

확장 칼만 필터와 경로계획을 이용한 쿼드로터 실외 위치 추정

Outdoor Localization for a Quad-rotor using Extended Kalman Filter and Path Planning

김기정, 이동주, 김윤기, 이장명*
(Ki-Jung Kim¹, Dong-ju Lee², Yoon-Ki Kim², and Jang-Myung Lee^{2*})

¹Department Interdisciplinary Program in Robotics, Pusan National University

²Department of Electrical Engineering, Pusan National University

Abstract: This paper proposes a new technique that produces improved local information using a low-cost GPS/INS system combined with Extended Kalman Filter and Path Planning when a Quad-rotor flies. In the research, a low-cost GPS is combined with INS by Extended Kalman Filter to improve local information. However, this system has disadvantages in that estimation accuracy is getting worsens when the Quad-rotor flies through the air in a curve and precision of location information is influenced by performance of the used GPS. An algorithm based on Path Planning is adopted to deal with these weaknesses. When the Quad-rotor flies outdoors, a short moving path can be predicted because all short moving paths of quad-rotor can be assumed to be straight. Path planning is used to make the short moving path and determine the closest local information of data of the GPS/INS system to location determined by path planning. Through the foregoing process, improved local data is obtained when the quad-rotor flies, and the performance of the proposed system is verified from various outdoor experiments.

Keywords: path planning, cell divide algorithm, extended Kalman filter, quad-rotor, GPS, INS, localization

I. 서론

오늘날 재난감시, 인명구조, 환경감시, 교통체증 감시, 군사정찰 등을 효과적으로 수행할 수 있는 무인비행로봇(UAV)에 대한 관심이 높아져 왔다[1]. 그 중 제작비용이 적고 소형인 쿼드로터는 4개의 로터를 이용하여 비행하는 회전익 형 무인비행로봇으로써, 수직이착륙, 정지비행, 전 방향 이동이 가능한 장점을 가지고 있기 때문에 음식 서빙, 물건 배달, 조깅 도우미 등 실생활에 밀접한 곳에서 많이 활용되고 있으며 연구 또한 활발하게 진행이 되고 있다[2,3]

쿼드로터가 다양한 임무를 수행 하기 위해서는 자율주행이 매우 중요한데, 쿼드로터의 자율주행은 정밀한 자기 위치인식을 해야만 가능하고, 주로 외부에서 임무를 수행하기 때문에, 정밀한 실외위치추정 항법 기술이 사용되어야 한다[4].

이러한 실외위치추정 항법을 위하여 최근 관성항법 시스템(inertial navigation system) 과 GPS를 결합하여 정밀 위치추정을 하는 연구가 활발히 진행되고 있는데, INS는 상대위치를 추정할 수 있는 가속도, 자이로, 지자기 센서 등으로 구성되어 있으며 짧은 시간 동안 정밀한 위치 정보를 제공하지만 센서 자체의 특성 오차와 외부환경에 의한 외란으로 장시간 사용할 경우 누적 오차가 발생하게 된다. GPS는 짧은 시간에 대한 위치 오차가 크고, GPS 신호가 단절되는 음영지역에서

는 사용하기 어려운 단점이 있다. 하지만 위성으로부터 실시간으로 계속 신호를 수신 받아 위치를 보정하기 때문에 누적 오차가 생기지 않아서 장시간의 안정적인 절대위치 정보를 제공하고, GPS/INS융합 위치추정 시스템을 구축하기 위해, GPS는 칼만필터, 확장칼만 필터, 파티클 필터 등으로 INS와 결합되어 서로의 특성들이 보완 되어진다[5-8].

본 논문에서는 계산량이 비교적 적으며 비선형 시스템에서 상태 추정이 가능한 확장칼만필터를 이용해 저가형 GPS와 INS를 융합함으로써 위치 정밀도를 높인다. 하지만 확장칼만필터로 융합된 GPS/INS 시스템은 GPS의 성능에 영향을 많이 받기 때문에 위치추정 성능향상에 한계를 가진다. 이 한계를 극복하기 위해 셀 분할 할 알고리즘과 자이로 센서의 방향 정보를 이용하여 경로를 계획한 후 경로의 일정한 범위 안에 들어오는 실제 값에 근접한 GPS/INS 시스템 위치정보만을 선택함으로써 위치의 정밀도를 더욱 향상 시킨다.

