

jh240022

空飛ぶクルマのフリーフライト・シミュレーション

青木 尊之（東京科学大学（東京工業大学））

概要

「空飛ぶクルマ」の飛行安全性を調べるために、ローターの回転数だけを与えて自由な飛行を再現するフリーフライト・シミュレータを GPU スパコン上で開発する。高速回転するローターの計算負荷が余りに高いため、翼素運動量理論に基づくアクチュエータライン・モデルをローター部に適用することにより、計算負荷を大きく低減させることができた。マルチローターの飛行体は空力不安定であるため、ドローンと同じように PID 制御を導入することにより、離陸、ホバリング、水平飛行、旋回、着陸の再現が可能になった。さらに、ローターの一部が突然停止したり、突風にあおられたり、2 機の「空飛ぶクルマ」が接近したりしたときの墜落や揺動の振舞いをシミュレーションすることができた。

1. 共同研究に関する情報

共同利用・共同研究を実施している拠点名
東京科学大学 情報基盤センター

(1) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(2) 参参加研究者の役割分担

青木 尊之（東工大）：研究の総括と全ての項目
に対する詳細な指示

渡辺 勢也（九州大学）：アクチュエータライン・
モデルの導入とコード開発

イン イクイ（東工大）：シミュレーションの実
行とブレード回転数制御

大西 領（東工大）：微気象シミュレーションと
の連携の検討

TAN HONG GUAN（東工大）：複数の空飛ぶクルマ
の相互作用

2. 研究の目的と意義

次世代のモビリティとして期待されている
「空飛ぶクルマ」と称されるマルチコプターは、
2025 年の大阪万博で定期運航が見送られデモ
フライトのみになるなど、安全性が疑問視され
ていることは明らかである。大型のドローンの

ような航空機であるが、無人の場合とは全く異
なり、けた違いの航行安全性が求められる。



図1 「空飛ぶクルマ」の将来イメージ

複数の空飛ぶクルマが（特に上下に）接近して
しまったとき、ローターの一つが停止するなど
の異常な回転をしたとき、予期せぬ突風にあお
られたときなど、どうやって姿勢を立て直し安
全な航行を維持するかなどの制御法の確立や、
より安全な「空飛ぶクルマ」の設計・開発など、
実機による実験は余りにコストと時間が掛か
り過ぎる。そこで、コンピュータの仮想空間の
中に「空飛ぶクルマ」を設置し、さまざまな状
況下でローター・ブレードに（時間的に変化する）
回転数だけを与え、仮想の「空飛ぶクルマ」
がどのように航行するのかを予測する（実験に
置き換わる）フリーフライト・シミュレーショ
ンを実現することが本研究の目的である。

これまでもヘリコプターやドローンのシミュレーションは数多く行われているが、その全てがローター・ブレードのシミュレーションであり、機体の航行までを Navier-Stokes 方程式を解いてシミュレーションするものは（課題代表者が調べた限り）存在しない。ブレードが高速で回転するためにレイノルズ数が高く、ブレードにかかる力を計算するには非常に薄い境界層を解像する高解像度格子を y^+ に配置する必要があり、この計算コストが膨大であるためにブレードが 30 回転する程度までの時間しか計算できない。しかし、機体の航行をシミュレーションするにはブレードが 1000 回転する程度の時間を計算する必要がある。そこで本研究は翼素運動量理論に基づいたアクチュエータライン・モデル（ALM: Actuator Line Model）をブレードに適用することで画期的な計算時間の短縮を実現し、長時間シミュレーションを行うことを目的とする。

3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義

課題代表者を中心とする東京工業大学のグループは、これまで GPU スパコンを用いて多くの大規模流体シミュレーションを行ってきた。計算科学・計算機科学の両面の専門性を有しているが、アクチュエータライン・モデルについては未経験であり、JHPCN の共同研究の枠組みを用いることにより、導入を推進することができた。また、微気象シミュレーションとの連携にいて、多くの議論を行い、方向性を確認することができた。本共同研究の 9 月までの成果を基に科研費・基盤研究 (A) (2025 年度～2028 年度) を申請し、採択された。また、2025 年度の HPCI システム一般課題にも選定された。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

