

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(9), 752-761(2014)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.9.752>

AR. Drone을 이용한 실내 군집비행용 충돌회피 기동 설계

조동현*, 문성태**, 장종태**, 류동영***

Collision Avoidance Maneuver Design for the Multiple Indoor UAV
by using AR. Drone

Dong-Hyun Cho*, Sung Tae Moon**, Jong Tai Jang** and Dong-Young Rew***

IT Convergence Technology Team*, Aerospace Future Technology Team**,
Lunar Exploration Technology Team***, Korea Aerospace Research Institute

ABSTRACT

With increasing of interest in quad-rotor which has excellent maneuverability recently, a various types of multi-rotor aircraft was developed and commercialized, and there are many kinds of leisure products to be easily operated. In these products, the AR.Drone manufactured by Parrot has an advantage that it is easily operated by user due to the its internal stabilization loop in the on-board computer. Thus it is possible to design the unmanned UAV system easily by using this AR.Drone and its inner loop for the stabilization. For this advantage, KARI(Korea Aerospace Research Institute) has been developing the indoor swarming flight system by using multiple AR.Drones. For this indoor swarming flight, it is necessary that not only the position controller for each AR.Drone, but also the collision avoidance algorithm. Therefore, in this paper, the collision avoidance controller is provided for the swarm flight by using these AR.Drones.

초 록

뛰어난 기동성으로 인한 최근 쿼드로터에 대한 관심의 증대는 다양한 형태의 멀티로터 비행체의 개발 및 상용화를 이끌었으며, 레저용으로 사용자들이 쉽게 사용할 수 있는 다양한 쿼드로터 제품들이 등장하고 있다. 이 중에서 최근 Parrot사에서 제작한 AR.Drone은 사용자를 위한 내부 안정화 루프를 탑재하고 있기 때문에 초보자들도 쉽게 제어할 수 있는 장점이 있다. 이러한 AR.Drone의 시스템을 이용하면 다양한 형태의 다수 무인기 시스템을 쉽게 구축할 수 있다. 이러한 특성을 바탕으로 한국항공우주연구원에서는 다수의 AR.Drone을 이용한 실내 군집비행 연구를 진행 중에 있다. 이러한 다수의 무인비행체를 이용한 실내 군집비행을 위해서는 개개의 비행체에 대한 위치제어 및 서로간의 충돌을 방지하기 위한 알고리즘이 필요하다. 이를 위해서 본 논문에서는 다수의 실내 무인기의 원활한 기동을 위해 개발한 충돌회피 기동 제어를 소개하고자 한다.

Key Words : Indoor UAV(실내 무인비행기), Swarm Flight(군집 비행), Quad-rotor UAV(쿼드로터 무인비행기), AR. Drone

† Received: March 3, 2014 Accepted: August 19, 2014

* Corresponding author, E-mail : dhcho99@kari.re.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

I. 서론

4개의 로터를 이용해서 빠른 선회 및 제자리 비행(Hovering) 등의 뛰어난 기동성을 자랑하는 쿼드로터에 대한 연구가 전 세계적으로 활발히 이루어지고 있으며, 상업적으로도 그 능력을 인정받아 다양한 분야에서 사용되고 있다. 레저용 쿼드로터에서부터 방송 촬영용 쿼드로터가 활용 중이며, 농업분야에서도 농약살포 및 다양한 형태로 활용되고 있는 가운데, 최근에는 세계적인 전자 상거래업체인 아마존이 무인 화물 배송을 선언을 한 바가 있다⁽¹⁾.

이와 같은 상용 멀티로터 비행체 중에서 최근 Parrot사에서 제작한 AR.Drone은 비용면에서 저가인 반면 안정화 루프를 내장함으로써 높은 사용자 편의성을 제공하고 있다. 또한 SDK(Software Development Kit)⁽²⁾을 제공해주고 있기 때문에 무인기 연구에 쉽게 활용할 수 있다. 이러한 장점으로 최근 AR.Drone을 이용한 연구가 증가하는 추세이다⁽³⁻⁷⁾.

한편, 무인기의 성능 향상을 위해 다수의 무인기를 동시에 운영하고자 하는 연구들이 진행되고 있다⁽⁸⁻¹¹⁾. 이러한 연구의 일환으로 한국항공우주연구원(이하 항우연)에서는 최근 다수의 AR.Drone을 이용한 실내 군집비행 연구를 진행하고 있다. 이를 위해서 실내의 위치 인식을 위한 이미지처리 및 모션캡처 장비들을 활용하고 있으며, AR.Drone의 내부 제어알고리즘을 활용한 위치추종 제어기를 설계·적용하여 다수의 AR.Drone을 활용한 군집비행 임무를 수행하고 있다.

하지만 AR.Drone의 사용자 편의를 위한 내부 안정화 루프는 사용자의 수정을 방지하기 위해 접근이 제한되어 있기 때문에 정확한 운동방정식의 유도가 어렵고, 다수의 무인 비행체의 좁은 실내영역에서의 비행으로 인한 충돌위험을 내재하고 있다.

따라서 본 논문에서는 다수의 AR.Drone을 이용한 실내 군집비행을 위해 설계한 충돌회피 제어기에 대해 소개하고자 한다. 이러한 충돌회피 제어기를 위해 상대위치정보 기반의 포텐셜(Potential) 함수를 이용한 제어기를 설계, 적용하였으나 AR. Drone의 운동관성 및 PID 제어명령에 의한 충돌이 발생하였다. 따라서 이를 해결하기 위해 상대속도 및 상대위치 정보를 기반으로 충돌회피 제어기를 설계, 적용함으로써 원활한 군집비행 임무를 수행하였다. 이에 본 논문에서는 2절에서 실내 군집비행을 위한 시스템 구성에 대해 살펴본 후, 3절에서 제어기 설계에 대해 다루

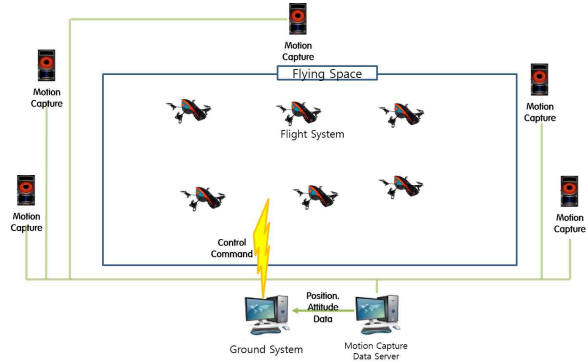


Fig. 1. Indoor swarm flight system architecture

고 있다. 특히 3절에서는 실내 비행을 위한 기본적인 PID 구성에 대한 내용을 3.1절에서 기술하고 있으며, 이러한 제어기를 바탕으로 3.2절에서 충돌회피 제어기의 설계에 대해 기술하고 있다.

