

다중 GPS를 이용한 EKF 기반의 실외 위치 추정 시스템

EKF Based Outdoor Positioning System using Multiple GPS Receivers

최 승 환¹, 김 윤 기², 황 요 섭², 김 현 우², 이 장 명[†]

Choi Seung-Hwan¹, Kim Yun-Ki², Hwang Yo-Seop²,
Kim Hyun-Woo², Lee Jang-Myung[†]

Abstract In this paper, a high precision outdoor positioning system is newly proposed using multiple GPS receivers based on the Extended Kalman Filter (EKF). Typically, the GPS signal has the instantaneous errors that degrade the positioning seriously. Using the multiple GPS receivers instead of an expensive DGPS receiver, the positioning reliability and accuracy are improved in this research as a low cost solution. To incorporate the small displacement, an INS data have been tightly coupled to the GPS data, which has the inherit disadvantage of the cumulative error occurring over time. To achieve a stabilized and accurate positioning system, the multiple GPS receiver data are fused with the INS data through the EKF process. Through real navigation experiments of an outdoor mobile robot, the performance of the proposed system has been verified to be accurate comparable to DGPS system with a lower cost.

Keywords: GPS, Extended Kalman Filter, INS, Outdoor positioning system

1. 서 론

이전부터 위치인식 기술은 모바일 로봇의 핵심 기술로서 중요하게 여겨져 왔다. 특히, 위치 추정은 무인 자동차 및 지능형 로봇의 자율적 경로 이동을 위해 활발히 연구되고 있다. 위치 추정에는 주로 GPS (Global Positioning System)와 INS(Inertial Navigation System)가 있다. GPS는 각 위성으로부터 사용자의 수신기까지 전파가 도달하는 시간을 삼각측량법으로 계산하여 사용자의 위치를 구하고,

INS는 초기 위치정보로부터 가속도 데이터의 2차 적분을 통해 항체의 속도와 위치를 계산한다^{1,2}.

GPS는 위성과 수신기의 거리를 위성에서 보내는 전파의 도달시간을 바탕으로 계산된다. 이때 위성과 수신기의 시계가 일치하지 않아 오차가 발생한다. 또한, 최소 4개 이상의 GPS 위성에서 전파를 수신해야 자신의 위치를 비교적 정확하게 파악할 수 있다. 저가형 GPS의 경우 일반적으로 10 m 이내의 큰 오차를 가지기 때문에 정밀도 높은 DGPS나 RTK-GPS를 이용한 연구도 많이 진행되었다. 하지만 일반 GPS보다 시스템 구축의 비용이 수십 배 이상인 고가의 시스템들이다. INS의 경우 적분 방식을 통해 위치정보를 구하기 때문에 오차가 시간의 제곱에 비례하여 누적되어 시간이 지남에 따라 큰 오차를 발생시킨다^{3,4}.

본 논문에서는 GPS 수신기의 안정도와 정밀도를 높이기 위해 GPS 수신기 3 개를 사용하였다. 수신기를 통해 들어오는 3 개의 데이터를 삼각 중심 법을 통해 보정된 위치

Received : Jan. 8. 2013; Reviewed : Feb. 6. 2013; Accepted : Mar. 26. 2013

※ This research was supported by the MKE(The Ministry of Knowledge Economy), 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)." (NIPA-2012-H1502-12-1002)

[†] Corresponding author: Electronic Engineering, Pusan University, Jangjeon 2-dong, Geumjeong-gu, Busan, Korea, (jmlee@pusan.ac.kr)

¹ Interdisciplinary Program in Robotics, Pusan University (seunghwan7379@pusan.ac.kr)

² Electronic Engineering, Pusan University ({mecha8404, mmmx001, hyunwoo1687}@pusan.ac.kr)

정보를 얻었다. 또한, 다중 GPS를 이용하여 얻은 정밀한 위치정보를 통해 INS의 위치 값을 갱신해주는 EKF 기반의 정밀 위치 추정 시스템을 제안한다.

