

EKF-SLAM을 이용한 쿼드콥터의 위치 추정

A Position Estimation of Quadcopter Using EKF-SLAM

조영완*, 황재영*, 이희진***

Youngwan Cho*, Jaeyoung Hwang*, Heejin Lee***

Abstract

In this paper, a method for estimating the location of a quadcopter is proposed by applying an EKF-SLAM algorithm to its flight control, to autonomously control the flight of an unmanned quadcopter. The usefulness of this method is validated through simulations. For autonomously flying the unmanned quadcopter, an algorithm is required to estimate its accurate location, and various approaches exist for this. Among them, SLAM, which has seldom been applied to the quadcopter flight control, was applied in this study to simulate a system that estimates flight trajectories of the quadcopter.

요약

본 논문에서는 무인 쿼드콥터의 자율 비행 제어를 위해 기반이 되는 위치 인식을 위하여 EKF-SLAM 기반 위치 추정 알고리즘을 제안하고 이를 쿼드콥터의 궤적 추종 제어에 적용하여 시뮬레이션을 통해 위치 추정의 성능과 이를 통한 궤적 추종의 결과를 검증하였다. 쿼드콥터의 EKF-SLAM 기반 위치 추정을 위해 쿼드콥터 비행 동역학 모델을 수립하고 이를 기반으로 EKF-SLAM의 운동 모델 및 관측 모델을 유도하였으며 궤적 추종을 위한 쿼드콥터의 수평제어와 자세제어를 위해 PD 제어를 적용하였다. 본 논문에서는 다양한 궤적 및 랜드마크 환경에 대해 EKF-SLAM 기반 위치 추정 성능을 시뮬레이션함으로써 EKF-SLAM을 이용한 위치 추정 기반 궤적 추종 제어의 성능을 확인하였다.

Key words : Extended Kalman Filter, EKF-SLAM, Quadcopter, Position estimation, Flight control

* Dept. of Computer Engineering, Seokyeong University

** Dept. of Electrical, Electronic and Control Engineering, Hankyong National University

★ Corresponding author

e-mail : lhjin@hknu.ac.kr, 031-670-5294

※ Acknowledgment

This research was supported by Seokyeong University in 2014.

Manuscript received Nov. 13, 2015; revised Dec. 8, 2015; accepted Dec 8, 2015

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 서비스용 로봇과 안전을 위한 극한 작업용, 의료용 로봇 관련 시장이 높은 성장률을 유지하고 있으며, 특히 무인 비행체 분야의 연구가 활발해지고 응용의 필요성이 강하게 대두되고 있다. 이러한 상황에서 자율적인 움직임이 요구되는 작업에서 4개의 로터에 의해 구동되는 쿼드콥터가 비행의 안정성 및 제어의 상대적 용이성 때문에 많은 주목을 받고 연구되고 있다.[1] 군사목적 또는 민간목적으로 쿼드콥터를 자율적으로 운

용하기 위해서는 제어기술이 필수적이며 이를 위해 쿼드콥터의 자기위치인식이 선행적으로 필요하다. 쿼드콥터를 비롯해 무인비행체의 자기위치인식을 위해 GPS(Gloval Positioning System)와 관성항법센서 정보를 융합하여 위치를 추정하는 방법이[2][3] 주로 사용되고 있다. 하지만 이러한 접근 방법은 GPS 잡음과 관성센서 정보의 누적 오차를 피해 갈 수 없다. 따라서 위치정보에 기반을 둔 쿼드콥터의 서비스를 제공하기 위해서는 쿼드콥터의 목적지와 쿼드콥터의 상대적 정보를 이용하여 목적지와 쿼드콥터의 위치를 추정하는 시스템이 필요하다. 본 논문에서는 쿼드콥터의 위치를 추정하기 위한 기술로써 SLAM(Simultaneous Localization And Mapp)을 이용한 방법을 제안한다. SLAM은 특정 환경에서 로봇이 위치 기반 작업을 하기 위해서 로봇이 지도를 생성하고 동시에 생성된 지도에서 로봇의 위치를 추정하는 알고리즘이다.[4] SLAM 기술은 인간이 직접적으로 또는 신속히 접근이 불가능한 환경에 응용이 될 수 있는 알고리즘이다. 군사적으로는 정찰 또는 작전을 위한 무인항공기 개발 기술에 응용이 될 수 있으며 극한 환경이나 인간이 접근하기 힘든 곳을 탐사하기 위한 로봇을 개발할 때도 SLAM 이 응용될 수 있다.[5] SLAM은 다양한 추정 알고리즘들을 이용하여 연구되었다. 대표적으로 파티클 필터[6]와 칼만 필터[7][8], BA(Bundle Adjustment)[9], 그래프기반[10] 방법 등이 있다. 국내에서는 SLAM 알고리즘이 모바일 로봇에 적용된 경우는 많았지만 상대적으로 쿼드콥터에 적용된 사례는 찾기가 쉽지 않으며 외국에서는 비전 센서를 이용한 그래픽 기반의 SLAM 알고리즘을 구현한 사례가 있기는 하나 [11] SLAM 알고리즘 보다는 센서정보를 효율적으로 처리하는 방식에 더욱 집중하여 연구가 되고 있는 추세이다. 따라서 본 논문에서는 쿼드콥터의 자율비행 및 자기위치추정을 위해 쿼드콥터의 동역학 모델을 바탕으로 쿼드콥터에 SLAM을 적용하기 위한 운동 및 관측모델을 제안하고 그 성능을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

