

Frank Schnitzer

Ein Systemansatz zur bildbasierten Navigation und
Geometrierekonstruktion für Raumfahrt-Rendezvousmanöver

Beiträge aus der Automatisierungstechnik

Frank Schnitzer

**Ein Systemansatz zur bildbasierten
Navigation und Geometrierekonstruktion für
Raumfahrt-Rendezvousmanöver**

 VOGT

Dresden 2013

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by the Deutsche Bibliothek

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the internet at <http://dnb.ddb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2013

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation

„Ein Systemansatz zur bildbasierten Navigation und Geometrierekonstruktion für Raumfahrt-Rendezvousmanöver“ von Frank Schnitzer überein.

© Jörg Vogt Verlag 2013

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-938860-68-7

Jörg Vogt Verlag

Niederwaldstr. 36

01277 Dresden

Germany

Phone: +49-(0)351-31403921

Telefax: +49-(0)351-31403918

e-mail: info@vogtverlag.de

Internet : www.vogtverlag.de



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Institut für Automatisierungstechnik

Ein Systemansatz zur bildbasierten Navigation und Geometrierekonstruktion für Raumfahrt-Rendezvousmanöver

A Systems Approach for Image-based Navigation and
Geometry Reconstruction for Spacecraft On-Orbit
Rendezvous Maneuvers

Frank Schnitzer

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktoringenieurs

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. K. Röbenack (TU Dresden)

Gutachter: Prof. Dr. techn. K. Janschek (TU Dresden)
Prof. Dr.-Ing. C. Stiller (KIT, Karlsruhe)

Tag der Einreichung: 05.04.2013

Tag der Verteidigung: 02.10.2013

Vorwort

Diese Arbeit entstand zwischen Dezember 2009 und April 2013 im Rahmen des Graduiertenkollegs *Aspekte zukünftiger Satelliten-Erkundungsmissionen*, das gemeinsam von der Technischen Universität Dresden und der Astrium GmbH, Friedrichshafen organisiert wurde. Für die Möglichkeit der Teilnahme an diesem Graduiertenkolleg danke ich Herrn Prof. Dr. techn. Klaus Janschek und Herrn Dr.-Ing. Georg Willich.

Großer Dank gebührt auch den Betreuern meiner wissenschaftlichen Arbeit. Sowohl Herr Prof. Dr. techn. Klaus Janschek als auch Herr Hartmut Jörck standen mir bei Fragen jederzeit zur Verfügung und gaben viele wertvolle Hinweise und Anregungen, die ich gern aufgegriffen und verwertet habe.

Für die bereitwillige Übernahme des Zweitgutachtens und nützliche Ratschläge zur Verbesserung der einen oder anderen Stelle dieser Dissertation möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller danken.

In den vergangenen Jahren wurde ich am Institut für Automatisierungstechnik an der TU Dresden stets von Kollegen und Freunden unterstützt, wofür ich mich bei diesen herzlich bedanken möchte. Nicht nur auf inspirierende wissenschaftliche Diskussionen und Gespräche mit viel oder wenig Tiefgang, sondern auch auf Unternehmungen jenseits des Arbeitsplatzes werde ich gern zurückblicken. Viele schöne Erinnerungen verbinde ich außerdem mit den viel zu seltenen morgendlichen Besuchen der Cafeteria, die mich dennoch unablässig dazu anspornten, den Arbeitstag früh zu beginnen und von denen ich mit etlichen, meist ganz nebenbei entstandenen, hilfreichen Tipps und Ermutigungen zurückkam. Nicht unerwähnt bleiben sollen weiterhin Frau Petra Möge und Herr Matthias Werner, die am Institut immer wieder bürokratische und technische Hindernisse aus dem Weg räumten.

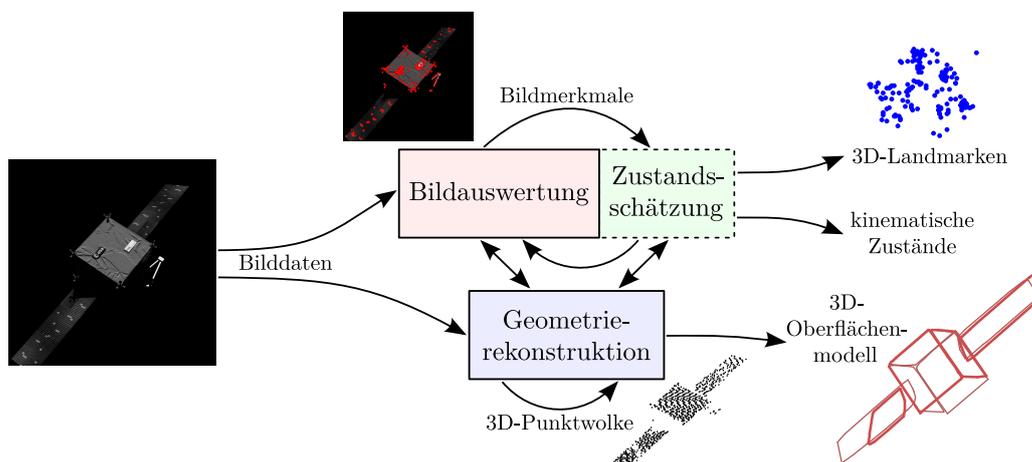
Ebenso sei an dieser Stelle all jenen Studenten gedankt, die unter meiner Verantwortung ihre Seminar-, Studien- und Diplomarbeiten absolvierten und auf diese Weise einen Beitrag zu der vorliegenden Arbeit geleistet haben.

Einen ganz entscheidenden Anteil an meiner Entwicklung und dem erfolgreichen Abschluß dieser Arbeit haben meine Eltern, die unentwegt nur das Beste für mich wollten. Nicht nur während meiner Schulzeit und dem Studium, sondern auch in meiner Zeit als Doktorand hatte ich dadurch das große Glück, mich, wann immer es notwendig war, auf meine Arbeit konzentrieren zu können und nicht durch zusätzliche – für Andere unvermeidliche – Aufgaben abgelenkt zu werden. Dankeschön!

Frank Schnitzer

Ein Systemansatz zur bildbasierten Navigation und Geometrierekonstruktion für Raumfahrt-Rendezvousmanöver

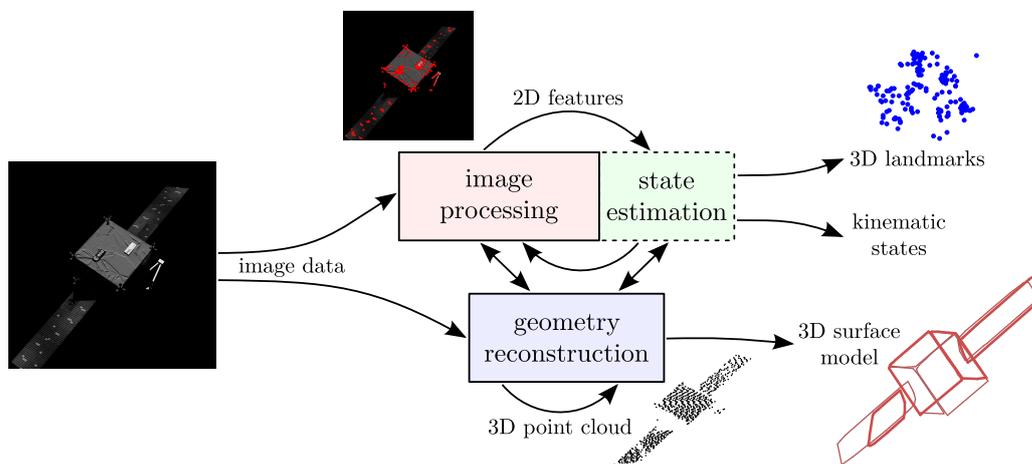
Zukünftige Raumfahrtprogramme setzen vermehrt auf das sogenannte On-Orbit Servicing: ein im Erdorbit befindlicher Satellit wird in einem Rendezvous- und Dockingmanöver eingefangen und dann gewartet, repariert, aufgetankt oder neu positioniert. Trotz ungünstigen Beleuchtungsbedingungen und eingeschränkten Möglichkeiten für Beobachtungstrajektorien sind während der Annäherung genaue Angaben über Position, Lage, Geschwindigkeit und Form des Zieles notwendig, um eine Kollision mit diesem zu verhindern. Im Kontext eines autonomen Manövers kann der Zielsatellit allerdings nicht als a priori bekannt vorausgesetzt werden.



