

風環境下での動的計画法による衝突回避の検討

A Study of Collision Avoidance by Dynamic Programming under Wind Environment

○川井寛文<sup>1</sup>, 佐々修一<sup>2</sup>, 安部明雄<sup>2</sup>

\*Hirofumi Kawai<sup>1</sup>, Shuichi Sasa<sup>2</sup>, Akio Abe<sup>2</sup>

Abstract: Airplanes mainly use fossil fuels for operation, which is a major cost for airlines, and many studies have been conducted to reduce fuel consumption. In addition, with the expansion of air transportation demand, air route congestion and aircraft interference have occurred. For these reasons, it is important to avoid interference between aircrafts and to reduce fuel consumption. In this study, we obtain the optimal trajectory to minimize the fuel when interference with the planned trajectories of other aircraft occurs in a wind environment.

1. はじめに

航空機は、運航のため主に化石燃料を使用し、航空会社の大きなコストとなっており、燃料消費量を削減する研究が多くなされている。また、航空輸送需要の拡大に伴って、航空路の混雑や航空機同士の干渉が発生している。これらのことから、航空機同士の干渉を回避かつ、燃料消費量を削減させることは重要である。加えて、昨今の研究・技術動向として、消費燃料を最小する軌道の導出に、風を外乱として扱わずに積極的に利用する研究が行われている。

これらの課題に対して、文献[1]では無風時の環境下で最適化された軌道が他の航空機の予定軌道と干渉が発生した際に自機が他機と十分な間隔を維持するために軌道を修正することを前提に、最適軌道を再生成して燃料や飛行時間に及ぼす影響がどのようなものか検討されている。

本研究では、この先行研究を基に、実際の運航に近い風環境下で他の複数の航空機の予定軌道と干渉が発生した際に最適軌道を生成して燃料最小となる軌道がどのようなものか検討する。

2. 最適軌道設計

本研究で取り扱う最適化問題について定式化を行う。航空機の軌道生成問題では質点近似運動方程式が度々用いられる。運動モデルを Figure1 に示し、運動方程式は縦の運動に限定し、式(1)~(4)のように状態変数は対気速度  $V$  及び高度  $h$  の 2 つとし、対応する制御入力として推力  $T$  と飛行経路角  $\gamma$  を与える。式中の  $V_w$  は風速である。式(5)において旅客機の飛行経路角の時間変化率は小さいために本稿では準定常近似として扱う。

$$\mathbf{x} = [h \quad V]^T, \mathbf{u} = [T \quad \gamma]^T \tag{1}$$

$$dx/dt = V \cos \gamma \tag{2}$$

$$dh/dt = V \sin \gamma \tag{3}$$

$$m \frac{dV}{dt} = T - D - mg \sin \gamma - m \frac{dV_w}{dt} \cos \gamma \tag{4}$$

$$mV \frac{d\gamma}{dt} = L - mg \cos \gamma + m \frac{dV_w}{dt} \sin \gamma \tag{5}$$

$$J = \int_{t_0}^{t_f} cT dt \tag{6}$$

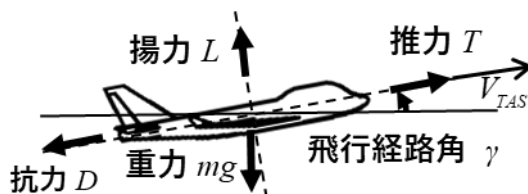


Figure 1. Aircraft model

式(6)は評価関数であり、本稿では燃料消費量を示す燃料流量係数  $c$  (機種に依存) と推力  $T$  の積を時間で積分したものである。

最適軌道の算出には大域的最適解を求めることが可能な動的計画法を用いて導出する。一方で、本手法では状態変数と制御入力の数が一致しなければならない。通常、独立変数を時刻  $t$  で表すが、ダウンレンジ  $x$  を独立変数として扱うことで、状態変数と制御入力の数を一一致させている。

3. 衝突回避

本稿で用いる衝突回避の条件は、文献[1]を参考に設定する。Figure2 のように複数の航空機が干渉する場合には、片方の航空機が高度を変更して、衝突の回避を行う。ここで、水平方向の回避距離  $d_0$  を  $5nm(8.05km)$ 、高度方向の回避高度  $h_0$  を  $1000ft(305m)$  とする。この回避エリアには近づけないこととして、最適軌道を算出する。

1 : 日大理工・院 (前)・航宇 2 : 日大理工・教員・航宇

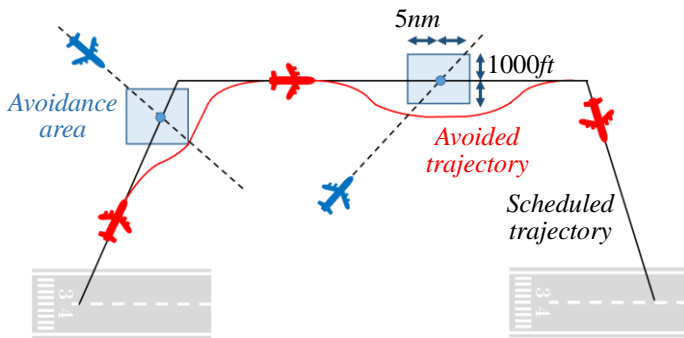


Figure 2. Image of interference

4. 水平飛行における最適化シミュレーション結果

本節では水平飛行のシミュレーション結果について述べる。飛行距離を 200[km]，初期高度と終端高度を 12500[m]，初期対気速度と終端対気速度を 128[m/s]に設定した。動的計画法における格子の分解能を Table1 に示す。機体性能モデルは EUROCONTROL が公表している BADA モデル<sup>[2]</sup>を用いる。シミュレーション結果を Figure3 に示す。

