

BILDBASIERTE SLAM-RELATIVNAVIGATION UND 3D-REKONSTRUKTION FÜR DAS ON-ORBIT-SERVICING VON UNBEKANNTEN UND UNKOOPERATIVEN RAUMFLUGKÖRPERN

F. Schnitzer, A. Sonnenburg, K. Janschek,
Technische Universität Dresden, Fakultät
Elektrotechnik und Informationstechnik,
Institut für Automatisierungstechnik,
01062 Dresden, Deutschland

G. Willich,
Astrium GmbH,
Future Programs & Instruments,
88090 Immenstadt, Deutschland

Zusammenfassung

Für das autonome On-Orbit-Servicing sind die Kenntnis über die Form des Zielraumflugkörpers und eine adäquate Relativnavigation während der Annäherungsphase essentiell für kollisionsfreie Interaktionen und Serviceoperationen.

Für den Fall, dass die Form des Ziels unbekannt ist (z. B. Weltraumschrott oder beschädigte Satelliten), muss dessen 3D-Form geschätzt werden. Kamerabasierte Messungen bieten Vorteile in Kosten, Gewicht und Leistungsaufnahme, ergeben aber wegen der ungünstigen Beleuchtungsbedingungen, den speziellen Oberflächen von Raumfahrzeugen und der begrenzten Rechenkapazität an Bord oft nur eine verteilte 3D-Punktwolke mit niedriger Dichte. Übliche 3D-Rekonstruktionsalgorithmen basieren auf dichten Punktwolken und sind sehr rechenintensiv. Daher sind geeignete neue und echtzeitfähige Algorithmen für die Auswertung notwendig.

Vorgestellt wird ein Ansatz, bei dem alle notwendigen Informationen zur Durchführung eines Rendezvousmanövers bezüglich eines unbekanntes, unkooperativen und um eine Achse rotierenden Zieles ausschließlich aus Stereokameradaten gewonnen werden.

Durch Einsatz eines Rendezvous-SLAM-Algorithmus (SLAM - Simultaneous Localization and Mapping) wird die Positions-Messung markanter Punkte auf der Zieloberfläche ("Bildverarbeitung") stark verbessert und die Schätzung kinematischer (Relativ-)Zustände bezüglich des Zieles ermöglicht ("Zustandsschätzung"). Die resultierende, verrauschte Punktwolke mit niedriger Dichte wird nun genutzt, um die Stereobild-basierte Rekonstruktion der unbekanntes Form des Ziels ("Geometrische Rekonstruktion") zu verbessern und somit eine Kollisionsvermeidung und eine geometrische Charakterisierung des Zieles zu ermöglichen. Der vorliegende Beitrag skizziert das Gesamtkonzept und präsentiert experimentelle Ergebnisse auf der Basis von synthetischen Bilddaten und realen Bilddaten eines institutseigenen Rendezvous-Simulators.

1. EINLEITUNG

Das robotische Beobachten, Einfangen, Warten und Reparieren von Satelliten ohne Zutun des Menschen – kurz: autonomes On-Orbit-Servicing (OOS) – gilt als eine der großen Herausforderungen der modernen Raumfahrt. Neben dem Einsatz als Assistenzsystem bei bemannten Raumfahrtmissionen können diese Systeme auch vollkommen eigenständig agieren.

Eine unausweichliche Teilaufgabe des OOS ist die Rendezvous-Navigation zwischen dem sich annähernden Raumfahrzeug („Chaser“) und dem Zielobjekt (z. B. ein Satellit oder Weltraumschrott). Dem Risiko einer Kollision während der Annäherung begegnet man mit sehr hohen Anforderungen an Genauigkeit und Robustheit des Systems. Für Rendezvous-Manöver mit defekten Satelliten oder Schrottteilen ergeben sich jedoch noch weitere Bedingungen: Das Ziel kann vollständig unbekannt und unkooperativ sein, es kann eine unerwartete Form aufweisen oder auch taumelnde Bewegungen ausführen.

Eine rein kamerabasierte Lösung für die Rendezvous-Navigation bietet gegenüber anderen Ansätzen Vorteile bezüglich Gewicht, Energieeffizienz und Informationsdichte. Mit entsprechenden Algorithmen können aus den Bild-

daten sowohl die kinematischen Zustände des Zielobjektes, als auch seine geometrische Struktur bestimmt und somit eine sichere und kollisionsfreie Annäherung durchgeführt werden.

1.1. Stand der Technik

Die Wichtigkeit robotischer Missionen wurde im Jahr 2012 auf der nationalen Konferenz zur Raumfahrt-Robotik noch einmal in Fachvorträgen aus dem Bereich des Orbitalen Servicing bestätigt [1]. Automatisierte Rendezvous-Manöver wurden bereits in der Vergangenheit erfolgreich durchgeführt (z. B. [2], [3]). Die Ziele waren jedoch stets kooperativ oder zuvor bekannt, es wurden spezialisierte Sensoren verwendet oder eindeutige Navigationsmuster auf dem Ziel angebracht.

Ansätze, bei denen die dreidimensionale Struktur direkt aus der zweidimensionalen Abbildung erkannt und die räumliche Orientierung des bekannten Zieles geschätzt wird, werden u. a. in [4] und [5] präsentiert, nutzen aber jeweils eine Bibliothek mit a-priori bekannten Modellen.

Ein Verzicht auf die Nutzung eines bekannten Modelles und somit die Möglichkeit Form und Bewegung eines unbekanntes Zieles zu schätzen, ergibt sich durch die

Verfolgung natürlicher charakteristischer Punkte im Bild (Bildmerkmale, engl.: features) und dem nachfolgenden Einsatz eines Schätzfilters. Den Bildpunkten lassen sich Punkte (natürliche Landmarken) auf dem Ziel zuordnen. Auf diese Weise ist es möglich, die relativen Zustände des Zieles und die dreidimensionalen Positionen der Landmarken zu schätzen. Ein Ansatz mit einem Monokamera-System und SIFT-Bildmerkmalen [6] sowie einem Partikelfilter für die Pose- und Landmarkenschätzung wird in [7] vorgestellt. In [8] wird ein Ansatz mit einem erweiterten Kalman Filter-SLAM (EKF-SLAM) präsentiert, bei dem die Orbit-Dynamiken einbezogen werden, um die relativen kinematischen Zustände und die Zielstruktur zu schätzen. Die in beiden Ansätzen ermittelten Landmarken werden in einer Punktwolke zusammengefasst. Die Form des Zieles wird jeweils nur durch die Punkte dieser Punktwolke wiedergegeben.

Für einige missionsbezogene Aufgaben (z. B. Kollisionsvermeidung) ist es dagegen sinnvoll, anstelle einer Repräsentation des Zieles durch eine Punktwolke oder einer triangulierten Oberflächendarstellung, ein 3D-Modell des Zieles einzusetzen. In diesem Fall kann eine Punktwolke als Grundlage für eine geometrische Rekonstruktion dienen. Für die Objekterkennung basierend auf Punktwolken sind verschiedene Methoden und Techniken bekannt (u. a. [9], [10], [11]).

Aufgrund der eingeschränkten Mobilität während der Zielerkundung (durch Beschränkungen der orbitalen Dynamik) und der ungünstigen Beleuchtungsbedingungen im Welt- raum liefern die merkmalsbasierten Filteralgorithmen ver- rauschte Punktwolken mit nur geringer Dichte. Dadurch ergeben sich besondere Herausforderungen für die Re- konstruktionsalgorithmen.