In dieser Arbeit wird ein Systemkonzept für die kamerabasierte Rendezvous-Navigation mit einem unbekanntem, unkooperativen Zielobjekt entwickelt. Geeignete Algorithmen für Bildauswertung, Zustandsschätzung und Geometrierekonstruktion werden systematisch durch Informationsrückführungen erweitert und durch eine metrikbasierte Modellierung abgebildet, um eine quantitative Bewertung unterschiedlicher Konzeptvarianten zu ermöglichen. Eine Verifikation der entwickelten Algorithmen erfolgt in verschiedenen Experimenten mit synthetischen und realen Bilddaten.

A Systems Approach for Image-based Navigation and Geometry Reconstruction for Spacecraft On-Orbit Rendezvous Maneuvers

Future space programs are increasingly focusing on on-orbit servicing: a satellite in Earth orbit is caught in a rendezvous and docking maneuver and is thereafter maintained, repaired, refueled or repositioned. Despite unfavorable lighting conditions and restricted mobility for exploration during the approach, details of position, orientation, velocity and shape of the target are necessary while approaching and preventing any collision. In the context of an autonomous maneuver the target satellite can not be assumed to be known a priori.



In this thesis a system design for a camera-based rendezvous navigation with an unknown and non-cooperative target is developed. Suitable algorithms for image processing, state estimation and geometry reconstruction are integrated at system level and are systematically enhanced by information feedback. The algorithms are mapped to a metrics model permitting a quantitative assessment of concept variants. A verification of the developed algorithms is performed by experiments with synthetic and real image data.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation: Autonome Rendezvous-Navigation	1
1.2	Übersicht über den Inhalt der Arbeit	3
2	Stand der Technik und eigene Beiträge	5
2.1	Kamerabasierte Navigation	5
2.2	Kamerabasierte Navigation und Geometrierekonstruktion . .	11
2.2.1	Bildauswertung	12
2.2.2	Zustandsschätzung	16
2.2.3	Geometrierekonstruktion	17
2.2.4	Informationsrückführungen	23
2.3	Defizite bisheriger Ansätze und eigene Beiträge	25
3	Systemkonzept	29
3.1	Bildauswertung	30
3.2	Geometrierekonstruktion	33
3.3	Zustandsschätzung	35
4	Algorithmen für Navigation und Geometrierekonstruktion	37
4.1	Bildauswertung	37
4.1.1	Bildvorfilter	40
4.1.2	Integralbilderstellung	42
4.1.3	Merkmalsdetektion und -deskription	43
4.1.4	Korrespondenzsuche	45
4.1.5	Ausreißererkenung	53
4.1.6	Merkmalsverwaltung	54
4.2	Zustandsschätzung	59
4.3	Geometrierekonstruktion	61
4.3.1	Stereorekonstruktion	63
4.3.2	Triangulation	65
4.3.3	Normalenbestimmung	66
4.3.4	Segmentierung	68
4.3.5	Oberflächenrekonstruktion	70

5	Metrikbasierte Modellierung	77
5.1	Modellbildung mittels Metriken	77
5.2	Bildauswertung	78
5.2.1	Bildvorfilter	79
5.2.2	Integralbilderstellung	80
5.2.3	Merkmalsdetektion	80
5.2.4	Merkmalsdeskription	82
5.2.5	Stereo-Korrespondenzsuche	83
5.2.6	Datenbank-Korrespondenzsuche	84
5.2.7	Ausreißererkenung	86
5.2.8	Merkmalsverwaltung	87
5.2.9	Modell der Bildauswertung	91
5.3	Zustandsschätzung	99
5.4	Geometrierekonstruktion	99
5.4.1	Stereorekonstruktion	100
5.4.2	Triangulation	102
5.4.3	Normalenbestimmung	103
5.4.4	Segmentierung	104
5.4.5	Oberflächenrekonstruktion	105
5.4.6	Modell der Geometrierekonstruktion	107
5.5	Modulübergreifende Abhängigkeiten	114
6	Test und Verifikation	115
6.1	Implementierung	115
6.2	Simulationsexperimente	118
6.2.1	Inhalt der Simulationsexperimente	119
6.2.2	Ergebnisse der Simulationsexperimente	123
6.3	Laborexperimente	138
6.3.1	Spacecraft Rendezvous Simulator MiPOS	138
6.3.2	Inhalt der Laborexperimente	140
6.3.3	Ergebnisse der Laborexperimente	141
6.4	Fazit der Verifikation	144
7	Zusammenfassung	145
7.1	Erreichte Ziele	145
7.2	Ausblick	147
7.3	Abschluss und Fazit	149

Anhang A Algorithmische Abläufe	153
A.1 Bildauswertung	153
A.1.1 Bildvorfilterung	153
A.1.2 Integralbilderstellung	155
A.1.3 Merkmalsdetektion	155
A.1.4 Merkmalsdeskription	157
A.1.5 Stereo-Korrespondenzsuche	158
A.1.6 Datenbank-Korrespondenzsuche	159
A.1.7 Ausreißererkenung	162
A.1.8 Merkmalsverwaltung	163
A.2 Geometrierekonstruktion	168
A.2.1 Stereorekonstruktion	168
A.2.2 Triangulation	171
A.2.3 Normalenbestimmung	172
A.2.4 Segmentierung	173
A.2.5 Oberflächenrekonstruktion	177
Anhang B Experimentdaten	179
B.1 Simulationsexperimente	179
B.2 Laborexperimente	192
B.3 Experimentelle Ermittlung der Modellkennwerte	194
Literaturverzeichnis	195

Abbildungsverzeichnis

1.1	Projektbeispiele für Satellitenservicing	2
2.1	Bekannte Ziele mit künstlichen Landmarken	7
2.2	Navigationskonzept bei bekannten Zielen	8
2.3	Modellbasierte Objekterkennung bei unkooperativen Zielen	9
2.4	Navigationskonzept bei unkooperativen, unbekannt Zielen	10
2.5	Unbekannte, unkooperative Ziele	11
2.6	Kamerabasierte Navigation und Rekonstruktion	13
2.7	Dreidimensionale Rekonstruktion eines Zielobjektes	19
2.8	Segmentierung einer Punktwolke	20
2.9	Rekonstruktionsmöglichkeiten für Oberflächen	22
2.10	Zusammenfügen geometrischer Flächen	23
2.11	Informationsrückführung der Zustandsschätzung	24
3.1	Übersicht über das Systemkonzept	29
3.2	Systemgruppe Bildauswertung	31
3.3	Systemgruppe Geometrierekonstruktion	33
3.4	Systemgruppe Zustandsschätzung	35
4.1	Module der Bildauswertung	39
4.2	Extraktion interessanter Bildbereiche	41
4.3	Erstellung und Auswertung des Integralbildes	42
4.4	Merkmalsdetektion und -deskription durch SURF	43
4.5	Allgemeiner Ablauf der Korrespondenzsuche	47
4.6	Stereo-Korrespondenzsuche	48
4.7	Landmarken-Korrespondenzsuche	51
4.8	Ablauf der Datenbank-Korrespondenzsuche	52
4.9	Aufbau und Ablauf der Merkmalsverwaltung	57
4.10	Einfluss der Merkmalsverwaltung	58
4.11	Module der Zustandsschätzung	59
4.12	Konzept des SLAM-Filters	61
4.13	Module der Geometrierekonstruktion	62
4.14	Dichte Stereorekonstruktion	64

