



Optimale kooperative Steuerung von Mehrflugzeugsystemen

Markus Glocker/Alexander Martin/Oskar von Stryk

Die Untersuchung und Optimierung von Koordination und Flugtrajektorien zur Erhöhung von Kapazität und Sicherheit im Luftverkehr unter Berücksichtigung von Freiflugphasen und neuen Möglichkeiten der Flugregelung führt bei realitätsnaher Modellierung der Flugzeugdynamik auf eine gänzlich neue Klasse von diskret-kontinuierlichen dynamischen Optimierungsproblemen. Damit können die simultane Optimierung von Flugtrajektorien und Landereihenfolge bei Flughäfen ebenso beschrieben werden wie die Koordination und Trajektorienoptimierung einer Flotte unbemannter Flugsysteme zur Verkehrsüberwachung oder Aufklärung bei Katastrophen. Erste Ansätze für numerische Berechnungsverfahren werden diskutiert und an Beispielen illustriert.

Optimal cooperative control of multiple aerial vehicles. *The investigation and optimization of coordination and flight trajectories for improving capacity and safety in air traffic which takes free flight phases and new possibilities of flight control into account results in a completely new class of discrete-continuous dynamic optimization problems considering realistic models of the flight dynamics. This approach enables the simultaneous optimisation of flight trajectories and aircraft landing sequence at airports as well as the coordination and trajectory optimisation of a fleet of unmanned aerial vehicles deployed for traffic surveillance or exploration of a disaster scenario. First approaches for numerical methods are discussed and computational results are presented.*

Einführung

Durch das starke Anwachsen des zivilen Luftverkehrs sowie des damit verbundenen Risikos von Kollisionen stößt das gegenwärtige Flugsicherungssystem zunehmend an die Grenzen seiner Leistungsfähigkeit. Neue methodische Ansätze im Bereich der Luftverkehrsregelung sind erforderlich, um Kapazität und Sicherheit des Luftverkehrsraums gleichermaßen trotz des wachsenden Luftverkehrsaufkommens zu verbessern. Technologische Entwicklungen im Bereich der Onboard-Flugzeugsensorik werden es ermöglichen, Fragen der Navigation und der Flugsicherheit zwischen der bisherigen, zentralen Regelung durch die Flugsicherung und möglichen, künftigen dezentralen Regelungen durch die beteiligten Luftfahrzeuge neu zu verteilen.

Eng verwandte Fragestellungen der Koordination und Flugtrajektorienplanung treten bei kooperierenden, autonomen Luftfahrzeugen (unmanned aerial vehicles, UAVs) auf. Mögliche, zukünftige Einsatzgebiete für eine Flotte kooperierender UAVs, die im ISTAG Report 2004 als eine der „Grand Challenges“ für die Entwicklung der Informationsgesellschaft in Europa benannt wurden, sind Einsätze zur Überwachung und Aufklärung bei Umweltkatastrophen und -verunreinigungen, Verkehrsüberwachung und -management (Abb. 1), zur Unterstützung von menschlichen Koordinatoren oder als autonome Transportvehikel für leichte Gefahrgüter.

Für beide Szenarien ist eine systematische und simultane Optimierung von Kooperation und Flugtrajektorien bei realistischer Modellierung der Systemdynamik der einzelnen Luftfahrzeuge wünschenswert, aber bislang erst in Ansätzen möglich.