본 논문의 2장에서는 연구에서 사용된 시스템의 구성을 설명한다. 3장에서는 다중 GPS를 설계하는 방식을 제시하고 GPS 수신기의 개수에 따른 위치 오차를 비교한다. 4장에서는 본 논문에서 제시하는 GPS/INS 융합 알고리즘에 대해서 설명하고, 5장에서는 단일 GPS와 다중 GPS의 실험 비교를 통해 다중 GPS의 성능을 검증한다. 끝으로 6장에서는 실험 결과를 토대로 본 논문을 마무리한다.

2. 시스템 구성

위치 추정 시스템의 구성은 그림 1과 같다. MCU는 TEXAS INSTRUMENTS 사의 Cortex-M3 ARM인 LM3S8962를 사용하였다. 센서는 E2BOX 사의 EBIMU-9DOF 모델인 IMU 센서 1 개와 LOCOSYS Technology 사의 LS20031 모델인 GPS 수신기 3 개를 사용하였다.

그림 2는 시스템의 하드웨어 구성과 배치를 나타낸다. GPS 수신기는 위치 오차의 범위를 최소화하기 위해 수신

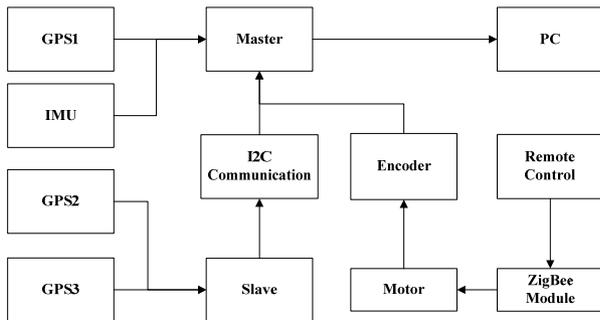


Fig. 1. Total system block diagram

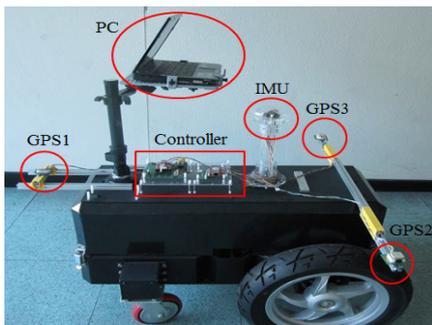


Fig. 2. The Configuration of the hardware

기 3개의 중심이 모바일 로봇의 중앙에 위치하도록 설계하였다. 또한, 자세와 위치정보를 얻기 위해 IMU 센서를 사용하였고, 모바일 로봇의 내부에는 모터 제어부를 탑재하였다.

3. 다중 GPS 시스템

GPS 수신기는 위성을 통해 시간과 위치, 속도, 방위 등의 항법 정보를 수신하게 된다. 하지만 수신된 GPS 정보는 공간 구조에서의 생성으로 인한 구조적 요인에 따른 오차와 위성의 배치에 따른 기하학적 오차, 그리고 SA(Selective Availability) 오차를 갖게 된다^[56]. 이 장에서는 GPS 위성의 수신을 안정시키고, 수신되는 데이터의 오차를 감소시켜 정확도를 높이는 다중 GPS 시스템을 제시한다.

3.1 다중 GPS의 구성

다중 GPS 시스템은 GPS 수신기의 개수에 따라 오차의 범위가 달라진다. 본 논문에서는 수신기의 개수를 고려하여 오차 범위를 최소화하는 시스템을 설계하였다. 그림 3은 실제 모바일 로봇에 GPS 수신기 3 개를 장착한 모습이다. 그림과 같이 전방에 1 개, 후방에 2 개를 배치하여 삼각 중심 법을 적용하였다.

그림 4는 GPS 수신기의 개수에 따른 모바일 로봇의 무게중심과 오차 범위를 나타낸 것이다. 그림에서 원은 GPS의 오차 범위라 가정하고, (b)의 삼각형과 (c)의 사각형은 각각의 GPS 수신기의 오차 범위를 통해 수신기 전체의 평균 오차 범위를 나타낸다. 그림 4의 (a)와 같이 GPS 수신기 2 개를 이용할 경우 수신된 두 지점의 평균을 통해 위치 값을 계산하기 때문에 오차 범위가 넓다. 또

