

無人機の協調制御による被災地探査の効率化

Efficiency Cooperation System with UAV and UGV for Disaster Area Exploration

○伯川貴哉¹, 内山賢治², 増田開²*Takaya Hakukawa¹, Kenji Uchiyama², Kai Masuda²

UAV and UGV are expected to be widely active in exploring disaster area. However, each unmanned vehicle has problems such as short flight time and poor efficiency of the exploration. As a solution of these problems, a cooperative control is useful by compensating disadvantages each other. In this paper, we proposed a cooperation system using quadrotor UAV and UGV. In the cooperative system, potential function method that can flexibly cope with change of environment without heavy calculation load is used to avoid obstacles and reach destination. The validity of the proposed control system is verified through numerical simulations.

1. 緒言

無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) や無人地上車輻 (UGV: Unmanned Ground Vehicle) は、通信インフラなどがない環境下で探査等を行えるため、災害時における利用が増加するとともに、様々な研究開発が行われている。

UGV による探査では、事前の経路設計が必要ないポテンシャル関数誘導法が有効な方法の一つとされている。ただし、この誘導則には局所解が存在し、探査中に局所解に陥った場合、探査の継続が不可能になる^[1]。これに対し、固定翼 UAV と UGV を協調させることで探査範囲を広げ、局所解の回避を図ってきた^[2]。しかし、固定翼 UAV と UGV の速度に大きな違いがあることから、探査の効率化を実現する有効な協調システムを構築するためには、いくつかの問題点が挙げられている。

そこで本稿では、汎用性や機動性に優れた、マルチコプタ型の UAV と UGV の協調システムを提案し、探査の効率化を図る。最後に、数値シミュレーションで提案手法の有効性を検証する。

2. 協調制御系

2.1 UAV の誘導制御系

Figure 1 に示す UAV の並進・回転運動に対し、それぞれ Dynamic inversion (DI) 法により運動方程式^[3]の線形化を行い、その後、誘導制御系を設計する。

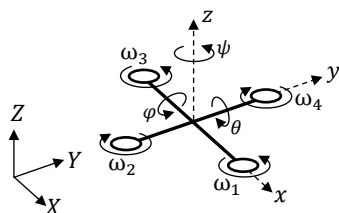


Figure 1. Coordinate system of UAV

まず、並進制御系における位置の誤差 \mathbf{x}_e を次式で定義する。

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{x} - \mathbf{x}_c = [x - x_c \quad y - y_c \quad z - z_c]^T \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{x} は現在位置、 \mathbf{x}_c は目標位置を示す。(1)式の二階微分及び非線形運動方程式より次式が得られる。

$$\ddot{\mathbf{x}}_e = \frac{1}{m} \mathbf{F}_g - \frac{1}{m} k_d \mathbf{V}^I + \frac{1}{m} \mathbf{T}^{I/B} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{T}^{I/B}$ は機体座標系の推力 \mathbf{T}^B から慣性座標系に座標変換した推力を示している。以上より、(2)式を線形化するための推力ベクトル $\mathbf{T}^{I/B}$ は、次式のように非線形項を含む式で表せる。

$$\begin{aligned} \mathbf{T}^{I/B} &= m \left(-\frac{1}{m} \mathbf{F}_g + \frac{1}{m} F_d \mathbf{V}^I + \mathbf{v}_x \right) \\ &= [T_x \quad T_y \quad T_z]^T \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{v}_x は線形化されたシステムにおける新たな制御入力であり、システムは次式で表される。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_e \\ \dot{\mathbf{x}}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_e \\ \dot{\mathbf{x}}_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \mathbf{v}_x \quad (4)$$

上式に対し最適レギュレータを適用し、状態フィードバックゲインを求める。また、(3)式で示された推力ベクトル $\mathbf{T}^{I/B}$ の各軸方向の成分を用いて、UAV の姿勢角指令値 φ_c , θ_c を生成する。各指令値は次式のようにになる。

$$\varphi_c = -\tan^{-1}(T_y/T_z), \quad \theta_c = \tan^{-1}(T_x/T_z), \quad \psi_c = 0 \quad (5)$$

次に、指令値に姿勢を追従させるため角度の誤差 \mathbf{e}_e を次式のように定義する。

$$\mathbf{e}_e = \mathbf{e} - \mathbf{e}_c = [\varphi - \varphi_c \quad \theta - \theta_c \quad \psi - \psi_c]^T \quad (6)$$

ここで、 \mathbf{e} は現在の姿勢角、 \mathbf{e}_c は指令値である。(6)式の間微分及び非線形運動方程式より次式が成り立つ。

$$\ddot{\mathbf{e}}_e = \dot{\mathbf{C}}(\mathbf{e}) \boldsymbol{\omega}^B - \mathbf{C}(\mathbf{e}) \mathbf{I}^{-1} \tilde{\boldsymbol{\omega}} \mathbf{I} \boldsymbol{\omega}^B + \mathbf{C}(\mathbf{e}) \mathbf{I}^{-1} \mathbf{M}_d \quad (7)$$

$\mathbf{C}(\mathbf{e})$ と $\dot{\mathbf{C}}(\mathbf{e})$ はそれぞれ変換行列とその一階微分であり、 \mathbf{M}_d はモーメントベクトルを示す。以上より、(7)式を線

形化するための \mathbf{M}_d は、次式のように非線形項を含む式で表せる.

$$\mathbf{M}_d = -\mathbf{I}\mathbf{C}^{-1}(\mathbf{e})\dot{\mathbf{C}}(\mathbf{e})\boldsymbol{\omega}^B + \tilde{\boldsymbol{\omega}}\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}^B + \mathbf{I}\mathbf{C}^{-1}\mathbf{v}_e \quad (8)$$

ここで、 \mathbf{v}_e は線形化されたシステムにおける新たな制御入力であり、システムは次式で表される.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_e \\ \dot{\mathbf{e}}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_e \\ \dot{\mathbf{e}}_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \mathbf{v}_e \quad (9)$$

(9)式に対し最適レギュレータを適用し、状態フィードバックゲインを求める.