논문은 다음과 같이 구성된다. II 장에서 시스템 구성 및 하드웨어에 대한 소개를 하고, III 장에서 GPS/INS 융합과 경로 계획 알고리즘을 서술한다. IV 장에서 본 논문에서 제시하는 위치 추정의 성능을 실외에서 실험을 통하여 검증하고, 마지막으로 V 장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 시스템 구성 및 하드웨어

논문에서 제안된 시스템의 구성은 그림 1과 같다. 시스템에서 제어를 위해 사용한 MCU (Micro Controller Unit)은 Atmel사에서 만든 ATMEGA 2560 이다. 센서는 3축 자이로와 3축 가속도 센서가 결합된 MPU-6050, 3축 지자기 센서인 HMC - 5883, 압력센서인 BMP 085 그리고 위치인식을 위해 GPS 수신기인 MTK 3329를 사용하였으며, 쿼드로터의 추력을 발생시키기 위해 RoHS 사의 ESC (Electrical Speed Controller)와

* Corresponding Author

Manuscript received February 10, 2014 / revised May 30, 2014 / accepted July 23, 2014

김기정: 부산대학교 로봇협동과정(kijung7379@pusan.ac.kr)

이동주, 김윤기, 이장명: 부산대학교 전자전기공학과

(dongju7379@pusan.ac.kr/mecha8404@pusan.ac.kr/jmlee@pusan.ac.kr)

* 이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(NRF-2013R1A1A2021174).

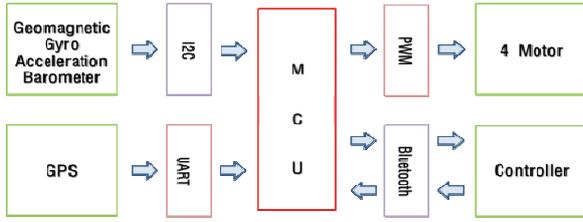


그림 1. 시스템 블록 다이어그램.
Fig. 1. System Block Diagram.

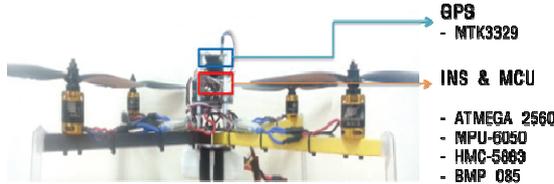


그림 2. 전체 쿼드콥터 구성.
Fig. 2. Total Quad-rotor configuration.

Brushless Motor를 사용하였다.

쿼드콥터의 프로펠러는 기체의 회전을 막기 위해 서로의 회전력을 상쇄시키는 방향으로 회전하면서 추력을 얻을 수 있도록 설계를 하였고, 로봇에 이동과 복귀 명령을 내리기 위하여 RoHS에서 만든 RN-42 Bluetooth를 사용하였다.

그림 2는 시스템의 하드웨어 구성을 나타낸다. GPS 는 데이터를 최대한 정확하게 받기 위해 쿼드콥터의 상단에 위치하도록 설계하였고, 그 아래에 MCU와 IMU 를 배치하였다.

III. GPS/INS 융합 및 셸 분할

1. GPS/INS 융합

INS는 가속도 데이터를 2번 적분함으로써 항체의 속도와 기준위치로부터의 위치 변화를 연속적으로 제공하기 때문에 동적 특성이 좋지만 시간이 지날수록 오차가 누적되는 단점이 있다. 그리고 GPS는 실외에서 항체의 위치정보를 제공하지만 지형에 따라 오차가 심한 단점을 가진다[9,10]. GPS와 INS의 단점을 보완하도록 각각의 데이터를 융합하기 위해 칼만 필터(Kalman filter), 확장칼만필터(EKF: Extended Kalman Filter) 등을 사용하는데, 칼만 필터는 선형시스템에 사용하고, 확장 칼만 필터는 비선형 시스템에 사용한다[11]. 쿼드콥터의 위치와 상태는 비선형적인 요소를 포함하고 있기 때문에, 연구에서는 확장 칼만 필터를 이용하여 GPS와 INS를 융합 한다. 확장 칼만 필터를 이용한 위치 추정은 다음과 같이 수행 되어 진다.