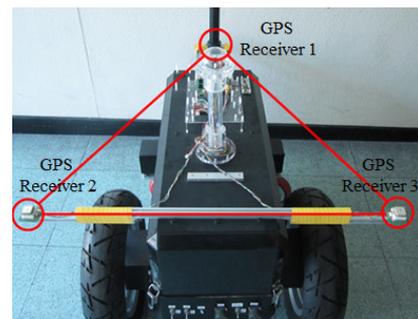


Fig. 3. The Configuration of the GPS receiver

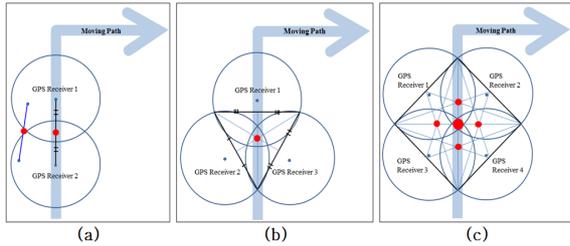


Fig. 4. Average weighted of the GPS receiver

한, 회전 시 순간 두 지점 간의 방향이 틀어지게 되어 위치 오차가 더 커지게 된다. 그림 (b)의 경우 GPS 수신기 3개를 삼각 중심 법을 이용하여 위치추정을 하는 것으로 GPS 수신기의 무게중심이 중앙에 가장 근사하게 위치하여 오차 범위를 가장 최소화시킬 수 있다. 또한 순간 회전 시에도 보다 유연하게 위치를 추정할 수 있다. 반면에 4개 이상의 수신기를 사용하면 삼각형의 무게중심을 이용하여 무게중심을 구하게 되는데 그림 (c)와 같이 전체 무게중심의 변동이 커지고 오차 범위도 넓어진다. 이로 인해 회전 시 순간 오차도 커지게 된다.

$$P(G_i) = (x_i, y_i) \tag{1}$$

$$P(G) = \frac{G_1 \times n_1 + G_2 \times n_2 + G_3 \times n_3}{n_1 + n_2 + n_3} \tag{2}$$

식 (1)은 각각의 GPS 수신 위치를 나타낸 것이고 식 (2)는 다중 GPS 수신기의 위치 계산식이다. 본 논문에서는 GPS 수신기에서 측정된 수신 위성의 수에 따라 가중치를 두어 정밀도를 높였다. G 는 GPS 수신기, n 은 수신기에 측정된 위성의 수를 뜻한다. 여기서 수신된 위성 수가 많은 수신기의 위치 값에 가중치를 둔다. 또한, GPS 수신기에서 위성의 수가 4개 미만인 경우, 그 데이터는 배제하게 된다.

3.2 다중 GPS 시스템 알고리즘

GPS는 실외 환경이나 기후에 따라 수신 안정도가 달라진다. 또한, 수신기마다 조금의 성능 차이가 있다. 그림 5는 GPS 위성의 수신 안정도를 판별하여 그에 따른 위치 추정의 과정을 순서도로 나타내었다.

본 논문에서는 GPS 데이터의 수신 시간과 위성수를 고

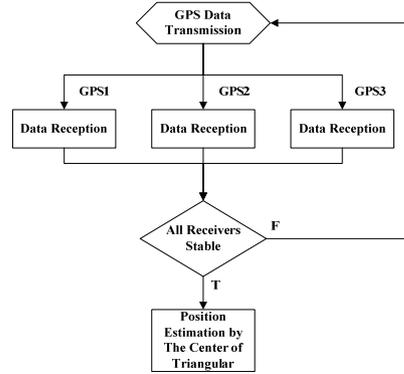


Fig. 5. The position estimation about degree of GPS stability

려하였다. 모든 GPS 수신기가 수신 시간이 일치하고, 4개 이상의 위성에서 데이터를 수신할 경우 안정하다고 판단한다. 또한, 수신된 위성의 개수에 따라 가중치를 두어 점평데이터의 오차를 줄여준다. 따라서, 안정성 확보를 통해 획득한 위치정보들은 삼각 중심 법을 이용하여 정밀하게 위치를 추정하게 된다.

3.3 단일 GPS와 다중 GPS의 비교

단일 GPS와 다중 GPS의 성능을 비교하기 위하여 정지 상태에서 30분 동안 각각의 수신기에서 데이터를 획득하였다.

