3106 航空機の半自動緊急着陸システムの開発

Development of Semi-automatic Emergency Landing System for Aircraft

○小松雄高（東大院） 鈴木真二（東大院） 増位和也（宇宙機構）

Yutaka KOMATSU, the University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo

Shinji SUZUKI, the University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo

Kazuya MASUI, Japan Aerospace Exploration Agency, Osawa 6-13-1, Mitaka-shi, Tokyo

The algorithm for on-line flight path optimization for emergency landing of aircraft and its flight experiment are discussed in this paper. On-line optimal flight path generation problem is transformed into the state-space search problem and the Tabu Search method with Random Moves is combined to optimize each segment of the state-space search in real-time. We checked the effectiveness of the proposed algorithm in flight simulation, then the plan for the flight experiment scheduled in this October is illustrated. The generated flight path is shown to a pilot in "Tunnel-in-the-Sky" Display, and indicates guidance for emergency landing to the pilot.

Key Words : Flight Path Optimization, On-line Control, Simulation, Flight Experiment

1. 研究の背景と概要

航空機を最適な飛行経路に沿って目的地へ誘導することは、安全かつ経済的な運航をする上で重要な課題である。ここで言う「最適」とは、ある評価関数の値が最大または最小になることであり、その評価関数は飛行時間や消費燃料等から与えることが多い。

現在、大型旅客機を中心に搭載されている飛行管理システム (Flight Management System:FMS) では、目的地までの飛行時間や消費燃料、機体重量等を考慮し、最適な飛行経路に沿ってのフライトを算出する。しかし、飛行中に事故や故障が発生するなど飛行環境が大きく変化した場合には現行の FMS では対応することができず、事故や故障の状況に応じて、航空機を付近の空港へ緊急着陸させるための最適な飛行経路をオンラインで生成する手法の確立が期待されている¹⁾²⁾。特に、緊急事態ではパイロットに心理的圧力がかかるため飛行経路の自動生成による運航支援は重要な課題であり、本研究ではこのような状況における実時間での最適飛行経路の生成、およびそれに沿った航空機の誘導を目的とした緊急着陸システムの開発について考察を行う。

本稿ではまず前半に、前述の目的を達するために本研究で構築したオンライン飛行経路最適化のアルゴリズムについて概説する。本研究では、RTA*アルゴリズム³⁾と R-TABU 探索法⁴⁾の2つの手法を組み合わせることにより、飛行経路のオンライン最適化アルゴリズムの構築を目指した。RTA*アルゴリズムによって最適制御問題は状態空間探索問題に変換され、「ヒューリスティック」と呼ばれる経験則を利用して効率的なオンライン探索が行われる。また、非線形計画問題の一解法である R-TABU 探索法を用いることにより、各展開節点の高速な探索を行い、実時間内の最適化を目指す。生成した最適飛行経路に追従して航空機を誘導するためには、特異摂動法を併用した逆ダイナミクス法⁵⁾を適用して必要な制御入力を求める。

本稿の後半では、飛行シミュレーションを行うことによって、構築したアルゴリズムの有効性について検証し、独立行政法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の多目的実

証実験機 MuPAL- α ⁶⁾を用いて共同で行われるオンライン飛行経路最適化の実験の概要について触れる。この飛行実証試験では、緊急着陸システムの開発の第一段階として、オンラインで生成された最適飛行経路に沿ってパイロットの手動操縦によって航空機を目的地まで誘導する。将来的には操縦の完全な自動化や、事故機への適用も視野に入れ、自動緊急着陸システムに関する実験を進めていく予定である。

2. 飛行経路最適化に用いるアルゴリズム

2.1. RTA*アルゴリズム

RTA*アルゴリズム³⁾は状態空間探索問題をオンラインで解くための一解法である。

状態空間探索問題とは Fig.1 に示すように初期状態と目標状態を含む可能な状態の集合である「状態集合」の中で、節点の展開を繰り返すことによって初期状態から目標状態へ至るまでに発生するコストが最小となる経路を探索する問題と定義される。航空機の飛行経路最適化では通常「コスト」は飛行時間や消費燃料などの評価関数に対応する。RTA*アルゴリズムでは状態空間探索問題を解く際に「ヒューリスティック」と呼ばれる先験的、直感的な経験則を用い、探索を効率的に行うのが特長である。

Fig.1 State-space search problem

2.2. R-TABU 探索法

R-TABU 探索法⁴⁾は探索領域を大きさの異なる複数の領域に分け、ランダムな探索を行う非線形計画問題の一般法である。Fig.2 のように、初期解の周辺にランダムな試行解を発生させ、評価関数が最良となる解を次の試行の初期解とすることで、試行を進めるごとに解が改善されていく。R-TABU 探索法は大域的最適解を探索する能力を持つと同時に、乱数を用いて解を発生させるため高速な探索が可能で、オンライン最適化に寄与することができる。

