

Bildgestützte Rendezvousnavigation für Satelliten-Servicing-Operationen

Motivation

Autonome Wartung und Manipulation von Satelliten im Orbit, so genanntes On-Orbit-Servicing (Abb. 1), gilt als Schlüsseltechnologie und Herausforderung in der nahen Zukunft. Durch autonome Wartung von Raumfahrzeugen können erhebliche Kosten eingespart werden, z.B. durch Reduzierung von Nutzlast bei Wiederverwendung von sich bereits im Orbit befindlichen Satelliten, deren Treibstoffvorrat nachgefüllt wird oder durch den Austausch von defekten Teilsystemen statt Ersatz des kompletten Satelliten. Autonome Systeme können und sollen Astronauten entlasten oder ersetzen. Die ESA hat mit dem Rendezvous-Manöver zwischen der ISS und dem ATV „Jules Verne“ gezeigt, dass autonome Docking-Manöver bereits beherrscht werden. Die NASA hat zuvor mit der Orbital Express-Mission autonome Rendezvous- und Servicing-Technik erprobt und demonstriert. Die bisher durchgeführten Missionen setzten allerdings voraus, dass sowohl das anfliegende Raumschiff (Chaser) als auch das angeflogene Raumschiff (Target) funktionstüchtig sind und miteinander direkt oder indirekt kommunizieren können, sowie dass beide Raumschiffe für ein Rendezvous-Manöver präpariert sind. Bestehen derartige Voraussetzungen nicht, existieren noch keine sicheren Konzepte für eine Rendezvousnavigation.

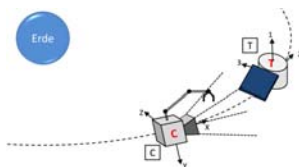


Abb. 1: Symbolische Darstellung einer Satelliten-Servicing-Operation

Ziel der Arbeit

Um defekte Satelliten warten zu können, werden Schätzverfahren benötigt, damit umgehen können, dass

- das Target nicht kooperativ ist,
- die Target-Geometrie a priori nicht bekannt ist und
- die Navigation autonom abläuft (keine Teleoperation).

Notwendige Schätzgrößen sind die kinematischen Relativzustände und die Targetgeometrie. Am Institut für Automatisierungstechnik werden solche Schätzverfahren auf Basis von Kamerabildern entwickelt und verifiziert. Vorteil der bildgestützten Rendezvousnavigation ist, dass Kameras relativ günstige, energie-sparende passive Sensoren sind und neben den unbedingt notwendigen Informationen über die relative Bewegung des Targets und dessen Geometrie weitere Analysen ermöglichen (z.B. Objekterkennung zur Identifizierung geeigneter Andockstrukturen).



Abb. 2: On-Orbit Kameraaufnahmen eines Target-Satelliten: Links real [1], Mitte/Rechts gerendert

Referenzdaten – Raytracing und Laborsimulator

Um Algorithmen verifizieren zu können, benötigt man repräsentative Sensordaten und die zugehörigen wahren Werte (Ground Truth). Da für Bilder von abgeschlossenen Missionen keine Ground Truth zur Verfügung steht (Abb. 2, Links), werden Bilder mit zwei verschiedenen Methoden generiert, für die alle zu schätzenden Größen bekannt sind. Dazu wird verwendet:

- eine Raytracing-Software (Abb. 2, Mitte/Rechts) und
- ein Laborsimulator (Abb. 3).

In beiden Fällen wurde Wert auf realistische Beleuchtungsbedingungen gelegt, da Schatten und Reflexionen die Bildauswertung erschweren. Lichtquellen sind die Sonne (direkte Beleuchtung) und die Atmosphäre der Erde (indirekte Beleuchtung). Das verwendete Satellitenmodell bildet einen Satelliten-Grundkörper verpackt in Wärmeschutzfolie (reflektierend) und einen daran befestigten Solargenerator ab.

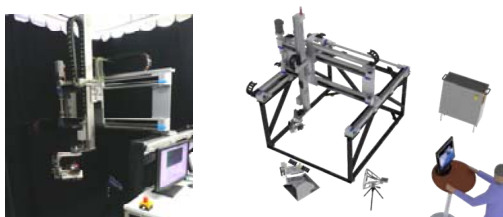


Abb. 3: Der am Institut für Automatisierungstechnik entwickelte Simulator MiPOS

Kontakt

Technische Universität Dresden
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Lehrstuhl für Automatisierungstechnik
Prof. Dr. techn. Klaus Janschek
01062 Dresden
www.et.tu-dresden.de/ffa

Ansprechpartner:
Telefon:
Telefax:
E-Mail:
Besuchsadresse:

Dipl.-Ing. Arne Sonnenburg
+49 351 463 35391
+49 351 463 37039
arne.sonnenburg@tu-dresden.de
Barkhausen-Bau, Georg-Schumann-Str. 11, Zi. S84



Die gerenderten, idealen Bilder werden gemäß einem, für die Raumfahrt repräsentativen, Kameramodell gestört. Dabei werden optische Effekte der Optik (z.B. Randabschattung und Verzeichnung) und zeitveränderliche und zeitvariante elektrische Effekte des Sensors (z.B. Dunkelrauschen, Ausleserauschen und Offset) berücksichtigt.

