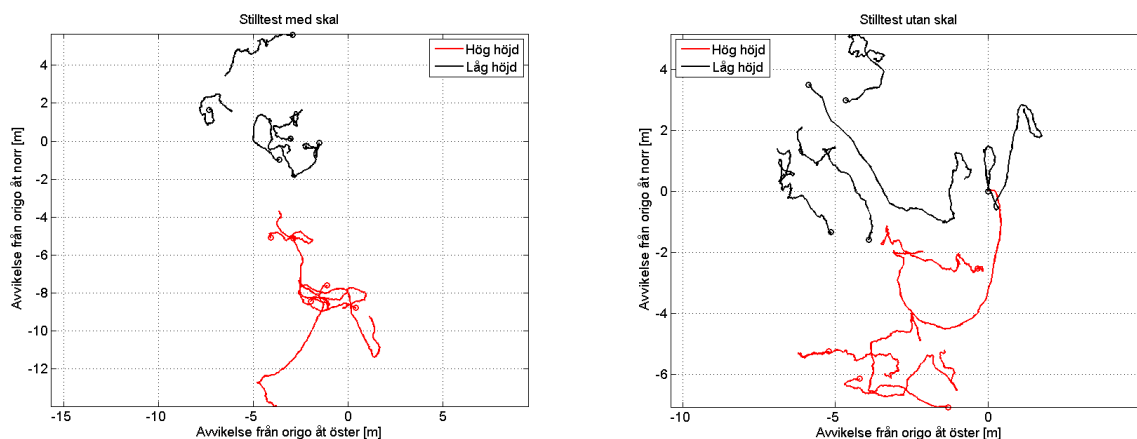
### 7.4.3 Skalets inverkan på positionsestimeringen

I Figur 7.6a visas positionsestimeringen då quadcoptern hade skal och i Figur 7.6b visas positionsestimeringen då quadcoptern inte hade skal. De röda graferna visar positionsestimeringen då quadcoptern var placerad på höjden 2,55 meter och de svarta då quadcoptern var placerad på marken. Observera att eftersom testerna utfördes på olika höjder är startpunkten olika för de tester som utfördes på hög höjd samt på markhöjd.

Oavsett höjd verkar resultaten med skal ha en något mindre spridning än resultaten för test utan skal. Eftersom endast fem tester har utförts av varje kombination åt gången kan hypotesen om bättre prestanda med skal inte säkerställas eftersom antalet tester varit för få. Spridningen är, oavsett om skal används eller inte, stor i förhållande till den, av Parrot, angivna noggrannheten. Testernas startpunkt och slutpunkt är olika för alla tester och positioneringen tenderade att driva kontinuerligt över den uppmätta tiden. Hastigheten med vilken positionsestimeringen förändrades uppvisade inga tydliga trender och inte heller felens riktningsektorer.

Eftersom tidigare utförda tester visar samma resultat dras slutsatsen att skalet inte

försämrar GPS-signalen. I det redovisade resultatet tycks positionsestimeringen variera mindre med skal men eftersom variationen fortfarande är stor samt att antalet tester är för få kan inga slutsatser dras huruvida användandet av skal skulle minska variationen av positionsestimeringen. Medelvärdet av signalstyrkan var 31,85 dB  $[C/N_o]$  utan skal och 31,91 dB  $[C/N_o]$  med skal. Signalstyrkan var något högre med skal men skillnaden är mycket liten och dessa två kan antas lika. Testresultaten visar också att det inte blir någon påverkan av signalstyrkan om skal används eller inte.



(a) **Test av GPS:ens positionsuppskattning vid stillastående test med skal.** Testerna på hög höjd respektive marknivå har olika startpunkter. Origo i figuren motsvarar en godtyckligt vald punkt från testdatan. Det är en orsak till varför testerna för de olika höjderna är samlade i olika delar av koordinatsystemet.

(b) **GPS:ens positionsuppskattning vid stillastående test utan skal.** Testerna på hög höjd respektive marknivå har olika startpunkter. Origo i figuren motsvarar en godtyckligt vald punkt från testdatan. Det är en orsak till varför testerna för de olika höjderna är samlade i olika delar av koordinatsystemet.

**Figur 7.6: Jämförelse av GPS:ens precision då den placeras på marknivå respektive 2,55 meter över marken.**

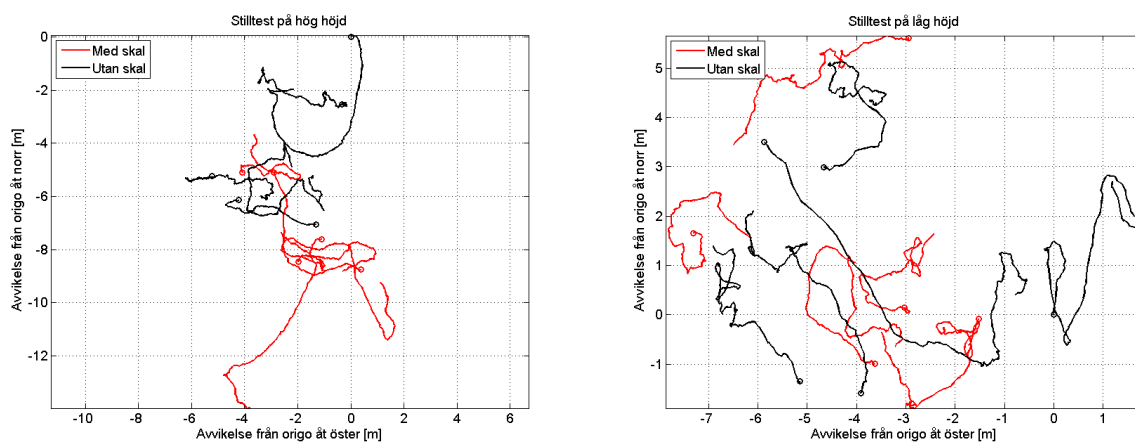
#### 7.4.4 Höjdens inverkan på positionsestimeringen

Vid test av höjdens inverkan på positionsbestämning påvisades ingen signifikant betydelse av quadcopterns placering i höjddled. I Figur 7.7a visas positionsestimeringen då quadcoptern är placerad på höjden 2,55 meter och i Figur 7.7b visas positionsestimeringen då quadcoptern är placerad på marknivå. Det test som resulterade i minst variation var då quadcoptern placerades på marken med skal. I de två figurerna anges resultat relativt samma origo för både med och utan skal.

Testernas startpunkt och slutpunkt är olika för alla tester och positioneringen tenderade att driva kontinuerligt över den uppmätta tiden. Hastigheten varmed positionsestimeringen förändrades uppvisade inga tydliga trender gällande förändringens riktning och storlek. Testresultaten på både höjd och marknivå hade merparten av

sina positionsangivelser inom ungefär lika stora områden.

