

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(3), 282-287(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.3.282

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

벡터필드 유도기법이 적용된 다수 무인기를 이용한 적 방공망 제압 임무의 실험적 검증

정우영*, 김기덕**, 이성현**, 방효충***

Experimental Validation of Multiple UAVs with Vector Field Guidance for SEAD(Suppression of Enemy Air Defense)

Wooyoung Jung*, Ki-duck Kim**, Seongheon Lee** and Hyochoong Bang***

Korea Advanced Institute of Science Technology

ABSTRACT

In modern warfare, the importance of SEAD(Suppression of Enemy Air Defense) mission is being emphasized. However, this mission runs the risk of hull damage or casualties of our friendly air forces. Because of these risks, research on the way of minimizing damages and enhancing mission capability is under active discussion. As a part of this research, SEAD mission planning with multiple UAVs has been covered using vector field guidance. This guidance method not only applies to various forms of flight path but also requires less computational power than other guidance methods. Therefore, in this paper, planning methods of SEAD mission for multiple UAVs using vector field guidance and experimental data from flight experiments regarding designed mission has been covered.

초 록

현대전에서 적 방공망 제압 임무는 과거에 비해 그 중요성이 점차 부각되고 있다. 그러나 본 임무는 적의 방공망에 아군의 항공기와 조종사가 노출되는 위험을 안고 있어, 아군의 피해를 최소화하면서 효과적으로 임무를 수행할 수 있도록 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 이러한 연구의 일환으로써, 벡터필드 유도기법을 이용하여, 다수 무인기의 적 방공망 제압 임무를 설계하였다. 벡터필드 유도기법은 다른 유도기법들에 비하여 계산량이 적고 쉽게 응용이 가능한 이점이 있어, 다수 무인기 운용에 해당 기법을 적용하는 경우 무인기간의 상호 협동을 통한 다양한 형태의 임무를 계획할 수 있다. 따라서 벡터필드 유도기법을 이용한 다수 무인기의 적 방공망 제압 임무의 설계방법을 제시함과 동시에, 비행실험을 통하여 그 운용 가능성을 확인해 보았다.

Key Words : Multiple UAV's (다수 무인기), Unmanned Aerial Vehicle, Unmanned Aircraft (무인항공기), Guidance (유도기법), Vector Field (벡터 필드), Suppression of Enemy Air Defence (적 방공망 제압)

† Received : December 10, 2014 Revised : February 16, 2015 Accepted : February 17, 2015

** Corresponding author, E-mail : wyjung@ascl.kaist.ac.kr

1. 서 론

적 방공망 제압 임무는 현대 미 공군의 항공 작전 중 전체 임무의 20% 이상을 차지하고 있으며, 이는 과거와 비교하여 5배 이상 증가한 값으로 오늘날 적 방공망 제압 임무의 중요성을 나타내고 있다[1,2]. 이처럼 방공망 제압 임무는 중요한 임무로써 그 비중이 증가하고 있지만 임무 특성상 투입된 아군 항공기 역시 적 방공망 위협에 노출 될 수밖에 없다. 최근 인명이 중시되는 현대전 추세에 따라 무인화 및 자율화 기술 확보를 통해 적 방공망 제압 임무를 점차 무인기로 대체하려는 연구가 활발히 진행되고 있다[3,4].

무인기 시스템은 기존의 유인 조종에 비하여 높은 기동성, 조종사의 안전, 무게 및 크기의 감소, 비용 감소 등의 장점을 가지고 있으며 최근 비약적으로 발달한 통신 및 운용기법을 통해 다수의 무인기들이 유기적으로 종합적인 정보를 수집하고 최소의 손실만으로 목표를 달성하는 방향으로 연구가 진행되고 있다.

다수의 무인기를 가지고 임무를 수행할 경우 한 대로 수행하기 어려운 복잡한 임무를 수행할 수 있으며 일부 무인기가 소실되어도 나머지 무인기들로 임무를 완수할 수 있다는 장점이 있다. 또한 각 무인기별로 다양한 센서를 탑재할 경우 동일한 표적에 대한 다면적인 관점의 관측을 통해 표적 식별 능력 또한 크게 향상시킬 수 있다[5]. 이러한 무인기 기술의 발전과 함께 무인기에 대한 관심이 높아짐에 따라 다양한 종류의 무인기가 이미 실제 임무 수행을 위하여 투입되고 있다. 특히 무인 정찰기의 경우 군사분야에서 이미 전력으로 활용되고 있으며 무인 전투기의 실전 투입을 위한 연구가 본격적으로 진행되고 있다.