II. 비행시스템

충돌회피 제어기를 설계하기에 앞서 현재 구현된 실내 군집비행 시스템에 대한 특성을 살펴 보도록 하겠다. 이를 위해서 본 절에서는 Fig. 1과 같이 구성된 실내 군집비행 시스템 중 무인기 시스템, 위치인식 시스템, 지상국 시스템 및 이들 시스템에 정의된 좌표계에 대해서 살펴보도록 하겠다.

2.1 무인기 시스템

현재 항우연에서 개발하고 있는 실내 군집비행 연구에 사용되는 무인기로는 Parrot사의 AR. Drone이 이용되고 있다. 현재 Parrot사에서는 다양한 버전의 AR.Drone은 2.0버전을 시판하고 있으며, 항우연에서 사용한 기체는 AR.Drone 2.0 Classic 버전으로 Fig. 2와 같은 외형을 가진다. AR.Drone은 전방과 하방에 2개의 영상카메라를 가지고 있으며, 특히 하방의 카메라로부터 얻은 영상에 옵티컬 플로우(Optical Flow) 기법을 적용한 안정화 루프는 위치유지(Hovering) 기동에 적용되고 있다. 다만, 바닥면의 무늬가 없거나 옵티컬 플로우를 적용하기에 부적합할 경우 위치



Fig. 2. AR.Drone 2.0

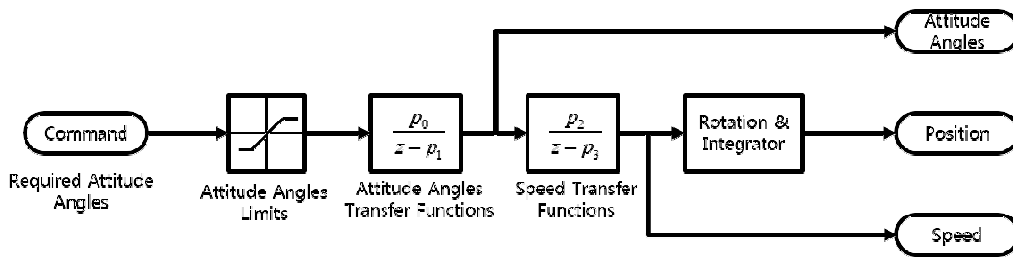


Fig. 3. Dynamic model of AR.Drone from Parrot

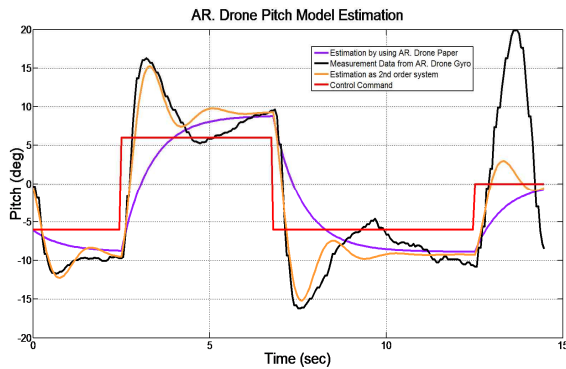


Fig. 4. Dynamics parameter estimation result for the pitch axis of AR.Drone

유지를 수행하지 못하고 사용자의 의도와 다르게 움직이기도 한다. 초음파센서와 압력센서, 가속도 센서 및 영상 정보는 고도유지 루프에 적용되고 있으며, 이 외에 3축 가속도 센서 및 각속도 센서를 통해 자세정보 등의 다양한 정보를 사용자에게 제공해 준다.

하지만, AR.Drone은 다수의 비행체를 동시에 운영하기 위해 개발된 플랫폼이 아니기 때문에 이를 이용한 실내 군집비행에 활용하기 위해서는 네트워크 설정 및 초음파 간섭을 방지하기 위한 우회루프 설계 등이 필요하다⁽⁷⁾.

또한, Parrot에서는 AR.Drone에 대한 내부 운동방정식을 Fig. 3과 같이 제공해주고 있지만^(5,6), 실제 운동특성을 모사하기에는 운동방정식이 너무 단순하다. 이를 확인하기 위해서 Fig. 4와 같이 피치 축에 대한 동역학 파라미터 추정을 수행해 본 결과 검은색의 실제 AR.Drone의 각속도 센서 데이터와 비교하면 Fig. 3의 1차 선형 모델의 경우 동역학 특성을 제대로 모사하고 있지 못하며, AR.Drone의 내부 제어로직이 작동을 하면서 해당 피치 각도에 대한 정착시간(Settling Time)이 길며, 과도응답(Overshoot)이 상당히 발생하며, 정상상태 오차(Steady State Error)도 크게 발생하는 것을 확인해 볼 수 있다. 이러한 차이는 AR.Drone의 단독 기동에서는 사용이 가능

하지만, 다수의 AR.Drone을 좁은 실내에서 기동할 경우 큰 문제로 작용한다. 따라서 보다 정밀한 제어를 위해서는 해당 모델에 대한 좀 더 정확한 동역학 모델의 설정하고 해당 동역학 모델에 대한 파라미터를 추정할 수 있어야 하지만, 군집비행 연구과정에서 생기는 기체의 빈번한 파손을 복구하기 위해 소요되는 시간 및 복구된 해당 비행체에 대한 동역학 파라미터를 다시 추정하는 시간까지 더해지면 군집연구에 필요한 시간이 훨씬 증가하게 된다. 또한, AR.Drone의 초기 이륙 시 매번 해당 센서들에 대한 평면보정(Flat Trim)을 수행하는 과정에서 해당 파라미터에 대한 변동이 있을 수 있는 이유로 인해 항우연에서는 동역학 운동방정식 기반의 정량적 제어 알고리즘 대신 입력-출력 관계에 따른 정성적 제어 알고리즘을 설계·적용 적용하고 있다.