Inte heller genom data från tidigare utförda tester kan någon skillnad mellan positionsestimeringen beroende på höjd urskiljas. Medelvärdet för signalstyrkorna vid positionsestimering på höjd var 31,77 dB  $[C/N_o]$  utan skal och 32,43 dB  $[C/N_o]$  med skal. Medelvärdet för signalstyrkorna vid test på markhöjd var 31,20 dB  $[C/N_o]$  utan skal och 31,66 dB  $[C/N_o]$  med skal. Testerna på högre höjd med skal var mycket bättre än de övriga med hänseende till signalstyrkan. Signalstyrkan har varit bra i alla tester och ökningen vid test på höjd med skal har därför troligtvis mindre betydelse. Trots den förbättrade signalstyrkan varierar inte positionsestimeringen mindre.



(a) GPS:ens positionsuppskattning vid stillastående test på 2,55 meters höjd. Alla tester utgår från samma origo.

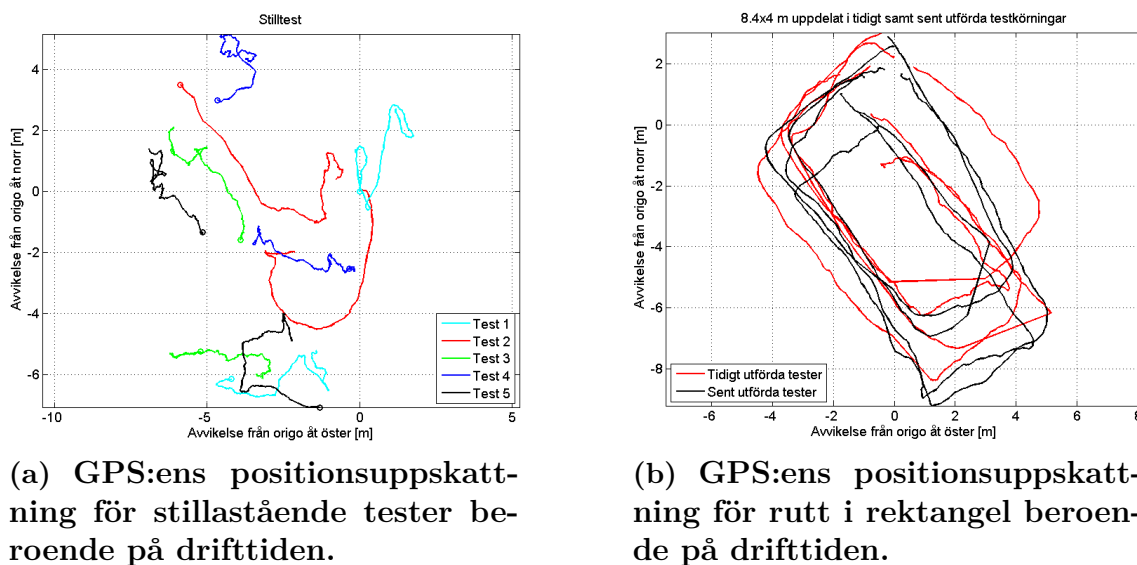
(b) GPS:ens positionsuppskattning vid stillastående test på marknivå. Alla tester utgår från samma origo.

Figur 7.7: GPS:ens positionsuppskattning vid stillastående test 2,55 meter över marken samt på marknivå.

#### 7.4.5 GPS:ens drifttidsinverkan på positionsestimeringen

Vid stilltester samt test i rörelse uppvisades ingen förändring av resultat beroende på hur länge GPS:en och quadcoptern varit aktiv. I alla resultat för stilltest och test i rörelse är testerna redovisade i kronologisk ordning. Test 1 är således det test som utfördes först och Test 5 det som utfördes sist.

I Figur 7.8a visas stilltester för olika driftstider. I Figur 7.8b visas tester i rörelse för olika driftstider. Testerna i rött är de två första testerna ur varje testserie och de svarta är de två sista. Resultatet visar att tiden som GPS och quadcopter varit aktiv inte påverkade resultatet i fallet då quadcoptern var stillastående.



(a) GPS:ens positionsuppskattning för stillastående tester beroende på drifttiden.

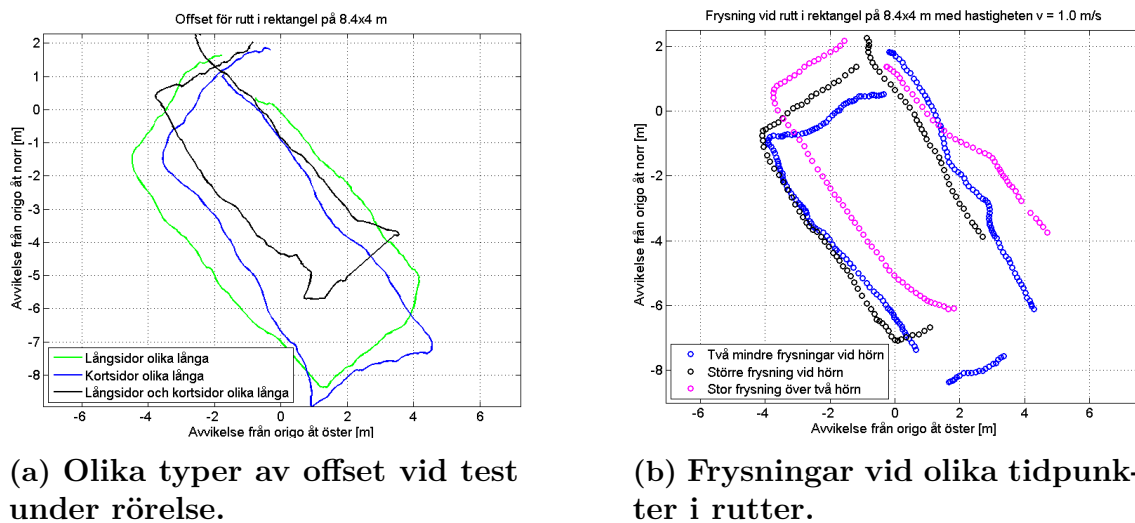
(b) GPS:ens positionsuppskattning för rutt i rektangel beroende på drifttiden.

Figur 7.8: Resultat beroende på drifttid i stillstående läge samt i rörelse.

#### 7.4.6 Andra begränsningar för positionsbestämning med GPS

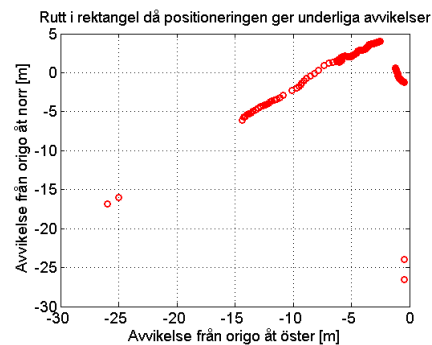
Två vanliga problem som uppkom under tester var offset och frysning av GPS-koordinater. För alla tester som utfördes i en rektangel borde slutpunkten vara vid samma punkt som startpunkten. Ett offset innebär att slutpunkten hade en avvikelse i något väderstreck. Offset kan också innebära att slutpunkten inte når fram till eller passerar startpunkten. Exempel på offset visas i 7.9a. Det kan bero på eventuella fördröjningar av registrerade positioner eller att start- och slutpositionen inte har registrerats på rätt ställe. Offset kan också innebära att slutpunkten hamnar vid sidan av startpunkten. Även i det fallet kan det bero på att start- och slutpositionen inte har registrerats på rätt ställe. I de tester som utfördes på kända positioner, som redovisas i avsnitt 7.4.2, ses lättare om en avvikande start- eller slutkoordinaten är skälet till avvikelsen. Även om resultaten var mer avvikande än för tidigare genomförda tester kunde det urskiljas att en avvikande start- eller slutkoordinat inte är enda orsaken till offset.

