

◆ 특집 ◆ 멀티 스케일 다중 전개형 협업 로봇의 설계 및 생산 기술 개발

무인비행로봇에 장착된 카메라를 이용한 다중 무인지상로봇의 충돌 없는 대형 제어기법

Vision-Based Collision-Free Formation Control of Multi-UGVs using a Camera on UAV

최병화¹, 하창수¹, 이동준^{1,✉}

Francis Byonghwa Choi¹, Changsu Ha¹, and Dongjun Lee^{1,✉}

¹ 서울대학교 기계항공공학부 (School of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ. and IAMD)

✉ Corresponding author: djlee@snu.ac.kr, Tel: +82-2-880-1724

Manuscript received: 2012.11.13 / Accepted: 2012.11.21

In this paper, we present a framework for collision avoidance of UGVs by vision-based control. On the image plane which is created by perspective camera rigidly attached to UAV hovering stationarily, image features of UGVs are to be controlled by our control framework so that they proceed to desired locations while avoiding collision. UGVs are assumed as unicycle wheeled mobile robots with nonholonomic constraint and they follow the image feature's movement on the ground plane with low-level controller. We used potential function method to guarantee collision prevention, and showed its stability. Simulation results are presented to validate capability and stability of the proposed framework.

Key Words: Vision-based Control (영상기반 제어), Collision Avoidance (충돌 회피), Potential Function Method (포텐셜함수방법)

기호설명

$\{B\}$ = body-frame of UAV with NED (North-East-Down) coordinates

p_i = image feature of i-th UGV on the image plane relative to body-frame $\{B\}$

p_i = position of i-th UGV relative to body-frame $\{B\}$

1. 서론

무인 비행로봇 (Unmanned Aerial Vehicle; UAV)은 활용가치가 무궁무진한 로봇이다. 감시, 정찰, 운송 등의 업무를 간단히 수행할 수 있고 사람이 가기 힘든 위험한 곳에 가서 작업을 할 수도 있다. 특히

쿼드로터형 (Quadrotor-type) 무인 비행로봇은 조각이 간편하며 수직 이착륙이 가능하고 제자리에서 호버링 (Hovering) 할 수 있는 등 높은 활용성으로 인해 각광받고 있는 추세이다.

본 과제에서는 실현하고자 하는 수색/정찰 등의 임무를 수행하기 위해서 여러 대의 무인 지상로봇 (Unmanned Ground Vehicle; UGV)이 활용된다. 하지만 움직임이 2 차원인 지상으로 한정되고 하드웨어적인 한계로 인해 주변 정보 습득 및 상호 작용에 어려움이 따른다. 광범위한 주변의 정보를 원하는 상황에서는 비행로봇과의 협업이 요구된다. 따라서 UAV 를 활용하면 주변의 정보를 얻음과 동시에 근접화된 무인 지상로봇들의 제어까지 가능하다. 특히, 최근 활발히 연구되고 있는 카메라 기반

의 제어기법은 사용자가 알지 못하는 외부환경에서도 모션캡처시스템 없이 UAV 나 다른 로봇시스템을 사용할 수 있게 해준다.^{1,3}

본 과제에서는 카메라를 이용하여 UAV 를 원격 제어하고, 동시에 무인 지상로봇의 위치를 조종할 수 있는 제어기법을 중점적으로 연구하게 된다. 특히, 본 논문에서는 UAV 자체의 제어보다는 UAV 를 통한 UGV 의 제어에 집중하며 상호간의 충돌을 회피하며 목표 위치를 찾아가는 UGV 의 제어를 다룬다.

