

LORENZ SCHMITT

INTEGRIERTE BEWEGUNGSPLANUNG FÜR UNBEMANNTE FLUGGERÄTE MIT ZUSTANDSABHÄNGIGEN BEOBACHTBARKEITSEIGENSCHAFTEN



Ende 2012 schloss Lorenz Schmitt sein Studium der Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Stuttgart mit einer Diplomarbeit zur Regelung von Lenkflugkörpern ab und ist seit 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugmechanik und Flugregelung. Dort befasste er sich zunächst mit Bahnplanung und Navigation für Flächenflugzeuge mit Kamera und Inertialsensoren. Als Vertreter einer Klasse von Systemen deren Beobachtbarkeitseigenschaften in enger Wechselwirkung mit dem Zustandsverlauf stehen, stellt diese Anwendung die etablierte Trennung von Planung und Schätzung in Frage. Das motivierte Herrn Schmitt, die analytische Auseinandersetzung mit jener Wechselwirkung ins Zentrum seiner wissenschaftlichen Arbeit zu rücken. So beschäftigt er sich gegenwärtig mit der Frage, wie der Zusammenhang zwischen den Trajektorien eines Fahrzeugs und der bei der Bestimmung seines Bewegungszustands erreichbaren Genauigkeit in allgemeingültiger Weise zu fassen ist. Die Fortsetzung seiner Aktivitäten, in Zukunft auch im Rahmen eines DFG-geförderten Vorhabens, soll integrierte Ansätze zu Schätzung und Planung hervorbringen, die die Leistungsfähigkeit autonomer Fahrzeugen zielgerichtet und systematisch verbessern.

Der technische Fortschritt der letzten Jahre hat unbemannten Fluggeräten eine Vielzahl neuer Anwendungsgebiete erschlossen. Bereits heute übernehmen sie vielfältige Aufgaben in Erkundung, Überwachung, Vermessung oder Transport und unterstützen so die Arbeit von Wissenschaftlern, Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen. Die Autonomie gegenwärtiger Systeme ist allerdings begrenzt. So beschränkt sich der Betrieb üblicherweise auf die Fernsteuerung durch einen menschlichen Piloten am Boden oder das Abfliegen vorprogrammierter Bahnen. Um das volle Potenzial der noch jungen Technologie auszuschöpfen, müssen sich zukünftige Systeme durch die Fähigkeit zur längerfristigen vollständig autonomen Operationsweise auszeichnen. Welche Anforderungen das an die Technik stellt, wird klar, wenn man sich vor Augen führt, welche Funktionen der menschliche Pilot eines konventionellen Flugzeugs erfüllt:

- Durch Sinneseindrücke nimmt der Pilot die Umgebung und einen Teil des Flugzustands wahr. Das geschieht in erster Linie optisch, aber auch durch Kräfte, die entsprechend der Beschleunigung des Fahrzeugs auf seinen Körper wirken. In einem technischen System entspricht das am ehesten der Rolle der Sensoren.
- Auf Grundlage dieser Informationen verortet der Pilot das Flugzeug in der Umgebung und zieht Rückschlüsse auf seine

Geschwindigkeit und Orientierung im Raum. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Größen, die Teil des Bewegungszustands des Fahrzeugs sind. Ihre Bestimmung ist Aufgabe von Navigationsalgorithmen.

- Der Flug dient in aller Regel einem bestimmten Zweck, einem Missionsziel. Im einfachsten Fall besteht es darin, zu einem bestimmten Punkt zu gelangen. Unter Kenntnis des Bewegungszustandes kann der Pilot einen zur Missionserfüllung geeigneten Flugpfad bestimmen. Dabei muss er die technischen Möglichkeiten des Fahrzeugs, aber auch zusätzliche äußere Beschränkungen — etwa die Ver-

Kurzzusammenfassung:

Um ihr volles Potential auszuschöpfen, müssen sich zukünftige unbemannte Luftfahrzeuge durch ein weitaus höheres Maß an Autonomie auszeichnen. Dabei sind Navigation und Bewegungsplanung entscheidende Funktionen und deshalb Gegenstand intensiver wissenschaftlicher Untersuchungen. Beide Gebiete werden in Forschung und Entwicklung immer noch isoliert voneinander betrachtet, obwohl nachgewiesen ist, dass diese Trennung die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems empfindlich beeinträchtigen kann. Tatsächlich sind deutliche Leistungssteigerungen zu erwarten, wenn die Bewegungsplanung zielgerichtet auf die Verbesserung der Navigationsgüte hinwirken kann. Voraussetzung dafür ist allerdings ein theoretisch fundiertes Verständnis der zugrundeliegenden Wechselwirkungen. Auf dieser Grundlage werden neuartige integrierte Algorithmen für Planung und Schätzung entwickelt, durch die zukünftige Systeme präziser, zuverlässiger und kostengünstiger arbeiten können.

FORSCHUNGSBEITRAG ZU AUTONOMEN FLUGGERÄTEN

meidung der Kollision mit Hindernissen oder unzulässige Bereiche im Luftraum – berücksichtigen. Entsprechende Algorithmen zur Bewegungsplanung fallen bei unbemannten Fluggeräten unter die Begriffe Flugführung oder Lenkung.

