不確実環境下でのコンフリクトフリー4次元軌道生成アルゴリズム

東京大学大学院
航空宇宙工学専攻
松野賀宣，土屋武司

背景

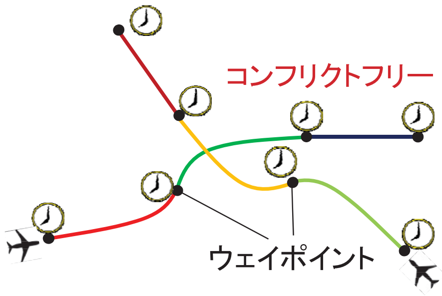
- 現在の航空管制システム
  - 航空管制官が運用
  - 空域の安全を監視
  - 航空機間のコンフリクトを回避

- 航空交通需要の増加

→管制官のワークロードの限界

背景

- 時間管理を導入した4次元軌道ベース運用
  - ➢すべての航空機がそれぞれの4次元軌道に従う



➢ 航空機間の安全を確保
➢ コンフリクトフリー軌道を飛行

→コンフリクトフリー4次元軌道最適化

目的

- コンフリクトフリー4次元軌道最適化
  - ➢飛行中の不確実環境を考慮

    気象情報の不確かさ
    航法誤差

  - ➢確率的な航空機の運動モデル

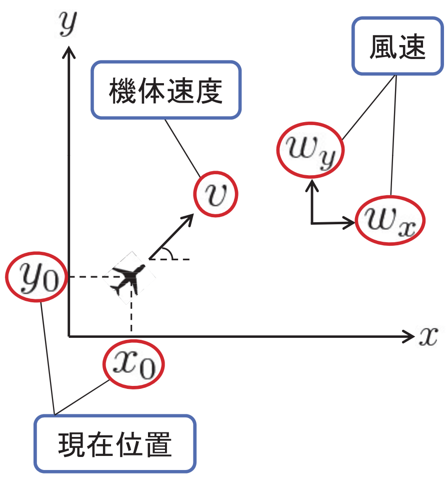
→確率論的軌道最適化

➢不確実要素を考慮したロバストな飛行軌道を生成

2013/3/21 中間報告会 5

不確実環境

- 2次元平面内



- 不確実要素
  1. 風速の予測誤差
  2. 機体速度の測定誤差
  3. 現在位置の推定誤差

→確率変数として扱う

2013/3/21 中間報告会 6

不確実環境

- 不確実要素（確率変数）

➢風速の予測誤差
- 5.17 m/s

➢機体速度の測定誤差
- 5 knots (2.57 m/s)

➢現在位置の推定誤差
- 50 m (水平面内)