Frysning av GPS-positioner innebär att GPS:en inte uppdaterar sin position utan fortsätter att rapportera samma position trots att enheten har förflyttats. Problemet beror på GPS:en och dess kommunikation med systemet och satelliter. Exempel på frysning av GPS-positioner visas i Figur 7.9b. Ringarna visar vilka positioner som rapporteras från GPS-enheten. I varje rutt finns stora hopp mellan vissa ringar. Hoppen beror inte på att en plötslig förändring har skett utan snarare på att GPS-enheten har rapporterat samma position flera gånger och flera ringar är således placerade på varandra. Frysning av GPS-positioner påverkar mer vid körning i högre hastigheter eftersom quadcoptern då förflyttas en längre sträcka under en frystid. Det är även allvarligt vid svängar och kan påverka möjligheten att ta hänsyn till förbjudna flygzoner. I de tre fall som visas i Figur 7.9b hade frysningen lett till att quadcoptern inte höll sig inom avsökningsytan. Dessa frysningar var mycket vanligt förekommande och kunde vara upp till 10 sekunder.



Figur 7.9: Offset och frysningar vid test av GPS under rörelse.

I flera fall slutade GPS-enheten att ge korrekta koordinater. Enheten gav positioner endast inom ett mycket litet område trots att quadcoptern förflyttades över ett mycket större område. Positioner från GPS-enheten då ett sådant problem inträffat visas i Figur 7.10. Om detta hade skett under en rutt hade situationen lett till att quadcoptern skulle flugits utom kontroll. Det skulle inte heller gå att säkerställa att hela arean avsökts, flygfria zoner respekterats samt att ingen flygning utanför utsatt avsökningsyta skett.



Figur 7.10: Rutt i rektangel då GPS-enheten har stora avvikelser i sin positionering.

## 7.5 Ruttplanering och förbjudna flygzoner

De tre utförda testerna för den nya ruttplaneringsalgoritmen, med förbjudna flygzoner, visar på goda resultat. Samtliga nödflyttningar som var nödvändiga utfördes på rätt sätt och de noder, som var placerade centralt i zonerna, eliminerades. Utöver detta kontrollerades att inläsningen av ruten fungerade. Detta gjordes genom att kontrollera att rätt antal noder placerades ut över sökarean samt att placeringen på dessa var korrekt. Både i de förbjudna flygzonerna samt i hela avsökningsarean visade sig inläsningen fungera väl.

# 8

## Utvidgning av projekt

Eftersom kandidatarbetet syftade till att quadcopters och markörers positionsestimering skulle ske med användning av GPS istället för med *PTAM* ställdes höga krav på positionsestimeringens precision. Testresultat visar på bristande hårdvaruprestanda och slutsatsen drogs att projektets mål inte är uppnåeliga med den hårdvara som använts i projektet. En alternativ lösning var att utveckla en metod för att möjliggöra markördetektering efter avslutad flygrutt.

Den quadcopter som användes i denna del av projektet var en DJI Phantom 3 Advanced. Quadcoptern användes inte tillsammans med *ROS* och kontinuerligt informationsutbyte kan inte ske under avsökning. Quadcopters hårdvara är bättre än den som finns på en Parrot AR.Drone 2.0 och dessutom är kamerans prestanda, samt noggrannhet för sensordata, bättre. Dessutom är den mer robust och lämpar sig således bättre för flygning utomhus.

Positionsestimering av markörer sker med en helt ny metod. En quadcopter avsöker och filmar en fördefinierad avsökningsyta. Vid avsökning loggas även positionsdata. I efterhand behandlas den inspelade filmen och varje bildruta ur filmen behandlas enskilt och eventuella markörer i bildrutan detekteras. Bilder som innehåller markörer matchas mot insamlad positionsdata. Markörernas positioner i avsökningsområdet beräknas på samma sätt som beskrivs i avsnitt 3.3.

Metoden för att i efterhand kunna positionsestimera markörer utifrån insamlad film och loggdata sker i flera steg. Metoden läser in och tolkar loggdata genererad av DJI:n samt parar ihop loggdatan med bilder ur filmen som samlats in under en färdad rutt. Relevant positionsinformation som sparas under flygning är följande:

- Latitud
- Longitud
- Altitud
- Rotation i yaw-led
- Tid från start

Matchning av data sker genom att frekvensen för positionsdata, i detta fall 10 Hz, jämförs med frekvensen för bildupptagning. Det krävs även att en utgångstidpunkt väljs i loggfilen eftersom bildupptagning och positionsloggning inte startar samtidigt. Val av utgångstidpunkt väljs enkelt genom att drönarens operatör startar bildupptagning när drönaren startas.

# 9

## Diskussion

I det här kapitlet förs en diskussion över de resultat som redovisas i kapitel 7. Vidare diskuteras möjliga lösningar på de problem som testresultaten visar på. Dessutom ges rekommendationer för vad framtida arbete bör fokusera på.

### 9.1 Navigationsmetoder

I kandidatprojektet har navigationsmetoderna *PTAM* och GPS undersökts. I avsnittet diskuteras fördelar och nackdelar med metoderna.

#### 9.1.1 PTAM som navigationsmetod

Testresultat från avsnitt 7.1 visar att navigationsmetoden *PTAM* inte är lämplig för användning utomhus och riskerar dessutom att orsaka skada på personer och egendom. *ROAR* strävar mot att en quadcopter ska ta sig till och avsöka ett område för att detektera avfallsbehållare. Om *PTAM* ska användas måste dessa avsökningsytor ligga i direkt anslutning till quadcopterns startposition eftersom *PTAM* fungerar bäst då initieringen utförs manuellt på plats. Autonom initiering misslyckas ofta och är för osäker för att användas. Om quadcoptern initieras manuellt på plats kan likaväl personen som initierar *PTAM* identifiera sopbehållarna eftersom ytan ligger i direkt anslutning till startpositionen. När *PTAM* initierats måste quadcoptern hela tiden se de referenspunkter som skapats, vilket begränsar ytornas utformning. Det går inte att avsöka större ytor och quadcoptern kan inte svänga runt hörn eftersom samma objekt som funktionen initieras mot måste vara synliga under hela avsökningsområdet. Dessa begränsningar minskar betydelsen av *PTAM*:s främsta fördel: att kunna initieras var som helst utan att ha tidigare information om området.

För att funktionen ska hinna identifiera de referenspunkter som initieras i varje ny bild måste hastigheten varmed quadcoptern flyger hållas låg. För att navigeringsmetoden ska fungera bra krävs att flera objekt är placerade på olika avstånd i kameravyn. Det ska helst finnas objekt som är placerade ganska nära quadcoptern, men också objekt placerade på olika avstånd som med fördel har en utformning med många kanter som är enkla att identifiera. Det är inte troligt att quadcoptern kommer användas i miljöer med denna utformning när den används i projektet *ROAR*.