Abbildungsverzeichnis

4.15	Berechnung der Punktposition	65
4.16	Schätzung der Oberflächennormalen eines Punktes	68
4.17	Parameter der geometrischen Primitive	70
4.18	Punktuell bestimmte Flächenbegrenzungen	71
4.19	Ablauf der Oberflächenrekonstruktion	73
4.20	Fusion überlappender Flächen	74
4.21	Benachbarte Flächen	75
4.22	Einhüllende Flächen eines Zielobjektes	76
5.1	Datenflüsse der Bildvorverarbeitung	79
5.2	Datenflüsse der Integralbilderstellung	80
5.3	Datenflüsse der Merkmalsdetektion	81
5.4	Datenflüsse der Merkmalsdeskription	82
5.5	Datenflüsse der Stereo-Korrespondenzsuche	83
5.6	Datenflüsse der Datenbank-Korrespondenzsuche	84
5.7	Datenflüsse der Ausreißererkenung	86
5.8	Datenflüsse der Merkmalsverwaltung	87
5.9	Einfluss von Flächenmodell und Bildausschnitt	94
5.10	Einfluss von Landmarken und Datenbanken	96
5.11	Datenflüsse der Zustandsschätzung	99
5.12	Datenflüsse der Stereorekonstruktion	100
5.13	Datenflüsse der Triangulation	102
5.14	Datenflüsse der Normalenbestimmung	103
5.15	Datenflüsse der Segmentierung	104
5.16	Datenflüsse der Oberflächenrekonstruktion	106
5.17	Einfluss von Bilddaten und Punktwolke	111
5.18	Einfluss von Flächenmodell und Landmarken	113
6.1	Aufbau der Software-Realisierung (1)	117
6.2	Aufbau der Software-Realisierung (2)	118
6.3	Experimentreihen der Simulationsexperimente	120
6.4	Bilder der Simulationsszenarien und Ausgangssituation	122
6.5	Experiment 1A: Rechendauer der Bildauswertung	123
6.6	Experiment 1A: Erkennung und Anzahl von Bildmerkmalen	124
6.7	Experiment 1A: Modellrekonstruktion	125
6.8	Experiment 1A: Abweichungen vom Referenzmodell	127
6.9	Auswertung des Experiments 1B	128
6.10	Auswertung des Experiments 1C	130
6.11	Auswertung des Experiments 1D	131

Abbildungsverzeichnis

6.12	Auswertung des Experiments 1E	133
6.13	Auswertung des Experiments 1F (1)	134
6.14	Auswertung des Experiments 1F (2)	135
6.15	Auswertung des Experiments 1G (1)	136
6.16	Auswertung des Experiments 1G (2)	137
6.17	Spacecraft Rendezvous Simulator MiPOS	139
6.18	Kameratrajektorie der Laborexperimente	140
6.19	Bilder der Laborexperimente	141
6.20	Auswertung des Laborexperiments 1	142
6.21	Auswertung des Laborexperiments 2	143
B.1	Zielsatelliten der Simulationsexperimente	179
B.2	Bilder der Simulationsszenarien 1 - 3	180
B.3	Bilder der Simulationsszenarien 4 - 8	181
B.4	Auswertung Experiment 2A (1)	182
B.5	Auswertung Experiment 2A (2)	183
B.6	Auswertung Experiment 5A (1)	184
B.7	Auswertung Experiment 5A (2)	185
B.8	Auswertung Experiment 7A (1)	186
B.9	Auswertung Experiment 7A (2)	187
B.10	Auswertung Experiment 3A	188
B.11	Auswertung Experiment 4A	189
B.12	Auswertung Experiment 6A	190
B.13	Auswertung Experiment 8A	191
B.14	Zielsatelliten der Laborexperimente	192
B.15	Bilder der Laborexperimente 1 - 2	193

Tabellenverzeichnis

5.1	Dauer der Arbeitsschritte der Bildauswertung	91
5.2	Faktoren der Bildauswertung	91
5.3	Abschätzung der Rechendauer der Bildauswertung	98
5.4	Dauer der Arbeitsschritte der Geometrierekonstruktion	108
5.5	Faktoren der Geometrierekonstruktion	108
5.6	Abschätzung der Rechendauer der Geometrierekonstruktion	114
6.1	Experimentplan der Simulationsexperimente	120
6.2	Einstellungen für die Simulationsexperimente	121
6.3	Szenarien der Simulationsexperimente	122
6.4	Experiment 1A - Rechendauer Bildauswertung	124
6.5	Experiment 1A - Rechendauer Geometrierekonstruktion	126
6.6	Experiment B - Rechendauer Bildverarbeitung	129
6.7	Experiment C - Rechendauer Datenbank-Korrespondenzsuche	130
6.8	Experiment C - Anzahl übergebener Merkmale	130
6.9	Experiment D - Rechendauer Datenbank-Korrespondenzsuche	132
6.10	Experiment D - Anzahl übergebener Merkmale	132
6.11	Experiment E - Größe der Datenbank DB2	133
6.12	Experiment E - Rechenzeiten der Merkmalshandhabung	133
6.13	Experiment F - Anzahl an Landmarken	135
6.14	Experiment F - Rechenzeiten der Merkmalshandhabung	135
6.15	Experiment G - Rechendauer Oberflächenrekonstruktion	136
6.16	Experiment G - Orientierungsfehler	137
6.17	Experiment G - maximaler Abstand	137
B.1	Zielsatelliten der Simulationsexperimente	180
B.2	Experiment 2A - Rechendauer Bildauswertung	182
B.3	Experiment 2A - Rechendauer Geometrierekonstruktion	182
B.4	Experiment 5A - Rechendauer Bildauswertung	184
B.5	Experiment 5A - Rechendauer Geometrierekonstruktion	184
B.6	Experiment 7A - Rechendauer Bildauswertung	186
B.7	Experiment 7A - Rechendauer Geometrierekonstruktion	186
B.8	Experiment 3A - Rechendauer Bildauswertung	188

Tabellenverzeichnis

B.9 Experiment 4A - Rechendauer Bildauswertung	189
B.10 Experiment 6A - Rechendauer Bildauswertung	190
B.11 Experiment 8A - Rechendauer Bildauswertung	191
B.12 Zielsatelliten der Laborexperimente	192
B.13 Laborexperiment 1 - Durchschnittliche Rechendauer	193
B.14 Laborexperiment 2 - Durchschnittliche Rechendauer	193
B.15 Kennwerte der Simulationsszenarien	194

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

2D / 3D	zwei- / dreidimensional
AOCS	<i>Attitude and Orbit Control System</i>
BRISK	<i>Binary Robust Invariant Scalable Keypoints</i>
EKF	<i>Extended Kalman Filter</i>
EPOS	<i>European Proximity Operations Simulator</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
FREAK	<i>Fast Retina Keypoint</i>
GNC	<i>Guidance, Navigation and Control</i>
LVLH	<i>Local Vertical Local Horizontal</i>
MiPOS	<i>Mini Proximity Operation Simulator</i>
RANSAC	<i>Random Sample Consensus</i>
ROI	<i>Region of Interest</i>
SIFT	<i>Scale Invariant Feature Transform</i>
SLAM	<i>Simultaneous Localization and Mapping</i>
SURF	<i>Speeded Up Robust Features</i>

Bezeichner

AWL	Auswahlliste zur Weitergabe präferierter Bildmerkmale
DB1	Korresp.-Datenbank mit Bildmerkmalen des vorherigen Bildes
DB2	Korresp.-Datenbank mit Bildmerkmalen früherer Bilder
DDM	Korrespondenzsuchtoleranz Deskriptordifferenzen-Maximum
DDV	Korrespondenzsuchtoleranz Deskriptordifferenzen-Verhältnis
FSF	Ausreißererkenngsfaktor Flussvektor-Sicherheitsfaktor
FVF	Ausreißererkenngsfaktor Flussvektor-Vergrößerungsfaktor
MDB	Merkmalsdatenbank zur Verwaltung aller Bildmerkmale

