

셀 분할 알고리즘과 확장 칼만 필터를 이용한 쿼드로터 복귀 실외 위치 추정

Outdoor Localization for Returning of Quad-rotor using Cell Divide Algorithm and Extended Kalman Filter

김기정*, 김윤기**, 최승환**, 이장명**

Ki-Jung Kim*, Yoon-Ki Kim**, Seung-Hwan Choi**, Jang-Myung Lee**

Abstract

This paper proposes a local estimation system which combines Cell Divide Algorithm with low-cost GPS/INS fused by Extended Kalman Filter(EKF) for localization of Quad-rotor when it returns to the departure point. In the research, the low-cost GPS and INS are fused by EKF to reduce the local error of low-cost GPS and the accumulative error of INS due to continuous integration of sensor error values. When the Quad-rotor returns to the departure point in the fastest path, a moving path can be known because it moves straight, where Cell Divide Algorithm is used to divide moving route into the cells. Then it determines the closest position of data of GPS/INS system fused by EKF to obtain the improved local data. The proposed system was verified through comparing experimental localization results obtained by using GPS, GPS/INS and GPS/INS with Cell Divide Algorithm respectively

요약

본 논문은 쿼드로터의 최단거리 복귀 시 위치인식을 위해 확장칼만필터(EKF) 이용한 저가형 GPS/INS 융합시스템과 셀 분할 알고리즘이 결합된 위치추정시스템을 제안한다. 연구에서는 저가형 GPS가 가지는 위치오차와 INS가 가지는 가속도 값의 지속적인 적분으로 인한 누적 오차를 줄이기 위해 확장칼만필터를 이용하여 GPS/INS 융합시스템을 구성한다. 또한 쿼드로터는 원점 복귀 명령 시 최단거리의 경로 지점에 대한 위치 경로 측정이 가능하기 때문에 위치 경로를 기준으로 셀 분할 알고리즘을 적용하여 GPS/INS 결합 데이터 중 실제 위치와 근접한 데이터를 결정함으로써 위치오차를 더욱 줄인다. 본 논문에서 제안하는 기법의 성능은 실외에서 쿼드로터 복귀 중 GPS, GPS/INS 결합, 셀 분할 알고리즘 적용 각각의 실험 결과를 비교함으로써 평가된다.

Key words : Cell Divide Algorithm, Extended Kalman Filter, Quad-Rotor, GPS, INS, Localization.

* Interdisciplinary Program in Robotics, Pusan National University(cumajjang7@nate.com/051-510-7379)

** Department of electrical engineering, Pusan National University

** Department of electrical engineering, Pusan National University

★ Corresponding author:(jmlee@pusan.ac.kr/051-510-2378)

※"This research was supported by the MSIP(Ministry of Science, ICT & Future Planning), Korea, under the ITRC(Information Technology Research Center) support program (NIPA-2013-H0301-13-2006) supervised by the NIPA(National IT Industry Promotion Agency)"

"This research was supported by the MOTIE(The Ministry of Trade, Industry and Energy), Korea, under the Human Resources Development Program for Special Environment Navigation/Localization National Robotics Research Center support program supervised by the NIPA(National IT Industry Promotion Agency)." (H1502-13-1001)

Manuscript received Nov. 9, 2013; revised Nov. 20, 2013 ; accepted Nov 21. 2013

I. 서론

최근 지상 환경의 영향을 덜 받으며 주행할 수 있는 무인비행로봇(UAV)은 재난감시, 인명구조 환경감시, 군사정찰과 같은 다양한 목적으로 활용되고 있다.[1] 그 중 쿼드로터는 4개의 로터를 이용하여 비행하는 회전익형 무인비행로봇이다. 쿼드로터는 수직이착륙, 정지비행, 전 방향 이동이 가능한 장점을 가지고 있어 실생활에 많이 활용되고 있으며 활발한 연구도 진행이 되고 있다.[2]