Vindpustar, solljus, reflektioner och rörliga objekt leder till att *PTAM* kan tappa skapade referenspunkter. Funktionen är inte anpassad för att användas i miljöer

som är föränderliga. När *PTAM* tappas sina referenspunkter försöker systemet hitta dessa igen. Ibland tror *PTAM* att den återfunnit sina referenspunkter men om dessa är fel börjar den hastigt åka iväg åt något håll. Detta kan även hända när *PTAM* inte återfinner sina referenspunkter och quadcoptern kan vid dessa tillfällen skada personer allvarligt. Det är inte lämpligt att använda ett system som förlorar sin navigationsförmåga när solen kommer fram runt en husknut eller när något objekt rör sig i synområdet, i synnerhet inte när systemet ska användas i områden där människor befinner sig.

### 9.1.2 GPS som navigationsmetod

GPS är en välutvecklad metod för utomhusnavigering som används flitigt för att positionsbestämma objekt i rörelse [31]. Då det dessutom fanns en tillhörande GPS-enhet till quadcoptern Parrot AR.Drone 2.0 ansågs GPS vara en intressant navigationsmetod att undersöka.

Att GPS:en inte skulle visa helt korrekta resultat var väntat då produktspecifikationen anger en noggrannhet motsvarande två meter. Det huvudsakliga syftet med utförda tester var att utreda huruvida det är möjligt att filtrera signaler för att uppnå bättre precision. Om felet hade varit statistiskt eller varierat enligt någon form av mönster hade reglering kunnat motverka dessa avvikelser. Testdata visar dock att positionsuppskattningen varierar upp till drygt 23 meter då quadcoptern står helt still. Riktningen för dessa avvikelser varierar hela tiden och några samband eller tendenser har inte kunnat identifieras, se Figur 7.7a och 7.7b. Vid tester i rörelse syns det att GPS:en under vissa tidsperioder, ibland upp till 10 sekunder, upphör att rapportera sin position, se Figur 7.8b. Vid den högre hastigheten 1 m/s orsakar dessa uppehåll stora glapp i positionsuppskattningen, vilket beror på att quadcoptern förflyttats en viss sträcka utan att ha rapporterat sin position. Dessa glapp i datan minskade då hastigheten sänktes till 0,5 m/s, men vid denna hastighet visade GPS:ens positionsuppskattning på en större variation.

Vid användning i *ROAR* kommer avsökning av område troligtvis inte ske i öppna ytor. De tester som visade på sämst resultat utfördes i tätbebyggd miljö, medan de bästa testerna utfördes på ett öppet fält, något som gäller såväl för stillastående tester som för tester i rörelse. En trolig anledning till detta är så kallade flervägsfel som uppstår då fasta föremål hindrar signalen att ta den kortaste vägen till mottagaren. Vid sådana fall reflekteras signalen, en eller flera gånger, innan den når mottagaren. Därav genereras en tidsfördröjning som skapar en felaktig GPS-positionering [32].

Vid analys av testdatan konstaterades att GPS:ens uppdatering släpar med ett par sekunder, vilket yttrade sig framförallt under test i rörelse där det under samtliga försök fanns ett glapp i slutet av varvet. För att åtgärda detta hölls quadcoptern stilla på slutdestinationen under två sekunder, något som visade sig vara tillräckligt för att GPS:ens positionsuppskattning skulle visa på en förflyttning av quadcoptern runt hela rektangeln. Detta måste beaktas vid navigering då en uppskattning av quadcoptern position bör utföras för att inte få stora positionsestimeringsfel vid

höga hastigheter.

En diskussion gällande metoder för filtrering av GPS-signalen är nödvändig. Under projektets gång har fokus legat på att, för positionering, använda en simpel filtrering för den råa data som skickas från enheten. Att endast titta på obehandlad data tros vara ett alltför naivt tillvägagångssätt. Då quadcoptern som använts även är utrustad med accelerometer hade ett lämpligt tillvägagångssätt varit att behandla GPS-data tillsammans med data från accelerometern. En tänkbar metod är att bortse från den GPS-data som enligt data från accelerometern tyder på en allt för stor förflyttning.

För behandling av enbart GPS-data tyder efterforskning på att filtrering genom ett så kallat Kalmanfilter är en användbar metod för att erhålla bättre precision [33]. Ett Kalmanfilter eller någon annan form av filtrering med matematiska metoder utfördes aldrig i kandidatprojektet. GPS-datan är mycket varierande och har stora avvikelser. Ett filter som behandlar båda GPS- och accelerometerdata har potential att motverka dessa avvikelser. Men att uppnå den precision som krävs när GPS-enheten emellanåt upphör att uppdatera i upp till 10 sekunder, samtidigt som accelerometerens precision varierar med upp till 50 mg, skulle vara mycket svårt. Dessutom anses det onödigt att skapa ett filter för den GPS-enhet, Parrot Flight Recorder, som användes eftersom enheten är anpassad till den quadcopter som användes, Parrot AR.Drone 2.0, som anses ha för bristfällig hårdvara för att kunna användas i *ROAR*.

Trots de brister som visats gällande GPS:ens precision tros ändå tekniken vara tillämpbar för ändamålet. Genom efterforskning har det visat sig att det finns tekniker för att förbättra precisionen av positionsbestämning med GPS. Dessa tekniker listas nedan:

- **RTK** är en teknik som bygger på att en fast referensstation med GPS-mottagare sätts ut på en känd position. För positionsestimering av, i det här fallet, quadcoptern beräknas den relativa positionen gentemot referensstationen. Genom denna typ av mätning minskar mätosäkerheten till ett fåtal centimeter. Det största problemet med denna teknik är att referensstationen måste upprättas inför varje användningstillfälle [34].
- **Nätverks-RTK** är en metod som är vidareutvecklad från *RTK*. Metoden fungerar likadant som vanlig *RTK*, med skillnaden att GPS-mottagaren mäter sin relativa position utifrån ett flertal permanent utsatta referensstationer. Fördelarna med Nätverks-*RTK* kontra vanlig *RTK* är att referensstationerna redan är installerade då mätning ska påbörjas samt att GPS-mottagarens relativa position beräknas med hjälp av flera referensstationer samtidigt [34]. Dock ställs en del krav på GPS-mottagaren för att den ska vara kompatibel med nätverks-*RTK*, bland annat måste mottagaren vara uppkopplad via *GSM* eller *GPRS*, vilket kräver en uppgradering av GPS-enhet. Med denna teknik uppnås en noggrannhet ned mot ett fåtal centimeter [35].

- **DGPS** är en teknik som liknar *RTK*, i avseende att mottagaren korrigerar mot referensstationer. Skillnaden är att *DGPS* är mottaglig endast för bärvågsfrekvensen L1, medan både *RTK* och nätverks-*RTK* använder sig av frekvenserna L1 och L2, se avsnitt 3.1. Således uppnås inte lika hög precision med *DGPS* som med *RTK* [18]. Med *DGPS* kan en noggrannhet motsvarande 30 centimeter uppnås, att jämföra med nätverks-*RTK* där precisionen ligger i spannet 1-2 centimeter [30][35].

