

## 이종 로봇팀의 협업을 통한 맵 빌딩과 위치추정

# Cooperation of Heterogeneous Robot Team for Localization and Map Building

정진수, 임윤원, 강수혁, 김동한\*

(Jin Su Jeong<sup>1</sup>, Yun Won Lim<sup>1</sup>, Soo Hyek Kang<sup>1</sup>, and Dong Han Kim<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Kyunghee University

**Abstract:** In this paper we present cooperation of heterogeneous robot team, composed of a wheeled robot and a helicopter for localization and map building. This heterogeneous robot team can successfully fulfill task by combining the abilities of both robots than single robot because wheeled robot and helicopter have complementing ability. The scenario describes a tightly cooperative task, where the wheeled robot move carrying the helicopter and detect obstacles, if there are obstacles, helicopter take off for map building and land, then robot team move destination avoiding obstacles. We present PID controller for position control of helicopter and transformation algorithm to global coordinate from image pixel coordinate. Experimental result show that the proposed method is valid.

**Keywords:** heterogeneous, map building, cooperation, wheeled robot, helicopter

### I. 서론

이동로봇이 주어진 임무를 성공적으로 수행하기 위해서는 주변 환경을 인식할 수 있어야 하고 목표지점까지 정확하게 이동할 수 있어야 한다. 이 주행기능, 인식기능의 선행 조건으로서 맵 빌딩이 이루어진다면 더 높은 임무 성공률을 기대할 수 있다. 현재 대부분의 이동로봇들은 단일로봇 형태로 초음파 센서, GPS 등의 센서를 퓨전하여 사용하거나[1] LRF[2], 다수의 카메라를 사용하는[3] 등의 연구가 진행되고 있다. 이는 복잡한 알고리즘이나 고가의 센서를 사용해야 하거나 실내에 국한되는 단점이 있다. 이는 단일로봇 형태의 한계이며 소형 다개체 로봇의 협업을 통해 임무를 수행하는 것이 더 적합할 수 있다. 이에 양바퀴형 이동로봇과 동축반전 헬리콥터의 협업을 통해 로봇의 위치를 추정하고 맵을 빌딩하여 다양한 임무에 적용할 수 있는 방법을 제안한다.

본 논문에서는 로봇들의 기구학과 동역학적 특징을 분석하고 동축반전 헬리콥터에 장착된 카메라에서 얻은 영상정보를 가지고 맵을 획득 하고 로봇의 위치제어를 위한 제어를 설계하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 획득한 맵 정보의 정확성을 검증하고 실험을 통해 증명하였다.

### II. 이종 로봇팀의 구성

본 연구에서 제시할 이종 로봇팀은 그림 1과 같이 양바

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 11. 15., 수정: 2010. 12. 5., 채택확정: 2010. 12. 20.  
정진수, 임윤원, 강수혁, 김동한: 경희대학교 전자전파공학과  
(jinsu0199@khu.ac.kr/leomyth@khu.ac.kr/robot@khu.ac.kr/donghani@khu.ac.kr)

※ 본 논문은 교육과학기술부의 대구경북과학기술원 일반사업 연구비 지원과 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행되었음(R01-2008-000-20352-0).

Copyright© ICROS 2011

퀴형 로봇과 동축반전 헬리콥터로 구성하였다. 두 로봇은 상호 보완할 수 있는 능력을 가지고 있기 때문에 협업을 통해서 더 좋은 성능을 낼 수 있다. 개체간의 통신을 주고받지 않고 중앙의 주 컴퓨터에서 데이터, 제어알고리즘, 통신 등을 처리한다.

#### 1. 양바퀴형 로봇

양바퀴형 로봇은 iRobot 사의 Create Robot 플랫폼을 사용하였다. 20cm x 20cm의 크기로 최대 20cm/s의 이동 속도를 가지고 있다. 유료하중은 5kg 으로 헬리콥터를 싣고 움직이기에 충분하다. IR 거리 센서가 장착되어 있어 주변의 장애물의 유무를 판단할 수 있으며 주컴퓨터와 Bluetooth 통신을 할 수 있다.

