



Kandidatavhandling

Kandidatprogrammet i Datavetenskap

# Samtidig lokalisering och kartläggning med datorseende

Sebastian Sergelius

22.10.2020

MATEMATISK-NATURVETENSKAPLIGA FAKULTETEN

HELSINGFORS UNIVERSITETET

**Handledare**

Doktor Jeremias Berg

**Examinatorer**

Doktor Patrik Floréen

**Kontaktinformation**

PB 68 (Pietari Kalm gata 5)  
00014 Helsingfors universitetet, Finland

E-postadress:: [info@cs.helsinki.fi](mailto:info@cs.helsinki.fi)

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

Tiedekunta — Fakultet — Faculty		Koulutusohjelma — Utbildningsprogram — Study programme	
Matematiske-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	
Kandidatavhandling		22.10.2020	
		Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages	
		11 sidor	
Tiivistelmä — Referat — Abstract			
<p>Roboters förmåga att navigera är ett forskningsområde som har gått framåt under de senaste årtionden. En drönare, som är en flygande robot, har använts för att skaffa visuell information av katastrofområden eller övervaka industriolyckor. Att en robot skulle kunna navigera autonomiskt måste den vara medveten om sitt läge, miljö, kursriktning och hastighet. En viktig del i autonomisk navigering för drönaren är att den kan samtidigt kartlägga omgivningen och lokalisera sig själv i omgivningen.</p> <p>För att kameror är billiga och är inte beroende på utomstående hjälp för att skaffa information av omgivningen har vision baserad navigering fått mera uppmärksamhet än de traditionella metoder som till exempel satellitnavigation. Syftet med denna avhandling är att undersöka vision baserad navigation från drönarens perspektiv med fokus på samtidig kartläggning och lokalisering och hur detta problem har angripits.</p>			
<p><b>ACM Computing Classification System (CCS)</b> 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

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Bakgrund</b>	<b>2</b>
2.1	Navigation . . . . .	2
2.2	Datorseende och bildbearbetning . . . . .	2
2.3	Kartläggning av omgivningen . . . . .	3
2.4	Lokalisering i omgivningen . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Samtidig lokalisering och kartläggning</b>	<b>5</b>
3.1	Kartlösa system . . . . .	5
3.1.1	Optiskt flöde . . . . .	6
3.1.2	Spårning av egenskaper . . . . .	6
3.2	Kartbaserade system . . . . .	6
3.3	Kartbyggande system . . . . .	7
3.3.1	Indirekta metoder . . . . .	7
3.3.2	Direkta metoder . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Sammanfattning</b>	<b>9</b>
	<b>Referenser</b>	<b>10</b>

# 1 Inledning

En drönare är ett obemannat luftfordon som kan styras med hjälp av vision baserad-, tröghets- eller satellitnavigation (Lu m. fl., 2018). För att robotar eller drönaren skulle kunna navigera autonomiskt måste den vara medveten om sitt läge, omgivning, hastighet, kursriktning samt start- och slutplats. Andra faktorer som borde beaktas för att flyga från start till slutplatsen är hur drönaren 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.

För att drönaren är mer versatila än robotar som inte flyger så finns det mera användningsfall för dem. De kan övervaka markföroreningar, industriolyckor eller växternas behov av vatten och näring (Motlagh m. fl., 2017). Drönaren har också använts vid katastrofområden, såsom vid Japans jordbävning för att mäta strålningsvärden i Fukushima och få visuell information om katastrofområdet samt räddning av invandrare vid medelhavet. Mest lovande forskning är inom vision baserad navigering med hjälp av datorseende.

Robot navigering med hjälp av datorseende är ett aktivt forskningsområde (Desouza och Kak, 2002). För att robotar skulle vara verkligen autonoma måste de kunna kartlägga sin omgivning och lokalisera sig själv i omgivningen, detta 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 är att konstruera algoritmer som fungerar i allmänhet, såsom i dynamiska och stora miljöer (Durrant-Whyte och Bailey, 2006).

Avhandlingen kommer att vara en översikt om SLAM problemet och vilka metoder det finns för att kartlägga miljön och lokalisera sig själv med hjälp av datorseende, som refereras också som samtidig lokalisering och kartläggning med datorseende (VSLAM, Visual SLAM). Frågor som behandlas är: Vad är det fundamentala problemet med SLAM? Vilka SLAM metoder skulle kunna användas eller har använts med drönaren och vad begränsar användningen av dessa? Varför har VSLAM fått så mycket uppmärksamhet än de traditionella metoderna?