Modellierung

Die Modellierung der Systemdynamik eines einzelnen Flugzeugs führt mit Methoden der Flugmechanik je nach Modellierungstiefe auf ein nichtlineares System gewöhnlicher Differentialgleichungen für dessen Zustand (d.h. Position, Orientierung, Geschwindigkeit, Massenänderung u.a.) und hängt u.a. von aerodynamischen Größen wie Auftrieb und Widerstand sowie den Steuervariablen des Flugzeugs wie Triebwerksschub, Auftriebsbeiwert (Höhenruder) und Schräglage (Quer- und Seitenruder) ab (Abb. 2). Exemplarische Szenarien im Bereich des Passagierflugverkehrs liegen im Bereich der Flugwegeoptimierung (Area Control) und der Anflugsreihungsoptimierung eines Flughafens (Approach Control). Die Berücksichtigung von Reihenfolgen und Anzahl mehrerer Flugzeuge führt zu einer Modellierung mit diskreten, ganzzahligen Variablen. Dabei sind verschiedene Flugzeugtypen und aktuelle Flugzeugzustände in der Modellierung ebenso zu berücksichtigen wie unterschiedliche Optimierungskriterien der Luftverkehrsgesellschaften (Kosten, Pünktlichkeit, Komfort) sowie die Vermeidung von Konfliktsituationen (Kollisionsgefahr). Darüber hinaus ist die Berücksichtigung weiterer Kriterien, z.B. bei der Bestimmung einer optimalen Landereihenfolge und zugehörigen Flugtrajektorien, der Auslastung des Flughafens, von Kerosinverbrauch und Lärmentwicklungen bei der Planung von Interesse.

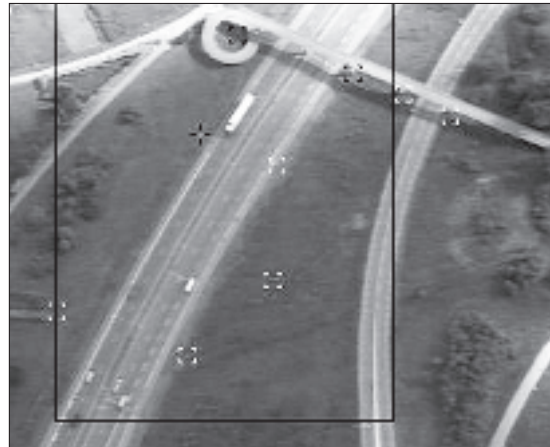


Abbildung 1:
Luftaufnahme eines Verkehrsknotenpunkts
(Quelle: COMETS Project
web site, www.comets-uavs.org)

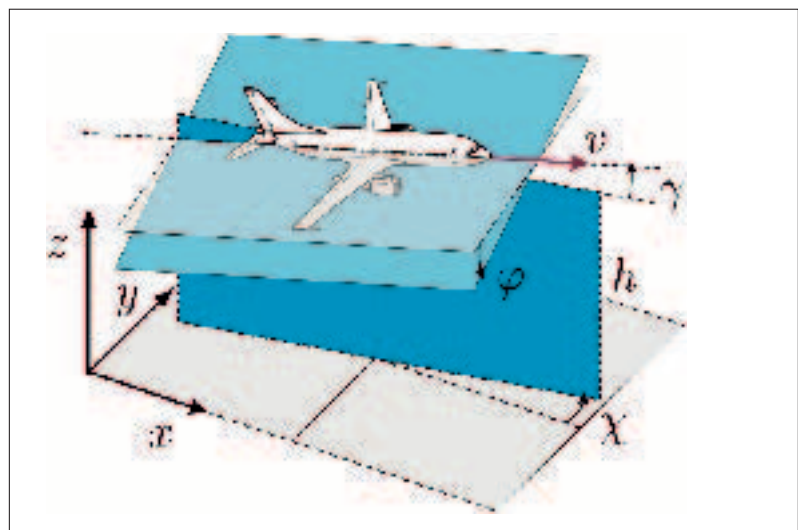
Aerial observation of a traffic junction.