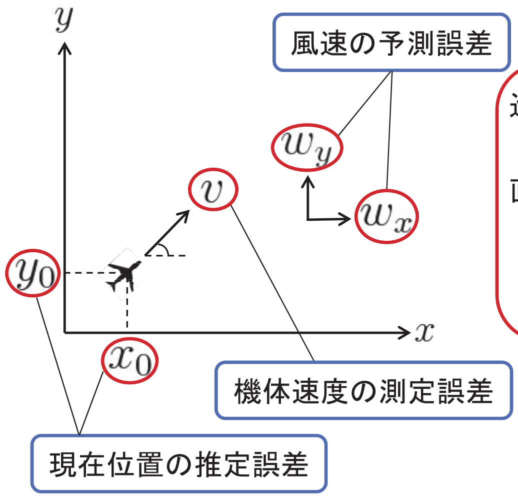
➢実際の運航データをもとに決定

➢ガウス分布の標準偏差としてモデル化

2013/3/21　中間報告会　7

確率論的手法

1. 将来の位置をガウス分布で表現
   - 誤差全体をガウス分布の標準偏差としてモデル化（時間と共に増大）



進行方向：

$$\sigma_{AT} = (50 + 7.74t)/1852, \mathrm{NM}$$

直交方向：

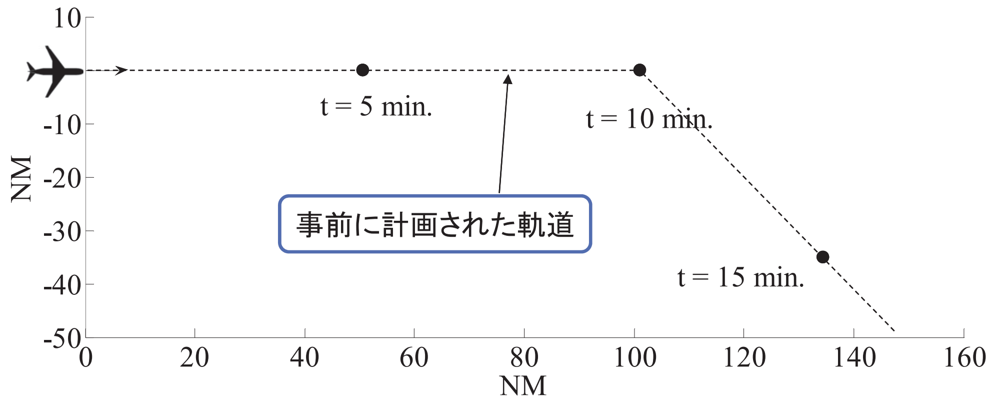
$$\sigma_{CT} = \min\{1, (50 + 5.17t)/1852\}, \mathrm{NM}$$

一定値に収束させる
（実際の操縦を模擬）

2013/3/21　中間報告会　8

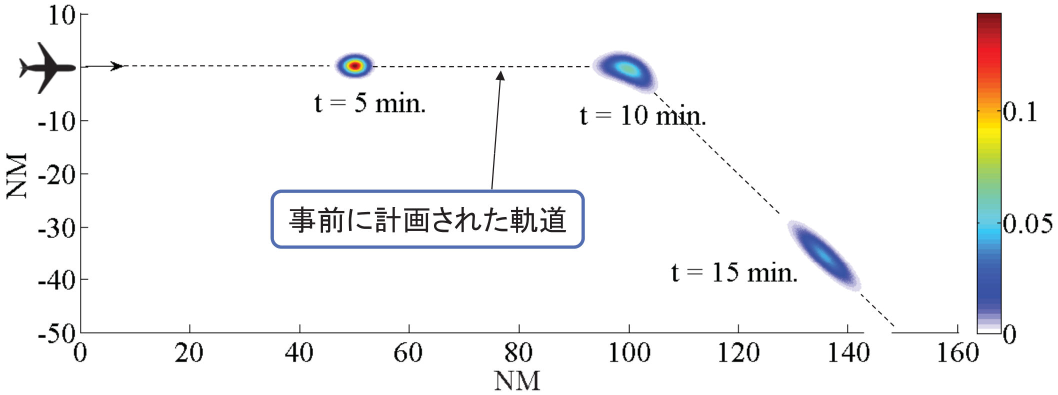
確率論的手法

1. 将来の位置をガウス分布で表現
   - 機体速度：600 knots
   - 10分後に45度方位を変更



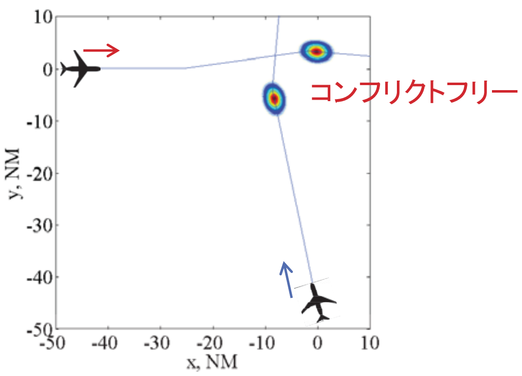
確率論的手法

1. 将来の位置をガウス分布で表現
   - 機体速度：600 knots
   - 10分後に45度方位を変更



確率論的手法

1. 将来の位置をガウス分布で表現
   - 複数機の分布を求めることでコンフリクトを考慮



   - コンフリクトフリーな軌道（ノミナル軌道）を最適化

2013/3/21 中間報告会 11

確率論的手法

1. 将来の位置をガウス分布で表現
   - ➢航空機の運動を単純化したモデル

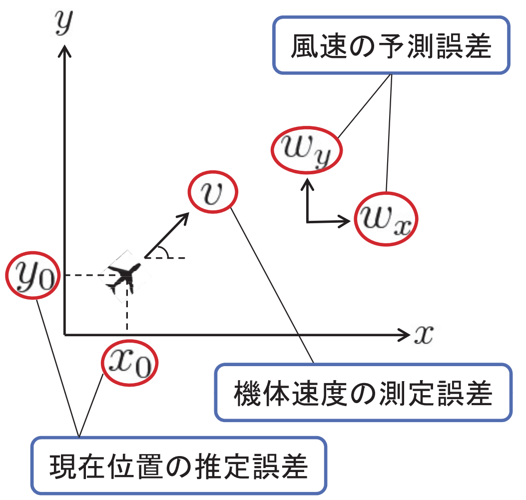
   - ➢制御入力を考慮していない
     - 例えば，旋回といった航空機の運動を詳細に扱うことが困難