카메라를 통하여 얻어지는 하나의 UGV 좌표 값을 $p_i \in \mathbb{R}^3$ 라고 하였을 때, UGV 를 원하는 대로 조종하기 위해서는 p_i 를 특정한 원하는 p_i^d 값으로 수렴시켜야 하며, 동시에 각 UGV 간의 충돌이 일어나지 않아야 한다. 이를 위하여, 비례제어기법 (Proportional controller)과 포텐셜함수 방법 (Potential function method)를 사용하였으며, 본 연구에서는 가장 일반적이고 사용하기 쉬운 Perspective camera 를 사용한다.⁴

지금까지 언급한 무인 비행로봇과 무인 지상로봇의 협업체계는 각 로봇이 서로의 단점을 보완해 줄 수 있는 시스템이기 때문에 정찰, 각종 임무 수행 등의 군사용뿐 만 아니라, 구조, 촬영 등의 민간부분에 이르기까지 많은 응용분야에 적용될 수 있을 것이다. 따라서 앞으로 관련된 연구가 활발히 이루어질 것으로 판단된다.

이후 논문의 구성은 다음과 같다. Sec. 2 에서 영상기반 충돌회피 제어를 설계하고 이를 UGV 에 적용하기 위한 하위레벨 제어기까지 설계한다. 설계한 제어의 안정성을 Sec. 3 에서 분석하고, Sec. 4 에서 전체 제어 시스템에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 마지막으로 Sec. 5 에서 최종 결론 및 향후 연구 발전방향에 대해 다룬다.

2. 영상기반 충돌회피 대형제어

2.1 이미지 평면

시각은 사람에게 가장 직관적이고 풍부한 정보를 제공해주는 감각기관으로 이러한 기능을 흉내 내기 위해서 다양한 카메라가 개발되어 왔다. 본 논문에서는 가장 보편적으로 사용되는 Perspective camera 를 사용한다.

카메라와 가상 이미지 평면 사이의 거리를 (가상) 초점거리 f 라고 하고 이미지 평면은 지면에 평행하게 설정한다. UAV 와 이미지 평면의 개략적

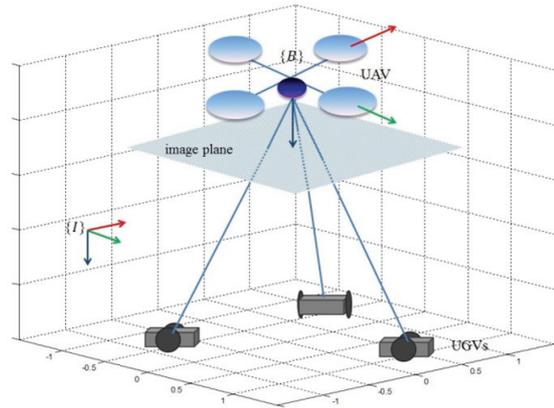


Fig. 1 UAV, UGVs and image plane

인 형태는 Fig. 1 과 같다.

이 가상 이미지 평면 위에 맺힌 Body-frame $\{B\}$ 에서의 UGV 이미지 개체 (Image feature)를 $p \in \mathbb{R}^3$ 라고 하자. 이 p 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p = f \frac{P}{Z} = \left[f \frac{X}{Z}, f \frac{Y}{Z}, f \right]^T \tag{1}$$

$$= \frac{P}{Z} = \left[\frac{X}{Z}, \frac{Y}{Z}, 1 \right]^T$$

여기서 두 번째 줄은 $f = 1$ 을 적용한 것이고, $P := [X, Y, Z]^T \in \mathbb{R}^3$ 는 UAV 카메라에서 바라본 Body-frame $\{B\}$ 에서의 지상의 UGV 좌표이다.