Anledningen till att ovan nämnda tekniker inte använts i kandidatarbetet är dels att tillgång till referensstation ej funnits samt att quadcoptern inte är utrustad med en *GSM*- eller *GPRS*-enhet.

### 9.1.3 Andra navigationsmetoder

Användning av referensmarkörer är ett sätt att förbättra precisionen för positionsbestämning. Tillämpningen sker genom att mäta ut exakta positioner och placera referensmarkörer på dessa. Då quadcoptern detekterar en referensmarkör korrigeras positionsestimeringen relativt markören. I framtiden kan referensmarkörer ersättas av objektigenkänning där referenser utgörs av fasta objekt som till exempel byggnader. I [36] har tester utförts där en markgående robot navigerats längs en 5,5 kilometer lång väg med hjälp av bildigenkänning, och gjort detta med bättre precision än GPS. Testresultaten som erhållits i detta kandidatarbete påvisar en oavbruten variation av angiven position. Med detta i åtanke måste referenser vara placerade med väldigt korta avstånd från varandra om inte en mer exakt metod för positionsbestämning under flygning mellan referenser används.

En annan, historiskt välanvänd, metod är så kallad död räkning vilket innebär att aktuell position avgörs genom att beräkna hur lång sträcka fordonet förflyttats. Denna beräkning görs genom multiplicering av hastighet och tid där riktningen bestäms med hjälp av en kompass [37].

En tillämpning av död räkning är tröghetsnavigering där hastigheten uppskattas med accelerometrar och riktningen bestäms med gyroskop [38]. Enligt undersökningar och beräkningar kräver detta hög precision på såväl accelerometrar som gyroskop [39]. För Parrot AR.Drone 2.0 är precisionen för accelerometern  $\pm 50 \text{ mg}$ , vilket motsvarar cirka  $0,49 \text{ m/s}^2$ , se ekvation 9.1. Detta medför att quadcopterns hastighetsuppskattning efter 10 sekunder har en felmarginal motsvarande  $4,9 \text{ m/s}$ , se ekvation 9.2. Vid samma tidpunkt är noggrannheten för quadcopterns positionsuppskattning  $24,5 \text{ meter}$ , se ekvation 9.3.

$$|a(x, y, z)| = 50 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 = 0,4905 \text{ m/s}^2 \quad (9.1)$$

$$|v(x, y, z)| = \int_0^{10} 0,4905 \text{ dt} = [0,4905 \cdot t]_0^{10} = 4,905 \text{ m/s} \quad (9.2)$$

$$|s(x, y, z)| = \int_0^{10} 0,4905 \cdot t \text{ dt} = \left[ \frac{0,4905 \cdot t^2}{2} \right]_0^{10} = 24,525 \text{ m} \quad (9.3)$$

Således blir det med dessa feluppskattningar problematiskt att tillämpa denna typ av navigationsmetod. Oavsett vilken noggrannhet sensorerna har kommer det potentiella felet växa med tiden. Då riktningen för felet varierar blir det också svårt att kompensera för felmarginalen. Däremot hade navigationsmetoden varit möjlig att använda om quadcoptern var utrustad med en precis hastighetsmätare. Felet hade trots det växt med tiden men däremot inte exponentiellt med tiden i kvadrat.

## 9.2 Ruttplanering och förbjudna flygzoner

Testerna som utfördes avseende ruttplaneringsalgoritmen visade goda resultat. Då startpunkten var nedre vänstra hörnet, den punkt som tidigare ruttplanering alltid använde som utgångspunkt, fungerade den nya algoritmen som ruttplaneringen i [14] om inga förbjudna flygzoner definierats. Resultatet var förväntat eftersom båda algoritmerna syftar till att minska antalet riktningssändringar.

Valet att representera sökarean som en graf ökade möjligheten för olika ruttplaneringsalgoritmer. Det förenklar inte bara undersökning av hela arean, utan skapar även möjligheten att utnyttja välbeprövade algoritmer för ruttplanering mellan två specifika noder, vilket är användbart när förbjudna flygzoner försvårar rutten. Då en graf inte är bunden till någon specifik form kan dessutom utformningen av sökarean utökas till valfri figur. Det enda som skulle behöva ändras för att möjliggöra andra former är genereringen av de noder som representerar sökarean.

Ruttplaneringen som utvecklades fungerar dock inte alltid som förväntat i samband med förbjudna flygzoner. Detta då noder som flyttas, eller genereras på nytt, inte alltid är i linje med dess tidigare grannar. När en nod inte är i linje med dess grannar minskar prioriteterna att den besöks ty att resa till en sådan nod alltid innebär en riktningssändring. Problemet kan minimeras genom att prioritera förflyttning och skapande av noder så att riktningssändringar ej är nödvändiga.

Införandet av förbjudna flygzoner är en möjlighet för att definiera mer komplexa avsökningsytor. I framtiden skulle ytor kunna definieras på digitala kartor, där även geometrisk utformning av ytorna kan varieras. Förbjudna flygzoner skulle också kunna lagras i en databas. Med hjälp av databasen behöver endast avsökningsytan definieras en gång och man slipper att återigen definiera förbjudna flygzoner. Det skulle både underlätta och spara tid för användare då avsökningsområdena troligtvis kommer avsökas regelbundet. Förbjudna flygzoner anses därmed ha många användningsområden.

## 9.3 Avsökningshöjd

Utifrån testresultaten som presenteras i avsnitt 7.2 framgår att en avsökningshöjd betydligt högre än de 1,5 meter, som använts i [14], är tillämpningsbar. Att öka

avsökningshöjden har flera fördelar, speciellt om det tilltänkta användningsområdet i *ROAR* beaktas. Att flyga på 1,5 meters höjd innebär stor kollisionsrisk med människor såväl som med andra vanliga föremål, exempelvis bilar. Att öka höjden eliminerar många av dessa kollisionsrisker, och minskar dessutom antalet förbjudna flygzoner som måste respekteras. Dessutom kan avsökningruttens sträcka, och därmed också tid, förkortas då kameran i varje bildruta fångar en större markyta. Vid avsökning på en högre höjd skulle även ljud från drönaren, som av omgivningen kan upplevas som störande, minska.

För den i projektet tillämpade hårdvaran bestäms höjden med en ultraljudssensor. Detta är fördelaktigt ur precisionssynpunkt då felet för positionsuppskattningen är väldigt litet. Av testresultaten för ultraljudssensorn, presenterade i avsnitt 7.3, framgår att felet av sensorns feluppskattning ökar vid högre höjd, men aldrig är större än en decimeter vid höjder upp till fyra meter. Problemet med användning av en ultraljudssensor är att quadcopterns altitud kommer ökas automatiskt när föremål interfererar med ultraljudsignalen. Detta fel anses dock enkelt att kompensera för.

## 9.4 Förbättringsförslag

I det här avsnittet diskuteras potentiella förbättringar gällande navigationsmetoder, ruttplanering, förbjudna flygzoner samt hårdvara.