Obwohl der RANSAC-Algorithmus aus [10] ursprünglich für sehr große Datensätze angedacht ist, zeigt er auch bei Punktwolken mit niedriger Dichte vielversprechende Er- gebnisse und kann automatisch verschiedene Typen geometrischer Primitive erkennen und voneinander unter- scheiden. In [12] wurde der RANSAC-Algorithmus erfolg- reich zur Segmentierung von Punktwolken eingesetzt, die aus synthetischen Bilddaten eines Raumfahrt- Rendezvous-Manövers erzeugt wurden. In [13] konnte der gleiche Ansatz auf weitere Punktwolken, basierend auf realen Bildern aus einem Rendezvous Simulator, ange- wendet werden. Der Ansatz nutzt SURF-Bildmerkmale [14] und schätzt die relativen Zustände und die 3D- Landmarken mit einem EKF-SLAM-Filter.

1.2. Inhalt

Vorgestellt wird ein Ansatz, der die Schätzung der rela- tiven kinematischen Zustände und die Rekonstruktion der Form eines unbekanntes, unkooperativen Zieles allein auf Grundlage der Bilddaten eines Kamerasystems realisiert. Der Einsatz eines Schätzfilters verbessert nicht nur die Bestimmung der interessierenden Werte, sondern ermög- licht auch die Voraussage für Berechnungen zukünftiger Auswertungszyklen.

Gezeigt werden neben Konzept und Ablauf des Ansatzes auch eine Diskussion zur Machbarkeit und Güte, sowie Ergebnisse aus Experimenten mit synthetischen und rea- len Bilddaten.

1.3. Aufbau

Im nachfolgenden Kapitel 2 wird das Konzept des vorge- stellten Ansatzes skizziert, bevor in den Kapiteln 3, 4 und 5 detaillierter auf Bildverarbeitung, Zustandsschätzung, und geometrische Rekonstruktion eingegangen wird. In

Kapitel 6 werden Experimente zur Bewertung und Ein- schätzung des Ansatzes beschrieben. Kapitel 7 schließt diesen Beitrag mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick ab.

2. KONZEPT

Um einen autonomen Betrieb eines Service- Raumfahrzeuges zu erlauben, muss dieses auch mit un- bekannten und unkooperativen Zielen zurechtkommen. Sichere und kollisionsfreie Manöver sind jedoch nur dann möglich, wenn die relativen kinematischen Zustände und die Form des Zieles bekannt sind oder zuvor bestimmt wurden.

Das GNC-System (Guidance-Navigation-Control) des Service-Raumfahrzeuges wird dafür um den hier be- schriebenen Ansatz erweitert. BILD 1 verdeutlicht das Modell des Systems. Das rekonstruierte Modell kann an- schließend für den autonomen Betrieb genutzt oder zur Unterstützung von Astronauten und Operateuren bereit- gestellt werden.

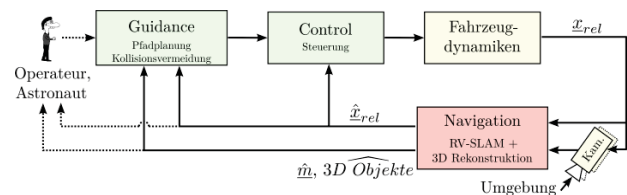


BILD 1. Der Ansatz wird in das GNC-System des Ser- vice-Raumfahrzeuges integriert.

Der bereits in [12] und [13] vorgestellte Ansatz beschränkt sich auf die Nutzung eines Kamerasystems. Um nicht auf künstliche Landmarken auf dem Ziel angewiesen zu sein, werden in den Bilddaten natürliche Bildmerkmale mittels SURF-Algorithmus detektiert. Diese Merkmale ermöglichen die Zuordnung von Bildpunkten zwischen den Bil- dern des Stereo-Kamerasystems und die Verfolgung von Bildpunkten über mehrere Zeitpunkte hinweg.

Wird ein einzelnes Bildmerkmal mehrmals detektiert, so werden dessen Bildkoordinaten an einen erweiterten Kalman Filter Rendezvous-SLAM (EKF-RV-SLAM) weiter- gegeben. Zusammen mit einigen Information des GNC- Systems des Service-Raumfahrzeuges und unter Beach- tung kinematischer und dynamischer Modelle der Raum- fahrzeuge sowie des Messmodells des Kamera-Systems können die 3D-Positionen der den 2D-Bildmerkmalen zugehörigen Landmarken und die relative Zustände des Zieles bestimmt werden [8]. Durch Einsatz dieses Schätz- filters können die Positionen der Landmarken deutlich genauer bestimmt werden, als bei Nutzung einer reinen Stereo-Triangulation (bis zu eine Größenordnung [12]). Die Landmarken formen eine Punktwolke mit niedriger Dichte. Die sehr geringe Anzahl der Landmarken-Punkte ist zwar vorteilhaft bezüglich der Weiterverarbeitung und Speicherung in einer Datenbank, jedoch ist eine Rekon- struktion der Form des Zieles nur auf Basis dieser Daten nicht möglich. Stattdessen wird mit einer parallel ausge- führten Stereo-Triangulation eine zusätzliche Punktwolke erzeugt, die eine für die Rekonstruktion vorteilhafte Anzahl an Punkten enthält, siehe BILD 2.

Um das 3D-Modell des Zielobjektes auch in weiteren Mo- dulen (u. a. Kollisionsvermeidung, Missionsplanung, Pfad- planung) vorteilhaft nutzen zu können, sollte es aus mög- lichst wenigen geometrischen Primitiven anstelle eines aufwendigen Polygonnetzes aufgebaut sein. Das Modell lässt sich auf diese Weise vereinfachen, bleibt aber

gleichzeitig genau genug, um eine semantische Charakterisierung der Zielform zu ermöglichen. Die durch die Zustandsschätzung erstellte Punktwolke kann anschließend genutzt werden, um die Genauigkeit des Modells zu erhöhen.

Die Informationen des 3D-Modells können zusätzlich auch dazu genutzt werden, um die Leistungsfähigkeit der Algorithmen der Bildverarbeitung, der Zustandsschätzung sowie der Rekonstruktion in zukünftigen Berechnungszyklen zu verbessern [13].

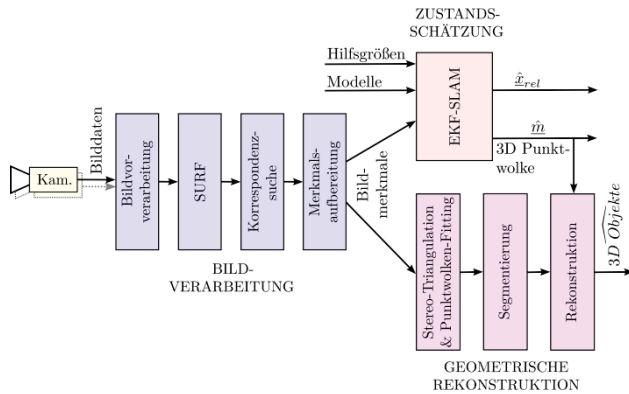


BILD 2. Ablaufschema des Ansatzes. In den Bilddaten werden Bildmerkmale detektiert, ein Schätzfilter ermittelt die relative Zustände des Zieles und Landmarkenpositionen. Parallel dazu erfolgt eine Rekonstruktion des Zieles basierend auf Bildmerkmalen des Stereo-Kamerasystems.

3. BILDVERARBEITUNG

Da vom unbekanntem Ziel weder Form noch spezielle Vorrichtungen oder Markierungen bekannt sind und auch nicht erwartet werden können, ist es notwendig, auf natürliche Landmarken des Zieles zurückzugreifen. Um diese in den Bilddaten zu detektieren und somit die Eingangssignale für den EKF SLAM zu erzeugen, wird ein merkmalsbasierter Ansatz gewählt. Der SURF-Algorithmus [14] bietet sich hierfür aufgrund seiner Echtzeitfähigkeit, die aus der Nutzung von Integralbildern und Box-Filtern resultiert, an. Die Deskriptorvektoren zur Beschreibung der gefundenen Bildmerkmale zeichnen sich durch Skalen- und Rotationsinvarianz aus und sind robust gegenüber verschiedenen Bildtransformationen. Dies ermöglicht das Wiederfinden der Bildmerkmale, und der zugehörigen Landmarken, auch nach einer vollständigen Umrundung oder Rotation des Zieles.