쿼드로터를 이용하여 다양한 임무를 수행하기 위해 많은 기술들이 필요하다. 고가의 쿼드로터는 임무 수행 후 원래의 목적지로 반드시 복귀해야 하는데, 이때 사용 되는 자율 복귀 기술은 중요한 기술 중 하나가 된다. 쿼드로터의 자율복귀를 위해서는 정밀한 자기 위치인식이 중요한 문제가 되고, 쿼드로터는 주로 실외에서 임무를 수행하기 때문에 실외에서의 위치인식은 매우 중요하다.[3] 하지만 실외에서는 많은 변수가 작용하여 정밀한 위치인식이 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 INS, GPS, 무선통신을 이용하여 정밀 실외위치추정을 하는데, INS는 센서가 제공하는 가속도 정보를 적분함으로써 위치 정보를 얻게 하지만 적분과정에서 오차가 적분되어 위치오차가 점점 심해진다. GPS는 실외에서 위치추정을 수행하기 위해 주로 쓰이는데 정밀한 GPS의 경우 고가이고, GPS 신호가 단절되는 음영지역에서는 사용하기 어렵다는 단점들이 존재한다. 그래서 주로 INS, 무선통신 기술들과 융합하는 방식을 많이 이용하고 있다.[4][5]

본 논문에서는 쿼드로터의 복귀 시 정밀한 자기 위치인식을 위하여, 저가형 GPS와 INS를 EKF를 이용하여 융합하고 셀 분할 알고리즘을 적용하여 위치 정밀도를 향상시키는 알고리즘을 소개한다.

논문은 다음과 같이 구성된다. II절에서 시스템의 구성에 대하여 소개하고, III절에서 GPS/INS 융합 필터와 셀 분할 알고리즘에 대하여 서술한다. IV절에서 본 논문에서 제시하는 셀 분할 알고리즘과 EKF의 적용 성능 평가를 위한 실험을 하고 마지막으로 V절에서 결론을 맺는다..

II. 시스템 구성 및 하드웨어

논문에서 제안되어진 시스템구성은 그림 1과 같다. 시스템에서 제어를 위해 사용한 Micro Controller Unit (MCU)은 Atmel사에서 만든 ATMEGA 2560 이다. 센서는 3축 자이로와 3축 가속도 센서가 결합된 MPU-6050, 3축 지자계 센서인 HMC-5883, 압력센서

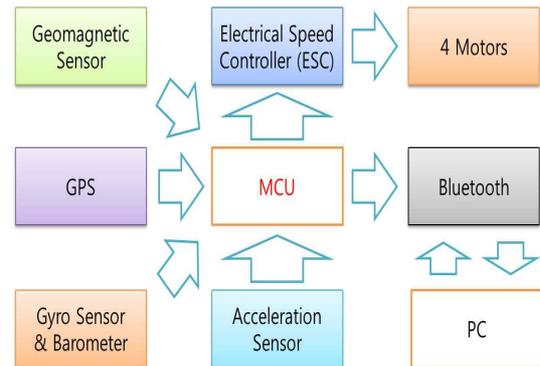


Fig. 1. System Block Diagram
그림 1. 시스템 블록 다이어그램

인 BMP 085 그리고 위치인식을 위해 GPS 센서인 MTK 3329를 사용하였으며, 쿼드로터의 추력을 발생시키기 위해 RoHS 사의 Electrical Speed Controller (ESC)와 Brushless Motor를 사용하였다.

쿼드로터의 프로펠러는 기체의 회전을 막기 위해서 서로의 회전력을 상쇄시키는 방향으로 회전하면서 추력을 얻을 수 있도록 설치를 하였고, 로봇에 이동과 복귀 명령을 내리기 위하여 RoHS에서 만든 RN-42 블루투스 사용하였다.

그림 2는 시스템의 하드웨어 구성을 나타낸다. GPS 수신기는 데이터를 최대한 정확하게 받기위해 쿼드로터의 상단에 위치하도록 설계하였고, 그 아래에 MCU와 IMU 센서를 배치하였다.