본 연구에서는 제어 설계를 단순하게 하고 UGV 의 제어에 집중하기 위해 UAV 가 일정한 높이의 제자리에서 호버링 (Hovering)하고 있다고 가정한다. 즉, Z 는 모든 UGV 에 대해 동일하며 시간에 따라 변하지 않는 상수이다 ($\dot{Z} = 0$).⁵

이미지 평면 위의 UGV 이미지 개체를 시간에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{p} = \frac{d}{dt} \left(\frac{P}{Z} \right) = \frac{\dot{P}}{Z} \tag{2}$$

2.2 영상기반 충돌회피 제어 설계

영상기반 충돌회피 제어 시스템을 설계하기 위해 우선 제어 알고리즘을 구성해야 한다. 이미지 평면 위의 이미지 개체 p_i 를 서로간의 충돌을 회피하면서 목표 지점으로 이동시키는 제어를 설계

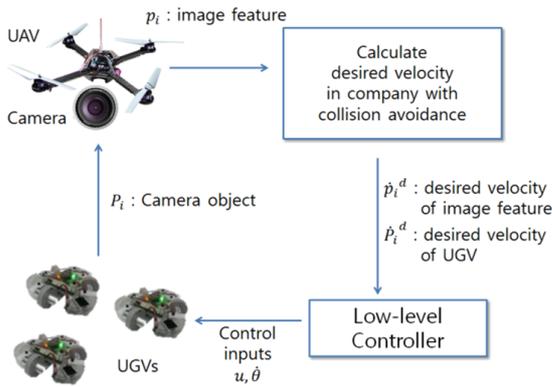


Fig. 2 Vision-based collision avoidance control architecture

한 후 이를 지상의 UGV 에게 목표 값으로 넣어주면 하위레벨 제어기에 의해 최종적으로 UGV 를 원하는 대로 조종할 수 있게 된다. 이를 도식화하여 나타낸 것이 Fig. 2 이다.

먼저, 이미지 평면 위의 p_i 를 원하는 지점으로 제어하기 위한 식을 세워보면 다음과 같다.

$$\dot{p}_i = \dot{p}_i^d - \gamma(p_i - p_i^d) - \sum_j^{j \neq i} \left(\frac{\partial \varphi_{ij}(\|p_i - p_j\|)}{\partial p_i} \right)^T \quad (3)$$

여기서 $\gamma > 0$ 는 상수이며, φ_{ij} 는 각 UGV 간의 충돌을 방지하기 위해 사용한 포텐셜함수 (Potential function)⁶⁻⁸로써 다음과 같이 정의한다.

$$\varphi_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{\|p_i - p_j\|} - \frac{1}{Q} \right)^2 & \|p_i - p_j\| \leq Q \\ 0 & \|p_i - p_j\| > Q \end{cases} \quad (4)$$

여기서, $i \neq j$ 이며, $\eta > 0$ 는 상수, $Q > 0$ 는 접근을 감지하기 시작하는 경계이다. 즉, 서로 다른 두 UGV 가 일정 거리 이내로 접근하게 되면 위의 포텐셜함수로 인해 더 이상 가까워지지 못하여 충돌을 방지하게 된다.

식 (3)은 각 UGV 가 개별적으로 주어진 목표 지점으로 수렴하도록 하는 제어($p_i \rightarrow p_i^d$)와 서로간의 충돌을 방지하는 제어($\|p_i - p_j\| > Q$) 가 결합되어 있는 형태이다. 만약 목표 지점이 변하지 않고 고정되어 있다고 가정하면,

$$\dot{p}_i^d = 0 \quad (5)$$

라고 할 수 있으며, 포텐셜함수를 p_i 에 대해 미분하면 다음과 같이 나타난다.

$$\left(\frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial p_i} \right)^T = \eta \left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{\|p_i - p_j\|} \right) \frac{p_i - p_j}{\|p_i - p_j\|^3} \quad (6)$$

따라서, 식 (3)을 식 (5)와 (6)을 사용해서 다시 표현하면,

$$\dot{p}_i = -\gamma(p_i - p_i^d) - \eta \sum_j^{j \neq i} \left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{\|p_i - p_j\|} \right) \frac{p_i - p_j}{\|p_i - p_j\|^3} \quad (7)$$

