

jh240022

青木尊之 (東京工業大学 学術国際情報センター)

空飛ぶクルマのフリーフライト・シミュレーション



研究背景と目的

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発表されているなど注目度が非常に高い。これまで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見当たらない。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格子を用いたLES計算か壁関数やDES計算が必要となる。いずれにしてもブレード近傍では高解像度格子を用いた計算が必要となり、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少なくとも1000回以上回転する時間を計算する必要がある。

研究の意義

「空飛ぶクルマ」は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。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。近未来のSociety 5.0に資する研究と言える。

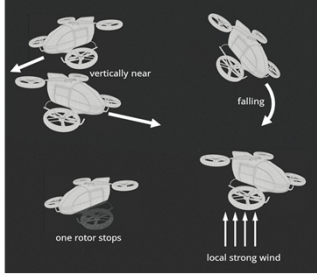


研究グループ

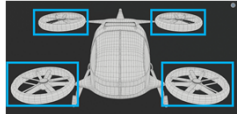
代表者 青木 尊之 (東工大)
副代表者 渡辺 勢也 (九大)
共同研究者 大西 領 (東工大)
共同研究者 インイクイ (東工大)
共同研究者 TAN HONG GUAN (東工大)

フリーフライトとは

本研究では、ローターの回転数だけを与え、それに基づいて「空飛ぶクルマ」等のマルチコプターが自由航行することと呼ぶ。

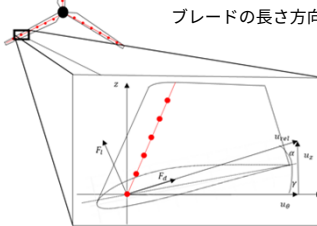


「空飛ぶクルマ」離陸時のダウンウオッシュ



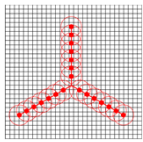
アクチュエータラインモデル

アクチュエータラインモデル

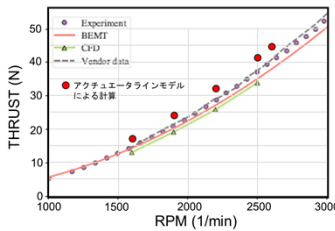
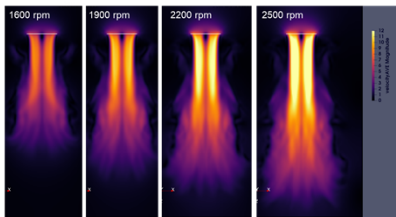


ブレードの長さ方向にマーカーを配置し、各マーカー位置で既に求められている翼断面の抗力係数 C_d 、揚力係数 C_l から翼素運動量理論に基づいてブレードにかかる力を求める。一方、流体側には反作用の力をマーカー中心に分布して与える。

- マーカーに加わる力
$$F_{2D} = \frac{1}{2} \rho u_{rel}^2 C_a (C_l e_l + C_d e_d) \Delta r$$
$$u_{rel} = \sqrt{u_z^2 + (r\Omega - u_\theta)^2}$$
$$d: \text{マーカー} i \text{ と格子点}(x, y, z) \text{ の距離}$$
$$\varepsilon: \text{影響半径}$$
- 格子点に与える体積力
ガウシアンフィルタ
$$F(x, y, z) = \sum_i \eta_i(x, y, z) F_{2D,i}$$
$$\eta_i(x, y, z) = \frac{1}{\pi^{3/2} \varepsilon^3} e^{-\left(\frac{d_i(x,y,z)}{\varepsilon}\right)^2}$$



実験・詳細 CFD 計算との比較



翼断面が A18 airfoil のブレードの回転数に対する推進力(Thrust)の実験および詳細計算(最小格子 D/2000)に対して、アクチュエータラインモデルによる試計算の結果との比較を行った。ブレード直径Dに対してマーカーをD/128の間隔で配置した結果は、非常によく一致している。

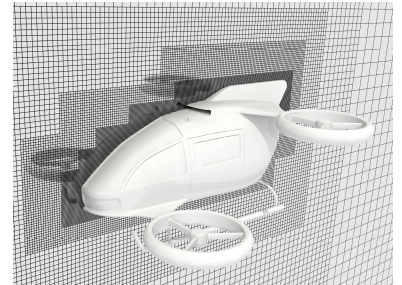
K. E. Giljarhus, A. Porcarelli, J. Apeland: Investigation of Rotor Efficiency with Varying Rotor Pitch Angle for a Coaxial Drone, Drones 2022, 6(4), 91. <https://doi.org/10.3390/>

計算手法

Cumulant衝突項の格子ボルツマン法に基づいた空力計算. 陰的 LES 渦粘性モデル.

$$f_{ijk}(x + \xi_{ijk} \Delta t, t + \Delta t) = \frac{1}{\tau} f_{ijk}^{eq}(x, y, z, t) + \left(1 - \frac{1}{\tau}\right) f_{ijk}(x, y, z, t)$$

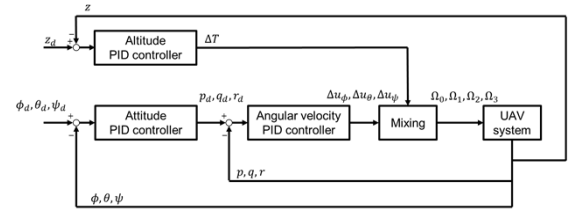
f : 速度分布関数
 ijk : 速度分布関数の方向
 ξ_{ijk} : 速度分布関数の速度
 τ : 緩和係数
 f^{eq} : 局所平衡状態の分布関数



Octree ベース AMR 法と、空間充填曲線に基づいた動的領域分割

PID制御

実際のマルチコプターと同じように、空飛ぶクルマのシミュレーションでも、各ローターの回転に対してPID フィードバック制御しないと、安定な航行ができない。



特許証

アクチュエータラインモデルを空飛ぶクルマなどのマルチコプターのローターに適用し、航行シミュレーションを実現するアイデアの特許を取得している。

発明者 : 青木 尊之
渡辺 勢也
インイクイ

登録番号 : 第7475103号
登録日 : 2024/04/18
出願番号 : 特願2024-018919
出願日 : 2024/02/09