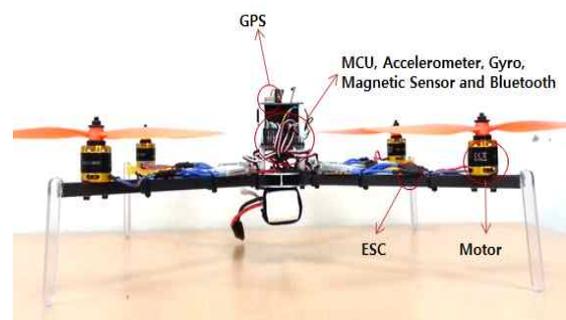


Fig. 2. Total Quad-rotor configuration
그림 2. 전체 쿼드로토 구성

III. GPS/INS 융합 및 셀 분할

가. GPS/INS 융합

INS는 가속도 데이터를 2번 적분함으로써 항체의 속도와 기준위치로부터의 위치 변화를 연속적으로 제

공하기 때문에 동적특성이 좋지만 시간이 지날수록 오차가 누적되는 단점이 있다. 그리고 GPS는 실외에서 항체의 위치정보를 제공하지만 지형에 따라 오차가 심한 단점을 가진다.[6][7] GPS와 INS의 단점을 보완하도록 각각의 데이터를 융합하기 위해 칼만 필터(Kalman Filter), 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter or EKF) 등을 사용하는데, 칼만 필터는 선형시스템에 사용하고, 확장 칼만 필터는 비선형 시스템에 사용한다.[8] 쿼드로터의 위치와 상태는 비선형적인 요소를 포함하고 있기 때문에, 연구에서는 확장 칼만 필터를 이용하여 GPS와 INS를 융합 한다. 확장 칼만 필터의 알고리즘은 그림 3이 보여준다.

항체 좌표계와 항법 좌표계는 다르기 때문에 자이로 센서에서 얻은 각속도를 \tilde{w}_b^b 이용해 쿼터니언으로 표현된 자세 \hat{q} 를 구한 뒤, 이 자세로 항체 좌표계를 항법 좌표계로 변환시켜주는 변환행렬 \hat{R}_n^b 을 구한다. 가속도 \hat{a} 를 이중 적분하여 구한 항법 좌표계상의 쿼드로터 위치 \hat{p} 와 셀 분할 알고리즘을 통해 얻어진 GPS위치의 차를 $\delta\hat{p}^- \equiv \tilde{p} - \hat{p}$ 로 정의하고, 자자기 센서의 측정 값 \hat{m}^b 에 변환행렬을 곱하여 항법 좌표계의 값 \hat{m}^n 으로 바꾼다. 실제 지구 자기장 m^n 과 계산 값의 차를 $\delta\hat{m}^n$ 로 정의하고, $\delta\hat{p}^n$ 와 함께 확장 칼

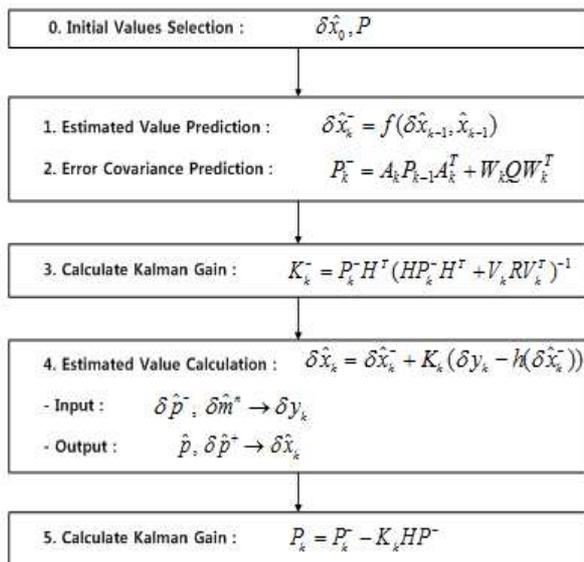


Fig. 3. Algorithm of Extended Kalman Filter
 그림 3. 확장 칼만 필터의 알고리즘

만 필터의 측정치로 사용하여, 위치 오차와 자세오차를 추정하는 다음 식과 같은 상태 공간 방정식을 설

계한다. 자세와 위치를 구해진 오차를 이용하여 갱신함으로써 보정된 값을 얻을 수 있게 된다.