II. 쿼드콥터의 동역학 모델

1. 추력 모델

쿼드콥터에 장착된 4개의 모터에서 발생하는 추력 T 는 W.J.M. Rankine의 모멘텀 이론과 모터의 역기전력상수 및 토크비례상수를 이용하여 다음 식(1)과 같이 모델링 할 수 있다. [12]

$$T = \left(\frac{K_v K_t \sqrt{2\rho A}}{K_t} \omega \right)^2 = k\omega^2 \quad (1)$$

여기서, K_v 는 역기전력 상수, K_t 는 전력 토크비례 상수, K_t 는 외형 토크비례 상수를 나타내고 A 는 프로펠러의 회전 시 생성되는 디스크의 면적, ρ 는 유체의 밀도, ω 는 모터의 회전속도를 나타낸다.

식(1)의 추력과 모터의 회전속도에 관한 관계식으로부터 4개의 모터의 추력을 합하면 최종적으로 쿼드콥터 전체의 추력 T_B 를 구할 수 있다.

$$T_B = \sum_{i=1}^4 T_i = k \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum_{i=1}^4 \omega_i^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2. 자세토크 모델

프로펠러가 쿼드콥터의 수평 방향으로 이동하며 발생하는 마찰항력은 다음 식(3)과 같다.

$$\tau_D = \frac{1}{2} R \rho C_D A v^2 = \frac{1}{2} R \rho C_D A (\omega R)^2 = b\omega^2 \quad (3)$$

여기서 τ_D 는 yaw축 토크, R 은 프로펠러의 반경, C_D 는 표면과 유체와의 관계 상수, ω 는 프로펠러의 각속도를 나타낸다.

식(3)에서 유도된 각 축의 마찰항력으로부터 프로펠러 회전에 따른 yaw(ψ)축 자세 토크는 4개의 모터에 관해 회전 방향을 고려하여 다음 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_\psi = (-1)^{i+1} b\omega_i^2 \quad (4)$$

roll축과 pitch 축의 자세 토크는 임의로 두 개의 모터 $i=1$ 와 $i=3$ 을 roll축으로 둬으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_\phi = \sum r \times T = L(k\omega_1^2 - k\omega_3^2) = Lk(\omega_1^2 - \omega_3^2) \quad (5)$$

$$\tau_\theta = Lk(\omega_2^2 - \omega_4^2) \quad (6)$$

여기서 L 은 프로펠러 중심 간의 거리이며 k 는 앞서 구했던 추력과 각속도의 상관관계수이다. 이제 전체 기체 좌표에 관한 자세 토크를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\tau_B = \begin{bmatrix} Lk(\omega_1^2 - \omega_3^2) \\ Lk(\omega_2^2 - \omega_4^2) \\ b(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

