

6. 継続上昇運航(CCO)に関する研究

横浜国立大学 ※上野 誠也
航空交通管理領域 虎谷 大地

1 まえがき

近年の航空旅客需要の急激な増加に伴い、航空機の定時運航には空港周辺の航空交通流の混雑緩和が急務の課題となった。航空運航会社の立場からは消費燃料の低減が大きな課題であり、航空管制官の立場からはワークロードの軽減が課題となっている。一方、空港周辺の環境保全の立場からは、航空機による排出ガスや騒音が周辺住民に与える影響を最低限に抑えることが要求されている。このような課題を軽減する最適経路を管制中に求めることができれば、課題の解決に大きく貢献できる。

継続上昇運航(CCO)はこれらの課題を解決する運航方式として注目され、一部の空港で導入されている。しかし、CCOで離陸した航空機と降下機との干渉が発生し、CCOを上昇途中で中止されるケースが報告されている。CCOで上昇中の航空機には、降下機との間隔を保ちつつ上空の航空路を巡航中の航空機との安全な合流を満たす飛行経路の提供が必要がある。

本報告は、CCOで上昇する航空機の単機および複数機の飛行経路の最適化を最適制御問題として扱い、数値解を求めるアルゴリズムを示すことを目的とする。まず、第2章で時間と空間を同じ変数として扱う時空間座標系について紹介する。そして、第3章では降下機との衝突回避を考慮した経路を単機の経路最適化問題として求める。さらに、第4章では複数機の飛行順序の変更を含めた飛行経路の最適化を紹介する。

2 航空機モデル

2.1 時空間座標系

時空間座標系とは、航空機の飛行経路に沿った経路長を独立変数とし、航空機の位置を表わす座標系と時間を同じように従属変数として扱う座標系である。この座標系を用いることにより、空間と時間を同じ変数として扱うことがで

きる。後に述べる降下機との衝突回避においては、時間間隔を空けても空間間隔を空けても両機の干渉は避けることができる。時空間座標系ではどちらの間隔を用いるかを最適化の過程で最適な方を選択することになる。

本節での説明は、簡単のために垂直面内の運動に限定した運動方程式を用いる。三次元運動を記述する運動方程式でも同様に時空間座標系を定義することができる。航空機を質点と仮定した垂直面内の運動方程式は次式で与えられる。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} V \\ \gamma \\ x \\ H_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (Thr - D - W \sin \gamma) / m \\ (L - W \cos \gamma) / (mV) \\ V \cos \gamma \\ V \sin \gamma \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし、状態変数は速度 V 、経路角 γ 、水平座標 x 、高度 H_p である。右辺には図1に示す航空機に作用する力が記述されており、推力 Thr 、抗力 D 、重力 $W(=mg)$ 、揚力 L である。作用する力は状態変数の関数で記述される変数もあるが、本稿では詳細な説明は省略する。

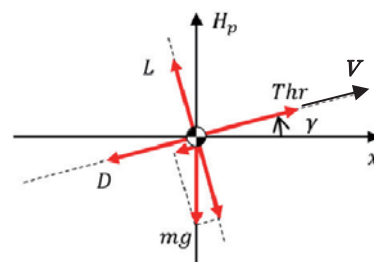


図1 航空機に作用する力

時空間座標系では飛行経路に沿った経路長 s を独立変数として扱う。時間 t との関係は次式である。

$$ds = V dt \quad (2)$$

これを用いれば、式(1)は次式となる。5番目の状態変数として時間 t が含まれている。時空間座標系で表した水平面内の飛行経路を図2に示

$$\frac{d}{ds} \begin{pmatrix} V \\ \gamma \\ x \\ H_p \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (T - D - W \sin \gamma) / (mV) \\ (L - W \cos \gamma) / (mV^2) \\ \cos \gamma \\ \sin \gamma \\ 1/V \end{pmatrix} \quad (3)$$