新規研究課題なので、該当しない。

5. 今年度の研究成果の詳細

5.1 空力計算手法

高レイノルズ数の乱流に対し、高性能な陰的 LES 渦粘性により高精度かつ安定な空力解析を

行うことができる Cumulant 型格子ボルツマン法 (LBM) を用いる。境界層の剥離や再付着を精度よく計算できるため、ドラッグ・クライシスも精度よく再現することができている。

「空飛ぶクルマ」同士の（上下）接近や衝突、建物への接近、離陸・着陸などのさまざまな飛行のシミュレーションに対し、移動格子や重合格子は制限が多過ぎるため、適用できない。数 100 メートル・サイズの静止した計算空間を用意し、その中で図 2 のように 8 分木データ構造に基づいた AMR (Adaptive Mesh Refinement) 法により「空飛ぶクルマ」の近傍に高解像度格子を動的に割当て、細分化と粗大化を「空飛ぶクルマ」とともに移動させる。

図 3 に「空飛ぶクルマ」の Airbus モデルの形状データ (CAD データ) を示す。STL データからレベルセット関数を作成し、Interpolated Bounce Back 法により移動する複雑形状の境界条件を LBM の流体計算に課す。一方、境界で Bounce Back する速度分布関数を用いて「空飛ぶクルマ」にか

かる力を求める。

GPU スパコンを用いるため、複数 GPU を前提としたコードの実装を進めている。各 GPU はシミュレーション内にメモリプールを持ち、AMR 格子の細分化と粗大化に伴う頻繁な GPU メモリの確保と解放を避ける。また、空間充填曲線（モートン曲線）を用いた動的負荷分散、GPU 間の通信と計算のオーバーラッ

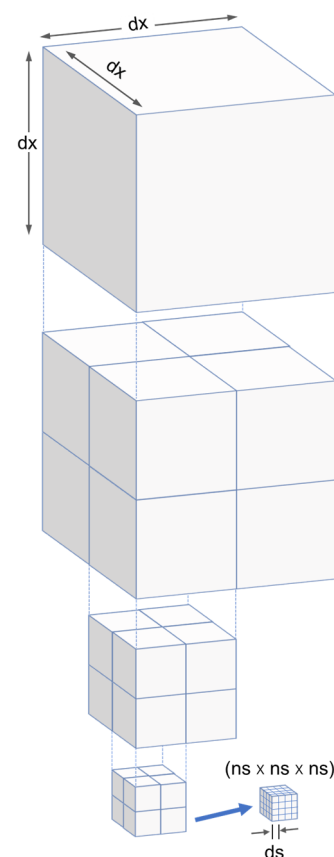


図 2 Octree AMR 法の実装のオーバーラップなどを実装している。

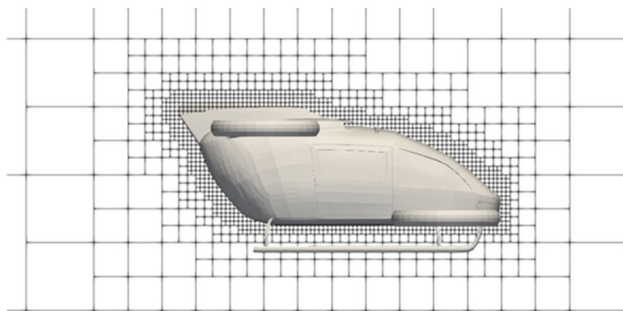


図3 「空飛ぶクルマ」の Airbus モデルと AMR 格子

5.2 アクチュエータライン・モデル (ALM)

