

# UAV 垂直連結協調搬送システムの制御方法に関する研究

## Research on Control Methods for Cooperative Transport System

2025 年 11 月 12 日

発表者 瀧 敬太

指導教員 梅本 和希 准教授

### 研究の概要と目的

本研究は、従来の水平配置による協調搬送とは異なり、複数のドローンを垂直に連結して荷物を搬送する新しいシステムの制御方法を開発することを目的としている。垂直連結配置では、各ドローンが重力方向に直接推力を発生させるため、エネルギー効率の向上と運用の柔軟性が期待できる。しかし、上位機体のダウンウォッシュによる下位機体の不安定化や、吊り荷の振り子運動による制御困難などの課題がある。

本研究では、ArduPilot フライトコントローラー上に外乱推定オブザーバーを実装し、これらの課題を解決する制御手法を確立する。具体的には、姿勢角やプロペラ入力値から外乱力を推定し、荷物の揺れを抑制する制御システムを開発する。推定した外乱を用いて姿勢目標を補正することで揺れの蓄積を防ぎ、ドリフトについてはパラメータ調節により抑制に成功した。また、吊り下げ構造を機体重心付近に変更することで、制御なしでも安定する構造を実現した。さらに制御の遅れに対処するため、逐次最小二乗法（RLS）による周期外乱の予測制御を導入し、実験を進めている。Matlab シミュレーションと実機実験を組み合わせることで制御性能を評価し、将来的には RTK-GNSS を用いた屋外環境での制御や空中ドッキング機能の実現を目指す。

本研究により、災害時の物資輸送や建設現場での重量物運搬などの用途において、従来よりも効率的で安全な協調搬送システムの実現を目指している。

This research aims to develop a new control method for drone cooperative transport systems. Unlike traditional horizontal formation systems, we propose using multiple drones connected vertically to carry loads. In this vertical formation, each drone can generate thrust directly against gravity, which may improve energy efficiency and operational flexibility. However, there are challenges such as instability of lower drones caused by downwash from upper drones and control difficulties due to pendulum motion of suspended loads.

In this study, we try to solve these problems by implementing a disturbance estimation observer on the ArduPilot flight controller. Our approach is to estimate disturbance forces from attitude angles and propeller input values, and develop a control system that can reduce load swing. Drift caused by nonzero mean components has been suppressed through parameter tuning. The suspension structure was modified to place the attachment point near the center of gravity, achieving stability even without active control. To address control delays, we introduced predictive control using Recursive Least Squares (RLS) for periodic disturbances. We evaluate the control performance through Matlab simulations and real flight experiments. Future work includes RTK-GNSS-based outdoor control and aerial docking functions.

Through this research, we aim to realize a more efficient and safe cooperative transport system for applications such as disaster relief supply transport and heavy load transport at construction sites.

## 1 研究の背景と意義

### 1.1 社会的背景

近年、物流配送の自動化やドローン配送サービスの実用化が急速に進展している。災害時の物資輸送や建設現場での重量物運搬など、従来の輸送手段が困難な状況において、UAV を用いた協調搬送技術の重要性が高まっている。単機での搬送能力の限界を超えるため、複数機による協調搬送システムの開発が不可欠となっている [5]。

### 1.2 学術的背景

従来の UAV 協調搬送研究では、複数機が水平に配置されて荷物を吊り下げる方式が主流である [3][4][5]。この水平配置方式では、各ドローンが荷物を斜め方向に引っ張るため、推力効率の低下や制御の複雑化が課題となっている。一方、垂直連結配置方式は、各ドローンが重力方向に直接対抗する推力を発生させるため、エネルギー効

率の向上が期待できる [12]。しかし、垂直配置時のダウンウォッシュ干渉や荷物の揺れ抑制などの制御問題は未解決である。

### 1.3 技術的意義

ArduPilot プラットフォーム上に外乱推定オブザーバーを実装し、垂直連結協調搬送に特化した制御方法を開発・実証することで、新たな協調搬送技術を確立する。従来の水平配置とは根本的に異なる垂直連結配置による制御手法の開発は、協調搬送分野に新しい技術的価値をもたらす。