す。右側の垂直軸が時間軸となっており、4機の飛行経路が描かれている。

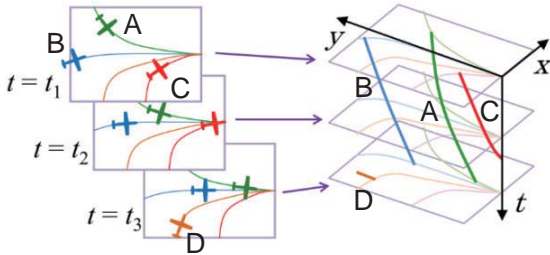


図2 時空間座標系(水平面内軌道の例)

2.2 スラストモデル

消費燃料の算出に用いるスラストモデルは、BADA(Base of Aircraft Data)に定義されたモデルを用いる。上昇中であれば最大推力と燃料流量は次式で定義されている。

$$Thr_{cl} = C_{Tc1} \left(1 - \frac{H_p}{C_{Tc2}} + C_{Tc3} H_p^2 \right) \quad (4)$$

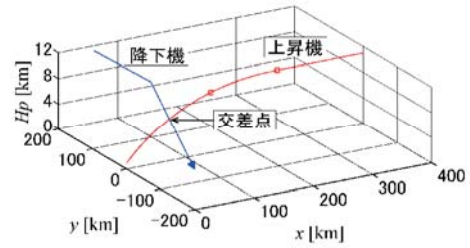
$$FF = C_{f1} \left(1 + \frac{V_{TAS}}{C_{f2}} \right) Thr \quad (5)$$

ただし、両式の $C_{Tc1}C_{f1}$ などは定数である。すなわち最大推力は高度の関数、燃料流量は推力と速度の関数となっている。

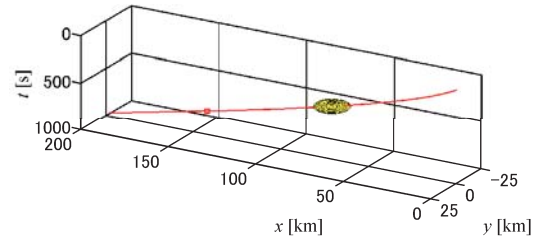
3 単機の軌道最適化

3.1 最適回避経路問題^[1]

航空機が CCO で上昇している経路に交わるように降下機の経路が存在している場合、両機には最小限の間隔が必要である。例えば、空間的には 5[nm]の間隔、時間的には 60[s]の間隔などである。この領域を時空間座標系で表現すると図3になる。図3b)の縦軸は時間を表しており、水平2軸は水平距離を表している。時空間座標系では、上昇機の飛行経路と降下機の飛行経路の交差点に楕円体で飛行制限領域として表現することができる。この制限の下で上昇機の最適経路を求める最適制御問題として定義で



a) 三次元空間での飛行経路表現



b) 時空間座標系での飛行領域制限

図3 衝突回避経路問題

きる。

降下機の飛行経路は与えられているものとして、上昇機のみ飛行経路の最適化を行った。上昇機の出発時間を遅延させると、時間的回避が有利となる。遅延時間と消費燃料の関係を表した結果が図4である。時間的回避の方が消費燃料が減る傾向があるため、出発時間の遅延と消費燃料のトレードオフを表した図である。

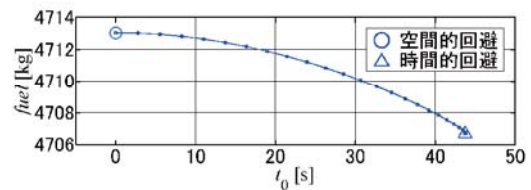


図4 出発時間の調整による消費燃料変化

3.2 実システムへの応用

最適制御問題は限られた時間区間の中で、限られた機体を対象として、消費燃料の最適化を行っている。しかし、実際の管制では、常に新たな機体が領域内に入り、対象としていた機体は領域から離れていく。すなわち、時間の区間

は無限に続き、対象とする航空機は常に変化している。このような問題に対しては、最適化を行う区間を時々刻々変化させるレシーディング・ホライズン誘導の考え方を応用することで対応できる。詳細は文献[2]に記載されているので本稿では説明を省略するが、この考え方で前述の最適飛行経路は実システムの応用が可能となる。