機体への入力は、推力ベクトル $\mathbf{T}^{i/B}$ とモーメントベクトル \mathbf{M}_d を用い、速度の指令値はポテンシャル関数誘導法^[1]を用いて生成する.

2.2 UGV の誘導制御系

Figure 2 に示す UGV についても UAV と同様に DI 法を適用し、非線形運動方程式^[1]の線形化を行う. 誤差の方程式より、非線形項を打ち消す推力ベクトル $\mathbf{T}^{i/b}$ は、次式で表せる.

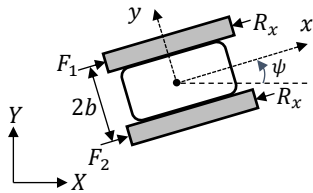


Figure 2. Coordinate system of UGV

$$\begin{aligned} \mathbf{T}^{i/b} &= m \left(-\dot{\mathbf{R}}_{i/b} \mathbf{v}^b + \frac{\mathbf{R}_{i/b}}{m} \begin{bmatrix} \text{sign}(\dot{x}) R_x \\ 0 \end{bmatrix} \right) \\ &\quad + \frac{\mathbf{R}_{i/b}}{m} \begin{bmatrix} (a_1 F_1 + a_2 F_2) \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{v}_{xr} \\ &= [T_x \quad T_y]^T \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 \mathbf{v}_{xr} は線形化されたシステムにおける新たな制御入力であり、 $\mathbf{R}_{i/b}$ は回転行列^[1]である. 以下に線形化されたシステムを示す.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{er} \\ \dot{\mathbf{x}}_{er} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{I}_{2 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{er} \\ \dot{\mathbf{x}}_{er} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{I}_{2 \times 2} \end{bmatrix} \mathbf{v}_{xr} \quad (11)$$

(11)式に対し最適レギュレータを適用し、状態フィードバックゲインを求める. また、(10)式で示した推力ベクトル $\mathbf{T}^{i/b}$ の各軸方向の成分を用いて UGV の指令角 ψ_c を生成する. 指令値を次式のように定義する.

$$\psi_c = \tan^{-1} \left(\frac{T_y}{T_x} \right) \quad (12)$$

次に、指令値に姿勢を追従させるため、回転制御系について考える. 角度の誤差から計算された非線形項を打ち消すモーメントベクトル M_{dr} を次式に示す.

$$\mathbf{M}_{dr} = J \{ b(a_1 F_1 - a_2 F_2) + v_{er} \} \quad (13)$$

ここで、 \mathbf{v}_{er} は線形化されたシステムにおける新たな制

御入力であり、システムは次式で表される.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{er} \\ \dot{\mathbf{e}}_{er} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{er} \\ \dot{\mathbf{e}}_{er} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_{er} \quad (14)$$

(14)式に対し最適レギュレータを適用し、状態フィードバックゲインを求める. UAV の誘導制御と同様に、 $\mathbf{T}^{i/b}$ と M_{dr} により機体への入力、ポテンシャル関数誘導法により指令値の生成を行う.

3. 数値シミュレーション

数値シミュレーションでは、UAV 及び UGV の障害物検出範囲を X-Y 平面上で半径 5 [m] とし、UGV が目標位置に到着した時点でミッション完了とした. なお、X-Y 平面上の 1 辺が $10\sqrt{2}$ [m] になる正方形の各頂点に UAV 及び UGV を配置した. また、常に目標に対して UGV が後方であり、UGV の対角線上の頂点にある UAV が先頭となる配置とした.

Figure 3 では先行する UAV 群から得た障害物の位置情報により、局所解に陥ることを回避しており、提案手法の有効性が確認できた.

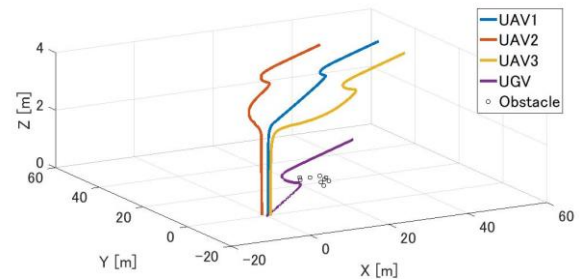


Figure 3. Trajectories of UAVs and UGV during cooperation

4. 結言

本研究では、UAV と UGV 対してポテンシャル関数を適用した協調システムを提案し、被災地等における探査の効率化を図った. 数値シミュレーションにより提案するシステムの有効性を確認した.

参考文献

- [1] 羽鳥龍太, 澁谷浩平, 内山賢治: 走行抵抗を考慮したポテンシャル関数法による惑星探査ローバの誘導, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1E03, 2015.
- [2] 小湊 翔太, 内山賢治: UAV-UGV 協調システムによる探査の効率化, 日本大学理工学部航空宇宙工科学科論文, 2016.
- [3] Xin Liu, Quanmin Zhu, Pritesh Narayan, "Case studies on U state space control system design for quadrotor model", 8th International Conference on Modelling, Identification and Control, pp.857-862, 2016.