

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(10), 859-867(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.10.859

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

다수 무인기의 행위 기반 강인 군집비행 제어법칙 설계

신종호**, 김승균*, 석진영***

Development of robust flocking control law for multiple UAVs using behavioral decentralized method

Jongho Shin**, Seungkeun Kim* and Jinyoung Suk***

Agency for Defense Development**

Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University *'***

ABSTRACT

This study proposes a robust formation flight control technique of multiple unmanned aerial vehicles(UAVs) using behavior-based decentralized approach. The behavior-based decentralized method has various advantages because it utilizes information of neighboring UAVs only instead of information of whole UAVs in the formation maneuvering. The controllers in this paper are divided into two methods: first one is based on position and velocity of neighboring UAVs, and the other one is based on position of neighboring UAVs and passivity technique. The proposed controllers assure uniformly ultimate boundedness of closed-loops system under time varying bounded disturbances. Numerical simulations are performed to validate the effectiveness of the proposed method.

초 록

본 논문은 행위 기반 분산 기법(behavior-based decentralized method)을 활용하여 복수 무인기의 군집 비행을 위한 강인 제어기를 제안한다. 행위 기반 분산 기법을 활용한 복수 무인기의 군집 비행은 주변 무인기들의 정보만을 활용하여 편대를 이루게 되므로 많은 장점을 갖는다. 본 논문에서는 무인기 시스템에 크기가 제한된 시변 외란(time varying bounded disturbance)이 존재하는 상황에서, 주변 무인기들의 위치와 속도를 모두 활용하는 경우와 위치만을 활용하는 경우로 나뉘어 제어기를 설계하며, 위치만을 활용하는 경우 passivity 기법을 적용하여 제어기를 설계한다. 제안된 제어기는 시간에 의존하는 제한된 외란이 존재하는 상황에서 전체 폐루프 시스템의 uniformly ultimate boundedness 특성을 보장한다. 수치 시뮬레이션을 통해 제안된 제어기법의 타당성을 검증한다.

Key Words : Behavior-Based Decentralized Method(행위기반 분산기법), Formation Flight(군집 비행), UAV(무인기), Robust Control(강인제어), Passivity Technique(패시비티기법)

† Received : January 13, 2015 Revised : September 9, 2015 Accepted : September 16, 2015

* Corresponding author, E-mail : skim78@cnu.ac.kr

I. 서론

최근 항공전자공학이 급속도로 발전함에 따라 무인기(unmanned aerial vehicle: UAV)의 활용분야가 크게 증가되고 있다. 특히, 정찰(reconnaissance), 공중 재급유(air refueling) 등의 복잡한 임무를 더욱 효과적으로 수행하기 위해 무인기의 협업과 관련된 많은 연구가 진행되고 있다[1,2].

복수 무인기의 편대비행은 크게 두 가지 방법으로 접근할 수 있다[1]. 첫 번째는 집중형(centralized) 방법으로서, 리더 무인기, 혹은 지상국(ground station)이 편대비행의 매니저가 된다[3]. 집중형 기법은 위험상황에서 사람의 결정권이 보장되는 장점이 있지만, 많은 양의 통신이 이루어져야 한다는 단점을 갖는다. 또한, 통신 지연 등의 문제는 전체 편대기동 성능을 크게 떨어뜨릴 수 있다. 두 번째 기법은 분산형(decentralized) 기법으로서 편대를 이루는 복수의 무인기들이 주변 무인기들의 정보만을 활용함으로써 독립적인 의사결정을 보장할 수 있는 기법이다[4-12].

무인기 군집비행에 관한 대부분의 연구는 집중형 구조에 기반한 선도기-추종기 기법을 사용하고 있다. 이는 선도기의 외란이 추종기로 전파되면서 오차가 증폭될 수 있으며, 선도기의 고장에 대응하기 어렵다는 단점이 있다. 선도기-추종기 구조와는 달리 행위기반 접근법은 철새들의 편대비행 행위와 유사하며, 로봇틱스 분야에서 활발하게 연구가 수행되어 왔다. 이 기법에서는 다양한 상황에 신속히 대응하기 위하여 각 멤버들의 목표행위들에 대한 상대적 가중치를 이용하여 제어입력이 계산된다. S. Kim과 Y. Kim[5]은 경로점 도달과 군집형태 유지라는 두 가지 행위를 유지하기 위한 PD 제어 형태의 행위기반 군집비행제어와 제어이득의 최적값을 결정하기 위한 알고리즘[6,7]을 제안하였다. 이는 분산형 구조에 기반하였지만, 다른 무인기의 위치/속도 정보를 통신채널 등을 이용하여 획득하는 것을 가정하였고, 통신이나 구동기 지연 및 외란에 의한 불확실성을 고려하지 않은 이상적인 상황을 가정하였다.

본 논문에서는 기존 행위 기반 분산형 기법의 단점을 보완하는 두 가지 형태의 강인 편대비행 제어기를 제안한다. 첫 번째 제어기는 주변 무인기들의 위치와 속도 정보를 활용하고, 두 번째 제어기는 주변 무인기들의 속도 정보 대신 passivity 기법을 활용한다[8]. 더불어 무인기에는 크기가 제한된 시변 외란(time varying bounded disturbances)이 존재한다고 가정한다. 이러한 외란을 제거하고 전체 페루프 시스템의 uniformly

ultimate boundedness 특성을 보장할 수 있는 강인 요소(robust term)를 포함한다[13,15].

본 논문의 2장은 무인기 모델에 대해 간략히 기술하고 3장에서는 군집기동에 대해 설명한다. 4장에서는 위에서 언급한 두 가지 제어기를 설계하고 5장에서 설계된 제어기의 타당성을 검증한다. 마지막으로 결론을 맺는다.