2.2 위치인식 시스템

무인기의 실내 운용을 위해서는 무인기의 위치정보를 획득할 수 있어야 한다. 실외의 경우 GPS 센서를 통해 1~10m 내외의 정확도로 정밀한 위치정보의 획득이 가능한 반면, 실내의 경우 별도의 위치센서를 필요로 하게 된다.

본 연구에서는 Fig. 5와 같이 적외선 기반의 모션캡처(Motion Capture) 시스템을 활용함으로써 보다 높은 정밀도의 위치정보를 획득할 수 있었다. 모션캡처 시스템은 여러 대의 적외선 카메라



Fig. 5. Motion capture system for the indoor positioning system

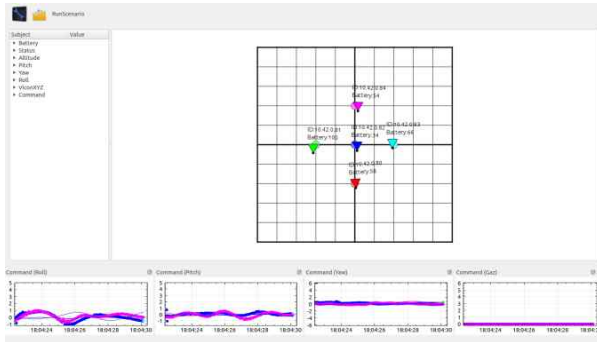


Fig. 6. GUI configuration of ground system

라로 구성되며, 각각의 카메라에 있는 스트로브(Strobe)에서 방사한 적외선이 AR.Drone에 설치한 마커에 의해 전반사되고 이 반사된 적외선 신호를 적외선 카메라로 감지하게 된다. 이렇게 모여진 데이터를 통해 해당 마커의 3차원 위치를 0.1mm 수준의 정확도로 제공해주고 있으며, 여러 마커를 묶어 하나의 객체(Object)로 설정해줄 경우 해당 객체에 대한 자세각 정보 역시 이용 가능하다(7,12,13,14). 현재 항우연에서 사용하고 있는 모션캡처 장비는 VICON사의 MX-T10S와 MX-T40S이며, 초기에 6대의 MX-T10S로 시스템을 구성한 후 테스트를 수행하였으며, 2014년 현재는 총 28대의 카메라를 이용하여 17m x 17m x 6m 공간에 대한 시스템을 구축하여 사용하고 있다.

2.3 지상국 시스템

실내 군집비행을 위한 지상국 시스템은 위치 인식 장치인 모션캡처 시스템 및 각각의 AR. Drone으로부터 수신한 내부 센서 데이터들을 이용해서 제어 알고리즘을 적용하고 이를 통해 얻은 제어명령을 각각의 AR. Drone으로 송신함으로써 군집비행이 가능토록 하고 있다. 또한 사용자에서 Fig. 6과 같이 간소한 GUI만을 제공하면서 전체 군집의 형상을 보여주는 기능을 하고 있다. 또한 다양한 운영체제에서 작동이 가능하도록 QT 기반으로 개발되었기 때문에 윈도우, 리눅스 및 MAC에서 사용할 수 있는 특징이 있다.

2.4 좌표계 정의

AR.Drone의 자세각에 대한 동체 좌표계 및 위치제어를 위한 좌표계의 경우 Fig. 7과 같이 정의된다. 여기서 살펴볼 것은 AR.Drone의 관련 논문(6)에서 제공하고 있는 제어 좌표계가 실제 SDK를 이용한 제어시스템을 설계할 때와 차이를 보이는 것이다. 실제 AR.Drone 2.0에 대한 SDK의 제어 명령을 분석했을 때, Fig. 7과 같이 AR.Drone의 위치 좌표계(XYZ)와 동축좌표계(Roll-Pitch

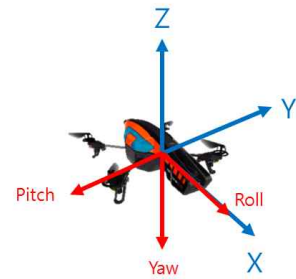


Fig. 7. Coordinate system of AR.Drone

h-Yaw)가 일치하지 않기 때문에 제어 명령을 수행할 경우 이와 같은 점에 유의해야 한다.

III. 비행제어 알고리즘

본 논문에서 사용한 무인 비행기체인 AR.Drone의 경우 레이저용으로 개발이 되어 사용자로 하여금 쉽게 제어가 가능하도록 내부 안정화 루프를 탑재하고 있다. 이러한 내부 안정화 루프로는 각각의 센서 데이터로부터 정보를 추출해서 통합하고 필터링하는 과정에 대한 센서 데이터 루프와 사용자의 제어입력에 대한 자세제어 루프, 전체 시스템에 대한 상태(Status)에 따른 명령 수행 루프 및 사용자의 흥미를 유발하기 위한 애니메이션 기능 루프 등이 있다. 이러한 내부 루프들의 경우 4개의 로터에 대한 PWM(Pulse Width Modulation) 신호제어를 통해 회전속도를 제어하고, 이를 바탕으로 롤, 피치, 요의 자세각을 제어함으로써 각각의 기능 제어루프를 구성하고 있다. 이는 앞의 Fig. 4의 동역학 특성에서 살펴볼 수 있듯이 사용자가 원하는 자세각을 입력하면 내부 루프에서 해당 자세각을 추종하기 위한 자세제어 루프를 가지고 있고, 이를 바탕으로 전체

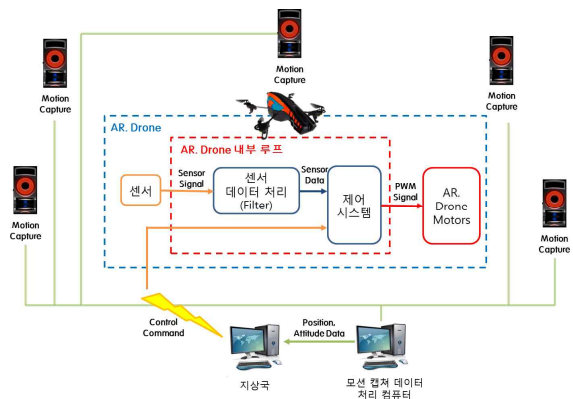


Fig. 8. Control system architecture of indoor flight by using AR.Drone

움직임을 제어한다. 이러한 AR.Drone의 별도의 내부 자세제어 루프는 사용자에게 제어의 편의성을 제공하는 반면 사용자의 접근을 제한하여 수정이 불가능한 특성을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 Fig. 8과 같이 전체 제어시스템을 구성하고 사용자 명령(User Command)만을 이용해서 위치제어를 수행하는 위치추종 제어기를 설계하여 적용하고 있다. 먼저 모션 캡처로부터 얻어진 적외선 영상정보들이 모션 캡처 데이터 처리 컴퓨터에 모여져서 각각의 무인 비행체에 대한 위치 및 자세정보가 생성되면 해당 데이터가 이더넷을 통해 지상국 컴퓨터로 전송된다. 지상국 컴퓨터에서는 사용자가 입력한 제어 입력과 전달받은 모션 캡처 데이터를 이용해서 제어 명령을 생성한 후 해당 데이터를 무선(wifi)으로 무인 비행체에 전달해준다. 이 때 무인 비행체에 전달해주는 제어 명령으로는 기본적으로 롤, 피치, 요 각도 및 수직속도(Vertical Speed, gaz), 이착륙 등을 위한 상태명령(Status)이 있다.