- In einem konventionellen Flugzeug muss der Pilot wissen, mit welchen Steuereingaben er die geplante Bewegung umsetzt. Eine genaue Kenntnis des Systemverhaltens, wie man sie etwa durch Flugerfahrung erlangt, ist hier von großer Bedeutung. An ihre Stelle tritt in einem autonom operierenden unbemannten Fluggerät ein mathematisches Modell, mit dessen Hilfe die sogenannte Flugregelung entworfen wird. Die Grenze zur Flugführung ist fließend, denn auf einer abstrakten Ebene geht es in beiden Fällen darum, physikalischen Größen ein bestimmtes dynamisches Verhalten aufzuprägen. Statt von Flugführung und -regelung wird deshalb häufig von High- und Low-Level-Regelung gesprochen.
- Indem er zum Beispiel Kraft auf den Steuerknüppel oder die Pedale aufbringt, kann der Pilot die gewünschten Steuereingaben realisieren. Durch verstellen der Ruder verändert er so die aerodynamischen

„Um ihr Potential auszuschöpfen, müssen unbemannte Fluggeräte die Fähigkeit zur längerfristigen vollständig autonomen Arbeitsweise erlangen.“

Lorenz Schmitt

Eigenschaften und damit auch den Flugzustand in geeigneter Weise. Einem unbemannten System stehen zur Umsetzung des Regelziels Aktuatoren, zum Beispiel in Form von Servomotoren, zur Verfügung.

Abbildung 1 zeigt die einzelnen Komponenten im Zusammenhang.

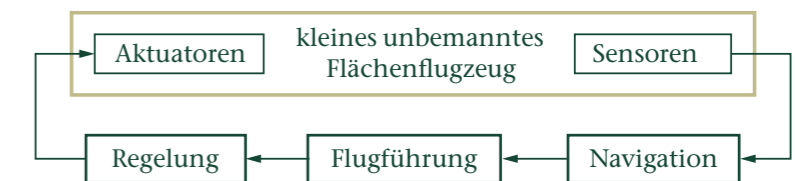
Aktuatoren und Sensoren sind die Schnittstellen zum physikalischen System Flugzeug. Während die grundsätzliche mechanische Funktionsweise des Flugzeugs die Auswahl der Aktuatoren im Rahmen der Konstruktion bereits stark einschränkt, bleiben dem Systementwurf große Freiheiten bei der Frage, welche Sensoren zum Einsatz kommen. Um die Flugleistung nicht zu beeinträchtigen, werden hier üblicherweise ein geringes Gewicht und eine geringe elektrische Leistungsaufnahme angestrebt. Im Hinblick auf die Komplexität des Gesamtsystems sollte die Anzahl der Sensoren außerdem nicht unnötig hoch sein. Hier spielen auch die Kosten eine wichtige Rolle. Führt man den Gedanken der Fähigkeit zum vollständig autonomen Betrieb konsequent zu Ende, ergibt sich daraus über die Unabhängigkeit von einem Piloten an Bord oder am Boden hinaus die Forderung nach allgemeiner Unabhängigkeit von externer Infrastruktur. Alles andere würde den Einsatz auf speziell vorbereitete Areale oder wenigstens Gebiete mit günstigen Empfangsbedingungen (zum Beispiel für Satellitennavigation) begrenzen und so eine

Vielzahl von Anwendungen erschweren, unrentabel oder gänzlich unmöglich machen. Vor dem Hintergrund dieser Forderungen bietet sich als minimale Sensorausstattung eine Kombination aus Kamera und Inertialsensoren, das heißt Beschleunigungs- und Drehratenmessern, an. Der Informationsgehalt der entsprechenden Messungen entspricht auch in etwa dem, was einem menschlichen Piloten an Bord zur Verfügung stünde. Die Bestimmung des Flugzustands auf dieser Grundlage wird durch den Begriff optisch gestützte Inertialnavigation beschrieben.

Anders als Aktuatoren und Sensoren, bei denen es sich um physische Bauteile handelt, sind Navigation, Flugführung und Flugregelung reine Algorithmen, die an die Stelle kognitiver Leistungen des Piloten treten. Sie sind Gegenstand intensiver Forschung. Dabei ist vor allem die dargestellte Trennung zwischen Navigation und Flugführung/-regelung etabliert. So wird beim Entwurf von Algorithmen zur Flugführung davon ausgegangen, dass das Navigationssystem zu jeder Zeit eine Schätzung des Flugzustands bereitstellt, deren Güte unabhängig von der Art und Weise ist, in der sich das Flugzeug bewegt. Oft wird sogar die Annahme getroffen, dass die Zustandsschätzung vollkommen fehlerfrei ist. In jedem Fall ist eine gewisse Navigationsgüte unverzichtbar für eine sinnvolle Bewegungsplanung und damit für eine erfolgreiche Missionserfüllung.