Mengen

\mathcal{B}	Bildmerkmale
\mathcal{C}	Segmente
\mathcal{I}	Bilddaten
\mathcal{L}	Landmarken
\mathcal{P}	Punktwolke
\mathcal{S}	Oberflächenmodell

Allgemeine Symbole

$\{C\}$	Kamera-Koordinatensystem
$\{T\}$	Ziel-Koordinatensystem
b	Abstand zwischen den Kameras eines Stereo-Kamerasystems
f	Brennweite einer Kamera
$C_{\mathcal{I}i}$	Kamera des Kamerasystems, $i = 1, 2, \dots$
\mathbf{a}_C	Sichtrichtung einer Kamera
\mathbf{p}_C	3D-Raumkoordinaten des Zentrums einer Kamera
k	Zeitpunkt

Symbole mit Bezug auf Bilddaten

$\mathcal{I}_{i,k}$	Bilddaten der Kamera $C_{\mathcal{I}i}$, $i = 1, 2, \dots$
$\mathcal{I}_{\text{InIm},k}$	Integralbild
$\mathcal{I}_{\text{ROI}mask,k}$	Bildmaske
$\mathcal{I}_{\text{ROI}region,k}$	Bildausschnitt, Größe: $(\Delta u_{\text{ROI}} \times \Delta v_{\text{ROI}})$
$\mathcal{I}_{i, \text{rekt},k}$	rektifiziertes Bild der Kamera $C_{\mathcal{I}i}$, $i = 1, 2, \dots$
\mathbf{DSI}_k	Disparitätsraumvolumen
\mathbf{D}_k	Skalenraumkarte mit Filterantworten
$\mathbf{D}_{int_n,k}$	Antwortkarte mit Filterantworten einer spezifischen Skale
d_{\min}	Mindestwert für Detektions-Filterantwort
$d_{u,v,s}$	einzelne Filterantwort im Skalenraum; Detektionsstärke
$E(\Delta U)$	Energiefunktion der Stereorekonstruktion
$E(u, v, \Delta u)$	Energiewert der Stereorekonstruktion für ein Bildpixel
\mathbf{H}_k	Skalenraumkarte der <i>Laplace</i> -Vorzeichen
$\mathcal{I}_{u,v,k}$	einzelnes Bildpixel
\mathbf{MC}_k	Kostenmatrix der Stereorekonstruktion
s	Skale im Skalenraum
(u, v)	Koordinaten eines Bildpixels
$(U_{\mathcal{I}} \times V_{\mathcal{I}})$	ursprüngliche Größe eines Kamerabildes \mathcal{I}_k
$[\Delta u]$	Disparitätsintervall; $[\Delta u] = [\Delta u_{\min}; \Delta u_{\max}]$
$\Delta \mathbf{U}_k$	Disparitätsbild
$\Delta u_{u,v,k}$	Disparität eines Bildpixels
u_{\min}, u_{\max}	minimale/maximale horizontale Koordinate des Bildausschnitts
v_{\min}, v_{\max}	minimale/maximale vertikale Koordinate des Bildausschnitts

Symbole mit Bezug auf Bildmerkmale

$\mathcal{B}_{\mathcal{I},k}$	detektierte Bildmerkmale, allgemein
$\mathcal{B}_{\mathcal{I}i,k}$	in Bild $\mathcal{I}_{i,k}$ detektierte Bildmerkmale, $i = 1, 2, \dots$
\mathcal{B}_k	aktuell vom System detektierte Bildmerkmale
$\mathcal{B}_{\text{DB}i,k}$	Bildmerkmale in Datenbank DBi, $i = \{1, 2\}$

$\mathcal{B}_{K1,k}^\times$	Bildmerkmale mit Korrespondenz in DB1
$\mathcal{B}_{K1,k}$	von Ausreißern bereinigte Bildmerkmale aus $\mathcal{B}_{K1,k}^\times$
$\mathcal{B}_{K2,k}$	Bildmerkmale mit Korrespondenz in DB2
$\mathcal{B}_{AWL,k}$	Bildmerkmale der Auswahlliste AWL
$\mathcal{B}_{\mathcal{L},k}$	an die Zustandsschätzung übergebene Bildmerkmale
$\mathcal{B}_{\dots,k}^\diamond$	Bildmerkmale für die Korrespondenz-Bildpositionsprüfung
$\mathcal{B}_{\dots,k}^*$	Bildmerkmale für den Korrespondenz-Deskriptorvergleich
$\mathcal{B}_{\dots,k}^\square$	Bildmerkmale ohne Korrespondenz in DB1
$\mathcal{B}_{\dots,k}^\circ$	Bildmerkmale ohne Korrespondenz in DB1 oder $\hat{\mathcal{L}}_{k,k-1}$
AWL_{\max}	Maximalgröße der Auswahlliste AWL
$\mathbf{d}_{\mathcal{B}}$	Deskriptorvektor eines Bildmerkmals
$\Delta \mathbf{d}$	euklidischer Abstand zwischen zwei Deskriptorvektoren
$DB2_{\max}$	Maximalgröße der Datenbank DB2
$DB2_{\min}$	Mindestgröße für DB2 nach Bereinigung der Datenbank
D	Bewertungskriterium <i>Detektionsstärke</i>
$d_{\mathcal{B}}$	Detektionsstärke eines Bildmerkmals
$h_{\mathcal{B}}$	<i>Laplace-Vorzeichen</i> eines Bildmerkmals
K	Bewertungskriterium <i>Konstanz</i>
k_A, k_E	Start- und Endzeitpunkt der aktuellen Sichtungsperiode
N_F	Bewertungskriterium <i>Anzahl der Weitergaben</i>
N_P	Anzahl der Sichtungen innerhalb der aktuellen Sichtungsperiode
N_S	Bewertungskriterium <i>Anzahl der Sichtungen</i>
$o_{\mathcal{B}}$	Orientierung eines Bildmerkmals
$\mathbf{p}_{\mathcal{B}}$	Bildkoordinaten eines Bildmerkmals; $\mathbf{p}_{\mathcal{B}} = (u_{\mathcal{B},\mathcal{I}}, v_{\mathcal{B},\mathcal{I}})^T$
\mathbf{p}_{pred}	erwartende Bildposition eines möglichen Korrespondenzpartners
$\Delta \mathbf{p}$	Positionsdivergenz zweier Bildmerkmalspunkte
$\Delta \mathbf{p}_{DBi \max}$	Bildsuchbereich für Korrespondenzsuche in DB i , $i = \{1,2\}$
$\Delta \mathbf{p}_{DKS \max}$	Bildsuchbereich für Landmarken-Korrespondenzsuche
$\Delta \mathbf{p}_{SKS \max}$	Bildsuchbereich für Stereokorrespondenzsuche
$\overline{\Delta p}_{K1,k}$	Flussvektor eines Bildpunktes zwischen Zeitpunkt $k - 1$ und k
$\overline{\Delta p}_{K1,k}$	Mittelwert der Flussvektoren aller Bildmerkmale aus $\mathcal{B}_{K1,k}^\times$
$R_{\mathcal{B}}$	Merkmalsbewertung
$s_{\mathcal{B}}$	Merkmalsgröße / <i>Skale</i> eines Bildmerkmals
V	Bewertungskriterium <i>Nachbarschaftsverteilung</i>
WG_{\max}	Maximalanzahl zu übergebender Merkmale
WG_{\min}	geforderte Mindestanzahl zu übergebender Merkmale
w_D	Wichtungsfaktor für Bewertungskriterium D
w_F	Wichtungsfaktor für Bewertungskriterium N_F

