



Kandidatavhandling

Kandidatprogrammet i Datavetenskap

Samtidig lokalisering och kartläggning med datorseende

Sebastian Sergelius

6.12.2020

MATEMATISK-NATURVETENSKAPLIGA FAKULTETEN

HELSINGFORS UNIVERSITETET

Handledare

Doktor Jeremias Berg

Examinatorer

Docent Patrik Floréen

Kontaktinformation

PB 68 (Pehr Kalms gata 5)
00014 Helsingfors universitetet, Finland

E-postadress: info@cs.helsinki.fi

URL: <http://www.cs.helsinki.fi/>

Tiedekunta — Fakultet — Faculty		Koulutusohjelma — Utbildningsprogram — Study programme	
Matematis-k-naturvetenskapliga fakulteten		Kandidatprogrammet i Datavetenskap	
Tekijä — Författare — Author			
Sebastian Sergelius			
Työn nimi — Arbetets titel — Title			
Samtidig lokalisering och kartläggning med datorseende			
Ohjaajat — Handledare — Supervisors			
Doktor Jeremias Berg			
Työn laji — Arbetets art — Level	Aika — Datum — Month and year	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages	
Kandidatavhandling	6.12.2020	20 sidor	
Tiivistelmä — Referat — Abstract			
<p> Navigering är ett forskningsområde som har utvecklats under de senaste årtionden. En drönare, som är en flygande robot, har använts till att skaffa visuell information från katastrofområden och till att förhindra industriolyckor. För att vara användbara måste drönare kunna navigera autonomt i miljöer. För att en drönare skulle kunna navigera autonomt måste den vara medveten om sitt läge, sin omgivning, och hastighet. En viktig del i autonom navigering för drönare är att den kan samtidigt kartlägga omgivningen och lokalisera sig själv i omgivningen. </p> <p> Visionsbaserad navigering med kameror är ett lovande forskningsområde inom robotnavigering. Med visionsbaserad navigering går det att kartlägga omgivningen och lokalisera sig själv i omgivningen. Kameror används för att extrahera egenskaper ur bilder och de är inte beroende på en utomstående entitet för att skaffa data om omgivningen. Syftet med denna avhandling är att undersöka visionsbaserad navigering från drönarens perspektiv med fokus på samtidig kartläggning och lokalisering och hur detta problem har angripits. </p> <p> ACM Computing Classification System (CCS) Computer systems organization → Embedded and cyber-physical systems → Robotics → Robotic autonomy </p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords			
drönare, kartläggning, lokalisering, samtidig lokalisering och kartläggning, datorseende			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited			
Helsingfors universitets bibliotek			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Additional information			

Innehåll

1	Inledning	1
2	Bakgrund	3
2.1	Visionsbaserad navigering	3
2.2	Bildbearbetning	4
2.3	Lokalisering i omgivningen	4
2.4	Kartläggning av omgivningen	8
3	Samtidig lokalisering och kartläggning	11
3.1	Kartlösa system	12
3.1.1	Optiskt flöde	12
3.1.2	Spårning av egenskaper	13
3.2	Kartbaserade system	14
3.3	Kartbyggande system	16
3.3.1	Indirekta metoder	16
3.3.2	Direkta metoder	17
4	Sammanfattning	18
	Referenser	19

1 Inledning

För att drönare är mer versatila än robotar som inte flyger så finns det särskilda användningsfall för dem. De kan övervaka markföroreningar eller växternas behov av vatten och näring samt förhindra industriolyckor (Motlagh m. fl., 2017). Drönare har också använts vid katastrofområden, som vid jordbävningen nära Japan för att mäta strålningsvärden i Fukushima och att skaffa visuell information om katastrofområdet samt i räddning av invandrare vid medelhavet. Inom logistikbranschen är man intresserad om autonoma drönaren som skulle leverera paket för kunder, till exempel 86 % av Amazons paket väger mindre än 2.26 kg och de har tänkt på att leverera paket inom 30 minuter för människor som bor nära Amazons lager (Charlie Rose, CBS News, u. å.).

En drönare är ett obemannat luftfordon som kan styras med hjälp av visionsbaserad, tröghets- eller satellitnavigation (Lu m. fl., 2018). För att en drönare skulle kunna navigera självständigt måste den vara medveten om sitt läge, sin omgivning och sin hastighet. Andra faktorer som borde beaktas då en drönare flyger självständigt är hur drönare kan behandla data från inbyggda sensorer i sig, det vill säga kartlägga miljön och sin egen position i denna miljö samt hur man planerar vägen utan att kollidera med hinder.

Ett av de centrala forskningsfälten inom robotnavigering är navigering med hjälp av datorseende (Desouza och Kak, 2002). För att robotar skulle kunna navigera autonomt måste de kunna samtidigt kartlägga sin omgivning och lokalisera sig själv i omgivningen, som kallas för SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). SLAM är ett problem som har fått uppmärksamhet av det vetenskapliga samfundet sedan 80-talet och har sätts som ett rön om det löses. Utmaningar i utvecklingen av kartläggnings- och lokaliseringsalgoritmer är att konstruera algoritmer som fungerar i allmänhet, som i dynamiska och stora miljöer (Durrant-Whyte och Bailey, 2006). Sannolikhetsberäkning är tillvägagångssättet för att lösa SLAM-problemet och flesta av de algoritmer som har löst problemet baserar sig på sannolikhetsberäkning (Thrun m. fl., 2005).

Avhandlingen är en översikt om SLAM problemet och vilka metoder det finns för att kartlägga miljön och lokalisera sig själv med hjälp av datorseende. Frågor som behandlas är: Vad är det fundamentala problemet med SLAM-lösningarna? Vilka SLAM-metoder skulle kunna användas eller har använts med drönare och vad begränsar användningen av dessa? Varför har visionsbaserad navigation fått så mycket uppmärksamhet än andra navigeringsmetoder?

Resten av avhandlingen är strukturerad enligt följande: I kapitel 2 diskuteras bakgrund

bakom visionsbaserad navigering. Vad är navigering och vilka sensorer kan användas i visionsbaserad navigering samt vilka metoder det finns för att extrahera data ur bilder. Kapitel 2 kommer också att diskutera lokalisering och kartläggning. Kapitel 3 är om samtidig lokalisering och kartläggning och hur SLAM kan grupperas i olika kategorier enligt hurudan data som man har. Kapitel 4 sammanfattar avhandlingen.

