

OPTISCHE NAVIGATIONSVERFAHREN IN GROSSSKALIERTEN UMGEBUNGEN

F. Andert*

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Flugsystemtechnik
38108 Braunschweig, Deutschland

Zusammenfassung

Diese Arbeit betrachtet Alternativen zu satellitengestützter Navigation als Ergänzung zu gekoppeltem GNSS/INS. Vorgestellt wird ein optisch gestütztes Lokalisierungsverfahren für den Einsatz bei kleineren bzw. unbemannten Luftfahrzeugen in unbekanntem Umgebungen und bei Flügen über größere Entfernungen im Kilometerbereich. Technischer Kern ist ein kamerabasiertes Verfahren zur Lokalisierung und Kartierung (SLAM). Hierbei werden aus Bildinhalten 3D-Geländemerkmale extrahiert. Durch Georeferenzierung aus vorhergehenden Positionsdaten können diese dann für die weitere Lokalisierung der Kamera und damit des Luftfahrzeugs verwendet werden. Zur Erhöhung der Genauigkeit werden die Informationen der Kamerabilder mit Entfernungsmessungen kombiniert. Geeignet sind hier insbesondere Sensoren wie Lidar und Radar. Die Anwendbarkeit des Ansatzes wird anhand von Daten aus Flugversuchen demonstriert – gezeigt werden Flugversuche mit bemannten und unbemannten Versuchsträgern. Die relative optische Navigation erreicht eine Ungenauigkeit von etwa 1–6% Fehler bezogen auf die geflogene Strecke, was in etwa in der Größenordnung der verwendeten Entfernungssensoren liegt. Darüber hinaus geht der Artikel auf spezielle Probleme der Sensorik sowie auf die Grenzen der Anwendbarkeit optischer Navigationsverfahren mit Luftfahrzeugen ein.

1. EINLEITUNG

Zur Steigerung der Robustheit und Ausfallsicherheit von satellitengestützten Navigationsverfahren werden derzeit Verfahren zur Nutzung optischer Sensoren als zusätzliche Bewegungssensoren entwickelt. Betrachtet werden kamerabasierte Verfahren, bei denen die in den Bildsequenzen sichtbaren Bewegungen zur Schätzung der Eigenbewegung der Kamera(s) bzw. Position und Lage(-änderung) des Luftfahrzeugs genutzt und in eine GNSS/INS-Sensorfusion integriert werden. Derartige Verfahren werden zurzeit auf kleinen fliegenden Plattformen (z.B. Quadrocopter) eingesetzt [1]. Die Hauptanwendung ist dabei der Flug bei temporärem Ausfall oder Störung der GNSS-Positionsstützung. Schwebefähige RPAs für den Flug im Sichtbereich und mit optischer Stabilisierung (v.a. Schwebeflug) haben bereits Marktreife erreicht, jedoch werden für den Nutzer Einschränkungen bei der Anwendbarkeit angegeben. Beispielsweise rät der RPA-Hersteller DJI von der Nutzung optischer Technologien im schnellen Tiefflug und in dynamischen Umgebungen ab [2].

Die Übertragung derartiger optisch gestützter Navigationsverfahren auf größere Einsatzgebiete und auf Flächenflugzeuge bringt weitere Herausforderungen für die Umgebungssensoren (Kameras, Entfernungsmesser) und die Datenauswertung. Dies betrifft beispielswei-

se Einschränkungen aufgrund von Fluggeschwindigkeiten und Messreichweiten.

Ein wesentliches Ziel der betrachteten Technologie ist die Fortsetzung der Positionsstützung bei Ausfällen des GNSS, insbesondere zur Reduktion der Inertialdrift. Die Arbeit gibt einen Einblick in ein am DLR-Institut für Flugsystemtechnik entwickeltes Verfahren zur optischen Navigation für fliegende Plattformen. Neben den technischen Grundlagen werden auch die Besonderheiten und Grenzen im Hinblick auf Luftfahrtanwendungen evaluiert. Anschließend erfolgt die Anwendung der optisch basierten Technologie in Flugversuchen mit bemannten und unbemannten Trägersystemen (Bild 1).



BILD 1: Unbemannte Versuchsträger am DLR: Hubschrauber *super-ARTIS* (Flettner-Doppelrotor mit 2x 2,8m Rotordurchmesser, 85 kg MTOM) und Flugzeug *Prometheus* (Spannweite 3,2m, 31 kg MTOM).

*Kontakt: Franz Andert, e-mail: franz.andert@dlr.de, Tel.: +49 (0)531 295 2678. Präsentiert auf dem 65. Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2016, Braunschweig, Deutschland.

2. OPTISCHE NAVIGATION

Im gegebenen Kontext bezeichnet *optische Navigation* Verfahren zur Lokalisierung bzw. Zustandsschätzung, in denen optische Sensoren, insbesondere Kameras, eine wesentliche Rolle einnehmen. Grundlage der hier betrachteten Verfahren für Luftfahrzeuge ist die GNSS/INS-Koppelung mit Navigationsfiltern (z.B. EKF). Als Ergänzung bzw. Alternative zu GNSS (bspw. bei einem temporären Ausfall) erfolgt die Bestimmung von Positions- und Lageinformationen basierend auf den Daten von Kameras und weiteren Umgebungssensoren wie Radar und Lidar. Der vorgestellte Ansatz ist für beliebige bzw. unbekannte Umgebungen konzipiert, d.h. es werden keine Umgebungskarten, Landmarken oder weitere Infrastrukturelemente benötigt. Derartige optische Verfahren dienen als *relative Navigation* vor allem zur Überbrückung temporärer GNSS-Ausfälle und zur Verringerung der Drift bei der Verwendung von vergleichsweise ungenauen IMUs für kleine Luftfahrzeuge (v.a. RPAs).

2.1. Zustandsschätzung

Grundlage ist eine GNSS/INS-Sensorfusion, u.a. zur Ausgabe der Schätzwerte (Position, Fluglage, Geschwindigkeit) an den Flugregler. Derartige Algorithmen sind Stand der Technik und werden am DLR mit optischen Verfahren kombiniert. Es erfolgt eine Prädiktion (höherfrequent, hier 100 Hz) des Flugzustandes basierend auf Inertialmessungen, die in regelmäßigen Abständen durch GNSS-Positions- und Geschwindigkeitsmessungen korrigiert wird (niederfrequent, hier 1–20 Hz). Bei der Verwendung von vergleichsweise ungenauen MEMS-IMUs (hier u.a. getestet: InertialScience ISIS IMU) führt ein Ausfall der GNSS-Korrektur bereits nach einigen Sekunden zu signifikanten Positionsfehlern. Eine hohe Drift ist für das Gesamtsystem kritisch, woraus der Bedarf nach Kompensationsmöglichkeiten resultiert.