위 식은 이미지 평면 위의 상에 대한 제어 식이므로 지상에 있는 UGV 에 대한 제어 식으로 확장시켜야 한다. 카메라에서 바라본 UGV 의 속도 \dot{p}_i 는 식 (2)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{p}_i &= Z \dot{p}_i \\ &= Z \left[-\gamma(p_i - p_i^d) - \eta \sum_j^{j \neq i} \left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{\|p_i - p_j\|} \right) \frac{p_i - p_j}{\|p_i - p_j\|^3} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

이 속도 식을 한번 더 미분하면 UGV 의 가속도 \ddot{p}_i 을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{p}_i &= Z \left[-\gamma \dot{p}_i - \eta \sum_j^{j \neq i} (\dot{p}_i - \dot{p}_j) \left\{ \frac{(p_i - p_j)^T (p_i - p_j)}{\|p_i - p_j\|^6} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{\|p_i - p_j\|} \right) \left(\frac{1}{\|p_i - p_j\|^3} - 3 \frac{(p_i - p_j)^T (p_i - p_j)}{\|p_i - p_j\|^5} \right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

식 (8)과 (9)는 각각 하위레벨 제어기에서 UGV 의 목표 속도와 가속도로써 사용되게 된다.

2.3 하위레벨 제어기(Low-level controller) 설계

본 논문에서는 UGV 가 Nonholonomic 구속조건을 가진 Wheeled mobile robot 이라고 설정하여 Unicycle 운동학을 고려한다. 이 UGV 의 위치를 위에서 구한 목표속도 \dot{p}_i 및 목표가속도 \ddot{p}_i 를 따

라움직이게 하기 위하여는, UGV 의 Nonholonomic 구속 조건 때문에 그의 방향제어도 함께 이루어져야 하는데, 이를 위하여 본 연구에서는 다음과 같은⁷ 과 흡사한 제어를 UGV 에 적용하였다.

먼저 UGV 의 속도는 다음과 같이 정면방향 속도 u 와 진행각도 θ 에 관한 식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = u \cos\theta \tag{10}$$

$$\dot{y} = u \sin\theta \tag{11}$$

또한, Nonholonomic 구속조건은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x} \sin\theta - \dot{y} \cos\theta = 0 \tag{12}$$

이런 구속조건하의 UGV 를 제어하는 하위레벨 제어를 설계해보도록 하자. 먼저, 다음과 같이 속도 오차를 정의한다.

$$e_v := u_i \begin{bmatrix} \cos\theta_i \\ \sin\theta_i \end{bmatrix} - v_i^d \tag{13}$$

여기서 v_i^d 는 앞에서 구한 영상기반 충돌회피 제어로부터 얻은 \dot{p}_i 이며 곧 UGV 의 목표 속도이다. 이 속도 오차를 시간에 대해 미분한 것을 다음과 같이 정의하자.

$$\dot{e}_v = \dot{u}_i \begin{bmatrix} \cos\theta_i \\ \sin\theta_i \end{bmatrix} + u_i \begin{bmatrix} -\sin\theta_i \\ \cos\theta_i \end{bmatrix} \dot{\theta}_i - \dot{p}_i \triangleq -\zeta e_v \tag{14}$$

여기서 $\zeta > 0$ 는 상수이다. 그러면 위 식으로부터 $e_v \rightarrow 0$ 임이 보장되고, 따라서 UGV 의 속도가 목표 속도를 따라가게 된다. 최종적으로 식 (13)과 식 (14)를 정리하면 다음의 제어 입력 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_i + \zeta u_i \\ \dot{\theta}_i u_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i \\ -\sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix} [\dot{p}_i + \zeta \dot{p}_i] \tag{15}$$

제어 입력 값 u, θ 을 위의 식으로 업데이트 시켜주면 UGV 가 이미지 평면에서 제어되는 대로 이동하게 된다. 즉, UGV 가 서로 간에 충돌을 피하며 목표 지점으로 이동한다.

3. 충돌 회피 안정성 분석

앞서 Sec. 2 에서 서로 다른 두 대 이상의 UGV 가 충돌하지 않기 위한 제어를 설계하였다. 여러 대의 UGV 를 운용할 때 상호간에 충돌이 일어나지 않는 것이 중요하므로 충돌 회피가 보장되어야 하며 이는 UGV 사이의 최소 거리가 유지되어야 함을 의미한다.