### 9.4.1 Navigationsmetoder

Resultaten som erhöles från genomförda tester för GPS:ens precision, presenterade i avsnitt 7.4, visade på stora fel. Som diskuteras i avsnitt 9.1.2 förväntas användandet av obehandlad GPS-data vara ett alltför naivt tillvägagångssätt. Bland de lösningar som presenterades anses metoden där GPS- och sensordata filtreras, med exempelvis ett Kalmanfilter, vara den mest aktuella då den inte ställer krav på specifik hårdvara. Genom att kombinera denna lösning med referenser tros en hög precision vara möjlig.

### 9.4.2 Ruttplanering och förbjudna flygzoner

Både sökarean och de förbjudna flygzonerna består av rektangulära ytor. För att skräddarsy avsökningsprocessen bör avsökningsarean och de förbjudna flygzonerna kunna anta andra geometriska former. Ruttplaneringen kan utvidgas för att kunna ta hänsyn till fler variabler för att effektivisera avsökningen. I dagsläget fungerar ruttplaneringen så att quadcoptern, om det är möjligt, ska fortsätta i samma riktning. Genom att värdera nodgrannarna utförligare med avseende på total avsökningstid eller avsökningssträcka finns det möjligheter att förbättra ruttplaneringen avsevärt. Med avseende på testresultat i avsnitt 7.2 och 7.3 samt den diskussion som förs i avsnitt 9.3 bör avsökningshöjden ökas vid framtida arbete.

### 9.4.3 Hårdvara

Precisionen av positionsestimeringen beror på de sensorer och navigationssystem som används. Quadcoptern som användes har inexakta sensorer och ska helst flygas i vindstilla förhållanden. Den har dessutom en drifttid på enbart sju minuter och måste vara nära styrdatorn på grund av begränsningar av Wi-Fi-räckvidd. Den in-exakta GPS-enhet har valts enbart av anledning att den är byggd för quadcoptern. Att byta både quadcopter och GPS-enhet hade möjliggjort både bättre positionsestimering, användning i mer varierande väderförhållanden samt avsökning av större ytor.

### 9.4.4 DJI Phantom 3 Advanced

Som beskrivs i kapitel 8 påbörjades arbete med en annan quadcopter, DJI Phantom 3 Advanced, i slutet av projektet. Användningen av denna skiljer sig på flera punkter jämfört med Parrot AR.Drone 2.0.

En anledning till att denna quadcopter användes är att den kan flyga upp till fem kilometer från styrdatorn [40], vilket lämpar sig bättre för syftet med *ROAR*. Då en länk mellan styrdatorn och quadcoptern inte kan säkerställas över så pass långa sträckor behöver quadcoptern istället spara all positionsdata samt bildupptagning, för att sedan positionsbestämma eventuella markörer efter utförd avsökning. En lösning som denna, givet att quadcoptern kan följa en förutbestämd rutt utan kontakt med styrdatorn, har stora fördelar eftersom större ytor då kan avsökas.

# 10

## Slutsats

Under projektets gång har betydande hårdvaruproblem uppkommit vilket lett till att quadcopters funktionalitet begränsats. Resultatet ligger därför inte i linje med vad som från början var tilltänkt.

Gällande implementeringen av GPS som huvudsaklig positionsestimat försvårades genomförandet av en alltför oprecis hårdvara. Metoden för positionsbestämning av quadcopter och således även av markörer var därmed otillräcklig och orsakade felaktigheter vid avsökning, vilket inneburit att en komplett flygning inte kunnat genomföras. Däremot förväntas GPS som positionsestimat, i samverkan med andra sensorer, fungera om kraven på en mer precis hårdvara uppfylls.

Den algoritm för ruttplanering som utvecklades under projektet har möjliggjort att på ett enkelt sätt kunna ta hänsyn till förbjudna flygzoner, samtidigt som hela det tillåtna sökområdet avsöks. Målet att i avsökningsområdet kunna definiera förbjudna flygzoner har således uppfyllts.

Den alternativa lösning som framarbetades under slutskedet av projektet och som bygger på att efter genomförd avsökning positionsbestämma markörer, förväntas även den fungera väl. Men även denna metod ställer krav på hårdvarans möjlighet för positionsbestämning.

Trots att ingen komplett flygrutt kunnat genomföras ses ändå möjligheten att använda en quadcopter för autonom avsökning av ett fördefinierat område som fullt möjligt. Konceptet *ROAR* tros ha god potential om vidare utveckling görs där lämplig hårdvara tillföres.

# Litteraturförteckning

- [1] International Federation of Robotics. Industrial robot statistics, 2015. <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>, Hämtad 2016-02-04).
- [2] ltu. Smarta maskiner och material. <http://www.ltu.se/research/areas-of-excellence/smart-machines-and-materials> (hämtad 2016-05-16).
- [3] Viktor Mölne. Explosionsartad försäljning av drönare, 2015. <http://www.di.se/artiklar/2015/2/6/explosionsartad-forsaljning-av-dronare/>, (hämtad 2016-02-05).
- [4] Al Jazeera. Most killed by us drones were not targeted, 2015. <http://www.aljazeera.com/news/2015/10/killed-drones-targeted-intercept-report-usa-afghanistan-somalia-yemen-151015193.html> (hämtad 2016-02-04).
- [5] Åsa Hedberg. Här kan du se natos nya drönare tillverkas, 2015. <http://www.di.se/artiklar/2015/6/18/har-kan-du-se-natos-nya-dronare-tillverkas/> (hämtad 2016-02-04).
- [6] Beth Stevenson. Swedish army evaluated mali uav deployment, 2015. <https://www.flightglobal.com/news/articles/swedish-army-evaluates-mali-uav-deployment-418264/> (hämtad 2016-02-04).
- [7] Jason Dorrier. Watch how robots and drones are transforming wild-life documentaries, 2014. <http://singularityhub.com/2014/03/26/watch-how-robots-and-drones-are-transforming-wildlife-documentaries/> (hämtad 2016-02-04).
- [8] Aerial Images. What is a drone and some common uses for uav drones, 2013. <http://aerialimagesuk.com/index.php?p=articles-uav-drones-common-uses> (hämtad 2016-02-04).
- [9] Transportstyrelsen. Drönare. <https://www.transportstyrelsen.se/sv/luftfart/Luftfartyg-och-luftvardighet/Obemannade-luftfartyg-UAS/> (hämtad 2016-02-04).
- [10] Pelle Zettersten. Drönaren - en mångsidig hjälpreda, 2014. <http://sverigesradio.se/sida/artikel.aspx?programid=415&artikel=5880791> (hämtad 2016-02-04).
- [11] Ulla Karlsson-Ottosson. Drönare skall inspektera vindkraftverk till havs, 2016. [http://www.nyteknik.se/nyheter/energi\\_miljo/vindkraft/article3959197.ec](http://www.nyteknik.se/nyheter/energi_miljo/vindkraft/article3959197.ec) (hämtad 2016-02-04).
- [12] Jonas Ryberg. Autonoma drönare räddar nödställda i alperna, 2016. <https://summa.talentum.se/article/dt/nyheter/>