항체 좌표계와 항법 좌표계는 다르기 때문에 자이로 센서에서 얻은 각속도를 $\tilde{\omega}_{ib}^b$ 이용해 쿼터니언으로 표현된 자세 \hat{q} 를 구한 뒤, 이 자세로 항체 좌표계를 항법 좌표계로 변환시켜주는 변환행렬 \hat{R}_n^b 을 구한다.

$$\dot{\hat{q}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\hat{q}_2 & -\hat{q}_3 & -\hat{q}_4 \\ \hat{q}_1 & \hat{q}_4 & -\hat{q}_3 \\ -\hat{q}_4 & \hat{q}_1 & \hat{q}_2 \\ \hat{q}_3 & -\hat{q}_2 & -\hat{q}_1 \end{bmatrix} (\tilde{\omega}_{ib}^b - \mathbf{b}_{gyro}) \quad (1)$$

$$\hat{R}_n^b = \begin{bmatrix} \hat{q}_1^2 + \hat{q}_2^2 - \hat{q}_3^2 - \hat{q}_4^2 & 2(\hat{q}_2\hat{q}_3 - \hat{q}_1\hat{q}_4) & 2(\hat{q}_1\hat{q}_3 + \hat{q}_2\hat{q}_4) \\ 2(\hat{q}_2\hat{q}_3 + \hat{q}_1\hat{q}_4) & \hat{q}_1^2 - \hat{q}_2^2 + \hat{q}_3^2 - \hat{q}_4^2 & 2(\hat{q}_3\hat{q}_4 - \hat{q}_1\hat{q}_2) \\ 2(\hat{q}_2\hat{q}_4 + \hat{q}_1\hat{q}_3) & 2(\hat{q}_1\hat{q}_2 + \hat{q}_3\hat{q}_4) & \hat{q}_1^2 - \hat{q}_2^2 - \hat{q}_3^2 + \hat{q}_4^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

가속도 \hat{a} 를 이중 적분하여 구한 항법 좌표계상의 쿼드콥터 위치 \hat{p} 와 GPS 수신기로부터 얻은 위치의 차를 $\delta\hat{p}^- \equiv \hat{p} - \hat{p}$ 로 정의하고, 식 (3)에 나타나 있듯이, 지자기 센서의 측정 값 \hat{m}^b 에 변환행렬을 곱하여 항법 좌표계의 값 \hat{m}^n 으로 바꾼다.

$$\hat{m}^n = \hat{R}_n^b \hat{m}^b \quad (3)$$

측정 값 \hat{m}^n 과 추정 값 \hat{m}^n 의 차를 $\delta\hat{m}^n$, $\delta\hat{p}^n$ 와 함께 확장칼만필터의 측정치로 사용하여, 위치오차와 자세오차를 추정하는 다음 식과 같은 상태 공간 방정식을 설계한다. 자세와 위치를 구해진 오차를 이용하여 갱신함으로써 보정된 값을 얻을 수 있게 된다.

$$x_k = f(x_{k-1}, k-1) + \omega_{k-1} \quad (4)$$

$$y_k = h(x_k, k) + v_k \quad (5)$$

f 는 상태 전과 함수, h 는 측정 방정식, ω_k 는 시스템 오차, v_k 는 측정 오차, x_k 는 상태값, y_k 는 측정값으로 표현한다. 확장 칼만 필터에 이용되는 상태는 속도오차 δv , 위치 오차 δp , 자세오차 ρ , 가속도와 자이로 센서의 바이어스 오차 δb_{acc} , δb_{gyro} 등 총 5가지 3차원의 오차를 가져 15개의 차원 $x_k = [\delta p^T \delta v^T \delta \rho^T \delta b_{acc}^T \delta b_{gyro}^T]$ 을 가지게 된다. 본 논문에서 사용한 GPS와 INS융합 알고리즘은 그림 3과 같다.

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

$$\varepsilon_N \ \varepsilon_E : \text{tilt errors}, \ \varepsilon_D : \text{heading error})$$

확장칼만필터는 아래수식과 같이 예측과정(6,7)과 측정업데이트 과정(8),(9),(10)으로 나뉘진다.

$$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}, k-1) \quad (6)$$

$$P_k^- = A_{k-1} P_{k-1} A_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (7)$$

$$K_k = P_k^- C^T (C P_k^- C^T + R^n)^{-1} \quad (8)$$

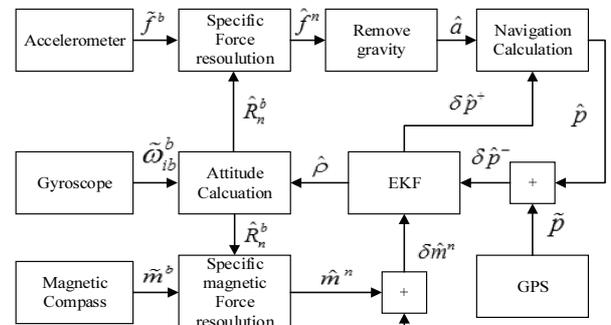


그림 3. GPS와 INS의 융합 알고리즘.
Fig. 3. Fusion algorithm of GPS and INS.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k + K_k(z_k - C\hat{x}_k) \tag{9}$$