#### 2. 헬리콥터

헬리콥터는 동축반전 형태의 RC헬기이며, 길이 45cm 무게 400g으로 소형헬기이다. 로터는 0.9kg/cm의 토크를 가지며 40g 가량의 무게의 물체를 들어 올릴 수 있다. 자세제어를 위한 자이로 센서가 장착되어 있으며 하단에는 CMOS 카메라와 양방향 통신이 가능한 통신 모듈을 장착하였다. 카메라에서 찍은 영상은 주 컴퓨터로 전송되고 영상처리를 통해 제어 데이터를 받아 위치제어 한다.



(a) Coaxial rotor helicopter



(b) iRobot Create

그림 1. 이종 로봇팀.

Fig. 1. Heterogeneous robot team.

표 1. 로봇의 능력 분석.

Table 1. Analysis ability of robots.

	유료하중	기동성	사물 인식	통신
양바퀴형 로봇	++	+	-	++
헬리콥터	-	++	++	++

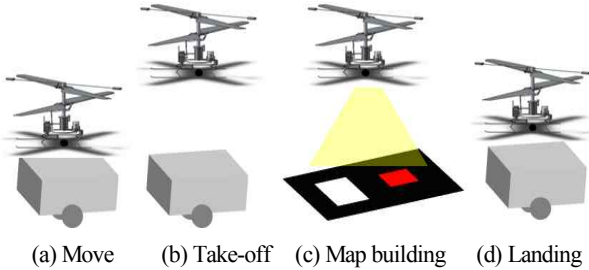


그림 2. 협업 방법.

Fig. 2. Cooperative scenario.

3. 로봇의 능력 분석

본 연구에서 제시한 이중 로봇팀은 서로의 능력을 보완할 수 있는 능력을 가지고 있다. 표 1을 보면 양바퀴형 로봇은 기동성과 사물인식 능력은 좋지 않지만 유료하중이 뛰어나고 헬리콥터는 유료하중은 낮지만 기동성과 사물인식 능력이 뛰어나다. 즉 양바퀴형 로봇이 헬리콥터의 낮은 유료하중을 보완하고 헬리콥터는 양바퀴형 로봇의 사물인식 능력을 보완하게 되면 로봇팀의 성능을 극대화 할 수 있다.

4. 협업 방법

이중 로봇팀의 임무는 목표지점까지 장애물을 회피하여 이동하는 것이다. 양바퀴형 로봇은 헬리콥터를 싣고 이동을 한다. 거리센서를 통해 전방에 장애물의 유무만을 판단하고 장애물이 있다면 맵 빌딩을 위해 헬리콥터가 이륙한다. 이륙한 후 하단에 장착된 카메라를 통해 영상 정보를 전송하고 다시 착륙하게 된다. 이 정보는 주 컴퓨터로 전송되고 영상처리를 통해 장애물의 위치와 크기, 목표점의 위치를 계산한 후 이 정보를 양바퀴형 로봇으로 다시 전송한다. 양바퀴형 로봇은 받은 정보를 사용하여 목표점까지 이동한다. 양바퀴형 로봇은 고도를 계산하기 위한 패치 역할도 수행하게 된다. 영상정보로 위치와 크기를 얻기 위해서는 고도 정보가 필요한데 이는 양바퀴형 로봇의 크기를 이용해서 얻을 수 있다.

III. 헬리콥터의 위치제어와 맵 빌딩

1. 비전 시스템에 기반한 위치제어

헬리콥터의 이·착륙과 호버링을 하기 위해서 칼라패치를 이용한 비전제어를 사용하였다. 양바퀴형 로봇에 부착된 패치를 인식하여 헬리콥터를 패치의 중심에서 일정 범위를 유지하도록 하였다. 영상 정보를 통해 패치의 위치를 알아내고 위치제어를 위한 PID제어기를 설계하여 제어하였다.

