

Sequential Monte Carlo methods in air traffic management

Doctoral Thesis

Author(s):

Lymperopoulos, Ioannis

Publication date:

2010

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006159564>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Dissertation ETH Zürich No. 19004

Sequential Monte Carlo Methods in Air Traffic Management

A dissertation submitted to
ETH Zürich

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

IOANNIS LYMPEROPOULOS

Dipl.-Ing, University of Patras, Greece
born 11.04.1981 in Athens
citizen of Greece

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. John Lygeros, examiner
Prof. Dr. Fredrik Gustafsson, co-examiner

2010

Abstract

Demand for air transport services is constantly rising all over the world creating new routes of heavy traffic and exercising an additional pressure on the already existing ones. The current Air Traffic Management (ATM) system, rigidly built around human controllers and older concepts of operations, is put under severe strain. The expected future growth requires drastic changes in infrastructure and technology to conserve and improve the current levels of safety and efficiency. Novel automation and Decision Support Tools (DST) are required to alleviate the workload of air traffic controllers and provide new ways for handling the increased traffic demand.

Accurate Trajectory Prediction (TP) plays a fundamental role in advanced air traffic control and management operations. Uncertainty about the future position of the aircraft constrains the growth of airspace capacity since large separation margins are required to ensure safety. Wind forecast errors are a core source for this uncertainty, because commercial aircraft fly level with constant airspeed, instead of constant ground-speed, for fuel efficiency reasons. We demonstrate how to decrease uncertainty about forecasts with the use of ground radar measurements from multiple aircraft.

A hybrid stochastic model that captures the dynamics of multiple aircraft, equipped with a 3D flight management system is developed. Aircraft follow a predefined flight plan under disturbances from varying wind and atmospheric conditions. Wind forecast errors are modeled as a state space system that evolves with time and is spatially correlated. The correlation of the wind uncertainty allows for the creation of probabilistic maps that represent the difference between the wind forecast and the real wind conditions. Enhanced knowledge about the current wind situation in the airspace of interest can be used for improved TP.

Sequential Monte Carlo Methods (or particle filters) are used to filter the incoming ground radar measurements and to provide estimates for the state of the aircraft and the wind. The situation is complicated by the fact that aircraft dynamics are nonlinear and wind is represented by a large number of states at each location where it is evaluated. Conventional particle filters can provide reasonable approximations to the filtering problem, when very few aircraft are involved, at the expense of heavy computational burden. However, in order to sense the wind in different places and build a wind map that captures uncertainties all over the airspace, measurements from multiple aircraft are required.

Conventional algorithms have great difficulties in assimilating such a large amount of information under this formulation. A novel algorithm is developed, called Sequential Conditional Particle Filter (SCPF) that aims to take advantage of the structure of the situation. SCPF treats the linear and nonlinear parts of the system separately, filters the measurements sequentially and conditions the probabilistic wind map according to the spatiotemporal correlation of the wind forecast errors. The effectiveness of the novel algorithm is demonstrated on feasibility studies involving multiple aircraft, from one to several hundred.

Various air traffic management applications can take advantage of SCPF. TP lies at the heart of most Conflict Detection (CD) algorithms. By comparing the predicted trajectories

of different aircraft against each other, we can detect real threats while avoiding false alarms. We demonstrate here how SCPF can enhance CD performance over the simple use of meteorological forecasts. We show also how multiple aircraft can improve efficiency in CD even further.

Finally, the particularly challenging problem of joint parameter and state estimation is addressed as well. For air traffic management applications, considered here, we assume that the aircraft airspeeds are not available to the air traffic controllers. Radar measurements have now to be used both for estimating the wind and aircraft states like before and for calibrating the unknown parameters. We develop practical methods for augmenting SCPF in order to handle this problem. Simulation studies show how SCPF manages to improve trajectory prediction while also identifying the unknown aircraft airspeeds.

Zusammenfassung

Die Nachfrage nach Lufttransportdienstleistungen steigt stetig auf der ganzen Welt, immer mehr Luftstrassen kämpfen mit sehr dichtem Verkehr und bereits stark beflogene Routen werden noch mehr belastet. Das momentane Air Traffic Management (ATM) System, in welchem der menschliche Controller ein fester Bestandteil ist und das auf älteren Betriebskonzepten beruht, stösst an seine Belastungsgrenze. Das erwartete Wachstum erfordert erhebliche Veränderungen in Bezug auf die Infrastruktur und Technologie, um den momentanen Stand der Sicherheit und Effizienz zu wahren oder zu verbessern. Neue Automatisierung und Decision Support Tools (DST) werden gebraucht, um die Last der Fluglotsen zu erleichtern und um neue Wege zu ermöglichen, das erhöhte Verkehrsaufkommen zu handhaben.