Fig.2 Tabu Search method with Random Moves

2.3. 逆ダイナミクス法

与えられた飛行経路に沿って航空機を誘導するための制御入力（エンジン推力、舵角）を求めるためには、逆ダイナミクス法⁵⁾を用いる。Fig.3 は航空機の各状態量をタイムスケールに応じて分類したものであるが、ここでは特異摂動法を併用することにより機体のダイナミクスをタイムスケールの大きさごとに分割し、各々のサブシステムごとにフィードバック制御系を組む。これにより機体モデル化誤差や外乱、ノイズなどに対するロバスト性を補うことができる。

Fig.3 Time-scale separated aircraft dynamics

3. 飛行経路最適化アルゴリズムの概要

ここでは前節で述べた3つのアルゴリズムを利用して、オンラインで飛行経路を最適化するアルゴリズムの概要について触れる。

3.1. 飛行経路の構成

各節点を補間する飛行経路の要素には次のような三角関数の級数を用いる。

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^N (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t)$$

$$y(t), z(t) \text{ も同様}$$

3.2. 飛行経路の展開

Fig.4 に飛行経路を展開する際の様子を示す。

Fig.4 Expansion of flight path

現在の節点 n における位置、速度ベクトルが与えられたときに、先の子節点 n_i における位置、速度ベクトル、および節点を補間する三角関数の級数を R-TABU 探索法によって最適化することにより、評価関数の値を最小化する飛行経路を決定する。

3.3. アルゴリズムの概要

以上のようにして構成したアルゴリズムの概要を Fig.5 に示す。アルゴリズム全体が RTA*アルゴリズム、R-TABU 探索法、逆ダイナミクス法に大きく区分される様子がわかる。

Fig.5 On-line flight path optimization algorithm

4. 飛行シミュレーション

前節で構築したアルゴリズムによりオンラインで飛行経路を生成することが可能であることを検証するために、ここでは飛行シミュレーションを行う。

4.1. シミュレーションの設定

機体モデルとして宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の多目的実証実験機 MuPAL- α ⁶⁾ (Fig.6) を用いる。

Fig.6 MuPAL- α (JAXA)

また、初期条件と終端条件を Table.1 のように設定し、飛行中の各状態量に対する制約条件を Table.2 のように与える。

Table.1 Initial and final condition

	unit	Initial	Final
R_x	m	10000	0
R_y	m	-15000	0
R_z	m	1000	100
velocity V	m/s	61.7	61.7
flight path angle γ	deg	0	-1
azimuthal angle ψ	deg	170	90

Table.2 Constraints during the flight

minimum	parameter	maximum
46.3 [m/s]	< velocity V	< 77.2 [m/s]
-5 [deg]	< attack angle α	< 15 [deg]
-20 [deg]	< bank angle ϕ	< 20 [deg]
-10 [deg]	< pitch angle θ	< 20 [deg]
0.5 [G]	< load factor n	< 1.5 [G]
0 [m]	< altitude h

Fig.7 Constraints on thrust T_h

推力 T_h の上下限値は速度 V の関数として線形近似し、Fig.7 のように制限を与えた。制約を満たさなかった場合は、ペナルティ関数法によって評価関数に付加する。以上のような設定のもとで、評価関数として飛行時間を最短とするような飛行経路を、次の2通りについてオンライン最適化計算で生成した。

- 正常な機体の場合
- 事故・故障等の発生により、バンク角 ϕ が $-7[\text{deg}] < \phi < 20[\text{deg}]$ に制限された場合

4.2. 結果

Fig.8 に生成した飛行経路を、Fig.9、Fig.10 に速度、推力の時間変化をそれぞれ示す。実線が正常な機体の場合、破線がバンク角を制限された場合である。正常な機体の場合、誘導開始後から右旋回、左旋回と続き、337.3秒で終端条件に至っているが、左バンク角が -7 度に制限されると、右旋回のみを行う飛行経路を通して終端条件へアプローチし、正常な機体に比べて飛行時間が40秒近く長くなることがわかる。

また、飛行時間を最小化する飛行経路を生成したため、どちらのケースも誘導開始直後から推力を上げ、上限値付近の速度 ($77.2[\text{m/s}]$) で飛行を続けている様子がわかる。

以上の通り、構築したアルゴリズムが飛行状況や状態量制約に応じて適切な解を生成することがわかった。

Fig.8 Flight time minimized path

Fig.9 Velocity

Fig.10 Thrust

5. 結論

本研究では、オンラインで航空機の最適飛行経路を生成するために、RTA*アルゴリズム、R-TABU探索法、逆ダイナミクス法の3つのアルゴリズムを併用することにより、リアルタイム性、最適性、ロバスト性の性能を追求した手法について検討を行った。