그림 6은 특정 지점 Position(위도: 35.139347, 경도: 129.049213)에서 정지 상태로 각각의 단일 GPS 수신기 3개와 다중 GPS 수신기를 통해 획득한 위치정보를 보여준다. 표 1은 단일 GPS 3개와 다중 GPS의 최대 위치 오차와 평균 위치 오차를 계산한 결과이다. 표에서 볼 수 있듯이 단일 GPS의 경우 최대 8m이상의 위치 오차가 발생하

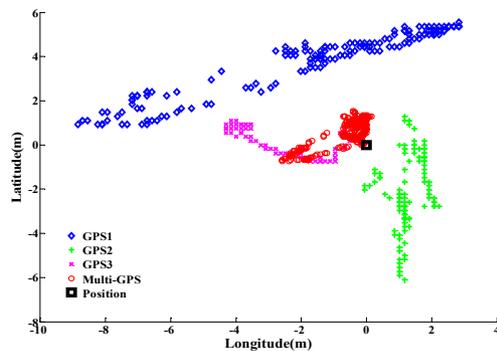


Fig. 6. Comparison of the single GPS & multi-GPS at the stop state

Table 1. The position error of the single GPS and multi-GPS

Sort	Maximum Position Error(m)	Average Position Error(m)
GPS1	8.9036	5.2077
GPS2	6.2120	2.7370
GPS3	4.3995	2.1832
Multi-GPS	3.6497	0.6635

였고 평균 오차의 경우도 2 m 이상을 띄고 있다. 또한, 그림의 위치 분포도를 보면 현재 position 지점의 위치를 정확히 파악하기 어렵다. 이에 반해 다중 GPS의 경우 삼각 중심 법을 이용해 서로의 오차를 보정해 줌으로써 위치정보가 현재 Position 지점 주변에 밀집되었고 평균 위치 오차도 0.6635 m로 1 m 이내의 우수한 정밀도를 보였다.

4. GPS / INS 융합 알고리즘

INS는 연속적인 항법 정보를 제공하여 동적 특성이 좋지만 시간이 지날수록 오차가 누적되는 단점이 있다. 반면에 GPS는 절대 위치정보를 제공하지만 오차가 심하고 지형적 특징에 따라 항법 해를 계산하지 못하는 단점이 있다. 따라서 두 장치의 융합은 서로의 단점을 보완하여 전체적인 시스템의 성능을 향상시킨다^[7,9].

그림 7은 다중 GPS와 INS의 융합 알고리즘 블록도이다. 자이로 센서에서 얻은 각속도($\hat{\omega}_b^b$)를 이용하여 쿼터니언(Quaternion)으로 표현된 자세(\hat{q})를 갱신한다^[10]. 쿼터니언으로 표현된 자세는 항체 좌표계에서 항법 좌표계로 변환시켜 주는 변환 행렬을 구할 수 있다.

항법 좌표계의 가속도(\hat{a})를 두 번 적분하여 구한 위치(\hat{p})와 다중 GPS의 수신을 통해 획득한 위치(\tilde{p})의 차를 $\delta\hat{p} \equiv \tilde{p} - \hat{p}$ 로 정의한다. 지자기 센서의 측정값(\hat{m}^b)을 변

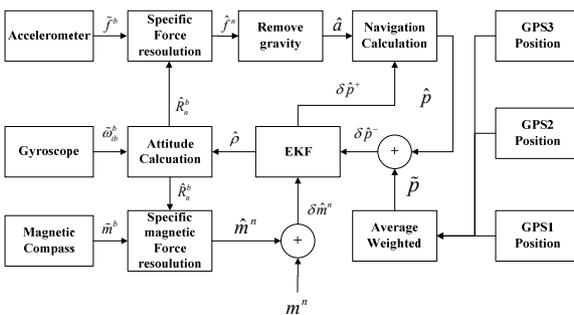


Fig. 7. The block diagram of the GPS/INS fusion algorithm

환행렬을 이용하여 항법 좌표계의 값($\hat{m}^n = \hat{R}_n^b \hat{m}^b$)으로 바꾸어 지구 자기장의 값을 측정한다. 실제 지구 자기장(m^n)과 계산한 지구 자기장 값의 차를 $\delta\hat{m}^n \equiv \hat{m}^n - m^n$ 라고 정의한다. $\delta\hat{p}$ 와 $\delta\hat{m}^n$ 을 EKF의 측정치로 사용하여 식 (3)과 같이 상태 공간 방정식으로 설계한 뒤 자세오차($\hat{\rho}$)와 위치 오차($\delta\hat{p}^+$)를 추정한다.