이러한 위치제어기를 바탕으로 사용자의 실수로 인한 무인 비행체간의 충돌 및 파손을 방지하기 위한 충돌회피 기동을 위한 제어기 역시 설계하여 적용하였다. 본 절에서는 이러한 제어기에 대해 기술하고자 한다.

3.1 위치추종 제어기

본 논문에서는 우선적으로 다수의 실내 무인 비행체의 위치제어를 위해 정해진 위치에 정확히 위치하기 위한 위치 추종 제어만을 고려하여 제어기를 설계하였으며, 추후 중간 경로 등을 고려한 다양한 형태의 제어기에 대해 연구하고자 한다. 위치추종 제어를 위해서는 AR.Drone의 운동 방정식에 대한 동특성 파라미터들을 개별적으로 추정해주어야 하지만 2.1절에서 언급한 것과 같이 다수의 AR.Drone의 운용을 위해서는 실질적으로 적용하기 어렵기 때문에 사용자의 입력에 따른 상태정보의 특성을 바탕으로 한 정성적 제어기를 설계·적용하고 있다. 이는 사용자가 레저용으로 쉽게 사용이 가능한 것처럼 위치오차에 따른 제어량을 바탕으로 목표 자세각 명령을 생성하는 방식이며, 전체 블록 다이어그램은 Fig. 9와 같이 구성할 수 있다.

이 때 사용되는 제어기로는 고전적인 PID(비례-적분-미분) 제어기를 적용하였다. PID 제어기를 설계하기 위해서 상대적으로 발산(Divergence) 위험이 적은 PD 제어기를 먼저 설계하여 적용한 후 정상상태 오차(Steady State Error)를 줄이기 위해 적분기를 적용한 PID제어기를 최종적

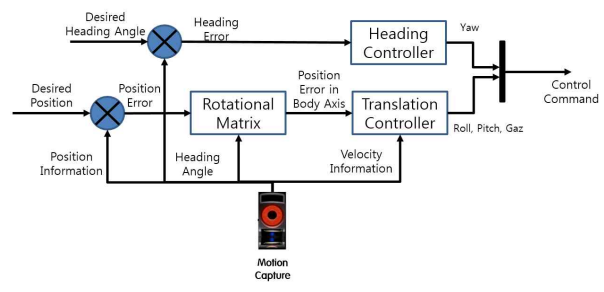


Fig. 9. Block diagram of position controller for indoor flight by using AR.Drone

으로 적용하였으며, 제어이득(Gain)의 값을 설정하기 위해서 무인 비행체에 다양한 목표 위치정보를 설정하여 제어기에 의한 무인 비행체의 응답특성을 바탕으로 설정하였다.

3.2 충돌회피 제어기

현재 적용한 위치 추종 제어기의 경우 최종 목표 위치와의 오차만을 피드백(Feedback) 제어하기 때문에 다수의 실내 무인 비행체를 동시에 운용할 경우 이동경로에 대한 충돌위험도가 존재하게 된다. 이와 같은 충돌위험도를 줄이기 위해서 사용자는 다수의 실내 무인 비행체에 대한 이동경로를 고려하여 목표 위치를 산출해야하지만, 이는 사용자의 부담으로 작용하며, 경우에 따라서는 사용자의 실수로 인한 충돌이 발생하기도 한다⁽¹⁵⁾. 따라서 이동 중인 다수의 실내 무인비행체간의 충돌위험 경감을 위한 충돌회피 알고리즘이 요구된다. 또한, 충돌회피 기동을 위한 제어기가 위치 추종을 위한 PID 제어기의 역할을 동시에 수행하는 제어기의 설계는 운동방정식의 부재로 인해 어렵기 때문에 위치 추종을 위한 PID 제어기에 충돌회피를 위한 보상제어기 개념으로 설계를 하였다. 따라서 최종적인 제어명령은 PID 제어기에서 산출된 제어명령과 충돌회피 제어기에서 산출된 제어명령의 합으로 구성하였다. 본 절에서는 이를 위한 충돌회피 제어기의 설계 및 실제 비행 테스트 결과에 대해 기술하였다.

3.2.1. 포텐셜 함수(Potential Function)를 이용한 충돌회피 알고리즘

충돌회피 제어를 위해 다양한 연구가 진행 중에 있으며, 그 중에서 포텐셜(Potential) 함수를 이용한 충돌회피 제어는 UAV뿐만 아니라 인공위성의 군집비행에도 적용되고 있다⁽¹⁶⁾. 일반적인 포텐셜 함수 기반의 충돌회피 알고리즘은 충돌회피 기동을 수행할 무인비행체와 상대 무인비행체 사이의 상대거리를 바탕으로 Fig. 10과 같이 포텐셜 함수를 구성한다. 이러한 포텐셜 함수는 상