4 複機の順序と軌道の同時最適化

4.1 軌道順序の同時最適化手法

上昇機と降下機が混在した空域において、複数機の最適化問題を扱う場合、飛行経路の最適化だけでなく飛行順序の最適化も併せて行う必要がある。複数機が同一飛行経路に合流する場合や上昇機と降下機の飛行経路が交わる場合である。互いの干渉が生じる地点をここでは合流点と呼ぶ。互いの干渉がなければ、それぞれの機体は最適経路で合流点を最適な時刻に通過することになる。しかし、相互の干渉があれば、早期または遅延して合流点を通過することになる。当然のことながら、最適な時刻から通過時刻がずれるので評価関数は悪くなる。通過時刻と評価関数値を図示すると図5となる。本稿ではこの図を「評価関数曲線」と呼ぶ。

複数機の同時最適化であるから、それぞれの機体の評価関数曲線が存在する。例えば、3機が合流点を通過する場合は、図6に示すように3本の評価関数曲線が存在する。一方、3機が合流点を通過する時刻は指定された最小時間間隔を確保する必要がある。図6では最小時間間隔を Δt_{min} で表現している。従って、問題は最適飛行経路から求めた評価関数曲線に対して、最小時間間隔を確保した点の組合せの中で、評価関数値の総和が最小となる組合せを求めることになる。評価関数曲線は飛行経路の最適化であるので、連続変数の最適化である。一方、組合せの最適化は離散変数の最適化である。これらを同時に解くことが要求されるので、本稿では混合整数線形計画法を活用して解く手法を提案する。アルゴリズムの詳細は文献[2]を参照していただきたい。

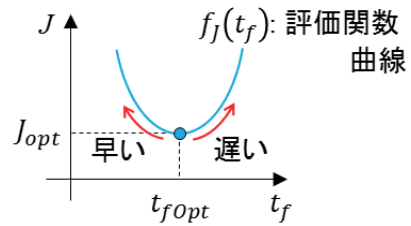


図5 評価関数曲線

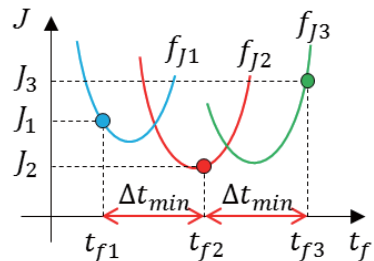


図6 評価関数曲線と最小時間間隔

4.2 合流問題^[2]

提案する手法を用いて、異なる地点を飛行する航空機が合流点を同一方向へ通過する問題を解く。境界条件としては図7に示すように、合流点から150[km]離れ、初期方位角が20[deg]ずつ異なる3機が60[s]の最小時間間隔を維持して合流する問題である。

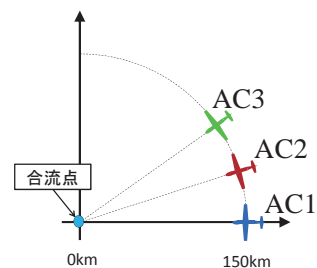


図7 合流問題の初期条件

この問題に対する評価関数曲線を図8に示す。旋回のために飛行経路が長くなるAC3ほど評価関数値の極小点が右に存在している。最適化の結果、最適順序はAC1→AC2→AC3となり、図8の□印の点が求められた。

同じ初期位置からAC1の開始時刻を6秒遅らせたケースを図9に示す。AC1の評価関数曲線が右側にシフトしている。この影響により、最適順序は変化し、AC2→AC1→AC3となった。評価関数の総和は僅かであるが、より低い順序が求められた。