II. 무인기 모델

본 논문에서는 다음의 2차원 무인기 모델을 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cos \psi \\ \dot{y} &= V \sin \psi \\ \dot{V} &= u_1 + \delta_1 \\ \dot{\psi} &= \frac{u_2 + \delta_2}{V} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 x, y 는 관성좌표계에서의 무인기 위치, V 는 속도, ψ 는 헤딩각, 그리고 u_1, u_2 는 종방향 및 횡방향 가속도 제어입력을 나타낸다. δ_1, δ_2 는 시간에 의존하는 제한된 외란(bounded disturbance: $|\delta_1|, |\delta_2| < \bar{\delta}$)을 의미한다.

III. 군집 기동

본 장에서는 참고문헌 [6,8]에서 제안한 군집기동(formation maneuver)에 관해 기술한다. 군집의 패턴은 다음과 같이 통과해야 하는 경로점들을 활용하여 정의될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_{11}^d & \xi_{12}^d & \cdots & \xi_{1N}^d \\ \xi_{21}^d & \xi_{22}^d & \cdots & \xi_{2N}^d \\ \vdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ \xi_{k1}^d & \xi_{k2}^d & \cdots & \xi_{kN}^d \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 ξ 는 x, y 로 구성된 벡터($\xi = [x, y]^T$), P_j 는 j 번째 군집 패턴 세트, ξ_{ji}^d 는 i 번째 무인기의 j 번째 목표 경로점, k 는 경로점의 개수, N 은 무인기의 수를 나타낸다.

본 논문에서 목표로 하는 군집기동은 두 개의 목적을 시키면서 진행된다. 첫 번째 목표는 식(2)에서 정의된 군집 패턴속의 경로점을 통과해야 하는 것이고, 두 번째 목표는 무인기들이 현재 경로점에서 다음 경로점으로 이동시 군집 모양을 유지시키는 것으로 정의한다.

첫 번째 목표인 군집 패턴 속에 정의된 경로 점들을 통과시키기 위해 무인기의 현재 위치와 j 번째 목표 경로점과의 오차의 합 E_j^G 로 표현된다.

$$E_j^G = \sum_{i=1}^N e_{ji}^T K_g e_{ji} \quad (3)$$

여기서 $e_{ji} = \xi_{ji} - \xi_{ji}^d$, $K_g = K_g^T > 0$ 로 정의된다.

두 번째 목표인 이동시의 군집 모양 유지를 위해 다음과 같은 오차함수 E_j^F 로 정의된다.

$$E_j^F = \sum_{i=<N>} (e_{ji} - e_{j(i+1)})^T K_f (e_{ji} - e_{j(i+1)}) \quad (4)$$

여기서 $K_f = K_f^T > 0$, $i = <N>$ 은 ring summation을 의미한다[10,11]. 오차함수 E_j^F 가 0이 되는 것은 $e_{ji} - e_{j(i+1)}$ 가 0이 됨을 의미하므로 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\xi_{ji} - \xi_{j(i+1)} = \xi_{ji}^d - \xi_{j(i+1)}^d$$

즉, 무인기들의 군집형태가 목표 경로점들의 배치와 동일한 형태로 수렴됨을 의미한다.

경로 오차함수 E_j^G 와 유지 오차함수 E_j^F 를 활용하여 최종 오차함수 E 를 다음과 같이 정의한다.

$$E = \sum_{i=<N>} \left(e_{ji}^T K_g e_{ji} + (e_{ji} - e_{j(i+1)})^T K_f (e_{ji} - e_{j(i+1)}) \right) \quad (5)$$

따라서 본 논문의 최종목표는 외란 δ_1, δ_2 가 존재하는 상황에서 오차함수 (5)를 가능한 작은 값으로 보내는 것으로 정의된다.

군집비행에 참여하는 모든 무인기의 목표 경로점 도달 오차로 구성된 오차벡터를 다음과 같이 정의한다.

$$e_j = [e_{j1} \ e_{j2} \ \cdots \ e_{jN}]^T \quad (6)$$

오차벡터 e_j 와 Toeplitz 행렬 C , Kronecker Product을 활용하면 오차함수 E 는 다음과 같이 표현될 수 있다[6,8].

$$E = \frac{1}{2} e_j^T (I_N \otimes K_g + C \otimes K_f) e_j \quad (7)$$

여기서 I_N 은 $N \times N$ 단위행렬이고, $C > 0$ 으로 다음과 같다.

$$C = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N \times N}$$

$A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 일 경우 Kronecker 곱은 다음과 같이 정의된다[14].

$$A \otimes B = \begin{bmatrix} a_{11}B & \cdots & a_{1n}B \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}B & \cdots & a_{mn}B \end{bmatrix}$$

IV. 행위기반 군집비행 강인제어법칙

본 장에서는 3장에서 설명한 군집 기동을 위한 두 가지 형태의 강인제어기를 설계한다. 첫 번째 제어기는 주변 무인기의 위치와 속도 정보를 활용한 결합형 동역학 기반 제어법칙이다. 두 번째 제어기법은 무인기의 위치정보와 passivity를 활용한 passivity기반 군집비행 제어법칙이다. 제안된 두 가지의 제어기는 불확실성 δ_1, δ_2 를 보상하기 위한 강인요소(robustifying term)를 포함한다.