Der Einsatz einer Flotte von UAVs zur Verkehrsüberwachung oder zur Aufklärung bei Umweltkatastrophen erfordert z.B. für ein zeit- oder energieminimales Anfliegen einer Menge von Kontrollpositionen, die optimalen Flugtrajektorien zusammen mit der Reihenfolge und Aufteilung der Positionen auf die beteiligten UAVs zu bestimmen. Darüber hinaus müssen in beiden Szenarien jeweils Sicherheitsaspekte in Form weiterer Nebenbedingungen berücksichtigt werden, beispielsweise permanente Mindestabstände zur Kollisionsvermeidung, die bei der Analyse optimaler Landereihenfolgen auch durch vom Flugzeugtyp abhängige Luftverwirbelungen bestimmt werden. Bei voller Modellierungstiefe der individuellen Flugzeugdynamik führt die resultierende Optimierungsaufgabe für die diskreten, ganzzahligen (z.B. Reihenfolgen) sowie die kontinuierlichen Flugzeugsteuervariablen auf ein gemischt ganzzahlig-nichtlineares, dynamisches Optimierungsproblem (mixed-integer optimal control problem, MIOCP). Je nach Vereinfachung der Flugzeugdynamik resultieren gemischt ganzzahlig nichtlineare oder lineare Optimierungsprobleme (mixed-integer linear program, MI(L)P).

Optimierung

Die Anwendung von MIP-Berechnungsverfahren auf entsprechend modellierte Problemstellungen wurde in den letzten Jahren verstärkt untersucht. Im Bereich des Luftverkehrsmanagements wird damit vor allem die Problematik kollisionsfreier Bahnen betrachtet.

Abbildung 2:
Flugdynamische Zustandsvariablen
State variables of flight dynamics.



Meist wird entsprechend der aktuellen Luftraumstruktur mit mehreren Verkehrsschichten die stark vereinfachende Annahme gemacht, dass nur Flugbahnen in einer Ebene (d.h. ohne Auftrieb) betrachtet werden müssen. Eine derartige Betrachtung mit stark vereinfachter, linearer Flugzeugdynamik kann als gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem (MILP) formuliert werden [1,2], wobei von Seiten der Systemdynamik wenig Unterschiede zu einer entsprechend linearisierten, ebenen Radfahrzeugdynamik bestehen [1,3]. Auf diese Weise konnten Optimierungsprobleme mit bis zu 17 Flugzeugen untersucht werden [1]. Unter Verwendung verbesserter Approximationen der nichtlinearen Systemdynamik wurden jüngst in [4] bis zu 8 Flugzeuge im dreidimensionalen Raum berücksichtigt. Bei der Optimierung der Landereihenfolge sind bisher noch keine Arbeiten mit Berücksichtigung nichtlinearer flugdynamischer Eigenschaften bekannt. In [5] wird diese Fragestellung als MILP formuliert und an Beispielen mit bis zu 123 Flugzeugen unter Verwendung heuristischer und exakter Verfahren der diskreten Optimierung berechnet. Die kooperative Bahnplanung für mehrere UAVs mit Anfliegen mehrerer Kontrollpunkte wurde in [6] als ein diskretes Optimierungsproblem für mehrere Handlungsreisende (multi traveling salesmen problem, m-TSP) formuliert und gelöst.

Bei solchen Rundreiseproblemen, die wohl die bekanntesten kombinatorischen Optimierungsprobleme darstellen, werden meist Städtetouren betrachtet, wobei die Kosten der Verbindung zwischen je zwei Städten durch deren Entfernung gegeben sind. Die

bisher größte bewiesene optimale Rundreise besucht 24.978 Städte in Schweden. Sie wurde mit der Lin-Kernighan-Methode [7] berechnet und unter Verwendung von Branch-and-Cut-Techniken bewiesen [8].

Die Betrachtung der kombinatorischen Optimierungsprobleme (z.B. für Reihenfolgen) in enger Kopplung mit einer realistischen Modellierung der nichtlinearen Flugzeugdynamik führt auf MIOCPs. Von den Autoren wurden als Benchmarkprobleme für diese völlig neue Klasse von Optimierungsaufgaben Problemstellungen für einzelne und mehrere motorisierte Handlungsreisende vorgestellt [9].