2 Bakgrund

2.1 Visionsbaserad navigering

Med navigering anser vi att en drönare planerar och utför en rutt från en given startplats till ett givet mål (Lu m. fl., 2018). För att kunna navigera till målet måste drönaren vara medveten om sitt läge, sin miljö och sin hastighet. För att kunna navigera autonomt måste drönare kunna undvika hinder, planera sin rutt samt ta omvägar vid behov. I visionsbaserad navigering används visuella sensorer för att få bilder som indata. Bilderna behandlas sedan med algoritmer för att få en representation av omgivningen och för att lokalisera drönare i omgivningen.

Visuella sensorer som används i visionsbaserad navigering är monokulära-, stereo-, RGB-D- och fisheyekameror samt kombinationer av dessa (Lu m. fl., 2018). En monokulärkamera innehåller ett kameraobjektiv och stereokamera har två kameraobjektiv. En fisheye-kamera är en monokulärkamera där man använder ett fisheyeobjektiv för att få ett bredare synfält i bilden. Med RGB-D kamera kan man samtidigt ta bilder av omgivningen och uppskatta djupet med hjälp av infrarödsensorer, oftast används dessa inomhus.

Jämfört med de traditionella navigeringsmetoder, såsom satellitnavigering som använder GPS-signaler (Global Positioning System) för lokalisering, och tröghetsnavigering (Inertial Navigation System) som använder accelerometer och gyroskop, är fördelarna med kameror att man får visuell information, som till exempel färg, textur och former av omgivningen, det går att navigera i områden där GPS-signaler inte fungerar för att kameror är passiva, det vill säga de kan inte bli störda av utomstående signaler eller upptäckas av utomstående entitet. Med egenskapen att kameror är passiva kan man beräkna drönarens position i omgivningen inombords, dessutom är kamerasensorer billiga att operera och väger lite (Kehoe m. fl., 2006; Lu m. fl., 2018).

Drönare byggs mindre än förr och har därför begränsad batteri- och bärkapacitet. Visionsbaserad navigering med drönare som använder sig av laser- och ultraljudsensorer har uteslutats på grund av att dessa sensorer förbrukar mer elektricitet och väger mer än kameror (Fraundorfer m. fl., 2012). Med hjälp av visionsbaserad navigering som använder sig av kameror kan man få rikligt med information av omgivningen (Lu m. fl., 2018). Visionsbaserad navigering, som är ett aktivt forskningsområde, är en av de mest lovande metoder för robotnavigering.

2.2 Bildbearbetning

Med kameror får man sekventiella bilder ur omgivningen som sedan bearbetas med algoritmer för att få en representation av miljön (Desouza och Kak, 2002). Bildbearbetning betyder att man gör utdrag ur bilder i form av former, kanter, linjer, rörelse, färg eller mönster och bygger en karta av de egenskaper som man extraherat ur bilderna, dessa egenskaper kallas också för landmärken.

För att få former, kanter eller linjer ur bilder finns det olika bilbearbetningsalgoritmer så som SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), HARRIS hörn upptäckare, SURF (Speeded Up Robust Features), ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF), med mera (Rublee m. fl., 2011; Aulinas m. fl., 2008; Se, D. Lowe m. fl., 2002). SIFT, SURF och ORB provar hitta egenskaper från bilderna som är invarianta för rotation, som menar att samma egenskaper kan hittas från olik synvinkel (Rublee m. fl., 2011). Enligt Rublee m. fl., 2011 är ORB mer energieffektiv algoritm än SIFT för att den kräver mindre beräkning för att extrahera egenskaper ur bilder, som betyder att den är snabbare färdig, utan att tappa effektivitet.

Då man extraherar egenskaper ur bilder är det möjligt att utjämna bilder (Se, D. Lowe m. fl., 2002). Detta menar att man gör bilder otydligare för att få bort digitalt brus och att bilden har mindre detalj. Då man extraherar egenskaper ur bilder som är otydligare hittar algoritmerna färre egenskaper än om bilden var i sin original form. Med att extrahera färre egenskaper ur bilderna under navigeringen kan algoritmerna beräkna snabbare robotens läge i omgivningen.

Fast det finns fördelar på data som man kan extrahera ur kameror jämfört med andra sensorer, som till exempel laser och ultraljud, är förändring i belysning, vädret och årstid samt skuggor ett problem som måste tas i beaktande med kameror, speciellt då man navigerar utomhus (Desouza och Kak, 2002). Dessa problem har lösts med att bearbeta bildernas färgnyanser, färgmättnad (saturation) och ljusstyrka.

2.3 Lokalisering i omgivningen

Med att en robot lokaliserar sig själv menar vi att den tar reda på sin position i omgivningen (Desouza och Kak, 2002). Från bilderna ur kameror i drönaren identifieras landmärken, sedan matchas de observerade landmärken med de som finns i kartan och efter det kan drönaren estimerar sin positionen i omgivningen. Lokalisering av en drönare är enkelt då man har en uppfattning om miljön, till exempel en karta.

Då en drönare navigerar så beräknas positionen och orientationen av drönaren till exempel

med sannolikhetsberäkning baserat på tid och indata av sensorer (Thrun m.fl., 2005). Efter varje rörelse drönaren gör måste den estimeras sin position i omgivningen. För att beräkna sannolikheten av sin position i omgivningen använder den som data rörelseinformation, och efter att den har rört på sig, observerar de landmärken. Med att drönare observerar landmärken efter sin rörelse kan den förstärka sin förtroelse om sin position i omgivningen.

Då man använder sannolikhetsberäkning för lokalisering är robotens läge i omgivningen en kontinuerlig stokastisk sanningsvariabel X , där en sannolikheten av robotens läge betecknas som $P(x_t)$, alltså möjligheten att roboten befinner sig vid x vid tidpunkt t , som är samma sak som att $P(X = x_t)$ (Thrun m.fl., 2005). Variabeln x_t beskriver då robotens tillstånd, som i drönarens fall kan vara till exempel drönarens koordinater och orientering i omgivningen. Rörelseinformation som skaffas vid tidpunkt t betecknas som u_t och landmärken som extraheras från kameran sensorernas bilder med z_t . Lokaliseringsproblemet är att bestämma x_t med sannolikhetsberäkning givet alla föregående lägen $x_{0:t-1}$, landmärkesuppfattningar $z_{1:t-1}$ och rörelseinformationer $u_{1:t}$ samt då vi antar att roboten rör på sig före den skaffar sensorinformationen. Då kan betingade sannolikhetsformeln för robotens läge vid $X = x_t$ skrivas som:

$$P(X = x_t | x_{0:t-1}, z_{1:t-1}, u_{1:t}) \quad (2.1)$$

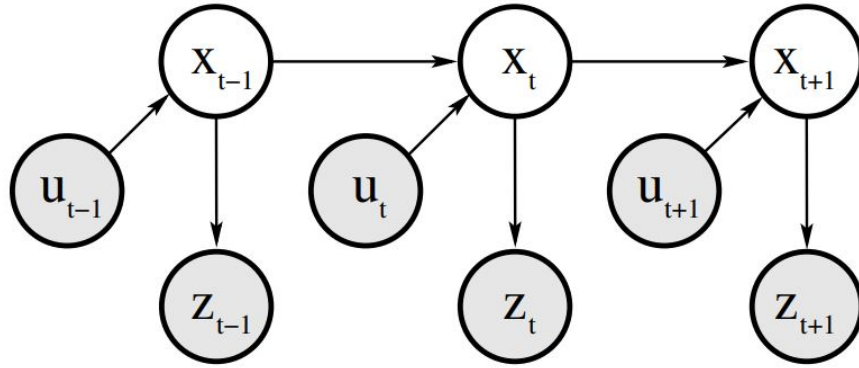
Problem uppstår i beräkningen då man navigerar länge för att man tar i beaktande alla tidigare lägen $x_{0:t-1}$ för att beräkna nästa läge (Thrun m.fl., 2005). För att minska beräkningsbehov i lokaliseringsproblemet antar man Markovegenskapen för variabeln x . Med Markovegenskapen menar man att läge vid x_t är bara beroende på den tidigare läge, alltså sannolikheten x_{t-1} , och inte på händelseförloppet som hände före roboten befinner sig vid x_{t-1} . Då man antar att x har Markovegenskapen så kan man begränsa att x_t är bara beroende på dens tidigare position x_{t-1} och rörelseinformation u_t , se figur 2.1, som demonstrerar Markovegenskapen. Lokaliseringsproblemet kan då skrivas som följande:

$$P(x_t | x_{t-1}, u_t) \quad (2.2)$$

Då vi antar att roboten rör på sig och sedan skaffar sensorinformation och att x_t har Markovegenskapen kan sannolikhetsfördelningen för landmärkesuppfattningar z_t skrivas:

$$P(z_t | x_{0:t}, z_{1:t-1}, u_{1:t}) = P(z_t | x_t) \quad (2.3)$$

Formeln $P(x_t | x_{t-1}, u_t)$ är rörelseuppfattningssannolikheten och $P(z_t | x_t)$ är landmärkesuppfattningssannolikheten för roboten (Thrun m.fl., 2005).



Figur 2.1: Lokaliseringsproblemet med Markovegenskapen är att bestämma x_t givet x_{t-1} och u_t . En bild på lokaliseringsproblemet som visualiserar Markovegenskapen för variabeln x (Thrun m. fl., 2005).

Läget av roboten kan beräknas med Bayes filter som använder sig av rörelse- och landmärkesuppfattningssannolikheten (Thrun m. fl., 2005). Bayes filter är en rekursiv algoritm som beräknar sannolikheten för robotens position baserat på robotens tidigare position, rörelseinformation och observerade landmärken. I Bayes filter algoritmen beräknas $bel(x_t)$, som är en sannolikhetsfördelning av robotens position i omgivningen.

Algorithm BFA: Bayes Filter Algorithm

BayesFilter($bel(x_{t-1}), u_t, z_t$):

forall x_t **do**

$spådom = \int P(x_t|x_{t-1}, u_t) bel(x_{t-1}) dx_{t-1}$

$bel(x_t) = \eta P(z_t|x_t) spådom$

end

return $bel(x_t)$

Bayes filters algoritmen fungerar så att för varje x_t beräknas två kritiska steg, som är spådom och korrigering (Thrun m. fl., 2005). Spådomsdelen i algoritmen är delen där vi beräknar integralen för två faktorer: sannolikheten att rörelseinformationen u_t tar oss till x_t och den gamla distributionen av positionen $bel(x_{t-1})$. Korrigeringsdelen är då man multiplicerar spådomsdelen med den sannolikhet att z_t skulle observeras för varje möjliga x_t . I korrigeringsdelen används en normering konstant η för att normera sannolikheten. Bayes filter algoritmen är definierat nedan som sedan görs rekursivt, se algoritmen 1. Utmaningen i algoritmen är integralen i spådomsdelen. För att algoritmen skulle fungera i allmänhet, måste man begränsa robotens läge att vara en ändlig variabel så att integralen över spådomsdelen blir en summa.

Med hjälp av Bayes regler, lagen om total sannolikhet för kontinuerliga variabler och Markovegenskapen kan det bevisas med matematisk induktion att Bayes filtern fungerar, då man antar att x_t har Markovegenskapen och att $bel(x_0)$ sannolikhetsfördelning är känd då $t = 0$.

Med att sannolikhetsfunktionen är känd menar vi att roboten vet sin position vid början med full säkerhet eller så är $bel(x_0)$ en likformig sannolikhetsfördelning.

$$bel(x_t) = P(x_t|z_{1:t}, u_{1:t}) \quad (\text{BF1})$$

$$= \eta P(z_t|x_t, z_{1:t-1}, u_{1:t}) P(x_t|z_{1:t-1}, u_{1:t}) \quad (\text{BF2})$$

$$= \eta \underline{P(z_t|x_t)} P(x_t|z_{1:t-1}, u_{1:t}) \quad (\text{BF3})$$

$$= \eta P(z_t|x_t) \int \underline{P(x_t|x_{t-1}, z_{1:t-1}, u_{1:t}) P(x_{t-1}|z_{1:t-1}, u_{1:t})} dx_{t-1} \quad (\text{BF4})$$

$$= \eta P(z_t|x_t) \int \underline{P(x_t|x_{t-1}, u_t) P(x_{t-1}|z_{1:t-1}, u_{1:t-1})} dx_{t-1} \quad (\text{BF5})$$

$$= \eta P(z_t|x_t) \int P(x_t|x_{t-1}, u_t) \underline{P(x_{t-1}|z_{1:t-1}, u_{1:t-1})} dx_{t-1} \quad (\text{BF6})$$

$$= \eta P(z_t|x_t) \int P(x_t|x_{t-1}, u_t) \underline{bel(x_{t-1})} dx_{t-1} \quad (\text{BF7})$$

Sannolikhetsfördelningen i Bayes filter är BF1, det vill säga sannolikheten att roboten är vid x_t , som betecknas $bel(x_t)$, är samma som sannolikheten av x_t givet $z_{1:t}$ och $u_{1:t}$. Med Bayes teorem kan detta skrivas om i format BF2. Vid BF3 använder vi Markovegenskapen för x_t så kan betingade sannolikheten för z_t skrivas som landmärkesuppfattningssannolikheten. Med satsen om total sannolikhet för kontinuerliga variabler, som uttrycker sannolikheten för enskilda händelser till en betingade sannolikhet, kan formeln skrivas om till BF4. Vid BF5 och BF6 använder vi Markovegenskapen för x_t , se Markovkedjan i figur 2.1. Till slut får vi BF7, som bevisar med induktion att algoritmen fungerar (Thrun m. fl., 2005).