본 논문에서 제안하는 군집비행 제어법칙은 입력-출력 궤환선형화(feedback linearization) 기법을 활용한다. 입력-출력 궤환선형화 기법을 활용하기 위해 3장에서 정의한 벡터 ξ 를 출력 ξ_1 으로 정의한 뒤, 시간에 대해 두 번 미분하게 되면 다음의 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_1 &= \xi_2 \\ \dot{\xi}_2 &= g(\psi)(u + \delta) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $u = [u_1 \ u_2]^T$, $\delta = [\delta_1 \ \delta_2]^T$, $\xi_2 = \dot{\xi}$, $g(\psi)$ 는 다음과 같다.

$$g(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (9)$$

4.1 결합형 동역학 기반 군집비행

본 절에서는 주변 무인기들의 위치와 속도 정보를 모두 활용한 결합형 동역학 기반 군집비행 제어법칙을 설계한다.

j 번째 군집 형태로 비행중인 무인기의 위치

오차벡터 e_j 를 e_1 로 정의하자. e_1 의 i 번째 요소 e_{1i} 을 시간에 대해 미분하고 가상 제어입력 (virtual control input) $\bar{\xi}_{2i}$ 를 도입하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{e}_{1i} &= \dot{\xi}_{1i} - \dot{\xi}_i^d \\ &= \xi_{2i} - \bar{\xi}_{2i} + \bar{\xi}_{2i} - \dot{\xi}_i^d \\ &= e_{2i} + \bar{\xi}_{2i} - \dot{\xi}_i^d\end{aligned}\quad (10)$$

여기서 오차변수 e_{2i} 는 $\xi_{2i} - \bar{\xi}_{2i}$ 를 의미하고 e_{1i} 를 제어하기 위한 가상 제어입력 $\bar{\xi}_{2i}$ 은 다음과 같이 정의한다.

$$\bar{\xi}_{2i} = -K_1 e_{1i}\quad (11)$$

여기서 $K_1 (> 0)$ 은 대각양행렬을 의미한다. 가상 제어입력 (11)을 (10)에 적용하면 다음을 얻는다.

$$\dot{e}_{1i} = -K_1 e_{1i} + e_{2i}\quad (12)$$

두 번째 오차변수 e_{2i} 를 시간에 대해 미분하면 다음을 얻는다.

$$\dot{e}_{2i} = g_i(u_i + \delta_i) + K_1(-K_1 e_{1i} + e_{2i})\quad (13)$$

식 (13)을 기반으로 i 번째 무인기의 최종제어 입력은 다음과 같이 설계한다.

$$u_i = g_i^{-1}(\nu_i - r_{f_i} - K_1(-K_1 e_{1i} + e_{2i}))\quad (14)$$

여기서 ν_i 와 r_{f_i} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}\nu_i &= -(K_g e_{1i} + 2K_f e_{1i} - K_f e_{1i-1} - K_f e_{1i+1}) \\ &\quad - (D_g e_{2i} + 2D_f e_{2i} - D_f e_{2i-1} - D_f e_{2i+1})\end{aligned}\quad (15)$$

$$r_{f_i} = \frac{\bar{\delta}_i^2}{\bar{\delta}_i \|e_{2i}\| + \epsilon_i} e_{2i}\quad (16)$$

여기서 $K_g, K_f, D_g, D_f (> 0)$ 는 대각 양행렬을 의미하며 $e_{1i-1}, e_{1i+1}, e_{2i-1}, e_{2i+1}$ 는 $i-1, i+1$ 번째 무인기의 두 오차변수를 의미한다. 식 (16)에 정의된 r_{f_i} 는 불확실 요소 δ_i 를 보상하기 위한 강인요소이며, ϵ_i 는 설계변수가 된다.

제어입력 (14)를 오차시스템 (13)에 적용하면 다음과 같은 폐루프 시스템을 얻는다.

$$\dot{e}_{2i} = \nu_i - r_{f_i} + g_i \delta_i$$

정리1. 최종제어 입력 (14)는 δ 의 존재에도 불구하고, 오차변수 e_1, e_2 의 uniformly ultimate boundedness를 보장한다.

증명. 다음과 같은 Lyapunov 후보 함수를 고려하자.

$$L = \frac{1}{2} e_1^T (I_N \otimes K_g + C \otimes K_f) e_1 + \frac{1}{2} e_2^T e_2\quad (17)$$

여기서 e_1 과 e_2 는 모든 무인기들의 오차 변수 ($e_{1i}, e_{2i}, (i = 1, \dots, N)$)를 포함한 벡터가 된다.

위 함수의 방향 시간 도함수를 구하면 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned}\dot{L} &= e_1^T (I_N \otimes K_g + C \otimes K_f) (- (I_N \otimes K_1) e_1 + e_2) \\ &\quad + e_2^T (- (I_N \otimes K_g + C \otimes K_f) e_1 - (I_N \otimes D_g \\ &\quad + C \otimes D_f) e_2 + G\Delta - Re_2) \\ &\leq -\lambda_1 e_1^T (I_N \otimes K_g + C \otimes K_f) e_1 - \lambda_2 e_2^T e_2 \\ &\quad + e_2^T G\Delta - e_2^T Re_2\end{aligned}\quad (18)$$

여기서 $G\Delta$ 와 R, λ_1, λ_2 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}G\Delta &= \text{diag}\{g_1 \delta_1, g_2 \delta_2, \dots, g_N \delta_N\} \\ R &= \text{diag}\left\{ \frac{\bar{\delta}_1^2}{\bar{\delta}_1 \|e_{21}\| + \epsilon_1} I_2, \frac{\bar{\delta}_2^2}{\bar{\delta}_2 \|e_{22}\| + \epsilon_2} I_2, \right. \\ &\quad \left. \dots, \frac{\bar{\delta}_N^2}{\bar{\delta}_N \|e_{2N}\| + \epsilon_N} I_2 \right\} \\ \lambda_1 &= \min_\lambda (K_1) \\ \lambda_2 &= \min_\lambda (I_N \otimes D_g + C \otimes D_f)\end{aligned}$$

$\min_\lambda (A)$ 는 A 행렬의 가장 작은 고유치를 의미한다.