Die ersten Ansätze zur Lösung von MIOCPs beruhen auf einer geeigneten Verknüpfung numerischer Verfahren zur Lösung gewöhnlicher Optimalsteuerungsprobleme mit solchen zur Lösung kombinatorischer Optimierungsprobleme [9]. Ein untersuchter Lösungsansatz verbindet ein Branch-and-Bound-Verfahren, das in einer äußeren Iteration den Raum der diskreten Möglichkeiten durchsucht, mit einem auf Approximation von Steuer- und Zustandsvariablen mit polynomialen Ansatzfunktionen auf einem Zeitgitter und strukturausnützendem, nichtlinearer Optimierung beruhenden Verfahren zur Berechnung optimaler Steuerprozesse in einer inneren Iteration. Ein zweiter Ansatz beruht auf einer geeigneten Linearisierung von Nichtlinearitäten im Optimalsteuerungsproblem mittels linearer Ansatzfunktionen und einer neuen Transformation des MIOCP auf eine Klasse von MILP [10], die mit sogenannten Branch-and-Cut Verfahren global gelöst werden können.

Ergebnisse

Mit den neuen Ansätzen wurden bislang Rundreiseprobleme in der Ebene für motorisierte Handlungsreisende mit einfacher, aber nichtlinearer Fahrzeugdynamik betrachtet. Dabei konnten optimale Reihenfolgen und optimale Trajektorien für ein oder zwei Fahrzeuge und bis zu 7 Städten berechnet werden. Dies stellt in dieser Problemklasse die bislang komplexesten, gelösten MIOCP dar. Dafür wird auf guten PCs 5 h an Rechenzeit benötigt. Diese kann mit dem zweiten Ansatz [10] für eine Approximation der Lösung auf knapp 4 h reduziert werden. In Abb. 3 ist beispielhaft eine Lösung für 2 motorisierte Handlungsreisende und 6 Städte angegeben.

Bei der Landereihenfolgeoptimierung unter Berücksichtigung der beschriebenen, realitätsnahen Flugdynamikmodelle konnten bislang Problemstellungen mit bis zu 5 Flugzeugen untersucht werden. Die benötigte Rechenzeit liegt ebenfalls noch im Bereich mehrerer Stunden. Die berechneten Trajektorien sind in Abbildung 4 dargestellt.

Zusammenfassung und Ausblick

Eine neue Vorgehensweise zur Untersuchung der optimalen Kooperation und Trajektorienplanung für Mehrflugzeugsysteme mit Anwendung u.a. bei der Landereihenfolgeoptimierung von Passagierflugzeugen sowie kooperierenden, unbemannten Flugsystemen bei Überwachungsaufgaben wurde vorgestellt. Zur numerischen Lösung der resultierenden neuen Klasse MIOCP von Optimierungsproblemen wurden erste Ansätze diskutiert. Diese ermöglichen beispiels-

Abbildung 3:
Optimale Kooperation und Trajektorien für zwei motorisierte Handlungsreisende und 6 Städte

Optimal cooperation and trajectories for two motorized traveling salesmen and 6 cities.

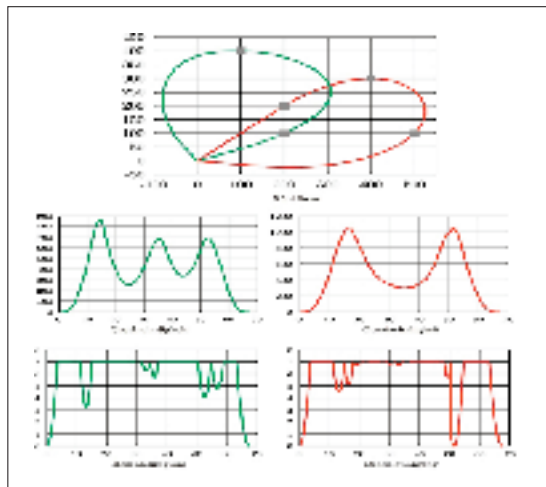
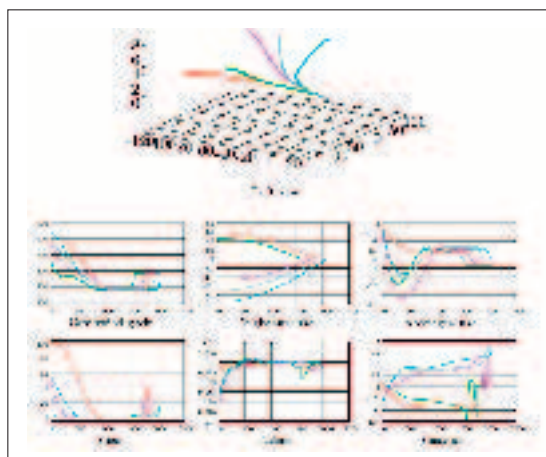