Bayes filter är den mest allmänna algoritm för att beräkna robotens läge med sannolikhetsberäkning (Thrun m. fl., 2005). Algoritmen baserar sig starkt på Markovegenskapen att det nuvarande läge är oberoende av tidigare data. I robotnavigering är det inte dock så lätt att anta detta, för det skulle betyda att allt runtomkring roboten borde vara statiskt. Till exempel om en bil rör på sig då roboten navigerar så då man gör landmärkesuppfattning kommer Bayes filter algoritmen att ge en felaktig estimation. Bayes filter är basis för många andra lokaliseringsalgoritmer, som till exempel Kalman filter eller Markov lokalisation.

I navigering är det svårt att begränsa robotens tillstånd så att integralen i Bayes filter blir en summa över spådomsdelen, för det skulle betyda att roboten navigerar i en begränsad omgivning. På grund av oändligt läge där roboten kan finna sig i omgivningen beräknar lokaliseringsalgoritmer ett approximativt värde för sannolikhetsfördelnigen och det är i beräkningen av approximativa värdet där olika lokaliseringsalgoritmer skiljer sig (Thrun m. fl., 2005).

Med att approximera sannolikhetsfördelningen så lämnar man bort någon av egenskaperna som är viktigt för robotnavigering, såsom beräkningseffektivitet, noggrannhet i approxime-

ringen av robotens läge eller enkel implementering av algoritmen för robotar, för att förbättra någon annan av egenskaperna (Thrun m. fl., 2005). Till exempel om man vill nå beräknings-effektivitet i en approximering så avstår man till exempel i noggrannhet av robotens läge.

Lokalisering kan delas i global och lokal lokalisering (Desouza och Kak, 2002; Se, D. G. Lowe m. fl., 2005). Med global lokalisering har roboten ingen vetskap om sin position vid början av navigeringen. I lokal lokalisering har roboten en ungefärlig eller exakt vetskap om sin plats vid början av navigeringen som den fått som indata.

Lokala lokaliseringsmetoder strävar för att korrigera fel som uppstår av robotens rörelse. Med globala lokaliseringsmetoder kan roboten klara av verkliga misstag då den estimerar sin position i omgivningen, till exempel roboten kan klara av en situation där den kidnappas och förs till en annan plats. Då man börjar navigera, alltså när tidpunkt t är noll, så då man använder sig av globala lokaliseringsmetoder är sannolikheten att roboten är vid $bel(x_0) = 1/|X|$ och i lokala lokaliseringsmetoder är det till exempel $bel(x_0) = 1$ eller en normalfördelning runt läget x_0 (Thrun m. fl., 2005).

2.4 Kartläggning av omgivningen

Med kartläggning av omgivningen menar vi att roboten kartlägger sin omgivning med hjälp av data som den har tillgång till, detta kan vara till exempel rörelseinformation eller sensorinformation samt kombinationer av dessa (Thrun m. fl., 2005). I lokal lokalisering, där man vet robotens läge och har åtkomst till rörelseinformation, är kartläggning lättare att göra än då robotens position i början är okänd. För att konstruera en karta så måste man ta i beaktande störningar som uppstår av rörelse- och sensorinformation.

En karta om miljön kan representeras i två (2D) eller tre (3D) dimensioner (Lu m. fl., 2018). Att konstruera en 3D-representation av omgivningen kräver det mer beräkningskapacitet än att konstruera en 2D-karta, för att man tar i beaktande fler dimensioner (Thrun m. fl., 2005). För robotar som navigerar på stadig grund är oftast en 2D-representation tillräckligt, men för drönaren behöver man kartlägga i 3D.

För att konstruera 3D-kartor behöver man uppskatta djuphet. Metoder för att uppskatta djuphet med datorseende är till exempel att beräkna binokulära skillnaden eller rörelseparallax (Mansour m. fl., 2019). Idén med att beräkna binokulära skillnaden och rörelseparallax är att uppskatta djuphet på samma sätt som mänskliga synförmåga.

Rörelseparallax betyder att objekt rör på sig snabbare i synfältet då de är närmare observatören och långsammare då de är långt borta, detta gäller också om observatören rör på sig och objektet står stilla (Mansour m. fl., 2019; Rogers och Graham, 1979). För att räkna

binokulära skillnaden för observerade kännetecken behöver man två kameror som är riktade parallellt i samma linje så att deras synfält överlappar, kamerornas distans från varandra är känd och av båda kamerornas bilder utdras samma kännetecken. Från skillnaden ur kännetecknets horisontala position i båda av kamerornas bilder kan man estimerar djuphet. Med en monokulär kamera kan man uppskatta djuphet av bilder baserat på rörelseparallax. För att estimerar djuphet med monokulärkamera och rörelseparallax behöver man veta distansen till ett objekt då navigeringen börjar och som indata får man bilder och rörelseinformation av roboten. Rörelseinformationen i robotar på stadig grund kan man få till exempel från en hastighetsmätare som är inbyggt i roboten.

Mansour m. fl., 2019 undersökte djuphetsuppskattning med rörelseparallax och med att räkna binokulära skillnaden från stereokameror, och märkte att stereokameror fungerar bättre då objekten är nära medan monokulära kameror med hjälp av rörelseparallax kan uppfatta mer precis distans då distansen växer (Mansour m. fl., 2019). Med stereokamera kan djupheten estimeras bra upp till cirka 10 meters avstånd och vid 20 meters avstånd så är estimeringarna oanvändbara, efter detta måste man växla över till att använda monokulära kameran. Mansour m. fl., 2019 skriver att forskning för att skaffa rörelseinformation från bilderna är viktigt, på grund av att rörelseinformation behövs för att lokalisera roboten i omgivningen och kartlägga omgivningen. Med att uppskatta rörelseinformation från bilder kan man avlägsna hastighetsmätare som drönare inte har tillgång till och detta ger möjlighet att estimerar djuphet ur bilderna för drönare.

Kartor kan sparas i olika format, såsom datorstödd konstruktion (CAD, Computer-Aided Design), beläggningskarta (Occupancy Grid Map) eller en enkel graf om landmärken och deras sammankopplingar (Desouza och Kak, 2002). En datorstödd konstruktion av miljön kan vara en mycket detaljerad representation av omgivningen. En beläggningskarta är en 2D eller 3D-modell av omgivningen som är sparad i ett rutsystem där rutor som är upptagna är någon objekt i miljön, oftast har dessa rutorna sparad i sig en sannolikhet att där finns någon objekt i vägen (Heng m. fl., 2011; Desouza och Kak, 2002).