$$\delta X_k = f_k(\delta X_{k-1}) + \omega_k \quad (1)$$

$$\delta Y_k = h_k(\delta X_k) + v_k \quad (2)$$

k 의 추정 값은 \hat{k} , 측정값은 \tilde{k} 으로 정의하고, f_k 는 상태 전과 함수, h_k 는 측정 방정식, ω_k 는 시스템 오차, v_k 는 측정 오차, δy_k 는 측정값으로 표현한다.

확장 칼만 필터에 이용되는 상태는 속도오차 δv , 위치오차 δp , 자세오차 ρ , 가속도와 자이로 센서의 바이어스 오차 δb_{acc} , δb_{gyro} 등 총 5가지 3차원의 오차를 가져 15개의 차원을 가지게 된다. 본 논문에서 사용한 GPS와 INS융합 알고리즘은 그림 4와 같다.

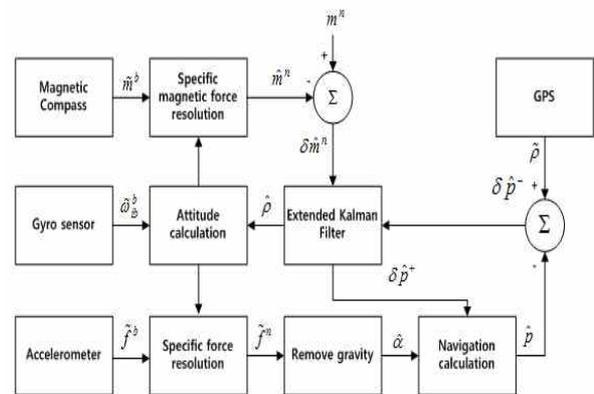


Fig. 4. Block diagram of Extended Kalman Filter
 그림 4. 확장 칼만 필터 블록 다이어그램

나. 셀 분할 알고리즘

셀 분할 방식은 이동체의 경로 계획 방법 중 하나로 자유공간을 경로가 쉽게 계획될 수 있는 셀들로 나누어 전체 운동경로를 계획하는 방식이다. 나누어진 셀을 기반으로 이웃한 셀들을 연결하는 연결 그래프를 생성한 후 최적경로를 탐색하는데, 셀을 나누는 방식에 따라 근사 셀 분할 방식으로 나눌 수 있다.[9]

완전 셀 분할 방식은 분할한 셀들의 합집합이 정확히 전체 자유공간이 되는 조건을 만족해야 하는 방식으로 셀들의 합집합이 전체 자유공간이 되는 조건을 만족해야 한다.[10][11] 그림 5에 나와 있듯이 공중에

서 주행하는 쿼드콥터는 땅에서 주행하는 이동 로봇과는 달리 장애물에 대한 제약을 받지 않기 때문에 본 논문에서는 완전 셀 분할 방식을 사용한다.[12][13]



Fig. 5. Moving Route of Quad-rotor
그림 5. 쿼드콥터의 이동 경로

GPS 센서에서 얻은 출발지와 도착지의 위도, 경도는 식을 통해 거리 값으로 변환되고[12], 거리는 길이에 따라 가변적이게 셀로 분할된다. 분할된 셀의 중심 좌표들은 식을 통해 GPS 값으로 변환되며, 원래 값에 근접한 GPS 값을 채택하기 위해 GPS 센서로부터 나오는 데이터와 비교 된다. 논문에서 제안된 셀 분할 알고리즘을 통한 위치결정 순서는 다음과 같다.