1.1 PID 제어기

그림 3은 헬리콥터의 위치제어를 위한 PID 제어기의 블록도이다. 로봇의 현재 위치, 고도 값은 영상 정보를 사용

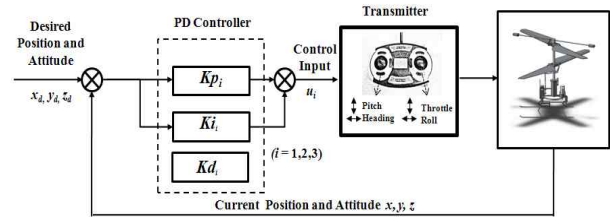


그림 3. PID 제어기.

Fig. 3. PID controller.

하고 입력 값인 수렴해야하는 위치, 고도 값 또한 영상정보를 통해 얻어진다. 로봇에서 받은 영상정보를 주컴퓨터로 송신해 처리하고 PID 제어기를 거쳐 얻어진 제어입력은 다시 헬리콥터로 송신된다. 제어입력은 원하는 고도, 위치( $Z_d, x_d, y_d$ )에 대하여 실제 고도, 위치( $Z, x, y$ )를 제어하기 위한 입력값이다.

$$\begin{aligned}
 u_1 &= Kp_1(Z_d - Z) + Ki_1 \int (Z_d - Z)dt + Kd_1 \frac{(Z_d - Z)}{dt} \\
 u_2 &= Kp_2(x_d - x) + Ki_2 \int (x_d - x)dt + Kd_2 \frac{(x_d - x)}{dt} \\
 u_3 &= Kp_3(y_d - y) + Ki_3 \int (y_d - y)dt + Kd_3 \frac{(y_d - y)}{dt}
 \end{aligned} \quad (1)$$

1.2 비전제어기

영상정보에서 패치의 색을 추출하기 위해 RGB 코딩을 사용하였다. 이미지의 픽셀을 기반으로 2차원 좌표계를 설정하고 패치로 추정되는 픽셀들을 추출하여 제어 입력을 계산한다. 색을 추출하기 위해 다음의 필터링 룰을 적용하였다.

$$\begin{aligned}
 aI_B(x,y) < I_R(x,y) \leq 255 \\
 bI_G(x,y) < I_B(x,y) \leq 255 \\
 0 \leq c < I_R(x,y)
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $(a, b, c) = (1.5, 1.5, 20)$  로 패치를 인식하기 위한

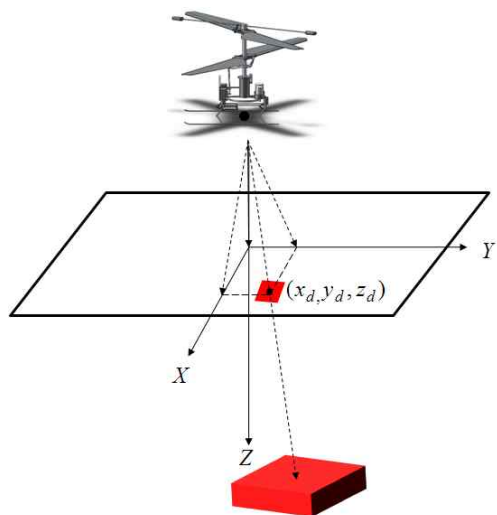


그림 4. 비전제어기.

Fig. 4. Vision controller.

색 범위를 실험을 통해 구하였다. 또한 PID 제어기의 제어 입력으로 들어가는 고도, 위치( $Z_d, x_d, y_d$ ) 정보는 픽셀좌표계에서 얻은 정보를 가지고 계산한다. 이는 다음 장에 자세히 설명한다.