식 (18)의 마지막 부분 $e_2^T G\Delta - e_2^T Re_2$ 는 다음과 같이 한정된다.

$$\begin{aligned}e_2^T G\Delta - e_2^T Re_2 &\leq \bar{\delta}_1 \|e_{21}\| + \bar{\delta}_2 \|e_{22}\| + \dots + \bar{\delta}_N \|e_{2N}\| \\ &\quad - \frac{\bar{\delta}_1^2 \|e_{21}\|^2}{\bar{\delta}_1 \|e_{21}\| + \epsilon_1} - \frac{\bar{\delta}_2^2 \|e_{22}\|^2}{\bar{\delta}_2 \|e_{22}\| + \epsilon_2} \\ &\quad \dots - \frac{\bar{\delta}_N^2 \|e_{2N}\|^2}{\bar{\delta}_N \|e_{2N}\| + \epsilon_N} \\ &= \frac{\bar{\delta}_1 \|e_{21}\| \epsilon_1}{\bar{\delta}_1 \|e_{21}\| + \epsilon_1} + \frac{\bar{\delta}_2 \|e_{22}\| \epsilon_2}{\bar{\delta}_2 \|e_{22}\| + \epsilon_2} \\ &\quad \dots + \frac{\bar{\delta}_N \|e_{2N}\| \epsilon_N}{\bar{\delta}_N \|e_{2N}\| + \epsilon_N} \\ &\leq N\epsilon\end{aligned}$$

여기서 ϵ 은 $\epsilon_1, \dots, \epsilon_N$ 에서 가장 큰 값을 의미한다. 따라서 식 (18)은 다음과 같이 한정된다.

$$\dot{L} \leq -\lambda_1 e_1^T (I_N \otimes K_g + C \otimes K_f) e_1 - \lambda_2 e_2^T e_2 + N\epsilon \leq -2\tau L + N\epsilon$$

여기서 τ 는 다음과 같다.

$$\tau = \min \{ \lambda_1, \lambda_2 \}$$

윗식은 $L \geq N\epsilon/2\tau$ 일때 방향 도함수가 음수임을 의미하므로 최종적으로 e_1, e_2 의 uniformly ultimate boundedness를 보장한다.

4.2 Passivity 기반 군집비행

본 절에서는 주변 무인기들의 위치정보만을 활용한 passivity 기반 군집비행 제어법칙을 설계한다.

Passivity 기반의 제어법칙은 앞 절의 제어법칙과 비슷한 형태로 설계된다.

$$u_i = g_i^{-1} (\nu_{p_i} - r_{f_i} - K_1 (-K_1 e_{1i} + e_{2i})) \quad (19)$$

하지만, 주변 무인기들의 속도 정보를 활용할 수 없으므로 제어입력 (19)의 ν_{p_i} 는 다음과 같이 정의해보자.

$$\begin{aligned} \nu_{p_i} = & -(K_g e_{1i} + 2K_f e_{1i} - K_f e_{1i-1} - K_f e_{1i+1}) \\ & - (D_g e_{2i} + 2D_f e_{2i} - D_f A \hat{x}_{i-1} - D_f e_{1i-1}) \\ & - D_f A \hat{x}_{i+1} - D_f e_{1i+1} \end{aligned} \quad (20)$$

여기서 A 행렬은 음한정 행렬이며 \hat{x}_i 는 다음을 통해 얻는다.

$$\dot{\hat{x}}_i = A \hat{x}_i + e_{1i} \quad (21)$$

제어입력 (19)을 오차시스템 (13)에 적용하면 다음과 같다.

$$\dot{e}_{2i} = \nu_{p_i} - r_{f_i} + g_i \delta_i$$

정리2. 양의 고유치 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_6$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \min_{\lambda} (K_1) \\ \lambda_2 &= \min_{\lambda} (I_N \otimes D_g + I_N \otimes 2D_f) \\ \lambda_3 &= \max_{\lambda} (|(C - 2I_N) \otimes D_f A|) \\ \lambda_4 &= \max_{\lambda} (|(C - 2I_N) \otimes D_f|) \\ \lambda_5 &= \min_{\lambda} (|I \otimes A|) \\ \lambda_6 &= \max_{\lambda} ((I_N \otimes K_g + C \otimes K_f)^{-1}) \end{aligned} \quad (22)$$

정의된 고유치 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_6$ 은 다음의 조건을 만족한다.

$$\begin{aligned} \lambda_1 &> \frac{1}{2} \lambda_4 \lambda_6 + \frac{1}{2} \lambda_6 \\ \lambda_2 &> \frac{1}{2} \lambda_3 + \frac{1}{2} \lambda_4 \\ \lambda_5 &> \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \lambda_3 \end{aligned} \quad (23)$$

제어이득 K_1, K_g, K_f, D_g, D_f 와 음한정 행렬 A 를 위의 고유치 조건 (23)를 만족하도록 설계하면 최종제어 입력 (19)는 δ 의 존재에도 불구하고, 주변 무인기들의 위치정보만을 활용하여, 오차변수 e_1, e_2 의 uniformly ultimate boundedness를 보장한다.

증명. 다음과 같은 Lyapunov 후보 함수를 고려하자.

$$\begin{aligned} L_p = & \frac{1}{2} e_1^T (I_N \otimes K_g + C \otimes K_f) e_1 + \frac{1}{2} e_2^T e_2 \\ & + \frac{1}{2} \hat{x}^T \hat{x} \end{aligned} \quad (24)$$

여기서 \hat{x} 는 \hat{x}_i 들로 구성된 벡터를 의미한다.