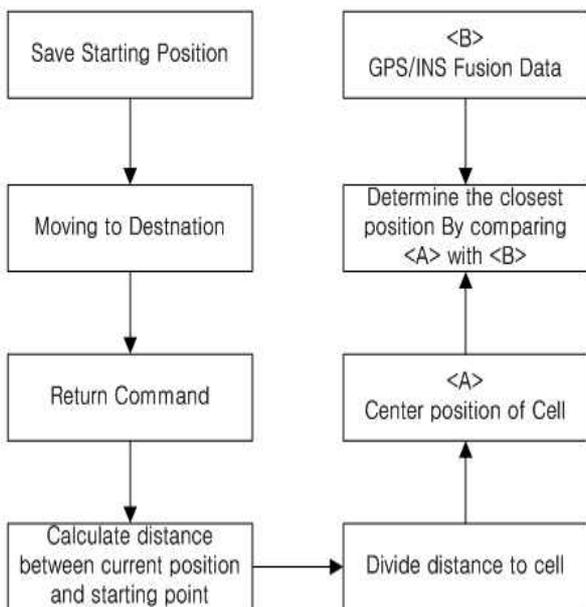


Fig. 6. Block diagram of cell divide algorithm
그림 6. 셀 분할 알고리즘의 블록 다이어그램

위 알고리즘을 통해 얻은 GPS 값은 그림 7에 나타난다.

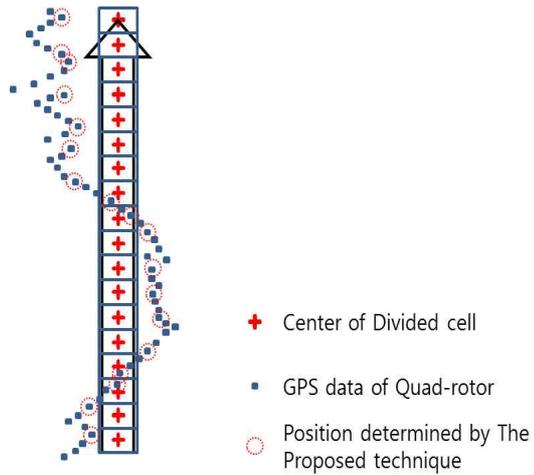


Fig. 7. Position determined by cell divide algorithm
그림 7. 셀 분할 알고리즘으로 결정된 위치

IV 실험

본 논문에서는 실외에서 쿼드콥터의 위치 추정 정확도를 향상시키기 위하여 비교적 큰 오차를 가지는 저가형 GPS 위치정보에 셀 분할 알고리즘과 확장칼만필터를 사용하여 쿼드콥터의 위치 정보를 향상 시켰다. 확장칼만필터를 사용하여 위치정보를 구하는 것은 INS의 누적오차로 인하여 예측 값의 누적오차가 발생하게 되는데, 이를 보완하기 위해 확장 칼만 필터에서 절대 위치를 가지는 GPS 위치정보를 갱신한다.

제안된 기술을 검증하기 위하여 쿼드콥터의 비행 중 출발지와 거리 50미터인 지점에서 자율 복귀를 시키는 실험을 본교의 운동장에서 실행 하였다.



Fig. 8. Place of experiment
그림 8. 실험 장소

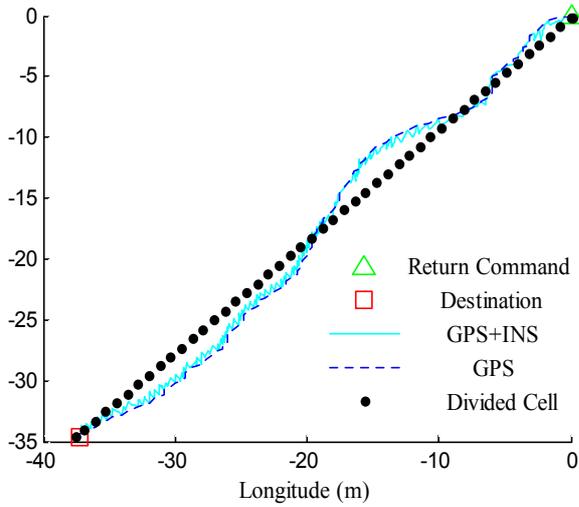


Fig. 9. Location determined by GPS+INS System
 그림 9. GPS/INS 시스템으로 결정된 위치

그림 9 에는 셀 분할된 최단경로, GPS 그리고 GPS/INS로 결정된 위치정보가 나타나 있다. 그림 9와 표 1에서 알 수 있듯이 저가형 GPS가 제공하는 데이터보다 확장칼만필터로 결합된 GPS/INS 시스템이 제공하는 위치정보가 더 정밀하다.