2. 맵 빌딩

헬리콥터에 장착된 카메라에서 얻은 영상 정보에서는 고도를 알 수 없으므로 정확한 맵 정보를 얻을 수가 없다. 하지만 양바퀴형 로봇에 부착된 패치를 통해서 고도를 추정할 수 있다. 고도에 따라 인식되는 패치의 크기가 선형적으로 변하므로 이를 비례공식에 의해 추정할 수 있다. 이미지의 픽셀에서의 로봇의 좌표를 다음과 같이 정의하였다. 픽셀좌표계에서의 고도는 1로 가정하고 헬기는 항상 양바퀴형 로봇의 수직방향에 있다고 가정한다.

$$m = \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

실제 로봇의 좌표는 다음과 같다.

$$M = \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

픽셀좌표계와 실제 좌표계의 관계는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R \\ Z_R \\ Y_R \\ Z_R \end{bmatrix} \quad (5)$$

비전 카메라를 사용해 얻은 영상을 픽셀 좌표계로 정의하였고 고 이를 실제 환경에서의 로봇에 적용하기 위해선 로봇에 대한 절대 좌표계로 정의해야 한다. 절대 좌표를 얻

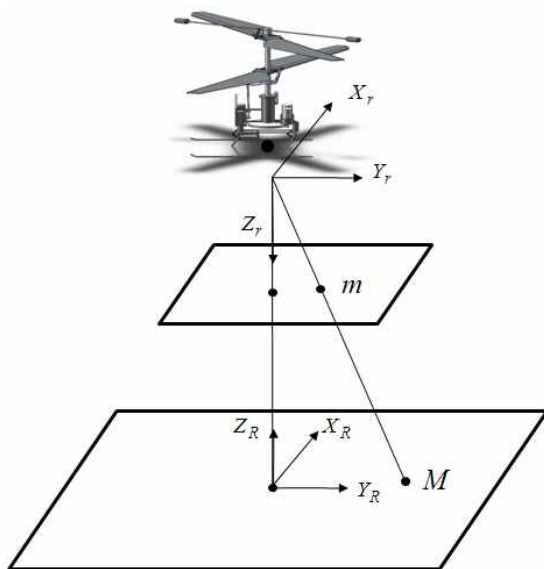


그림 5. 픽셀 좌표계와 실제 좌표계.  
Fig. 5. Pixel coordinate and real coordinate.

기 위해선 전역 좌표계로 변환해야 한다. 식 (5)를 이용하여 픽셀 좌표계에서 전역 좌표계로 변환하기위한 변환 행렬은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$G_M = \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \\ 1 \end{bmatrix} = R P_M \quad (6)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\widehat{X_R X_G}) \cos(\widehat{X_R Y_G}) \cos(\widehat{X_R Z_G}) X_p \\ \cos(\widehat{Y_R X_G}) \cos(\widehat{Y_R Y_G}) \cos(\widehat{Y_R X_G}) Y_p \\ \cos(\widehat{Z_R X_G}) \cos(\widehat{Z_R Y_G}) \cos(\widehat{Z_R X_G}) Z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 R은 좌표 변환 행렬이고 ( $X_p, Y_p, Z_p$ )는 전역 좌표계 원점에서 카메라까지의 거리치이다. 전역좌표계에서 점 M 은 2차원으로 표시될 수 있기 때문에 고도 값을 0으로 가정하고 양변을  $Z_R$ 로 나누면 픽셀 좌표계에 관학 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_G \\ Z_R \\ Y_G \\ Z_R \\ 0 \\ 1 \\ Z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\widehat{X_R X_G}) \cos(\widehat{X_R Y_G}) \cos(\widehat{X_R Z_G}) X_p \\ \cos(\widehat{Y_R X_G}) \cos(\widehat{Y_R Y_G}) \cos(\widehat{Y_R X_G}) Y_p \\ \cos(\widehat{Z_R X_G}) \cos(\widehat{Z_R Y_G}) \cos(\widehat{Z_R X_G}) Z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \\ 1 \\ Z_R \end{bmatrix} \quad (8)$$

이 식을  $Z_R, X_G, Y_G$ 에 관학 식으로 취환하면 다음과 같이 전역 좌표계에서의 값을 얻을 수 있다.