3. 운동방정식

관성좌표계에서 쿼드콥터의 가속도는 추력과 중력에 의해서 발생되며 오일러각을 파라미터로 하는 회전 행렬 R을 이용하여 쿼드콥터의 기체 좌표계에서 계산된 추력이 관성좌표계에서 어떻게 작용하는지 알 수 있다

$$m\ddot{x} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} + RT_B + F_D \quad (8)$$

\vec{x} 는 쿼드콥터의 위치정보를 담고 있는 벡터이다. g 는 중력가속도, F_D 공기 마찰에 의한 항력이며 T_B 는 4개의 쿼드콥터 모터로부터 발생하는 전체 추력이다. 이 운동방정식을 이용하면 쿼드콥터 자세에 의해서 결정되는 회전행렬 R과 4개의 모터로부터 발생하는 추력을 이용하여 관성좌표계에서 쿼드콥터가 어떻게 이동할지 알 수 있다. 강체의 회전운동에 관한 오일러 방정식을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I\dot{\omega} + \omega \times (I\omega) = \tau \quad (9)$$

ω 는 각속도이며 I는 관성모멘트행렬이다. 그리고 τ 는 자세를 결정하는 외부 토크이다. 이 수식을 다시 풀어 쓰면 다음과 같다.

$$\dot{\omega} = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} = I^{-1}(\tau_B - \omega \times (I\omega)) \quad (10)$$

본 논문에서는 쿼드콥터를 두 얇은 봉을 교차시키고 봉의 양 끝에 각각 4개의 모터를 위치시키도록 설계하여 선대칭적(axisymmetric)이기 때문에 관성 모멘트는 식 (11)과 같고,

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (11)$$

기체좌표계에서의 회전 방정식은 식 (12)와 같다.

$$\dot{\omega} = \begin{bmatrix} \tau_\phi I_{xx}^{-1} \\ \tau_\theta I_{yy}^{-1} \\ \tau_\psi I_{zz}^{-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \omega_y \omega_z \\ \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \omega_x \omega_z \\ \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \omega_x \omega_y \end{bmatrix} \quad (12)$$

III. EKF-SLAM을 통한 위치 추정

쿼드콥터에 EKF-SLAM을 적용하기에 위해 본 논문에서 제시하는 운동모델과 관측모델은 다음과 같다.

1. 운동모델

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{V}_x \\ \dot{V}_y \\ \dot{V}_z \\ \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \\ p_1 \\ \vdots \\ p_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ \frac{1}{m} \sin\theta \sin\psi T_b - \frac{1}{m} K_d V_x \\ -\frac{1}{m} \cos\psi \sin\theta T_b - \frac{1}{m} K_d V_y \\ \frac{1}{m} \cos\theta T_b - \frac{1}{m} K_d V_z - g \\ \frac{\tau_\phi}{I_{xx}} + \frac{(I_{yy} - I_{zz})}{I_{xx}} \omega_y \omega_z \\ \frac{\tau_\theta}{I_{yy}} + \frac{(I_{zz} - I_{xx})}{I_{yy}} \omega_x \omega_z \\ \frac{\tau_\psi}{I_{zz}} + \frac{(I_{xx} - I_{yy})}{I_{zz}} \omega_x \omega_y \\ p_1 \\ \vdots \\ p_4 \end{bmatrix} + w(k) \quad (13)$$

V_x, V_y, V_z 는 관성좌표계에서 각축에 대한 선속도이며 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 는 기체의 각속도이고 I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} 는 각 방향의 관성모멘트이다. θ, ϕ, ψ 는 외부로부터 계산된 오일러 각이며 K_d 는 공기마찰에 의한 항력이고 m 은 쿼드콥터의 질량이다. $\tau_\phi, \tau_\theta, \tau_\psi$ 는 4개의 모터의 각속도로부터 생겨나는(식(7)) 자세 토크이며 T_B 는 4개의 모터로부터 발생하는 추력의 합이다. 마지막으로 $p_1 \sim p_4$ 는 랜드마크의 위치정보이다. $w(k)$ 는 시스템에 유입되어 상태변수에 영향을 주는 잡음이다.