Abbildung 4:
Optimale Landereihenfolge und Flugtrajektorien für 5 Flugzeuge

Optimal sequencing and flight trajectories for 5 aircrafts.



Die Arbeitsgruppe Diskrete Optimierung an der TU Darmstadt

Die Arbeitsgruppe Diskrete Optimierung mit 15 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern ist im Fachbereich Mathematik an der TU Darmstadt angesiedelt. In der Forschung beschäftigt sich die Gruppe mit der Entwicklung von Methoden zur Lösung schwieriger diskreter Optimierungsprobleme aus Industrie und Wirtschaft. Schwerpunkte der Arbeiten sind:

- die mathematische Modellierung der praktischen Fragestellung,
- die theoretische Analyse (vorwiegend mit Methoden aus den Bereichen der Graphentheorie, der Polyedrischen Kombinatorik und der Theorie zur ganz-zahligen Programmierung),
- die Entwicklung und die Implementierung effizienter Algorithmen und deren Umsetzung in die Praxis.

Dieser interdisziplinäre Charakter spiegelt sich auch in den Anwendungsgebieten wieder, in denen die Arbeitsgruppe Erfahrung hat, beispielsweise bei der Standortplanung in der Telekommunikation, der Frequenzzuweisung im Mobilfunk, bei Netzwerkdimensionierungsproblemen, im Supply Chain Management, bei Planungsfragen im Öffentlichen Personennahverkehr oder bei Energiemanagementfragen.

Fachgebietsleiter:

Prof. Dr. rer. nat. Alexander Martin

TU Darmstadt, Fachgebiet Diskrete Optimierung

Schlossgartenstraße 7 • 64289 Darmstadt • Tel: 0 61 51/16-3394

e-mail: martin@mathematik.tu-darmstadt.de • www.opt.tu-darmstadt.de

Das Fachgebiet Simulation und Systemoptimierung an der TU Darmstadt

Die Forschungsschwerpunkte des Fachgebiets mit derzeit zwölf wissenschaftlichen Mitarbeitern und Doktoranden umfassen Simulationstechnik, Optimierung, optimale Steuerung und Robotik. Zur simulationsbasierten Optimierung und Steuerung nichtlinearer dynamischer Prozesse wie Kraftfahrzeuge und vielgelenkige Roboter werden besonders effiziente, numerische Verfahren entwickelt, die weltweit hohe Akzeptanz und Verbreitung gefunden haben (z.B. wurde das am Fachgebiet entwickelte direkte Kollokationsverfahren zur Berechnung optimaler Steuerungen weltweit von mehr als 70 Forschungseinrichtungen in 25 Ländern lizenziert).

Aktuelle Drittmittelprojekte umfassen die robuste, diskret-kontinuierliche Parameteroptimierung bei Strömungssimulationen, die Vorwärtsdynamiksimulation und -optimierung menschlicher Bewegungen, die Entwicklung von bionischen Roboterarmen und -beinen sowie die Entwicklung autonomer, kooperierender mobiler, vor allem laufender, Robotersysteme. Seit 2001 wurde ein sehr erfolgreiches Team von autonomen vierbeinigen Robotern in dynamischer Umgebung am Szenario des Roboterfußballs entwickelt (Darmstadt Dribbling Dackels), das seit 2004 durch ein Team kleiner, humanoider Roboter ergänzt wird. In diesem Zusammenhang werden kooperative Lokalisierungs- und Navigationsmethoden sowie modulare und flexible Software- und Steuerungsarchitekturen entwickelt, die mittelfristig in die Entwicklung heterogener Teams laufender und fahrender, autonomer Roboter münden, die zur gemeinsamen Erledigung von Aufgaben jenseits des Roboterfußballs eng kooperieren.