$$Z_R = \frac{-Z_p}{\cos(\widehat{Z_R X_G}) X_r + \cos(\widehat{Z_R Y_G}) Y_r + \cos(\widehat{Z_R X_G})} \quad (9)$$

$$X_G = Z_R (\cos(\widehat{X_R X_G}) X_r + \cos(\widehat{X_R Y_G}) Y_r + \cos(\widehat{X_R Z_G}) X_p) \quad (10)$$

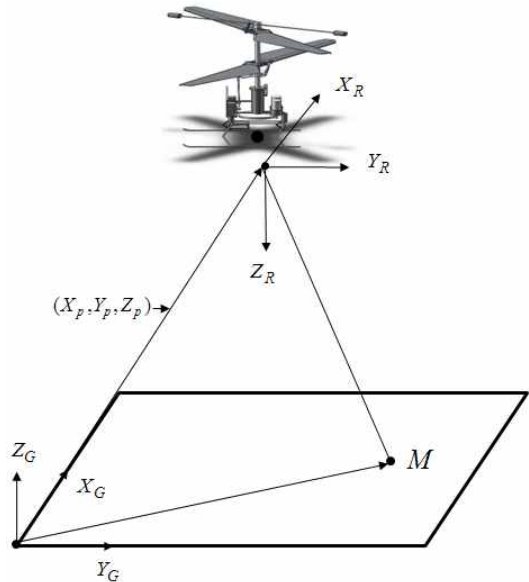


그림 6. 전역좌표계로 변환.  
Fig. 6. Transportation to global coordinates.

$$Y_G = Z_R (\cos(\widehat{Y_R}, X_G) X_r + \cos(\widehat{Y_R}, Y_G) Y_r + \cos(\widehat{Y_R}, Z_G) + Y_p) \quad (11)$$

위의 식을 통해 현재 로봇의 위치에 대한 장애물의 크기와 위치를 추정함으로써 맵 빌딩이 이루어진다.

#### IV. 결과

##### 1. 실험 환경 설정

제안한 이론을 증명하기 위해 그림 1과 같이 실험환경을 구성하였다. 로봇축구 경기장에서 실험을 진행하였고 로봇에는 붉은색 계열의 패치를 붙이고 장애물은 디귤자 모양으로 흰색 패치를 부착하였다. 로봇팀의 임무는 시작점에서 목표점까지 이동하는 것이고 세부 임무는 다음과 같이 나눌 수 있다.

- 1) 양바퀴형 로봇이 헬리콥터를 싣고 직진한다.
- 2) 장애물의 유무가 판단되면 헬리콥터가 이륙한다.
- 3) 이륙한 후 영상정보를 주 컴퓨터에 보낸 후 착륙한다.
- 4) 실제 장애물의 절대 좌표와 크기를 계산한다.
- 5) 양바퀴형 로봇은 장애물을 피해 목적지까지 간다.



그림 7. 실험 환경.  
Fig. 7. Experiment environment.

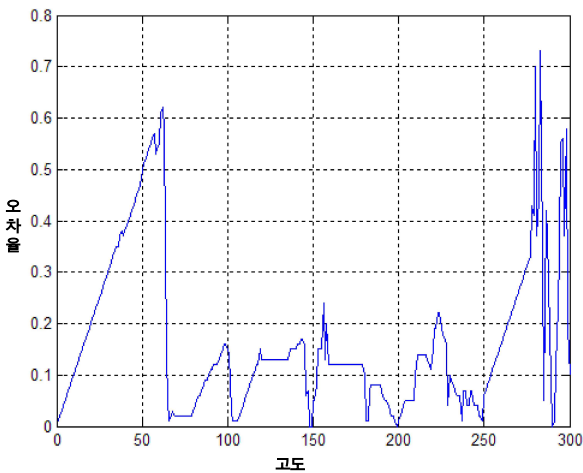
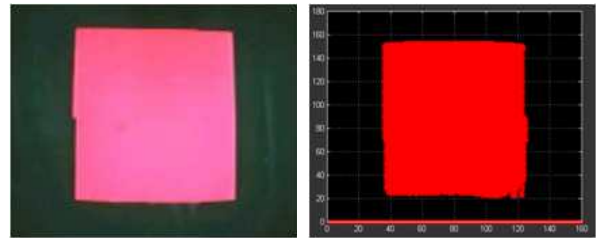