飛行シミュレーションの結果の通り、本研究で提案した最適化アルゴリズムがリアルタイムの飛行経路生成問題に対して有効に機能することが検証されたとと言える。

6. 多目的実証実験機 MuPAL- α を用いたオンライン飛行経路最適化の実験計画

前節の飛行シミュレーションの結果を受けて、現在、独立行政法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の多目的実証実験機 MuPAL- α を用いて、オンラインで飛行経路の最適化を行い、航空機を目的の空港まで緊急着陸させるための実験を計画している。この実験は東京大学と宇宙航空研究開発機構の共同実験として今年に行われており、本学会の発表時には結果を報告できることになると思う。

Fig.11 Configuration of experiment system

6.1. 実験の概要

実験は、4 節で用いた MuPAL- α (Fig.6) の機体を用いて行われる。本研究で構築したアルゴリズムを用いて、飛行中に目的の空港までの最適飛行経路をリアルタイムで生成し、その経路に沿って航空機を飛行させる。

今回の実験は、生成した飛行経路に沿って航空機を自動操縦で誘導するのではなく、パイロットの手動操縦によって行われる。そのために、飛行経路を Fig.12 に示すようにトンネル型経路表示⁷⁾としてパイロット前面の 10inch ディスプレイに表示し、パイロットがこの表示に従ってトンネル型の経路を通過するように機体を操縦することになる。

また、生成された飛行経路は時間を含む 4 次元の情報で与えられるため、パイロットには 10inch ディスプレイの左上に、各 Way Point の通過速度が指示され、この速度に合わせて航空機を飛行させることで、各 Way Point を指定された時刻で通過することができる。

Fig.12 "Tunnel-in-the-Sky" Display

6.2. 実験システムの構成

本実験のシステム構成の概要を Fig.11 に示す。誘導開始時刻での位置および速度を GPS または INS などのセンサを用いて取得し、あらかじめ与えられた目的地の位置および通過速度の情報からオンボードの誘導情報生成計算機を用いて最適飛行経路を生成する。この飛行経路から、一定時間ごとに各 Way Point の位置および通過速度の情報がコックピットの 10inch ディスプレイ上に時々刻々と更新され、パイロットに表示される。パイロットはこのディ

スプレイに表示される飛行ガイダンスの情報を用いて、最適飛行経路に沿った飛行を実現できるように FBW システムによる操縦を行う。

6.3. 今後に向けて

本実験を通じて、シミュレーション上で実現されたことが実機を用いて的確に機能するか確認されることになる。また、将来的にはこのように最適飛行経路を緊急着陸の際にパイロットにガイダンスとして表示するといった技術に適用することも考えられるが、その際には、算出された最適飛行経路に沿った飛行をパイロットがマニュアル操縦で実現できるか、パイロットに過度のワークロードを与えないか、パイロットに対するガイダンス表示の内容および形式が適当であるか、などの各技術的課題を評価項目としてさらに詳しく考察する必要がある。

6.4. 追記

本実験は、経済産業省の委託により、社団法人日本航空宇宙工業会のもとで 2002 年度より行われている「将来型航空機運航自律制御支援システム技術研究調査」の一環として行われている。

参考文献

- 1) 鈴木真二, 河村文博, 増位和也, 荒川憲明: 事故航空機の自律制御支援システムの研究計画, 2003 年自動車技術会春季学術講演会講演集 20035099, 2003
- 2) 植田聡史, 鈴木真二: 4 次元誘導を利用した航空機の飛行経路の最適化, 第 39 回飛行機シンポジウム講演集, 2001, pp.889-894
- 3) Korf, R.E.: Real-Time Heuristic Search, Artificial Intelligence, Vol.42, No.2-3, 1990, pp.189-211
- 4) Hu, N.: Tabu Search Method with Random Moves for Globally Optimal Design, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.35, 1992, pp.1055-1070
- 5) 馬場順昭, 宮本盛慈: 与えられた経路のための飛行制御系, 日本航空宇宙学会誌, 38, 440(1990), pp.494-501
- 6) 坂東俊夫, 塚野雄吉, 増位和也, 石川和敏, 稲垣敏治, 前川昭二, 辻本隆, 辻浩敏, 篠田直正: 多目的実証実験機 (MuPAL- α) の開発と運用, 日本航空宇宙学会第 34 期年会講演会講演集, 2003, pp.17-24
- 7) Funabiki, K., Muraoka, K., Terui, Y., Harigae, M. and Ono, T.: In-flight Evaluation of Tunnel-in-the-Sky Display and Curved Approach Pattern, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 1999