In beiden simultan aufgenommenen Bildern des Stereo-Kamerasystems werden unabhängig voneinander Bildmerkmale detektiert und anschließend denen des anderen Bildes zugeordnet. Über die Bildkoordinaten der Merkmalspaare ist es möglich, die Landmarkenposition in Bezug auf das Kamera-Koordinatensystem zu bestimmen.

Alle je detektierten Bildmerkmale werden in einer Datenbank hinterlegt, um aktuelle Merkmale jenen aus früheren Bildern zuordnen zu können und somit Landmarken verfolgen zu können. Da Bildmerkmale, die zum vorhergehenden Zeitpunkt gefunden wurden, mit recht hoher Wahrscheinlichkeit auch im aktuellen Bild wieder gefunden werden können, werden diese Merkmale in einer separaten, kleineren Datenbank gespeichert. Um zu prüfen, ob ein aktuelles Bildmerkmal einem Merkmal des

vorhergehenden Zeitpunktes zugeordnet werden kann, ist es daher nicht notwendig, die gesamte Datenbank mit all ihren Merkmalen zu durchsuchen, wodurch ein schneller Zugriff auf die Bildmerkmale ermöglicht wird [15].

Um die Menge der an den EKF SLAM weitergereichten 2D-Bildmerkmale handhaben zu können, wird für jedes Merkmal eine Statistik geführt und das Merkmal gemäß dieser bewertet. Nur eine beschränkte Anzahl besonders gut bewerteter Merkmale wird letztlich dem EKF SLAM übergeben.

Die Größe der Datenbank wird zur Einhaltung und Verbesserung der Echtzeitfähigkeit beschränkt. Wird der Grenzwert überschritten, so werden aus den Datenbanken die Bildmerkmale mit den niedrigsten Bewertungen entfernt. Diese Merkmale werden, entsprechend ihrer Bewertung, mit hoher Wahrscheinlichkeit ohnehin nicht erneut detektiert. Zusätzlich können Bildmerkmale aus den Datenbanken gelöscht werden, wenn diese mehrfach nicht als Korrespondenz zu einem aktuellen Merkmal zugeordnet werden konnten, obwohl eine Schätzung der zugehörigen Landmarkenposition dies vorhersagte [12].

Eine Vorauswahl interessanter Bildmerkmale und eine Eingrenzung des Bildmaterials auf interessante Bildbereiche basiert auf der Stereo-Triangulation der Merkmale. Unterscheidet sich die resultierende Entfernung zur zugehörigen Landmarke deutlich vom erwarteten Wert, so werden diese Merkmale ausgesondert.

4. ZUSTANDSSCHÄTZUNG

Die alleinige Verwendung eines Stereo-Kamerasystems zur 3D-Rekonstruktion des Zieles ohne anschließende Weiterverarbeitung der Messwerte führt über sukzessive Messungen zu keiner konsistenten und drifffreien Punktwolke. Außerdem ist die Tiefeninformation der Messung bei ungünstigem Verhältnis zwischen Abstand der Kameras und Abstand zum Target ungenau. Diese Ungenauigkeit kann auch durch wiederholtes Messen nicht verbessert werden, da die Relativbewegung zwischen Service-Raumfahrzeug und Ziel nicht bekannt ist.

Die Kenntnis der Relativbewegung (Rendezvous-Navigation) ist aber, neben der Rekonstruktion der Zieloberfläche, elementar für ein OOS: direkt zur sicheren Kollisionsvermeidung und langfristig zur Missionsplanung eines möglichen Docking- oder Bergungsmanövers.

4.1. Filterkonzept

Zur Rendezvous-Navigation bezüglich kooperativer Raumflugkörper ist der Einsatz von Schätzfiltern schon lange etabliert [16]: Die Relativzustände zwischen dem bewegten Chaser-Koordinatensystem (KS) und einem bewegten Ziel-Koordinatensystem, in dem feste Messmarken angebracht sind, können beispielsweise mit Hilfe eines Extended Kalman Filters (EKF) geschätzt werden (BILD 3a).

Demgegenüber wird die Navigation relativ zu einem a priori unbekanntem Ziel (Rendezvous-SLAM) durch die Tatsachen erschwert, dass (i) die benötigten Größen nicht direkt messbar sind (unbekannter Schwerpunkt des Zieles), (ii) die auf verrauschten Bildern basierenden Messungen ungenau sind, (iii) die Bezugspunkte des Zieles a priori nicht bekannt sind (Position im Ziel-Koordinatensystem unbekannt) und (iv) das Bewegungsmodell des Chasers nicht exakt ist.

Bei dieser Problemstellung gibt es starke Analogien zu dem aus der mobilen Robotik bekannten, „Simultaneous Localization and Mapping“ (SLAM)-Problem, bei dem die Position der Landmarken in einem festen Bezugssystem

a-priori unbekannt sind und das bewegte Robotersystem diese kartieren und relativ zu ihnen navigieren soll (BILD 3b).

Der Ansatz zum Lösen des Rendezvous (RV)-SLAM-Problems ist eine Kombination beider Konzepte: Die Unsicherheiten der Messungen und des Bewegungsmodells werden mit in die Zustandsschätzung einbezogen und die Zielgeometrie (Karte) wird im Zustandsvektor mit abgebildet und geschätzt. Dabei geschieht die initiale Einbeziehung und Einordnung von neuen Landmarken relativ zu bereits bestehenden Landmarken und dem bis dahin geschätzten Zustandsvektor und deren zugehöriger Unsicherheit. Die Beziehungen zwischen Zuständen werden bei jeder Messung verfeinert. Dieses Konzept wurde bereits mit zwei Filteransätzen vorgestellt ([7], [8]) (BILD 3c).

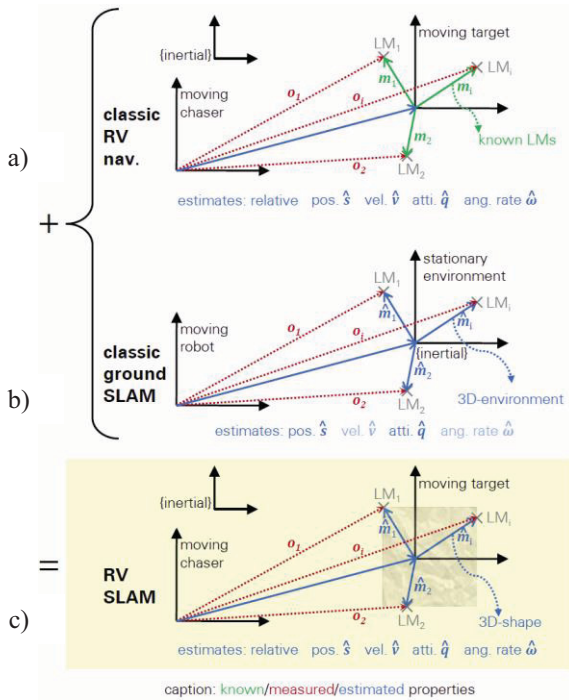


BILD 3. Vergleich der Filteransätze:
RV-Navigation: zwei bewegte KS, bekannte Landmarkenpositionen;
Klassischer SLAM: Navigation bzgl. Inertialsystem, unbekannte Landmarkenpositionen;
RV-SLAM: relative Navigation, zwei bewegte KS, unbekannte Landmarkenpositionen.