$$P_k = (I - K_k C)P_k^- \tag{10}$$

식에서 A 와 C 는 상태방정식 및 측정방정식의 자코비안, \hat{x}_k 는 상태의 예측평균, P_k 는 공분산, K_k 는 Kalman gain을 나타낸다. 세부사항은 참고문헌[12]를 통해 구성할 수 있다.

2. 경로 계획 알고리즘

경로계획은 셀 분할 알고리즘과 자이로 정보를 이용하여 수행 된다. 셀 분할 알고리즘은 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 최적 경로를 탐색하는데 셀을 나누는 방식에 따라 근사 셀 분할과 완전 셀 분할 방식으로 나눌 수 있다. 완전 셀 분할 방식은 분할한 셀들의 합집합이 정확히 전체 자유공간이 되는 조건을 만족해야 한다[13,14]. 높은 상공에서 주행하는 쿼드로터는 땅에서 주행하는 이동 로봇과는 달리 장애물에 대한 제약을 받지 않기 때문에 본 논문에서는 완전 셀 분할 방식을 사용한다[15,16]. 그림 4는 쿼드로터의 셀로 분할된 이동경로를 보여준다. 쿼드로터가 있는 공간을 하나의 바둑판이라고 간주하고, 쿼드로터가 이동하는 궤적이 곡선일 경우에도 곡선을 짧은 직선의 집합으로 생각함으로써, 아래의 하늘색 영역과 같은 셀로 이루어진 경로를 생성할 수 있게 된다.

논문에서 제안된 셀 분할 알고리즘을 통한 위치결정 순서는 그림 5와 같다.

쿼드로터의 경로를 계산하기 위해 현재 방위각을 이용하여 GPS 센서에서 얻은 현재 위도 X_b 와 경도 Y_b 를 기준으로 하여 식 (11)과 같은 직선의 방정식을 생성한다. 식에서 X 는 위도의 거리 값, Y 는 경도의 거리 값 그리고 R 은 방위각을 나타낸다.

$$Y = \tan(R) \times X \tag{11}$$

이어서 위의 식의 X 에 아래의 식 (12)가 성립할 때까지 값을 대입하여 Y 의 값을 계산한 뒤 X, Y 값을 10개의 셀로 분할하여 각각의 중심점을 구한다. 구해진 값은 X_b, Y_b 에 더해지고

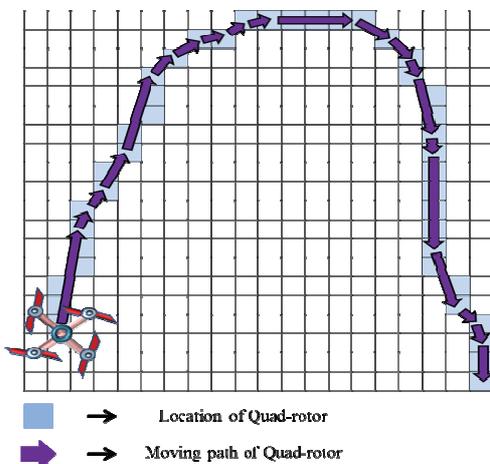


그림 4. 쿼드로터 이동 경로상의 셀 분할.

Fig. 4. Cell division in the moving route of quad-rotor.

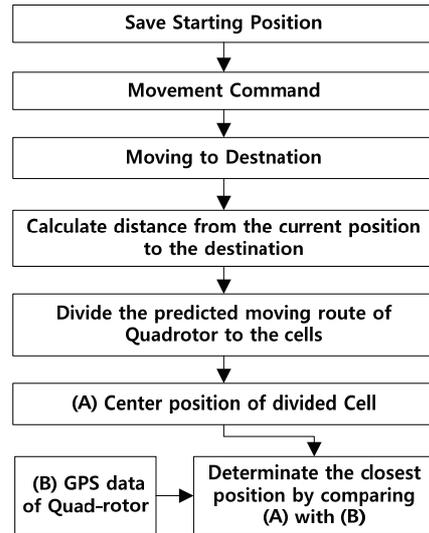


그림 5. 셀 분할 알고리즘의 블록 다이어그램.