2.2. Lösungsansatz Visual SLAM

Die Hinzunahme einer oder mehrerer Kameras als Bewegungssensor erfolgt nicht direkt, sondern über weitere Zwischenschritte, da die Bewegungsinformation im Bildraum als eigentliche Messung zunächst aus den Bildsequenzen extrahiert werden muss (*Feature Tracking*). Die Extraktion der Kamerabewegung aus diesen Features bedeutet beispielsweise die Berechnung von Homographien zwischen Bildern (d.h. 2D-2D-Korrespondenzen von Features) oder die Rekonstruktion der Kameraposition und -lage durch räumlichen Rückwärtsschnitt (d.h. 2D-3D-Korrespondenzen zwischen Features und räumlichen Objekten). Hier erfolgt die Bearbeitung über ein Visual SLAM-Modul (Simultaneous Localization and Mapping). Dieses kombiniert die optischen Messungen mit dem Zustandsschätzer. Bild 2 zeigt die Filterarchitektur mit den Ein- und Ausgabedaten sowie dem Datenfluss zwischen den Modulen. Neben einer Kamera werden auch Distanzmes-

sungen (s. Abschnitt 2.3) sowie optional ein barometrischer Sensor (Kompensation Höhendrift) verwendet.

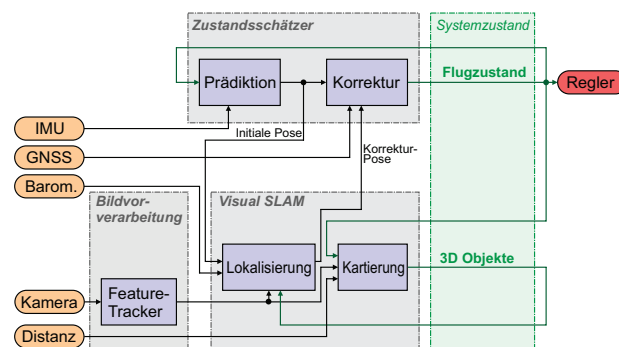


BILD 2: Architektur des optischen Navigationssystems, bestehend aus drei separaten Modulen *Bildvorverarbeitung*, *Visual SLAM* sowie dem eigentlichen *Zustandsschätzer*. Der Systemzustand enthält neben dem Flugzustand die zu schätzenden 3D-Objekte innerhalb des Visual SLAM-Moduls.

Visual SLAM besteht aus einer Komponente zur *Lokalisierung*, d.h. Bestimmung der Kamera- bzw. Flugzeugposition, dessen Ausgabe als weiterer Korrekturterm an den ursprünglichen Zustandsschätzer weitergegeben wird. Da die Lokalisierung auf einer Reprojektion zwischen gemessenen Bildmerkmalen (Features) und erdfesten 3D-Objekten basiert, müssen die erdfesten Objekte einerseits mittels *Kartierung* (d.h. Triangulationsverfahren) bestimmt und in einer Karte (als Teil des Systemzustandes) gespeichert werden (Bild 3). Bei signifikanten Änderungen des Sichtfeldes erfolgt eine Neukartierung, dabei werden auch bereits kartierte Objekte aktualisiert. Details zu diesem Prinzip und zur Implementierung sind in [3] beschrieben.

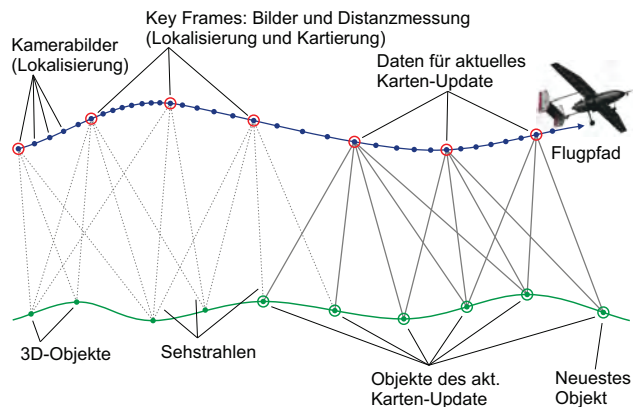


BILD 3: Funktionsweise des Visual SLAM-Algorithmus. Die Lokalisierung erfolgt hochfrequent mit jedem Kamerabild, die Kartierung wird parallel und nur bei signifikanten Änderungen des Sichtfeldes (*Key Frames*) ausgeführt.

Entscheidend für die Anwendbarkeit dieses Verfahrens ist eine erfolgreiche Initialisierung der zur Lokalisierung verwendeten Objektkarte. Dies kann bei Kenntnis bestimmter absoluter Objektpositionen (Landmarken) direkt erfolgen, benötigt jedoch Umgebungswissen und entsprechende Matching-Algorithmen zwischen aufgezeichneten Bildern und externen Landkarten. Dies kann beispielsweise in der bekannten Umgebung ei-

ner RPAS-Basisstation umgesetzt werden. Bei dem verwendeten Algorithmus erfolgt eine Initialisierung der Objektkarte durch Triangulation aus bekannten Vehikelpositionen, was eine Positionsbestimmung (d.h. GNSS-Position) während der Initialisierung erfordert. In Szenarien mit grundsätzlichem Satellitenempfang (Kontrollmöglichkeit in Bodenstationsnähe) und nur temporären Ausfällen sollte dies keine Einschränkung bedeuten.

Ein zu beachtender Aspekt ist die Akkumulation von Positionsfehlern. Bei der Kartierung sind die Objektpositionen unmittelbar abhängig von den Kamerapositionen, bei der Lokalisierung ist es genau umgekehrt. Sofern wie hier beschrieben kein Abgleich mit bekannten Landmarken erfolgt (d.h. relative Navigation), ergibt sich eine gegenseitige Kopplung der jeweiligen Fehler. Die Positionsabweichung wächst dabei mit der geflogenen Strecke (theoretisch linear bzgl. kartesischer Koordinaten), wobei die Fehlergröße abhängig von der Genauigkeit des Kamerasystems und der weiteren Sensoren ist. Interessant ist relative optische Navigation daher vor allem zur Driftreduktion in Kombination mit eher ungenaueren IMUs sowie in Schwebeflugszenarien, in denen die Lokalisierung relativ zu gleichbleibenden sichtbaren Objekten keine Fehler akkumuliert.