Für die in diesem Beitrag vorgestellten Experimente wird der in [8] eingeführte Filteransatz, basierend auf einem EKF-SLAM-Konzept, eingesetzt. Das betrachtete Rendezvous-Szenario besteht aus einem Chaser mit voll funktionsfähigem „Attitude and Orbit-Control System“ (AOCS) und einem Ziel, das als Starrkörper mit Rotation um eine inertial feste Achse auf einem kreisförmigen Low-Earth-Orbit (LEO) angenommen wird. Die Chaser-Dynamik wird durch das AOCS als bekannt angenommen, die Relativedynamik zwischen den Raumflugkörpern lässt sich beim betrachteten Abstand über die Euler-Hill-Gleichungen beschreiben und die Zielkinematik wird durch die Quaternionendifferenzialgleichung beschrieben [17]. Details hierzu können [8] entnommen werden. Entsprechend dem RV-SLAM-Ansatz werden neben den vier Basiszuständen Relativposition s und -geschwindigkeit

v der Schwerpunkte, sowie Lage q und Drehrate ω des Zieles bezüglich Inertialsystem, die beobachteten Landmarken m_i relativ zum Zielschwerpunkt im Zustandsvektor zusammengefasst: $\hat{x} := (\hat{s} \hat{v} \hat{q} \hat{\omega} | \hat{m}_1 \dots \hat{m}_N)^T$. Die Länge des Zustandsvektors ist dabei nicht konstant, da neu beobachtete Landmarken nach und nach hinzugefügt werden, um das Zielobjekt von allen Seiten beschreiben zu können.

Der Messvektor besteht aus den 2D-Bildkoordinaten der Bildmerkmale (Bildrepräsentationen der Landmarken, pro Landmarke jeweils ein Bildmerkmal im rechten und linken Bild), die von der in Kapitel 3 beschriebene Bildverarbeitung geliefert werden.

Da die Massenverteilung des Zieles nicht bekannt ist, gibt es zunächst keine physikalische Einschränkung für die Definition des Ziel-Körper-Koordinatensystems. Ohne eine Randbedingung ist das System allerdings nicht beobachtbar. Definiert man das Ziel-Koordinatensystem $\{T\}$ so, dass eine Achse in Richtung der ersten beobachteten Landmarke zeigt und die zweite beobachtete Landmarke in der Ebene liegt, die von dieser und einer weiteren Achse aufgespannt wird, dann wird das System beobachtbar (siehe BILD 4).

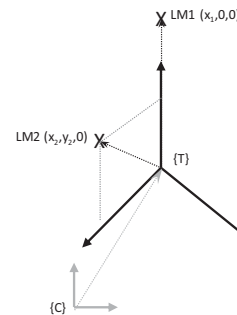


BILD 4. Die erste Landmarke liegt per Definition auf einer Achse, die zweite Landmarke auf der Ebene, die von dieser und einer weiteren Achse aufgespannt wird.

4.2. Diskussion

Es gibt mehrere Vorteile einer SLAM-basierten Lösung gegenüber alleiniger Stereo-Messung, welche die 3D-Rekonstruktion positiv beeinflussen. Das SLAM-Filter schätzt direkt die Drehrate des Zieles inklusive Kovarianzen (BILD 5). Das kann z. B. dazu genutzt werden, um die Suchbereiche in der Bildverarbeitung einzuschränken (siehe auch Abschnitt 3 und 5 sowie [13]) und ermöglicht weiterhin die Propagation der Zielbewegung, um eine sichere Annäherung zu ermöglichen.

Weiterhin werden Landmarken, die von der Bildverarbeitung längere Zeit erkannt werden, vom Filter genauer geschätzt als es eine alleinige Stereomessung ermöglicht. Ein Glättungseffekt ist zu beobachten, der direkt die 3D-Rekonstruktion verbessert (BILD 6a). Wird die Landmarke längere Zeit nicht gesehen, kann man auf die vom Filter geschätzte Kovarianz zurückgreifen, um zu bestimmen, wie die 3D-Rekonstruktion diese Schätzgröße sinnvoll nutzen kann (BILD 6b). Wird die Landmarke nach einer Umdrehung des Zieles oder einer Umrundung durch den Chaser (oder einer Kombination von beidem) erneut wieder detektiert, ist zu erwarten, dass sich die Schätzwerte des kompletten Zustandsvektors verbessern (loop closing).

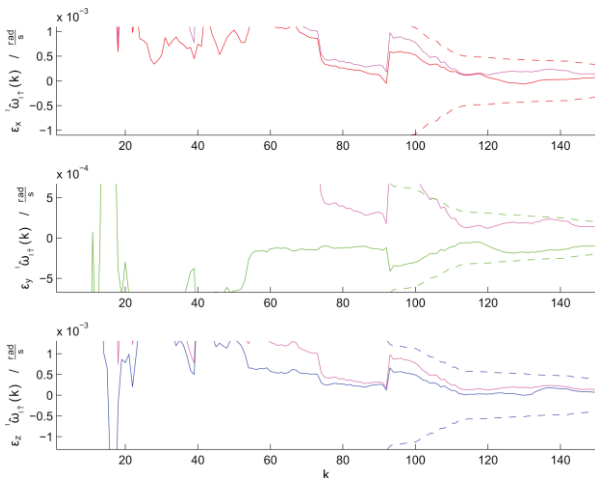


BILD 5. Beispiel für Schätzfehler des Drehratenvektors bei vollständiger Bildverarbeitung (durchgezogene farbige Linie). Die gestrichelten Linien zeigen die 3σ -Grenzen der Schätzunsicherheit. Die magentafarbene Linie ist der RSS des gesamten Drehratenschätzfehlervektors.

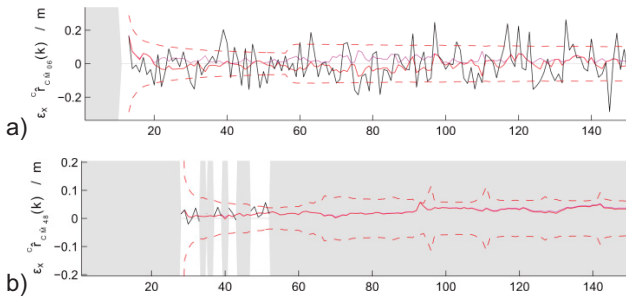


BILD 6. Beispiel für Schätzfehler (x-Komponente) des Vektors vom Kamera-Koordinatensystem zu einer Landmarke (bzgl. Kamera-KS).
 a) Simulation einer Bildmerkmalsdetektion;
 b) Bildmerkmalsdetektion basierend auf der vorgestellten Bildverarbeitung;
 Schwarz dargestellt sind die Fehler der direkten ungefilterten Stereomessungen. Die rote durchgezogene Linie zeigt den Schätzfehler des Filters. Die roten gestrichelten Linien zeigen die 3σ -Grenzen der Schätzunsicherheit. Die magentafarbene Linie ist der RSS des gesamten Landmarkenschätzfehlervektors. In den grauen Bereichen wird eine Landmarke vom Kamerasystem nicht gemessen.