Fig. 5. Block diagram of cell divide algorithm.

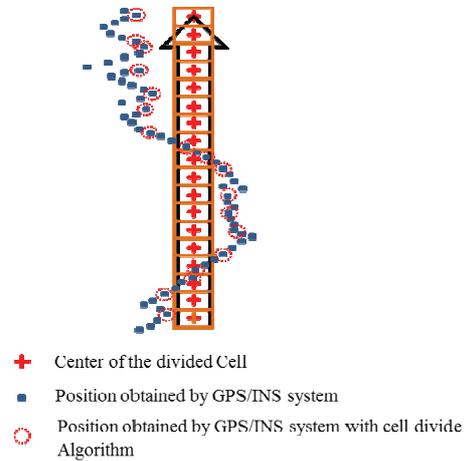


그림 6. 셀 분할 알고리즘.

Fig. 6. Position determined by cell divide algorithm and rotational transform.

[17], 이 값들은 그림 6에서 GPS/INS 융합 시스템의 위치정보와 비교하는데 사용된다.

$$10(m) \leq \sqrt{X^2 + Y^2} \tag{12}$$

쿼드로터의 곡선 주행 시 변화하는 방위각 정보와 함께 10m의 직선경로계획을 지속적으로 수행함으로써 곡선 주행 시에도 진행 경로를 계획 할 수 있게 된다.

중심점 값과 더해진 좌표들은 GPS/INS 융합 위치정보와 비교하여 점과 점 사이의 거리공식을 사용함으로써 실제 위치에 가장 근접한 위치가 찾아진다.

IV. 실험

본 논문에서는 쿼드로터의 실외 위치 추정을 하기 위해 확장칼만필터를 이용하여 비교적 큰 오차를 가지는 저가형 GPS 위치 정보와 누적 오차를 가지는 INS 위치정보를 결합하였다. 그러나 확장칼만필터의 성능이 비선형성이 강한 커

브에서 추정 성능이 좋지 못하고, GPS/INS 융합 시스템 또한 GPS 성능에 영향을 많이 받을 뿐만 아니라 위치추정 정보에 상당한 노이즈를 가지는 단점이 있다. 이 문제를 보완하기 위하여 경로 계획 알고리즘을 적용하여 위치 추정 성능을 향상 시키는 시스템을 구성 한다.

제안된 시스템의 성능을 평가하기 위하여 본교의 대 운동장에서 쿼드콥터를 직선경로로 50m, 곡선경로로 110m 비행하여 위치추정을 실행 하였고, 기준 위치 정보는 Google earth 를 이용하여 구하였다. 쿼드콥터에 사용된 센서 정보는 아래와 같고, 센서의 bias 및 보상 법은 참고문헌[18]을 보면 알 수 있다.

이동하는 쿼드콥터의 위치 정보는 블루투스 통신을 이용하여 실시간으로 전송 받았고, 전송된 데이터를 이용하여 Laptop을 이용하여 계산 하였다. 계산된 위치정보는 LAB VIEW 프로그램을 통해 확인 했으며 지상에서 200초 동안 초기정렬을 수행한후 궤적을 비행 하였다.

표 1. 사용된 센서 정보.

Table 1. Used Sensor specification.

Sort	Noise	Bias
Accelerometer	8mg	0.2mg
Magnetic sensor	1.15mgauss	4mgauss
Gyro sensor	0.8deg/s	0.009deg/s



그림 7. 실험 환경.

Fig. 7. The experimental environment.

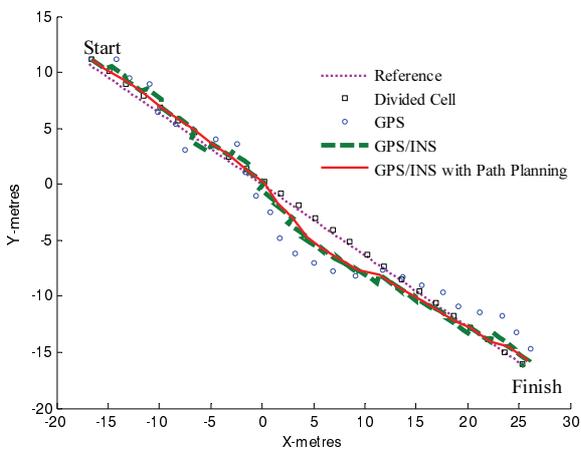


그림 8. 직선경로에서 시스템의 위치추정 성능 비교.