- autonoma-dronare-raddar-nodstallda-i-alperna/252722 (hämtad 2016-02-04).
- [13] Jesse Stafford. How a quadcopter works, 2014. [http://ffden-2.phys.uaf.edu/webproj/212\\_spring\\_2014/Clay\\_Allen/clay\\_allen/works.html](http://ffden-2.phys.uaf.edu/webproj/212_spring_2014/Clay_Allen/clay_allen/works.html) (hämtad 2016-05-09).
- [14] Henrik. Widmann Dominik. Wikander Lukas. Lindelöw, Markus. Olsson. Marker detection and autonomous flight using quadcopter mounted cameras. <http://www.slideshare.net/LukasWikander/marker-detection-and-autonomous-flight-using-quadcopter-mounted-cameras> (hämtad 2016-02-04), 2015.
- [15] Parrot. Parrot ar.drone 2.0, 2015. <http://ardrone2.parrot.com> (hämtad 2016-02-25).
- [16] R. Bajaj. Gps: location-tracking technology. *Computer*, 35(4):92 – 94, apr 2002.
- [17] Dennis. Aksberg. Gps, navigering med stor precision, 1999. [http://people.kth.se/~e98\\_dak/gps/](http://people.kth.se/~e98_dak/gps/) (hämtad 2016-05-10).
- [18] Olofsson Andreas. Ahrenberg, Magnus. En noggrannhetsjämförelse mellan nätverks-rtk och nätverks-dgps, 2005. [https://www.lantmateriet.se/globalassets/kartor-och-geografisk-information/gps-och-matning/geodesi/rapporter\\_publicationer/rapporter/lmv-rapport\\_2005\\_3\\_exjobb\\_ahrenberg\\_olofsson.pdf](https://www.lantmateriet.se/globalassets/kartor-och-geografisk-information/gps-och-matning/geodesi/rapporter_publicationer/rapporter/lmv-rapport_2005_3_exjobb_ahrenberg_olofsson.pdf)(hämtad 2016-05-10).
- [19] Navigation National Coordination Office for Space-Based Positioning and Timing, 2016. <http://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/> (hämtad 2016-05-10).
- [20] Matematiska Vetenskaper. Minsta-kvadratmetoden - analys och linjär algebra, del c, k1/kf1/bt1, vt10, 2010. <http://www.math.chalmers.se/Math/Grundutb/CTH/tmv036c/0910/Studio/minstakvadrat.pdf> (hämtad 2016-04-18).
- [21] CHRobotics. Understanding quaternions. <http://www.chrobotics.com/library/understanding-quaternions>(hämtad 2016-05-09).
- [22] Topics, 2016. <http://wiki.ros.org/Topics> (hämtad 2016-02-03).
- [23] Jakob Engel, Jürgen Sturm, and Daniel Cremers. Scale-aware navigation of a low-cost quadcopter with a monocular camera. *Robotics and Autonomous Systems*, 62(11):1646 – 1656, 2014. Special Issue on Visual Control of Mobile Robots.
- [24] qrcode.com. Qr code features, 2010. <https://archive.is/20120915040047/http://www.qrcode.com/en/qrfeature.html> (hämtad 2016-05-13).
- [25] Uco.es. Aruco: a minimal library for augmented reality applications based on opencv. <http://www.uco.es/investiga/grupos/ava/node/26> (hämtad 2016-05-13).
- [26] Charles Karney. GeographicLib, 2015. <http://geographiclib.sourceforge.net/> (hämtad 2016-04-13).
- [27] H Vermeille. Direct transformation from geocentric coordinates to geodetic coordinates. *Journal of Geodesy*, 76(8):451–454, 2002.
- [28] GeographicLib. Geocentric coordinates, 2015. <http://geographiclib.sourceforge.net/html/geocentric.html> (hämtad 2016-04-13).

- 
- [29] Joe. Malkevitch. Sales and chips. <http://www.ams.org/samplings/feature-column/fcarc-tsp> (hämtad 2016-05-16).
- [30] Lantmäteriet. Ordlista. <http://www.lantmateriet.se/sv/Fastigheter/Andra-fastighet/Ordlista/#D> (hämtad 2016-05-10).
- [31] Nationalencyklopedin. Gps. <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/gps> (hämtad 2016-05-17).
- [32] Lantmäteriet. Felkällor vid gnss-mätning. <https://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/GPS-och-geodetisk-matning/GPS-och-satellitpositionering/Metoder-for-GNSS-matning/Felkallor-vid-GNSS-matning/> (hämtad 2016-04-26).
- [33] Larry J. Levy. The kalman filter: Navigation's integration workhorse. <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/Levy1997/index.html> (hämtad 2016-05-15).
- [34] Lantmäteriet. Rtk. <https://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/GPS-och-geodetisk-matning/GPS-och-satellitpositionering/Metoder-for-GNSS-matning/RTK/> (hämtad 2016-05-02).
- [35] Lantmäteriet. Nätverks-rtk. <https://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/GPS-och-geodetisk-matning/GPS-och-satellitpositionering/Metoder-for-GNSS-matning/Natverks-RTK/> (hämtad 2016-05-02).
- [36] Vig Eleonora. Scheirer-Walter. Milford, Michael. and David. Cox. Vision-based simultaneous localization and mapping in changing outdoor environments. *Journal of Field Robotics*, 31(5):780 – 802, 2014. Special Issue on Field and Service Robotics.
- [37] Utterström Bengt. Ramberg, Sten. Fritidsskepparen: Navigation och sjömanskap för förar- och kustskepp, 2011. <https://books.google.se/books?id=LWVQAgAAQBAJ&pg=PA171&lpg=PA171&dq=död+räkning+kompass&source=bl&ots=du95H6n4W6&sig=Qae2nuv0gjdgnVRRUuadjxD3Fn8&hl=sv&sa=X&ved=0ahUKEwjfi8fvkNLMAhVLiCwKHXESC5AQ6AEIRTAH#v=onepage&q=död%20räkning%20kompass&f=false>, (hämtad 2016-05-11).
- [38] Nationalencyklopedin. Tröghetsnavigering. <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/tröghetsnavigering> (hämtad 2016-05-02).
- [39] CH Robotics. Using accelerometers to estimate position and velocity. <http://www.chrobotics.com/library/accel-position-velocity> (hämtad 2016-05-02).
- [40] DJI.com. Phantom 3 advancedspecs, 2016. <http://www.dji.com/product/phantom-3-adv/info#specs>, (hämtad 2016-05-15).