Kartan kan vara färdigt sparad för en drönare eller så kan miljön kartläggas från bilderna av sensorerna då den flyger (Lu m. fl., 2018). Med 3D volymetriska sensorer kan man konstruera en 3D modell och spara denna information i en Octree-struktur. Med strukturen kan data om miljön packas i mindre format utan att tappa möjligheten att uppdatera informationen vid behov. En annan metod som tas upp är med stereovisionsalgoritmer göra en djupetskarta och behandla data till plana ytor som minskar på missvisning som uppstår med användning av stereovision algoritmer när man bygger upp djupetskartan.

Viktigt i kartläggning är att kartan kan lätt uppdateras då man gör nya observationer och

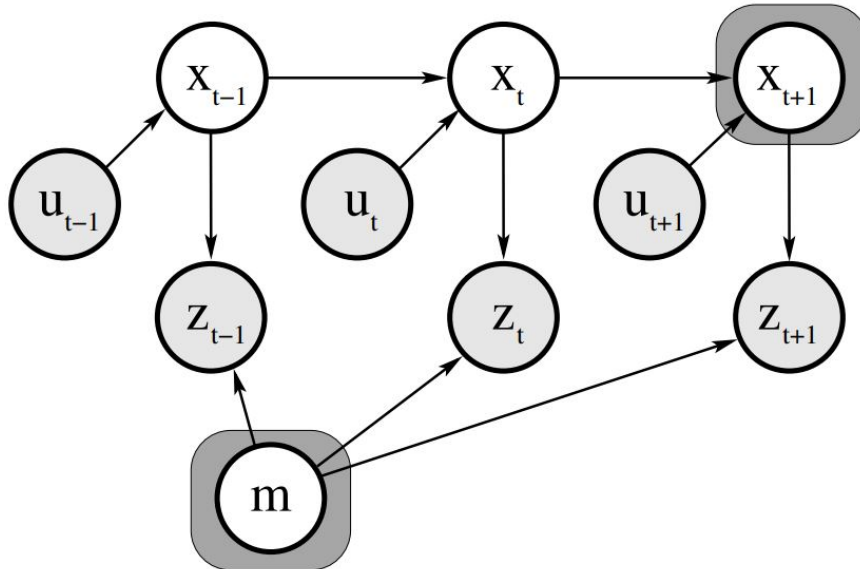
bevarar data om hur landmärken är sammankopplade, för att då man observerar nya landmärken och får beräknat en bättre sannolikhet av robotens läge så uppdateras också landmärkes sannolikhet att de är vid positionen som man observerade (Se, D. G. Lowe m. fl., 2005).

Oftast så har robotar inte en färdig karta som de kan använda för att planera sin rutt eller att navigera, och för att åstadkomma autonoma robotar så måste de kunna själv kartlägga sin omgivning (Thrun m. fl., 2005). Kartläggning för robotar är ett problem som är svårt utan lokalisering och lokaliseringsproblemet är svårt att lösa utan att man kartlägger, därför är det nyttigt att lösa båda problem samtidigt.

3 Samtidig lokalisering och kartläggning

Samtidig lokalisering och kartläggning (SLAM) är ett av de grundläggande problem i robotnavigering (Durrant-Whyte och Bailey, 2006). SLAM problemet definieras så att en robot som inte har tidigare information om sin plats eller omgivning skall samtidigt bygga en karta av omgivningen och lokaliserar sig själv relativt till kartan som den bygger, till exempel med hjälp av datorseende och att identifiera landmärken. Att beräkna robotens läge med sannolikhetsberäkning så är termen $P(x_t, m|z_{1:t}, u_{1:t})$, det vill säga, sannolikheten att roboten befinner sig vid x_t och kartan m givet alla landmärkesuppfattningar $z_{1:t}$ och rörelseinformation $u_{1:t}$.

Det finns två varianter av SLAM-problemet, som är Fullständig SLAM och Online SLAM (Thrun m. fl., 2005). Skillnaden med dessa två är hur man beräknar betingade sannolikheten för x_t och m . I fullständig SLAM beräknas betingade sannolikheten från hela robotens positionskedja $x_{0:t}$, det vill säga $P(x_{0:t}, m|z_{1:t}, u_{1:t})$, medan i Online SLAM använder man bara senaste läge x_{t-1} och kartan m , då är formeln $P(x_t, m|z_{1:t}, u_{1:t})$, alltså man döljer tidigare rörelse- och landmärkesinformation för att estimerar den nya positionen av roboten. Några lösningar för SLAM som baserar sig på sannolikhetsberäkning är Extended Kalman Filter (EKF-SLAM), som är en Online SLAM-lösning, och FastSLAM, som är en fullständig SLAM-lösning (Durrant-Whyte och Bailey, 2006; Thrun m. fl., 2005).



Figur 3.1: Bild på Online SLAM-problemet där man beräknar sannolikheten av robotens position och bygger kartan från sensorinformation z och rörelseinformation u (Thrun m. fl., 2005).

SLAM-problemet har delproblem som borde lösas för att få robotar att navigera autonomiskt (Aulinas m. fl., 2008). Ett stort problem i flesta visionsbaserade SLAM-lösningar är dataföreningsproblemet, som betyder att man identifierar två olika landmärken som en och samma. Detta problem kan uppstå redan vid korta rörelsen av robotar eller då en robot har navigerat och kommer till en plats som den har redan varit i förr, detta kallas för loopstängning (Loop Closure). Med att förena landmärken fel så uppkommer det missvisningar då man estimerar positionen av roboten.

Positionen av roboten i omgivningen och landmärkens position i kartan kan beräknas också med att räkna distansen till landmärken och bevara en matris om landmärkens sannolikhetsposition i omgivningen och landmärkes förhållande till varandra, alltså en korrelationsmatris (Durrant-Whyte och Bailey, 2006; Thrun m. fl., 2005). Då man bevarar en korrelationsmatris så har man den fördelen att när man lokaliserar en robot med stor sannolikhet går det att updatera landmärkens sannolikhet av deras position. Nackdelen med denna metod är att då man observerat stora mängder av landmärken så kommer beräkningsbehovet att växa kvadratisk enligt observerade landmärken.

Visuell kartläggning och lokalisering kan delas i tre kategorier baserat på data som man har i början av navigeringen. Kategorierna är kartlösa (mapless), kartbaserade (map-based) och kartbyggande (map-building) system (Lu m. fl., 2018).

3.1 Kartlösa system

Kartlösa system är oftast den realistiska situationen då man navigerar (Thrun m. fl., 2005). I system utan karta navigerar drönare bara med hjälp av att observera tydliga egenskaper i miljön (Desouza och Kak, 2002). Dessa kan vara till exempel väggar, dörrar, möbler eller andra landmärken. Metoder, som diskuteras i avhandlingen, och används inom kartlösa system är optiskt flöde (Optical flow) och spårning av egenskaper (Feature tracking).