Bei der Schwerpunktsschätzung müssen prinzipielle Abstriche gemacht werden: die aus der Relativedynamik der Raumflugkörper gewonnene Information ist sehr klein und kurze Sichtbarkeiten der Landmarken erlauben kaum Rückschlüsse auf den Abstand der Landmarke zur Drehachse, was zu einer schlechten Schätzung führt. Drehratenschätzung und 3D-Rekonstruktion werden davon aber nicht beeinflusst, so dass dies kein großer Nachteil ist. Eine wichtige Definition bei der Bestimmung der Schätzfehler ist eine geeignete Bereitstellung der Ground Truth für die Landmarkenpositionen. Da Landmarken a-priori nicht bekannt sind und erst zur Laufzeit „entdeckt“ und initialisiert werden, gibt es keinen zugehörigen wahren 3D-Punkte auf dem Ziel. Bei den vorliegenden Experimenten

wird die Ground Truth per Definition im Moment der Landmarkeninitialisierung im Filter bestimmt. Sie ist an der Stelle der Oberfläche des Zieles auf die der Sichtstrahl trifft, der vom Bildmerkmal im rechten Kamerabild ausgeht. Falls das Bildmerkmal in weiteren Bildern so detektiert wird, das der Sichtstrahl meist einen anderen 3D-Punkt auf der Oberfläche trifft, wird dies als ein Fehler gewertet, welchen das Schätzfilter nicht berücksichtigen kann.

5. GEOMETRISCHE REKONSTRUKTION

Ein Vorgehen wie in [5], bei dem ein Modell eines möglichen Zieles in die Bilddaten eingepasst wird, um dessen relative Position und Lage zu ermitteln, ist für das hier betrachtete Missionsszenario nicht anwendbar, da von einem a-priori unbekanntem Ziel ausgegangen wird. Doch auch wenn das Ziel bekannt und seine Form aus einer Datenbank abrufbar wäre, könnte sich diese in der Vergangenheit auch aufgrund eines Zwischenfalles geändert haben. Zusätzlich erschweren die Beleuchtungsbedingungen die Bestimmung der Kontur und Form des Zieles. Die hier vorgestellte geometrische Rekonstruktion nutzt stattdessen durch Stereo-Triangulation erzeugte Punktwolken, segmentiert diese und rekonstruiert schließlich die Oberflächen.

Der Random Sample Consensus (RANSAC) Algorithmus [18], ein Algorithmus zur Verarbeitung fehlerhafter oder verrauschter Datenmengen und für die Detektion von Ausreißern, wurde bereits zuvor zur Segmentierung von Punktwolken eingesetzt (siehe [10], [19]). Vorzugsweise wird dieser Algorithmus verwendet, wenn sehr große Datenmengen zu handhaben sind, jedoch zeigen sich auch bei spärlichen, verrauschten Punktwolken noch gute Resultate [12].

In zahlreichen Durchläufen wird der RANSAC Algorithmus jeweils drei zufällig gewählte Punkte aus der Punktwolke auswählen und prüfen, ob mit diesen ein geometrisches Primitiv (Ebene, Kugel, Zylinder, Kegel) erzeugt werden kann, das auch gut zur restlichen Punktwolke passt. Die Segmentierung einer verrauschten, spärlich besetzten Punktwolke wird kaum optimale Primitive hervorbringen, d.h. es entstehen über- und untersegmentierte Bereiche sowie eine unzureichende Erfassung der Randbereiche einer Fläche. Es ist daher notwendig, weitere Untersuchungsprozeduren durchzuführen, damit sichergestellt wird, dass die resultierenden Flächen eine akzeptable Qualität aufweisen.

Ein durch den RANSAC Algorithmus detektiertes geometrisches Primitiv nach [10] repräsentiert eine parametrische, jedoch unendliche Fläche, zu der keine Begrenzungen gegeben werden. In folgenden Bearbeitungsschritten müssen daher zuerst stimmige Flächenberandungen gefunden werden.

Die Bestimmung der Begrenzungen nutzt die zuvor bestimmten Parameter der zugrundeliegenden Primitive [13]. Die Länge von Zylindern oder Kegeln wird durch die entlang der Achse entferntest liegenden Punkte determiniert; die Umrandung von Ebenen wird durch die äußersten Punkte vorgegeben. Angeschnittene Flächen werden durch den Vergleich zwischen Mittelpunkt und Schwerpunkt erkannt.

Flächenbegrenzungen, die nur durch wenige Punkte vorgegeben werden, sind nicht so ideal, wie es bei möglichen Schnittkurven der Fall wäre. Aus diesem Grund werden vom Rekonstruktionsalgorithmus weitere Untersuchungen durchgeführt.

Alle gefundenen Flächen werden nun auf überlappende oder identische Teile, Überschneidungen und Schnitte mit anderen Flächen untersucht [12]. Auf diese Weise können nicht nur die Parameter der Primitive verbessert und somit der Einfluss der verrauschten Daten reduziert werden, sondern auch die Flächenbegrenzungen lassen sich Schritt für Schritt optimieren.

Sobald ein 3D-Modell des Zieles vorliegt, selbst wenn dieses noch unvollständig ist, kann es in einer Rückkopplungsstruktur (siehe BILD 7) genutzt werden, um die Leistung der vorangegangenen Algorithmen zu verbessern [13].

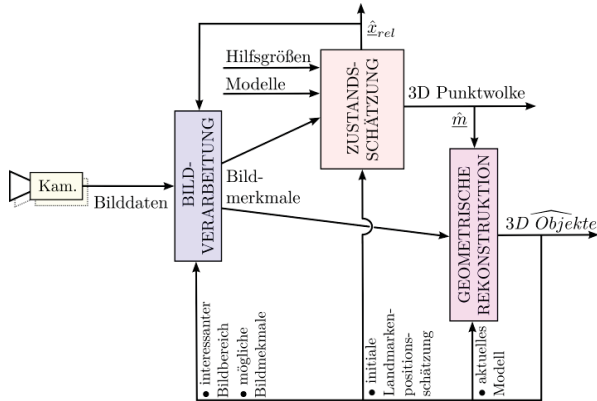


BILD 7. Rückführung der Modellflächen zur Verbesserung vorgelagerter Algorithmen.

Einen vergleichsweise aufwendigen Algorithmus stellt die Detektion der Bildmerkmale dar. Vor allem wenn das Ziel nur einen kleinen Teil des Blickfeldes einnimmt, kann die Rechendauer der Detektion gesenkt werden, wenn ein interessanter Bildausschnitt (ROI) gewählt und der SURF-Algorithmus nur dort angewendet wird. Der geeignete Bildausschnitt kann bestimmt werden, indem alle gefundenen Flächen des Zielmodells und deren Begrenzungen ausgewertet werden. Transformiert man die Flächen in die Bildebene, so definieren die äußersten Punkte deutlich, welche Teile des Bildes interessant oder unwichtig sind. Um sicher zu stellen, dass keine Teile des Zieles ausgelassen werden, kann der Bildbereich einfach um einige Prozent seiner Größe erweitert werden [13].

Während der Korrespondenzsuche werden Bildmerkmale ermittelt, deren Deskriptorvektoren möglichst ähnlich sind. Dieser Suchprozess kann beschleunigt werden, wenn eine Bildregion vorgegeben wird, in der ein im aktuellen Bild gefundenes Bildmerkmal erwartet wird, um die Auswahl zu untersuchender Merkmale bereits vorab zu beschränken. Weitere Verbesserungen sind zu erwarten, wenn mit Hilfe des erstellten Modells ausgewertet wird, welche Bildmerkmale auf welchen Flächen beobachtet wurden, um zusätzlich die Menge der in den Deskriptorvergleich einzubeziehenden Merkmale zu senken.

Für jede 3D-Landmarke, die dem EKF SLAM hinzugefügt wird, wird eine initiale Schätzung bezüglich ihrer Position benötigt. Zu Beginn kann diese durch Nutzung des Stereo-Kamerasystems und Triangulation bestimmt werden. Sobald ein Modell des Zieles vorliegt, kann geprüft werden, ob sich ein neues Bildmerkmal auf einer der Modellflächen befindet. Ist dies der Fall, so kann die initiale Position basierend auf dem Modell und damit im Allgemeinen genauer als durch eine Stereoprozessierung bestimmt werden.