ローターではブレードが高速回転するために流れのレイノルズ数が高く、従来の方法でブレードにかかる力を計算するには、非常に薄い境界層まで解像する格子を用いた LES 計算、壁関数法、DES 計算のどれかが必要となる。いずれにしてもブレード近傍では非常に高解像度の格子を用いた計算が必要となり、この計算負荷が膨大であるためにブレードが 30 回転する程度の時間までしか計算できない。そこで、「空飛ぶクルマ」のローター部に、翼素運動量理論に基づいたアクチュエータライン・モデルを用いる。

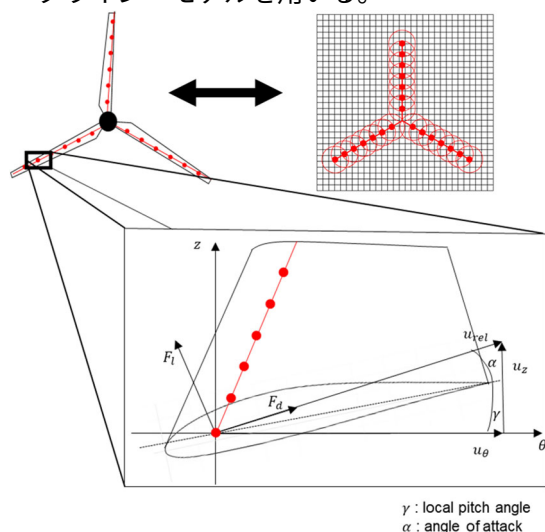


図4 アクチュエータライン・モデル

既にデータベース化されている翼断面に対する揚力・抗力の空力特性を用い、図4のようにブレードにマーカー点を設置し、その点に翼素理論に基づいて空気から受ける力をブレードに与える。一方でその反作用による力をガウシアン・フィルタにより分散して流体に与える。アクチュエータライン・モデルをローター・ブレードに適用し、実験と詳細な CFD (壁面からの無次元距離 y^+

に十分格子を集めた計算) との比較を行い、Single rotor だけでなく Co-axial rotor (図5および図6) についても実験および詳細な CFD と非常に良い一致が得られた。

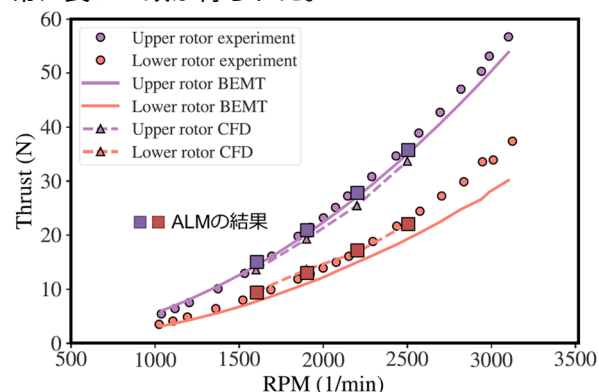


図5 アクチュエータライン・モデルによる Co-axial rotor の推力

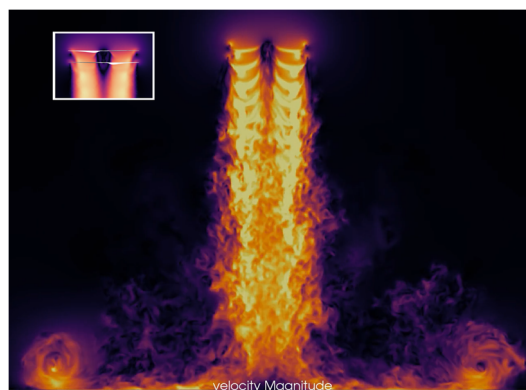


図6 2500 rpm のときの Coaxial Twin Rotor から放出される流れの断面

5.3 Airbus モデルへの ALM の適用

ローター部に推力と釣り合う／少し重い／少し軽い質量を設定し、ローター部だけの自由上昇および下降の検証を行い、問題ないことを確認した。その後、図3に示す Airbus の「空飛ぶクルマ」の形状モデルのローター部に ALM を取り付け、ローターが受ける推力、周囲の空気から受ける空力、重力に対して機体の運動方程式を解き、機体の運動とそれによる周囲の流れの相互作用を計算した。