→確率過程を含む運動方程式を考える

2013/3/21 中間報告会 12

確率論的手法

2. 確率的なダイナミクス（確率微分方程式）



- 確率過程を含む方程式

$$
\boxed{\begin{aligned} \dot{x} &= \underline{v} \cos\psi + \underline{w_x} \\ \dot{y} &= \underline{v} \sin\psi + \underline{w_y} \end{aligned}}
$$

- 確率論的解
  - 統計的情報
    - ➢期待値
    - ➢分散

2013/3/21 中間報告会 13

確率論的手法

- モンテカルロ法
  - 確率変数のランダムサンプリング
  - 各サンプル点で決定論的問題に書き換える
  - 全サンプル点での解一式から確率論的解（期待値・分散）を求める
  - 適用しやすいが，計算負荷が高い

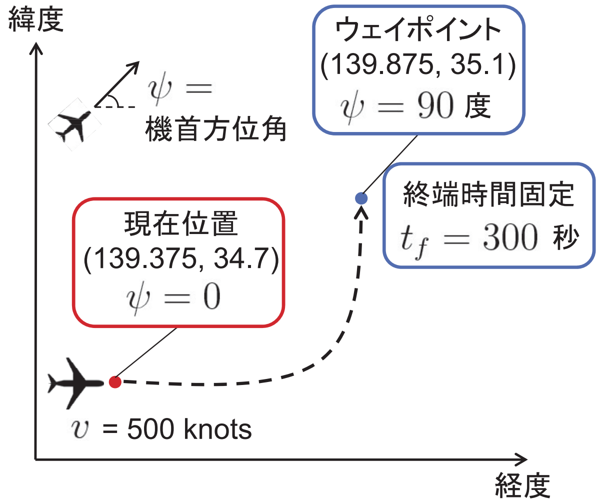
2013/3/21 中間報告会 14

確率論的手法

- 一般化多項式カオス
  - モンテカルロ法と同様，適用しやすい
  - 計算負荷を減少させる特徴
    1. 解の多項式近似
       - 解を確率変数の直交多項式として表す
    2. 確率変数のコロケーション点
       - ランダムサンプリングではない（e.g.モンテカルロ法）
       - 規則的なサンプリング
       - モンテカルロ法と同様，各コロケーション点で決定論的問題に書き換える

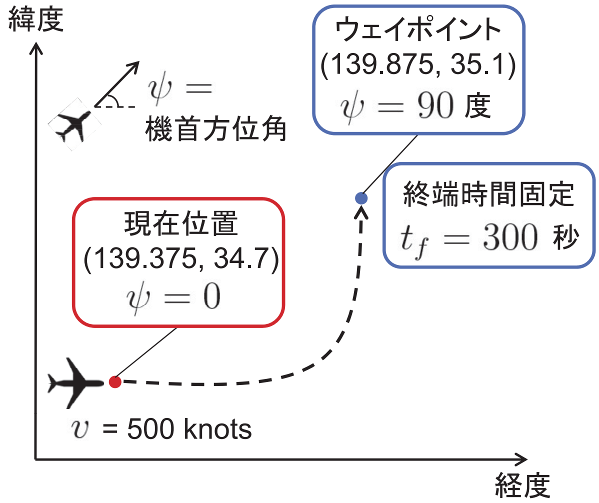
シミュレーション-問題設定

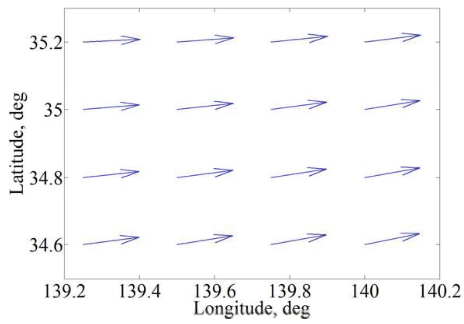
- 4次元軌道最適化
  - 2次元平面内，高度34000 ft
  - 状態変数：経度，緯度，機首方位角
  - 制御変数：u = バンク角
  - 目的関数：$J = \int u^2 dt$
  - 最小化