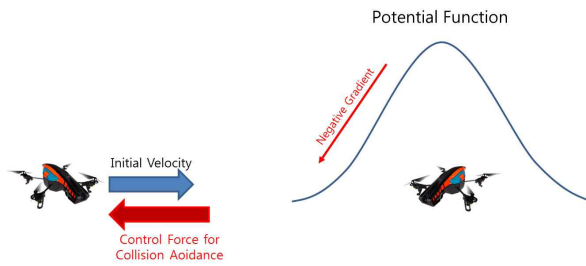


Fig. 10. Collision avoidance algorithm architecture based on the potential field

대 무인비행체의 위치에서 가장 높은 값을 가지며 상대거리가 늘어날수록 작아져서 사용자가 지정한 안전거리(Safety boundary) 이상에서는 영향을 주지 않게 기울기가 0이 되는 특성을 가진다. 이러한 포텐셜 함수를 이용한 충돌회피 알고리즘은 해당 포텐셜 함수의 기울기를 이용하는 방식으로 Fig. 10에서 보이는 것과 같이 등근 가상의 공이 해당 포텐셜 함수로 이루어진 일종의 등고선의 해당 지점(상대거리)에 놓여졌을 때 굴러 내려가는 원리를 생각하면 이해가 쉽다. 즉, 포텐셜 함수의 기울기만큼 멀어지는 힘으로 표현이 가능한데, 이를 수학적으로는 2차원 혹은 3차원 공간상에서 수학적 기울기(Gradient)를 이용하여 계산이 가능하다. 일반적으로 수학적 기울기는 벡터로 표현이 가능하며, 해당 벡터의 방향은 포텐셜 함수가 커지는 방향을 향하기 때문에 충돌회피 알고리즘에서는 이 수학적 기울기의 반대 방향으로 제어명령을 산출해주면 된다. 이와 같은 수학적 기울기는 포텐셜 함수의 편미분을 통해 구할 수 있지만, 포텐셜 함수가 모든 방향에서 동일한 형상을 가진다면 해당 방향은 항상 상대거리 벡터 방향(충돌회피 기동을 수행할 무인비행체로부터 상대 무인비행체 방향)과 동일하다. 따라서 충돌회피 기동을 위한 제어입력의 기준벡터(Unit vector)는 항상 결정이 가능하며, 이에 대한 제어크기(Magnitude)는 상대 거리에 대한 함수로 다양하게 설계할 수 있다. 본 논문에서는 일례로 Fig. 11과 같은 자연로그함수를 이용하여 다음과 같이 설계하였다.

$$\max(-a \ln(b d_{rel}), 0) \quad (1)$$

여기서 d_{rel} 은 상대거리를 의미하며, 상수 a, b 는 각각 제어크기 함수의 설계 파라미터가 된다. 이들 설계 파라미터를 설정하기 위해서 Fig. 11과 같이 상대거리가 사용자가 지정한 안전거리에 도달했을 때 자연로그함수의 값이 0이 되며, 안전거리의 절반정도까지 침범하였을 때의 제어크

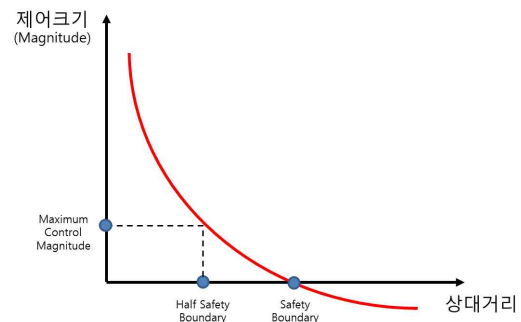


Fig. 11. Design example for the control magnitude of collision avoidance maneuver

기가 최대 제어크기가 될 수 있도록 설계하였다.

이와 같은 단순한 충돌회피 알고리즘을 적용하여 기존의 PID 제어기의 제어명령과 동시에 적용하여 테스트 비행을 수행해 보았을 때 가장 큰 문제로 작용하는 것이 충돌회피 알고리즘의 작동시점이었다. 현재 다수의 무인비행체에 대한 군집행상을 유지할 때 상대 무인비행체에서 발생시킨 공기흐름의 변화로 인한 외란력을 보상하기 위해서 높은 비례, 미분 제어이득을 적용하고 있다. 이로 인해 무인 비행체의 이동속도가 상대적으로 빠른 반면 충돌회피 알고리즘은 두 물체가 안전거리 이하로 근접했을 때 비로소 작동을 시작하기 때문에 기존의 운동관성을 충분히 보상하지 못하고 두 무인 비행체가 충돌하는 문제가 발생하였다. 또한 좁은 실내공간에서 다수의 무인 비행기를 이용한 군집을 유지해야 되기 때문에 안전거리를 키울 수도 없는 상황이다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 충돌회피 알고리즘의 작동시점을 좀 더 빨리 설정하기 위해 상대 운동속도를 고려한 알고리즘을 다음과 같이 적용하였다.

3.2.2 상대 속도를 고려한 충돌회피 알고리즘

기존이 상대위치만을 고려한 포텐셜 함수 기법으로는 적절한 충돌회피 제어를 설계할 수 없었다. 따라서, 본 논문에서는 Fig. 12와 같이 상대 속도벡터를 이용한 예상되는 충돌위험 거리를 이용하였다. 먼저 모션 캡처 시스템으로부터 얻어지는 무인 비행체들의 위치정보와 속도정보를 바탕으로 충돌위험을 계산하고자 하는 두 대의 무인 비행체에 대한 상대 위치벡터 및 상대 속도벡터를 계산한다. 이를 바탕으로 Fig. 12에서와 같이 직각삼각형을 구성하게 되면 충돌위험 거리($d_{collision}$)는 다음과 같이 쉽게 계산된다.

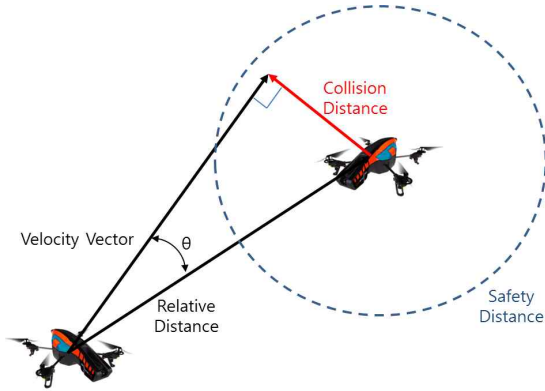


Fig. 12. Collision distance based on the relative position and velocity vector

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{v}_{rel} \cdot \mathbf{r}_{rel}}{\|\mathbf{v}_{rel}\| \|\mathbf{r}_{rel}\|} \right) \quad (2)$$

$$d_{collision} = \|\mathbf{r}_{rel}\| \sin\theta \quad (3)$$

여기서, \mathbf{r}_{rel} 와 \mathbf{v}_{rel} 은 각각 충돌회피기동을 수행하는 무인비행체에 대한 상대 무인비행체의 상대 위치벡터와 상대 속도벡터를 의미한다.

