

速度場を用いた誘導則による UAV のフォーメーションフライト Guidance Law Based on Velocity Field for UAV's Formation Flight

○中森壯輝¹, 阿部貴裕¹, 小桑昌範², 内山賢治³

*Soki Nakamori¹, Takahiro Abe¹, Masanori Kokume² and Kenji Uchiyama³

This paper describes the guidance law based on velocity field for formation flight of multiple Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). Using this method UAVs can be moved by decentralized control. The attitude of each UAV is controlled by state feedback. In order to verify the performance of the proposed guidance law, numerical simulation and preliminary experiment are demonstrated.

1. はじめに

複数機の UAV によるミッションを想定した時、フォーメーションを形成する為の誘導が問題となる。機体数増加による各機の経路生成処理の複雑化を避ける為、本研究では速度場に基づく自律分散的な誘導則を用いる。提案する誘導則の有効性は、数値シミュレーション及び現在開発中の実験システムを用いて検証する。

2. 誘導則

UAV の誘導則にはポテンシャル関数に起因する速度場による制御を用いている。 i 番目の UAV に発生する速度場 \mathbf{v}_i は、誘導ポテンシャル関数 U^S 、反発ポテンシャル関数 U^R によって次の様に形成される。 [1] [2]

$$\mathbf{v}_i = -\nabla_i U^S(\mathbf{x}_i) - \nabla_i U_{ij}^R(\mathbf{x}_{ij}) \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{x}_i は各 UAV の位置ベクトルを表し、 $\mathbf{x}_{ij} = |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|$ は各 UAV 間の相対距離である。

誘導ポテンシャル関数 U^S は、以下の式で表される。

$$U^S(\mathbf{x}_i) = C_h \sqrt{\left(\sqrt{x_i^2 + y_i^2} - r\right)^2 + 1} \quad (2)$$

誘導ポテンシャル関数 U^S は半径 r の円へ UAV を誘導し、 C_h は誘導速度の変化率を決定する係数である。

反発ポテンシャル関数 U_{ij}^R は、以下の式で表される

$$U_{ij}^R(\mathbf{x}_{ij}) = C_r \sum_{j,j \neq i} \exp\left(-\frac{|\mathbf{x}_{ij}|}{L_r}\right) \quad (3)$$

ここで、 C_r は反発の強さ、 L_r は影響範囲を決定する係数である。反発ポテンシャル関数 U_{ij}^R は、他の UAV に対して斥力が働くような速度場を作り出す。これにより UAV は障害物の回避やフォーメーションフライト時の相互衝突を避けることができる。

式(2),(3)に示したポテンシャル関数を位置 x, y で偏微分する事で、 xy 平面上に速度場が形成される。図 1 は $(x, y) = (200, 200)$ 地点へ誘導される様に誘導ポテンシャルを設定した場合の速度場であり、 $(x, y) = (95, 95)$ 地点に他の UAV がいると仮定した。反発ポテンシャルによって相互衝突を回避するような速度場が形成されている事が分かる。

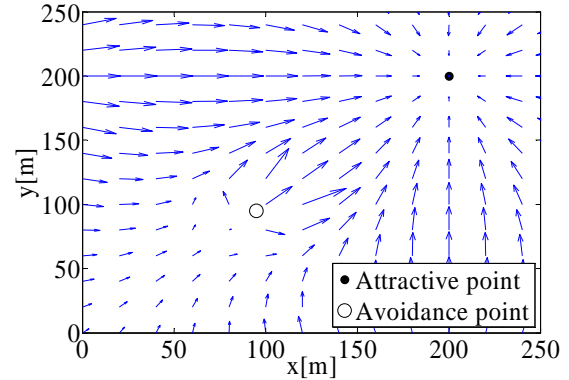


Figure 1. Velocity field

この速度場を用いることで、指令方位角 $\psi_{d,i}$ 及び指令速度 $v_{d,i}$ を以下のように定義する。

$$\psi_{d,i} = \tan^{-1}\left(\frac{v_{y,i}}{v_{x,i}}\right) \quad (4)$$

$$v_{d,i} = \sqrt{v_{x,i}^2 + v_{y,i}^2} \quad (5)$$

ただし、 $v_{x,i}, v_{y,i}$ はそれぞれ \mathbf{v}_i を x, y で偏微分した値である。

3. 数値シミュレーション

第 2 節の誘導則の有効性を検証する為、数値シミュレーションにより 2 機の UAV のフォーメーションフライトを行った。シミュレーション開始 0 秒から 30 秒までは $r = 10[m]$ 、30 秒から 60 秒までは $r = 0[m]$ 、それ以降は $r = 20[m]$ と設定した。UAV の姿勢制御則には状態フィードバックを用い、フィードバックゲイン K_p は最適レギュレータによって決定した。以下にその結果を示す。