3.1.1 Optiskt flöde

Optiskt flöde hänvisar till uppfattad relativ rörelse i sekventiella bilder mellan observatören och till exempel någon fästpunkt i miljön (Kehoe m. fl., 2006). Rörelse uppstår i sekventiella bilder till exempel då man vänder kameran eller om något rör på sig då kameran är stilla. Från relativa rörelsen i sekventiella bilder kan man beräkna flödesvektorer.

För att demonstrera ett exempel hur optiskt flöde kan användas för robotnavigering har Santos-Victor m. fl., 1993 använt optiskt flöde i en robot för att imitera bin (Santos-Victor

m. fl., 1993). De placerade två kameror, som är parallellt riktade ifrån varandra, på varsin sida av en robot och beräknade flödesvektorer från bilderna av båda kamerorna då roboten rör på sig. Om flödesvektorernas beräknade längd var samma på båda sidorna så far roboten rakt framåt, annars om andra sidas flödesvektoren är kortare än den andra så vänder den mot den sida vilkens flödesvektor är kortare. Med att använda optiskt flöde för navigering behöver man inte uppskatta djuphet. Denna navigeringsmetod fungerar dåligt i strukturlösa miljö där det inte finns någon fästpunkt eller landmärke som kan användas för att beräkna flödesvektorerna.

Fastän metoden som Santos-Victor m. fl., 1993 använde tog bara i beaktande horisontala flödesvektorer och demonstrerade att optiskt flöde kan användas i robotnavigering på stadig grund, så har sedan detta användning av optiska flödesmetoder använts i drönare (Chao m. fl., 2013). Nuförtiden används optiskt flöde i drönare för att uppskatta avstånd, hålla sin höjd, undvika hinder, beräkna hastighet och landa på en plattform som rör på sig.

3.1.2 Spårning av egenskaper

Spårning av egenskaper (Feature tracking) används för att skaffa information om objekt, såsom linjer, hörn och olika landmärken som är invariant för rörelse med hjälp av kameror och bildbearbetningsalgoritmer (Lu m. fl., 2018). Med hjälp av dessa landmärken och deras relativa rörelse i sekventiella bilder kan man bestämma robotens position och bygga en karta. Då drönare navigerar i omgivningen, så kommer den troligtvis att se samma landmärken från olika perspektiv, som hjälper drönare att beräkna en bättre sannolikhet för sin position i omgivningen samt updatera landmärkes position i kartan. Traditionella SLAM-lösningar, såsom EKF-SLAM och FastSLAM faller under denna kategori (Latif och Saddik, 2019). Dessa SLAM-lösningar fungerar inte då det finns mycket landmärken i kartan för till exempel med EKF-SLAM är problemet beräkningsbehovet som växer kvadratiskt av antalet landmärken. Ett stort problem i spårning av egenskaper är dataföreningsproblemet.

För att drönaren har begränsad batterikapacitet och bärkraft har Gu m. fl., 2015 föreslagit användning av VO-SLAM (Visual Odometry SLAM) som kan kartlägga omgivningen och lokalisera observatören då det finns upp till tusentals landmärken i kartan, med en stereo-kamera som tar 31 bilder per sekund och en krets som använder tio gånger färre energi än en Intel i7 3770K-processor (Gu m. fl., 2015). Deras VO-SLAM algoritm implementeras i en FPGA-krets (Field-Programmable Gate Array) vilkens logik är omprogrammerbar, den använder färre energi än vanliga processorer och kan beräkna parallellt. VO-SLAM med speciell hårdvara klarar av upp till 30 000 landmärken i kartan, jämfört med EKF-SLAM, som klarar av kring tusen landmärken för att fungera i realtid (Thrun m. fl., 2005; Gu m. fl., 2015).

VOSLAM-lösningen fungerar så att den extrahera landmärken från bilder med bilbearbetnings (Gu m.fl., 2015). Med hjälp av att beräkna binokulära skillnaden, som diskuterades i kapitel Kartläggning av omgivningen, från bilderna ur stereokameran konstruera de en 3D-representation av dessa landmärken som de sparar i en matris. FPGA-kretsen, som är byggt och programmerat för matrisberäkning, beräknar vektorvinklarna för varje observerade landmärke från globala kartan och hittar de bästa träffar för lokaliseringsalgoritmen. Före lokaliseringssuppfattningen tar de bort avvikande träffar inom landmärken med hjälp av en algoritm, så att inte kartan uppfylls med osäkra landmärkesuppfattningar.

Med hjälp av FPGA-kretsen har de fått dataförening med matriser att beräknas i realtid med upp till 31 bilder i sekund och litet energibehov. Enligt Gu m.fl., 2015 kan VO-SLAM estimerar positionen med 1–2 cm exakthet med upp till 30 000 landmärken i kartan, hantera loopstängning och enligt dem är troligtvis en av de mest energieffektiva lösning för SLAM-problemet (Gu m.fl., 2015). Något som deras lösning tar inte i beaktande är SIFT algoritmens tidskrav. Latif och Saddik, 2019 använder VO-SLAM i en drönare där de delat upp processen så att indata från stereokameran, bildbearbetning och 3D-representationen, som görs med SIFT, bearbetas i en egen processor och uppdatering av kartan, matcha observerade landmärken med kartan, lokalisering och uppdatering av kartan hanteras i FPGA-kretsen (Latif och Saddik, 2019).

3.2 Kartbaserade system

Med kartbaserade system har drönare en färdig vetskaper om miljön som kan vara i form av geometriska modeller, beläggningskarta eller förhållande mellan landmärken (Desouza och Kak, 2002). Idén är att då roboten navigerar provar den hitta till exempel landmärken från bilder som är lika till de landmärken som roboten vet om. När den observerat landmärken och förenat observationerna med kartan som den har så beräknas sannolikheten av roboten position i miljön. Med kartbaserad navigering kan en drönare planera sin rutt i förhand och beräkna omvägar under navigeringen då det behövs (Lu m.fl., 2018).

Kartbaserad lokalisering med datorseende kan delas upp i fyra steg, som är följande (Desouza och Kak, 2002):

- skaffa sensorinformation av kamerorna med bildbearbetning
- upptäcka landmärken från informationen med bildbearbetning
- matcha observationerna med kartan

- beräkna positionen av roboten

Det svåraste steget av dessa är att matcha observationerna med kartan som den har, som är dataföreningsproblemet. Roboten kan inte med full säkerhet veta sin position och då är det svårt att matcha landmärken med kartan (Desouza och Kak, 2002).