2.3. Beseitigung von Skalierungsfehlern

Werden die Objekt- oder Positionsabstände nicht absolut vermessen, wird neben dem oben beschriebenen Positionsfehler auch ein Skalierungsfehler akkumuliert. Anschaulich bedeutet dies eine Größenveränderung der geschätzten Karte und Flugbahn (vgl. Ergebnisse in Abschnitt 4), und bei der Zustandsschätzung ergibt sich neben dem wachsenden Positionsfehler auch ein wachsender Geschwindigkeitsfehler. Da standardmäßige (monokulare) Kameras keine metrischen Informationen liefern, muss dies durch weitere Umgebungssensoren kompensiert werden. Im Folgenden werden einige Ansätze vorgestellt, in denen Kamera-Features mit Abstandsmessungen zu 3D-Features kombiniert und so zur verbesserten Kartierung verwendet werden. Bild 4 zeigt das Grundprinzip, welches für beliebige Distanzsensoren anwendbar ist.

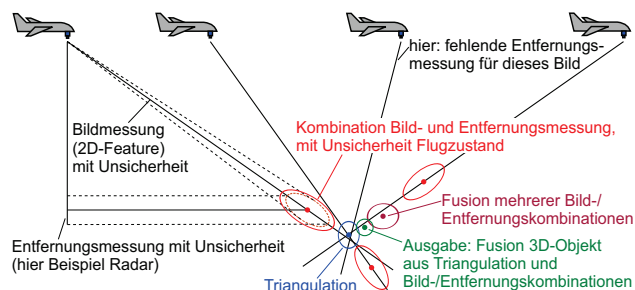


BILD 4: Kombination von 2D-Bildmessungen mit Distanzmessungen zur Optimierung der triangulierten 3D-Objekte. Als Zwischenschritt werden 3D-Objekte aus Bild- und Distanzmessungen einzelner Zeitschritte erzeugt, die anschließend miteinander sowie mit dem Triangulationsergebnis fusioniert werden.

2.3.1 Stereokamera und aktive Kameras

Eine vorangegangene Arbeit beschreibt ein stereoskopisches Verfahren zur Generierung von 3D-Punktwolken [4]. Durch Registrierung von Punktwolken zeitlich aufeinander folgender Messungen wird der Positionsverlauf eines RPAs rekonstruiert. Das Stereoprinzip wird in [3] auf die Kartierung des SLAM-Verfahrens angewendet, und es können damit bessere Ergebnisse erzielt werden. Stereoskopische Positionsbestimmung kann prinzipiell als ausgereift angesehen werden (vgl. [5]), allerdings ist die sinnvoll nutzbare Reichweite der Entfernungsmessung stark beschränkt (mit dem getesteten System bis ca. 40 m). Bei größeren Kameraabständen wird durch die mangelnde Steifigkeit der Kameras zueinander eine Online-Rekalibrierung erforderlich, in [6] wurde damit die optische Navigation bis etwa 100 m AGL (Above Ground Level) demonstriert. Diese Reichweite ist jedoch für eine Vielzahl von Anwendungen eine zu starke Einschränkung. Ähnliches gilt für die Navigation mit aktiven Kameras (Beispiel u.a. [7]).

2.3.2 Laser-Abstandssensor und -scanner

Die sinnvolle Verwendung ist maßgeblich durch die Reichweite des Lasersensors bestimmt. Es werden bei Scannern etwa 30 m bis 250 m erzielt¹, bei reinen Abstandssensoren auch Reichweiten bis zu mehreren Kilometern. Die Sichtbereiche von Kamera und Laser-scanner sind zumeist nicht deckungsgleich, womit 3D-Informationen nur für einen Teilbereich des Kamera-Sichtfeldes existieren. Allerdings existieren heuristische Verfahren zur Verknüpfung von Laserscans mit dem gesamten Kamerabild [8]. Die Verknüpfung von Laser-Abstandsmessungen mit 2D-Kamerafeatures verlangt eine gewisse räumliche und zeitliche Toleranz aufgrund der Zeitunterschiede der Abstandsmessungen innerhalb eines Laserscans sowie Ungenauigkeiten hinsichtlich Synchronisation und relativer Orientierung der Sensoren. Bild 5 zeigt ein Beispiel einer Sequenz, bei dem zusätzlich zu den Features zur 2D-Bewegungserkennung die Lasermessungen als Punkte eingefügt sind (verwendeter Sensor mit vier Scanzeilen). Die Linien zwischen jeweils einem Laserpunkt und einem 2D-Feature geben eine Verknüpfung von 2D-Punkt und Entfernung zu einem 3D-Punkt an, der in Strahlrichtung des 2D-Features generiert wird. Für die Features in der Nähe der Laserscans (Winkelabstand zwischen Bildprojektions- und Laserstrahl) sind damit zusätzliche 3D-Informationen verfügbar. Wird ein Laser-Abstandssensor statt eines Scanners verwendet, gilt das entsprechend für eine geringere Anzahl von Features.

2.3.3 Radarhöhenmesser

Es existieren neuere Sensoren bis etwa 500 m Reichweite², die bei geringem Gewicht und Größe

¹Herstellangaben Hokuyo UTM-30LX und Sick LD-MRS

²Herstellangaben smartmicro UMRR-0Ax70x-22070x-05070x

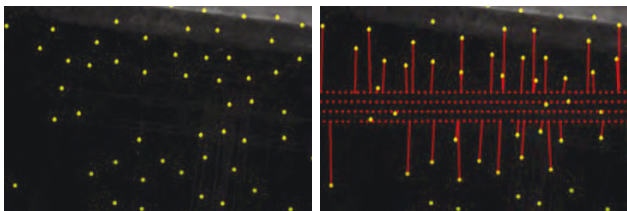


BILD 5: Ausschnitt aus einer RPA-Kamerabildsequenz (Blick nach unten) mit eingblendeten Features zur Bewegungserkennung (links) sowie deren Verknüpfung mit Laser-Entfernungsmessungen (rechts).

für den Einsatz mit kleinen RPAs geeignet sind. Die Fusion von 2D-Kamerafeature und Radarmessung ist prinzipiell vergleichbar mit der Fusion mit Laser-Entfernungsmessungen, allerdings ist eine andere Charakteristik der Messdaten zu berücksichtigen [9]. Insbesondere bedeutet eine Radarmessung eine Signalreflexion in einem größeren Bereich, d.h. in flachem Gelände und bei geringem Nick- und Gierwinkel kann eine Messung direkt als Flughöhe AGL interpretiert und mit den 2D-Kamerafeatures fusioniert werden (vgl. Bild 6; zum Vergleich: Lasermessungen bedeuten Schrägdistanz).