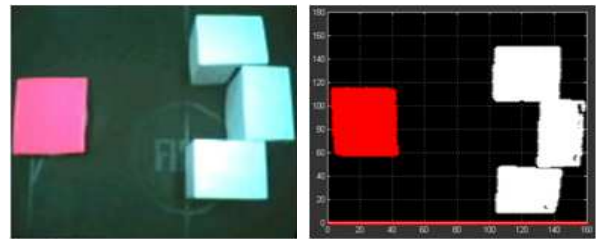
그림 8. 고도에 따른 오차율.  
Fig. 8. altitude error.

##### 2. 시뮬레이션

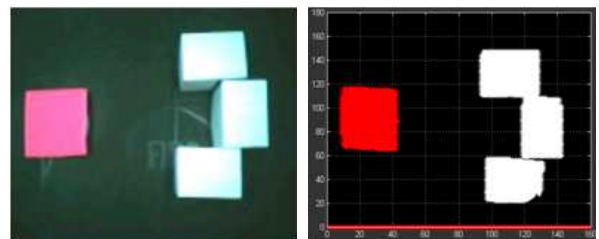
고도값을 기준으로 맵빌딩이 이루어지기 때문에 고도를 달리하면서 촬영한 영상 정보를 가지고 시뮬레이션 하였다. 왼쪽 사진은 실제 카메라에서 얻은 영상정보 이고 오른쪽 사진은 영상처리를 통해 로봇과 장애물을 추출한 결과이다. 카메라 자체의 왜곡 때문에 약간의 틀어짐이 발생하기도 하였으나 무시할만한 오차였다. 첫 번째 결과는 0.6m의 고도에서 촬영한 것이다. 헬기가 이 높이까지 이륙하기 전에는 패치를 인식하지 못하기 때문에 0.6m를 기준으로 고도 값을 추정했다. 나머지 시뮬레이션 결과를 보면 실제 고도와 측정된 고도를 비교해 본 결과 15% 내외의 오차가 발생했다. 하지만 이 0.6m ~ 2.15m의 범위를 벗어나면 오차가 증가하거나 패치를 인식하지 못했는데 이는 카메라 시야각의 한계와 헬기의 흔들림에 의한 왜곡 등의 이유라고 생각된다. 시뮬레이션을 통해 획득한 맵 정보의 정확성을 검증하였고 결과를 토대로 실제 실험에서는 헬리콥터의 고도를 0.6m ~ 2.5m로 제한했다.



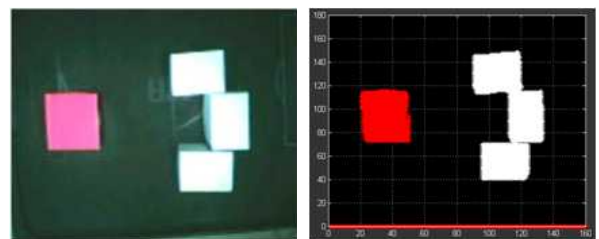
(a) altitude : 0.65m, measurement : 0.62m



(b) altitude : 1.15m, measurement : 1.08m



(c) altitude : 1.8m, measurement : 1.69m



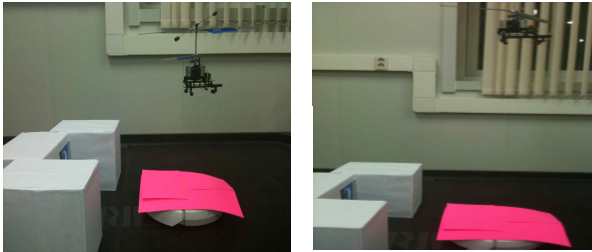
(d) altitude : 2.15m, measurement : 2.02m

그림 9. 시뮬레이션 결과.  
Fig. 9. Simulation result.