Resten av avhandlingen är strukturerad enligt följande: I kapitel 2 öppnas bakgrund bakom navigering, kartläggning, lokalisering och bildbearbetning som är nödvändiga för SLAM, kapitel 3 innehåller information om samtidig lokalisering och kartläggning och hur SLAM problemet kan grupperas i olika kategorier enligt data som man har.

# 2 Bakgrund

## 2.1 Navigation

Med navigering anser vi att en drönare planerar och utför en rutt från startplats till målet (Lu m.fl., 2018). För att kunna navigera till målet måste den vara medveten om sitt läge, miljö, kursriktning och hastighet. Autonomisk navigering kräver att drönaren kan undvika hinder, planera sin rutt samt ta omvägar vid behov. I vision baserad navigation används visuella sensorer för att få bilder som indata. Bilderna kan sedan behandlas med algoritmer för att få en representation av omgivningen och lokalisera drönaren i omgivningen. Visuella sensorer som används är monokulära, stereo, RGB-D och fisheye kameror samt kombinationer av dessa. Kamerasensorer är billiga att operera, väger lite och med dem kan man uppfatta färg, textur och former. Traditionella navigeringsmetoder såsom satellit, som använder GPS (Global Positioning System) signaler för lokalisering, och tröghetsnavigering (Inertial Navigation System), som använder accelerometer och gyroskop, får man inte visuell information av omgivningen. Med kameror kan man navigera i GPS nekade områden för att kameror är passiva, det vill säga de kan inte bli störda av utomstående signaler eller upptäckas av utomstående entitet. Drönaren kan använda laser och ultraljudsensorer för att navigera men dessa kräver mycket energi och väger mer än kameror (Fraundorfer m.fl., 2012). För att drönaren byggs mindre än förr, och på grund av detta har begränsad bärförmåga samt batterikapacitet, har dessa sensorer uteslutats. Med hjälp av vision baserad navigering, som använder kameror, kan man få rikligt med information om omgivningen (Lu m.fl., 2018). Vision baserad navigering, som är ett aktivt forskningsområde, är den mest lovande metoden inom robotnavigering.

## 2.2 Datorseende och bildbearbetning

Bildbearbetning i vision baserad navigering menar att man gör utdrag ur bilder i form av former, kanter, linjer, djuphet, rörelse, färg eller mönster (Desouza och Kak, 2002). Metoder för att uppskatta djuphet med datorseende är att räkna binokulära skillnaden eller rörelseparallax (Mansour m.fl., 2019). Rörelseparallax menar att objekt rör på sig snabbare då de är närmare observatören och långsammare då de är långt borta. Med binokulär skillnad har man två kameror som är riktade i samma linje, deras distans från varandra är känd och av

båda kamerornas bilder utdras samma kännetecken. Då distansen är kort så är kännetecknen vid olik plats på båda bilderna, men då distansen från objektet växer så är det svårt att estimera distansen. Med en monokulär kamera kan man uppskatta djuphet av bilder baserat på rörelseparallax. För att bygga djuphetskarta med monokulärkamera och rörelseparallax behöver man veta distansen till ett objekt då navigeringen börjar och som indata får man bilder och rörelseinformation av roboten (Mansour m. fl., 2019). Mansour m. fl., 2019 undersökte detta 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.

Man kan också utjämna bilder (Se, D. Lowe m. fl., 2002). Detta menar att man blurrar bilder för att få bort brus och då man gör utdrag ur bilder i form av egenskaper får man färre, men bättre träffar. För att få former, kanter eller linjer ur bilder finns det olika algoritmer såsom SIFT, HARRIS, SURF, ORB, med mera (Latif och Saddik, 2019; Aulinas m. fl., 2008; Se, D. Lowe m. fl., 2002).

## 2.3 Kartläggning av omgivningen

En karta om miljön kan representeras i två (2D) eller tre (3D) dimensioner (Lu m. fl., 2018). Kartor kan sparas i olika format, såsom datorstödd konstruktion (CAD, Computer-Aided Design), rutnät beläggning (Occupancy Grid) eller topologisk karta (Desouza och Kak, 2002). Kartan kan vara färdigt sparad för drönaren eller så kan miljön kartläggas från bilderna av sensorerna då drönaren 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 stereovision sensorer göra en djuphetskarta och behandla data till plana ytor som minskar på missvisning som uppstår med användning av stereovision algoritmer när man bygger upp djuphetskartan.