본 연구에서는 벡터필드 유도기법을 사용하여 다수의 무인기가 가상의 적 방공망을 제압하는 모의 시나리오를 설계하였다. 벡터필드 유도기법은 유클리디안 공간의 모든 점에 벡터를 정해두고 이를 무인기가 추종하도록 하는 유도기법으로 주로 지상자율 로봇에 적용되어 왔으나 최근에는 무인기를 위한 벡터필드 유도기법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[6~9]. 윤승호 등에 의하여 다수 무인항공기에 벡터필드를 이용한 연구가 진행 된 바 있으며[10], 유도무기의 유도기법으로도 연구된 바 있다[11].

시나리오를 실제적인 임무에 가깝게 설계하고, 설계된 시나리오를 실외 비행시험을 통해 수행하여 시나리오가 실제 환경에서 충분히 적용가능성이 있음을 보이고자 한다.

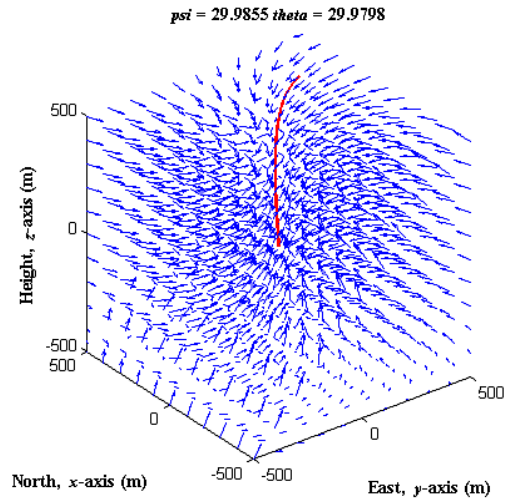


Fig. 1. Example of Vector Field (eq (1))

II. 본 론

2.1 벡터필드 유도기법

2.1.1 우회 형상 벡터필드

우회 형상 벡터필드는 원점으로 수렴하는 형태의 벡터필드로 과거 임승한 등에 의하여 제안되었다[6]. 본 연구에서는 정우영 등에 의하여 3차원으로 확장된 벡터필드 유도기법을 적용하였다[7]. 우회 형상 벡터필드는 구면좌표계에서 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ r \cos\theta \dot{\psi} \\ r\dot{\theta} \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} -1 \\ p_o r^2 \cos\theta \\ q_o r^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C = \frac{v_g}{\sqrt{1 + p_o^2 r^4 \sin^2\theta + q_o^2 r^4}}$$

r, θ, ψ 는 구면좌표계에서 원점으로부터의 거리와 고도각, 방위각을 나타내며, C 는 벡터의 크기를 속도 v_g 로 고정하기 위한 변수이다. p_o 와 q_o 는 벡터필드의 형상을 결정하는 무차원의 변수로서 각각 수평방향의 벡터필드의 형상과 수직방향의 벡터필드 형상을 결정한다. 각 변수의 크기는 벡터필드의 우회 정도를 결정하게 되며 p_o 와 q_o 의 부호에 따라 우회 방향이 결정되게 된다. 우회 형상 벡터필드의 형상은 Fig. 1에 도시되어 있다.

2.1.2 원 궤적 형상 벡터필드

원 궤적 형상 벡터필드는 원점을 기준으로 원

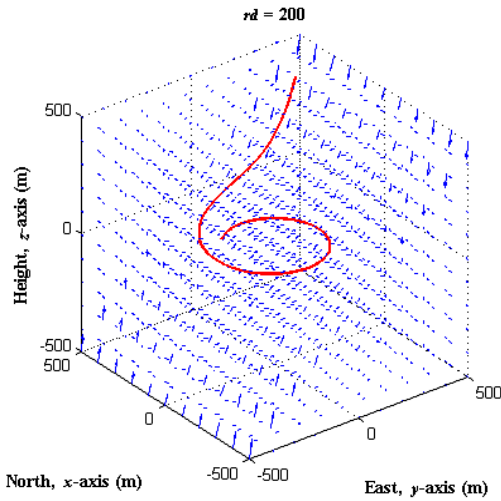


Fig. 2. Example of Vector Field (eq (2))