機体に鉛直上下移動のみの自由度を与え、ローターの回転数を指定したときに「空飛ぶクルマ」の自由な上昇・ホバリング・下降ができることを確認した。また、図7のように鉛直方向、水平1軸方向とそれらに垂直な軸周りの自由度を与え、

「空飛ぶクルマ」の前後のローターを逆回転させることによる 360 度のピッチ回転、左右のローターを逆回転させることによる 360 度のロール回転ができることを確認した。

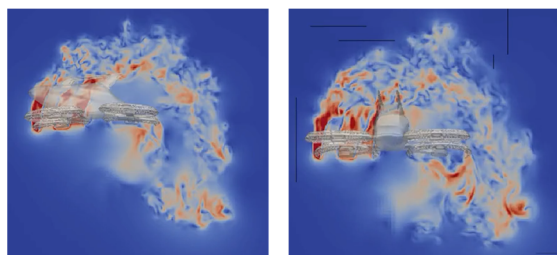


図 7 「空飛ぶクルマ」の 360 度ピッチ回転とロール回転

5.4 PID フィードバック制御の導入

「空飛ぶクルマ」の運動にフルの自由度（並進 3 自由度と回転 3 自由度）を与え、機体の重量と釣り合うローターの推力を発生する回転数を与え、ホバリングの検証を行った。ところが、図 8 に示すように、少し時間が経つと姿勢が不安定になり、回転しながら墜落することが明らかになった。これは、実際のドローンでも同じであり、マルチローターの飛行体は不安定であることがシミュレーションの中でも明らかになった。

実際のドローンでも組み込まれている PID フィードバック制御を「空飛ぶクルマ」のフリーフライト・シミュレータにも導入することにした。Airbus モデルの 4 つのローター部の 8 個のブレードの回転数に対し、「空飛ぶクルマ」の高度、並進速度、姿勢を保つような制御系を導入した。（図 9）



図 8 墜落

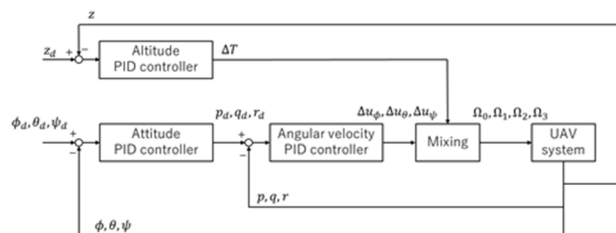


図 9 PID フィードバック制御

5.5 空飛ぶクルマのフリーフライト・シミュレーション

Airbus モデルの「空飛ぶクルマ」に対し、4 基の Co-axial ローターの上下合わせて 8 個のローターに対し、回転数の PID 制御だけで飛行するフリーフライトのシミュレーションを行った。図 10 は地面から離陸して 10m の高度でホバリングするシナリオのシミュレーションである。「空飛ぶ