## 2 研究目的

本研究の目的は以下の通りである：

1. 垂直連結協調搬送システムの制御方法の確立
2. ダウンウォッシュ干渉を考慮した制御アルゴリズムの開発

3. 吊り荷揺れ抑制のための外乱推定オブザーバー実装
4. Matlab シミュレーションによる制御性能評価
5. 実機による制御手法の有効性検証

## 3 先行研究調査と位置づけ

### 3.1 UAV 協調搬送研究の現状

多機体 UAV 協調搬送に関する研究では、水平配置による分散制御手法が主に研究されている [3][7]. エネルギー分散と負荷分担に基づく双機協調搬送戦略 [5] や、複数機による同時制御システム [9] などが提案されているが、これらは水平配置が前提となっている。

### 3.2 垂直連結協調搬送研究

垂直連結による協調搬送に関する研究は限定的である。ノルウェー工科大学の研究 [12] では、垂直スタック方式による協調リフトシステムが提案されているが、この飛行形態による姿勢安定の問題点や、制御方法の詳細な検討は不十分である。

### 3.3 外乱推定技術

UAV における外乱推定技術では、外乱オブザーバー [2][8] や機械学習を用いた手法が研究されている。吊り荷制御においては、振動抑制のための外力推定手法 [6][7] が提案されているが、垂直連結配置での適用例は見られない。

現代の外乱推定技術では、Extended Kalman Filter (EKF) [2][3] や Unscented Kalman Filter (UKF) [9][15] に基づく手法が主流となっている。特に、リアルタイムでの外乱推定が可能な有限時間安定外乱オブザーバー [25] や、固定時間収束を保証する手法 [30] などの先進的なアプローチが提案されている。

### 3.4 本研究の独創性

本研究では、従来の水平配置とは根本的に異なる垂直連結配置による協調搬送制御手法を確立する点で独創性を有している。特に、外乱推定オブザーバー実装と垂直配置特有の制御課題解決は新規性が高い。

**【追加】外乱推定と姿勢目標への反映に関する詳細説明**

## 4 外乱推定と姿勢目標への反映

### 4.1 外乱力の推定

本研究では、推進系の出力（スロットル／プロペラ入力）と慣性計測に基づいて機体に作用する外乱力を推定する。機体の加速度計測値を  $\mathbf{a}_{\text{body}}$ （機体座標系）とし、推力から生じる加速度分を差し引いた残差を外乱とみなす。具体的には、スロットル値をスラストスケールとオフセットで線形モデルとして変換し、重力および推力を除いた以下のような外力を定義する：

$$\mathbf{f}_{\text{raw}} = m\mathbf{a}_{\text{body}} - \mathbf{T},$$

ここで  $m$  は機体質量、 $\mathbf{T}$  は推力ベクトル（主に  $z$  軸方向に向く）であり、両者の差が振り子やダウンウォッシュ等の外部からの影響を含む外乱であると解釈する。

この生の外乱推定値  $\mathbf{f}_{\text{raw}}$  に対して簡易的な一時遅れフィルタ（一次ラグ）を適用し、ノイズを滑らかにする：

$$\mathbf{f}_k = \beta\mathbf{f}_{k-1} + (1 - \beta)\mathbf{f}_{\text{raw}},$$

ここで  $\beta \in [0, 1)$  はフィルタ係数（例：0.8–0.95 付近）で、前時刻の推定と新規観測の加重平均によって遅れを保ちつつ平滑化する。

### 4.2 目標姿勢への補正

推定された外乱  $\mathbf{f}_k$  のうち、横方向成分（機体座標系での  $x, y$ ）が吊り荷の揺れ方向を示すものとして取り出される。本研究では、この外乱方向に機体が追従することで、吊り荷の揺れを相対的に減衰させることを目的とする。小さな外乱に対して線形近似的に

$$\delta\phi = K_r \frac{f_y}{m}, \quad \delta\theta = K_p \frac{f_x}{m}$$

とし、ここで  $f_x, f_y$  は推定された外乱の横方向成分、 $K_r, K_p$  は設計ゲインである。符号は、推定外乱方向に機体の姿勢を傾け、荷物と機体の相対速度差を減少させることを意図して決定した。得られた補正角  $\delta\phi, \delta\theta$  をクォータニオンに変換し、既存の目標姿勢クォータニオン  $\mathbf{q}_{\text{target}}$  に乗じて反映する：

$$\mathbf{q}_{\text{corr}} = \mathbf{q}_{\text{correction}} \otimes \mathbf{q}_{\text{target}},$$