아래에서는 본 연구에서 제안한 제어시스템 (7)이 임의의 n 개 UGV 사이의 충돌회피를 보장함을 제시한다.

이를 위하여 Lyapunov function 을 다음과 같이 정의한다.

$$V(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n \varphi_{ij} (\|p_i - p_j\|) + \frac{1}{2\rho} \sum_{i=1}^n (p_i - p_i^d)^T (p_i - p_i^d) \tag{16}$$

여기서, $V(t)$ 가 증가하지 않는 특성을 가진다면, 이는 UGV 간의 충돌이 일어나지 않으며 ($\|p_i - p_j\| \neq 0$) 각 UGV 가 원하는 위치로 수렴($p_i \rightarrow p_i^d$)하는 것을 의미한다.

위의 $V(t)$ 를 시간에 대해 미분하고 정리하면,

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n \underbrace{\frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial p_i}}_{=: W_i^T} \dot{p}_i + \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^n (p_i - p_i^d)^T \dot{p}_i \\ &= -\gamma \sum_{i=1}^n W_i^T (p_i - p_i^d) - \sum_{i=1}^n W_i^T W_i \\ &\quad - \frac{\gamma}{\rho} \sum_{i=1}^n (p_i - p_i^d)^T (p_i - p_i^d) - \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^n (p_i - p_i^d)^T W_i \\ &= - \sum_{i=1}^n B_i^T B_i \\ &\quad + \left(\frac{(\rho\gamma + 1)^2}{(2\rho)^2} - \frac{\gamma}{\rho} \right) \sum_{i=1}^n (p_i - p_i^d)^T (p_i - p_i^d) \\ &= - \sum_{i=1}^n B_i^T B_i + \left(\frac{\rho\gamma - 1}{2\rho} \right)^2 \sum_{i=1}^n (p_i - p_i^d)^T (p_i - p_i^d) \end{aligned} \tag{17}$$

여기서 B_i 는 다음과 같이 두었다.

$$B_i := W_i + \frac{\rho\gamma + 1}{2\rho}(p_i - p_i^d) \quad (18)$$

만약 $\rho\gamma = 1$ 이라면, 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{dV}{dt} = - \sum_{i=1}^n B_i^T B_i \leq 0 \quad (19)$$

따라서, Lyapunov function 은 Negative semi-definite 이며 $\dot{V}(t) = 0$ 인 경우는 오직 $B_i = 0$ 인 경우인데, 이는 repulsive force 를 나타내는 W_i 와 attractive force 를 나타내는 $(p_i - p_i^d)$ 가 정확히 평형을 이루거나 두 항 모두 0 이 되는 경우이다. 전자는 local minimum 에 빠진 상황으로 일시적인 random walk 와 같은 방법으로 때때로는 빠져나갈 수 있으나, 일반적으로 UGV 를 local minima 를 회피하며 원하는 지점으로 이동시키는 제어기법은 좀 더 발전된 연구가 필요하며 향후 연구에서 추후 고려될 계획이다. 또한, 후자의 경우는, 두 항이 모두 0 이므로, 원하는 지점에 UGV 가 위치하며 다른 로봇과의 repulsive force 도 받지 않는 상태로 해석할 수 있다. 이 두 경우를 제외하고는 Lyapunov function 은 항상 감소할 것이므로, 포텐셜함수 ϕ_{ij} 와 목표 지점까지의 거리 $(p_i - p_i^d)$ 는 bound 되게 되며, 결과적으로 $\|p_i - p_j\|$ 는 $V(0)$ 에 비례하여 아주 작아질 수 없다는 것이 증명되고, 이는 UGV 간의 충돌회피가 보장됨을 의미하게 된다.