Tabellenverzeichnis

w_K	Wichtungsfaktor für Bewertungskriterium K
w_S	Wichtungsfaktor für Bewertungskriterium N_S
w_V	Wichtungsfaktor für Bewertungskriterium V
(x_B, y_B)	metrische Koordinaten eines Merkmals auf der Bildebene

Symbole mit Bezug auf Punkte

\mathcal{P}_k	erzeugte Punktwolke
\mathcal{C}_k	segmentierte Punktgruppe
$\mathbf{b}_{\mathcal{P}}$	Beobachtungsvektor eines Punktes
$\hat{\mathbf{n}}_{\mathcal{P}}$	Schätzung der Oberflächennormale eines Punktes
$\mathbf{p}_{\mathcal{P}}$	3D-Raumkoordinaten eines Punktes; $\mathbf{p}_{\mathcal{P}} = (x_{\mathcal{P}}, y_{\mathcal{P}}, z_{\mathcal{P}})^T$
\mathbf{p}_S	Schwerpunkt einer Punktgruppe
$\mathcal{P}_{\mathcal{C}}$	einer Punktgruppe zugeordnete Punkte
Z_{\max}	maximale erlaubte Entfernung zwischen Punkt und Kamera

Symbole mit Bezug auf Landmarken

$\hat{\mathcal{L}}_k$	geschätzte Landmarken
$\hat{\mathcal{L}}_{k,k-1}$	für den aktuellen Zeitpunkt vorhergesagte Landmarken
$\mathbf{p}_{\mathcal{B}, \mathcal{L}, \mathcal{I}_i}$	Bildkoordinaten einer Landmarke in Bild $\mathcal{I}_{i,k}$, $i = \{1, 2\}$
$\Sigma_{\mathcal{P}, \mathcal{L}}$	Positionsunsicherheit eines Landmarkenpunktes

Symbole mit Bezug auf Flächen

$\hat{\mathcal{S}}_k$	rekonstruierte Flächen
$\hat{\mathcal{S}}_{k,k-1}$	für den aktuellen Zeitpunkt vorhergesagte Modellflächen
$\hat{\mathcal{S}}_k^\bullet$	Flächenmodell vor Verarbeitung der Flächennachbarschaften
$\hat{\mathcal{S}}_k^*$	aktuelles Flächenmodell vor Fusion mit früherem Modell
\mathcal{S}_k^\times	Hüllflächen der Grobmodellierung
Γ	Beschreibungsparametersatz einer Fläche
$\epsilon_\alpha, \epsilon_d$	Abweichung der Lage bzw. Abstand von der Referenzfläche
$\epsilon_{\dots}, \alpha_{\dots}$	Toleranzen für Abstand/Normalenrichtung bei Segmentierung
$\epsilon_{\mathcal{L}, \text{near}}$	Toleranz für Abstand bei Landmarkenzuordnungen
ϵ_S, α_S	Toleranzen für ähnliche (_{simil}) oder benachbarte (_{inter}) Flächen
$\epsilon_{\max}, \alpha_{\text{tol}}$	Toleranzen für Abstand/Normalenrichtung für Nachbarschaften
LM_{\min}	erforderliche Anzahl bei Landmarkenzuordnungen
$N_{\text{NB}, \min}$	Mindestanzahl für Nachbarpunkte bei Normalenbestimmung
Φ	Formparametersatz einer Fläche
Φ_{Con}	Parameter eines Kegel-Primitivs; $\Phi_{\text{Con}} = (\mathbf{p}_{\text{Con}}, \mathbf{a}_{\text{Con}}, w_{\text{Con}})^T$
Φ_{Cyl}	Parameter eines Zylinder-Primitivs; $\Phi_{\text{Cyl}} = (\mathbf{p}_{\text{Cyl}}, \mathbf{a}_{\text{Cyl}}, r_{\text{Cyl}})^T$
Φ_{Pla}	Parameter eines Ebenen-Primitivs; $\Phi_{\text{Pla}} = (\mathbf{p}_{\text{Pla}}, \mathbf{n}_{\text{Pla}})^T$
Φ_{Sph}	Parameter eines Kugel-Primitivs; $\Phi_{\text{Sph}} = (\mathbf{p}_{\text{Sph}}, r_{\text{Sph}})^T$
$\mathbf{p}_{\text{ref}}, \mathbf{n}_{\text{ref}}$	Punkt / Normale (bzw. Achse \mathbf{a}_{ref}) der Referenzfläche

\mathcal{P}_S	Begrenzungspunkte einer Fläche
P_τ	Wahrscheinlichkeit: alle Primitive sind bereits extrahiert
$P_{\text{exist, min}}$	Wahrscheinlichkeit: Primitiv existiert in Punktwolke
$\mathbf{p}_{\mathcal{P}, S}$	3D-Raumkoordinaten eines Begrenzungspunktes
$r_{\dots, \text{max}}$	maximal erlaubter Radius für Kugel / Zylinder
$w_{\text{Con, min}}$	minimal erlaubter Öffnungswinkel für Kegel
Symbole mit Bezug auf kinematische Zustände	
$\hat{\mathbf{x}}_k$	relative kinematische Zustände des Zielobjektes
$\hat{\boldsymbol{\omega}}_{\text{rel}}$	relative Drehrate des Zieles
$\hat{\mathbf{q}}_{\text{rel}}$	relative Lage des Zieles
$\hat{\mathbf{s}}_{\text{rel}}$	relative Position des Zieles
$\hat{\mathbf{v}}_{\text{rel}}$	relative Geschwindigkeit des Zieles
$\mathbf{a}_{\text{thruster}}$	durch Aktoren hervorgerufene Beschleunigung des Service-Satelliten
$\mathbf{q}_{\text{chaser}}$	Lage des Service-Satelliten im Inertialsystem
Ω	Orbitalkreisfrequenz des Service-Satelliten

Modellierung der Rechenzeit

Symbole mit Bezug auf Anteilsfaktoren

a_{K1}^\times, a_{Ki}	Verhältnis zw. Korrespondenz- und Merkmalsanzahl, $i = \{1, 2\}$
a_L	Anteil der übergebenen Merkmale
$a_{N, \text{over}}$	Verhältnis zwischen übervoller und durchschnittlicher AWL
a_{AWLAA}	Anteil der zur AWL hinzuzufügenden Merkmale
a_{AWLAD}	Anteil der Zyklen mit Hinzufügen von AWL-Elementen
a_{AWLAP}	Anteil der die AWL vergrößernde Merkmale
a_{AWLRM}	Anteil der Zyklen mit Löschen von AWL-Elementen
a_{DBRA}	Anteil der Zyklen mit Bewertung von MDB-Merkmalen
a_{DBRM}	Anteil der Zyklen mit Löschen von MDB-Merkmalen
a_{BV}	Anteil der Flächenpaarungen mit Begrenzungenverbesserung
a_{CP}	Anteil der Punkte eines Segmentes an Gesamtpunktwolke
$a_{\text{CON}}, a_{\text{CYL}}$	Anteil der Segm.-durchläufe mit voller Berechnung des Primitivs
a_{SPH}	Anteil der Segm.-durchläufe mit voller Berechnung des Primitivs
a_{FF}	Anteil der sich ähnelnden Flächenpaarungen
a_{GR}	Verhältnis zwischen Segment- und Flächenanzahl
a_{LE}	Anteil der einer Fläche zugeordneten Landmarken
a_{PFZ}	Anteil der Punkte, die einer Fläche $\hat{S}_{k, k-1}$ zugeordnet wurden
a_{PI}	Anteil der zur Weiterverarbeitung ausgewählten Pixel
a_{PNB}	Anteil der Punkte innerhalb der Punktnachbarschaft
a_{PU}	Anteil der Segm.-durchläufe mit Übernahme eines Primitivs
a_{SEG}	Verhältnis zw. Segment.-durchläufen und Punktwolkengröße