Fig. 8. Location Estimation Performance Comparison of Systems in the straight path.

그림 8은 50m의 직선경로에서 수행한 쿼드콥터의 위치추정 결과를 보여준다. 그래프에서 GPS, GPS/INS 그리고 경로 계획 기반의 알고리즘이 적용된 GPS/INS 시스템이 각각 나타나 있는데, GPS 정보의 위치오차가 클 때 GPS/INS 시스템이 가지는 위치정보의 편차를 경로 계획 기반의 알고리즘을 적용하여 줄임으로써 위치 정보의 안정성과 정밀함을 높여 주는 것을 볼 수 있다.

그림 9는 확장칼만필터를 이용하여 GPS와 INS를 융합한 시스템이 쿼드콥터의 위치를 추정한 그래프이다. 이 그래프는 기준궤적, 수식으로 계산한 분할된 셀의 궤적, 그리고 GPS와 GPS/INS 시스템이 제공하는 위치정보를 나타낸다. 여기서 수식으로 계산한 분할된 셀의 궤적은 기준궤적과 유사한 것을 볼 수 있고, GPS의 위치정보와 GPS/INS 시스템이 제공하는 위치정보를 비교하면 GPS/INS 시스템의 위치추정 성능이 더욱 뛰어남을 알 수 있다.

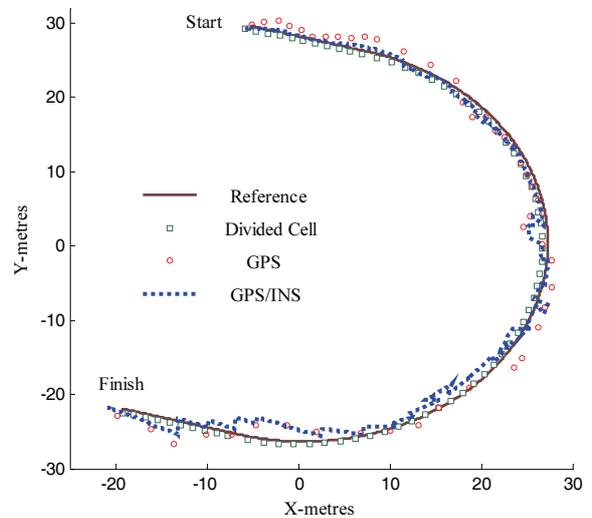


그림 9. 확장칼만필터에의해 결합된 GPS/INS 시스템.

Fig. 9. GPS/INS system combined by Extended Kalman Filter.

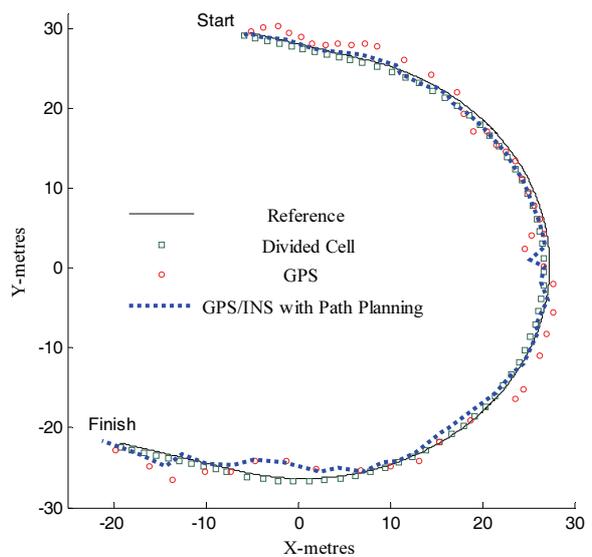


그림 10. 경로 계획 기반 알고리즘이 적용된 GPS/INS 시스템.

Fig. 10. GPS/INS System with Path Planning.

그림 10은 본 논문에서 제안한 확장칼만필터로 융합한 GPS/INS 시스템이 제공하는 위치 정보에 경로계획기반의 알고리즘을 적용시켜서 얻어진 쿼드로터의 궤적을 나타낸다.

그림 11은 제안된 시스템과 확장칼만필터를 이용한 GPS/INS 융합시스템의 위치 정보를 기준 궤적과 비교하여 각각의 위치추정 성능을 평가하였다.