4. 시뮬레이션 결과

본 연구에서 설계한 제어 시스템에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 이미지 평면상에서 디자인된 제어기를 통하여 지상의 Nonholonomic 구속조건을 가진 UGV 들의 대형이 유지할 수 있는가와 이와 동시에 충돌이 회피되는 지를 검증해본다.

Fig. 3 은 카메라에서 바라본 UGV 들의 궤적 p_i 를 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과 UGV 상호간에 충돌을 회피하며 목표 지점을 향해 가는 것을 확인할 수 있다. 그래프 상의 두 원은 UGV 들이 가까워져 충돌 회피 제어의 영향을 받은 영역을 표시한다. 본 논문에서 설계한 대로 일정 범위(Q) 이내로 접근하게 되면 포텐셜함수로 인한 반발력이

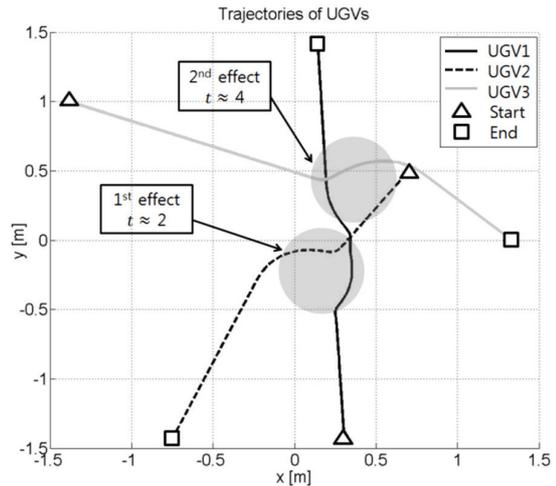


Fig. 3 Trajectories of UGVs

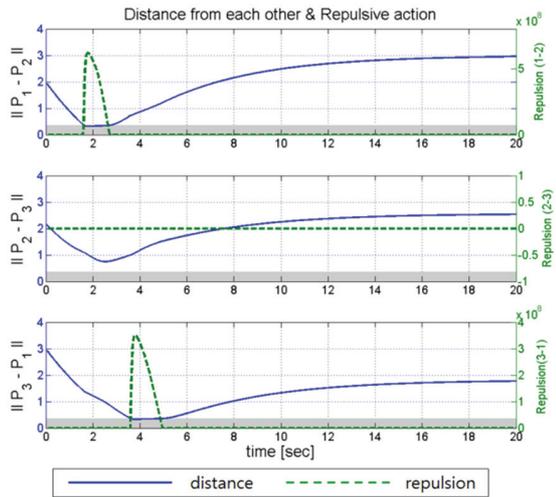


Fig. 4 Distance and repulsion from each other UGVs

발생하여 충돌을 방지하고 궤적을 바꾸게 된다.

UGV 들 간의 상대적 거리와 상호 반발작용을 나타낸 그래프가 Fig. 4 이다. 그래프 하단의 회색 영역이 상대적 거리가 Q 보다 작아져 충돌회피 제어의 영향을 받게 되는 영역이다. 1 번과 2 번 UGV 는 2 초 부근에서, 3 번과 1 번 UGV 는 4 초 부근에서 각각 서로 가까워졌고 ($\|p_i - p_j\| \leq Q$) 그로 인해 반발작용이 일어났음을 볼 수 있다.

2 번과 3 번 UGV 사이에는 아무런 반발작용이 일어나지 않았는데 이는 두 UGV 사이의 거리가 Q 보다 작아진 적이 없기 때문이다. 그래프에서 보면 상대적 거리 곡선이 하단의 회색 영역에 한번

