

卒業論文要旨

離陸時の QTW の姿勢安定化システム設計

システム工学群

機械システム制御研究室 1250058 北川 翔聖

1. 研究背景

本研究では4発テイルトゥイング機(Quad rotor Tilt Wing: QTW)を対象機体とする。QTWは垂直離着機の1種であり、この機体の特徴は回転翼機と固定翼機の2つの性能を併せ持ち、翼の角度を変更させるテイルト機構により、垂直離着陸かつ高速で安定した飛行が可能である点、4つのエンジンによる高い揚力から重量物の輸送や多くの人員を運ぶことができる点などが挙げられる。以上の点から QTW は災害現場などの狭地や不整地など様々な場面での運用が期待されている。

2. 研究目的

先行研究の QTW 実機での実験では実機が垂直離陸を試みる際に機体の姿勢が不安定になり垂直離陸ができなかった。(図1)垂直離陸時では機体と地面との距離が近くなるため、地面効果の影響が発生したことや、外乱の影響により姿勢が安定性を保つことができないためである。本研究では離陸時の地面効果や外乱による影響に対する QTW の姿勢を LQR 制御で安定化させるシステムを設計することを行った。

3. 研究方法

本研究では Matlab を用いて LQR 制御での姿勢安定化システムを設計し、シミュレーション上で姿勢安定化を行います。さらに様々な条件下でのシミュレーション結果の比較と考察も行います。

表1に本研究でのシミュレーション条件と QTW パラメータを示す。シミュレーションでは実機とは異なり簡約化のため推力係数を $1e^{-4}[\text{N} \cdot \text{s}^2]$ 、地面効果係数を 0.05 と仮定した。その他の値は実機と同様である。またシミュレーション環境での目標状態は姿勢角をロール角、ピッチ角、ヨー角そ

れぞれを 0[rad]にすることである。



Fig.1 A scene from an experiment conducted in previous research

Table 1 Simulation conditions and parameters

| | | | |
|----------------------------|-------|---------------------------|-----------|
| mass | 4.1kg | Thrust coefficient | $1e^{-4}$ |
| Gravitational acceleration | 9.81 | Ground Effect Coefficient | 0.05 |
| height | 0.31 | | |
| Inertia Tensor | Roll | 0.3372 | |
| | Pitch | 0.6079 | |
| | yaw | 0.9141 | |
| Time Step | 0.001 | Simulation time | 20 |
| Initial Error | Roll | 0.3 | |
| | Pitch | 0.3 | |
| | yaw | 0.3 | |

Matlab で地面効果の影響を考慮するために用いた式^[2]を次式に示す。

$$\frac{T}{T_{out}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{R}{4h}\right)^2} \quad (1)$$

T:任意の高さでの推力 R: ローター半径 h:地面との距離
 T_{out} :地面効果を受けない状態での推力
 式(1)で求めた推力をQTWのローター配置と掛けることでトルクとしてシステムに加えます。

4. シミュレーション

本研究では地面効果による姿勢角の影響とロール角、ピッチ角の姿勢変化がヨー角の姿勢に影響にさせるかを明らかにするため、シミュレーション条件を地面効果の有無による比較とヨー角の重み行列Qの大きさによる比較という二つのパターンでのシミュレーション結果の比較を行った。それぞれの比較を図2-図6に示す。またLQR制御における重み行列Qとは状態ベクトルの目標値との差をどれだけ重要視するかを表した行列である。図2と図3では地面効果の有無で比較すると、ロール角、ピッチ角、ヨー角それぞれが不安定になった。図4、図5、図6ではヨー角の重み行列Qの値を1000、10000、20000と変化させた。これはロール角、ピッチ角の重み行列は100としているため図4では10倍、図5では100倍、図6では200倍、ロール角とピッチ角に比べてヨー角では姿勢変化に敏感になることである。それぞれ比較すると、重み行列の値を大きくすると、全体的な安定化が進むことが振幅の値から分かる。