함수 (24)의 방향 시간 도함수는 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} \dot{L}_p = & e_1^T (I_N \otimes K_g + C \otimes K_f) (- (I_N \otimes K_1) e_1 + e_2) \\ & + e_2^T (- (I_N \otimes K_g + C \otimes K_f) e_1 \\ & - (I_N \otimes D_g + I_N \otimes 2D_f) e_2 \\ & + (C - 2I_N) \otimes D_f A \hat{x} + (C - 2I_N) \otimes D_f e_1 \\ & + G\Delta - Re_2) + \hat{x}^T ((I_N \otimes A) \hat{x} + e_1) \end{aligned}$$

식 (22)에서 정의한 최소 고유치 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_6$ 과 삼각 부등식을 활용하면

$$\begin{aligned} \dot{L}_p \leq & -\lambda_1 e_1^T (I_N \otimes K_g + C \otimes K_f) e_1 - \lambda_2 e_2^T e_2 \\ & + \frac{1}{2} \lambda_3 e_2^T e_2 + \frac{1}{2} \lambda_3 \hat{x}^T \hat{x} + \frac{1}{2} \lambda_4 e_2^T e_2 + \frac{1}{2} \lambda_4 e_1^T e_1 \\ & - \lambda_5 \hat{x}^T \hat{x} + \frac{1}{2} \hat{x}^T \hat{x} + \frac{1}{2} e_1^T e_1 + e_2^T G\Delta - e_2^T Re_2 \\ \leq & -(\lambda_1 - \frac{1}{2} \lambda_6 - \frac{1}{2} \lambda_4 \lambda_6) e_1^T (I_N \otimes K_g + C \otimes K_f) e_1 \\ & - (\lambda_2 - \frac{1}{2} \lambda_3 - \frac{1}{2} \lambda_4) e_2^T e_2 - (\lambda_5 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \lambda_3) \hat{x}^T \hat{x} \\ & + e_2^T G\Delta - e_2^T Re_2 \end{aligned}$$

정리1에서 보인 $e_2^T G\Delta - e_2^T Re_2$ 의 한정성과 최소 고유치조건을 만족하면 윗 식은 다음과 같이 한정된다.

$$\dot{L}_p \leq -\tau_p L_p + N\epsilon$$

Table 1. Waypoints for 3 UAVs (m,m)

	경로점 P_1	경로점 P_2	경로점 P_3
UAV1	(90,65)	(30,210)	(-20,50)
UAV2	(50,70)	(10,160)	(-40,100)
UAV3	(70,35)	(50,190)	(0,50)

여기서 τ_p 는 다음과 같다.

$$\tau_p = \min\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_5\}$$

윗식은 $L_p \geq N\epsilon/2\tau_p$ 일때 방향 도함수가 음수임을 의미하므로 최종적으로 e_1, e_2 의 uniformly ultimate boundedness를 보장한다.

V. 수치 시뮬레이션

본 장에서는 수치 시뮬레이션을 통해 제안된 군집 제어기법의 타당성을 검증한다.

군집 기동은 세 대의 회전익 무인기를 가정하여 이루어지며, Table 1에서 정의된 경로를 순차적으로 추종하며 군집패턴을 이루도록 정의한다 [6]. 무인기들의 초기조건은 다음과 같다.

무인기 1.

$$[x_1 \ y_1] = [40 \ -60](m, m)$$

$$[V_1 \ \psi_1] = [50km/h \ 50^\circ]$$

무인기 2.

$$[x_2 \ y_2] = [0 \ -70](m, m)$$

$$[V_2 \ \psi_2] = [40km/h \ 40^\circ]$$

무인기 3.

$$[x_3 \ y_3] = [-30 \ -60](m, m)$$

$$[V_3 \ \psi_3] = [45km/h \ 70^\circ]$$

군집 기동을 하는 무인기는 다음과 같은 크기가 제한된 시변 외란을 포함한다.

$$\delta_1 = 3 \cos t, \quad \delta_2 = \sin t$$

입력변수 종방향 및 횡방향 가속도의 제한조건은 0.5g로 가정하였고 제어이득은 다음과 같이 설계하였다.

$$K_1 = \text{diag}\{0.60, 0.60\}$$

$$K_g = \text{diag}\{0.07, 0.07\}, K_f = \text{diag}\{0.12, 0.12\}$$

$$D_g = \text{diag}\{0.28, 0.28\}, D_f = \text{diag}\{0.03, 0.03\}$$

$$A = \text{diag}\{-1.00 \ -1.00\}, \epsilon = 0.01, \bar{\delta}_i = 3.10$$

본 논문에서 제안한 강인요소를 포함한 군집 제어기의 성능을 확인하기 위해, 주변 인기들의 속도정보를 활용할 있는 경우(제어기 (14))와 활용할 수 없는 경우(제어기 (19))에 대해 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 더불어 외란을 포함하지 않은 경우와 포함한 경우를 동시에 고려하였다.

Figure 1~3은 주변 무인기들의 속도정보를 활용한 제어기 (14)에 대한 결과를 보여준다. Fig. 1은 목표 경로점들을 통과하여 비행하는 무인기들의 궤적을 보여준다. 시간이 지날수록 무인기들의 군집형태가 목표 경로점들의 배치 형태로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 또한 외란이 존재함에도 불구하고, 군집비행이 유지되는 것으로 보아 제안한 제어기법이 외란을 적절히 제거하고 있음을 알 수 있다. Fig. 2와 3은 각 무인기의 속도 및 헤딩 각 응답과 제어 입력의 시간반응을 보여준다. 외란 발생시, 외란이 존재하지 않은 경우와는 달리 발생된 외란을 제거하기 위해 더욱 많은 제어입력을 사용하고 있으며 그에 따라 속도 및 헤딩 각 응답이 변화하고 있음을 확인할 수 있다.