Då kartan finns kan man fokusera på lokalisering av roboten (Desouza och Kak, 2002). I global lokalisering måste man lita på att man kan förena observationerna med informationen man har och ta i beaktande osäkerheten med att observationerna kan matcha flera av de landmärken man vet om. Globala lokaliseringsproblemet, där roboten har ingen aning om vart den är i kartan vid början, kan lösas till exempel med Monte Carlo lokalisation eller Markov lokalisation, som båda är en variant av Bayes filter som presenterades i kapitel Lokalisering i omgivningen (Thrun m. fl., 2005).

Monte Carlo lokalisation fungerar så att en robot antar med lika sannolikhet sin position i kartan vid början av navigeringen (Dellaert m. fl., 1999). Då man approximerar sannolikheten av robotens position i Monte Carlo så väljer man slumpmässigt platser vart roboten möjligen skulle finnas med den rörelseorder som den tar och sedan rör roboten på sig, efter det observerar landmärken, förenar dessa landmärken med kartan som den har och på basis av denna information kan roboten estimerar vilken av dessa slumpmässiga positionsval var den bästa.

Markov lokalisationsalgoritmen klarar också av sig globala lokaliseringsproblemet då man har en karta (Thrun m. fl., 2005). Istället för att anta bara en sannolikhet av robotens position i kartan så uppehåller den en sannolikhetsfördelning över hela kartan. Till exempel då roboten börjar navigera så är sannolikhetsfördelningen enhetlig och då den rör på sig och om den observerar ett landmärke så ökar sannolikheten av robotens position för varje plats det finns en liknande landmärke i kartan. När den rör på sig vidare så kommer den troligtvis att observera mera landmärken och på basis av rörelseinformationen och observerade landmärken kan den vid något skede vara ganska säker av sin position.

I lokal lokalisering där roboten har en vetskap om sin position i början av navigering behöver lokaliseringsalgoritmen hålla koll på rörelseinformationen som roboten utför och på basis av rörelseinformationen beräkna nya positionen (Dellaert m. fl., 1999; Thrun m. fl., 2005). Då roboten rör på sig så minskar sannolikheten av robotens nya position på basis om hur lokaliseringsalgoritmen tar i beaktande felmarginal i rörelsen. Då osäkerheten av sin egen position är för stor så använder den observerade landmärken och förenar dessa med kartan den har för att öka på sannolikheten av sin position.

3.3 Kartbyggande system

Kartbyggande system används då det är svårt att navigera med en existerande karta om omgivningen eller om kartan inte finns, som i katastrofområden (Lu m.fl., 2018). Roboten kan vara medveten eller omedveten om sin position vid början av kartbyggandet (Se, D. G. Lowe m.fl., 2005). Kartor kan byggas i två eller tre dimensioner (Thrun m.fl., 2005). Fördelar med att bygga en karta i 3D och använda denna för lokalisering är att det uppkommer mindre missvisningar då roboten lokaliserar sig själv. Till exempel med 2D-kartor, om en robot navigerar i en korridor och kommer till slutet av korridoren kan det vara svårt för roboten att veta i vilken ända den är om korridoren är symmetrisk. Med 3D så finns det mera data att använda för att lokalisera, men detta betyder att man behöver mera beräkningskapacitet. Kartbyggande systems bildbearbetning kan delas tre kategorier, som är indirekta, direkta och hybrida metoder, som sammanslår indirekta och direkta metoder (Lu m.fl., 2018).

3.3.1 Indirekta metoder

I bildbearbetning som använder indirekta metoder tar man kännetecken ur bilden som är invarianta för rotation, synvinkeländringar och rörelseoskärpa, dessa ges som indata som sedan kan användas för rörelseuppfattning och lokalisering (Lu m.fl., 2018).

Ett sätt att konstruera en karta är att beakta robotens rörelse och synvinkel (Se, D. G. Lowe m.fl., 2005). Se, D. Lowe m.fl., 2002 har gjort dessa samt använt indirekta metoder i sin artikel "Mobile Robot Localization and Mapping with Uncertainty using Scale-Invariant Visual Landmarks" för att bygga en 3D-karta (Se, D. Lowe m.fl., 2002). Från stereokamerornas bilder, utjämnar de bilderna så att de har mindre detalj i sig och använder SIFT för att extrahera egenskaper ur bilderna. Med denna metod har de kunnat konstruera en 3D-karta av omgivningen baserat på landmärken utan att spara korrelationsmatris mellan landmärken som minskar på behov av beräkning då man lokaliserar roboten.

Denna metod att konstruera kartor och lokalisera roboten har ändå problem då det kommer till loopstängning och uppdatering av kartan (Se, D. G. Lowe m.fl., 2005). Med att använda samma bildbearbetningsmetoder och med att kartlägga delar av områden och senare bygga en stor global karta fick forskarna loopstängning och kart-uppdateringen löst.

Globala kartan uppbyggdes så att de identifiera identiska landmärken från dessa små kartor och kunde från dessa foga ihop kartor som var bredvid varandra till en stor karta. Indirekta metoder fungerar dåligt då det finns få egenskaper att extrahera ur bilder, såsom i strukturlösa miljöer (Lu m.fl., 2018).

3.3.2 Direkta metoder

Direkta metoder fungerar bättre i strukturlösa miljön än indirekta metoder (Engel m. fl., 2014). Jämfört med indirekta metoder där man provar hitta många landmärken ur bilderna så i direkta metoder använder man hela bilden för att hitta geometriska egenskaper. Med hjälp av dessa så kan man konstruera en detaljerad karta med extra processorberäkning (Lu m. fl., 2018). Då man konstruerar en mycket detaljerad karta, till exempel i 3D, går det att använda kartan för något annat än navigering, som till exempel att få information från katastrofområden. Att kartlägga i detalj används bara i speciella fall för drönare, på grund av att det kräver mycket beräkningskapacitet och förbrukar mycket energi.

4 Sammanfattning

Samtidig lokalisering och kartläggning i dynamiska miljön är ett problem som måste lösas för att drönare skulle kunna navigera autonomiskt. Oftast är robotens omgivning oändlig och då man estimerar positionen av roboten måste man approximera. Då man approximerar sannolikheten av robotens position är den sällan fullständigt medveten om sin position.

För att verkligen ha autonoma drönaren, som skulle använda sig av visionsbaserad navigering, måste man kunna kombinera effektiva bildbearbetningsalgoritmer, lokaliseringsalgoritmer och kartläggningsalgoritmer så att dessa algoritmer skulle fungera samtidigt, i realtid samt ge bra uppskattningar av drönarens läge.