## 2.4 Lokalisering i omgivningen

Med att en robot lokaliserar sig menar vi att den tar reda på sin position (Desouza och Kak, 2002). Då man har en uppfattning om miljön, det vill säga en karta, så kan en drönare lokalisera sig själv med att ge den landmärken som den hittar då den navigerar. Från bilderna ur drönarens kameror identifieras landmärken, sedan matchas observerade landmärken med de som finns i kartan och efter det kan man beräkna positionen av roboten. Positionen av roboten kan beräknas också utan kartan med att beräkna distansen till landmärken och

distansen mellan landmärken som extraheras ur bilder (Durrant-Whyte och Bailey, 2006). För att veta sin position i miljön används sannolikhetsberäkning med hjälp av rekursiv Bayes, som menar att man räknar sannolikheten av robotens position när man vet riktningen, hastigheten och observerade landmärken för varje tidpunkt. Man kan dela lokalisering till global- och inkrementell eller lokal lokalisering (Desouza och Kak, 2002; Se, D. G. Lowe m.fl., 2005). Med global lokalisering har roboten ingen vetskap om sin position i början. I lokal lokalisering har roboten en ungefärlig eller exakt vetskap om sin plats vid början av navigeringen som den fått som indata. Lokal lokalisering metoder strävar för att korrigera fel som uppstår av robotens rörelse. Globala lokaliserings tekniker kan komma över verkliga misstag i robotens position.



# 3 Samtidig lokalisering och kartläggning

Samtidig lokalisering och kartläggning (SLAM) är ett av de grundläggande problem i robotnavigering (Durrant-Whyte och Bailey, 2006). SLAM är ett problem där en autonom robot som inte har tidigare information om sin plats eller omgivning skall samtidigt bygga en karta och lokaliserar sig själv till exempel med hjälp av att identifiera landmärken. Detta kan uppnås med sannolikhetsberäkning baserat på tid där man tar i beaktande riktningen av roboten, distansen roboten rör på sig, landmärken som är invariant för rörelse och observationer som roboten gör vid varje tidpunkt. Några lösningar för SLAM som baserar sig på sannolikheträkning är Extended Kalman Filter (EKF-SLAM) och FastSLAM (Durrant-Whyte och Bailey, 2006).

SLAM processen har delproblem som borde lösas för att få robotar att navigera autonomt (Aulinas m. fl., 2008). Det svåraste problemet i flesta SLAM lösningar är dataföreningsproblemet som menar 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).

För autonomisk navigering behöver en robot veta sitt läge i miljön (Lu m. fl., 2018). Med hjälp av kameror, bildbearbetning och beräkning kan miljön kartläggas, i helhet eller delvis, och drönaren lokalisera sig själv, detta kallas också för visuell samtidig lokalisering och kartläggning (VSLAM). VSLAM kan delas i tre kategorier, som är kartlösa (mapless), kartbaserade (map-based) och kartbyggande (map-building) system.

## 3.1 Kartlösa system

I system utan karta navigerar drönaren 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 används inom kartlösa system är optiskt flöde (Optical flow) och spårning av egenskaper (Feature tracking).

### 3.1.1 Optiskt flöde

Santos-Victor et. al har använt optiskt flöde i en robot för att imitera bin (Santos-Victor m. fl., 1993). De placerade två kameror på varsin sida av en robot och beräknade hastigheten från bilderna av båda kamerorna med att ta fem bilder som utjämnas med Gaussisk oskärpa och de två sista utjämnade bilder används för att räkna medeltalet av optiska flödesvektorer. Om flödesvektorerna var samma på båda sidorna så for roboten rakt framåt, annars så far den mot den sida vilkens hastighet är mindre. Metoden som Santos-Victor et al. använde för roboten fungerar bara om båda kamerorna är symmetriskt riktade från varandra när man tar i beaktande rörelseriktningen av roboten (Desouza och Kak, 2002). Denna teknik fungerar dåligt i texturlösa miljö och det går inte att byta rörelseriktningen. Fast än metoden som Santos-Victor m. fl., 1993 använde tog bara i beaktande horisontala flödesvektorer så har sedan detta användning av optiska flödesmetoder forskats mera. Nuförtiden kan man använda drönaren att uppskatta avstånd, hålla sin altitud, undvika hinder, beräkna hastighet och landa på en plattform som rör på sig med hjälp av optiskt flöde (Chao m. fl., 2013).