그림 11에서 경로 계획기반의 알고리즘을 통하여 확장칼만필터로 결합된 GPS/INS 융합 시스템의 위치정보 중 실제 위치에 근접한 것들만 선택함으로써 위치추정의 정밀도가 더욱 향상되는 것을 볼 수 있다. 그림 12와 표 2는 그에 따른 평균 위치오차를 보여준다.

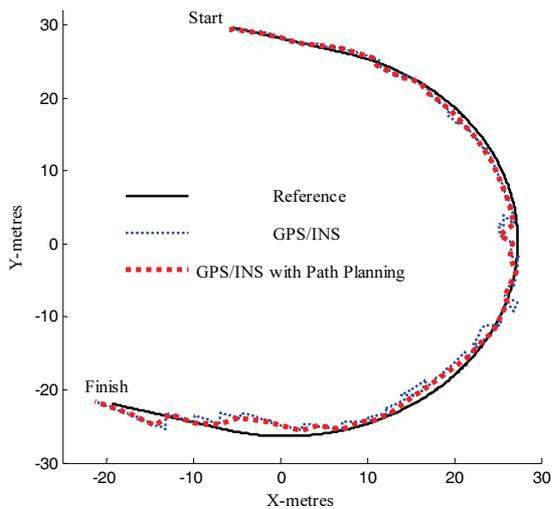


그림 11. GPS/INS 시스템과 경로계획 기반의 알고리즘이 적용된 GPS/INS의 성능비교.

Fig. 11. Performance comparison between GPS/INS System and GPS/INS with Path Planning.

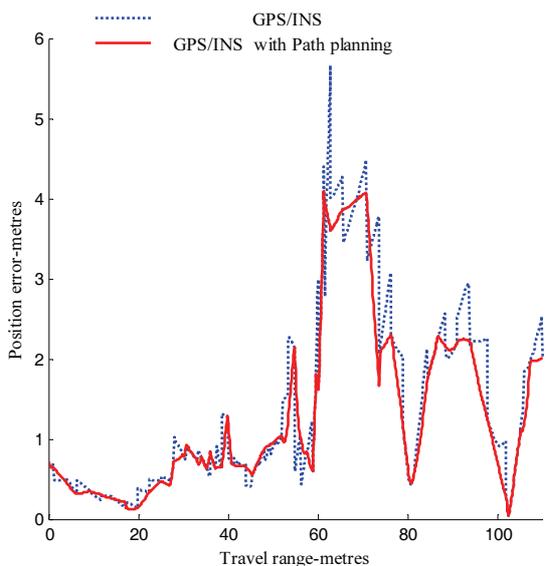


그림 12. GPS/INS 시스템과 경로기반 알고리즘이 적용된 GPS/INS의 위치 오차.

Fig. 12. Position error of GPS/INS and GPS/INS with Path Planning.

표 2. GPS와 GPS/INS 그리고 제안된 시스템의 위치오차.

Table 2. Location error of GPS, GPS/INS and proposed system.

Sort	Average Local Error(m)
GPS	2.7123
GPS/INS	1.6419
GPS/INS with Path planning	1.4281

경로계획 기반의 알고리즘이 적용된 GPS/INS 위치정보와 적용되지 않은 GPS/INS 위치정보의 오차 결과로부터, 경로 계획 기반 알고리즘이 적용된 시스템이 적용되지 않은 시스템보다 위치추정의 편차가 작아서 안정적이고 정밀한 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문은 실외에서 쿼드로터의 임무수행 시 자율주행을 할 수 있게 만드는 위치 추정을 수행하기 위해 확장칼만필터로 융합된 GPS/INS 시스템에 경로 계획 기반의 알고리즘을 적용함으로써 GPS/INS 시스템이 가지는 오차를 줄이는 기술을 제안하였고, 제안된 시스템은 실험을 통해 일반적인 GPS 시스템 그리고 확장칼만필터로 융합된 GPS/INS 시스템과 성능을 비교하여 성능의 우수성을 검증하였다. 현재 연구되고 있는 위치인식 분야 중 GPS/INS 융합 시스템의 위치 정밀도는 기본적으로 GPS가 제공하는 위치의 신뢰도가 높아야 하는데, 일반적으로 많이 사용하는 저가형 GPS의 경우 위치오차가 많이 생기기 때문에 필터를 이용하여 시스템을 구성해도 위치추정에 있어서 한계를 가지게 된다. 본 논문에서 제안된 확장칼만필터와 경로계획을 이용한 위치추정을 쿼드로터의 주행 시 수행 한다면, 저가형 GPS와 INS가 결합된 융합 시스템이 제공하는 위치정보를 일정 시간 구간 동안 저장하여 경로계획에 기반한 셀 분할 알고리즘으로 계산된 위치에 근접한 것만 선택하여 위치를 나타냄으로써 GPS/INS 융합시스템이 가지는 불 필요한 위치오차가 제거되어 쿼드로터의 위치 오차가 줄어들게 된다. 논문에서 제시하는 시스템에서 사용하는 확장칼만필터와 경로계획은 많은 계산량을 필요로 하지 않기 때문에 효율적이고, 저가형 GPS와 INS를 사용하기 때문에 다른 위치 추정 시스템보다 적은 비용으로 정밀한 위치 추정을 할 수 있다. 앞으로 연구에서는 외란이 있을 때도 정밀하게 위치 추정을 할 수 있도록 하는 시스템을 과제로 남겨 둔다.