이렇게 계산된 충돌위험 거리를 바탕으로 앞의 수식 (1)과 같은 형태의 제어크기 함수를 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\|\mathbf{u}_{collision}\| = \max(-a \ln(bd_{collision}), 0) \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{u}_{collision}$ 은 충돌회피 기동을 위한 제어 명령 벡터를 의미한다. 이 때 제어명령 벡터는 무인 비행체의 동체 좌표계를 기준으로 위치제어를 위해 무인 비행체가 이동해야 되는 방향 벡터를 의미한다.

최종적으로 이렇게 계산된 제어명령의 방향은 충돌방지를 위해 충돌위험 거리를 늘리는 방향으로 진행되어야 하기 때문에 충돌위험 거리벡터 방향으로 설정이 가능하며, 이 벡터는 상대 위치 벡터와 상대 속도벡터를 바탕으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\mathbf{u}_{collision}}{\|\mathbf{u}_{collision}\|} &= \frac{\mathbf{d}_{collision}}{\|\mathbf{d}_{collision}\|} \\ &= \left(\frac{\mathbf{r}_{rel}}{\|\mathbf{r}_{rel}\|} \times \frac{\mathbf{v}_{rel}}{\|\mathbf{v}_{rel}\|} \right) \times \frac{\mathbf{v}_{rel}}{\|\mathbf{v}_{rel}\|} \end{aligned} \quad (5)$$

또한 위치추종 제어기로 인한 관성운동을 줄이기 위해 충돌회피 제어입력에 따른 위치추종 제어입력의 상대비율을 적용하여 다음과 같이 최종적인 제어기를 설계·적용하여 보았다.

$$\mathbf{u} = w \mathbf{u}_{PID} + \mathbf{u}_{collision} \quad (6)$$

여기서, \mathbf{u}_{PID} 는 PID 제어기를 이용한 위치추종 제어명령 벡터를 의미하며, w 는 위치추종 제어기로 인한 관성운동을 줄이기 위한 가중치 함수로써 다음과 같이 정의하였다.

$$w = \max \left(\cos \left(\frac{\|\mathbf{u}_{collision}\|}{u_{critical}} \right), 0 \right) \quad (7)$$

여기서, $u_{critical}$ 은 임계치 값으로 다음의 조건에서 PID 제어기에서 계산된 제어명령을 무효화시키고 충돌회피 기동을 위한 제어명령만 작동되게 된다.

$$\|\mathbf{u}_{collision}\| \geq \frac{\pi}{2} u_{critical} \quad (8)$$

식 (6)에서와 같이 계산된 제어명령 벡터를 기반으로 해당 제어명령(Roll, Pitch, Yaw, Gaz)를 생성하고 송신함으로써 최종적으로 무인 비행체가 위치추종 및 충돌회피 기동을 수행하게 된다.

이와 같이 설계한 충돌회피 알고리즘을 이용하여 Fig. 13과 같은 간단한 시나리오에 적용하였다. 이 시나리오는 AR.Drone의 근접비행 시나리오에서 실제 있었던 비행경로로 일렬로 정렬된 무인비행체들을 입체적으로 근접시키는 시나리오를 수행하는 과정에서 AR.Drone의 크기로 인해 두 개의 AR.Drone을 충돌이 발생했었던 시나리오이다. 먼저 Fig. 13의 좌측의 무인 비행체를 기준으로 우측의 무인 비행체가 XY 평면상에서 (1,0)만큼 떨어져서 정렬비행을 수행하고 있다가 지상국의 명령에 의해 우측의 무인 비행체는 (1,1)의 위치로 이동하면서 동시에 좌측의 무인 비행체는 우측의 무인 비행체의 자리로 이동하는 시나리오이다. 이 시나리오와 같이 기동을 할 경우 서로 자리를 이동하는 과정에서 근접거리가 가까워지고 되고, 무인 비행체의 크기로 인해 충돌이 발생한 실제 비행 시나리오이다. 이와 같은 시나리오에 대해 제시한 충돌회피 알고리즘을 적용한 결과 두 AR.Drone의 비행경로를 Fig. 14에 도식화 하였다. 이 그림에서 보는 것과 같이 기

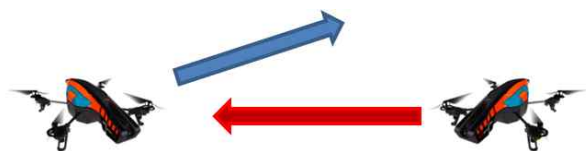


Fig. 13. Test flight scenario in X-Y plane for the collision avoidance maneuver

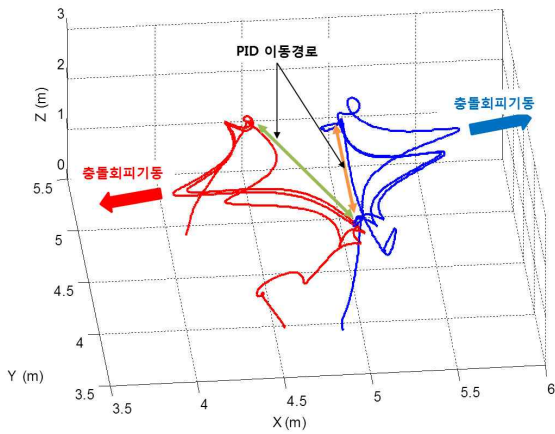


Fig. 14. Flight path of AR.Drones with collision avoidance algorithm

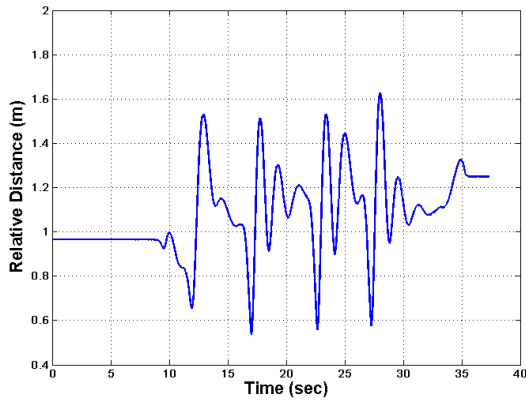


Fig. 15. Relative distance between two AR.Drones with collision avoidance maneuver algorithm