シミュレーション-問題設定

- 4次元軌道最適化
  - 2次元平面内，高度34000 ft
  - 風速の予測



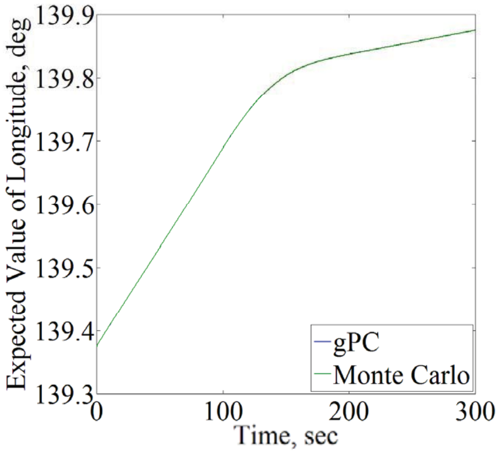


- 気象庁により公開
- 緯度・経度のグリッドデータ
- 補間して適用

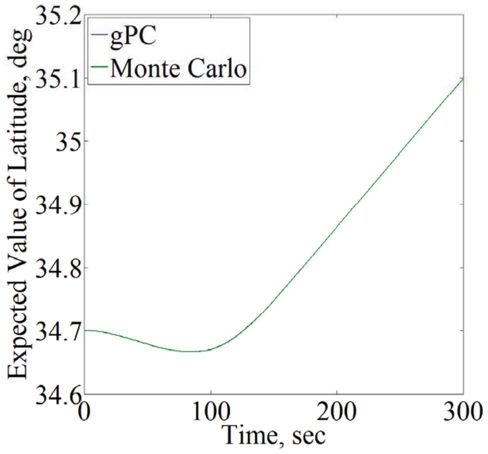
シミュレーション-結果

- 一般化多項式カオスとモンテカルロ法との比較

➢時間-経度（期待値）



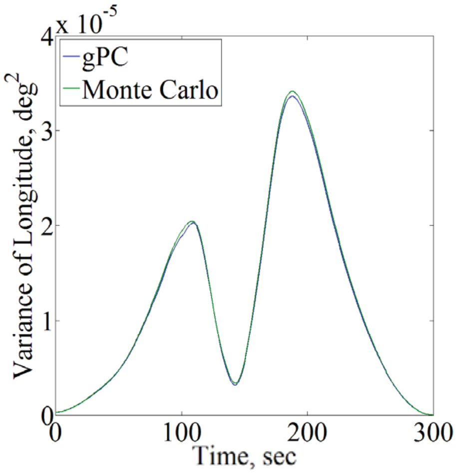
➢時間-緯度（期待値）



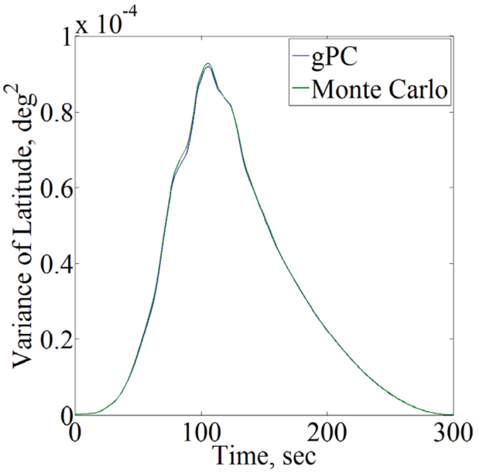
シミュレーション-結果

- 一般化多項式カオスとモンテカルロ法との比較

➢時間-経度（分散）



➢時間-緯度（分散）



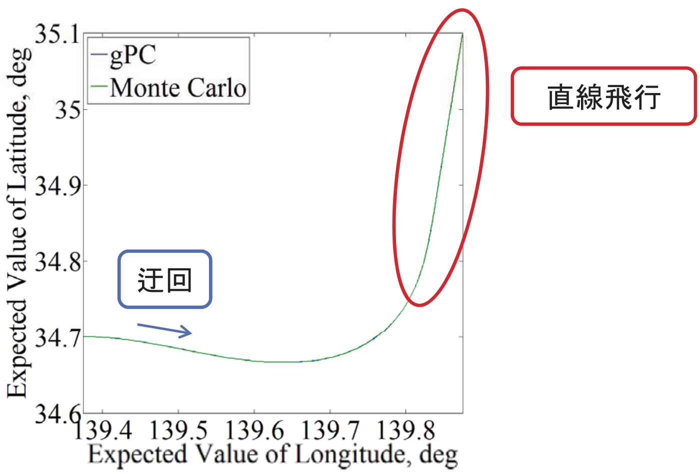
シミュレーション-結果

- 一般化多項式カオスとモンテカルロ法との比較

手法	サンプル点	計算時間
一般化多項式カオス	401	14.5分
モンテカルロ法	20000	10.5時間