Table 1. Calculation condition of level flight

Variable	Lower	Upper	
Flight Distance $x$ [km]	0	200	$\Delta x = 5.0$
Altitude $h$ [m]	9500	12500	$\Delta h = 100$
Air Speed $V$ [m/s]	128	240	$\Delta V = 3.7$

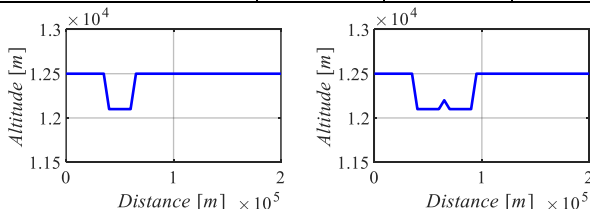


Figure 3. Optimal trajectory of level flight

Figure3 の左側は、1 箇所回避エリア  $(x, h) = (50, 12500)$  を設定した最適軌道である。右側は、2 箇所目の回避エリア  $(x, h) = (80, 12500)$  を追加したときの最適軌道である。回避エリアが 30[km]離れると、航空機は燃料消費量を減少させるために、高度を上昇・下降している。これは高高度のほうが燃料消費量を低減できると考えられる。回避が 1 箇所の場合と比較して、燃料と飛行時間は 1.37[kg]，0.33[sec]の増加である。

5. 飛行全体における最適化シミュレーション結果

本節では、離着陸を除く飛行距離を 900[km]，初期高度と終端高度を 3000[m]，初期対気速度と終端対気速度を 128[m/s]に設定した。ここでは、風環境を考慮しており、定常風の追い風  $V_w = 50, 30, 15$ [m/s]を高度ごとに導入している。動的計画法において、風速は対気速度

の格子の中に入れて求めている。また、対気速度の格子の分解能は Table1 と同様である。飛行距離の分解能は  $\Delta x = 9.0$ で、高度は  $3000 \leq h \leq 12500$  の範囲で分解能は  $\Delta h = 317$ である。シミュレーション結果を Figure4,5 に示す。

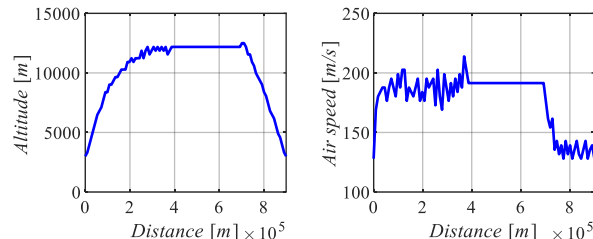


Figure 4. Optimal trajectory (No avoidance area)

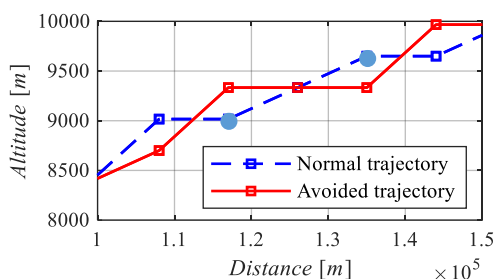


Figure 5. Comparison of optimal trajectories

Figure4 は、回避エリアを含まない場合の燃料消費量最小の最適軌道である。この結果から、2 箇所の回避エリアの中心(図中の●)を  $(x, h) = (117, 9017), (135, 9650)$  に設定した。Figure5 は、回避エリアを設定したときの最適軌道である。1 箇所目の回避エリアは元の軌道より上側を通過し、2 箇所目は元の軌道より下側を通過している。狭い区間に回避エリアが連続した場合も、高度を調整し、燃料消費量を低減する軌道を通り抜けている。回避がない場合と比較して、燃料と飛行時間は 1.2[kg]，6.7[sec]の増加である。

6. まとめ

複数航空機の衝突を回避するための検討をした。本稿では、風環境を考慮した動的計画法を用いて、複数の回避エリアを設定し、燃料消費量を低減する最適軌道を導出できた。

7. 参考文献

[1] 宮沢与和, 原田明徳, ナヴィンダ キトマル ビグラマシンハ, 宮本侑斗, 小塚智之: 動的計画法による干渉解消方策の一検討, 第 51 回飛行機シンポジウム, 香川, 2013.  
 [2] EUROCONTROL Experimental Center : User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) revision3.10, EEC Technical / Scientific Report No.12/04/10-45.