Problematisch ist die Interpretation der Radarmessung in bergigem Gelände, hierzu wurde in [10] ein Verfahren zur Erkennung und Filterung korrespondierender Kamera/Radar-Daten entwickelt. Im Wesentlichen bedeutet dies die Erkennung von Horizontalebene in der Objektkarte, die sich zu einer Skalierungskorrektur mit Hilfe von Radarmessungen eignen.

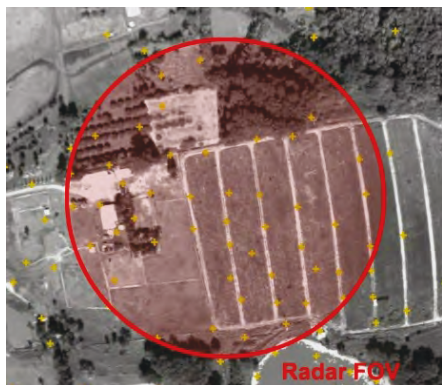


BILD 6: Luftbild mit Kamera-Features und Radar-Sichtfeld, anhand dessen den Features die Entfernungsmessung zugeordnet werden kann.

2.4. Synchronisation und Kalibrierung

Die zeitliche Synchronisierung der Sensoren erfolgt über Zeitstempel und, sofern möglich, über Triggersignale (u.a. Signalgeber GNSS/INS und Signalempfänger Kamera). Zeitdifferenzen müssen möglichst genau bekannt sein (möglichst <1 ms Fehler), hinzu kommt eine zeitgleiche Bildauslösung bei einer Sensorfusion mit mehreren Kameras.

Daneben müssen die intrinsischen (v.a. Verzeichnung und Projektionsmatrix bei Kameras) und extrinsischen Parameter (v.a. Alignment am Vehikel und relative Orientierung) der Sensoren ermittelt werden. Die Bestim-

mung erfolgt im Vorfeld von Flugversuchen mit Hilfe von Sensorkalibrierverfahren. Hierzu wurden am DLR Verfahren zur intrinsischen und relativen Kalibrierung von Kameras [11] und zur relativen Kalibrierung von Kamera und Laserscanner [12] entwickelt und in den hier beschriebenen Versuchen eingesetzt. Die Orientierungsbestimmung zwischen Kamera und IMU erfolgt hier mittels Handmessung, die erzielte Genauigkeit wird dabei als ausreichend angenommen.

3. BESONDERHEITEN NACH FLUGPROFIL

Es wird in diesem Abschnitt untersucht, inwieweit bei typischen Bewegungen eines Luftfahrzeugs optische Bewegungs- und Positionsinformationen messbar und zur Navigation anwendbar sind. In [9] wird die Charakteristik der optischen Messungen in Abhängigkeit von Flugprofil (u.a. Flughöhe, Geschwindigkeit, Rotation) und Kamerasystem (u.a. Bildfrequenz, Sichtfeld, Auflösung) untersucht, die wesentlichen Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

3.1. Mehrdeutigkeiten in Kamerabildern

Neben grundlegenden Bildeigenschaften wie eindeutigen und kontrastreichen Bildinhalten zur korrekten Messung ist die räumliche Verteilung der gemessenen Bewegungen entscheidend für die Bestimmung der Eigenposition bzw. -bewegung. Theoretisch sind der Vektor der Verschiebungsrichtung (ohne dessen Absolutgröße) und Drehungen in allen Achsen in einer Bildsequenz unterscheidbar. In Vortests wurden jedoch Mehrdeutigkeiten ermittelt, die bei einer geringen Variation der Objektentfernungen auftreten. Derartige Konstellationen können in der betrachteten Anwendung auftreten, z.B. bei einem Flug über relativ ebenes Gelände.

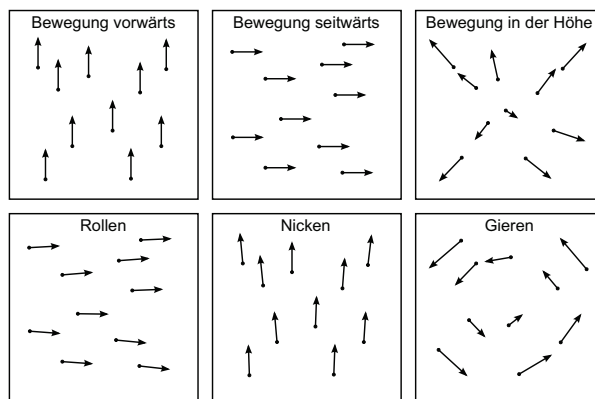


BILD 7: Charakteristik der im Bild sichtbaren Bewegungen (optischer Fluss) für eine nach unten blickende Kamera am Luftfahrzeug in Abhängigkeit der einzelnen Bewegungskomponenten.

Hierzu zeigt Bild 7 die Charakteristik von Featurebewegungen bei einer nach unten blickenden Kamera. Aus den Ähnlichkeiten zwischen horizontalen Verschiebungen und Roll- bzw. Nickbewegungen folgt die eindeutige Unterscheidbarkeit von maximal vier Freiheitsgraden, womit eine einzelne Kamera nicht als alleiniger

Sensor zur Bewegungsbestimmung verwendet werden kann. Daher sind weitere Sensoren erforderlich, neben der IMU zur eindeutigen Unterscheidung von Drehung und Verschiebung kann dies auch eine Kamera mit anderer Blickrichtung und damit anderen Merkmalscharakteristiken sein. Beispielsweise unterscheiden sich bei einer nach vorne blickenden Kamera die sichtbaren Nick- und Rollbewegungen signifikant von horizontalen Verschiebungen.