Welche Schätzgüte die Navigation erreichen kann, ist in Wahrheit allerdings keine Frage, die allein anhand der Art und Genauigkeit der verfügbaren Sensoren zu beantworten ist. Vielmehr besteht darüber hinaus ein Zusammenhang zur Bewegung des Fahrzeugs, der gerade bei der optisch gestützten Inertialnavigation besonders stark ausgeprägt ist. Wenn man im Sinne der Unabhängigkeit von externer Infrastruktur davon ausgeht, dass sich das Flugzeug über unbekanntem Terrain bewegt – also im Vorhinein über keine Karte der Umgebung verfügt –, existiert tatsächlich eine Vielzahl von Situationen, in denen eine Schätzung des Bewegungszustands nur sehr ungenau oder gar nicht möglich ist. So kann man zeigen, dass das Fliegen von Kurven eine notwendige Bedingung für das Gelingen der Geschwindigkeitsschätzung darstellt. Das schließt geradlinige Flugbahnen, die sonst die logische Wahl wären, um zeitoptimal von einem Punkt zum anderen zu gelangen, aus. Dieses Beispiel zeigt eines sehr klar: Die Güte der Navigationslösung hängt direkt von der Gestalt der Flugbahn ab, deren Planung Aufgabe der Flugführung ist. Gleichzeitig ist eine

Abbildung 1:
In der Entwicklung unbemannter Fluggeräte werden Navigation, Flugführung und Regelung typischerweise isoliert voneinander betrachtet.



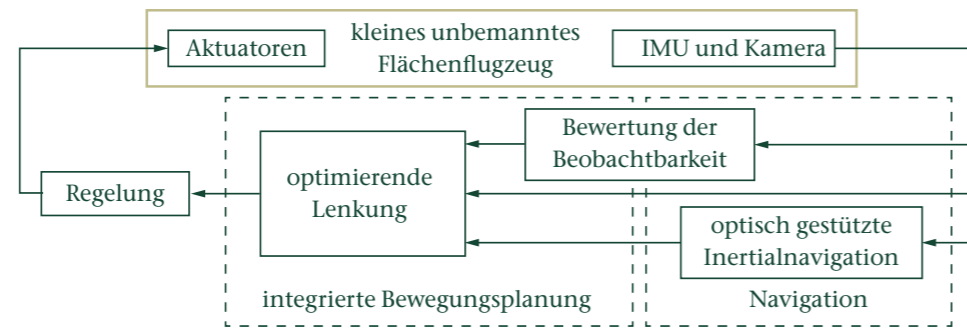


Abbildung 2:
Der integrierte Ansatz realisiert die Verbesserung der Navigationsgüte in der Bewegungsplanung über eine Beobachtbarkeitsanalyse. Um von externer Infrastruktur und Satellitenempfang unabhängig zu sein, kommt eine minimale Sensorausstattung aus Inertialsensoren (IMU) und Kamera zum Einsatz.

genaue Zustandsschätzung unbedingte Voraussetzung für eine sinnvolle Bewegungsplanung. Navigation und Flugführung stehen damit in einer Wechselwirkung, die die bislang strikte Trennung beider Bereiche infrage stellt. Tatsächlich ist davon auszugehen, dass die Missachtung dieses Zusammenhangs die Einsatzfähigkeit aktueller Systeme deutlich und unnötig einschränkt.

Eine neue Architektur

Angesichts der engen Wechselwirkung zwischen Schätzgüte und Fahrzeugbewegung ist die isolierte Betrachtung von Flugführung und Navigation nicht länger gerechtfertigt. Vielmehr muss die Bewegungsplanung zielgerichtet auf das Gelingen der Zustandsschätzung hinarbeiten. Kern dieser integrierten Bewegungsplanung kann zum Beispiel ein optimierendes Lenkverfahren sein, das neben der eigentlichen Navigationslösung, dem Missionsziel und Hindernissen in der Umgebung auch eine quantitative Bewertung der zu erwartenden Schätzgüte berücksichtigt. Im Vergleich zum konventionellen Aufbau (Abb. 1) ergibt sich damit die neue in

Abbildung 2 dargestellte Systemarchitektur. Ihre Komponenten optisch gestützte Inertialnavigation, Bewertung der Beobachtbarkeit und optimierende Lenkung werden im Folgenden beschrieben.

Optisch gestützte Inertialnavigation ohne Landmarkenschätzung

Gleichzeitig den Bewegungszustand der Kamera und die dreidimensionalen Positionen aller sichtbaren Landmarken zu schätzen, ist ein gängiger Ansatz zur optischen Navigation in einer unbekanntem Umgebung. Zwar können solche Verfahren unter günstigen Voraussetzungen sehr genaue Ergebnisse liefern [1, 13]. Allerdings müssen die zugrundeliegenden Algorithmen zumeist heuristisch auf konkrete Szenarien zugeschnitten werden, während sie gleichzeitig einen großen Rechenaufwand erfordern. Folgerichtig beschränken sich Demonstrationen in der Regel auf langsame Bodenfahrzeuge [7]. Typische Missionsprofile für kleine unbemannte Flächenflugzeuge umfassen aber insbesondere den Flug mit moderaten Geschwindigkeiten in niedriger Höhe, sodass einzelne

Landmarken jeweils nur in wenigen Bildern sichtbar sind. Ob ihre dreidimensionale Positionsschätzung in diesem kurzen Zeitraum hinreichend weit konvergieren kann, ist deshalb zumindest fraglich.