Figure 4~6은 주변 무인기들의 속도정보를 활용하지 않고, passivity를 활용한 제어기법 (19)에 대한 결과를 보여준다. Fig. 4는 목표 경로점들을 통과하여 비행하는 무인기들의 궤적을 도시한다. 시간이 지날수록 무인기들이 목표 경로점들의 배치형태로 수렴하는 것을 확인할 수 있고, 외란이 존재함에도 불구하고 군집비행이 유지되는 것을 Fig. 4-b)를 통해 확인할 수 있다. 하지만, 주변 무인기들의 속도정보를 활용한 제어기 (14)를 적용할 때 더욱 빠르게 최종 경로점에 도달할 수 있으며 속도와 헤딩 각 시간반응에서 보이듯이 상대적으로 과도응답이 적게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 제어기 (19)의 경우, 주변 무인기들의 속도 정보를 필터 (21)을 통한 추정치를 활용하기 때문으로 필터의 시간 지연이 Fig. 4에서 볼 수 있는 약간의 과도응답을 발생시키는 것으로 판단된다. 필터의 고유치를 음의 방향으로 키움으로서 시간 지연 문제를 해결할 수 있으나, 필터의 고유치 증가는 제어기 (19)의 제어이득을 전체적으로 증가시킴으로서 오히려 군집 기동 성능이 나빠짐을 확인할 수 있었다.

Figure 5와 6은 제어기법(19)를 활용하였을 때의 무인기 속도 및 헤딩 각 응답, 제어 입력 시간반응을 보여준다. 제어기법 (14)의 결과와 유사하게, 제어기법 (19)에서도 발생된 외란을 제거하기 위해 더욱 많은 제어입력을 사용하고 있으며 그에 따라 속도 및 헤딩 각 응답이 변화하고 있음을 확인할 수 있다. 하지만, 전체적인 군집비행의 성능측면에서는, 제한된 외란이 존재함에도 불구하고