Tabellenverzeichnis

$a_{\dots,k}^\diamond$	Anteil verbliebener Bildmerkmale für die Bildpositionsprüfung
$a_{\dots,k}^\star$	Anteil verbliebener Bildmerkmale für den Deskriptorvergleich
$a_{M,k}^\square, a_{N,k}^\square$	Anteil verbl. Merkmale/Landmarken nach Korr.-suche mit $\mathcal{B}_{DB1,k}$
$a_{M,k}^\circ$	Anteil verbl. Merkmale nach Korr.-suche mit $\mathcal{B}_{DB1,k}$ und $\hat{\mathcal{L}}_{k,k-1}$
$a_{N,k}^\circ$	Anteil der Landmarken mit Korrespondenz in DB2
$a_{N,k}^\triangle$	Anteil verbl. Landmarken nach Oberflächennormalenprüfung

Symbole mit Bezug auf Anzahlen

G_k	Anzahl der Punktgruppen \mathcal{C}_k
M_k	Anzahl der aktuell detektierten Bildmerkmale \mathcal{B}_k
$M_{AWL,k}$	Anzahl der in der Auswahlliste AWL enthaltenen Bildmerkmale
$M_{DBi,k}$	Anzahl der Bildmerkmale in Datenbank DBi, $i = \{1,2\}$
$M_{\mathcal{I}_i,k}$	Anzahl der in Bild $\mathcal{I}_{i,k}$ detektierten Merkmale $\mathcal{B}_{\mathcal{I}_i,k}$, $i = 1,2, \dots$
$M_{K1,k}^\times$	Anzahl der Bildmerkmale mit Korrespondenz in DB1
$M_{K1,k}$	Anzahl der bereinigten Korrespondenzen zu DB1
$M_{K2,k}$	Anzahl der Bildmerkmale mit Korrespondenz in DB2
$M_{\mathcal{L},k}$	Anzahl der an den Zustandsschätzer übergebenen Merkmale $\mathcal{B}_{\mathcal{L},k}$
N_k	Anzahl der geschätzten Landmarken \mathcal{L}_k
P_k	Anzahl der Punkte in der Punktwolke \mathcal{P}_k
$P_{\mathcal{C}_g,k}$	Anzahl der zu Segment $\mathcal{C}_{g,k}$ zugeordneten Punkte
$P_{n,NB,k}$	Anzahl der Punkte innerhalb der Nachbarschaft eines Punktes
$P_{\mathcal{S}_p,k}$	Anzahl der Begrenzungspunkte der Fläche $\mathcal{S}_{p,k}$
R_k	Anzahl der rekonstruierten Flächen im Modell \mathcal{S}_k
\bar{G}	durchschnittliche Anzahl an Punktgruppen
$\bar{M}_{\mathcal{I}}, \bar{M}_{DB2}$	durchschnittliche Anzahl an Merkmalen
\bar{N}	durchschnittliche Anzahl an Landmarken
\bar{P}, \bar{P}_S	durchschnittliche Anzahl an Punkten / Begrenzungspunkten
\bar{R}	durchschnittliche Anzahl rekonstruierter Flächen
$M_{\dots,k}^\diamond$	Anzahl der Bildmerkmale für die Bildpositionsprüfung
$M_{\dots,k}^\star$	Anzahl der Bildmerkmale für den Deskriptorvergleich
$M_k^\square, N_{k-1}^\square$	Anzahl der Merkmale/Landmarken nach Korr.-suche mit $\mathcal{B}_{DB1,k}$
$M_{\dots,k}^\circ$	Anzahl der Merkmale nach Korr.-suche mit $\mathcal{B}_{DB1,k}$ und $\hat{\mathcal{L}}_{k,k-1}$
N_{k-1}°	Anzahl der Landmarken mit Korrespondenz in DB2
N_{k-1}^\triangle	Anzahl der Landmarken nach Prüfung der Oberflächennormalen

Symbole mit Bezug auf Zeiten

T_{BA}	Berechnungsdauer der Bildauswertung
T_{GR}	Berechnungsdauer der Geometrierekonstruktion
T_{ZS}	Berechnungsdauer der Zustandsschätzung
$T_{\dots,DB2}$	durch Datenbank DB2 beeinflusster Anteil der Dauer

$T_{\dots, \mathcal{I}}$	durch Bilddaten beeinflusster Anteil der Dauer
$T_{\dots, \mathcal{L}}$	durch Landmarken beeinflusster Anteil der Dauer
$T_{\dots, \mathcal{P}}$	durch Punktwolke beeinflusster Anteil der Dauer
$T_{\dots, \text{ROI}}$	durch Bildausschnitt beeinflusster Anteil der Dauer
$T_{\dots, \mathcal{S}}$	durch Flächenmodell beeinflusster Anteil der Dauer
T_{ARE}	Zeitdauer für die Ausführung der Ausreißererkenung
T_{BVF}	Zeitdauer für die Ausführung des Bildvorfilters
T_{DKS}	Zeitdauer für die Ausführung der Datenbank-Korrespondenzsuche
T_{IBE}	Zeitdauer für die Ausführung der Integralbilderstellung
T_{MDS}	Zeitdauer für die Ausführung der Merkmalsdeskription
T_{MDT}	Zeitdauer für die Ausführung der Merkmalsdetektion
T_{MVW}	Zeitdauer für die Ausführung der Merkmalsverwaltung
T_{NBE}	Zeitdauer für die Ausführung der Normalenbestimmung
T_{REK}	Zeitdauer für die Ausführung der Oberflächenrekonstruktion
T_{SEG}	Zeitdauer für die Ausführung der Segmentierung
T_{SKS}	Zeitdauer für die Ausführung der Stereo-Korrespondenzsuche
T_{SRE}	Zeitdauer für die Ausführung der Stereorekonstruktion
T_{TRI}	Zeitdauer für die Ausführung der Triangulation

Symbole mit Bezug auf Elementarzeiten

$\Delta T_{\text{ARE}_{\text{AP}}}$	Zeitdauer der Ausreißerprüfung; je Korrespondenz
$\Delta T_{\text{ARE}_{\text{MB}}}$	Zeitdauer der Berechnung des Mittelwertes; je Korrespondenz
$\Delta T_{\text{BVF}_{\text{BA}}}$	Zeitdauer der Prüfung der Bildposition eines 2D-Punktes
$\Delta T_{\text{BVF}_{\text{BM}}}$	Zeitdauer der Prüfung des Flächeninhaltes einer Fläche
$\Delta T_{\text{BVF}_{\text{PB}}}$	Zeitdauer der Projektion eines 3D-Punktes auf die Bildebene
ΔT_{IBE}	Zeitdauer der Erstellung eines Integralbildpixels
$\Delta T_{\text{KS}_{\text{DS}}}$	Zeitdauer des Vergleichs der Deskriptoren zweier Merkmale
$\Delta T_{\text{KS}_{\text{NP}}}$	Zeitdauer der Prüfung der Normalenrichtung einer Landmarke
$\Delta T_{\text{KS}_{\text{PS}}}$	Zeitdauer des Vergleichs der Bildpositionen zweier Merkmale
$\Delta T_{\text{KS}_{\text{SB}}}$	Zeitdauer der Berechnung des Landmarken-Suchbereiches
$\Delta T_{\text{KS}_{\text{VZ}}}$	Zeitdauer des Laplace-Vorzeichen-Vergleichs zweier Merkmale
$\Delta T_{\text{MDS}_{\text{DB}}}$	Zeitdauer der Deskriptorbestimmung eines Bildmerkmals
$\Delta T_{\text{MDS}_{\text{KK}}}$	Zeitdauer der Anpassung der Bildposition eines Merkmals
$\Delta T_{\text{MDS}_{\text{OB}}}$	Zeitdauer der Orientierungsbestimmung eines Merkmals
$\Delta T_{\text{MDT}_{\text{DI}}}$	Zeitdauer der Untersuchung des Skalenraumes; je Bildpixel
$\Delta T_{\text{MDT}_{\text{KS}}}$	Zeitdauer der Konstruktion des Skalenraumes; je Bildpixel
$\Delta T_{\text{MDT}_{\text{ME}}}$	Zeitdauer der Erstellung eines Merkmals
$\Delta T_{\text{MVW}_{\text{AA}}}$	Zeitdauer der Erweiterung der AWL um ein Bildmerkmal
$\Delta T_{\text{MVW}_{\text{AD}}}$	Zeitdauer des Hinzufügens eines Merkmals zu einer Datenbank