Man kann zeigen, dass es zur Erfassung einer dreidimensionalen Umgebung genügt, den Geschwindigkeitsvektor des Fahrzeugs zu schätzen. Abstände zu Objekten in der Umgebung können dann unmittelbar aus ihrem optischen Fluss im Kamerabild berechnet werden. Methoden, die die Positionen von Landmarken nicht als Teil des zu beobachtenden Zustands auffassen [3, 8, 11], sind prinzipbedingt mit deutlich niedrigerem Rechenaufwand verbunden und eignen sich damit besonders für den Einsatz auf kleinen fliegenden Plattformen. Allerdings fußen bestehende Verfahren auf linearen Näherungen. Damit ist ihre Anwendbarkeit auf kleine Abweichungen vom wahren Systemzustand beschränkt, was wiederum kleine Schätz- und Messfehler voraussetzt. Das wird insbesondere bei der Initialisierung zum Problem.

Die in [10] veröffentlichte Arbeit begegnet dem Problem deshalb auf einer früheren Stufe, beim Systemmodell selbst. Durch geeignete Zustandstransformation entsteht eine Formulierung der Systemgleichungen, die trotz ihrer linear zeitvarianten Struktur exakt ist. Damit erlaubt sie grundsätzlich den Einsatz eines Kalman-Filters. Wegen der multiplikativen Wirkung des Messfehlers in

der Bildverarbeitung unterscheiden sich Form und Herleitung allerdings vom herkömmlichen Fall [2]. Es ergibt sich ein Navigationsalgorithmus, der allein mit Drehraten, Beschleunigungen und Bilddaten funktioniert und keine Annahmen über das Fahrzeug macht. Seine Formulierung ist damit allgemein genug, um ohne Anpassungen auf anderen beweglichen Plattformen verwendet werden zu können.

Demonstration im Flugversuch

Tests des neuen Verfahrens in Simulationen verliefen vielversprechend, die Realisierung auf einem tatsächlichen Fahrzeug birgt aber zusätzliche Herausforderungen. Das gilt in besonderem Maße für die Bildverarbeitung, deren Verhalten simulativ wenn überhaupt nur ansatzweise und mit hohem Aufwand zu erfassen ist. In der angestrebten integrierten Kombination aus Lenkung und optisch gestützter Inertialnavigation erfordert letztere zudem den mit Abstand größten Rechenaufwand und ist deshalb die für den Echtzeitfähigkeit des Gesamtsystems kritische Komponente. Um hier Gewissheit zu haben, wurde der Navigationsalgorithmus in ein kleines Flächenflugzeug integriert (Abb. 3) und in Flugversuchen erprobt [10]. So konnten die Einsatzfähigkeit unter realen Bedingungen und eine trotz der einfachen Systemkomponenten zufriedenstellende Schätzgüte demonstriert werden (Abb. 4).

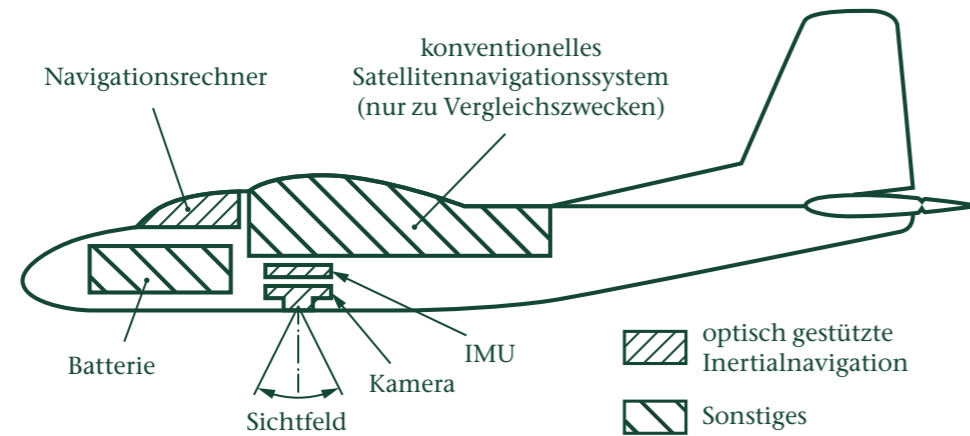


Abbildung 3:
Komponenten des Versuchs-
flugzeugs [10].