図 10 離陸とホバリングのシミュレーション

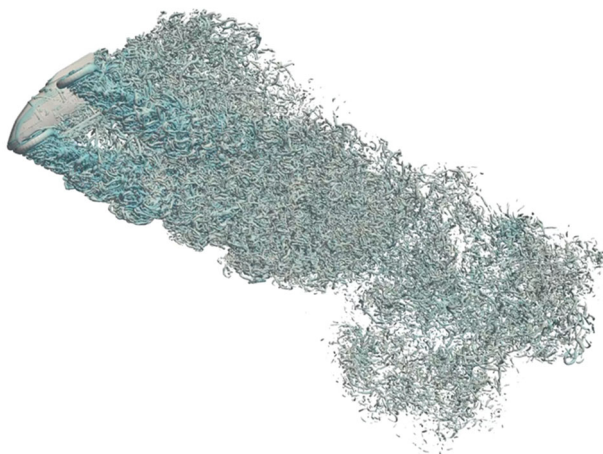


図 11 水平飛行するシミュレーション

クルマ」の高度と水平速度を指定すると、図 11 のように自動的に機首を下げた水平飛行がシミュレーションの中で確認できた。

急激に降下するとヘリコプターでも最も危険な制御不能な状態と言われる「Vortex Ring State」の発生を回避しながら、対地速度、高度をセンサー情報として使い、速度を落としながら安全に着地するシミュレーションが図 12 のように可能になった。また、「空飛ぶクルマ」がバーティポートなどから離陸する際のダウンウォッシュを図 13 に示す。激しく乱れた流れが水平に広がるのが分かる。



図 12 安全に着陸するシミュレーション

5.6 異常飛行のシミュレーション

機体の故障や異常気象など、通常と異なる状況での飛行をシミュレーションにより調べる。水平飛行している最中に、4 基の Co-axial ローターの合計 8 個のローターのうち、1 基が突然停止

したシナリオでシミュレーションを行った。停止した直後は僅かに姿勢を崩すが、残りの 7 基のローターに対する制御で水平飛行を維持することが分かった。

- 8 基のローターのうち、同じ軸の 2 基が突然停止した場合は、バランスを崩し回転しながら落下する結果となった。故障の事象が発生してから、PID 制御のパラメータを変更することにより落下を回避できるかもしれない。
- 8 基のローターのうち、異なる軸の 2 基が突然停止した場合は、ほぼ高度を維持しながら想定とは異なる方向に水平にドリフトする結果が得られた。これも、PID 制御のパラメータを変更することにより正常な航行を維持できる可能性がある。
- ダウンバーストなどの突風にあおられた際、気流変化の勾配に依存するが、急激な突風に対しては風に流され、通常飛行が不可能である結果となった。
- 2 機の「空飛ぶクルマ」が上下ですれ違うシナリオでシミュレーションを行ったところ、下の「空飛ぶクルマ」が大きな影響を受けると予想していたが、影響を受ける時間が短時間であるため、機体が大きくバランスを崩すようなことはなかった。