Tabellenverzeichnis

$\Delta T_{MVW_{AP}}$	Zeitdauer der Prüfung, ob Merkmal zu AWL hinzugefügt wird
$\Delta T_{MVW_{RA}}$	Zeitdauer der Merkmalsbewertung; je Bildmerkmal
$\Delta T_{MVW_{RM}}$	Zeitdauer des Entferns eines Merkmals aus einer Datenbank
$\Delta T_{MVW_{sort}}$	Zeitdauer des Sortierens einer Datenbank; $\Delta T_{MVW_{sort}} = f(M)$
$\Delta T_{MVW_{TA}}$	Zeitdauer der Prüfung, ob ein Merkmal der AWL ersetzt wird
$\Delta T_{MVW_{UP}}$	Zeitdauer des Aktualisierens der Statistiken eines Merkmals
$\Delta T_{MVW_{WG}}$	Zeitdauer der Prüfung, ob ein Bildmerkmal weitergereicht wird
$\Delta T_{NBE_{FN}}$	Zeitdauer der Übernahme der Normale einer Fläche; je 3D-Punkt
$\Delta T_{NBE_{FP}}$	Zeitdauer des Flächenzugehörigkeitsprüfung; je 3D-Punkt
$\Delta T_{NBE_{NB}}$	Zeitdauer der Prüfung auf eine Punktnachbarschaft; je 3D-Punkt
$\Delta T_{REK_{AB}}$	Zeitdauer der Bestimmung der äußeren Begrenzung; je Fläche
$\Delta T_{REK_{AP}}$	Zeitdauer der Ähnlichkeitsprüfung zweier Flächen; je Paarung
$\Delta T_{REK_{BV}}$	Zeitdauer der Verbesserung der Flächenbegrenzung; je Fläche
$\Delta T_{REK_{FF}}$	Zeitdauer der Fuson zweier ähnlicher Flächen; je Paarung
$\Delta T_{REK_{fit}}$	Zeitdauer des Einpassens in eine Punktmenge; $\Delta T_{REK_{fit}} = f(P)$
$\Delta T_{REK_{IB}}$	Zeitdauer der Bestimmung der inneren Begrenzung; je Fläche
$\Delta T_{REK_{LP}}$	Zeitdauer der Flächenzugehörigkeitsprüfung; je Landmarke
$\Delta T_{REK_{NP}}$	Zeitdauer der Nachbarschaftsuntersuchung einer Flächenpaarung
$\Delta T_{SEG_{AT}}$	Zeitdauer der Prüfung der RANSAC-Abbruchbedingungen
$\Delta T_{SEG_{BA}}$	Zeitdauer der Untersuchung aller aktuell vorhandenen Primitive
$\Delta T_{SEG_{CON}}$	Zeitdauer der Erstellung eines Kegel-Primitivs
$\Delta T_{SEG_{CYL}}$	Zeitdauer der Erstellung eines Zylinder-Primitivs
$\Delta T_{SEG_{PLA}}$	Zeitdauer der Erstellung eines Ebenen-Primitivs
$\Delta T_{SEG_{PU}}$	Zeitdauer der Erstellung eines Segmentes aus einem Primitiv
$\Delta T_{SEG_{SPH}}$	Zeitdauer der Erstellung eines Kugel-Primitivs
$\Delta T_{SRE_{AP}}$	Zeitdauer der Pfadaggregation; je Pixel, je Disparitätswert
$\Delta T_{SRE_{CT}}$	Zeitdauer der Census-Transformation; je Bildpixel
$\Delta T_{SRE_{DI}}$	Zeitdauer der Interpolation eines Disparitätswertes
$\Delta T_{SRE_{HB}}$	Zeitdauer der Auswertung des hor. Baums; je Pixel, je Disparität
$\Delta T_{SRE_{HD}}$	Zeitdauer der Hamming-Distanz-Berechnung; je Paarung
$\Delta T_{SRE_{MS}}$	Zeitdauer der Minimumsuche im DSI ; je Pixel, je Disparität
$\Delta T_{SRE_{PE}}$	Zeitdauer der Baum-Pfaderstellung; je Pixel, je Disparitätswert
$\Delta T_{SRE_{VB}}$	Zeitdauer der Auswertung des vert. Baums; je Pixel, je Disparität
$\Delta T_{TRI_{PE}}$	Zeitdauer der Erstellung eines 3D-Punktes
$\Delta T_{TRI_{ZB}}$	Zeitdauer der Berechnung der 3D-Punktcoordinate; je Bildpixel

1 Einleitung

Mit zunehmender Nutzung des Weltraums, etwa durch den vermehrten Einsatz von Navigations-, Telekommunikations- und Wettersatelliten, aber auch durch neue bemannte und unbemannte Forschungs- und Erkundungsmissionen in unserem Sonnensystem, steigt die Anzahl der in den Weltraum und den Erdorbit entsandten Satelliten und Raumfahrtsysteme.

Neben Systemausfällen, Bauteilversagen, Kollisionen oder Fehlfunktionen, die trotz aller getroffener Vorkehrungen immer wieder vorkommen können, führt auch das Lebenszeitende, das heißt erschöpfte Treibstoffreserven oder nicht aufladbare Energievorräte eines Satelliten dazu, dass dieser nicht mehr einsatzfähig und somit faktisch *Weltraumschrott* ist. Ereignet sich dies vor Ende der nominellen Mission, so ergibt sich meist nicht nur ein finanzieller Schaden, sondern auch die potenzielle Gefährdung weiterer Satelliten.

In jüngster Vergangenheit wurden verschiedene Raumfahrtprogramme ins Leben gerufen, deren Ziel ein Rendezvous- und Dockingmanöver mit einem solchen Satelliten ist, um diesen zu warten, zu reparieren, aufzutanken, seine Positions- und Lagekontrolle zu übernehmen oder ihn zu entsorgen, indem man gezielt seine Flugbahn so ändert, dass er in der Erdatmosphäre verglüht.

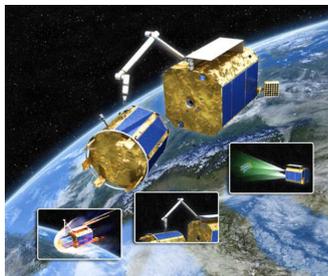
Während der Annäherung an den unter Umständen defekten und nicht kooperativen Zielsatelliten sind, um eine Kollision mit diesem zu verhindern, genaue Daten über das Ziel – dessen Position, Lage, Geschwindigkeit und dessen Form – notwendig. Besondere Herausforderungen ergeben sich jedoch, wenn es sich hierbei nicht um eine spezifische Mission handelt und das Ziel als unbekannt angenommen werden muss.