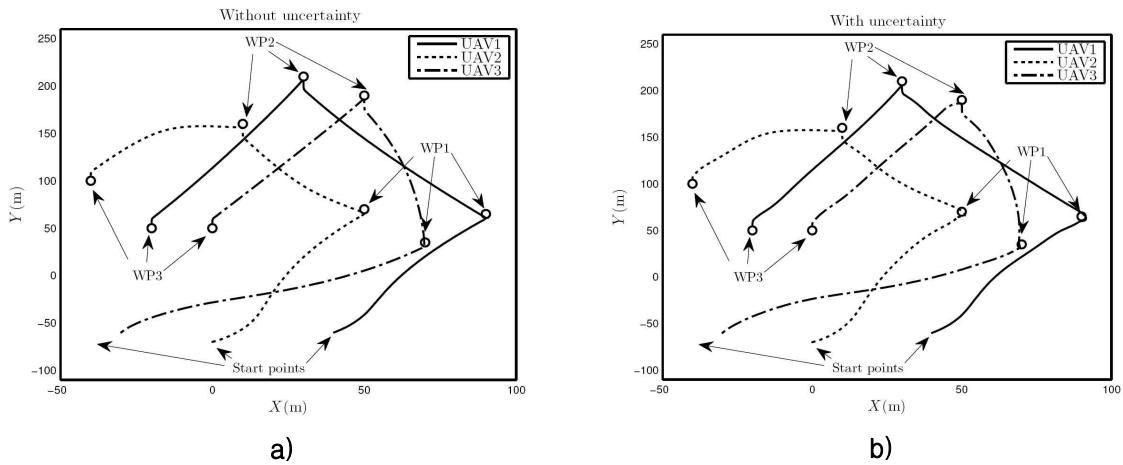


Fig. 1. Trajectory results with (14) a) Without uncertainty b) With uncertainty

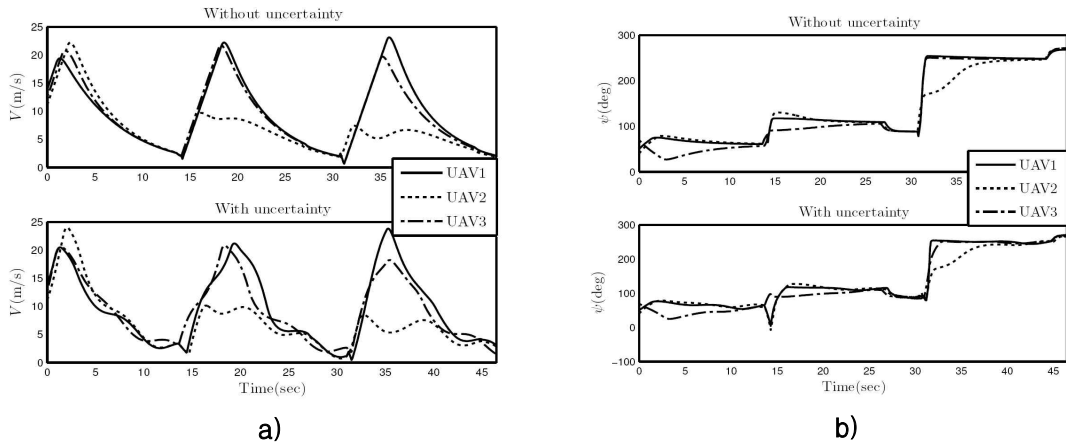


Fig. 2. Simulation results with (14); a) Velocity responses b) Heading responses

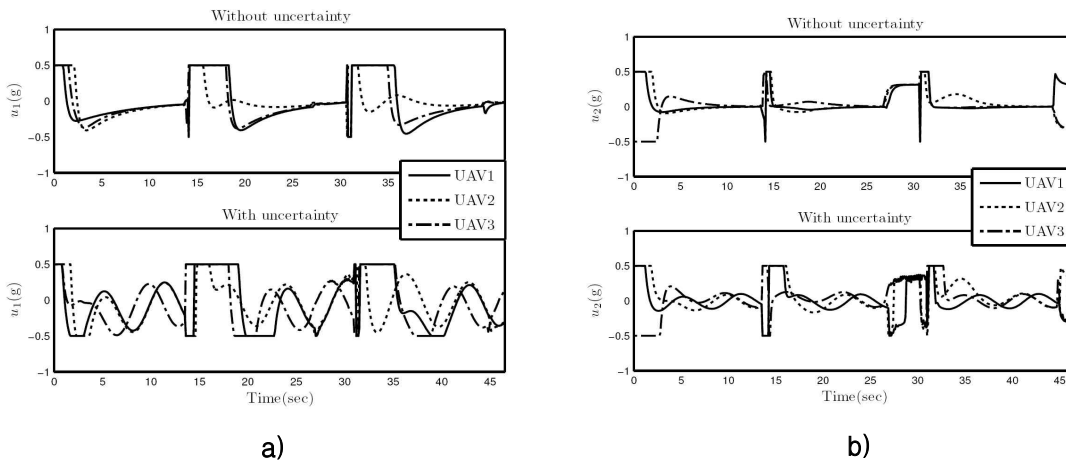


Fig. 3. Control input histories with (14); a) Longitudinal acceleration u_1 b) Lateral acceleration u_2

고, 두 제어기법 모두 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다. 이것은 상대적으로 측정하기 어려운 주변 무인기들의 속도정보를 측정이 아닌 추정의 형태로도 군집비행의 성능을 충분히 확보할 수 있음을 의미하는 것으로, 실제 비행시험을 통한 적용 측

면에서 매우 효과적인 접근이라 할 수 있다.

마지막으로 참고문헌[6], [8]에서 제안한 방법을 기반으로 제한된 외란이 존재하는 상황에서의 군집비행 성능을 고찰하였다. 제한된 외란의 크기가 작은 상황($\delta_1 = \cos t, \delta_2 = \sin t$)에서는 두