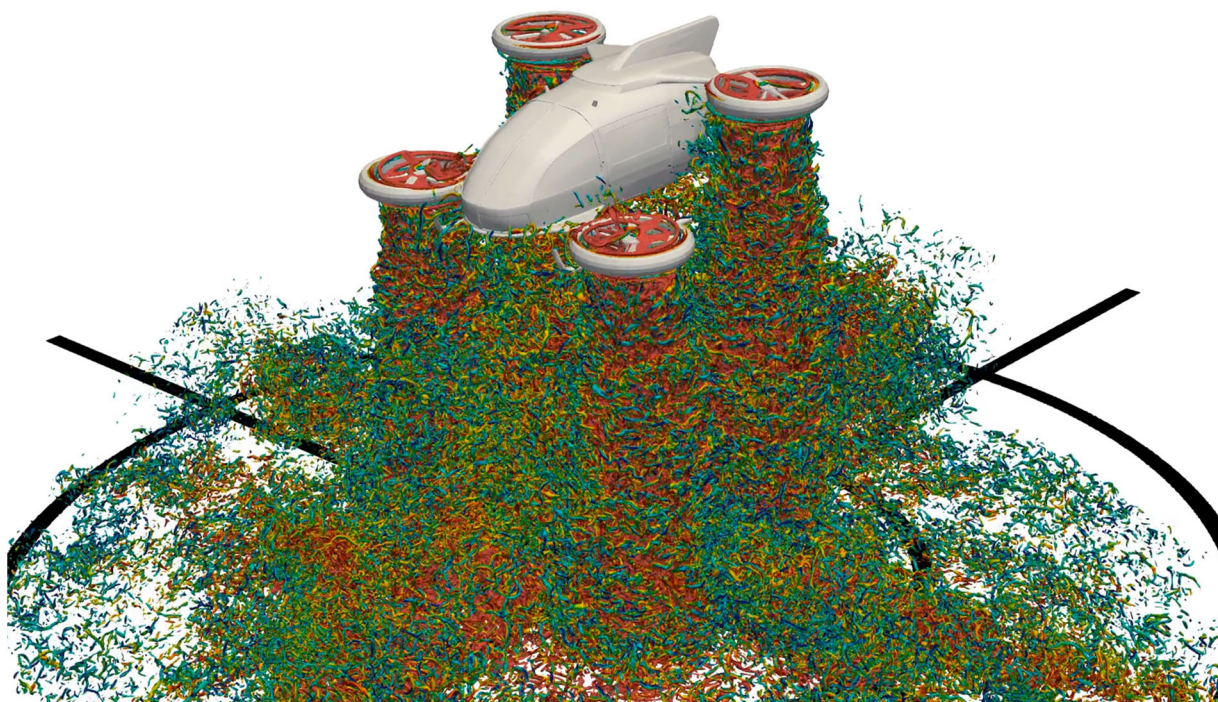


図 13 離陸時のダウンウォッシュ

5. まとめ

「空飛ぶクルマ」の高速で回転するローター周りの空力を直接計算せず、アクチュエータライン・モデルを適用し、計算効率を革新的に向上させ、フリーフライト・シミュレーションを可能にした。ローター部以外の空力計算は、高性能な陰的 LES モデルを含んだキュムラント衝突項の格子ボルツマン法に AMR 法を導入し、広大な計算空間の中を自由に飛行できるようにした。

単にローター部に推力を与え、6 自由度の飛行シミュレーションを行うと、飛行が不安定であることが分かり、「空飛ぶクルマ」にも PID 制御を導入する必要があることが明らかになった。それにより、離陸、ホバリング、水平飛行、安全な着陸のシナリオに対し、ローターの回転数を与えるだけで安定なフリーフライト・シミュレーションが可能であることを明らかにした。

一部のローターの異常な回転（停止）や突風などの想定外の事象に対してもフリーフライト・シミュレーションを行い、飛行を維持できる場合と墜落に至る場合があることが明らかになった。また、2 機の「空飛ぶクルマ」の上下の異常な接近などのシミュレーションも行うことができることを示した。

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

申請時に設定した今年度の研究計画に対し、順番は多少前後したが、ほぼ完全に計画内容を達成したと考えられる。2024 年 12 月以降に予定していた 2 台の空飛ぶクルマの相互干渉の計算は、対応させるためのコード開発が大変であったら、最終的に期間内に複数回の計算を実行することができた。

また、「4. 公募型共同研究として実施した意義」に記載した通り、本研究の年度途中までの成果を基に科研費・基盤研究（A）（2025 年度～2028 年度）に課題を申請し採択された。また、2025 年度の HPCI システム一般課題にも選定された。

今後は、「空飛ぶクルマ」が建物などの構造物に衝突した場合や、「空飛ぶクルマ」同士が接触した場合などのシナリオに対して、シミュレーションを行う。さらに、落下している最中に残

存する飛行能力でどこまで復活することができるかなどを明らかにする。

謝 辞

本研究は学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点（JHPCN）共同研究課題 jh240022「空飛ぶクルマのフリーフライト・シミュレーション」および革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ（HPCI）の一般課題 hp250130「空飛ぶクルマの革新的フリーフライト・シミュレーションー 墜落シミュレーション」として進めてきた研究である。また、科学研究費補助金・基盤研究(A) 課題番号 25H00714「フリーフライト・シミュレーションによる空飛ぶクルマの墜落阻止の研究」からも支援を頂いている。本研究の計算には、東京科学大学・情報基盤センターのスパコン TSUBAME4.0 を利用させて頂いた。記して謝意を記す。