REFERENCES

- [1] M. G. Kim and 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 and D. H. Edwards, "Designing a spatially aware and autonomous quadcopter," *IEEE Systems. Inform. Enging. Design. Symposium, Charlottesville, VA, USA*, pp. 213-218, Apr. 2013.
- [3] D.-J. Lee, B. J. Tippetts, and K. D. Lillywhite, "Vision aided stabilization and the development of a quad-rotor micro UAV," *Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2007. CIRA 2007. International Symposium, Jacksonville, FL, USA*, pp. 143-148, Jun. 2007.

- [4] M. Garzón, J. Valente, and 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.
- [5] S. Kim, C. Roh, S. Kang, and M. Park, "Outdoor navigation of a mobile robot using differential GPS and curb detection," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007.
- [6] G. T. Schmidt, "INS/GPS technology trends," NATO Research and Technology Organization, May 2009.
- [7] J. H. Seung, D. J. Lee, and J. Y. Ryu, "Precise positioning algorithm development for quadrotor flying robots using dual extended Kalman filter," *Journal of Institute of Control, Robotics and System (in Korean)*, vol. 19, no. 2, pp. 183-163, 2013.
- [8] D. J. Jwo, C. F. Yang, C. H. Chuang, and 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.
- [9] 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, Nov. 2012.
- [10] 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 (in Korean)*, vol. 12, no. 8, pp. 780-788 2006.
- [11] S. H. Choi and 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.
- [12] J. W. Seo, H. H. Lee, J. G. Lee, and C. G. Park, "Lever arm compensation for GPS/INS/odometer integrated system," *IJCAS*, vol. 4, no. 2, pp. 247-254, Apr. 2006.
- [13] J. T. Kim and 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.
- [14] J. W. Kang and S. J. Kim, "Path planning for complete and efficient coverage operation of mobile robots," *International Conference on Mechatronics and Automation*, Harbin, China, Aug. 2007.
- [15] J. Y. Ahn and K. A. Yu, "Expansion of motion planning algorithms by cell-decomposition," *The Korean Institute of Information Scientists and Engineers*, vol. 30, no. 1, pp. 887-889, 2003.
- [16] S. Hert, S. Tiwari, and V. Lumelsky, "A terrain-covering algorithm for an AUV," *Autonomous Robots*, vol. 3, pp. 91-119, 1996.
- [17] M. Rengarajan and 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, Apr. 2013.
- [18] P. Aggarwal, Z. Syed, and A. Noureldin, *Mems-Based Integrated Navigation, GNSS Technology and Application*, Artech House, 2010.



김기정

2013년 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2013년 부산대학교 로봇협동과정 입학(공학석사). 현재 동 대학원 로봇협동과정 석사 재학 중. 관심분야는 머니플레이터, Navigation and Localization 시스템, Quad rotor.



이동주

2013년 부경대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2013년 부산대학교 전자전기공학 과입학(공학석사). 현재 동 대학원 전자전기공학 석사과정 재학 중. 관심분야는 Map building, 실내 위치 인식, SLAM, 이족 로봇.



김윤기

2011년 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과(공학사). 2013년 부산대학교 전자전기공학과(공학석사). 현재 동 대학원 전자전기공학 박사과정 재학 중. 관심분야는 이족로봇제어, Navigation and Localization 시스템 Haptics.



이장명

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1982년 동 대학원 공학석사. 1990년 UCS (미국 남가주대학교) 공학박사. 1992년~현재 부산대학교 전자전기공학과 교수. 관심분야는 지능로봇시스템 설계 및 제어, 마이크로프로세서 응용, 특수환경 Navigation and Localization.