2. 관측모델

관측모델에서는 랜드마크와의 거리정보를 쿼드콥터의 중심점으로부터 랜드마크까지의 유클리드 거리와 각축에 대하여 아크탄젠트를 적용한 후 쿼드콥터의 진행방향 각도와와의 차이로 구성함으로써 3차원 공간상에서 쿼드콥터의 위치와 랜드마크의 관계를 표현하였다. roll 각을 측정하기 위해서 3차원 좌표계의 y,z 평면의 좌표 정보를 이용했으며 pitch 각을 측정하기 위하여 x,z 평면의 좌표정보를 이용하고 yaw각을 측정하기 위하여 x,y 평면의 좌표정보를 이용한다.

$$H(k) = \begin{bmatrix} r(k) \\ \phi(k) \\ \theta(k) \\ \psi(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x(k)-x_i)^2 + (y(k)-y_i)^2 + (z(k)-z_i)^2} \\ \arctan\left(\frac{z_i - z(k)}{y_i - y(k)}\right) - \phi(k) \\ \arctan\left(\frac{x_i - x(k)}{z_i - z(k)}\right) - \theta(k) \\ \arctan\left(\frac{y_i - y(k)}{x_i - x(k)}\right) - \psi(k) \end{bmatrix} + v(k) \quad (14)$$

식 (14)에서 $\phi(k)$, $\theta(k)$, $\psi(k)$ 는 현재 쿼드콥터의 자세이고 $v(k)$ 는 측정 잡음이다. 운동모델과 관측모델을 각각의 원소로 편미분 하여 다음과 같은 자코비안 행렬을 유도한다.

3. 운동모델 자코비안 행렬

운동모델 식(13)을 상태 벡터를 구성하는 인자들로 $(x, y, z, V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$ 각각 편미분하여 운동모델에 대한 자코비안 행렬 $J_f(k)$ 을 구성하며 이는 다음 식(15)와 같다. 이 행렬을 이용하여 쿼드콥터의 운동모델을 매 순간 선형화하여 쿼드콥터의 위치를 추정하기 위한 EKF-SLAM을 구현한다. $I_{3N \times 3N}$ 는 쿼드콥터의 각 축에 해당하는 관성모멘트이다.

$$J_f(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial(xyzV_xV_yV_z\omega_x\omega_y\omega_z)} O_{9 \times 3N} \\ O_{3N \times 9} I_{3N \times 3N} \end{bmatrix} \quad (15)$$

4. 관측모델 자코비안 행렬

관측모델에 관한 자코비안 행렬 또한 운동모델의 자코비안행렬과 같은 방법으로 관측모델(식 14)을 상태벡터를 구성하는 인자로 각각 편미분하여 자코비안 행렬을 구성하며 다음과 같은 행렬을 얻을 수 있으며 이 행렬을 이용하여 쿼드콥터의 상태모델을 매 순간 선형화하여 쿼드콥터의 위치를 추정하기 위한 EKF-SLAM을 구현한다.

$$J_h(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial(xyzV_xV_yV_z\omega_x\omega_y\omega_z)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

이 자코비안 행렬 또한 랜드마크를 고려해서 확장할 필요가 있다. 하지만 관측하는 랜드마크의 번호에 따라 자코비안 행렬을 달리하여 적용해야 하기 때문에 이점을 유의해서 행렬을 구성하여야 한다. 첫 번째 랜드마크를 관측할 시에 자코비안 행렬을 식(17)과 같이 구성해야 하며 두 번째 랜드마크를 관측할 시에는 식(18)과 같이

행렬을 구성해야 한다.

$$J_h(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial(xyzV_xV_yV_z\omega_x\omega_y\omega_z)} \frac{\partial h}{\partial(x_1, y_1, z_1)} O_{4 \times 3} \dots O_{4 \times 3} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$J_h(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial(xyzV_xV_yV_z\omega_x\omega_y\omega_z)} O_{4 \times 3} \frac{\partial h}{\partial(x_2, y_2, z_2)} \dots O_{4 \times 3} \end{bmatrix} \quad (18)$$

세 번째와 네 번째 랜드마크를 관측할 때에도 위와 같은 방법으로 현재 관측하고 있는 랜드마크에 따라 그에 맞는 자코비안 행렬을 구성하게 된다.