# A

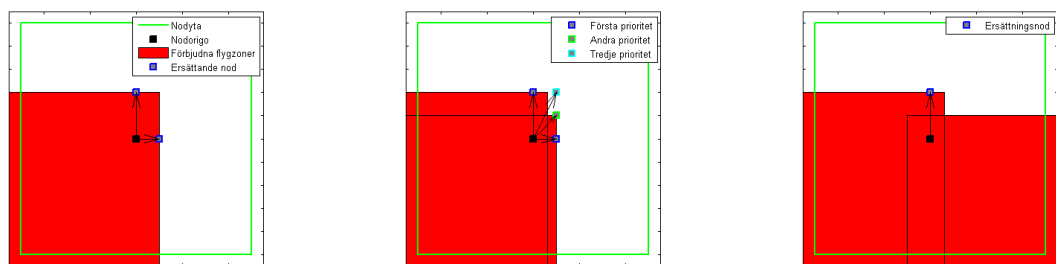
## Flytt av nodplacering

Varje nod kontrolleras med en procedur. En nod kontrolleras mot alla förbjudna flygzoner. Förbjudna flygzoner som interfererar placeras i listor beroende på hur de interfererar med noden. En flygzon kan interferera på sju olika sätt, dessa är från ett hörn, över två hörn, från en sida utan att interferera med hörn, genom en nod utan att interferera med hörn, i en nod utan att interferera med ett hörn samt över hela noden. Dessa kategorier delas in i underkategorier beroende på vilket hörn samt med vilken sida flygzonen interfererar med noden. En förbjuden flygzon interfererar med en nod om nodens origo ligger i den förbjudna flygzonen. Om nodens origo ligger på kanten av en förbjuden flygzon är inte nodens origo i zonen. Förbjudna flygzoner som ligger i en nods tänkta avsökningsyta men inte interfererar med origo påverkar inte nodens placering. Det påverkar dock vägen en quadcopter kan färdas mellan noder. Vägarna mellan noder behandlas separat och redovisas i 5.1.1.

Efter alla flygfria zoner har undersöks behandlas noders placeringar. Noder undersöks om ytor har detekterats som interfererar med ett hörn, med två hörn samt om ytor som från sidan. I vissa fall skapas fler noder för att avsöka kvarvarande yta. I Figur A.1a och A.1b är en eller flera flygfria zoner placerade över ett hörn. Metoden försöker i första hand placera två nya noder i motsatta riktningar mot hörnets placering i förhållande till noden. Om hörnet som interfererar med flygzoner är ner till höger kommer således två nya noder placeras ovanför och till vänster om zonerna. Om de nya noderna placeras på detta sätt kommer hela den kvarvarande yta i noden som ska avsökas täckas. Om minst en av de nya noderna inte går att placera på önskad position kommer algoritmen försöka placera en nod i ett hack mellan noderna, på samma sätt som noden med andra prioritet är placerad i Figur A.1b. Om denna nod interfererar med flygzoner görs ett sista försök att placera en nod på den maximala punkt alla interfererande zoner skulle kunna täcka noden. Dessa noder visas som prioritet 3 i Figur A.1b.

Då två av nodens hörn interfererar med förbjudna flygzoner placeras den nya noden på samma sätt. Två av nodens hörn kan interfereras av två olika förbjudna flygzoner interfererar två olika hörn, en enskild zon som interfererar med två hörn, alternativt en kombination av dessa. Noden flyttas längs med en axel bort från de interfererande zonerna tills placeringen är precis utanför de förbjudna flygzonerna. I Figur A.1c interfereras de två nedre hörnen med förbjudna flygzoner. Den nya noden placeras därför ovan den gamla noden.

Då tre av en nods hörn interfererar med förbjudna flygzoner placeras den nya noden



(a) En flygfri zon interfererar med ett hörn.

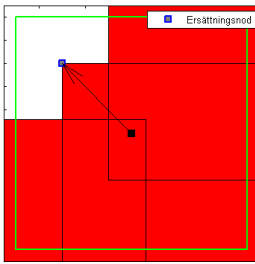
(b) Två flygfria zoner interfererar med ett hörn.

(c) Flera flygfria zoner interfererar med två hörn.

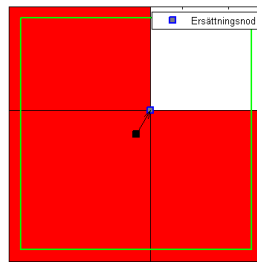
**Figur A.1: Flygfria zoner interfererar med en mindre del av en nod.**

på samma sätt. Tre hörn kan interfereras av olika flygzoner, en enskild zon interfererar med två hörn samt ytterligare en zon med ett annat hörn, alternativt en kombination av dessa. Metoden hittar det x- respektive y-värde som är närmst det hörn som flygzonen inte interfererar med. Eftersom zoner täcker minst 75% av ytan räcker det att placera en nod innanför den kvarvarande tänka sökytan för noden. I Figur A.2a och A.2b är tre hörn täckta av förbjudna flygzoner. Om zonen som täcker hörnet nere till väster hade passerat längre förbi origo, så som i Figur A.2a, hade den nya noden placerats på dess hörn upp åt höger. Om zonen inte passerar längre förbi origo är de andra förbjudna flygzonerna hamnar den ersättande noden som i A.2b.

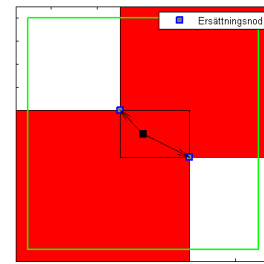
Om två av nodens hörn interfererar med förbjudna flygzoner och dessa ligger diagonalt gentemot varandra kommer två noder placeras ut som ersättning. Det krävs två noder för att täcka hela den kvarvarande ytan som ska avsökas. I Figur A.2c har hörnet uppe på höger sida samt hörnet nere på vänster sida täckts av förbjudna flygzoner. Två nya noder placeras som ersättning. Den ena placeras under de flygfria zonerna som interfererar med hörnet uppe på höger sida och till höger om de förbjudna flygzonerna som interfererar med hörnet i vänster nederkant. Den andra noden placeras på andra sidan av den ursprungliga noden med samma hänsyn till de förbjudna flygzonerna.



(a) Tre hörn interfereras av flygfria zoner. Zoner som interfererar med hörnet diagonalt mot det fria hörnet avgör nodens placering.



(b) Tre hörn interfererar med flygfria zoner. Zoner som interfererar med de hörn till vänster och nedanför det fria hörnet avgör nodens placering.



(c) Två hörn diagonalt mot varandra interfererar med flygfria zoner. Två ersättande noder placeras för att täcka den kvarvarande ytan.

**Figur A.2: Flygfria zoner interfererar med en större del av en nod.**

Metoden behandlar upp till två ytor i varje hörn. Den hanterar även fler än två hörn om resterande interfererande flygzoner helt kan täckas av en annan förbjuden flygzon. Då påverkar inte dessa ytor hur noden ska placeras och dessa bortses från.

Alla nya noder som skapas kontrollerar ytterligare en gång. De nya noderna tas bort om de interfererar med andra förbjudna flygzoner. Dessa flygzoner kan vara mindre zoner som ligger emellan noder. Om en nod blir placerad på ett sådant sätt att den inte behövs tas den också bort. Det kan till exempel vara att den ersättande noden i Figur A.2a placeras upp i högra hörnet. Om en nod placeras där betyder det att nodens syfte, att avsöka resterande yta av noden som inte är täckt av förbjudna flygzoner, är meningslös eftersom det inte finns någon yta kvar att avsöka. I alla fall då en nod inte kan placeras skapas ett nodnät över nodens yta och om möjligt väljs den nod som ligger närmst den ursprungliga nodens origo som ersättning. Metoden beskrivs mer utförligt i avsnitt 5.1.1.