5. 考察

図2が地面効果なし、図3が地面効果ありのシミュレーション結果を表しており、2つを比較すると、図3では図2よりも僅かにロール角、ピッチ角、ヨー角すべての姿勢が不安定なことが分かる。この原因は地面効果によりローターによる推力があがったことが考えられるが、そこまで影響が出ていない。そこまで影響が出ないのは研究対象であるQTWがプロペラの直径が大きいため式(1)の計算をする上で、地面との距離との比率が小さくなることが関係していると考えた。図4が重み行列1000、図5が10000、図6が20000の場合のシミュレーション結果である。図4と図5、図6を比較すると図5、図6の方が姿勢が収束していることが分かるため、重み行列を大きくすれば安定化が進んでいくことになる。しかし図5と図6を比較すると約3秒後での振幅は図5の方が大きくなっているが、約14秒後での振幅では図5の方が小さくなっている。このような結果になる原因として、図6では重み行列を20000にしてしまったことにより他の角度の重み行列とのバランスに偏りができてしまい、制御入力が不安定になったと考えた。

6. 結論

本稿では主に地面効果とLQR制御を用いたシミュレーションについて述べた。地面効果とは機体が地面に近いところで飛行する際に発生する現象であり、プロペラによって発生する推力が地面に反射することによって揚力が増加してしまう効果です。地面効果の影響としては本研究で用いたQTWの

構造上あまり出なかったが、多少のピッチ角への影響が出ていた。LQR制御を用いたシミュレーションではさまざまな環境での比較を行ったが、重み行列の値を大きくしすぎると、姿勢がさらに乱れてしまう可能性もあるため、重み行列の偏りを意識して調整する必要がある。本研究ではシミュレーションをもとに姿勢安定化を行ったが、今後の方針としてはシミュレーションだけでなく、実機での離陸時の姿勢安定化にも挑戦していきたいと考えている。

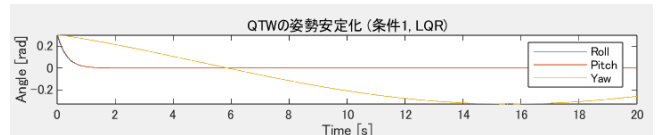


Fig.2 No ground effect

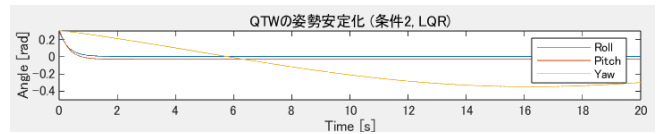


Fig.3 With ground effect

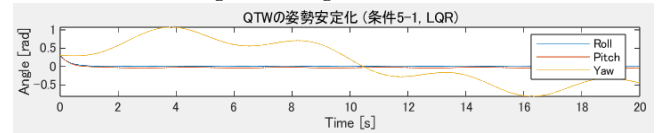


Fig.4 Weight matrix 1000

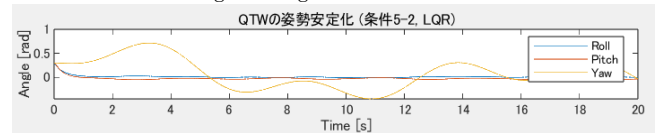


Fig.5 Weight matrix 10000

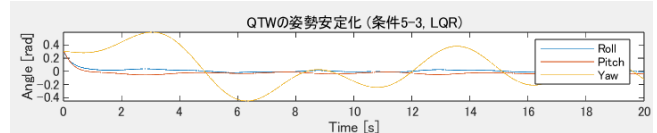


Fig.6 Weight matrix 20000

参考文献

- [1] 森本拓馬, "4発ティルトウイング機の制御システム開発", 高知工科大学附属情報図書館, 2024年度修士論文, 2025
- [2] 河野将佳, "地面効果を受ける小型クアドロータ機の推力解析とローター-上流流れの可視化, 東北大学, p2 式(1)