3.2. Flugenveloppe

Für verwertbare Bildsequenzen müssen die Bewegungen im Bildraum erkennbar sein, d.h. es ist eine ausreichende Überlappung und Bildschärfe erforderlich. Bei gegebenem Kamerasystem ist die Bewegung des Luftfahrzeugs dafür maßgeblich. Bild 8 stellt den Flugbereich dar, in dem unter gegebenen Randbedingungen gute Ergebnisse bei der optischen Navigation zu erwarten sind. Neben Beschränkungen der Fluggeschwindigkeit (durch das Luftfahrzeug selbst) und der Flughöhe (durch einen Entfernungsmesser wie Radar) verringert die Eigenbewegung die Überlappung zwischen Bildern und erhöht die Bewegungsunschärfe (hier nur für horizontale Verschiebungen und nicht für Drehungen dargestellt). Oberhalb des markierten Bereiches entstehen Skalierungsfehler aufgrund der fehlenden Entfernungsmessung, unterhalb sind die sichtbaren Bewegungen im Bildraum sehr hoch. Durch geringere Überlappung und Bewegungsunschärfe ist die Eigenbewegung damit wesentlich schlechter bzw. gar nicht mehr zu rekonstruieren. Eine weitere Limitierung des Flugbereichs betrifft die Drehraten, allerdings unabhängig von der Flughöhe. Details zu den Berechnungen sind in [9] beschrieben.

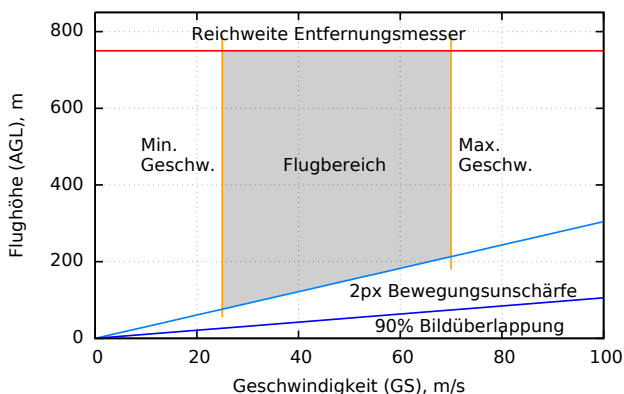


BILD 8: Limitierung der optischen Navigation für eine Beispielkonfiguration: Kamera mit 35° FOV, 15 Hz Bildfrequenz, 5 ms Belichtungszeit, Blickrichtung nach unten. Weitere Parameter von Radarthöhenmesser (hier FreeFlight RA 4500) und Flächenflugzeug (hier Cessna 172R, vereinfacht und ohne Wind).

Bei gegebenem Kamerasystem kann somit eine Maximalgeschwindigkeit proportional zur Flughöhe angegeben werden, bis zu der Bilddaten sinnvoll bzw. ohne nennenswerte Qualitätsverluste genutzt werden können. Bei der Parametrisierung aus Bild 8 ist eine derartige Limitierung der Geschwindigkeit erst ab 213 m Höhe (bzw.

eigentlich: Objektdistanz) unkritisch. Dies bedeutet eine Einschränkung vor allem in geringen Flughöhen, insbesondere betrifft dies den schnellen Tiefflug sowie Starten und Landen mit Flugzeugen. VTOL-Anwendungen sind hiervon nicht betroffen. Umgekehrt kann ein Kamera- bzw. Sensorsystem für einen bestimmten Flugbereich ausgelegt werden. Beispielsweise können die Limitierungen der Geschwindigkeit durch ein größeres Sichtfeld, höhere Bildfrequenz, höhere Bildauflösungen sowie geringere Belichtungszeiten reduziert werden. Weiterhin sind für den schnellen Tiefflug Kameras mit Blickrichtung in Flugrichtung (schräg oder horizontal) vorteilhaft, da dies die Objektdistanz aus Kamerasicht vergrößert.

4. TEST UND BEWERTUNG

Der für verschiedene Sensorkonfigurationen anpassbare vSLAM-Algorithmus wird anhand von Sensordaten evaluiert, die in Flugversuchen aufgezeichnet wurden. Das Datenlogging umfasst die Aufzeichnung von Bilddrohdaten, Inertialdaten, GPS/INS-Zustandsdaten als Referenz sowie je nach Verfügbarkeit barometrische Höhe, Radar-Höhe sowie Laserscans. Die konkrete Konfiguration wird in diesem Abschnitt bei den jeweiligen Flugversuchen beschrieben. Kern der Evaluation ist die Charakteristik der Positionsschätzung (insbesondere Akkumulationsfehler) bei einem Ausfall des GNSS, der hier nach einer Initialisierungsphase simuliert wird. Bei der optischen Lokalisierung werden aufgrund der Mehrdeutigkeiten (s. 3.1) die vier Freiheitsgrade Nord, Ost, Höhe und Steuerkurs bestimmt, d.h. Roll- und Nicklage werden auch bei einem GNSS-Ausfall aus den Inertialdaten bestimmt. Dazu wird der Einfluss von Entfernungssensoren untersucht, insbesondere im Hinblick auf die Vermeidung von Skalierungsfehlern. Als Flugversuchsträger stehen bemannte und unbemannte Systeme zur Verfügung. Die Hard- und Softwarearchitektur ermöglicht eine prinzipielle Ausführung der gesamten Prozesskette an Bord der Luftfahrzeuge inklusive der Schnittstellen zum Navigationssystem nach Bild 2. Die Datenauswertung erfolgt unter Berücksichtigung der Echtzeitfähigkeit auf typischer Zielhardware, hier der in den RPAs verwendete Rechner mit Intel Core-2 CPU.

4.1. RPA-Hubschrauber

Der seit 2015 am DLR-Institut für Flugsystemtechnik eingesetzte Versuchsträger *superARTIS* ist ein SDO 50 V2 (SwissDrones Operating AG) mit Ausrüstungsmöglichkeiten für verschiedene Nutzlasten. Ein Autopilot erlaubt das präzise Anfliegen einzelner Wegpunkte sowie das Einhalten bestimmter Positionen. Ein Eingriff in die Flugsteuerung durch Operator oder Sicherheitspiloten ist jederzeit möglich. Über die Bodenstation lassen sich wesentliche Betriebswerte des Hubschraubers in Echtzeit überwachen. Details u.a. zum prinzipiellen Ablauf bei der Versuchsdurchführung siehe [13]. Versuchskonfiguration siehe Bild 9 und Tab. 1.



BILD 9: Flugversuchsgelände (links), Ausrüstung des Hubschraubers (s. Bild 1) mit Kameras und Laserscannern (rechts).