5. 쿼드콥터 위치 추정을 위한 EKF-SLAM

본 논문에서는 이상에서 유도한 운동모델과 관측모델 그리고 이에 해당하는 자코비안 행렬을 이용하여 EKF-SLAM을 적용함으로써 쿼드콥터의 위치를 추정하는 방법을 제안한다. EKF-SLAM을 통한 쿼드콥터의 위치 추정은 예측과정과 추정과정을 반복함으로써 이루어진다.

예측 과정에서는 쿼드콥터의 입력과 이전의 상태 정보를 이용해서 현재의 쿼드콥터의 상태 및 랜드마크의 위치를 예측하며 그 후에 상태 정보의 기체의 각 가속도 정보를 이용하여 오일러각을 계산하게 된다. 추정과정에서는 일단 관측모델에 의해 랜드마크에 대한 상대적 정보를 획득했는지 여부에 따라 분기가 일어난다. 관측정보가 없을 경우에는 다시 예측 과정으로 돌아가며 관측정보가 있을 시에는 자코비안 행렬을 우선적으로 계산하고 칼만 게인을 계산하며 예측과정에서 계산된 상태벡터와 현재 관측정보를 칼만 게인을 이용해 융합 후 최종적으로 현재 상태정보 즉 랜드마크의 위치와 쿼드콥터의 위치 정보를 추정하게 된다.

IV. 시뮬레이션

EKF-SLAM을 이용한 쿼드콥터 위치 추정의 성능을 평가하기 위해서 쿼드콥터의 동역학 모델의 비행 궤적 정보와 EKF-SLAM을 통해서 추정한 쿼드콥터의 비행 궤적을 비교해 볼 필요가 있다. 단순히 쿼드콥터의 동역학 모델의 비행 궤적과 EKF-SLAM을 통해서 추정한 비행 궤적은 차이가 날 수 없음으로 관측정보와 쿼드콥터의 위치정보에 각각 가우시안 잡음을 추가한다. 그리고 쿼드콥터의 비행 궤적과 EKF-SLAM의 비행 궤적을 비교하여 시뮬레이션을 평가한다.

1. 비행 형태에 따른 시뮬레이션

(1) 직선 비행 시뮬레이션

직선비행 시뮬레이션의 랜드마크 배치 및 비행 궤적은 그림 1과 같다. 4개의 랜드마크를 3차원 공간상에 배치한 후 쿼드콥터를 직선비행 시킨다. 쿼드콥터는 직선으로 비행하며 4개의 랜드마크를 순차적으로 관측하며 비행 중 가까운 랜드마크의 거리정보와 쿼드콥터의 진행방향과 이루는 방향 정보를 얻어낸다. 쿼드콥터는 관측된 랜드마크 주변에 오차 공분산에 크기에 따라서 크기가 결정되는 타원을 그리며 비행을 하게 된다. 그림 2는 쿼드콥터가 최종적으로 비행한 궤적의 위치 오차를 나타낸다. 그림의 위치 오차는 앞서 모델링 한 쿼드콥터의 비행 궤적과 각 축마다 비교하여 정확도를 평가한 것으로, 잡음이 있음에도 불구하고 대체적으로 정확한 궤적을 추종하는 모습을 확인할 수 있다.