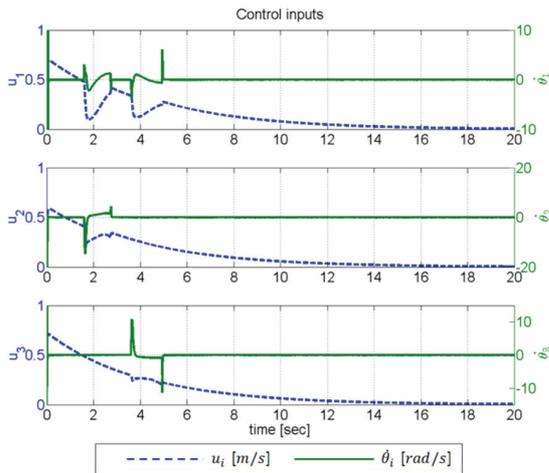


Fig. 5 Control inputs u_i , θ_i for UGVs

도 닿지 않았다는 것이 확인된다.

또한, 시뮬레이션 동안의 각 UGV 의 제어 입력 값을 표시한 것이 Fig. 5 이다. UGV 들이 각각 속도를 조절하고 방향을 틀면서 충돌을 회피하는 것이 나타난다.

하지만 시뮬레이션을 수행하는 중에 특정 상황에서 UGV 들 간에 Local minima 가 생기는 것을 발견하였다. 두 대의 UGV 가 완벽하게 정면으로 마주하거나 세 대 이상의 UGV 가 동시에 한 지점에 모일 경우에 힘 평형이 이루어져 목표 지점을 찾아가지 못하고 제자리에 서버리는 현상이 발생했다. 이러한 경우, 임의의 방향으로의 외란 (Disturbance) 을 가하여 Local minima 를 탈출할 수 있으며, 이에 대한 연구는 차후 다룰 예정이다.

5. 결론

본 논문에서는 호버링 (Hovering) 하는 UAV 에 장착된 카메라를 통한 영상기반의 UGV 들의 충돌 회피 제어 시스템을 설계하였다. 목표 추적을 위해서 비례제어기법 (Proportional Controller)을 사용하였고 충돌 회피를 위해서는 포텐셜함수 방법 (Potential function method)이 사용되었다. 충돌 회피 제어의 안정성을 증명하였으며, 이 제어를 적용하여 UGV 들이 충돌을 피하면서 목표 지점으로 수렴하는 것을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

차후에는 1) 정지상태가 아닌 운동하는 UAV 로부터의 ($Z \neq constant$) 영상기반 제어 설계; 2) 가능한 Local minima 탈출 방안 고안; 3) 실제 실험을

통한 검증 및 최적화 등의 사항을 추가로 고려한 연구가 진행될 것이다.

후 기

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012.0000348).

참고문헌

1. Hamel, T. and Mahony, R., "Visual servoing of an under-actuated dynamic rigid-body system: an image-based approach," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 18, No. 2, pp. 187-198, 2002.
2. Lee, D., Lim, H., Kim, H. J., and Kim, Y., "Adaptive image-based visual servoing for an under-actuated quadrotor system," AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 35, No. 4, pp. 1335-1353, 2012.
3. Anh, L. T. and Song, J.-B., "Robotic grasping based on efficient tracking and visual servoing using local feature descriptors," Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 13, No. 3, pp. 387-393, 2012.
4. Corke, P., "Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB," Springer, pp. 251-256, 2011.
5. Rao, R. S., Kumar, V., and Taylor, C. J., "Planning and control of mobile robots in image space from overhead cameras," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2185-2190, 2005.
6. Lee, D. J., Franchi, A., Giordano, P. R., Son, H. I., and Bulthoff, H. H., "Haptic teleoperation of multiple unmanned aerial vehicles over the internet," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1341-1347, 2011.
7. Lee, D. J., Ha, C., and Zuo, Z., "Backstepping control of quadrotor-type UAVs and its application to teleoperation over the internet," Intelligent Autonomous Systems 12, Advanced in Intelligent Systems and Computing, Vol. 194, pp. 217-225, 2013.
8. Lee, D. J., "Passive configuration decomposition and practical stabilization of nonholonomic mechanical systems with symmetry," IEEE Conference on Decision and Control, pp. 3620-3625, 2010.