Hubschrauber	SwissDrones SDO 50 V2 „superARTIS“
Größe	2,32 m Länge, 2 × 2,8 m Rotor
MTOM	86 kg (inkl. 50 kg Nutzlast & Treibstoff)
Antrieb	10 kW Turbine
Geschwindigkeit	hier bis 3,5 m/s (max. 15 m/s)
Navigation	iMAR iTraceRT-F400
GNSS	NovAtel SPAN L1/L2 GPS Empfänger
IMU	faseroptisch / Servo MEMS
Messfrequenz	100 Hz
Kamera	AVT GT-1380, 4,8 mm Objektiv
Auflösung	1360 × 1024 Pixel
FOV	84° × 68°
Messfrequenz	25 Hz
Distanzmess.	Hokuyo UTM-30 LX Laserscanner
Messbereich	0,1 m bis 30 m (Genauigkeit: 50 mm)
Auflösung	Messzeile mit 1081 Punkten
FOV	270°
Messfrequenz	40 Hz

TAB. 1: Konfiguration RPA-Hubschrauber und Experimentalnutzlast.

Betrachtet wird ein Flug in urbanem Gelände, wobei Gebäude überflogen werden. Die Flugstrecke ist etwa 220 m lang, wobei nach einer Initialisierungsphase von 30 s (d.h. Kartierung mit GNSS-Stützung) etwa 180 m ohne GNSS überbrückt werden sollen. Inklusive der Vehikelbewegung in Schwebeflugphasen wurde eine Pfadlänge von 380 m gemessen. Die Datensequenz umfasst den gesamten Flug, die maximale Flughöhe ist 29 m AGL. Ausgewertet werden Daten der nach unten blickenden Sensoren (Kamera und Laserscanner), die Ergebnisse sind in den Bildern 10 und 11 dargestellt.

Im Wesentlichen lässt sich die Funktionsfähigkeit des vSLAM-Algorithmus erkennen. Bild 10 zeigt die Positionsfehler der Lösungen mit und ohne Laserscanner. Es zeigt sich eine Verschlechterung bei Nutzung des Laserscanners im späteren Verlauf, die Ursache sind vermutlich widersprüchliche Informationen bei der Datenfusion aufgrund von Synchronisations- und Orientierungsfehlern. Positionssprünge aufgrund von nicht behebbaren Trackingfehlern wurden nicht beobachtet. Insgesamt zeigt sich keine Drift bei der Skalierung. Der relative Akkumulationsfehler (Bild 11) ist bei der monokularen Lösung relativ konstant bei etwa 1% (2 m bei Landung), was auch der Theorie entspricht. Bei Kombination mit Laser wächst der Fehler am Ende auf etwa 3% (6 m) an.

4.2. RPA-Flugzeug

Weitere Versuche erfolgen mit dem am DLR entwickelten unbemannten Systemträger *Prometheus*. Der

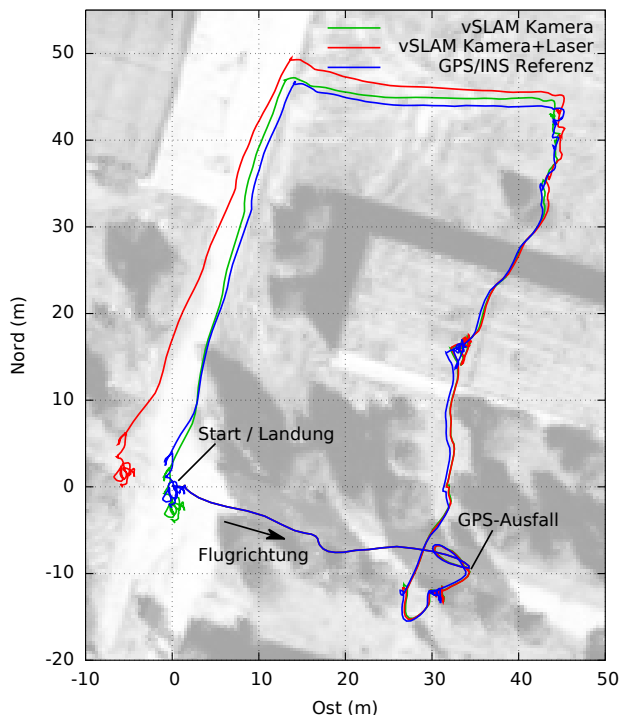


BILD 10: Flug mit RPA-Hubschrauber, Horizontalpfad. Hintergrund: Luftbild/Google.

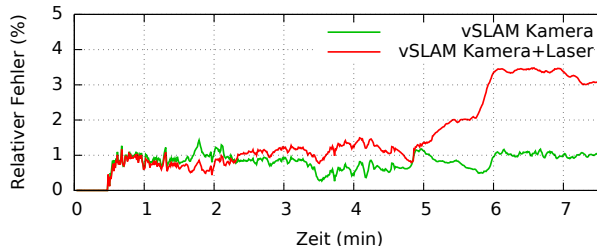


BILD 11: Flug mit RPA-Hubschrauber, 3D-Positionsfehler relativ zur bis zum jeweiligen Zeitpunkt geflogenen Strecke.

einmotorige Versuchsträger ist in einer sogenannten Pusher-Konfiguration mit Heckpropeller ausgeführt. Dadurch bestehen vielfältige Einsatzmöglichkeiten für den Einbau von Sensoren wie Kameras. Der Flug zur Datenaufzeichnung erfolgt mit der in Tab. 2 genannten Konfiguration mit manueller Steuerung. Die Datenaufnahme kann durch die Bodenstation in Echtzeit gesteuert und überwacht werden.



BILD 12: Ausrüstung des Flugzeugs mit Kamera und Rechnern (links), Beispielbild aus einer weiteren Bordkamera im Flug (rechts).

Die Auswertung der optischen Verfahren erfolgt nach dem Abheben bei Flughöhen zwischen 50 m und 180 m AGL. Einer der Hauptunterschiede im Vergleich zum Hubschrauberflug sind die höheren Geschwindigkeiten und der Kurvenflug. Die Ergebnisse sind in den Bildern 13 und 14 gezeigt. Wie im Versuch mit dem RPA-

Flugzeug	DLR-Entwicklung „Prometheus“
Größe	3,2 m Spannweite
MTOM	31 kg (mit ca. 6 kg Nutzlast)
Antrieb	6,7 kW Kolbenmotor
Geschwindigkeit	ca. 25 m/s
Navigation	Sensorfusion DLR-Entwicklung
GNSS	NovAtel OEM-4 GPS Empfänger
IMU	InertialScience ISIS (MEMS IMU)
Magnetometer	Honeywell HMR2300
Frequenz	100 Hz (Ausgabe Zustandsschätzung)
Kamera	PointGrey Chameleon, 4,8 mm Objektiv
Auflösung	1280 × 960 Pixel
FOV	52° × 40°
Messfrequenz	15 Hz
Distanzmess.	smartmicro - Micro Radar Altimeter
Messbereich	0,5 m bis 500 m (Genauigkeit: 2%, > 0,25 m)
FOV	40° × 40°
Messfrequenz	58 Hz

TAB. 2: Konfiguration RPA-Flugzeug und Experimentalnutzlast.