Fachgebietsleiter: Prof. Dr.rer.nat. Oskar von Stryk

Tel.: 0 61 51/16-2513 • E-Mail: stryk@sim.tu-darmstadt.de

Ansprechpartner: Dipl.-Math. Markus Glocker

Tel.: 0 61 51/16-5212 • E-Mail: glocker@sim.tu-darmstadt.de

Anschrift: TU Darmstadt • Fachgebiet Simulation und Systemoptimierung Hochschulstr. 10 • 64289 Darmstadt • www.sim.informatik.tu-darmstadt.de

weise eine gute Abschätzung, wie weit heutige Luftverkehrsregelungen von optimalen Regelungen entfernt sind. Darauf aufbauend ist eine Weiterentwicklung der Methoden im Hinblick auf Schnellzeit- bzw. Echtzeit-Optimierungen und deren Einsatz im Planungs- bis hin im laufenden Betrieb wünschenswert. Dazu sind aus Sicht der Optimierungsverfahren grundlegende neue Erkenntnisse bei der Modellierung und optimalen Steuerung kooperativer, hybrider (diskret-kontinuierlicher) dynamischer Systeme sowie bei numerischen Verfahren zur Berechnung von Lösungen notwendig. Diese Ziele können langfristig nur durch eine enge Zusammenarbeit von Experten der diskreten und der System-Optimierung sowie der Flugdynamik und -regelung erreicht werden, für die das Forschungszentrum Computational Engineering der Technischen Universität Darmstadt eine sehr gute Ausgangsbasis bietet.

Literatur

- [1] L. Pallottino, E. Feron, and A. Bicchi. Conflict resolution problems for air traffic management systems solved with mixed integer programming. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 3(1):3-11, March 2002.
- [2] A. Richards and J. P. How. Aircraft trajectory planning with collision avoidance using mixed integer linear programming. In *Proc. American Control Conference*, 2002.
- [3] M.G. Earl and R. D'Andrea. Iterative MILP Methods for Vehicle Control Problems. In *IEEE Conference on Decision and Control*, pages 4369-4374, 2004.
- [4] A. U. Raghunathan, V. Gopal, D. Subramanian, L. T. Biegler, and T. Samad. Dynamic optimization for 3d conflict resolution for multiple aircraft. *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 27(4):586-594, 2004.
- [5] T. Fahle, R. Feldmann, S. Götz, S. Grothklops, and B. Monien. The aircraft sequencing problem. In L. Wegner R. Klein, H.-W. Six, editor, *Lecture Notes in Computer Science: Computer Science in Perspective: Essays Dedicated to Thomas Ottmann*, pages 152-166. Springer-Verlag, July 2003.
- [6] T. Lemaire, R. Alami, S. Lacroix: A distributed tasks allocation scheme in multi-UAV context. *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, New Orleans, LA (USA), April 2004.
- [7] K. Helsgaun. An effective implementation of the Lin-Kernighan travelling salesman heuristic. *DATALOGISKE SKRIFTER (Writings on Computer Science)* 81, Roskilde University, 1998.
- [8] D. Applegate, R. Bixby, V. Chvatal, and W. Cook. Concorde tsp solver. Website <http://www.tsp.gatech.edu/concorde.html>, January 2005.
- [9] O. von Stryk, M. Glocker. Numerical mixed-integer optimal control and motorized traveling salesman problems. *APII - JESA (Journal européen des systèmes automatisés - European Journal of Control)*, 35(4):519-533, 2001.
- [10] M. Glocker. A decomposition approach for optimal control problems with integer inner point state constraints. In *Proc. Appl. Math. Mech. (PAMM)*, volume 4, pages 608-609, December 2004.