ここで  $\mathbf{q}_{\text{correction}}$  は補正ロール・ピッチから生成されるクォータニオンであり、両者の積により外乱方向への姿勢変更が目標に加わる。この更新は各制御周期ごとに行われ、正規化することで蓄積誤差を防ぐ。

### 4.3 更新の流れ（要約）

1. センサとスロットル値から生の外乱  $\mathbf{f}_{\text{raw}}$  を計算。
2. 一次ラグフィルタで滑らかにした外乱  $\mathbf{f}_k$  を得る。
3. 横方向成分からロール・ピッチ補正角を算出。
4. 補正クォータニオンを生成し目標姿勢に乗算、正規化して反映。

### 4.4 ドリフト抑制と構造改善

この補正機構を実機に適用した結果、吊り荷による周期的な外乱を抑制できる一方で、横方向の外乱の推定値がゼロ平均でない（非ゼロのバイアス成分を含む）ために、目標姿勢への継続的な補正が累積しドリフトとして現れる現象が確認された。このドリフトについては、人為的にパラメータを調節することで抑制することに成功した。

この機体の構造は、重心よりも 20cm 程度吊荷の支点が下に位置する構造で、ある一定の振動抑制に成功した。しかし、補正ゲインを上げると振動が発生し、逆に下げると補正効果が不十分になるという問題に直面した。このゲインはひもの長さや吊り荷の重さに敏感で、シビアなパラメータ調節を要求される。この問題から構造自体に課題があると判断し、吊り下げ位置の支点を機体の重心付近に変更する構造改良を実施した。

この結果、機体の揺れは拡大しなくなり、制御を入れなくても徐々に安定するようになった。しかし、急停止などの状況下では依然として揺れが収まるまでに時間がかかる。そこで、より減衰を早められる制御の実現を目指す。

## 5 研究方法

### 5.1 システム設計・開発

表 1: ハードウェア構成

| コンポーネント       | 仕様                    |
|---------------|-----------------------|
| フライトコントローラー   | Pixhawk6C (STM32H743) |
| コンパニオンコンピューター | Raspberry Pi 5        |
| 通信方式          | UART (ハードウェアフロー制御)    |
| プロトコル         | MAVLink               |
| 位置推定          | モーションキャプチャ            |

本研究では 2 台のドローンを構築し、モーションキャプチャシステムによる位置制御下での同時飛行を実現している。外乱推定オブザーバーの実装も完了し、単機での吊り荷搬送実験を通じて制御性能の評価を進めている。現在は、機体重心付近に吊り下げ点を配置した改良構造での制御検証と、逐次最小二乗法 (RLS) による予測制御の実装を行っている段階である。

### 5.2 外乱推定オブザーバーと予測制御

ArduPilot 内に実装した外乱推定オブザーバーは、姿勢角、プロペラ入力値、機体質量などを基に外乱力をリアルタイムで推定する仕組みを持つ。外乱推定値はおよそ 100Hz で更新され、その後の姿勢目標更新に直接反映される。

以前の構造において補正ゲインを高く設定できなかった原因は、外力を取得してそれをモーター出力に反映させるまでの遅延が大きかったためと推測される。すなわち、制御遅れが原因で高ゲイン時に振動が発生していた。そこで、揺れを先読みする予測制御手法を検討した。

#### 5.2.1 逐次最小二乗法 (RLS) による周期外乱推定

吊り紐の長さは一定であるため、振動周期も一定の周期外乱と仮定できる。そこで、逐次最小二乗法 (RLS: Recursive Least Squares) を用いて、振動の振幅と位相を逐次的に推定する手法を導入した。推定した正弦関数モデルを用いて、 $\Delta t$  秒後の振動を予測することで、補正ゲインを高く設定しても安定性を保つことが可能になると考えられる。