궤적을 추종하도록 하는 벡터필드이다. 원 궤적 벡터필드는 과거 frew 등이 제안하였으며[8], 다른 연구에서도 이미 사용된 바 있다. 정우영 등의 연구에서 3차원 원 궤적 형상 벡터필드가 제안되었으며[9] 이를 위하여 원통 좌표계를 사용하게 된다. 원통좌표계에서 정의된 벡터필드는 다음의 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ r\dot{\psi} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} -(r-r_d) \\ p_c r \\ -q_c z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C = \frac{v_g}{\sqrt{(r-r_d)^2 + p_c^2 r^2 + q_c^2 z^2}}$$

r, θ, z 는 원통 좌표계에서 원점으로부터의 수평 거리, 방위각, 고도를 나타낸다. 우회 형상 벡터필드와 마찬가지로 벡터의 크기는 변수 C 에 의하여 속도 v_g 로 정해진다. r_d 는 원하는 원 궤적의 반경이며, p_c 와 q_c 는 벡터필드의 형상을 결정하는 변수로서, 변수 p_c 는 작을수록 원에 빠르게 수렴하도록 수평면에서의 우회정도를 결정하며, 변수 q_c 는 클수록 원하는 고도에 빠르게 수렴하는 수직방향의 벡터필드 형상을 결정하는 변수이다. 원 궤적 벡터필드의 형상은 Fig. 2에 도시하였다.

2.1.3 벡터필드의 도달 조건 제어

폭격 임무에서 목표점에 동일한 시각에 도달하여 폭격을 하여 폭격의 효과를 증대시킬 수 있다. 특히 서로 다른 방향에서 접근하는 다수의

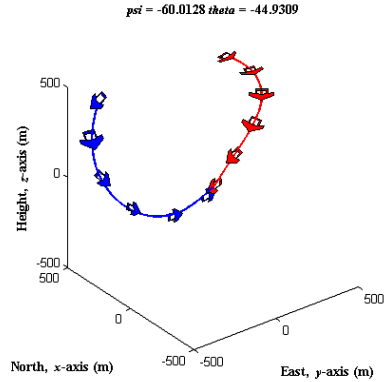


Fig. 3. Example of the arrival condition control vector field

무인기는 적 방공망의 공격에서도 임무 성공률을 향상시킬 수 있다. 이에 정우영 등에 의해 연구된 도달 조건 제어 벡터필드가 적용될 수 있으며[9] 도달 각도 제어를 위한 변수 p_o 와 q_o 는 다음과 같다.

$$p_o = -2 \frac{\psi - \psi_t}{r^2 - r_t^2} \quad (3)$$

$$q_o = -2 \frac{\theta - \theta_t}{r^2 - r_t^2}$$

아래첨자 t 는 원하는 도달 조건을 나타낸다. 또한 도달 속도와 시간은 다음의 식을 통해 계산할 수 있다.

$$l = t_t \frac{(v_t + v_o)}{2} \quad (4)$$

여기서 t_t 는 원하는 도달 시간까지 남은 시간이며, l 은 원하는 도달 속도 v_t 를 만족할 때의 이동거리이다. 남은 거리 l_t 가 예상 거리 l 과 같아질 때까지 현재속도 v_o 를 변경하여 원하는 시간에 원하는 속도로 목표지점에 도달할 수 있도록 한다. Fig. 3에 도달 조건 제어 벡터필드의 시뮬레이션 결과를 도시하였다. 두 대의 무인기가 동시에 원점으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

2.2 적 방공망 제압 임무

2.2.1 전체 임무 시나리오

적 방공망 제압 임무 시나리오는 고정익기 2대와 회전익 2대의 이중 무인기가 임무에 투입되며 크게 정찰 및 엄호 임무와 폭격 임무로 나누

어진다.

