

# 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 8 月 4 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ぐが、その過程で非ゼロ平均成分（バイアス）によるドリフトが確認されたため、このバイアスを将来の課題として取り扱い補正の改良を検討する。また、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、将来的には屋外環境での GNSS 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. Estimated disturbances are used to correct the attitude target, but nonzero mean components in the lateral disturbance estimates produced drift; handling that bias is identified as a future improvement. We plan to evaluate the control performance through Matlab simulations and real flight experiments. In the future, we hope to achieve GNSS-based control in outdoor environments 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。

### 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 現状の副作用と今後の課題

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。このため、現在の設計では補正によるドリフトが残るという副作用があり、バイアス成分を分離・補償する仕組みを導入する必要がある。

今後の課題として以下を検討する：

- 推定外乱の横方向成分からの定常バイアスをオンラインで識別し除去する（時間平均等）。
- 周期成分と定常バイアスを分離し、周期外乱のみを姿勢補正に使い定常要素はキャンセルするモデル分解。

### 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

現在 2 台のドローンを作成し、モーションキャプチャを使った位置制御での同時飛行が可能である。また外乱推定オブザーバーの実装も行った。予備実験では、2 機を上下に配置した際に下側ドローンがダウンウォッシュにより不安定になることを確認した。また、単機での吊り荷搬送では振り子運動により現状の PID 制御では姿勢が不安定になることも判明している。

## 5.2 外乱推定オブザーバー

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、機体重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。フィードバック的に揺れを抑える補正に加え、将来的に周期成分を明示的にモデル化したフィードフォワード補償も視野に入れている。

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。

## 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. 2 機垂直連結飛行での挙動確認
3. 複数機による協調搬送実証実験

## 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]。

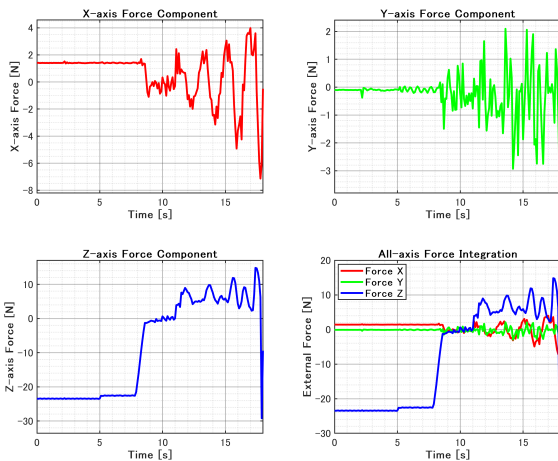


図 1: 実機による外乱推定結果

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、制御が複雑になる。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

全機体が上向き推力を発生するため、エネルギーロスが最小化される。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

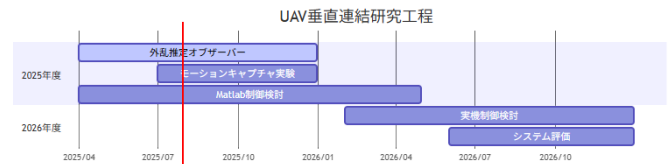


図 2: 研究計画工程表

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。外乱推定オブザーバーを活用した

揺れ制御技術と併せて、エネルギー効率と安全性を両立した新しい協調搬送システムを実現する。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、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.