### 3.1.2 Spårning av egenskaper

Spårning av egenskaper (Feature tracking) används för att skaffa information om objekt, så som linjer, hörn och olika former som är invarianta (Lu m. fl., 2018). Med hjälp av dessa egenskaper av objekten och deras relativa rörelse i sekventiella bilder kan man bestämma robotens position. Då drönaren navigerar i området, så kommer den troligtvis att se dessa objekt från olika perspektiv, som hjälper drönaren att navigera. EKF-SLAM och FastSLAM faller under denna kategorin (Latif och Saddik, 2019). Latif och Saddik har gjort en experiment inomhus med en drönare där de använde VoSLAM (Visual Odometry SLAM) som delar upp bildbearbetningen och 3D kartbyggande i egen processor och uppdatering av kartan samt lokaliseringen i en annan processor (Latif och Saddik, 2019).

## 3.2 Kartbaserade system

Med kartbaserade system har drönaren en färdig vetskap om miljön som kan vara i form av geometriska modeller, topologiska kartor eller förhållande mellan landmärken (Desouza och Kak, 2002). Idén är att då roboten navigerar prövar den hitta landmärken från bilder som är lika till de landmärken som roboten vet om. När den hittat dessa så kan roboten beräkna sin position i miljön. Med hjälp av karta kan drönaren planera sin rörelse i förhand och ta omvägar där det behövs (Lu m. fl., 2018).

Kartbaserad lokalisering med datorseende kan delas upp i fyra steg, som är skaffa sensorinformation, upptäcka landmärken från informationen med bildbearbetning, matcha observationerna med förväntan och beräkna position (Desouza och Kak, 2002). Det svåraste steget av dessa är att matcha observationerna med förväntan. Detta kallas för dataföreningsproblemet. Man kan inte med full säkerhet veta robotens position och då är det svårt att matcha landmärken från rätt synvinkel.

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 någon av observationerna kan matcha flera av de landmärken man vet om. Detta problem kan lösas till exempel med Monte Carlo lokalisation som i korthet fungerar så att en robot antar med lika sannolikhet sin position i kartan och när den rör på sig så observerar den ny information och kan beräkna sannolikheten att hur de som den observerar matchar den karta som den har (Dellaert m. fl., 1999).

I inkrementell lokalisering måste lokaliseringsalgoritmen hålla koll på osäkerheten av robotens position då den rör på sig och vänder (Dellaert m. fl., 1999). Då osäkerhet av sin position är för stor stannar roboten och beräknar sin position med hjälp av visuell information av bilderna, alltså minskar på osäkerheten.

### 3.3 Kartbyggande system

Kartbyggande system kan användas 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 kartbyggande (Se, D. G. Lowe m. fl., 2005). Kartbyggande systems bildbearbetning kan delas tre kategorier, som är indirekt, direkt och hybrid metoder, som sammanslår indirekta och direkta metoder (Lu m. fl., 2018).

#### 3.3.1 Indirekta metoder

I bildbearbetning där används indirekta metoder tar man kännetecken ur bilden som är invariant 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). De tar bilder från stereokameror, utjämnar bilderna och använder SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) algoritm för att extrahera egenskaper ur bilderna. Med denna metod har de kunnat konstruera en 3D karta av omgivningen baserat på landmärken utan att spara korrelationmatrix mellan landmärken som minskar häftigt på behov av beräkning. Denna approach har ändå problem då det kommer till loopstängning och uppdatering av kartan (Se, D. G. Lowe m.fl., 2005). Med att använda samma spårning av egenskaper, kartlägga delar av områden och senare bygga en stor global karta fick forskarna loopstängning och kart uppdateringen löst i begränsad miljö. I korthet kartlägger de, enligt robotens synvinkel, delar av kartan och från kartorna bredvid varandra kunde de identifiera landmärken och foga ihop kartorna till en stor karta. Indirekta metoder fungerar inte så bra i strukturlösa miljön, för det finns inte egenskaper att extrahera ur bilder (Lu m.fl., 2018).

### **3.3.2 Direkta metoder**

Direkta metoder fungerar bättre i strukturlösa miljön (Engel m.fl., 2014). Som i indirekta metoder där man provar hitta många små kännetecken ur bilder så i direkta metoder använder man hela bilden för att hitta geometriska egenskaper. Med hjälp av dessa så kan man hitta täta korrespondenser och konstruera en detaljerad karta med extra processorberäkning (Lu m.fl., 2018).

## 4 Sammafattning

# 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).
- Dellaert, F., Fox, D., Burgard, W. och Thrun, S. (1999). "Monte Carlo localization for mobile robots". I: *Proceedings 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).
- 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).

- 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>.