

1 4.安全間隔を考慮した CCO (継続上昇運航)

横浜国立大学 ※上野 誠也

航空交通管理領域 平林 博子, 虎谷 大地

1 まえがき

航空旅客需要の急増を受けて、主要空港は許容量を最大限に活かす運用が要求され、様々な課題に直面している。航空管制の立場では安全間隔を維持しながらの定時運航が課題であり、運航会社の立場では消費燃料の低減が大きな課題である。一方、空港周辺の住民の立場では大気汚染や騒音被害などの環境負荷の低減が大きな課題となっている。空港からの離陸後に継続的に上昇を続ける運航手法である継続上昇運航 (CCO: Continuous Climbing Operation) は、これらの課題解決に有効であり、CARATS でも実現すべき課題に挙げられている。

しかし、混雑空港において CCO を実施すると、空港へ進入する降下機や空港から離陸する他の上昇機との間隔維持などの制約を受け、余裕の少ない CCO は安全確保のために中止せざるを得ない状況に陥る。離陸前に全ての機体の飛行経路が確定していれば、CCO の実施判断は容易であるが、実際にはパイロットの判断や気象条件によって各機体の飛行経路には不確実性が存在し、判断を難しくしている。

本研究はこのような不確実性が存在する中で、安全性を確保した上で、最適な飛行経路を短時間で求めるアルゴリズムを開発し、離陸時に CCO 実施の可否を判断する情報を提供することを目的とする。そのために、①不確実性のモデル化の提案、②CCO 可能性の判断指針の検討を行った。

2 不確実性のモデル化

2.1 確率密度関数の離散モデル

安全性を確保した CCO 機の上昇経路を求めるには、降下機との干渉が無い経路を求めなければならない。しかし、降下機の経路には気象条件などの不確実性が含まれており、CCO 機の経路と干渉する点の通過時間などが正確に示すことができない。すなわち、降下機の存在は

ある確率密度関数で表される確率事象として扱う必要がある。このような条件の下で CCO 機の上昇経路の最適化問題を定義すれば、評価関数内に確率密度関数が含まれ、次式となる。

$$J = \int_0^T \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} L(x, u, t, p(w)) dw \right\} dt \quad (1)$$

ただし、 w は確率密度関数が与えられている不確定パラメータであり、例えば風による降下機の速度のばらつきやパイロットの判断による降下開始点のズレなどがある。そして、 $p(w)$ が確率密度関数である。このように、評価関数が二重積分では、一般の最適制御理論が適用できず、CCO 機の最適軌道を求めることができない。そのために、不確定パラメータを離散化し、次式の評価関数を最小化する最適入力を求めることで準最適解を求めることが用いられる。

$$J = \int_0^T \left\{ \sum_{k=-N}^N \{ L(x, u, t, w_k) p(w_k) \Delta w \} \right\} dt \quad (2)$$

この評価関数は $2N+1$ 個の離散点のモデルを同時に解く問題を意味している。式(2)で式(1)を近似的に表現するには、不確定パラメータの個数は 100 のオーダー、すなわち、オリジナルの問題に対して 100 倍の次元数の問題を解く必要がある。一般に、最適化計算は次元数の 3 乗に比例する計算時間を必要とする。仮に 10ms でオリジナルの問題が解けたとしても、拡張された式(2)の問題は 10^6 倍の約 2 時間かかることになる。これは現実的な計算時間ではない。そこで、本研究では少ない離散点のモデルで式(1)を近似することを提案する。すなわち、評価関数を次式で与える最適制御問題を解いて、最適経路を求める手法の提案である。

$$J = \int_0^T \left\{ \sum_{i=1}^n \{ L(x, u, t, w_i) \rho(w_i) \} \right\} dt \quad (3)$$

ここでモデル数の n を 2 または 3 で式(1)を近似する提案である。これならば、計算時間は 1

秒以下で抑えられる。ただし、その時の w_i ならびに $\rho(w_i)$ をどのように決めるかが新たな課題として残されている。

2.2 シミュレーション条件

本稿では平面内運動の2機の干渉問題を扱う。実際の航空機は三次元軌道を飛行しているが、速度変化や経路角が微小ということとを考慮すると、2次元運動に近似できる。従って、方位角変更による回避を行うことを前提とし、干渉回避の成立の有無は、相対距離が安全距離：