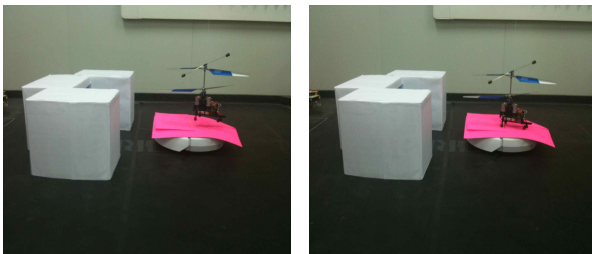
### 3. 실험 결과

실험을 통해 본 연구에서 제안한 협업 시스템을 검증하였다. 그림 10을 보면 실험의 결과를 각 동작별로 나타내었다. 처음에 양바퀴형 로봇이 이동하다가 장애물의 유무를 판단한 후 정지하게 되고 헬리콥터는 맵빌딩을 위해 이착륙 한 후 마지막으로 장애물을 피해 목적지 까지 이동한다. 양바퀴형 로봇이 장애물을 피하는 방법은 기존의 Limit-cycle 항법을[13] 적용하여 실험하였다.

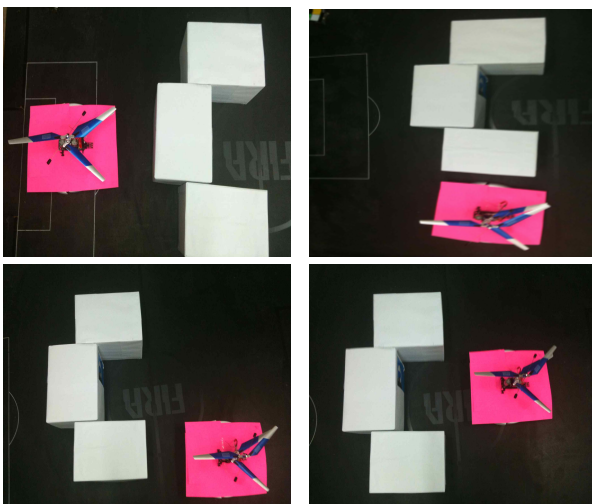
실험은 앞 절에서 설명했듯이 로봇축구 경기장을 사용하였고 로봇과 장애물에 칼라패치를 부착하여 실험 하였다. 각 로봇은 주 컴퓨터와 통신할 수 있고 주 컴퓨터에서는 연산한 값을 재전송해주는 역할을 한다. 시뮬레이션 결과를 토대로 0.6m ~ 2.15m의 고도에서 얻은 데이터들의 평균을 계산하여 맵을 빌딩 하였다. 실험 중 헬리콥터의 착륙에서 문제가 발생했다. 이는 0.6m 이하의 고도에서는 시야각의 한계로 제어가 불가하기 때문에 발생한 문제이다.



(a) Take off after detect obstacle



(b) Landing after map building



(c) Avoid obstacle using Map data

그림 10. 실험 결과.

Fig. 10. Experiment result.

### V. 결론

본 논문은 서로 다른 기능을 가진 로봇들의 협업을 통해 맵을 빌딩하고 위치를 추정하여 다양한 임무에 적용할 수 있는 방법을 제안하였고, 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다. 그 결과 제안한 맵 빌딩과 위치제어를 위한 협업시스템은 고가의 센서나 복잡한 알고리즘 없이도 좋은 성능을 낼 수 있는 것을 확인하였다. 하지만 임무 성공률을 향상시키기 위해선 추가적인 연구가 더 필요하다. 첫 번째로 비전제어를 사용하기 때문에 카메라의 시야각의 한계와 영상이 왜곡되는 문제를 해결해야한다. 영상의 왜곡은 영상 보정 알고리즘을 적용하여 해결할 것이고 헬리콥터에 추가 센서를 장착하여 고도 값을 보상한다면 시야각에서 벗어났을 때의 문제점 또한 해결할 수 있다. 두 번째로는 이 협업 시스템을 정찰, 운반 등 다양한 임무에 적용할 수 있도록 실제 환경에서의 연구도 진행할 것이다.