6. EXPERIMENTE

Die Verifikation des Ansatzes basiert auf verschiedenen Datensätzen: Synthetische (gerenderte) Bilddaten ermöglichen den Abgleich der Resultate mit bekannten, vorgegebenen Werten; weitere Experimente demonstrieren die Anwendung der Algorithmen auf reale Bilddaten.

6.1. Experimente mit synthetischen Bilddaten

Folgende Parameter dienen als Grundlage des Experimentszenarios: Chaser und Ziel befinden sich auf einem kreisförmigen 400 km LEO mit anfangs 7 m Abstand. Der Chaser nähert sich von $-v$ -bar mit einer Geschwindigkeit von $1,62 \cdot 10^{-3}$ m/s. Das Ziel dreht sich mit $36^\circ/\text{min}$ um eine Achse, die inertial fest ist und weder kollinear mit der LVLH-y-Achse ist, noch in der LVLH-x-z-Ebene liegt. Ausgewertet wurden 150 Bilder (entsprechend des Szenarios vorher gerendert, siehe BILD 8), die mit einem Abstand von 0,5 s aufgenommen wurden.

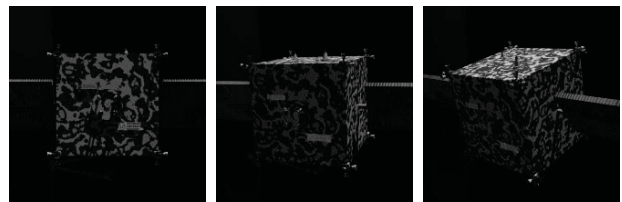


BILD 8. Synthetische Kamerabilder eines Experimentes.

Die Relativgeschwindigkeit wurde mit dem Nullvektor initialisiert. Gleiches gilt für die Drehrate. Der anfängliche Schwerpunktsschätzfehler wurde zufällig mit $[0,52; -0,45; -0,38]$ m initialisiert. Das Rauschen der Düsenbeschleunigungsmessungen wurde mit 100 mN je Raumrichtung simuliert und so auch im Filter modelliert. Das Messrauschen der Bildmerkmalskoordinaten-Bestimmung wurde mit 0,8 Pixeln je Achse modelliert. Ein Teil der Ergebnisse wurde bereits in BILD 5 und 6 präsentiert, darüber hinaus werden hier noch der Schätzfehler für eine andere Landmarke (BILD 9) und die Relativgeschwindigkeit (BILD 10) gezeigt.

Betrachtet man in den Abbildungen der Landmarkenpositionsschätzfehler die Bereiche der Messung (weiße Bereiche, BILD 6b und 9) fällt auf, dass die Landmarken nur wenige Bilder lang „sichtbar“ sind, obwohl sich das Ziel nur um $0,3^\circ$ pro Bild dreht und dies schon Landmarken mit längerer „Sichtbarkeit“ sind. Grund für diese geringen Werte sind die ungünstigen Beleuchtungsverhältnisse, die selbst in aufeinander folgenden Bildern deutliche Unterschiede hervorrufen können.

Basierend auf denselben Bilddaten wurde auch die Rekonstruktion der Zielform ausgeführt. Über die bekannte Konfiguration des Stereo-Kamerasystems (Kameraabstand 0,5 m, parallele Ausrichtung) wird eine Stereo-Triangulation ausgeführt. Die je Bildpaar entstehenden Punktwolken können durch die bekannten Korrespondenzen ineinander eingepasst werden, bis schließlich eine Punktwolke entsteht, die ausreichend Punkte für eine vernünftige geometrische Rekonstruktion aufweist. Eine Verbesserung der ermittelten Flächen mit Hilfe der geschätzten Landmarken wurde in diesem Fall nicht durchgeführt. Die Punktwolke und die rekonstruierten Flächen des Zielmodelles sind in BILD 11 abgebildet.

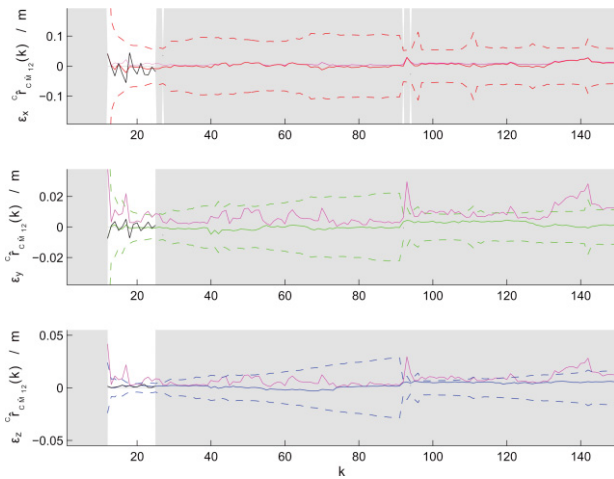


BILD 9. Weiteres Beispiel für Schätzfehler des Vektors vom Kamerakoordinatensystem zu einer Landmarke (bzgl. Kamera-KS). Schwarz dargestellt sind die Fehler der direkten ungefilterten Stereomessungen. Die durchgezogenen Linien zeigen den Schätzfehler des Filters. Die gestrichelten Linien zeigen die 3σ -Grenzen der Schätzunsicherheit. Die magentafarbene Linie ist der RSS des gesamten Landmarkenschätzfehlervektors. In den grauen Bereichen wird eine Landmarke vom Kamerasystem nicht gemessen. Aktualisierungen der geschätzten Position bzw. der Unsicherheit in diesen Bereichen beruhen auf Messungen anderer Landmarken.

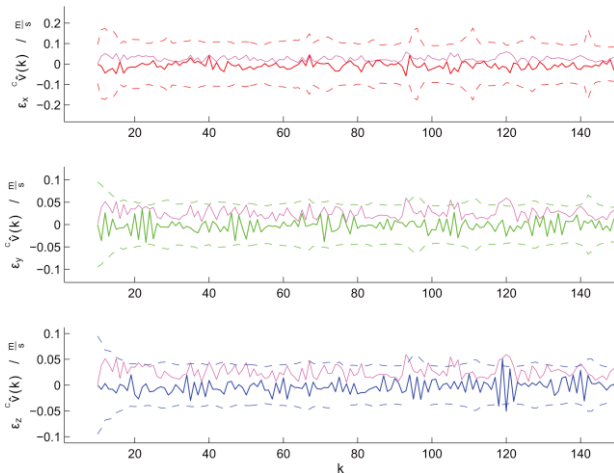


BILD 10. Beispiel für den Schätzfehler des Relativgeschwindigkeitsvektors (durchgezogene Linien). Die gestrichelten Linien zeigen die 3σ -Grenzen der Schätzunsicherheit. Die magentafarbene Linie ist der RSS des gesamten Geschwindigkeitsschätzfehlervektors.

Die in den Experimenten verwendeten Rekonstruktionsparameter wurden manuell gewählt. Da diese Parameter jedoch hauptsächlich relative Werte darstellen, ist während der Experimente kein Parameter-Fein-Tuning notwendig gewesen.

Da die Oberflächen der ohnehin kaum sichtbaren Solarpaneele deutlich weniger strukturiert als die des Hauptkörpers erscheinen, können dort keine Bildmerkmale und

daher auch keine 3D-Punkte gefunden werden. Folglich kann nur der Hauptkörper modelliert werden. Die Flächen des Hauptkörpers (Flächen 1, 2 und 3) basieren auf jeweils 257, 58 beziehungsweise 45 Punkten. Die Flächenberandungen werden durch die Schnittlinie der benachbarten Flächen verbessert. Eine Steigerung der Güte und eine Modellierung der Solarpaneele sowie anderer Flächen ist nur durch eine weitere Beobachtung des Zieles möglich.

