

## UAV 協調搬送システムにおける物資の振動抑制

## Vibration Suppression of Suspended Payload for Transportation System Using UAVs

○真田詞月<sup>1</sup>, 内山賢治<sup>2</sup>, 増田開<sup>2</sup>\*Shizuki Sanada<sup>1</sup>, Uchiyama Kenji<sup>2</sup>, Masuda Kai<sup>2</sup>

The UAVs have been currently used for a variety of applications, with research particularly active in the field of logistics and transport. This study proposes a method to suppress the vibration of payload for a system in which payload suspended on cables is transported by multiple UAVs. A method to control the vibration of payloads is to change the cable length. The swaying of payloads is complicated by cable length changes, making it more difficult to control the vibration. Therefore, this paper describes a control system design method to suppress payload vibration by varying the distance between the UAVs without changing the length of the cable connecting the UAVs and the payloads. Numerical simulations are conducted to confirm the effectiveness of the proposed method.

## 1. 緒言

無人航空機(UAV)の物流輸送分野での活用が大きな注目を集めている。複数機の UAV での輸送は、物資の形状や大きさ、質量等の制約が緩和され、様々な物資の搬送が可能になるだけでなく、長距離輸送が可能になる等のメリットがある。ただし、複数機の UAV で物資を輸送する場合、物資をワイヤ等で接続する必要がある。そのため、輸送時に振り子振動が伴い、物資の揺れにより UAV が姿勢を崩し、最悪の場合機体同士の衝突に繋がる。ワイヤで吊り下げた物資の制振制御の一つに、ワイヤの巻き上げ動作による方法が提案されている<sup>[1]</sup>。しかし、巻き上げ動作や巻き上げ機構の重量を考慮すると、飛行している UAV に適した手法とは言えない。

そこで本研究では、複数 UAV による輸送システムに適した物資の制振制御法を提案する。本稿では、物資を2機の UAV によりワイヤで吊り下げ、UAV の機体間距離を操作することで、物資の振動抑制を試みる。数値シミュレーションにより、提案手法の有効性を検証する。

## 2. 物資の制振制御

## 2.1 協調輸送システム

Figure 1 に2機の UAV による協調輸送システムの概略図を示す。UAV は4つのプロペラを持つ Quadcopter とする。物資はワイヤで吊り下げられ、ワイヤは UAV の重心に取付ける。従来の研究<sup>[2]</sup>と同様に、ワイヤのたわみや伸縮はないものとし、ワイヤの質量は無視する。また、物資は質点として取り扱う。

## 2.2 制振制御

前述のように、ワイヤの長さを変化させて物資の揺

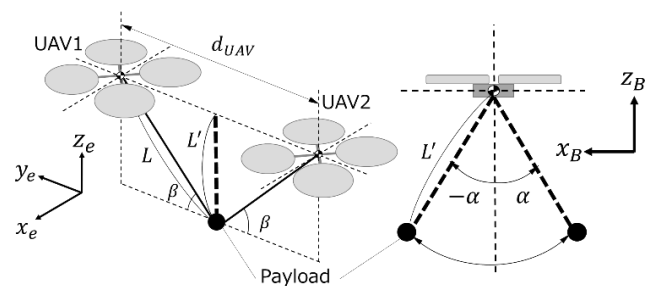


Figure 1. Transportation system using two UAVs

れを抑制する方法は UAV に適していない。そこで、UAV 間の距離を変化させることにより、物資の揺れを抑制する方法を考える。ワイヤの巻き上げによる荷揺れの抑制は、物資に働くコリオリ力に起因している。この原理を利用して、荷触れの角度が 0 度のときにケーブル長変動速度を最大にし、荷触れの角速度が 0 になるときにケーブル長変動速度を最小にすると、荷触れの減衰効果が最大となることが示されている<sup>[3]</sup>。したがって、Figure 1 に示すワイヤ長さの鉛直方向成分  $L'$  が変化すれば、ワイヤ巻き上げと同様の効果が期待できる。

ワイヤの長さを  $L$  とし、Figure 1 に示すようにワイヤ長さの鉛直方向成分を  $L'$  とする。2機の UAV は、同じ高度を維持しつつ水平面内の相対距離  $d_{UAV}$  を変化させる。このとき、任意の時刻  $t$  における長さ  $L'(t)$  は次式で表せる。

$$L'(t) = L'_0 + \Delta L' \sin(2\omega_h t) \quad (1)$$

$L'_0$  は長さ  $L'$  の初期値、 $\Delta L'$  は  $L'$  の最大長さを示す。荷揺れの角度を  $\alpha$ 、角速度を  $\dot{\alpha}$  としたとき、これらの値の符号が変わる周期を  $\omega_h$  とする。長さ  $L'$  を式(1)のように変化させることで荷揺れの抑制が期待できる。

水平線からケーブルまでの角度を $\beta$ とすれば、式(1)を満たす $\beta$ を算出することで、UAVの機体間距離の目標値が決まる。当該目標値を $d$ とすると、各UAVの目標位置 $X_{e1}$ 及び $X_{e2}$ は式(2)のように表せる。

$$X_{e1} = \begin{bmatrix} 0 \\ d - \frac{d_{UAV}}{2} \\ 0 \end{bmatrix}, X_{e2} = \begin{bmatrix} 0 \\ -d + \frac{d_{UAV}}{2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 3. 数値シミュレーション