### 참고문헌

- [1] K. LeBlanc and A. Saffiotti, "Cooperative anchoring in heterogeneous multi-robot systems," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, May 2008.
- [2] S. Jia, H. Yang, X. Li, and W. Fu, "LRF-based data processing algorithm for map building of mobile robot," *International Congerence on Information and Automation*, Harbin, China, pp. 1924 - 1929, Jun. 2010.
- [3] H. Oh, D. Won, S. Huh, B. Park, D. H. Shim, and M. Tahk, "Indoor UAV Pose estimation from multicamera system using EKF," *2nd International Symposium on Unmanned Aerial Vehicles*, Reno, Nevada, 2009.
- [4] F. Dcatelle, G. A. Di Caro, and L. M. Gambardella, "Cooperative self-organization in a heterogeneous swarm robotic system," *GECCO'10*, Portland, Oregon, USA, 2010.
- [5] S. Huh and D. H. Shim, "A vision-based automatic landing method for fixed-wing UAVs," *Journal of Intelligent and Robotics Systems*, vol. 57 pp. 217-231, Jun. 2009.
- [6] K. E. Wenzel, A. Masselli, and A. Zell, "Automatic take off, tracking and landing on a miniature UAV on a moving carrier vehicle," *Journal of Intelligent and Robotics Systems*, vol. 61, no. 1-4, pp. 221-238, 2010.
- [7] L. Iocchi and D. Nardi, "Distributed coordination in heterogeneous multi-robot systems," *Autonomous Robots*, vol. 15, pp. 155-168, 2003.
- [8] H. G. Tanner, "Switched UAV-UGV cooperation scheme for target detection," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, pp. 3457-3462, April 2007.
- [9] J. Kiener and O. V. Stryk, "Towards cooperation of heterogeneous, autonomous robots: A case study of humanoid and wheeled robots," *Robotics and Autonomous*

*Systems*, vol. 58, no. 7, pp. 912-929, July 2010.

- [10] E. Z. MacArthur, D. MacArthur, and C. Crane, "Use of cooperative unmanned air and ground vehicles for detection and disposal of mines," *Proc. of SPIE*, vol. 5999, 2005.
- [11] J.-Y. Choi, D. H. Kim, and G. H. Lee, "A collaboration method to confine a robot with multiple robots," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, vol. 34, no. 8, pp. 953-964, 2010.
- [12] S.-K. Ji, M.-S. Kang, J.-O. Shin, S. D. Park, S.-H. Whang, K. Cho, and D.-H. Kim, "Development of a coaxial rotor flying root for observation," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 13, no. 2, Feb. 2007.
- [13] K.-H. Rew and D. H. Kim, "Limit-cycle navigation method for fast mobile robots," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 14, no. 11, pp. 1130-1138, 2008.



**정진수**

2009년 경희대학교 전자공학과 졸업. 2009년~현재 동 대학원 석사 과정. 관심분야는 모바일로봇의 항법, 다개체 지능제어, UAV.



**임윤원**

2009년 경희대학교 전자공학과 졸업. 2009년~현재 동 대학원 석사 과정. 관심분야는 UGV 항법 및 제어, 다개체 로봇 제어.



**강수혁**

2010년 경희대 전자공학과 학사 졸업. 2010년~현재 경희대학교 전자·전파공학과 석사과정. 관심분야는 로봇제어, UAV.



**김동한**

1995년 KAIST 전기및 전자공학과(공학사). 1998년 동 대학원(공학석사). 2003년 동 대학원(공학박사). 2003년~2004년 일리노이 주립대학 Post Doc. 2004년~2007년 삼성전자 무선사업부 책임연구원. 2007년~현재 경희대학교 전자정보대학 교수. 관심분야는 로봇제어, 다개체 지능제어.