En drönare har begränsningar då det kommer till beräkningsbehov på grund av att kommersiella drönare byggs mindre än förr och har begränsad batterikapacitet. Drönare har inte tillgång till samma rörelseinformation som robotar på stadig grund som oftast har inbyggda tröghets- och hastighetsmätare i sig. Därför är det viktigt att det finns forskning inom beräkning av rörelseinformationen från kamerabilder.

Denna avhandling var en ytlig översikt om SLAM problemet och vad är basis för de SLAM-lösningar som finns idag. De problem som finns idag är att konstruera pålitliga algoritmer i visionsbaserad navigering som kan behandla olika scenario, till exempel att estimerar djuphet för att bygga 3D-kartor, positionen av roboten, kartläggning och uppdatering av kartan, dataförening, loopstängning samt ruttplanering och undvika hinder under navigeringen som avhandlingen har inte haft fokus på.

Referenser

- Aulinas, J., Petillot, Y., Salvi, J. och Llado, X. (jan. 2008). "The SLAM problem: a survey". I: vol. 184, s. 363–371. DOI: [10.3233/978-1-58603-925-7-363](https://doi.org/10.3233/978-1-58603-925-7-363).
- Chao, H., Gu, Y. och Napolitano, M. (2013). "A survey of optical flow techniques for UAV navigation applications". I: *2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, s. 710–716. DOI: [10.1109/ICUAS.2013.6564752](https://doi.org/10.1109/ICUAS.2013.6564752).
- Charlie Rose, CBS News (u.å.). *Amazon's Jeff Bezos looks to the future*. <https://www.cbsnews.com/news/amazons-jeff-bezos-looks-to-the-future/>, läst 02.11.2020.
- Dellaert, F., Fox, D., Burgard, W. och Thrun, S. (1999). "Monte Carlo localization for mobile robots". I: *Proceedings of 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)*. Vol. 2, 1322–1328 vol.2. DOI: [10.1109/ROBOT.1999.772544](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1999.772544).
- Desouza, G. N. och Kak, A. C. (2002). "Vision for mobile robot navigation: a survey". I: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 24.2, s. 237–267. DOI: [10.1109/34.982903](https://doi.org/10.1109/34.982903).
- Durrant-Whyte, H. och Bailey, T. (2006). "Simultaneous localization and mapping: part I". I: *IEEE Robotics Automation Magazine* 13.2, s. 99–110. DOI: [10.1109/MRA.2006.1638022](https://doi.org/10.1109/MRA.2006.1638022).
- Engel, J., Schöps, T. och Cremers, D. (2014). "LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM". I: *ECCV*. ISBN: 978-3-319-10604-5. DOI: [10.1007/978-3-319-10605-2_54](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10605-2_54).
- Fraundorfer, F., Heng, L., Honegger, D., Lee, G. H., Meier, L., Tanskanen, P. och Pollefeys, M. (2012). "Vision-based autonomous mapping and exploration using a quadrotor MAV". I: *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, s. 4557–4564. DOI: [10.1109/IROS.2012.6385934](https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385934).
- Gu, M., Guo, K., Wang, W., Wang, Y. och Yang, H. (2015). "An FPGA-based real-time simultaneous localization and mapping system". I: *2015 International Conference on Field Programmable Technology (FPT)*, s. 200–203. DOI: [10.1109/FPT.2015.7393150](https://doi.org/10.1109/FPT.2015.7393150).
- Heng, L., Lee, G. H., Fraundorfer, F. och Pollefeys, M. (2011). "Real-time photo-realistic 3D mapping for micro aerial vehicles". I: *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, s. 4012–4019. DOI: [10.1109/IROS.2011.6095058](https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6095058).
- Kehoe, J., Watkins, A., Causey, R. och Lind, R. (aug. 2006). "State Estimation Using Optical Flow from Parallax-Weighted Feature Tracking". I: DOI: [10.2514/6.2006-6721](https://doi.org/10.2514/6.2006-6721). URL: https://mae.ufl.edu/ricklind/rick_pro/of/GNC06_OF.pdf.

- Latif, R. och Saddik, A. (2019). "SLAM algorithms implementation in a UAV, based on a heterogeneous system: A survey". I: *2019 4th World Conference on Complex Systems (WCCS)*, s. 1–6. DOI: [10.1109/ICoCS.2019.8930783](https://doi.org/10.1109/ICoCS.2019.8930783).
- Lu, Y., Xue, Z., Xia, G.-S. och Zhang, L. (2018). "A survey on vision-based UAV navigation". I: *Geo-spatial Information Science* 21.1, s. 21–32. DOI: [10.1080/10095020.2017.1420509](https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420509).
- Mansour, M., Davidson, P., Stepanov, O. och Piché, R. (2019). "Relative Importance of Binocular Disparity and Motion Parallax for Depth Estimation: A Computer Vision Approach". I: *Remote Sensing* 11.17. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11171990>.
- Motlagh, N. H., Bagaa, M. och Taleb, T. (2017). "UAV-Based IoT Platform: A Crowd Surveillance Use Case". I: *IEEE Communications Magazine* 55.2, s. 128–134. DOI: [10.1109/MCOM.2017.1600587CM](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600587CM).
- Rogers, B. och Graham, M. (febr. 1979). "Motion parallax as an independent cue for depth perception". I: *Perception* 8, s. 125–34. DOI: [10.1068/p080125](https://doi.org/10.1068/p080125).
- Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K. och Bradski, G. (2011). "ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF". I: *2011 International Conference on Computer Vision*, s. 2564–2571. DOI: [10.1109/ICCV.2011.6126544](https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126544).
- Santos-Victor, J., Sandini, G., Curotto, F. och Garibaldi, S. (1993). "Divergent stereo for robot navigation: learning from bees". I: *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, s. 434–439. DOI: [10.1109/CVPR.1993.341094](https://doi.org/10.1109/CVPR.1993.341094).
- Se, S., Lowe, D. G. och Little, J. J. (2005). "Vision-based global localization and mapping for mobile robots". I: *IEEE Transactions on Robotics* 21.3, s. 364–375. DOI: [10.1109/TR0.2004.839228](https://doi.org/10.1109/TR0.2004.839228).
- Se, S., Lowe, D. och Little, J. (aug. 2002). "Mobile Robot Localization and Mapping with Uncertainty using Scale-Invariant Visual Landmarks". I: *The International Journal of Robotics Research* 21, s. 735–760. DOI: [10.1177/027836402761412467](https://doi.org/10.1177/027836402761412467). URL: <https://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/ijrr02.pdf>.
- Thrun, S., Burgard, W. och Fox, D. (2005). *Probabilistic robotics*. Intelligent robotics and autonomous agents. MIT Press, s. 1–647. ISBN: 978-0-262-20162-9.