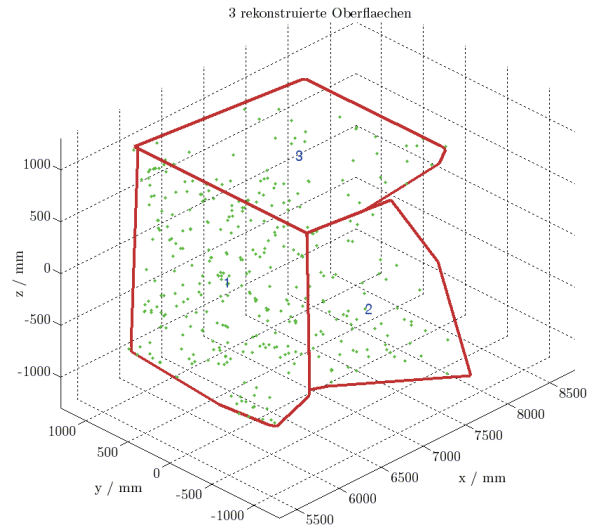


BILD 11. Ergebnisse des Experimentes mit synthetischen Bildern. Die Punktwolke mit 371 Punkten entstand aus 105 Bildern. Die rekonstruierten Flächen sind umso genauer, je mehr Punkte auf der Fläche detektiert wurden.

6.2. Experimente mit realen Bilddaten

Für die funktionale Verifikation des bildbasierten Ansatzes mit realen Bildern wurde der Spacecraft Rendezvous Simulator MiPOS (Mini Proximity Operation Simulator) entwickelt (siehe BILD 12). Dieser ermöglicht die Generierung missionsspezifischer Bilddaten unter realistischen Bedingungen bezüglich Beleuchtung, Reflektionen, wechselnden Hintergründen sowie natürlichen Oberflächen.

Der Rendezvous Simulator setzt sich aus zwei unabhängigen Bewegungseinheiten zusammen: der 6DOF-*Chaser-Einheit*, die die Sensorik (zwei CMOS Kameras für Mono- und Stereo-Aufbauten) trägt und der 3DOF-*Target-Einheit*, welche ein Modell eines Ziel-Raumfahrzeuges (Zielmaßstab zwischen 1:10 und 1:50) um eine beliebige Achse rotieren lassen kann. Der Arbeitsraum des Simulators umfasst 1,5 m x 1 m x 0,8 m mit einer Genauigkeit von etwa 0,2 mm (RMS) und 0,3° (RMS) in allen Achsen.

Schwarze Textilbahnen sorgen für einen neutralen Hintergrund. Um parallele Sonneneinstrahlung zu simulieren, wurde eine spezielle Lichtquelle mit einer Hochleistungs-LED und einer 250 mm Durchmesser Fresnel-Linse entwickelt. Während der Experimente ist sichergestellt, dass keine weitere Lichteinstrahlung möglich ist.

Der Rendezvous Simulator ist in einer Simulationsumgebung eingebettet, mit der Open-Loop-Simulationen durchgeführt werden können, um Bildserien mit bekannten Ground Truth zu erzeugen, ebenso wie Closed-Loop-Simulationen, bei denen die Bilddaten direkt an die Navigations- und Guidance-Algorithmen geleitet werden.

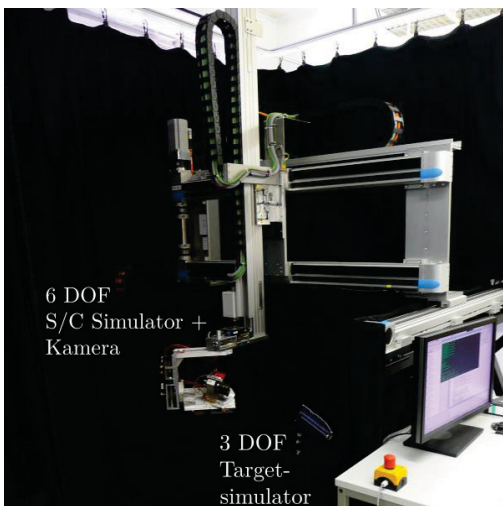


BILD 12. Simulator MiPOS für die funktionale Verifikation des Ansatzes.

Für die vorgestellten Experimente wurde ein Modell des ESA Satelliten *Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer* (GOCE) (Länge ca. 210 mm, Skalierung 1:25) verwendet. Das Modell wurde an einer Rotationsseinheit des Simulators befestigt und lässt sich mit dieser um eine Achse rotieren. Die Kameras und die Lichtquelle bleiben während des Experimentes fixiert und zeigen stets in Richtung des Zielmodells, siehe BILD 13.

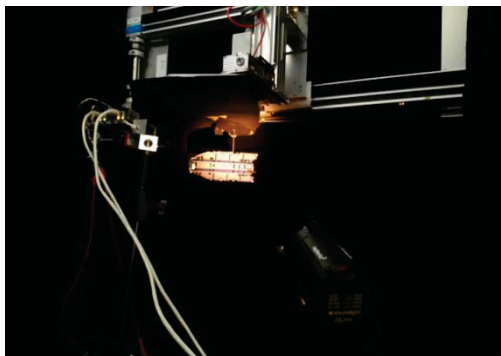


BILD 13. Experimentaufbau mit Modell des ESA Satelliten GOCE. Das Zielmodell wird um eine Achse rotiert, Kamera und Lichtquelle sind fixiert.

Das Modell hat einen Abstand von etwa 350 mm zu den Kameras, was einem simulierten Abstand von etwa 9 m entspricht. Die beiden Kameras des Stereo-Kamerasystems haben einen seitlichen Abstand von 46 mm und wurden vollständig kalibriert. Das Modell dreht sich zwischen zwei Kameraaufnahmen um je $0,5^\circ$, dies entspricht einer Drehrate des Zieles von $1^\circ/s$. BILD 14 zeigt drei der entstanden Bilder einer der Kameras.



BILD 14. Kamerabilder während der Experimente mit dem GOCE Modell.

Wiederum lassen sich die zu einem Zeitpunkt aufgenommenen Bilder so auswerten, dass eine Stereo-Triangulation ausgeführt werden kann. Punktwolken, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten entstehen, lassen sich über bekannte Korrespondenzen zwischen den Punkten ineinander einpassen. Die Zustandsschätzung wird für dieses Experiment nicht einbezogen. Da nach Betrachtung der Stirnseiten des Satelliten (siehe BILD 14, rechtes Bild), auf denen keine Bildmerkmale verfolgt werden können, jedoch keine Korrespondenzen mehr zwischen den Punktwolken der verschiedenen Seiten gefunden werden können, ist eine vollständige Modellierung des Zieles nicht möglich: die im Folgenden erstellten Punktwolken können ganz ohne Informationen über die relativen kinematischen Zustände des Zieles nicht mehr zu vorher zusammengeführten Punktwolken zugeordnet werden. Nach Auswertung der Bilder einer halben Umrundung beinhaltet die entstandene Punktwolke 1180 Punkte.

Wird die geometrische Rekonstruktion auf die Punktwolke angewendet, so resultiert dies in drei Modellflächen. BILD 15 stellt diese Ergebnisse dar. Wie bereits in den Experimenten mit gerenderten Bildern gezeigt, werden die gefundenen Flächen umso genauer rekonstruiert, je mehr Punkte auf ihnen gefunden werden können. Aufgrund des Experimentaufbaus und der Skalierung resultieren Störeinflüsse und Ungenauigkeiten in deutlichem Rauschen. Die detaillierte Rekonstruktion des Satellitenrumpfes ist mit dieser Punktwolke nicht möglich. Bei einer erneuten Umrundung und unter Einbeziehung der durch die Zustandsschätzung ermittelten Werte ließe sich die Güte der Punktwolke jedoch noch einmal steigern und somit auch die Rekonstruktionsergebnisse verbessern.