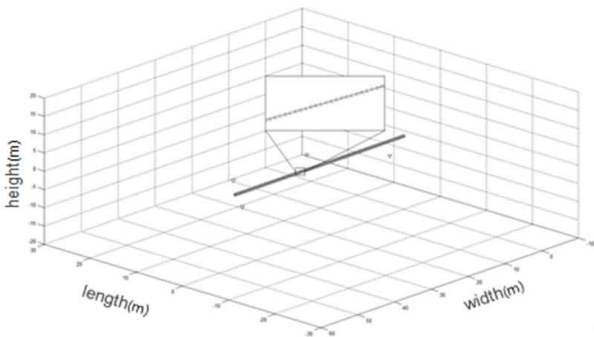


그림 1. 직선 비행 궤적
Fig. 1. Straight flight trajectory

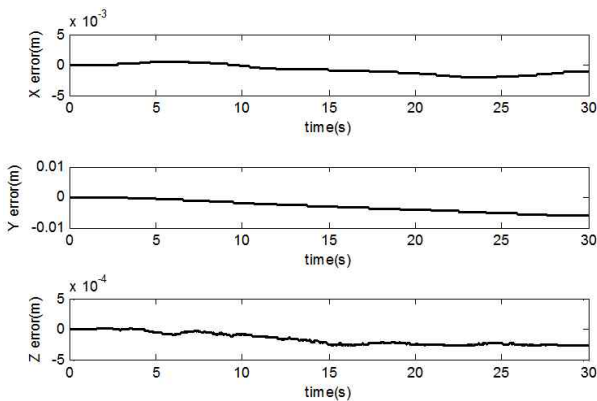


그림 2. 직선 비행 오차
Fig. 2. Straight flight error

그림 3은 랜드마크 위치에 대한 오차 공분산 행렬의 합과 쿼드콥터의 위치에 대한 오차 공분산

행렬의 합을 나타낸다. 대체적으로 감소 하는 형태를 보이며 칼만 필터의 성능이 발산하지 않음을 확인할 수 있다. 쿼드콥터 위치에 대한 오차 공분산 행렬 역시 관측한 랜드마크의 개수가 늘어남에 따라서 전반적으로 오차 공분산이 감소하는 결과를 나타낸다.

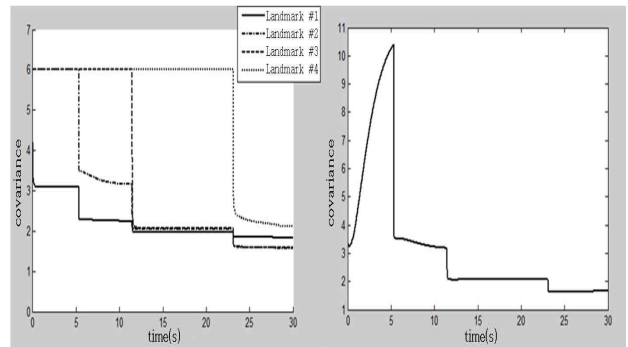


그림 3. 직선 비행 랜드마크 위치 오차 공분산(좌)
쿼드콥터 위치 오차 공분산(우)
Fig. 3. Straight Flight landmark position error covariance (left)
Quadcopter position error covariance (right)

(2) 회전 비행 시뮬레이션

회전 비행 시뮬레이션에서는 네 개의 랜드마크를 3차원 공간상에 그림 4와 같이 배치하고 궤적 제어를 수행한다. 쿼드콥터는 4개의 랜드마크의 안쪽에서 원을 그리며 비행을 하며 가상의 센서에 의해 비행 중 가까운 랜드마크의 거리정보와 쿼드콥터의 진행방향과 이루는 방향 정보를 얻어낸다. 그림 5는 쿼드콥터가 최종적으로 비행한 궤적에서의 위치 오차를 나타낸다. 이 오차는 기준 궤적과 EKF-SLAM을 통해 추정된 위치 인식 기반 비행 제어 궤적과의 오차로서 랜드마크의 인식에 따른 변화를 나타내며 전반적으로 성능이 우수함을 알 수 있다.