$$\delta\mathbf{x}_k = f_k(\delta\mathbf{x}_{k-1}) + \omega_k, \delta\mathbf{y}_k = h_k(\delta\mathbf{x}_k) + v_k \quad (3)$$

구해진 오차를 통해 자세와 위치를 갱신하여 보정된 값을 얻을 수 있다.

k 의 추정 값은 \hat{k} , 측정값은 \tilde{k} 로 정의한다. f_k 는 상태 전파 함수, h_k 는 측정 방정식, ω_k 는 시스템 오차, v_k 는 측정 오차, δy_k 는 측정값이다.

EKF에서 사용하는 상태는 각각 3 차원의 위치 오차(δp), 속도오차(δv), 자세오차(ρ), 가속도 센서와 자이로 센서의 바이어스 오차는 δb_{acc} 와 δb_{gyro} 를 확률변수로 가지는 총 15 개의 차원을 가진다^[11].

$$q\mathbf{x} = [\delta p^T \quad \delta v^T \quad \rho^T \quad \delta b_{acc}^T \quad \delta b_{gyro}^T] \quad (4)$$

이때 $\delta k \equiv k - \hat{k}$ 로 정의하고 각 확률변수의 요소는 다음과 같이 정의한다.

$$p \equiv [x \quad y \quad z]^T, v \equiv [v_x \quad v_y \quad v_z]^T, \rho \equiv [\varepsilon_N \quad rl \quad \varepsilon_D]^T \quad (5)$$

(ε_N : Tilt errors, ε_D : Heading error)

그림 8은 EKF 알고리즘을 나타낸다.

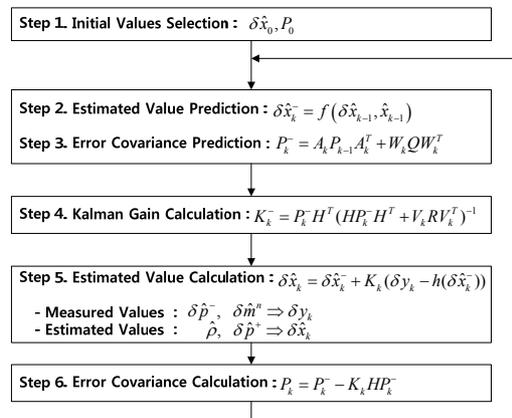


Fig. 8. The algorithm of the EKF

5. 실험 결과

본 논문에서는 실외 위치 추정의 정밀도를 향상시키기 위해 비교적 큰 오차가 발생하는 단일 GPS의 위치정보를 보정하고자 다중 GPS를 이용하였다. 그림 7에서 보듯이 EKF의 경우 예측 값을 통해 위치정보를 구하는 것으로 INS의 위치정보는 누적오차가 발생하여 EKF의 예측 값 또한 누적오차가 발생한다. 이를 보완하기 위해 EKF에서 GPS의 절대 위치 값을 통해 위치정보를 갱신한다. 따라서 다중 GPS를 이용하여 갱신 데이터를 더 정확하게 해줌으로써 정밀한 위치정보를 얻을 수 있다. 실험은 단일 GPS와 다중 GPS의 성능을 분석하고 두 장치를 EKF에 적용하여 비교 검증하였다.

그림 9는 GPS만을 이용하여 위치를 추정한 것이고 표 2는 그에 따른 평균 위치 오차를 나타낸 것이다. 실험은 초기 START(위도: 35.138936, 경도: 129.049354) 지점에서 출발하여 END(위도: 35.138933, 경도: 129.049348) 지점까지 이동하였다.