Table 1. Location error of the GPS and GPS/INS
 표 1. GPS와 GPS/INS의 위치 오차

Sort	Average Location Error(m)
GPS	2.3485m
GPS+ INS	1.824m

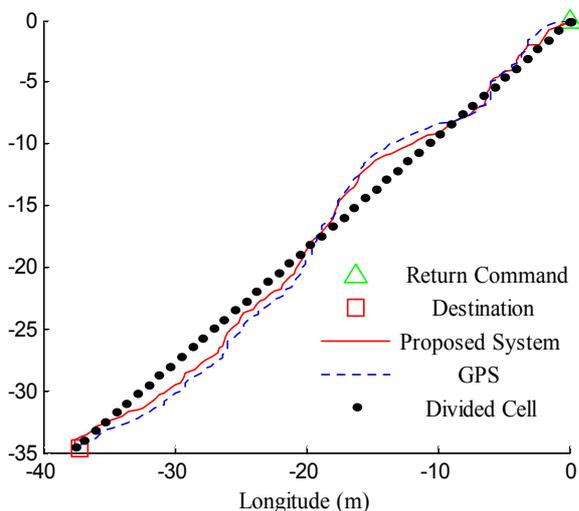


Fig. 10 Location determined by Cell Divide Algorithm
 그림 10. 셀 분할 알고리즘으로 결정된 위치

그림 10은 확장칼만필터로 결합된 GPS/INS 시스템에 셀 분할 알고리즘을 결합시킨 결과가 나타나 있다. 그림 9와 비교해보면 셀 분할 알고리즘으로 인해 GPS/INS의 위치정보 중 최단경로와 가장 가까운 것만 선택됨으로써 위치오차가 줄어든 것을 볼 수 있다. 표 2는 그에 따른 평균 위치 오차를 보여준다.

Table 2. Location error of GPS and Proposed system
 표 2. 제안된 시스템과 GPS의 위치 오차

Sort	Average Location Error(m)
GPS	2.3485m
Proposed System	1.1531m

IV 결론

본 논문은 실외에서 쿼드콥터의 원점으로 복귀 시 위치추정 성능 향상을 위해 셀 분할 알고리즘과 확장칼만 필터를 결합한 시스템을 제안하였고, 제안된 기술은 일반적인 저가형 GPS 시스템과 비교하여 성능의 우수성을 검증하였다. 지속적으로 연구되고 있는 GPS/INS 융합 시스템은 기본적으로 GPS가 제공하는 정보의 신뢰도가 높아야 되는데, 저가형 GPS는 위치의 오차가 많이 생기기 때문에 GPS/INS 융합을 하여도 위치추정 성능이 크게 향상 되지 않는다. 하지만 본 논문에서 제안한 셀 분할 알고리즘과 확장칼만필터를 쿼드콥터의 복귀 시 위치 추정을 위해 이용하면, 셀 분할 알고리즘으로 인해 저가형 GPS /INS 결합 데이터 중 실제 위치와 근접한 데이터가 결정됨으로써 위치 추정 오차가 줄어든다. 제안된 시스템은 저가형 GPS와 INS를 사용하기 때문에 다른 위치추정 시스템보다 비용이 적고 정밀 위치 추정이 가능하다. 추후 외란으로 인한 위치이탈과 곡선경로 이동시에도 정밀한 실외 위치 추정을 할 수 있는 시스템을 과제로 남겨둔다.