2대의 회전익기가 레이더망을 회피하는 경로 점 비행을 하여 적 방호기지의 정찰을 수행하게 된다. 이 과정에서 고정익기는 회전익을 기준으로 원 궤적을 그리며 엄호기동을 수행한다.

정찰 이후 4대의 무인기는 산개하였다가 동시에 적 방호기지에 폭격을 수행한다. 이 과정에서 4대의 무인기는 서로 90도의 각도를 이루며 적 방호기지에 접근하게 된다.

2.2.2 정찰 임무

정찰을 위한 회전익기의 경로점 비행은 우회형상 벡터필드를 이용하여 수행하게 된다. 적 레이더의 위치는 주어졌다고 가정하고 적 레이더망을 피할 수 있는 경로점을 미리 설정하여 경로점 비행을 수행하게 된다.

무인기는 상호간의 통신을 통하여 서로의 위치를 실시간으로 공유하며 회전익기의 위치를 원점으로 하여 고정익기가 원 궤적 형상 벡터필드를 이용하여 원 궤적을 그리며 엄호 비행을 수행한다. 이 과정에서 무인기간의 공중 충돌을 막기 위하여 본 연구에서는 서로 다른 고도에서 임무를 수행한다고 가정하였다.

2.2.3 폭격 임무

적 방호기지의 정찰 이후 4대의 무인기는 산개하여 폭격을 준비한다. 이후 동시에 적 방호기지에 접근하여 폭격을 수행한다. 이를 위하여 도달 조건 제어 벡터필드가 사용되었다. 각각의 무인기는 동일한 도달시간 t_d 를 입력받고 서로 다른 90도 각도를 이루어 목표점에 접근하게 되며 이를 위하여 도달 조건 제어 벡터필드가 사용되었다.

2.3 실험 결과

2.3.1 무인기 시스템

2.2절의 적 방공망 제압 시나리오를 따라 무인기 시스템을 구축하였다. 고정익은 연구실에서

Table 1. Specification of Hexus-F4

Size	Wingspan - 2120mm length - 750mm
Motor	Rimfire.55
Propeller	CFX folding prop. 15X8
Flying weight	4.5Kg
Battery	6S 6500mAh LiPo
Duration	30 min

Table 2. Specification of Hexus-M1

Size	Diameter - 1060mm Height - 700mm
Motor	MN4014-9 KV-400
Propeller	APC 14X4.5
Flying weight	11 Kg
Battery	4 parallels 6S 6500mAh LiPo
Duration	10 min

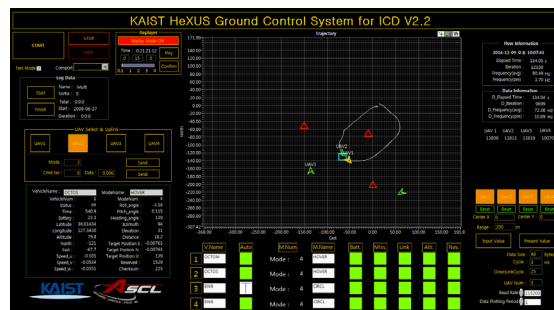


Fig. 5. Ground Control System

보유중인 전익기 형태의 Hexus-F4가 사용되었으며 제원은 Table 1에 나타내었다. 회전익기는 옥토크터 방식의 Hexus-M1이 사용되었으며 제원은 Table 2에 나타내었다.

각각의 무인기는 Freewave 사의 MM2-T를 이용하여 상호간 통신을 수행하며 서로의 위치 정보를 공유한다. 지상 제어 시스템은 National instrument 사의 Labview를 이용하여 지상에서 4대의 상황을 모니터링 할 수 있도록 구축하였다. 지상 제어 시스템의 화면을 Fig. 5에 도시하였다.