さらに、位相のずれの進展から、初期設定した振動周波数をオンラインで修正することも検討している。これをオンラインで推定することができれば、フーリエ変換などで求めるよりも高速に周波数修正が可能であり、かつ計算量も少なく抑えられる可能性がある。多くの場合、吊り紐の長さはある程度既知であり、初期値をある程度決定できるため、この仕組みでは初期段階からある程度の推定精度が期待できる。

現在、この RLS 推定アルゴリズムを実装し、外乱の取得精度と予測性能を検証する実験を進めている。

### 5.3 段階的実機実験

1. 外乱推定オブザーバーによる単機吊り荷制御検証
2. RLS による周期外乱推定と予測制御の検証
3. 2 機垂直連結飛行での挙動確認と課題抽出
4. RTK-GNSS 導入による屋外位置制御の実現
5. 複数機による協調搬送実証実験

### 5.4 垂直吊り協調搬送の実験と課題

垂直吊り協調搬送に向けて、2 台のドローンを構築し、上下に配置して飛行させる実験を実施した。しかし、上側機体と下側機体と同じ位置関係を保持したまま飛行させることは非常に困難であることが判明した。

この問題を解決する手段として、以下の制御方式を検討している：

- 上側機体には並進方向 3 軸すべてに位置制御を適用
- 下側機体には姿勢制御のみを適用

上側機体がテンションをかけている状態で、下側機体が徐々に推力を発生させることで、テンションを保持したまま離陸させることを目指している。

#### 5.4.1 離陸制御の課題

ArduPilot の制御において、離陸時に急激に推力を発生させる制御が組み込まれている可能性がある。この機能が本研究のプログラムにおいても作用していないか調査し、必要に応じてこの機能を無効化できるか検討する必要がある。

### 5.5 RTK-GNSS 導入

屋外環境での高精度位置制御を実現するため、RTK-GNSS システムの導入を進めている。GPS モジュールを購入し、RTK 基地局として NTRIP の補正データを受信できるように設定を行う予定である。これにより、モーションキャプチャ環境に依存しない屋外での協調搬送実験が可能となる。

## 6 実機による外乱推定結果

実機実験において、外乱推定オブザーバーを導入した。実験は室内のモーションキャプチャ環境で、機体に吊荷を取り付けた状態での外乱力を測定した [2][4][7]。

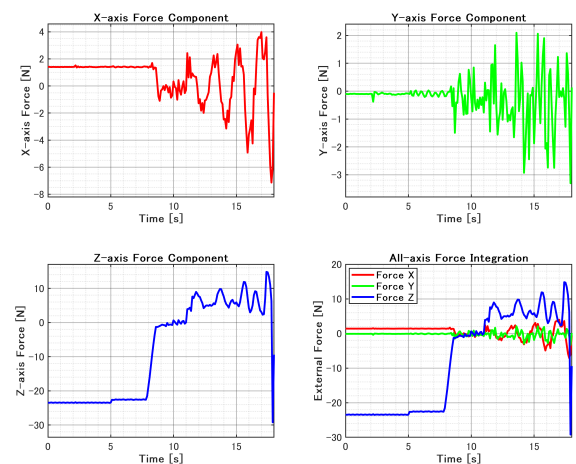


図 1: 実機による外乱推定結果

図 1 に示すように、実装した外乱推定オブザーバーでは、x, z 軸方向の外乱が周期的であることがわかる。これは、実際に吊荷が x 軸で振れていた実験内容と一致した。しかし、y 軸ではノイズが大きいため、フィルタ設計やバイアス分離の工夫が必要である。

## 7 垂直連結協調搬送の特徴

### 7.1 従来手法との比較

水平配置方式では複数ドローンが荷物を斜め方向に引っ張るため、推力効率が低下し、制御が複雑化する。一方、垂直連結方式では以下の利点がある [12]:

#### 7.1.1 エネルギー効率

全機体が鉛直上向きに推力を発生するため、エネルギー損失が最小化される。各ドローンは重力方向に直接対抗する推力を発生させ、システム全体の効率を向上させる。

#### 7.1.2 運用柔軟性

異なるペイロード能力を持つ機体を混在させることが可能で、システム構成の柔軟性が高い。

#### 7.1.3 安全性

故障時には上位機体による支援が可能で、小型機体使用により被害を軽減できる。

### 7.2 技術的課題

垂直連結配置では以下の課題がある：

- ダウンウォッシュによる下位機体の姿勢不安定化
- 吊り荷の振り子運動による制御不安定性
- 機体間の協調制御アルゴリズムの確立

## 8 研究計画

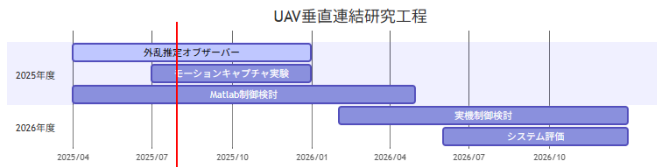


図 2: 研究計画工程表

図 2 に示すように、本研究は 2 年間の計画で実施する。1 年目（2025 年度）では外乱推定オブザーバーによる荷物揺れ制御の完成、モーションキャプチャ環境での複数ドローン縦連結飛行挙動確認、Matlab シミュレーションでの制御方法検討を行う。2 年目（2026 年度）では、シミュレーション結果を基にした実機制御検討、システム評価（エネルギーロス、揺れ制御抑制、故障時挙動）を実施する。

## 9 評価項目

本研究では以下の項目でシステムを評価する：

- エネルギー効率の定量評価
- 荷物揺れ抑制性能の測定
- 故障時の安全性検証
- 水平配置方式との性能比較

また、シミュレーション [30] により、様々な外乱条件下での頑健性を検証する予定である。

## 10 期待される成果

### 10.1 学術的成果

- 垂直連結協調搬送制御理論の確立
- 外乱推定オブザーバーを用いた揺れ制御手法の開発
- ダウンウォッシュ干渉を考慮した制御アルゴリズムの提案

### 10.2 実用的成果

- エネルギー効率の向上
- 安全性の向上（故障時墜落リスク軽減）
- 運用柔軟性の確保

### 10.3 社会的意義

災害時物資輸送、建設現場での重量物運搬、長距離配送サービスなどへの応用が期待され、社会インフラの高度化に貢献する。

## 11 まとめ

本研究では、従来の水平配置とは根本的に異なる垂直連結配置による協調搬送制御手法を確立することを目指している。外乱推定オブザーバーを活用した揺れ制御技術において、ドリフト抑制とともに構造改善を実施し、機体重心付近への吊り下げ点変更により安定性を向上させた。さらに、制御遅れに対処するため逐次最小二乗法（RLS）による周期外乱予測制御を導入し、現在実験を進めている。

垂直吊り協調搬送においては、2 機による上下配置飛行実験を実施し、位置関係維持の困難さという課題を抽出した。また、RTK-GNSS モジュールの導入により、屋外環境での高精度位置制御の実現に向けた準備を進めている。段階的な実験と Matlab シミュレーションにより、実用性の高い制御手法を開発し、将来の屋外運用に向けた基盤技術を確立する。

実機実験で得られた外乱推定結果と構造改善による安定化は、開発した制御システムの有効性を実証しており、垂直連結協調搬送システムの実現に向けた重要な進展を示している [25][30]。今後は、RLS による予測制御の有効性検証、複数機体による協調制御実験を通じて、システム全体の性能評価を行う予定である。

## 参考文献

- [1] J. J. Naundrup, D. Grombacher, J. D. Bendtsen, and A. la Cour-Harbo, "Modeling and simulation of a slung load system for UAS," Aalborg University, Master's thesis, 2018.
- [2] H. Ghadiri, M. Emami, and H. Khodadadi, "Adaptive super-twisting nonsingular terminal sliding mode control for tracking of quadrotor with bounded disturbances," *Aerospace Science and Technology*, vol. 112, p. 106616, 2021.
- [3] M. Guerrero, D. Mercado, R. Lozano, C. García, and G. Valencia, "Nonlinear control strategies for a UAV carrying a load with swing attenuation," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 91, pp. 709–722, 2021.
- [4] B. Wang, X. Yu, L. Mu, and Y. Zhang, "Trajectory tracking control for quadrotor robot subject to payload variation and wind gust disturbance," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 83, pp. 315–333, 2016.
- [5] O. Chopra and D. Ghose, "Distributed control for multiple UAV transport of slung loads," in *AIAA Aviation Forum*, 2021, paper AIAA 2021-0107.