Bestimmung Relativzustandsvektor und 3D-Rekonstruktion

Die Relativnavigation relativ zu einem a priori unbekannten Target (RV-SLAM) wird durch die Tatsachen erschwert, dass

- die benötigten Größen nicht direkt messbar sind (unbekannter Schwerpunkt des Targets),
- die Messungen, basierend auf verrauschten Bildern, ungenau sind,
- die Bezugspunkte des Targets a priori nicht bekannt sind (Position im Target-Koordinatensystem unbekannt) und
- das Bewegungsmodell des Chasers nicht exakt sein kann.

Bei dieser Problemstellung gibt es starke Analogien zu dem, aus der mobilen Robotik bekannten, „Simultaneous Localization and Mapping“ (SLAM) – Problem (Abb. 4).

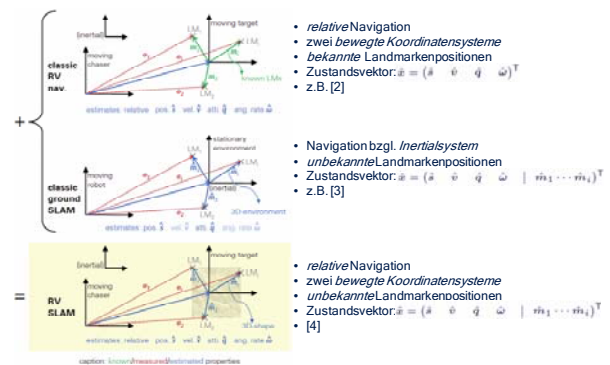


Abb. 4: Vergleich der unterschiedlichen Navigationsalgorithmen

Der Lösungsansatz zum Lösen des (RV)-SLAM-Problems besteht darin, die Unsicherheiten der Messungen und des Bewegungsmodells mit in die Zustandsschätzung einzubeziehen und die Karte/Targetgeometrie im Zustandsvektor mit abzubilden. Dabei geschieht die initiale Einbeziehung und Einordnung von neuen Referenzpunkten relativ zu bereits bestehenden Referenzpunkten. Die Beziehungen zwischen den Referenzpunkten und dem Referenzkoordinatensystem werden bei jeder Messung verfeinert. So ist es möglich trotz sukzessiver Berechnung einen driftfreien und konsistenten Zustandsvektor zu erhalten.

In der hier vorgestellten Arbeit wurde aufbauend auf [5] ein Extended Kalman Filter (EKF)-RV-SLAM-Algorithmus entwickelt der basierend auf einem Stereo-Kamera-System unter Nutzung von Rotations- und skalierungsinvarianten Features eine Relativnavigation zu einem unbekannten, unkooperativen Target, welches um eine inertial feste Achse rotiert, ermöglicht (Abb. 5).

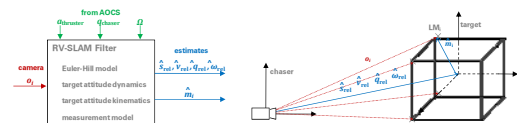


Abb. 5: EKF-RV-SLAM Filter Prinzipskizze; rot: Messungen, blau: Schätzwerte, grün: bekannte Werte

Die Targetgeometrie wird dabei als Punktwolke bezüglich dem Target-Body-Koordinatensystem abgebildet und kann z.B. zur Kollisionsvermeidung mit weiterführenden Algorithmen durch einfache geometrische Körper approximiert werden ([6]).

Referenzen

- [1] Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) Homepage; 01.09.2008; URL: http://www.darpa.mil/orbitalexpress/images/VS2_126_06_01_55_698.jpg
- [2] W. Fehse: "Automated Rendezvous and Docking of Spacecraft". Cambridge University Press, Cambridge 2003.
- [3] S. Thrun, W. Burgard, D. Fox: "Probabilistic Robotics". The MIT Press, Cambridge, London 2005.
- [4] S. Augenstein: "Monocular Pose and Shape Estimation of Moving Targets, For Autonomous Rendezvous and Docking". Dissertation, June 2011.
- [5] A. Sonnenburg, M. Tkocz, K. Janschek: "EKF-SLAM based Approach for Spacecraft Rendezvous Navigation with Unknown Target Spacecraft". 18th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, 6-10 Sept. 2010, Nara, Japan.
- [6] F. Schnitzer, A. Sonnenburg, K. Janschek, G. Willich: "SLAM-based 3D Shape Estimation for Rendezvous with Uncooperative and Unknown Target Spacecraft". 8th International ESA Conference on Guidance and Navigation Control Systems, 8-10 June 2011, Carlstad, Czech Republic.