Die genaue Trajektorienplanung (TP) spielt eine fundamentale Rolle in der fortgeschrittenen Flugsicherung und dem fortgeschrittenen ATM. Das Wachstum der Flugraumkapazität wird durch die Unsicherheit über die zukünftige Position des Flugzeugs eingeschränkt, da generell grosse Distanzmargen notwendig sind um, Sicherheit zu gewährleisten. Vorhersagefehler des Winds sind eine Hauptquelle für diese Unsicherheit, da Verkehrsflugzeuge aus Effizienzgründen mit konstanter relativer Geschwindigkeit zur Luftgeschwindigkeit anstatt zur Bodengeschwindigkeit fliegen. Wir zeigen, wie die Unsicherheit der Vorhersagen durch den Einsatz von Bodenradarmessungen von mehreren Flugzeugen reduziert werden kann.

Ein hybrides stochastisches Modell wird entwickelt, welches die Dynamiken mehrerer Flugzeuge, ausgestattet mit einem 3D Flug-Management-System, beschreibt. Die Flugzeuge folgen einer vorgegebenen Trajektorie unter dem Einfluss von Störungen, verursacht durch sich ändernde Wind- und atmosphärische Bedingungen. Fehler in der Vorhersage der Windbedingungen werden in einem sich zeitlich verändernden, räumlich korrelierten Zustandsraum modelliert. Die Korrelation von Windunsicherheiten erlaubt die Erstellung von probabilistischen Karten, welche den Unterschied zwischen der Windvorhersage und den tatsächlichen Windbedingungen wiedergeben. Die umfangreichere Kenntnis der gegenwärtigen Windsituation im interessierenden Luftraum kann genutzt werden, um die Trajektorienvorhersage zu verbessern.

Sequentielle Monte Carlo Methoden (oder Partikel-Filter) werden verwendet, um die eintreffenden Bodenradarmessungen zu filtern und Zustandsschätzungen des Flugzeuges und des Winds zu liefern. Dies wird verkompliziert durch die Nichtlinearität der Flugzeugdynamik sowie dadurch, dass der Wind an jedem Ort, an dem er evaluiert wird, durch eine grosse Anzahl an Zuständen dargestellt wird. Konventionelle Partikel-Filter bieten gute Approximationen des Filter-Problems, allerdings nur, wenn sehr wenige Flugzeuge involviert sind und unter hohem Rechenaufwand. Um jedoch den Wind an verschiedenen Orten zu erfassen und eine Windkarte zu erstellen, die die Unsicherheiten des gesamten Luftraums darstellt, benötigt man Messungen von zahlreichen Flugzeugen.

Konventionelle Algorithmen haben grosse Schwierigkeiten, eine so grosse Menge an Informationen wie in dieser Formulierung zu verarbeiten. Daher wird hier ein neuer Algorithmus entwickelt, der sogenannte Sequential Conditional Particle Filter (SCPF), der sich die Struktur des Problems zu Nutze macht. SCPF behandelt die linearen und nichtlinearen

Teile des Systems einzeln, filtert sie Messungen sequentiell und konditioniert die probabilistische Windkarte je nach raumzeitlicher Korrelation der Windvorhersagefehler. Die Effektivität des neuen Algorithmus wird in Durchführbarkeitsstudien geprüft unter Verwendung von mehreren Flugzeugen, von einem bis zu mehreren hundert.

Zahlreiche ATM-Anwendungen können von SCPF profitieren. Trajektorienplanung liegt im Zentrum der meisten Conflict Detection (CD) Algorithmen. Durch Vergleich der vorhergesagten Trajektorien von unterschiedlichen Flugzeugen miteinander, können Bedrohungen erkannt und Fehlalarme vermieden werden. Es wird hier gezeigt, wie SCPF die CD Performance im Vergleich zur simplen Verwendung von Wetterprognosen verbessern kann. Weiterhin wird demonstriert, wie mehrere Flugzeuge die Effizienz von CD weiter steigern können.

Schliesslich wird das besonders schwierige Problem der gleichzeitigen Parameter- und Zustandsschätzung adressiert. Für ATM-Anwendungen, wie hier betrachtet, wird angenommen, dass die Flugzeugwindgeschwindigkeiten für die Fluglotsen nicht verfügbar sind. In dem Fall müssen Radarmessungen sowohl für die Zustandsschätzung des Winds und des Flugzeugs genutzt werden als auch für die Kalibrierung der unbekannt Parameter. Simulationsstudien zeigen, wie SCPF die Trajektorienplanung verbessert, während es gleichzeitig die unbekannt Flugzeuggeschwindigkeiten identifiziert.