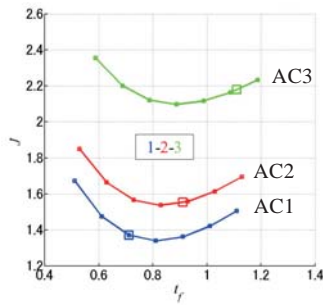


図8 合流問題における評価関数曲線

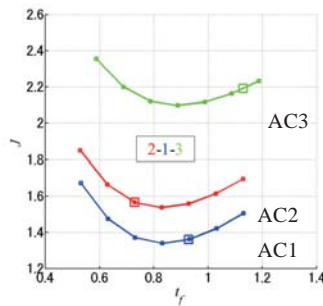


図9 評価関数曲線（AC1に遅れ）

4.3 実システムへの応用^[3]

本章で提案する手法を実際の飛行データに適用した例を示す。羽田へ降下する2機(*des1, des2*)と成田から離陸した2機(*cl1, cl2*)が洋上で交差する例である。図10に初期条件ならびに飛行経路を示す。合流点（洋上の交差点）における最小時間間隔を60秒と設定し、最適化を行った。

4機が全てB777と仮定して求めた評価関数曲線を図11に示す。本稿の提案手法を用いると、合流点の通過は*des1-cl1-des2-cl2*となった。一方、*cl2*の機種を変更し、大型機のB747とした場合の評価関数曲線を図12に示す。B747は消費燃料が多いので、評価関数は高くプロットされているが、最適点に比べて通過時間に対する評価関数の悪化が急激である。そのために、最適解はB747の最適点を優先的に選ぶ解が得られ、合流点の通過順序は*des1-cl1-cl2-des2*となった。機種の特性を把握した順序と経路の最適化が行われた結果を得ることができた。

5 まとめ

CCO機を対象に、最適飛行経路を求めるアルゴリズムについて検討を行った。時空間座標系を導入することで、時間的間隔と空間的間隔

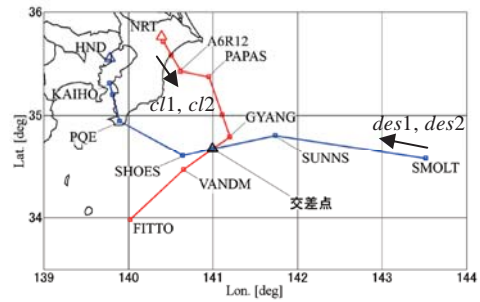


図10 実システム例の境界条件

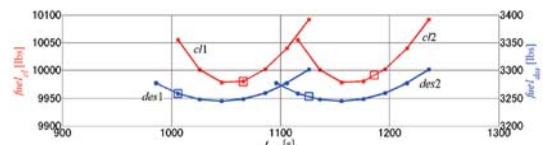


図11 評価関数曲線（全機B777）

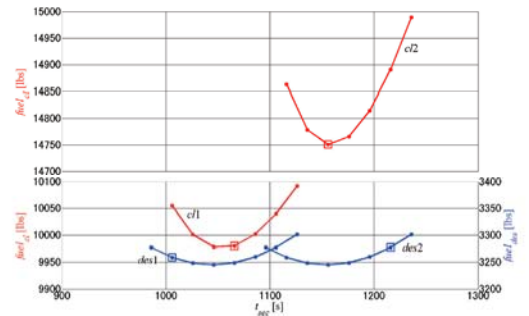


図12 評価関数曲線(*cl2*にB747)

を同時に扱うことができようになった。また、複数機の最適化では飛行経路のみならず順序の最適化も行うアルゴリズムを提案した。混合整数線形計画法を用いたアルゴリズムであるが、実システムへの応用例も確認できた。

参考文献

- [1] 虎谷大地, 上野誠也, 樋口丈浩, “空港周辺空域における上昇機のための最適な回避軌道に関する研究”, 航空宇宙技術, Vol.14, pp.105-112, 2015.
- [2] D. Toratani, S. Ueno, T. Higuchi, “Simultaneous Optimization Method for Trajectory and Sequence for Receding Horizon Guidance in Terminal Area”, SICE Journal of CMSI, Vol. 8, No. 2, pp.144-153, 2015.
- [3] 虎谷大地, 上野誠也, 樋口丈浩, “継続上昇・降下運航のための干渉回避手法に関する研究”, 航空宇宙技術, (印刷中)