단일 GPS의 경우 외부 요인으로 인해 발생하는 오차를 그대로 받아들이기 때문에 위치 오차의 범위가 넓고 순간 오차는 커서 비교적 큰 굴곡이 나타난다. 하지만 다중

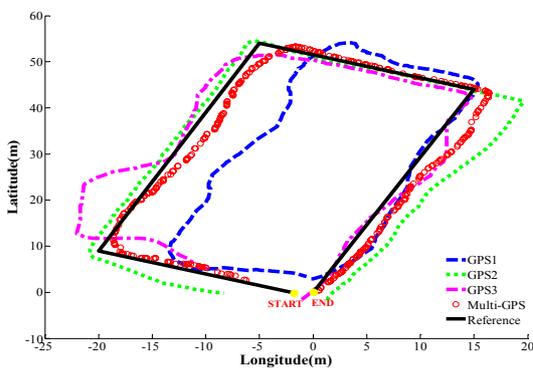


Fig. 9. The result of single GPS and multi-GPS

Table 2. The position error of the single GPS and Multi-GPS

Sort	Average Position Error(m)
GPS1	6.4380
GPS 2	2.9722
GPS 3	3.1492
Multi-GPS	1.7418

GPS는 앞에서 설명한 삼각 중심 법을 통해 모바일 로봇의 중심점을 잡아줌으로써 서로의 오차 요인은 어느 정도 상쇄하고 오차 범위와 순간 오차가 감소하여 완만한 형태의 결과를 보여준다.

그림 10은 EKF를 이용하여 단일 GPS와 다중 GPS를 각각 IMU 센서와 융합한 시스템들의 위치 추정 결과를 보여준다. 실험은 초기 START(위도: 35.139364, 경도: 129.049177) 지점에서 출발하여 END(위도: 35.139333, 경도: 129.049296) 지점까지 이동하였다. 또한, 표 3은 실험을 통해 구한 평균 위치 오차이다.

GPS 1과 GPS 3을 이용한 융합 시스템은 GPS 2의 시스템보다 비교적 위치 오차가 작지만, GPS의 순간적인 큰 오차로 인해 그림 10과 같은 굴곡이 나타나게 되었다. 반면에 다중 GPS를 이용한 EKF 융합 시스템은 갱신하는 GPS의 위치 값을 보다 정밀하게 제공함으로써 0.3757 m의 위치 오차가 발생하였다. 실험을 통해 다중 GPS를 이용한 EKF 융합 시스템의 정밀성과 유연한 위치 추정을 검증하였다.

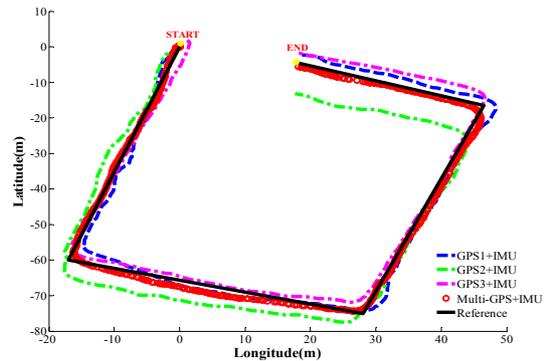


Fig. 10. The EKF convergence result of single GPS and multi-GPS

Table 3. The position error of the single GPS and multi-GPS through the EKF convergence

Sort	Average Position Error(m)
GPS 1+IMU	0.6097
GPS 2+IMU	1.4596
GPS 3+IMU	0.4961
Multi-GPS+IMU	0.3757

6. 결론

본 논문에서는 실외의 정밀한 위치 추정을 위해 EKF를 이용한 다중 GPS와 INS의 융합 시스템을 제안하였고, 실험을 통해 시스템의 우수한 성능을 검증하였다. 일반적으로 GPS/INS 융합 시스템에서 GPS의 위치정보는 INS의 위치를 갱신해주는 역할을 하기 때문에 GPS의 정밀도를 요하게 된다. 따라서 본 논문에서는 저가형 GPS 수신기 3개를 이용하여 수신 안정도에 따라 가중치를 두고 삼각중심법을 통해 보다 정밀한 위치정보를 제공하였다. 또한 연산 속도가 빠르고 구조가 간단한 EKF를 이용하여 다중 GPS와 INS를 융합하였다. 이 시스템의 특징은 메모리 사용량과 계산량을 줄일 수 있고 비교적 저비용으로 정밀 위치 추정을 구현한 것이다. 또한 GPS와 INS만의 결합이기 때문에 무인 자동차나 모든 실외 이동 물체에 적용할 수 있을 것이며, 이동로봇의 실외 주행을 위한 위치 인식 시스템으로 활용될 것이다.