1.1 Motivation: Autonome Rendezvous-Navigation

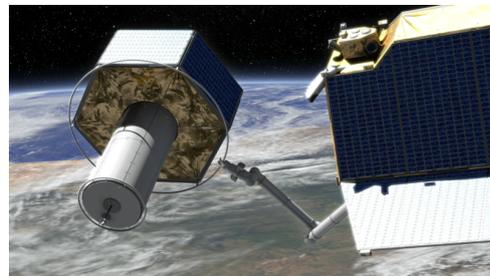
Die Menge des im Erdorbit befindlichen Weltraumschrotts muss in den kommenden Jahren gezielt reduziert werden, indem besonders massereiche, ausgediente Satelliten aus der Umlaufbahn entfernt werden. Ohne eine derartige Aufräumaktion kann es durch Kollisionen zu einem explosionsartigen Anstieg der Anzahl an Schrottpartikeln kommen, wodurch immer mehr Raumfahrzeuge beschädigt werden. [Wie+12]

Eine Vermeidung von Weltraumschrott kann dagegen z. B. durch *lebensverlängernde Maßnahmen* für Satelliten erreicht werden. Die erhöhte Nutzungszeit dieser Systeme verzögert den Einsatz von Nachfolgeexemplaren und ermöglicht somit auch eine Kostenersparnis. Anwendung soll dieses Prinzip beim *Orbital Life Extension Vehicle (OLEV)* finden: die Service-Plattform dockt an Satelliten an, deren Treibstoff aufgebraucht ist, die technisch jedoch einwandfrei funktionieren, und übernimmt deren Positions- und Lageregelung für weitere Jahre. [Sel+10]

Das als *On-Orbit Servicing* bezeichnete Vorgehen, bei dem im All ein Rendezvous und Docking sowie eine anschließende *Dienstleistung* am Zielsatelliten stattfinden, gerät mehr und mehr in den Blickpunkt der Raumfahrt. Um die Sicherheit von Astronauten nicht zu gefährden und die Notwendigkeit der Kommunikation mit Bodenstationen zu umgehen, werden vor allem (teil-) autonome Systeme entwickelt, die selbsttätig derartige Operationen durchführen sollen. Mit der *Deutschen Orbitalen Servicing-Mission* (kurz: *DEOS*) wird das Einfangen eines unkooperativen und taumelnden Satelliten mit einem Manipulatorarm sowie die Inspektion, Wartung und das De-Orbiting des Zielsatelliten beabsichtigt [WRS12] [SSB10] (siehe Abbildung 1.1). Das Projekt *INVERITAS (Innovative Technologien zur Relativnavigation und Capture mobiler autonomer Systeme)* beinhaltet die Entwicklung einer bildgestützten Navigation für ein Rendezvous mit einem unkooperativen Ziel. [SW12]



(a)



(b)

Abbildung 1.1: Projektbeispiele für Satellitenservicing. a) Die *Deutsche Orbitale Servicing-Mission (DEOS)* umfasst das Bergen, die Wartung und das De-Orbiting unkooperativer Satelliten [WRS12]; b) Das Projekt *INVERITAS* widmet sich der bildgestützten Nahbereichsnavigation beim Rendezvous [SW12].

Bei einem *Rendezvous* nähert sich das kameratragende System – der *servicer* bzw. *chaser* – gezielt dem Zielsatelliten – allgemein *Ziel* bzw. *Zielobjekt*, *target* oder *client*. Unterstützt dieser das Manöver weder durch Signale oder Kommunikation noch durch eigene Aktionen, so gilt er als *unkooperativ*.

Um ein Rendezvous- und Dockingmanöver durchzuführen, ist es notwendig, zu erkennen, wo sich das Ziel relativ zum Service-Satelliten befindet und wie es sich bewegt. Diese als *Relativnavigation* bekannte Aufgabe wird zusätzlich erschwert, wenn das Ziel *unbekannt* ist, d. h. a priori keine Informationen zu diesem vorliegen. Eine Kollisionsvermeidung ist jedoch nur dann möglich, wenn auch die Form des Zieles bekannt ist. Die Bestimmung all dieser Informationen basiert in dieser Arbeit allein auf den Bilddaten eines Kamerasystems. Algorithmen für die Auswertung der Bilder (*Bildauswertung*), für die Ermittlung der kinematischen Zustände des Zieles (*Zustandsschätzung*) und für die Bestimmung der Zielform (*Geometrierekonstruktion*) werden zu einem System zusammengefasst, das die gegebene Aufgabe lösen kann.

Die quantitative *Modellierung* bestimmter Verhaltenseigenschaften dieses Navigationssystems erlaubt es, verschiedene Entwurfsalternativen zu bewerten und durch eine gezielte Wahl von Systemparametern zu optimieren.

1.2 Übersicht über den Inhalt der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Systemkonzeptes für die kamerabasierte Rendezvous-Navigation mit einem unbekanntem, unkooperativen Zielobjekt. Um dies zu erreichen, werden Algorithmen in das Navigationssystem integriert, mit denen – ohne a priori Wissen – Bilddaten ausgewertet, kinematische Zustände geschätzt und die dreidimensionale Form des Zielobjektes rekonstruiert werden können. Durch eine geeignete Zusammenstellung der Algorithmen und durch den konsequenten Datenaustausch zwischen diesen können die Systemeigenschaften Rechengeschwindigkeit, Genauigkeit und Robustheit gegenüber bekannten Ansätzen verbessert werden. Die Modellierung von Verhaltenseigenschaften der Algorithmen und ihres Zusammenspiels innerhalb des Systems ermöglicht die Beurteilung der Systemleistung und erleichtert Entscheidungen bezüglich Änderungen des Navigationssystems. Für die vorliegende Arbeit ergibt sich damit folgender Aufbau:

Kapitel 2 – Stand der Technik und eigene Beiträge

Ein Überblick über Missionen und Systeme für die Rendezvous-Navigation von Raumfahrzeugen ermöglicht es, Defizite existierender Ansätze zu analysieren und Anforderungen für einen eigenen Lösungsweg auszuarbeiten. Mit diesen Grundlagen kann ein verallgemeinertes Systemkonzept für Rendezvous- und Docking-Manöver mit unbekanntem, unkooperativen Zielen eingeführt werden. Mögliche Methoden für dessen Realisierung werden vorgestellt und

deren jeweilige Beschränkungen aufgeführt, bevor schließlich die gewählte Herangehensweise und die eigenen Beiträge präsentiert werden.

Kapitel 3 – Systemkonzept

Aufbau und Zusammenstellung des Ansatzes mit den Systemgruppen *Bilddauswertung*, *Zustandsschätzung* und *Geometrierekonstruktion* werden vorgestellt. Ohne detailliert auf die zugrunde liegenden Algorithmen einzugehen, werden deren Schnittstellen und wichtige Datenflüsse aufgezeigt.

Kapitel 4 – Algorithmen

Das Navigationssystem – bestehend aus der Verarbeitung von Bilddaten, der Verwaltung der darin detektierten Bildmerkmale, der Schätzung der kinematischen Zustände des Zielobjektes sowie der Schätzung der Positionen beobachteter, natürlicher Landmarken und der Rekonstruktion der Form des Zieles – lässt sich in Module unterteilen, die jeweils die einzelnen Verarbeitungsschritte repräsentieren. Für jedes Modul werden die durchzuführenden Algorithmen sowie Ein- und Ausgangsdaten und Möglichkeiten für die systematische Nutzung von Informationsrückführungen beschrieben.

Kapitel 5 – Metrikbasierte Modellierung

Für alle Algorithmen des Ansatzes werden Metrikmodelle entwickelt. Mit diesen ist es möglich, die Eigenschaften und das Verhalten aller Module (in dieser Arbeit speziell das Zeitverhalten) zu beschreiben und das Zusammenspiel innerhalb der drei Systemgruppen und im Gesamtsystem nachzubilden. Das entstehende Modell kann schließlich zur Gesamtoptimierung aller Verarbeitungsschritte genutzt werden.

Kapitel 6 – Test und Verifikation

Die Umsetzung des erarbeiteten Konzeptes erfolgt durch eine rein softwaretechnische Realisierung. Der Nachweis der Leistungsfähigkeit des Navigationssystems wird durch Simulations- und Laborexperimente erbracht, mit denen die Algorithmen unter verschiedenen Voraussetzungen getestet und verifiziert werden.

Kapitel 7 – Zusammenfassung

Zum Abschluss werden die erreichten Ergebnisse zusammengefasst, offene Problemstellungen aufgezeigt und Ausblicke auf weiterführende Arbeiten gegeben.