数値シミュレーションでは、2機のUAVに吊り下げられた物資のモデルにPID制御を適用し、UAVの位置制御を行うことで荷揺れの抑制を試みる。数値シミュレーションの条件をTable1に示す。

Figure 2に各UAVの位置 $x_i, y_i, z_i$  ( $i = 1, 2$ はUAVの機体番号)の時間応答を示す。荷振れ角 $\alpha$ とその角速度 $\dot{\alpha}$ の正負が切り替わるタイミングを計測すると、その時間間隔は約0.467[s]であり、式(1)にある角周波数は $\omega_h = 3.37[\text{rad/s}]$ となる。したがって、式(2)より各UAVの運動周期もこの値に従い、この運動はFigure 1の $y_1$ 及び $y_2$ に現れている。

Figure 3に荷揺れ角 $\alpha$ 、角速度 $\dot{\alpha}$ 、 $L' - L'_0$ の時間履歴を示す。 $L' - L'_0$ は見かけ上のケーブル長の初期値を0としたときのケーブル長の増減を表し、Figure 2に示す機体間距離の増減に合わせて最大変動量 $\Delta L'$ 内で増減していることがわかる。 $\alpha, \dot{\alpha}$ の振動に対し、減衰を最大限に発揮する条件で $L'$ を変化させることができる。ここで、 $\Delta L'$ の値は大きいほど物資の揺れの収束は早まるが、同時に2機のUAV機体間距離を大きく動かすことが必要になり、2機のUAVの衝突や物資の高度はUAVを上回るという問題が起こる。それらが起こらない範囲内で $\Delta L'$ を設定する必要があり、今回は $\Delta L' = 0.1[\text{m}]$ としている。

Figure 4に物資の揺れ角の時間応答を示す。青線は制振無の結果、橙線は提案手法を適用したときの結果を示す。2機のUAVが機体間距離を制御し始めると荷揺れ角の抑制効果が顕著に現れている。12秒以降は0.1[rad]未満の微小な揺れとなり、十分な制振効果が確認できる。

Table 1 Simulation conditions

Initial swing angle : $\alpha_0$ [rad]	$-\pi / 4$
Initial cable angle : $\beta_0$ [rad]	$\pi / 3$
Length of cable : $L$ [m]	1.0
Maximum variation of length of the apparent cable : $\Delta L'$ [m]	0.1
Mass of the payload : $m_p$ [kg]	0.1
Gravitational acceleration : $g$ [ $\text{m/s}^2$ ]	9.806

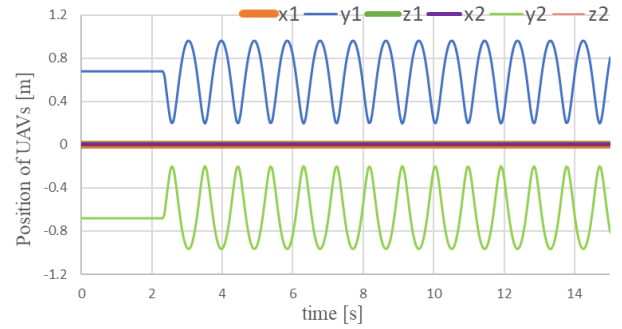


Figure 2. Position of UAVs

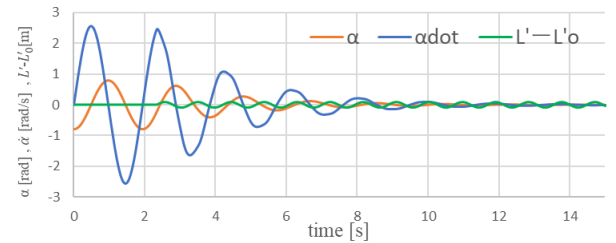


Figure 3.  $\alpha$ [rad],  $\dot{\alpha}$ [rad/s],  $L' - L'_0$ [m]

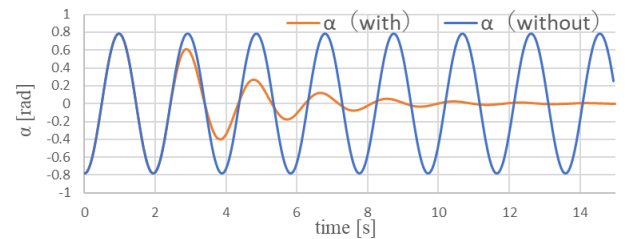


Figure 4.  $\alpha$ [rad] with/without vibration control

### 4. 結言

本項では、2機のUAVと物資をワイヤで繋いだ協働物資輸送の実現に向け、複数UAVを協調させることで荷揺れ角を制振する方法を提案した。また、提案手法の有効性について数値シミュレーションにより検証した。ただし、UAVの機体の大きさや最大変動量 $\Delta L'$ 、ケーブルの長さ $L$ の設定によっては、UAV同士の衝突や、物資がUAVの高度を上回る可能性もある。今後は、飛行時の制振や、外乱環境下での荷揺れ角の制振制御を検討する。

### 5. 参考文献

- [1] 齊藤 慶一郎 : 「クレーンのワイヤ巻き上げ時における振動抑制制御」, JSME, 2010
- [2] Yaser Alothman, Dongbing Gu : “Incentive Stackelberg Dynamic Game Approach to Transporting a Cable-Suspended Load with Two Quadrotors”, CEEC, 2018
- [3] Denise S.D. Stilling and Walerian Szyzkowski : “Controlling angular oscillations through mass configuration variable length pendulum case”, IJNM, 2002