References

[1] M.G.Kim, Y.D.Kim, "Multiple UAVs Nonlinear Guidance Laws for Stationary Target Observation with Waypoint Incidence Angle Constraint", Int'l J. of Aeronautical & Space Sci, Vol.14, No.1, pp 67-74, 2013
 [2] M.Y.Chen, D.H.Edwards, "Designing a Spatially Aware and Autonomous Quadcopter", IEEE Systems. Inform. Enging. Design. Symposium, Charlottesville, VA, USA, pp 213-218, APRIL 2013

[3]M.Garzón, J.Valente, D.Zapata, “Real-Time Feature Tracking Using Binary Descriptor for Vision based Unmanned Aerial Vehicle Localization”, *New Trends towards Automatic Vehicle Control and Perception Systems*, Vol. 13, No. 1, pp 1247-1267, 2013

[4] J.H. Seung, D.J. Lee, J.Y.Ryu, “Precise Positioning Algorithm Development for Quadrotor Flying Robots Using Dual Extended Kalman Filter”, *Journal of Institute of Control, Robotics and System*, Vol.19, No.2, pp 183-163, 2013

[5]D.J.Jwo, C.F.Yang, C.H.Chuang, T.Y.Lee, “Performance Enhancement for Ultra-tight GPS/INS integration using a fuzzy adaptive strong tracking unscented Kalman Filter”, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 73, No.1 pp 377-395, 2013

[6] J.H. Lee, H.S. Kim, “A Study of High Precision Position Estimator Using GPS/INS Sensor Fusion”, *Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol. 49, No. 11, November 2012

[7]K. G. Kim, C. H. Park, M. J. Yu and Y. B. Park, “A Performance Comparison of Extended and Coupled Approach”, *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, Vol. 12, No. 8, pp 780-788 2006

[8] S. H. Choi, Y.K. Kim, “Outdoor Precision Position Estimation System Using Multiple GPS and EKF”, *Journal of Korea Robotics Society*, Vol. 8, No. 2, pp 129-135, 2013

[9]J.T.Kim, D.J.Kim, “New Path Planning Combining Visibility Graph and Adaptive Cell Decomposition”, *Journal of KIISE : Computer Systems and Theory*, Vol. 36, No. 1, pp 357-361, 2009

[10]J.W.Kang, S.J.Kim, “Path Planning for Complete and Efficient Coverage Operation of Mobile Robots”, *International Conference on Mechatronics and Automation*, Harbin, China, August 5-8, 2007

[11]J.Y.Ahn, K.A.Yu, “Expansion of Motion Planning Algorithms by Cell-Decomposition”, *The Korean Institute of Information Scientists and Engineers*, Vol. 30, No. 1, 887-889, 2003

[12]S.Hert, S. Tiwari, V.Lumelsky, “A terrain-covering algorithm for an AUV”, *Autonomous Robots*, Vol. 3, pp.91-119, 1996

[13]M.Rengarajan, G. Anitha “Algorithm Development And Testing Of Low Cost Way Point Navigation

System”, *Engineering Science and Technology: An International Journal*, Vol 3, No. 2, pp 411-414, April 2013

BIOGRAPHY

Ki-Jung Kim (Student Member)



2013 : BS degree in Electronic Engineering, Dong-a University
2013~ : MS degree in Interdisciplinary Program in Robotics, Pusan University

Yoon-Ki Kim (Student Member)



2011 : BS degree in Mechatronics Engineering, Kyung-nam University
2013 : MS degree in Electronic Engineering, Pusan University
2013~ : PhD degree in Electronic Engineering, Pusan University

Seung-Hwan Choi (Student Member)



2012 : BS degree in Electronic Engineering, Dong-a University
2012~ : MS degree in Interdisciplinary Program in Robotics, Pusan University

Jang-Myung Lee (Member)



1980 : BS degree in Electrical Engineering, Seoul University.
1982 : MS degree in Electrical Engineering, Seoul University.
1990 : PhD degree in computer Engineering, University of Southern California(USC)
1992~ : Professor in Department of Electrical Engineering, Pusan University.