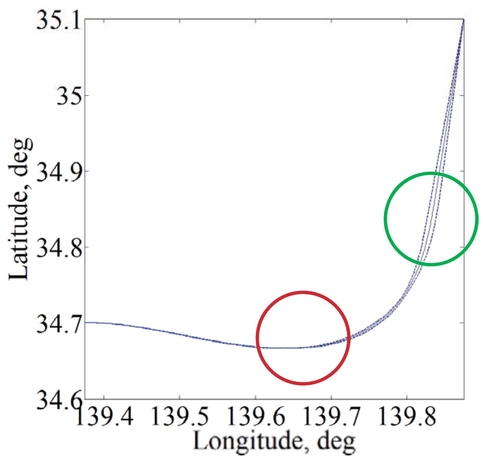
シミュレーション-結果

- 一般化多項式カオスとモンテカルロ法との比較
  - 経度-緯度(期待値)

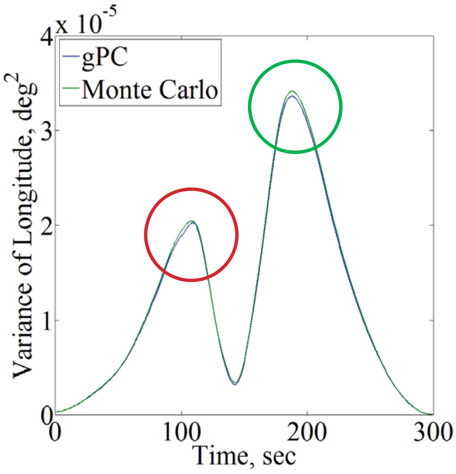


シミュレーション-結果

- 経度-緯度
  （経度の誤差）

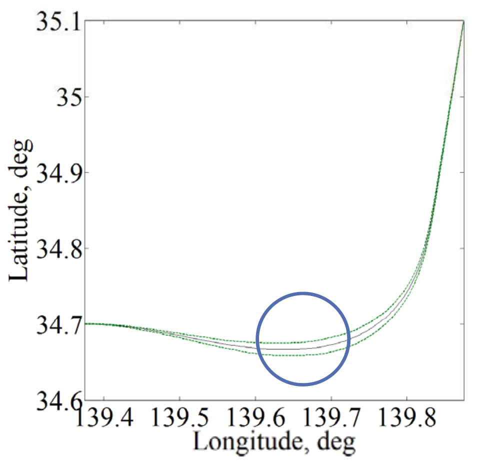


- 時間-経度（分散）

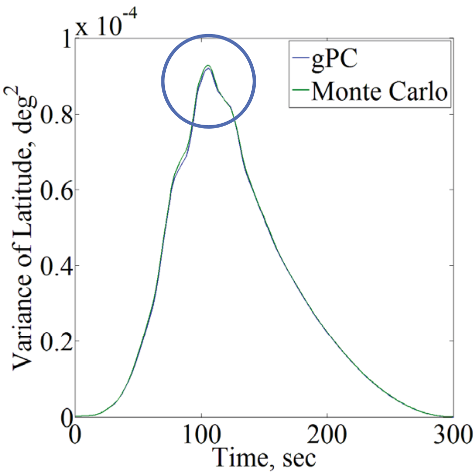


シミュレーション-結果

- 経度-緯度
  （緯度の誤差）



- 時間-緯度（分散）



まとめ

- 確率論的4次元軌道最適化
  - ➢確率論的手法
    - 飛行中の不確実要素を考慮
    - 確率過程を含む運動方程式
  - ➢一般化多項式カオス
    - モンテカルロ法と同様，適用しやすい
    - 計算負荷を大幅に減少
  - ➢確率論的解
    - 軌道の期待値と分散の時間履歴

今後の予定

- 3次元空間での運動
- 複数機について考慮
  - ➢ターミナル空域におけるマージング
  - ➢コンフリクトフリー軌道を生成
- 時間に依存する確率変数の導入