References

- [1] J. H. Lee and 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.
- [2] S. H. Oh, D. H. Hwang, C. S. Park and S. J. Lee, "Attitude Determination GPS/INS Integration System Design Using Triple Difference Technique", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 615-625, July 2012.
- [3] Kai-Wei Chiang and Yun-Wen Huang, "An intelligent navigator for seamless INS/GPS integrated land vehicle navigation applications," *Applied Soft Computing*, pp. 722-733, May 2007.
- [4] Kazunori Ohno, Takashi Tsubouchi, Bunji Shigematsu, Shoichi Maeyama and Shin'ichi Yuta, "Outdoor Navigation of a Mobile Robot between Buildings based on DGPS and Odometry Data Fusion," *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, vol. 2, pp. 1978-1984, September 2003.
- [5] H. C. Moon, Y. J. Son and J. H. Kim, "The Development of Driving Algorithm for an Unmanned Vehicle with Multiple-GPS's," *Robotics and Systems*, vol. 14, no. 1, January 2008.
- [6] Roozbeh Mottaghi, Michael Kaess, Ananth Ranganathan, Richard Roberts and Frank Dellaert, "Place Recognition-based Fixed-Lag Smoothing for Environments with Unreliable GPS," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1862-1867, May 2008.
- [7] J. M. Kim, Y. T. Kim and S. S. Kim, "An accurate localization for mobile robot using extended Kalman filter and sensor fusion," *IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, pp. 2928-2933, June 2008.
- [8] Jun Zhou and Hamidreza Bolandhemmat, "Integrated INS/GPS System for an Autonomous Mobile Vehicle," *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 694-699, August 2007.
- [9] Dongliang Huang, "Expectation Maximization Based GPS/INS Integration for Land-Vehicle Navigation," *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 43, no. 3 July 2007.
- [10] K. G. Kim, C. H. Park, M. J. Yu and Y. B. Park, "A Performance Comparison of Extended and Unscented Kalman Filter for INS/GPS Tightly Coupled Approach", *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 12, no. 8, August 2006.
- [11] Yunchun Yang and Jay A. Farrell, "Magnetometer and Differential Carrier Phase GPS-Aided INS for Advanced Vehicle Control," *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, vol. 19, no. 2, April 2003.



최승환

2012 동아대학교 전자공학과
(공학사)

2012~현재 부산대학교 로봇관
련협동과정 석사 과정 재
학 중

관심분야 : 지능로봇시스템, 센서융합, Navigation and
Localization 시스템



김 윤 기

2011 경남과학기술대학교
메카트로닉스공학과
(공학사)

2013 부산대학교 전자자기
공학과 (공학석사)

2013~현재 부산대학교 전자전기공학과 박사과정
관심분야 : 지능로봇제어, SLAM, Navigation and
Localization 시스템



김 현 우

2011 부경대학교 전자정보통신공학부(공학사)

2013 부산대학교 전자자기공학과 (공학석사)

2013~현재 부산대학교 전자전기공학과 박사과정
관심분야 : 지능제어시스템, Navigation and Localization
시스템, SLAM



황 요 섭

2010 경남과학기술대학교
메카트로닉스공학과
(공학사)

2012 부산대학교 로봇관련협
동과정 (공학석사)

2012~현재 부산대학교 전자전기공학과 박사과정
관심분야 : Haptics, 이족로봇제어, Navigation and
Localization 시스템



이 장 명

1980 서울대학교 전자공학과
(공학사)

1982 서울대학교 전자공학과
(공학석사)

1990 미국 남가주 대학교
(USC)(공학박사)

1992~현재 부산대학교 전자전기공학부 교수
관심분야 : 지능로봇시스템 제어, 특수환경 Navigation
and Localization 시스템