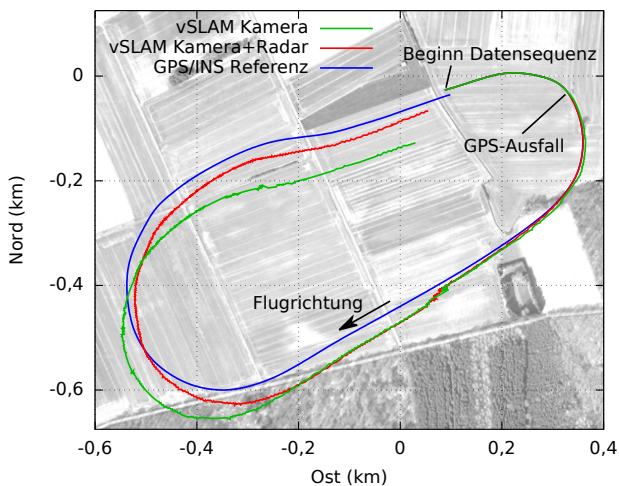


BILD 13: Flug mit RPA-Flugzeug, Horizontalpfad, Ausschnitt von ca. 2 min aufgrund besserer Sichtbarkeit. Hintergrund: Luftbild/Google.

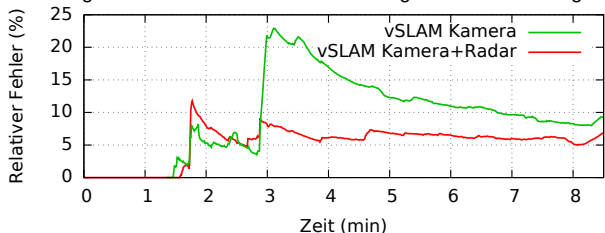


BILD 14: Flug mit RPA-Flugzeug, 3D-Positionsfehler relativ zur geflogenen Strecke zum jeweiligen Zeitpunkt.

Hubschrauber zeigt sich die prinzipielle Funktionsfähigkeit, wobei die Fehlergröße hier höher ist, siehe Bild 14). Der akkumulierte Fehler kann dabei durch den Entfernungsmesser (Radar) reduziert werden. Problematisch sind Tracking-Fehler (hier v.a. nach 3 min), die einen Positionssprung (unteres gerades Pfadsegment in Bild 13) nach sich ziehen. Daher sind neben den eingesetzten Verfahren zur Beseitigung von Ausreißern (bis ca. 25% Ausreißeranteil an den Features sind diese gut detektierbar) zusätzliche automatische Analysen, z.B. Plausibilitätsprüfungen der optischen Messungen und der konvergiernten Lösung, sinnvoll.

4.3. Bemanntes Flugzeug

Neben den Versuchen mit RPAs wird ein bemannter Versuchsträger für Tests in wesentlich größeren Umgebungen (d.h. mit längeren Flugzeiten und Pfadlängen) eingesetzt. Motivation ist die Möglichkeit zur Überfliegung von bergigem Gelände, welches für die Auswertung von Sensordaten (bspw. Radarhöhenmesser) eine Herausforderung sein kann. Zudem sind oftmals übliche Vereinfachungen bei der Umgebungskartierung (bspw. Annahme von ebenem Gelände) nicht zulässig, womit allgemeingültigere Verfahren (wie die verwendeten) zwingend erforderlich werden. Der Nutzen derartiger Tests ist damit offensichtlich. Bei dem eingesetzten Flugzeug handelt es sich um eine vom *Australian Research Centre for Aerospace Automation* betriebene Cessna 172R [14], welche für Experimentalnutzlasten und die äußere Montage von Sensoren modifiziert ist (Bild 15). Details sind in Tab. 3 aufgelistet.



BILD 15: Cessna 172R mit Experimentalnutzlasten.

Flugzeug	Cessna 172R „ASL“ (Operator: ARCAA)
Größe	8 m Länge, 11 m Spannweite
MTOM	1109 kg (ca. 400 kg Nutzlast)
Antrieb	119 kW Kolbenmotor
Geschwindigkeit	ca. 55 m/s
Navigation	NovAtel SPAN GPS/INS
GNSS	NovAtel OEMV-3 GNSS
IMU	iMAR FSAS (faseroptisch / MEMS)
Barometer	Höhendaten aus ASPEN EFD1000
Messfrequenz	100 Hz (GNSS/INS Ausgabe)
Kamera	PointGrey Flea-2, 3,5 mm Objektiv
Auflösung	1280 × 960 Pixel
FOV	69° × 54°
Messfrequenz	15 Hz
Distanzmess.	FreeFlight RA4500 Radar
Messbereich	0 m bis 700 m (Genauigkeit: 3% tief, 5% hoch)
FOV	30° × 20°
Messfrequenz	25 Hz

TAB. 3: Konfiguration Cessna 172R und Experimentalnutzlast.

Es wurde eine Reihe von Versuchen durchgeführt, wobei hier ein etwa 32-minütiger Flug mit einer Flugstrecke von etwa 112 km vorgestellt wird. Der Flug erfolgt über unebenes Gelände und mit Flughöhen zwischen 200 m und 1000 m AGL. Die überflogenen Berge haben eine Höhe von bis zu 556 m.

Die Bilder 16 und 17 zeigen die Ergebnisse der optisch bestimmten Flugbahn in ähnlicher Weise wie bei den RPA-Versuchen. Bei diesem Versuch wird die Problematik des Skalierungsfehlers deutlich, es entsteht bei

der rein kamerabasierten Lösung ein um den Faktor von etwa 0,4 skalierte Flugbahn. Der Skalierungsfehler kann durch Hinzunahme des Radarhöhenmessers nahezu kompensiert werden, allerdings mit Aussetzern bei Flughöhen oberhalb der Messreichweite. Der relative Fehler ist nur bei korrekter Skalierung sinnvoll auswertbar, bei der Variante mit Radar liegt dieser mit etwa 3% in der Größenordnung der Messgenauigkeit des Radarhöhenmessers.