$R[\text{km}]$ 以上確保されているか否かで判断する。

本稿で行ったシミュレーションに用いた初期条件ならびに各種条件を表1および表2に示す。両機は直交する経路上を飛行し、初期状態から約10分後に交差する条件である。相手機は直進し、自機のみが方位角変更で回避する。不確定性は相手機に存在するものとする。不確定パラメータ w_i は相手機の基準飛行速度からの速度誤差とし、正規分布とする。速度誤差の標準偏差が異なるケースを計算して、式(3)に含まれる w_i , $\rho(w_i)$ の妥当な値を求める。

2.3 2機によるモデル化

相手機を2機でモデル化したときの速度誤差 (w_i) と評価関数の重み (ρ) について検討結果を示す。基準飛行速度を V_0 とすれば、相手機は速度は V_0-DV の機体と V_0+DV の機体の2機が同時に飛行し、それらに対して自機の最適回避軌道を求める。この時、式(3)の評価関数値を「離散評価」と呼ぶ。一方、ここで求めた最適回避軌道に対して、式(2)を用いた評価関数値は求めることができる。これを「連続評価」と呼ぶ。離散評価と連続評価が一致する DV が妥当なモデルと判断できる。なお、2機モデルの場合は、両機の評価関数に掛る重み $\rho(w_i)$ は等しいと仮定している。

計算結果の一例を図1に示す。相手機に速度誤差の標準偏差が $6.0[\text{m/s}]$ の場合である。横軸が DV に相当し、 $1.0[\text{m/s}]$ 毎に求めた最適回避軌道に対する連続評価と離散評価がプロットされている。両者が一致するのは、離散モデルの DV が相手機に速度誤差の標準偏差に一致した時であることが示されている。

表1 初期条件

	自機	相手機
x座標[km]	0.0	-150.0
y座標[km]	-150.0	0.0
方位角[deg]	90.0	0.0

表2 シミュレーション条件

基準飛行速度 V_0 [m/s]	240.0
安全距離 R [km]	10.0
最大角速度 ω_{max} [deg/s]	2.16

2.4 3機によるモデル化^[1]

相手機を3機でモデル化したときの3機の速度誤差 (w_i) と評価関数の重み (ρ) について検討結果を示す。2機の分布では確率的な広がりを実現することはできるが、分布の中央にモデルが存在しない欠点がある。そのために3機目を分布の中央に配置し、確率密度関数の最大点にモデル機が存在する離散モデルを検討する。便宜上、モデルの3機をA機、B機、C機と呼ぶ。A機は速度 V_0-DV の機体、B機は速度 V_0+DV の機体、そしてC機は速度誤差が無い速度 V_0 の機体である。3機モデルの場合、速度誤差だけでなく評価関数に掛る重みのモデル化も必要である。3機の重みをそれぞれ、 X_A , X_B , X_C とする。重みの総和を1とし、対称性を考慮して X_A と X_B は等しいとする。従って、モデル化の不確定パラメータは、速度誤差 DV と重み X_A+X_B である。この2パラメータを変化させて最適回避軌道を求め、連続評価と離散評価を比較する手順は2機モデルの検討と同じ手順である。

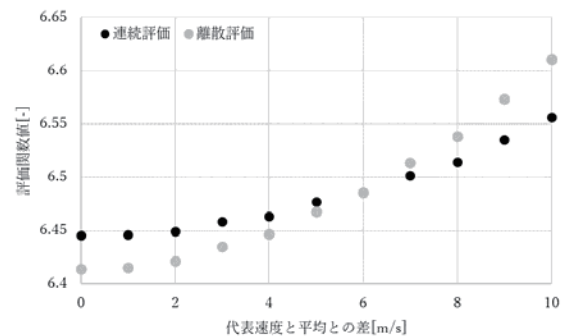


図1 評価関数値の比較(標準偏差 $6[\text{m/s}]$)

計算結果を図 2,3 に示す。速度誤差の確率分布の標準偏差が、4.0, 6.0[m/s]の 2 ケースである。連続評価と離散評価の差をカラーマップで表現している。図中に示されている黄色の線は、離散モデルの標準偏差を求めた時に、連続分布と同じ標準偏差を与える点である。速度誤差の連続分布は確率密度関数で与えられ、正規分布を仮定しているため、確率密度関数は次式で表すことができる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