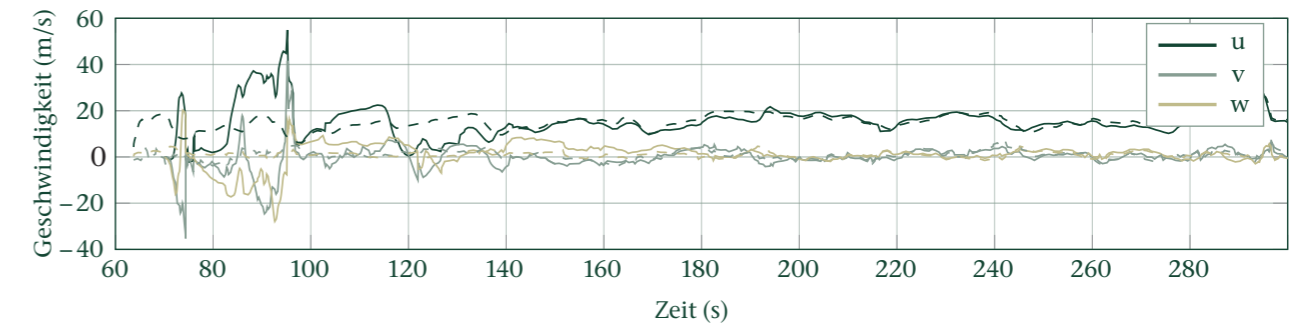
Erreichbare Schätzgüte

Im Zentrum der Wechselwirkung zwischen Bewegungsplanung und Navigation steht die Frage, unter welchen Voraussetzungen der Bewegungszustand aus bekannten Größen rekonstruiert werden kann. Im Sinne der Systemtheorie ist das nichts anderes als die Beobachtbarkeit des Systems. Da es sich im vorliegenden Fall um ein nichtlineares Problem handelt, gestalten sich diese Untersuchungen ungleich schwieriger als im linear zeitinvarianten Fall. Erschwerend kommt hinzu, dass im Hinblick auf eine spätere Optimierung neben der binären Aussage darüber, ob die Zustandsschätzung überhaupt gelingen kann, auch eine Abschätzung für die zu erwartende Güte dieser Schätzung gefunden werden muss.

Durch die lineare, aber zeitvariante Formulierung des Schätzproblems wird eine exakte Beobachtbarkeitsanalyse möglich, mit der neue notwendige und hinreichende Kriterien für Beobachtbarkeit hergeleitet wur-

den [10]. Diese sind so allgemein gehalten, dass sie bei sehr schwachen Forderungen an die Umgebung unmittelbar auf jede gegebene Fahrzeugtrajektorie angewandt werden können. Zudem ergeben sich interessante Anknüpfungspunkte zu Eigenschaften der Reaktivnavigation aus Richtungsmessungen.

Neben der Untersuchung der Beobachtbarkeit im Sinne von ja/nein-Kriterien erlaubt die neue Formulierung auch eine Bewertung der zu erwartenden Schätzgüte. Analog zum Konditionsbegriff bei der Lösung überbestimmter linearer Gleichungssysteme wurde durch Normabschätzungen eine obere Grenze für den relativen Schätzfehler bei linear zeitvarianten dynamischen Systemen gefunden. Eine wichtige Eigenschaft dieser Grenze ist, dass ihre Auswertung keine Kenntnis des Systemzustands erfordert und damit anders als etwa die vermutete Kovarianz eines erweiterten Kalman-Filters auch bei großen Schätzfehlern sinnvolle Werte liefert. Tatsächlich lässt sich die im Weiteren als Beobachtbarkeitsmaß bezeichnete Grenze



allein aus Messdaten berechnen und ist damit unempfindlich gegenüber Unbestimmtheiten in der Zustandsschätzung. Sie eignet sich deshalb besonders für die Verwendung im Kontext der integrierten Bewegungsplanung.

Bewegungsplanung als Regelungsaufgabe

Die Verfolgung eines übergeordneten Missionsziels bei gleichzeitiger Vermeidung von Kollisionen mit Hindernissen in der Umgebung kann als Lösung einer Optimierung (Missionsziel und ggf. weitere Anforderungen) unter Nebenbedingungen (Kollisionsvermeidung) begriffen werden. Die übliche Vorgehensweise zur Bestimmung dieser Lösung ist die Berechnung optimaler Trajektorien im Zustandsraum mithilfe eines iterativen numerischen Verfahrens. Da beim vorliegenden Fahrzeug aber nichtlineare differenzielle Beschränkungen berücksichtigt werden müssen und der Zustandsraum mindestens sechsdimensional ist, führt ein

solcher Ansatz auf hochkomplexe und entsprechend rechenaufwendige Algorithmen. Noch dazu kann ihre Laufzeit zum Erreichen einer gewünschten Genauigkeit im Vorhinein nicht bestimmt werden.