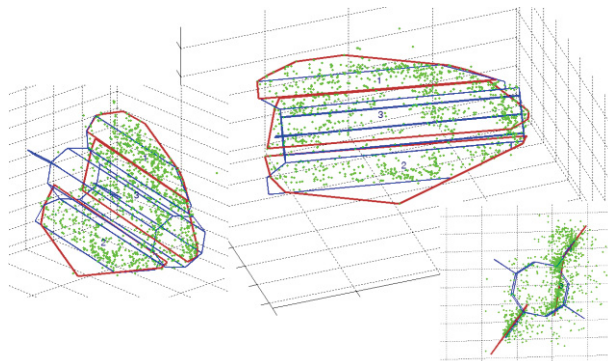


BILD 15. Ergebnisse des GOCE-Experimentes. Die rekonstruierten drei Flächen basieren auf einer Punktwolke mit 1180 Punkten. Diese entstand nach einer halben Drehung des Zieles (360 Bilder ausgewertet). Die blauen Linien deuten die Lage des GOCE-Modells an, die grünen Punkte repräsentieren die Punktwolke, die roten Linien umranden die gefundenen Flächen.

7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der vorgestellte Ansatz ermöglicht die Schätzung der relativen kinematischen Zustände eines unbekanntes und unkooperativen Zieles sowie die Rekonstruktion dessen Form basierend auf der alleinigen Auswertung der Daten eines Stereo-Kamerasystems. Die Ergebnisse durchgeführter Experimente und eine Diskussion zeigen Möglichkeiten und Einschränkungen des Ansatzes.

Für das RV-SLAM-Filter werden zurzeit zwei Aspekte tiefer gehend untersucht. Zum einen gilt es, die Schwerpunktschätzung zu verbessern, um die wenigen verfügbaren Informationen so gut wie möglich nutzen zu können. Weiterhin hat sich gezeigt, dass die Sichtbarkeit der Landmarken in der Praxis viel geringer ist, als es aus theoretischen Betrachtungen zu erwarten gewesen wäre. Hier bedarf es noch weiterer Arbeiten, um die Möglichkeiten einer bildbasierten Messung hinreichend auszuschöpfen. Weiterhin sind Experimente in Arbeit, um qualitative Aussagen über die Leistungsfähigkeit und Robustheit des Systems unter verschiedenen Umgebungsbedingungen machen zu können.

DANKSAGUNG

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des gemeinsamen Graduiertenkollegs "Aspekte zukünftiger Satelliten-Erkundungsmissionen" der TU Dresden und der Astrium GmbH, Friedrichshafen.

REFERENZEN

- [1] D. Reintsema und K. Landzettel, „Die DEOS-Mission – Leistungsdemonstration der Raumfahrt-Robotik in Deutschland.“ *Nationale Konferenz zur Raumfahrt-Robotik 2012*, Berlin, Germany, März 2012.
- [2] P. Bodin, R. Noteborn, R. Larsson, T. Karlsson, S. D'Amico, J. S. Ardaens, M. Delpuch und J.-C. Berges, „The Prisma Formation Flying Demonstrator: Overview and Conclusions from the Nominal Mission.“ in *Proceedings of the 35th annual AAS Guidance and Control Conference*, Breckenridge, Colorado, USA, Februar 2012.
- [3] S. Strandmoe, E. DePasquale, I. Escane, M. Augelli, G. Personne, B. Cavrois, N. Fau, M. Yu, M. Zink, X. Clerc, M. Chaize, H. Clerc, E. Gogibus, P. Brun, S. Roussel, H. Requiston, R. Delage, F. Martel, S. Chavy, C. Veltz, F. M. M. Fadrique, I. Juarez, C. M. Casas-Cuadrado, M. Bonnet, and D. Caluwaerts, „Automated Transfer Vehicle (ATV) Flight Control Achievements.“ in *7th International ESA Conference on Guidance and Navigation Control Systems – ESA GNC 2008*, Tralee, County Kerry, Ireland, Juni 2008.
- [4] J. C. Díaz und M. Abderrahim, „Visual Inspection System for Autonomous Robotic On-Orbit Satellite Servicing.“ in *Proceedings of the 9th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation (ASTRA)*, Noordwijk, The Netherlands, November 2006.
- [5] A. Petit, N. Despré, E. Marchand, K. Kanani, F. Chaumette, S. Provost und G. Flandin, „3D Model-based Tracking for Space Autonomous Rendezvous.“ in *8th International ESA Conference on Guidance and Navigation Control Systems – ESA GNC 2011*, Carlsbad, Czech Republic, Juni 2011.
- [6] D. G. Lowe, „Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints.“ *Int. J. Comput. Vision*, vol. 60, pp. 91–110, November 2004.
- [7] S. Augenstein und S. M. Rock, „Simultaneous Estimation of Target Pose and 3-D Shape using the Fast-SLAM Algorithm.“ in *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference 2009 (AIAA GNC 2009)*, Chicago, Illinois, USA, August 2009.
- [8] A. Sonnenburg, M. Tkocz und K. Janschek, „EKF-SLAM based Approach for Spacecraft Rendezvous Navigation with Unknown Target Spacecraft.“ in *Proceedings of the 18th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, Nara, Japan, September 2010.
- [9] G. Vosselman, B. G. H. Gorte, G. Sithole und T. Rabbani, „Recognising Structure in Laser Scanner Point Clouds.“ *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 46, no. 8/W2, pp. 33–38, Oktober 2004.
- [10] R. Schnabel, R. Wahl und R. Klein, „Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection.“ *Computer Graphics Forum*, vol. 26, no. 2, pp. 214–226, Juni 2007.
- [11] H. Woo, E. Kang, S. Wang und K. H. Lee, „A New Segmentation Method for Point Cloud Data.“ *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, no. 2, pp. 167–178, 2002.
- [12] F. Schnitzer, A. Sonnenburg, K. Janschek und G. Willich, „SLAM-based 3D Shape Estimation for Rendezvous with Uncooperative and Unknown Target Spacecraft.“ in *8th International ESA Conference on Guidance and Navigation Control Systems – ESA GNC 2011*, Carlsbad, Czech Republic, Juni 2011.
- [13] F. Schnitzer, K. Janschek und G. Willich, „Experimental Results for Image-based Geometrical Reconstruction for Spacecraft Rendezvous Navigation with Uncooperative and Unknown Target Spacecraft.“ in *Proceedings of the IROS 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vilamoura, Algarve, Portugal, Oktober 2012.
- [14] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars und L. V. Gool, „Speeded-Up Robust Features (SURF).“ *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)*, vol. 110, pp. 346–359, Juni 2008.
- [15] P. Neubert, N. Sünderhauf und P. Protzel, „FastSLAM using SURF Features: An Efficient Implementation and Practical Experiences.“ In *International Conference on Intelligent and Autonomous Vehicles (IAV)*. Toulouse, Frankreich, 2007, pp. 224–227.
- [16] W. Fehse, *Automated Rendezvous and Docking of Spacecraft*. Cambridge aerospace series 16. Cambridge University Press, Cambridge; New York, 2003.
- [17] J.R. Wertz, (Ed.), *Spacecraft Attitude Determination and Control, Volume 73 of Astrophysics and Space Science Library*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1978.
- [18] M. A. Fischler und R. C. Bolles, „Random Sample Consensus: a Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography.“ *Communications of the ACM*, vol. 24, pp. 381–395, Juni 1981.
- [19] P. Jenke, B. Krückeberg und W. Straßer, „Surface Reconstruction from Fitted Shape Primitives.“ in *Proceedings of the Vision, Modeling, and Visualization Conference 2008 (VMV)*, Konstanz, Germany, Oktober 2008, pp. 31–40.