존의 PID 제어기를 이용할 경우 현재 위치로부터 목표 위치까지의 직선 경로를 따라 이동하면서 서로간의 위치차이가 X축 방향으로 0~0.5m 정도가 된다. 따라서 반복적으로 위치를 이동할 경우 높은 확률로 충돌이 발생한다. 이에 대해 충돌회피 알고리즘을 적용함으로써 두 무인비행체의 이동궤적이 직선 궤적을 기준으로 서로간의 상대거리를 벌리는 방향으로 변화가 되었음을 확인할 수 있다. 이와 같은 방향은 충돌회피 기동을 통해 서로간의 충돌을 회피하기 위해 반대방향으로 거리를 벌리는 기동을 수행하면서 정해진 목표지점에 도달한 결과이다. 이 경우에 대한 두 AR.Drone의 상대거리의 변화를 Fig. 15에서 좀 더 살펴 볼 수 있다. 이 그래프에서 보는 것과 같이 서로간의 상대위치가 1m를 유지하고 있는 상황에서 이동명령을 통해 서로간의 상대거리가

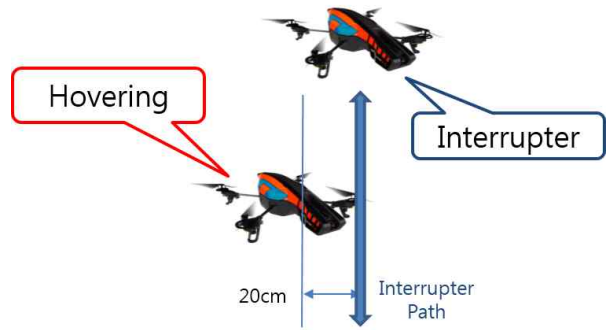


Fig. 16. Second test flight scenario in X-Y plane for the collision avoidance maneuver

줄어들다가 충돌위험을 계산해서 서로 충돌회피 기동을 수행하면서 상대거리를 벌리는 모습을 볼 수 있다. 총 4회에 걸친 반복 수행에 따라 그래프의 최소값이 총 4회 나타남을 확인할 수 있었으며, 최종적으로 0.5m 이내의 움직임을 보이지 않음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 충돌회피 움직임이 정상적으로 작동하는 것을 확인해 볼 수 있었다.

유사한 비행 시험을 좀 더 충돌확률이 높은 Fig. 16과 같은 시나리오에 대해서 적용하였다. 이 시나리오에서는 한 대의 AR.Drone이 제자리 비행을 하고 있고 다른 한 대의 AR.Drone이 20cm 간격으로 돌진하는 상황이다. 이 경우에도 충돌회피 알고리즘이 작동을 하면서 Fig. 17과 같은 궤적을 그리면서 목표위치로 이동을 하는 것을 확인할 수 있었다. 이에 대한 보다 자세한 상황은 참고문헌 [17]의 동영상에 나타나있다. 이 그

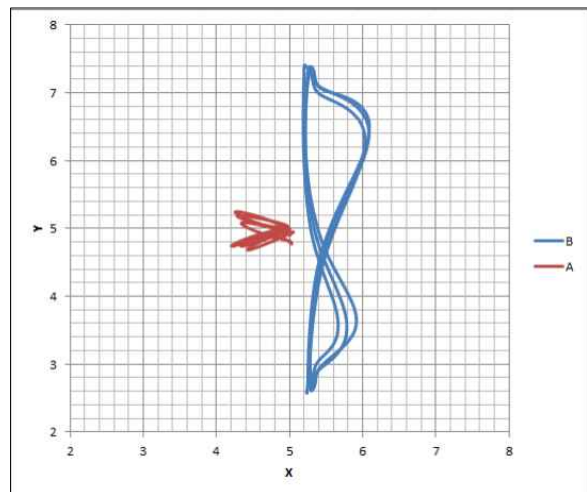


Fig. 17. Flight path for the second flight scenario

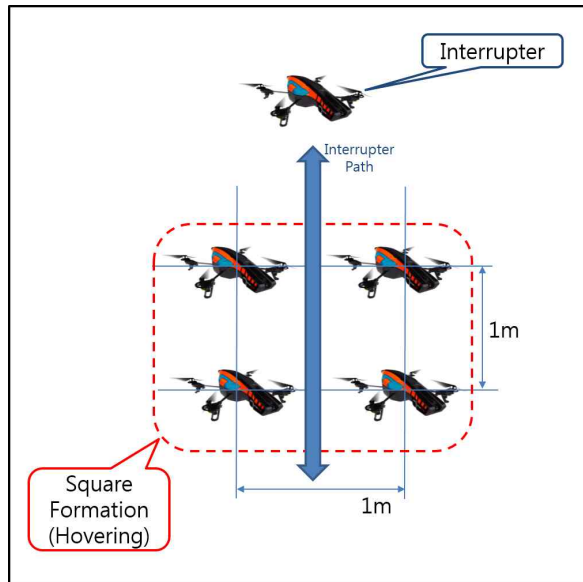


Fig. 18. Test flight scenario for the collision avoidance algorithm of swarm flight

래프에서 확인할 수 있듯이 접근하고 있는 비행체는 제자리 비행을 하고 있는 비행체를 피하기 위해 X축 방향 제어력이 더해지면서 거리를 벌리고, 제자리 비행을 하는 비행체 역시 충돌위험에 따라 X축 방향으로 이동을 함으로써 충돌위험이 줄어들고 있다. 또한 상대속도 벡터 방향이 시간이 지남에 따라 변하면서 제자리 비행하던 비행체의 Y축에 대한 이동이 생기는 것도 확인할 수 있었다.

이와 같이 제안한 충돌회피 알고리즘에 대한 시험을 2대의 AR.Drone에 대해 정상적으로 작동함을 확인하였다. 따라서 제안한 알고리즘을 N대의 AR.Drone의 운용에 활용하기 위해서 다음과 같이 충돌회피 제어기를 수정할 수 있다.

$$\mathbf{u}_{collision,k} = \sum_{i=1, i \neq k}^N \mathbf{u}_{collision} \quad (9)$$

즉, 각각의 AR.Drone에서는 (N-1)대의 상대 AR.Drone에 대한 충돌회피 제어벡터를 개별적으로 계산한 후 이들을 모두 합함으로써 전체적인 충돌회피 제어기를 구성하였다.