Um die Ausführung auf einem System mit begrenzten Ressourcen und unter Echtzeitbedingungen zu ermöglichen, wurde ein unkonventioneller Ansatz entwickelt. Die Arbeit wurde in [9] veröffentlicht und stützt sich auf die Tatsache, dass die Eingänge Lastvielfaches und Flugwindhängewinkel vektoriell als Querbeschleunigung ausgedrückt werden können. Tatsächlich existiert im Bereich der taktischen Raketenlenkung bereits eine Klasse nichtlinearer Regler, die Querbeschleunigungskommandos aus Forderungen an die translatorische Bewegung eines Fahrzeugs berechnet [14]. Diese als Lenkgesetze bezeichneten Algorithmen sind sehr effizient, haben ihrer Herkunft wegen aber normalerweise dem Zweck, die Kollision mit einem Zielfahrzeug herbeizuführen. Die wenigen bestehenden Ansätze zur Kollisi-

Abbildung 4:
Im Flugversuch zeigt die Schätzung der körperfesten Geschwindigkeitskomponenten bei optisch gestützter Inertialnavigation (gestrichelt) eine gute Übereinstimmung mit den Vergleichswerten (durchgezogen).

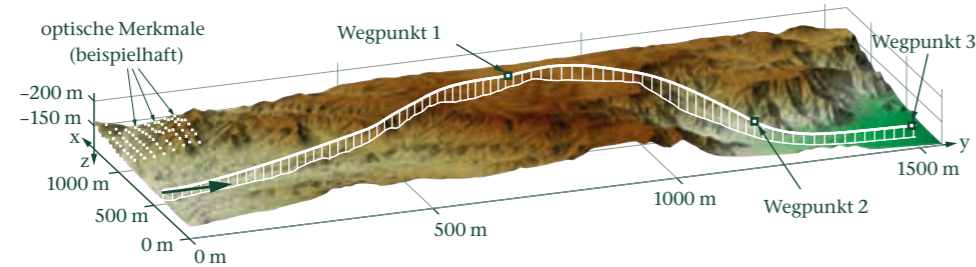


Abbildung 5: Missionserfüllung (hier Wegpunktfolge) bei gleichzeitiger Kollisionsvermeidung auf Grundlage von Bilddaten [9].

Kollisionsvermeidung können nur jeweils einem einzelnen Hindernis ausweichen [4, 6, 12] und verfügen, wenn überhaupt, lediglich über unzureichende Möglichkeiten zur Berücksichtigung eines übergeordneten Missionsziels [5]. Der Beitrag des Projektes [9] besteht in einem Lenkverfahren, das die Erfüllung eines Missionsziels bei gleichzeitiger Kollisionsvermeidung mit einer beliebigen Anzahl potenziell beweglicher Hindernisse erlaubt. Dazu wurde mithilfe der Eingangs-Ausgangs-Linearisierung ein nichtlineares Regelgesetz entwickelt, mit dem die der Kollisionsvermeidung entsprechenden Ungleichungsnebenbedingungen in den Stellraum transformiert werden können. Aus dem Missionsziel und einem passenden unbeschränkten Lenkgesetz lässt sich zudem eine Kostenfunktion im Stellraum formulieren. Das entstehende Optimierungsproblem besitzt sogar eine analytische Lösung, deren Komplexität allerdings exponentiell mit der Anzahl der berücksichtigten Hindernisse skaliert. Deshalb wurde ein näherungsweise semianalytisches Ersatzproblem formuliert, dessen aufwendigster Lösungsschritt das Sortieren der Hindernisliste mit der entsprechend niedrigen Komplexität ist. Selbst bei hoher Wiederholrate (zehn Hertz) und vielen Hindernissen (mehrere Hundert)

benötigt der Algorithmus damit deutlich weniger Rechenleistung als typischerweise an Bord kleiner unbemannter Flugzeuge zur Verfügung steht.

Ein weiterer Vorteil der Methode zeigt sich, wenn man die Betrachtungen auf statische Umgebungen beschränkt (Abb. 5). Dann nämlich genügen zu seiner Umsetzung eine Messung des optischen Flusses, inertielle Messdaten (Drehraten/Beschleunigungen) und eine grobe Geschwindigkeitsschätzung, wie sie etwa die optisch gestützte Inertialnavigation bereitstellt. Unbestimmtheiten im Geschwindigkeitsbetrag, die typischerweise durch schlechte Beobachtbarkeit entstehen, wirken sich hier zwar auf die Schnelligkeit des geschlossenen Lenkkreises aus, beeinträchtigen seine Stabilität aber nicht.

Der integrierte Ansatz im Test

Eine gute Handhabbarkeit und überzeugende Ergebnisse in Simulation und Flugversuchen gaben den Ausschlag, das integrierte Konzept aus optimierender Lenkung [9] und optisch gestützter Inertialnavigation ohne Landmarkenschätzung [10] aufzubauen. Die Kopplung zwischen Schätzgüte und Bewegungsplanung wird durch Berücksich-

tigung des Beobachtbarkeitsmaßes realisiert. Wie sich die Bewegung des Fahrzeugs auf das Beobachtbarkeitsmaß auswirkt, wurde analytisch untersucht. Daraus ergibt sich eine Menge von Geschwindigkeitsvorgaben, die geeignet sind, die Maßzahl zielgerichtet zu verbessern. Die verbleibende Freiheit in der Auswahl eines konkreten Geschwindigkeitsvektors kann zur Erfüllung des Missionziels genutzt werden. In der gezeigten Umsetzung des integrierten Konzepts geht eine entsprechende Kombination beider Forderungen als Zielfunktion in das Optimierungsproblem zur Kollisionsvermeidung ein. Dabei handelt es sich nicht um eine gewichtete Summe, sondern um eine orthogonale Projektion der Geschwindigkeitsvorgabe für die Missionserfüllung auf den Raum der die Beobachtbarkeit verbessernden Geschwindigkeitsvektoren. So entfallen uneindeutige Gewichtungsfaktoren im Optimalitätskriterium.