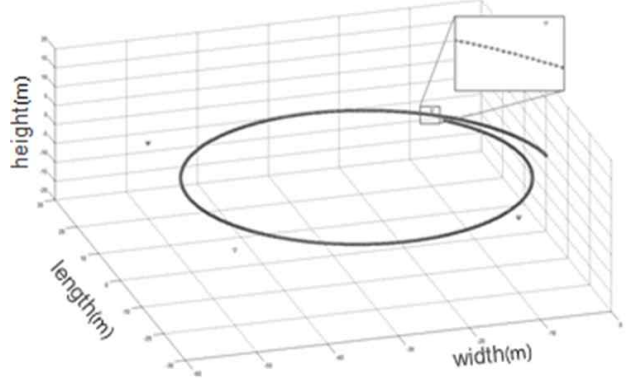


그림 4. 원형 비행 궤적
Fig. 4. Circular flight trajectory

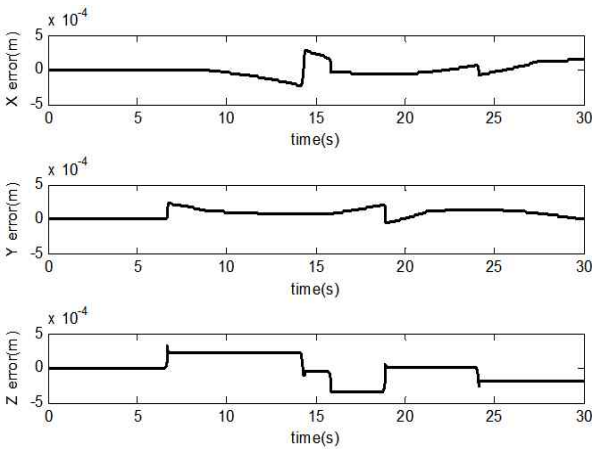


그림 5. 원형 비행 오차
Fig. 5. Circular flight error

그림6은 랜드마크 위치에 대한 오차 공분산 행렬의 합과 쿼드콥터의 위치에 대한 오차 공분산 행렬의 합을 나타낸다. 랜드마크 및 쿼드콥터 위치의 오차 공분산이 감소하며 수렴하고 있으며 관측이 가장 많이 된 2번 랜드마크의 오차 공분산이 가장 큰 폭으로 감소하고 있음을 알 수 있다.

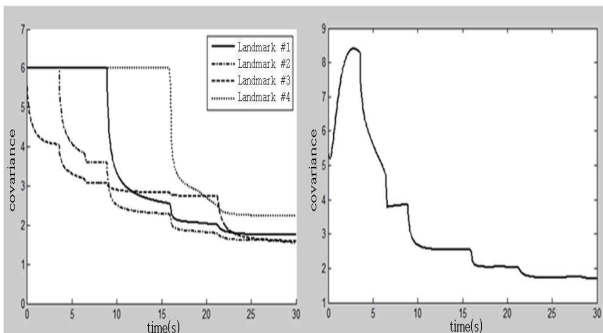


그림 6. 원형 비행 랜드마크 위치 오차 공분산(좌)
쿼드콥터 위치 오차 공분산(우)
Fig. 6. Circular Flight landmark position error covariance(left)
Quadcopter position error covariance(right)

(3) 사각 비행 시뮬레이션

사각비행 시뮬레이션의 랜드마크 배치는 회전비행 시뮬레이션의 배치와 같다. 네 개의 랜드마크를 3차원 공간상에 그림 7 과 같이 배치한 후 EKF-SLAM을 이용한 위치 추정 기반 쿼드콥터의 비행 제어를 수행한다. 쿼드콥터는 4개의 랜드마크의 안쪽에서 사각형 모양의 궤적을 따라 비행을 하며 가상의 센서에 의해 비행 중 가까운 랜드마크의 거리정보와 쿼드콥터의 진행방향과 이루

는 방향 정보를 얻어낸다. 쿼드콥터는 관측된 랜드마크 위치를 기반으로 인식된 자기위치에 따라 궤적 추종 비행을 한다. 그림 7은 쿼드콥터가 추종한 비행 궤적은 그림 7에 나타내었으며 EKF-SLAM을 통한 위치 추종 성능은 그림 8에 나타내었다. 위치 추정 기반 궤적 추종 성능은 그림 8에 나타난 바와 같이 그 정밀도가 각 축당 1cm 이하의 오차 성능을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 그림 9는 랜드마크 위치에 대한 오차 공분산 행렬의 합과 쿼드콥터의 위치에 대한 오차 공분산 행렬의 합을 나타낸 것으로 4개의 랜드마크 위치에 대한 공분산은 모두 감소하며 수렴하고 있고 쿼드콥터 위치에 대한 오차 공분산 행렬 역시 관측한 랜드마크의 개수가 늘어남에 따라서 감소하는 결과를 보임을 알 수 있다.