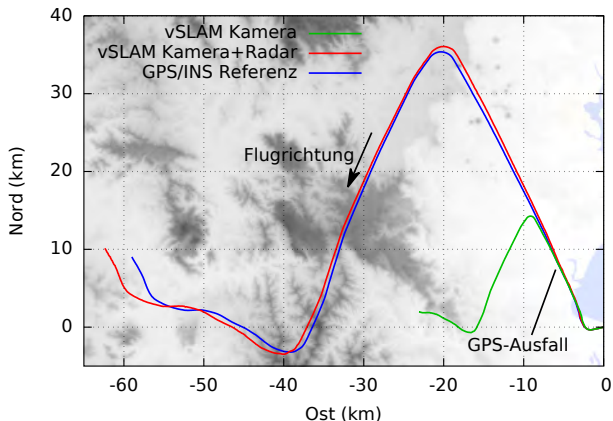


BILD 16: Flug mit bemanntem Flugzeug, Horizontalpfad. Hintergrund: Höhenkarte aus SRTM-Daten.

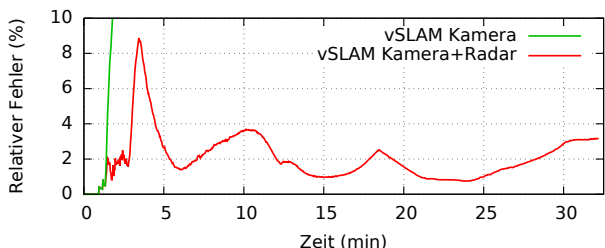


BILD 17: Flug mit bemanntem Flugzeug, 3D-Positionsfehler relativ zur geflogenen Strecke zum jeweiligen Zeitpunkt.

5. FAZIT UND AUSBLICK

Unter bestimmten Voraussetzungen (insbesondere hinsichtlich Flugprofil und Sichtbedingungen) sind optische Navigationsverfahren als Alternative bzw. Ergänzung zu GNSS anwendbar. Die Funktionsfähigkeit eines hierzu entwickelten Verfahrens wird anhand von drei Flugbeispielen demonstriert, wobei von einer stabilen Positionsbestimmung auch bei längeren Flügen ausgegangen werden kann. Zur Erhöhung der Robustheit sind weitere Entwicklungen zur Erkennung unbrauchbarer Sensordaten sowie zur Vermeidung von Positionssprüngen erforderlich. Derzeit untersucht das DLR-Institut für Flugsystemtechnik den Einfluss des optisch gestützten Navigationssystems auf die Flugregelung und testet den automatischen Flug bei GNSS-Störungen.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AGL	Above Ground Level
ARCAA	Australian Research Centre for Aerospace Automation
ARTIS	Autonomous Rotorcraft Testbed for Intelligent Systems
ASL	Airborne Systems Laboratory
CPU	Central Processing Unit

DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EKF	Extended Kalman Filter
FOV	Field Of View
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GS	Ground Speed
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
MEMS	Micro Electro-Mechanical System
MTOM	Maximum Take-Off Mass
RPA(S)	Remotely Piloted Aircraft (System)
VTOL	Vertical Take-Off and Landing
(v)SLAM	(visual) Simultaneous Localization And Mapping

DANKSAGUNG

Diese Arbeit ist Teil der Forschungsarbeit am DLR-Institut für Flugsystemtechnik, Abteilung Unbemannte Luftfahrzeuge. Mitwirkende u.a.: N. Ammann, J. Dittrich, M. Kislak-Schmidt, S. Krause, S. Lorenz. Die Flugversuche unter 4.3 wurden am Australian Research Centre for Aerospace Automation an der Queensland University of Technology, Brisbane, Australien, durchgeführt. Mitwirkende u.a.: D. Bratanov, G. Broadbent, D. Gilligan, D. Lessner, L. Mejías Alvarez.

LITERATUR

- [1] F. Kendoul, "Survey of advances in guidance, navigation, and control of unmanned rotorcraft systems," *Journal of Field Robotics*, vol. 29, no. 2, pp. 315–378, 2012.
- [2] DJI, "Inspire 1 User Manual, v2.0, Chapter: Vision Positioning System," Nov. 2015. Online: dl.djicdn.com/downloads/inspire_1/en/Inspire_1_User_Manual_en_v2.0_1218.pdf
- [3] F. Andert, N. Ammann, J. Püschel, and J. Dittrich, "On the safe navigation problem for unmanned aircraft: Visual odometry and alignment optimizations for UAV positioning," in *Int. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2014, pp. 734–743.
- [4] F. Andert, et al., "Stereoskopische Bewegungsschätzung zur optisch gestützten Navigation von unbemannten Luftfahrzeugen," in *Dt. Luft- und Raumfahrtkongress der DGLR*, 2012.
- [5] D. Grießbach, D. Baumbach, A. Börner, and S. Zuev, "Accuracy evaluation of stereo vision aided inertial navigation for indoor environments," in *The Intl. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-4/W4, 2013.
- [6] M. Warren and B. Upcroft, "High altitude stereo visual odometry," in *Robotics: Science and Systems*, 2013.
- [7] A. S. Huang, et al., "Visual odometry and mapping for autonomous flight using an RGB-D camera," in *International Symposium on Robotics Research (ISRR)*, 2011.
- [8] S. Krause, "Sichtfelderweiterung für Laserscanner mittels Kamera für die Hindernisdetektion von unbemannten Luftfahrzeugen," Ph.D. dissertation, Tech. Univ. Braunschweig, 2016, to appear.
- [9] F. Andert and L. Mejías, "Improving monocular SLAM with altimeter hints for fixed-wing aircraft navigation and emergency landing," in *Int. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2015.
- [10] F. Andert, S. Lorenz, L. Mejías, and D. Bratanov, "Radar-aided optical navigation for long and large-scale flights over unknown and non-flat terrain," in *Int. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2016, pp. 465–474.
- [11] K. H. Strobl, G. Hirzinger, "More accurate pinhole camera calibration with imperfect planar target," in *IEEE ICCV, 1st IEEE Workshop on Challenges and Opportunities in Robot Perception*, 2011, pp. 1068–1075. Online: www.robotic.dlr.de/callab
- [12] S. Krause, R. Evert, "Remission based improvement of extrinsic parameter calibration of camera and laser scanner," in *Int. Conf. on Control, Automation, Robotics & Vision*, 2012, pp. 829–834.
- [13] G. Strickert, J. Dauer, and A. Voigt, "Durchführung von Forschungsflügen mit VTOL RPAS unter unscharfen Randbedingungen," in *Dt. Luft- und Raumfahrtkongress der DGLR*, 2015.
- [14] D. G. Greer, R. Mudford, D. Dusha, and R. Walker, "Airborne systems laboratory for automation research," in *International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS)*, 2010.