Zur quantitativen Bewertung der Eigenschaften des in Abbildung 2 dargestellten Systems wurde es in der Simulation untersucht. Neben Beschleunigungs- und Drehratensensoren, die wie in [10] modelliert sind, verfügt das Versuchsfahrzeug über eine Kamera mit beschränktem Öffnungswinkel, die körper-

fest nach vorne unten schaut. Als Beispiel für das Missionsziel wird eine Wegpunktfolge gewählt, die allerdings nicht Gegenstand der Untersuchung ist. Von Interesse ist vielmehr das Zusammenspiel zwischen Navigation und Lenkung – insbesondere im Hinblick darauf, ob die aktive Verbesserung der Schätzgüte tatsächlich gelingt.

Zunächst wurde der vorgestellte Testfall ohne Einbeziehung des Beobachtbarkeitsmaßes untersucht. Aufgrund des fehlerhaften Schätzergebnisses gelingt in diesem Fall weder die Wegpunktfolge noch die Kollisionsvermeidung mit den optischen Merkmalen am Boden. Stattdessen sinkt beziehungsweise steigt das Flugzeug nach kurzer Zeit so stark, dass es entweder abstürzt oder keine optischen Merkmale mehr innerhalb des Blickfeldes der Kamera liegen. Um dennoch einen Vergleich mit der integrierten Bewegungsplanung zu ermöglichen, wurde entschieden, der Lenkung den exakten Bewegungszustand zur Verfügung zu stellen und die optisch gestützte Navigation lediglich im offenen Kreis zu betrachten. Abbildung 6 (links) zeigt

„Wie Energie so ist auch Information eine Ressource, mit der man effizient umgehen muss.“

Lorenz Schmitt

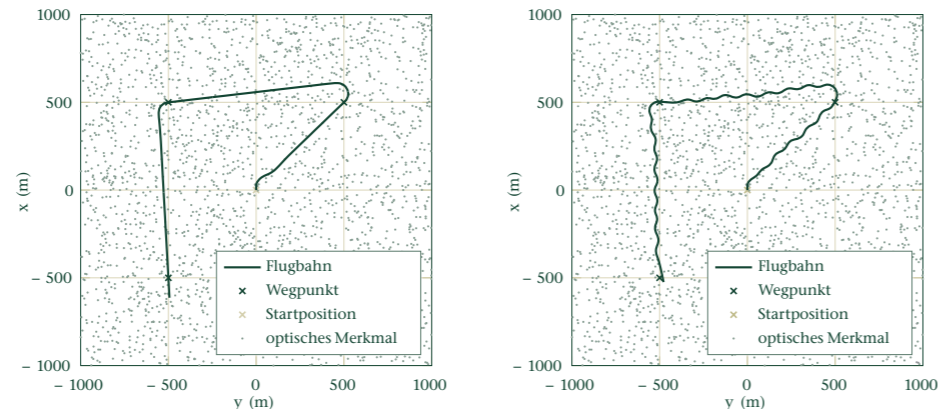


Abbildung 6: Der Flug ohne Verbesserung der Beobachtbarkeit (links) enthält lange Geradenstücke und gelingt nur bei Verwendung einer exakten Navigationslösung ohne Absturz. Bei aktiver Berücksichtigung der Beobachtbarkeit in der Lenkung (rechts) wird das Missionsziel auch mit optischer Navigation im geschlossenen Kreis erreicht.

Abbildung 7 (S. 65 oben): Beobachtbarkeitsmaß und relativer Schätzfehler beim Flug ohne (links) und mit (rechts) Verbesserung der Beobachtbarkeit

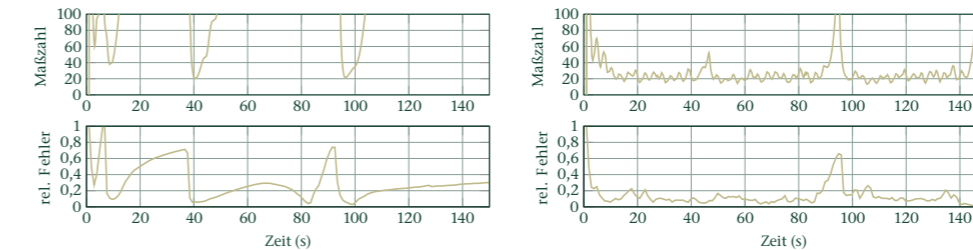
die resultierende Flugbahn. In *Abbildung 7 (links)* ist deutlich zu erkennen, wie die Kurvenflüge zu Beginn, bei 40 s und bei etwa 95 s die Beobachtbarkeit verbessern und den Schätzfehler verringern. Dazwischen steigt der relative Fehler allerdings jeweils stark an.