2.3.2 정찰 임무

정찰임무 궤적을 Fig. 6의 상단에 도시하였다. 무인기의 출발 지점을 원점으로 하여 2대의 회전



Fig. 4. SEAD mission scenario

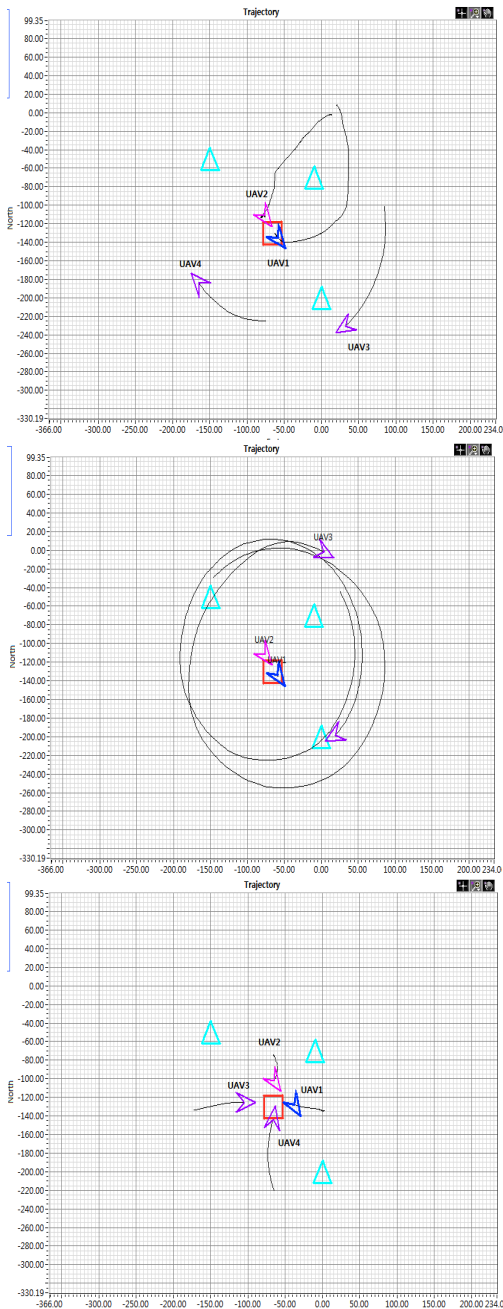


Fig. 6. Trajectories of flight test (top : reconnaissance, middle : cover, bottom : strike)

익기는 좌표 (-150,-40), (-10,-70), (0,-200)의 위치에 있는 적 레이더망(Fig. 6의 청색 삼각형)을 피하기 위하여 미리 입력된 경로점을 따라 비행하며 좌표 (-70,-130)의 위치에 있는 청색 사각형으로 표시된 목표점에 도달한다. 회전익기가 목표

점 정찰을 위해 경로점 비행을 하는 동안 2대의 고정익이 각각의 회전익기를 원점으로 하여 원 궤적을 그리며 엄호 임무를 수행하게 된다(Fig. 6 중단).

2.3.3 폭격 임무

폭격 임무의 궤적을 Fig. 6의 하단에 도시하였다. 서로 90도의 각도를 이루며 목표지점에 동시에 도달하는 것을 확인 할 수 있다. 목표점 5미터 이내에 진입하면 목표점에 도달한 것으로 판단하며, 폭격이후 각 무인기는 정해진 위치로 귀환하게 된다. 무인기의 충돌을 방지하기 위하여 본 실험에서는 각 무인기간의 고도에 10m씩 차이를 두었다. 폭격 임무 실험 결과를 Table 3에 나타내었다. 느린 속도로 움직이고 가속이 용이한 회전익기는 비교적 정확한 속도를 맞출 수 있었으나 고정익기의 경우 속도의 오차가 있을 것을 볼 수 있다. 도달 각도의 경우 실험 당일 동풍의 영향으로 측풍의 영향을 받게 되는 UAV2와 UAV4의 오차가 발생하였으나 Fig. 6의 하단 그림에서 보면 네 방향에서 접근함을 확인 할 수 있다. 시간의 경우 UAV1과 UAV4가 최대 오차를 보이나 그 오차가 0.9초로 도달 시간 제약이 잘 이루어져 있음을 확인 할 수 있다.

III. 결론 및 개선방안

본 연구에서는 벡터필드 유도기법을 적용하여 다수의 무인기를 이용한 적 방공망 제압 임무의 가능성을 실험을 통하여 검증하였다.