式中の σ^2 が標準偏差の 2 乗値の分散である。一方、3 機モデルも分散が求められ、C 機は誤差が無い状態なので、A 機と B 機の和から求められる。

$$\sigma^2 = DV^2 (X_A + X_B) \quad (5)$$

以上のことから、連続関数の分散と、3 機モデルの分散が等しくなる点を求めることができる。

3 機モデルの場合、式(5)を満たす DV と X_A+X_B の組合せが良好なモデルと判断できる。これは図 2,3 の黄色の線上である。この線上のどの点を選ぶかは、最適化計算の収束性などを判断して決めることになる。

3 CCO 可能性の判断指標

3.1 判定手法

上昇機の飛行経路が確定すれば、安全距離を確保できない降下機の確率を求めることができる。その確率が設定した閾値を越えた場合は、設定した上昇機の飛行経路は危険と判断し、閾値を越えない場合は安全と判断することができる。このようにして、不確実性のある降下機に対する上昇機の安全性を判断する指標を設定することができる。上昇機の飛行経路は、直線飛行経路と最適回避経路の二種類を考える。前者は回避を行わない CCO 経路に相当し、後者は最大限の回避を行った飛行経路に相当する。この二種類の飛行経路を判定に用いることにより、表 3 に示す三段階の安全性の判定になる。

この安全性の判定は、離陸機の離陸時間に依存する。仮に、設定した時刻に飛行経路が離陸不可であったとしても、早発あるいは遅延することで飛行経路が安全に移行する。さらに、降

表 3 安全性の判定

	飛行経路の判定	直線飛行	最適回避
#1	CCO 可	安全	安全
#2	CCO 不可/離陸可	危険	安全
#3	離陸不可	危険	危険

下機の確率分布に依存するため、上昇機が離陸後も判定が変化することになる。

3.2 計算結果

平面内で直交する飛行経路を用いて、安全性の判定を行った例を図 4,5 に示す。横軸は上昇機が実際に離陸した時刻、縦軸は最適経路を求めた際に使用した離陸時刻である。図中の白線は設計した時刻に離陸した場合であり、設計した時刻に離陸しない場合も含めて安全性を判定している。相手機の標準偏差が、図 4 は 8[m/s]、図 5 は 2[m/s]の場合である。

安全性を色で区別してあり、CCO 可(#1)は青、CCO 不可&離陸可(#2)は水色、離陸不可(#3)は赤である。黄色の領域は、最適回避軌道は不可となっているが、CCO 可の領域である。離陸時刻が設定時刻とずれているので、このような場合も存在する。

経路を設計した定刻に離陸する場合は白線上である。図 4 では離陸不可の領域を通過している。しかし、相手機の不確実性が減少した図 5 では離陸不可の領域には入らず、離陸時刻を早めれば CCO 可の領域になっている。相手機の不確実性は時刻と共に減少する。図 6 は遅延側も求めた CCO 可能性の判断指標を示した概念図である。相手機の不確実性が大きい時点では離陸不可の時刻が存在するが、不確実性が減少すると離陸不可の領域が消え、代わりに CCO 可の時間帯が表れることが示されている。

4 おわりに

不確実性を持つ相手機との安全間隔を確保しながら自機の飛行経路の最適化を求める計算手法を提案した。相手機の存在を 2 機または 3 機の離散モデルと近似し、その分布および重みを決める手法を導いた。その離散モデルを用いて、最適回避軌道を求め、安全性の判定から CCO 可能な離陸時刻を求める例を示した。

謝辞

本稿は平成 28 年度から 30 年度にて行われた「安全間隔を考慮した CCO（継続上昇運航）の研究」にて行われた成果である。研究の機会をいただいた電子航法研究所に謝意を示す。

参考文献

[1] 大野，上野，平林 “航空機の軌道誤差を考慮した軌道最適化計算に関する検討，” 第 56 回飛行機シンポジウム講演集，JSASS-2018-5116，2018 年 11 月。