이를 시험하기 위해서 Fig. 18과 같이 시나리오를 구성하였다. 먼저 4기의 AR.Drone이 1m 간격(사용자가 지정한 안전거리로 이 거리 이내에서는 충돌회피 알고리즘이 작동하기 때문에 군집을 이룰수 없다.)의 사각형 편대를 유지하면서 제자리 비행을 수행하고 있고, 이곳을 1기의 AR.Drone(침입기)이 가운데를 지나가는 상황을 계속

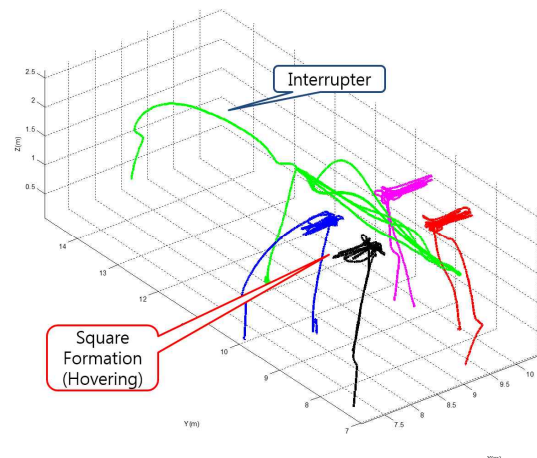


Fig. 19. Flight path for the swarm flight with collision avoidance algorithm

적으로 반복하였다. 이 시나리오에서도 충돌회피 기동이 정상적으로 작동을 하면서 사용자가 지정한 목표지점에 정상적으로 도달하는 것을 확인할 수 있었으며, 그 결과 각각의 AR.Drone에 대한 비행궤적은 Fig. 19와 같았으며, 해당 동영상은 참고문헌 [18]과 같았다. 이 결과와 같이 충돌위험을 줄이기 위해서 사각형 군집을 유지하고 있던 비행체들이 좌우로 간격을 벌려주고, 침입기가 이들의 중앙을 지나가는 것을 확인할 수 있었으며, 경우에 따라서는 고도를 높여서 피해가는 것도 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 다수의 실내 무인 비행체의 군집비행을 위한 위치추종 제어기 및 충돌에 의한 파손 위험을 방지하기 위한 충돌회피 알고리즘을 설계·적용하였다. 이와 같은 제어기를 설계하기 위해서 시스템의 정확한 동특성 파악이 중요하지만 다수의 실내 무인 비행체에 대한 빈번한 교체 등은 이러한 동특성 추정과정을 어렵게 한다. 따라서 본 논문에서는 외부의 위치 인식 센서로 고정밀의 모션캡처 시스템을 적용함으로써 사용자의 입력에 따른 무인 비행체의 움직임을 정성적으로 표현하고 이를 바탕으로 제어시스템을 설계 및 적용하였다. 또한, 군집비행 과정에서의 충돌로 인한 기체의 파손을 막기 위해 상대거리 및 상대속도 벡터를 이용한 포텐셜 함수 기반의 보상형 충돌회피 알고리즘을 설계·적용하였으며, 이를 통해 다수의 실내 무인 비행체의 군집비행 과정에서의 충돌위험을 경감시켰다.

References

- 1) <http://www.nbcnews.com/technology/what-if-amazon-delivery-drone-crashes-me-6-other-key-2D11673677>
- 2) Piskorski, S., Brulez, N., Eline, P. and Hayer F. D., *AR.Drone Developer Guide SDK 2.0*, Parrot, 2012.
- 3) Kim, K.-J. and Kim, S.-M., "Development of Control Platform for Quad-rotor Using CEM Studio", *Proc. of Institute of Control, Robotics and Systems(in Korean)*, May 2013, pp. 357~358.
- 4) Gwak, K. S., Park J. H., Chae H.-I., Han, S.-W., Lim, H. U. and Choi, K. N., "AR.Drone Wireless Control System Based on the Color Recognition on Android", *Proc. of Korean Society for Internet Information(in Korean)*, Nov. 2013, p p. 189~190.
- 5) Krajuik, T., Vonasek, V., Fiser D., and Faigl, J., "AR-Drone as a Platform for Robotic Research and Education" *Research and Education in Robotics - EUROBOT 2011*, 2011, pp. 172~186.
- 6) P. Bristeau, F. Callou, "The Navigation and Control technology inside the AR.Drone micro UAV," 18th IFAC world congress. Vol. 18. No. 1, 2011, pp. 1477~1484.
- 7) Moon, S.-T., Cho D.-H., Rew, D.-Y. and Shim, E.-S., "Development of Indoor Multiple AR.Drone Controller System based on Motion Capture", *Proc. of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences(in Korean)*, Nov. 2013, pp.896-899.
- 8) Shim, D. H. and Tahk, M.-J., "A Fully Decentralized Strategy for Swarming of UAVs in Urban Environment", *Proc. of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences(in Korean)*, Apr. 2007, pp. 450~454.
- 9) Choi, J. E., Kim, J. H. and Kim, H. J., "Cooperative Path Planning Algorithm for Efficient Coverage Operation of Multiple Quadrotors", *Proc. of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences(in Korean)*, Nov. 2012, pp. 679~682.
- 10) Lee, H. B., Moon, S. W., Kim, W. J. and Kim, H. J., "Cooperative Surveillance and Boundary Tracking with Multiple Quadrotor UAVs", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, No. 19, Vol. 5, 2013, pp. 423~428.
- 11) Choi, J. E. and Kim, H. J., "Cooperative Path Planning Algorithm for Dynamic Coverage Operation of Multiple Quadrotors", *Proc. of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences(in Korean)*, Apr. 2013, pp. 408~411.
- 12) VICON, "www.vicon.com"
- 13) Lee, M. G., Park, S. G., Park, G. P., Yang, S. W. and Lee, B. R., "Technical Trend of Motion Capture", *Electronics and Telecommunications Trends*, Vol. 22, Issue 4, 2007, pp. 35~42.
- 14) Kim, H. Y., Lee, J. S. and Han, J. H., "Indoor Flight of Quadrotors using Motion Capture System", *Proc. of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences(in Korean)*, Nov. 2013, p p. 853~856.
- 15) <http://www.youtube.com/watch?v=gwZq2bUBluI>
- 16) Lim, H., Bang H. and Kim, H., "Sliding Mode Control for the Configuration of Satellite Formation Flying using Potential Functions", *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 6, No. 2, 2005, pp. 56~63.
- 17) <http://www.youtube.com/watch?v=yflyVFEWRbQ>
- 18) <http://youtu.be/suSOebVQ-IQ>