4대의 이중 무인기를 사용하여 정찰 및 엄호

Table 3. Flight test result (strike mission)

	UAV1	UAV2	UAV3	UAV4
Speed (m/s)	2.17	1.80	27.22	23.47
	2	2	25	25
error	0.17	0.2	2.22	1.53
Arrival angle (deg)	94.3	168.2	268.1	24.7
	90	180	270	0
error	4.3	11.8	1.9	24.7
Arrival time (sec)	588.9	588.7	588.3	589
	588.5	588.5	588.5	588.5
error	0.4	0.2	-0.2	0.5

임무를 수행하고 적 방호기지에 대한 동시 폭격 임무를 수행하는 시나리오를 가정하였으며, 각 임무에 맞추어 정찰 임무에 우회 형상 벡터필드 유도기법, 엄호 임무에 원 궤적 형상 벡터필드 유도기법, 폭격 임무에 도달 조건 제어 벡터필드 유도기법을 적용하여 비행 실험을 수행하였다.

실제 비행 실험 결과를 통하여 벡터필드 유도 기법을 적용한 다수의 무인기를 이용하여 적 방공망 제압 임무를 성공적으로 수행할 수 있음을 확인하였다. 특히 도달 조건 제어 벡터필드를 이용하여 다수의 무인기가 동시에 적 방공망에 폭격이 가능함을 확인하였다.

본 연구에서 사용된 시나리오에서는 각각의 무인기가 다른 고도에서 비행하여 기체간의 공중 충돌에 대한 문제를 배제하였다. 하지만 실제 다수 무인기를 이용하여 적 방공망 제압 임무를 수행하기 위해서는 다수무인기의 충돌 회피를 위한 유도기법이 추가적으로 적용하여 다수무인기의 운용 안정성을 높일 필요가 있으며 이를 통하여 다수무인기의 다양한 임무에 활용 할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 “이종 자율 무인기 협업체계 선형 연구” 과제의 일환으로, 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(계약번호 UE124027JD).

References

- 1) Bolkman, C., “CRS Report for Congress Military Suppression of Enemy Air Defence (SEAD): Assessing Future Needs,” Congressional Research Service, Library of Congress, Washington, D.C., 2006.
- 2) Hathaway, D. C., “Germinating a New SEAD: the Implications of Executing the SEAD Mission in a UCAV,” MS Thesis, School of Advanced Airpower Studies, Air University Maxwell Air Force Base, AL, 2001.
- 3) P. B. Sujit, A. Sinha, and D. Ghose, “Team, Game, and Negotiation based Intelligent Autonomous UAV Task Allocation

for Wide Area Applications,” *Studies in Computational Intelligence*, vol. 70, pp. 39-75, 2007.

- 4) Office of the Secretary of Defense, “Unmanned aircraft Systems (UAS) Roadmap 2005-2030,” U.S., Report, 2005.

- 5) T. Schouwenaars, B. D. Moor, E. Feron, and J. How, “Mixed integer programming for multi-vehicle path planning,” *Proc. of European Control Conference 2001*, Porto, Portugal, pp. 2603-2608, Sep. 2001.

- 6) S. Lim and H. Bang, 2012, “A Proposal of New Vector Field Guidance for Unmanned Aircrafts,” presented at the Conference on Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Pyeongchang, Gangwon-Do, 2012.

- 7) W. Jung and H. Bang, 2013, “3 Dimensional Vector Field Guidance for Unmanned Aerial Vehicle,” presented at the Conference on Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Jeju, 2013.

- 8) E. W. Frew and D. A. Lawrence, 2005, “Cooperative Standoff tracking of Moving Targets by a team of Autonomous Aircraft,” presented at the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, San Francisco, California.

- 9) W. Jung and H. Bang, 2014, “Control Arrival Time and Speed for UAV Using 3 Dimensional Vector Field Guidance,” presented at the Conference on Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Jeju, 2014.

- 10) S. H. Yoon, Y. D. Kim, “Cooperative Control of Multiple Unmanned Aircraft for Standoff Tracking of a Moving Target,” *Journal of Korea Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 39, No. 2, 2011, pp. 114-120

- 11) S. H. Lim, C. H. Pak, C. Y. Cho, H. C. Bang, “Development of Flight Control System for Gliding Guided Artillery Munition - Part II: Guidance and Control,” *Journal of Korea Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 42, No. 3, 2014, pp. 229-236