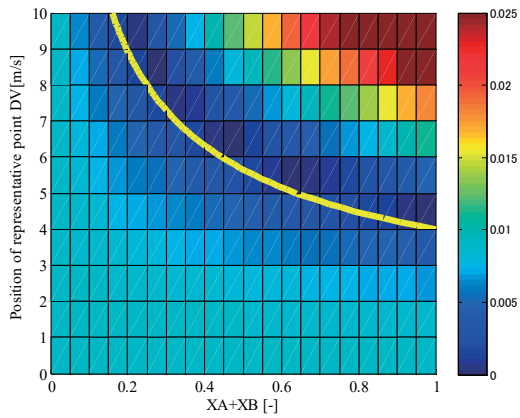


図 2 評価関数値の差(標準偏差 4.0[m/s])

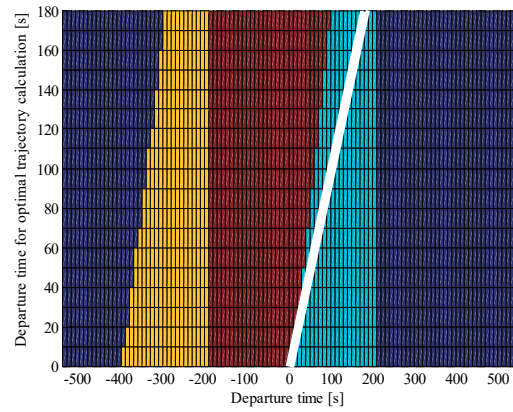


図 4 安全性の判定(標準偏差 8[m/s])

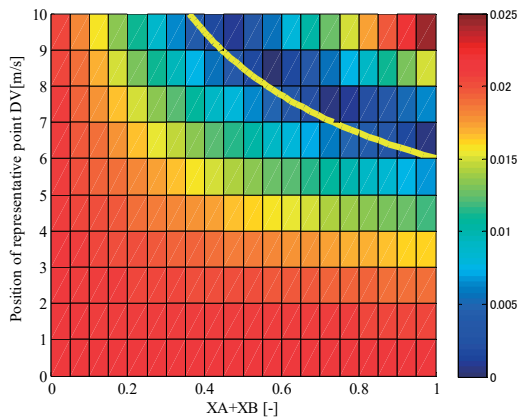


図 3 評価関数値の差(標準偏差 6.0[m/s])

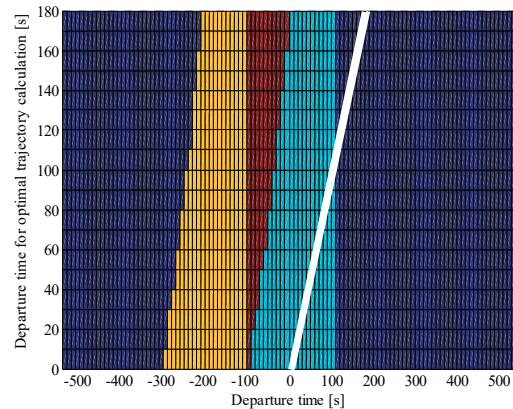


図 5 安全性の判定(標準偏差 2[m/s])

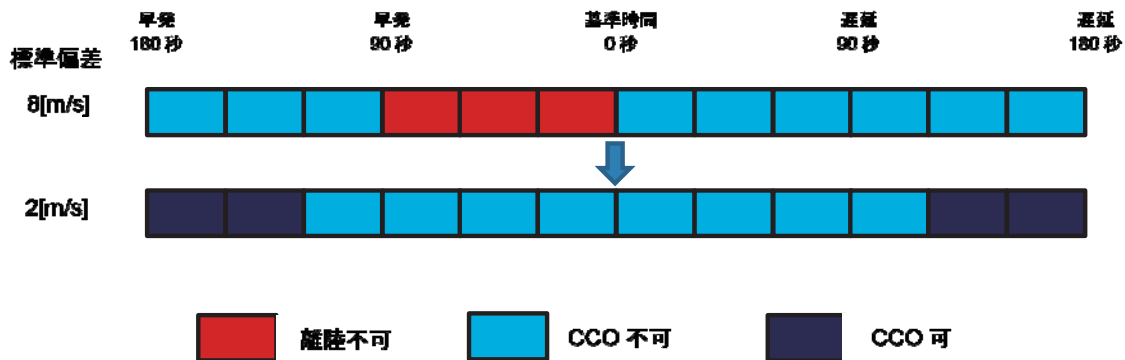


図 6 相手機の不確実性による離陸判断の変化