Ohne zielgerichtete Verbesserung der Beobachtbarkeit sind die Schätzergebnisse nicht hinreichend präzise, um die Missionserfüllung zu gewährleisten. Ein gänzlich anderes Bild ergibt sich bei Anwendung der in *Abbildung 6 (rechts)* zu sehen ist, enthält die sich ergebende Flugbahn anstelle von Geradenstücken Schlangenlinien. Entsprechend den in [10] vorgestellten Überlegungen handelt es sich also um Manöver, die geeignet sind, die Beobachtbarkeit des Problems herzustellen und zu verbessern. Das zeigt sich ebenfalls am Verlauf der Maßzahl und des relativen Schätzfehlers (*Abbildung 7, rechts*). Tatsächlich kann die optisch gestützte Inertialnavigation nun anders als zuvor

auch im geschlossenen Kreis eingesetzt werden. Dabei gelingen sowohl die Wegpunktfolge als auch die Kollisionsvermeidung.

Ressourcen effizient nutzen

Die Leistungsfähigkeit autonomer Fluggeräte wird heute in vielen Fällen durch Unzulänglichkeiten auf algorithmischer Ebene eingeschränkt. Die geschilderten Forschungsinhalte verfolgen das Ziel, diese Einschränkungen mithilfe neuartiger integrierter Planungs- und Schätzalgorithmen auszuräumen. Statt also die Komplexität der Systeme zu steigern, werden bereits verfügbare Ressourcen in effizienter Weise eingesetzt. Das kann dazu beitragen, dass unbemannte Luftfahrzeuge zuverlässiger, präziser und kostengünstiger arbeiten, und ihnen völlig neue Einsatzgebiete eröffnen.



Literaturverzeichnis

- [1] Bryson, Mitch ; Sukkari, Salah: Observability Analysis and Active Control for Airborne SLAM. In: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 44 (2008), Nr. 1, S. 261–280.
- [2] Gelb, Arthur: Optimal Linear Filtering. In: Applied Optimal Estimation. 1st. Cambridge, MA : MIT-Press, 1974, S. 102–155.
- [3] Gurfil, Pini ; Rotstein, Hector: Partial Aircraft State Estimation from Visual Motion Using the Subspace Constraints Approach. In: Journal of Guidance, Control, and Dynamics 24 (2001), Nr. 5, S. 1016–1028.
- [4] Han, S.-C. ; Bang, H. ; Yoo, C.-S.: Proportional Navigation-Based Optimal Collision Avoidance for UAVs. In: International Journal of Control, Automation and Systems 7 (2009), Nr. 4, S. 553–565.
- [5] Kumar, B. A. ; Ghose, D.: Radar-Assisted Collision Avoidance/Guidance Strategy for Planar Flight. In: Transactions on Aerospace and Electronic Systems 37 (2001), Nr. 1, S. 77–90.
- [6] Mujumdar, A. ; Padhi, R.: Reactive Collision Avoidance using Nonlinear Geometric and Differential Geometric Guidance. In: Journal of Guidance, Control, and Dynamics 34 (2011), Nr. 1, S. 303–311.
- [7] Pirker, K. ; Ruther, M. ; Bischof, H. ; Schweighofer, G. ; Mayer, H.: An Omnidirectional Time-of-Flight Camera and its Application to Indoor SLAM. In: 11th International Conference on Control Automation Robotics Vision (ICARCV). Singapore, Dec 2010, S. 988–993.
- [8] Roumeliotis, S.I ; Johnson, A.E. ; Montgomery, J.F.: Augmenting Inertial Navigation with Image-Based Motion Estimation. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington, DC, May 2002, S. 4326–4333.
- [9] Schmitt, Lorenz ; Fichter, Walter: Collision-Avoidance Framework for Small Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles. In: Journal of Guidance, Control, and Dynamics (2014), Nr. 4, S. 1323–1329.
- [10] Schmitt, Lorenz ; Fichter, Walter: Observability Criteria and Null-Measurement Kalman Filter for Vision-Aided Inertial Navigation. In: Journal of Guidance, Control, and Dynamics (2016), Nr. 4, S. 770–780.
- [11] Soatto, Stefano ; Perona, Pietro: Recursive 3-D Visual Motion Estimation Using Subspace Constraints. In: International Journal of Computer Vision 22 (1997), Nr. 3, S. 235–259.
- [12] Watanabe, Y. ; Calise, A. J. ; Johnson, E. N.: Minimum-Effort Guidance for Vision-Based Collision Avoidance. In: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2006.
- [13] Weiss, Stephan ; Scaramuzza, Davide ; Siegwart, Roland: Monocular-SLAM-Based Navigation for Autonomous Micro Helicopters in GPS-Denied Environments. In: Journal of Field Robotics 28 (2011), Nr. 6.
- [14] Zarchan, Paul: Progress in Astronautics and Aeronautics. Bd. 157: Fundamentals of Tactical Missile Guidance. 2nd. Reston : AIAA, 1994.