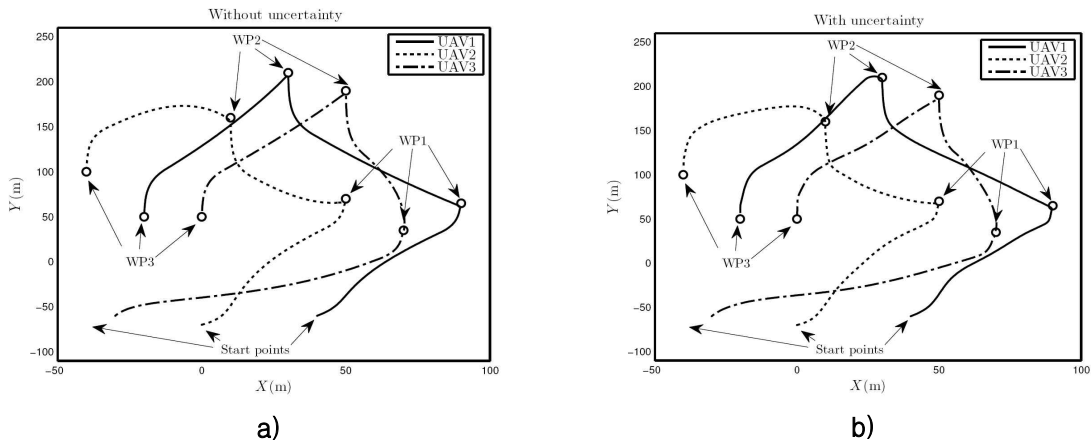


Fig. 4. Trajectory results with (19); a) Without uncertainty b) With uncertainty

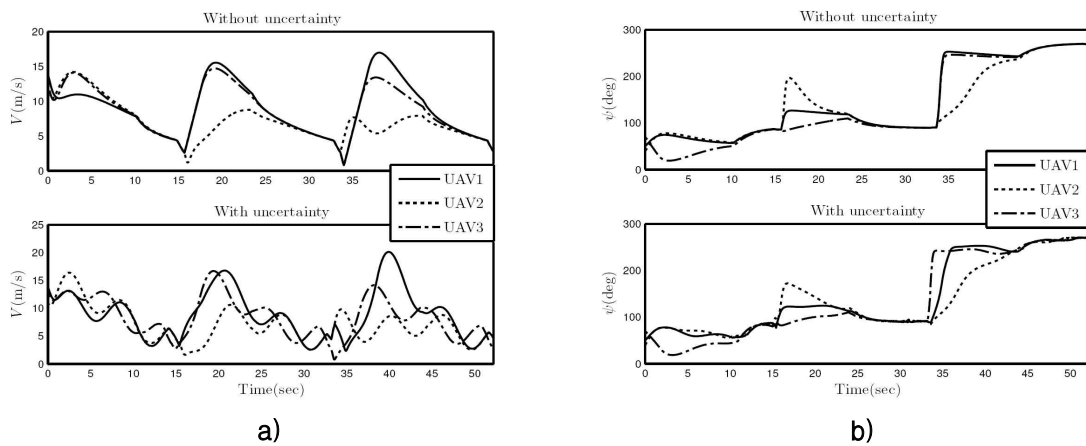


Fig. 5. Simulation results with (19); a) Velocity responses b) Heading responses

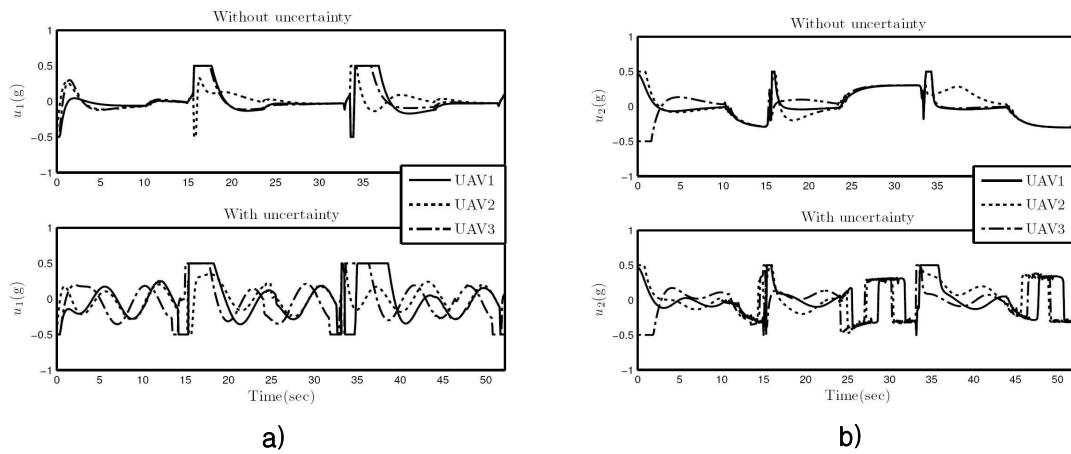


Fig. 6. Control input histories with (19); a) Longitudinal acceleration u_1 b) Lateral acceleration u_2

참고문헌에서 제안한 기법들이 만족할만한 성능을 보였으나, 외란의 크기가 커짐($\delta_1 = 3\cos t$, $\delta_2 = \sin t$)에 따라 군집비행을 실패하는 것을 확인할 수 있었다. 이것을 통해 본 논문에서 제안한 제어기에 포함된 강인요소 r_{f_i} 가 효과적으로

외란을 제거하고 있음을 확인할 수 있었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 행위 기반 분산 기법(behavior-

based decentralized method)을 활용하여 복수 무인기의 군집 비행을 위한 강인제어기를 제안하였다. 강인요소를 포함하는 제안된 제어기법은 두 가지로 구성된다. 첫째는 주변 무인기들의 위치와 속도 정보를 기반으로 설계하는 결합형 제어기법으로서 시간에 의존하는 제한된 외란이 존재하는 상황에서 만족할만한 군집 비행성능을 보였다. 두 번째 제어기법은 주변 무인기들의 속도 정보를 획득할 수 없을 때, 획득된 위치 정보를 기반으로 필터를 설계하고 필터의 출력을 활용하는 passivity기법 기반의 제어기로서 만족할 만한 군집 비행 성능을 확보할 수 있었다. 이것은 비행시험 시 주변 무인기들의 속도 정보를 획득하는 것이 어렵다는 사실에 비추어 볼 때 실제적인 적용 측면에서 매우 효과적인 방법이라 할 수 있다. 제안된 기법은 제한된 외란이 존재하는 환경에서 운용되는 다양한 형태의 무인시스템의 군집 기동에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

This research was supported by Space Core Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Korea government (Ministry of Science, ICT and Future Planning) (No. NRF-2014M1A3A3A02034925).

Reference

- 1) F. Giulietti, L. Pollini, and M. Innocenti, "Autonomous Formation Flight," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 20, No. 6, 2000, pp. 34-44.
- 2) A. Dogan, and S. Venkataramanan, "Nonlinear Control for Reconfiguration of Unmanned-Aerial-Vehicle Formation," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 28, No. 4, 2005, pp. 667-678.
- 3) M. Patcher, J. D'Azzo, and M. Veth, "Proportional and Integral Control of Nonlinear Systems," *International Journal of Control*, Vol. 64, No. 4, 1996, pp. 679-692.
- 4) A.W. Bloy, and M. Jouma'a, "Lateral and Directional Stability and Control in Air-to-air Refueling," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 209, 1995, pp. 299-305.

- 5) S. Kim, and Y. Kim, "Three dimensional optimum controller for multiple UAV formation flight using behavior-based decentralized approach." *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2007.

- 6) S. Kim and Y. Kim, "Behavioral Decentralized Optimum Controller Design for UAV Formation Flight," *Journal of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 36, No. 6, 2008, pp. 565-573.

- 7) S. Kim, and Y. Kim. "Optimum design of three-dimensional behavioural decentralized controller for UAV formation flight," *Engineering Optimization*, Vol. 41, No. 3, 2009, 199-224.

- 8) J. R. T. Lowton, R. W. Beard, and B. J. Young, "A Decentralized Approach to Formation Maneuvers," *IEEE Transactions On Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 6, 2003, pp. 933-941.

- 9) R. L. Raffard, C. J. Tomlin, and S. P. Boyd, "Distributed Optimization for Cooperative Agents: Application to Formation Flight," *IEEE Conference on Decision and Control*, Nassau, Bahamas, 2004.

- 10) W. Ren, and R. Beard, "Decentralized Scheme for Spacecraft Formation Flying via the Virtual Structure Approach," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 27, No. 1, 2004, pp. 73-82.

- 11) F. Giulietti, L. Pollini, and M. Innocenti, "Formation Flight Control: A Behavioral Approach," *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Montreal, Canada, 2001.

- 12) J. D. Wolfe, D. F. Chichka, and J. L. Speyer, "Decentralized Controllers for Unmanned Aerial Vehicle Formation Flight," *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, San Diego, CA, 1996.

- 13) T. Lee, "Robust adaptive tracking on SO(3) with an application to the attitude dynamics of a quadrotor UAV," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 5, 2013, pp.1924-1930.

- 14) R. A. Horn ; C. R. Johnson, *Matrix analysis*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1985.

- 15) H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, 3rd edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.