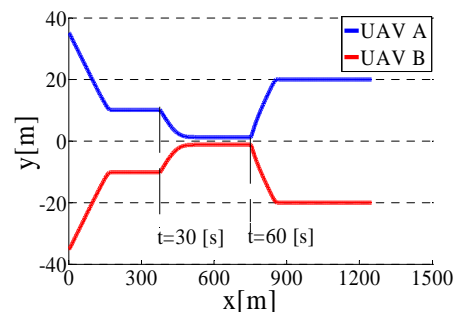


Figure 2. Trajectories of UAVs

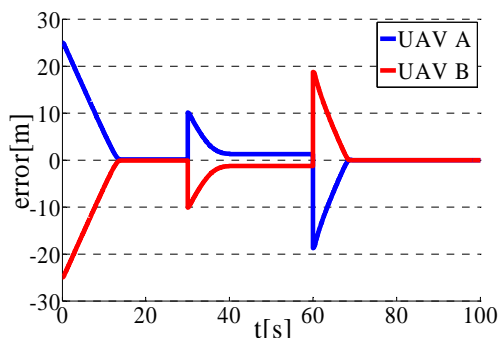


Figure 3. Error between equilibrium state and actual position of UAV

図2はシミュレーションにおける UAV の軌跡を示している。この図から、誘導目標半径が変化するのに従い、UAV 同士の間隔が変わっている事が分かる。

図3は UAV の位置と目標半径 r の差を計算したものを示している。30 秒から 60 秒の間ではフォーメーション半径 $r = 0[m]$ としているが、反発ポテンシャル U_{ij}^R が機能している事から相互衝突が回避できている事が分かる。実験において、より大きな UAV を使用する場合には反発ポテンシャル U_{ij}^R の係数である L_r を大きくする事で、機体間距離を調整する事ができる。

4. 実験

4.1 実証機の開発

実験によっても誘導則の有効性を検証するために、下図に示す UAV を開発した。

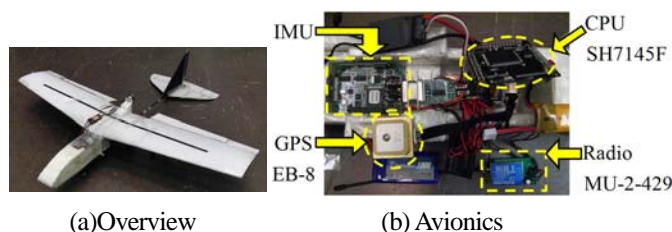


Figure 4. Developed UAV

機体内部にはマイコンやセンサーが搭載されている。3 軸の姿勢角と角速度は IMU センサーにより検出し、現在位置は GPS から取得する。

速度を検出するセンサーは搭載していないので、速度はオブザーバにより推定する。図5にオブザーバを含めた制御系のブロック線図を示す。

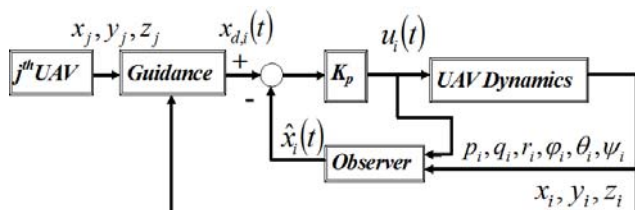


Figure 5. UAV flight control system

誘導則の演算はマイコンには負荷が大きいと考え、地上局で計算を行う事にした。(図6)

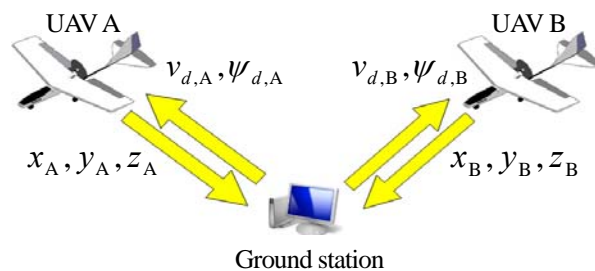


Figure 6. UAV's communication system

4.2 実験結果

フォーメーションフライトの前実験として、UAV の水平飛行実験を行った。その結果を図7に示す。この図より、UAV はほぼ水平の姿勢を維持できていることが分かる。

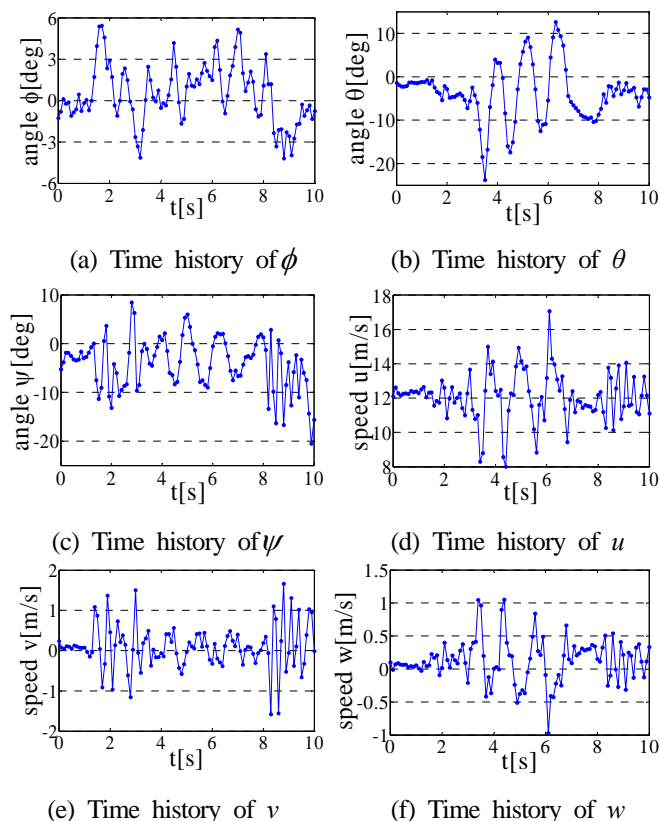


Figure 7. Experimental results

5. まとめ

数値シミュレーションにより誘導則の有効性を検証した。また開発した UAV において水平飛行を達成した。今後は提案した誘導則の実証実験を行ない、その後フォーメーションフライト実験を行う。

参考文献

- [1] Derek Bennet and Colin R. McInnes, "SpaceCraft Formation Flying Using Bifurcating Potential Fields", *International Astronautical Congress, IAC-08-C1.6.4*, 2008.
- [2] Masanori Kokume and Kenji Uchiyama, "Guidance Law Based on Bifurcating Velocity Field for Formation Flight", *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, AIAA-2010-8081*, 2010.