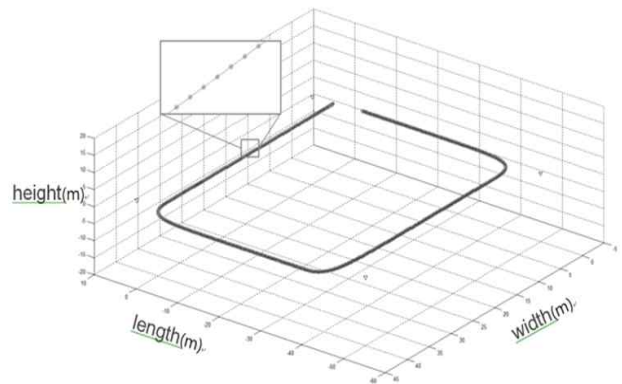


그림 7. 사각 비행 시뮬레이션
Fig. 7. Square flight Simulation

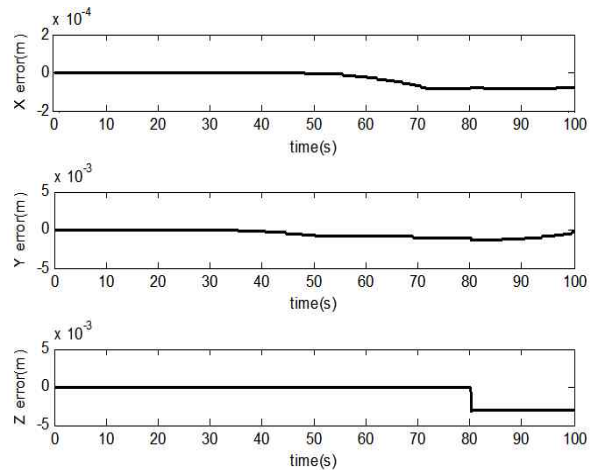


그림 8. 사각 비행 오차
Fig. 8. Square flight error

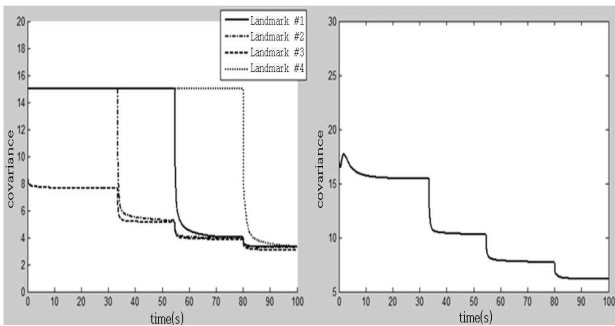


그림 9. 사각 비행 랜드마크 위치 오차 공분산(좌)
 쿼드콥터 위치 오차 공분산(우)
 Fig. 9. Square Flight landmark position error covariance(left)
 Quadcopter position error covariance(right)

2. 랜드마크 개수에 따른 성능 비교

본 논문에서는 랜드마크의 개수에 따른 EKF-SLAM 기반 위치 추정의 성능을 평가하기 위해서 랜드마크의 개수를 네 개부터 한 개까지 줄여가며 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과 그림 10 및 11과 같이 랜드마크 위치 및 쿼드콥터의 위치 오차 공분산은 랜드마크의 개수에 따라 성능의 차이가 있음을 확인하였으며, 그림 12와 같이 쿼드콥터의 비행 기준 궤적과 비교하여 x, y, z축에 대한 추종 오차를 분석한 결과 궤적 추종의 정확도 또한 랜드마크의 개수가 적을수록 떨어지며 오차 공분산의 감소량도 적어짐을 확인할 수가 있었다.

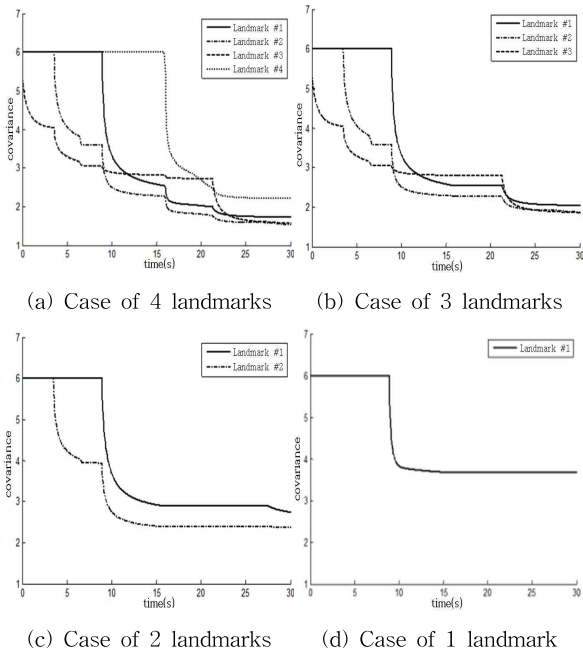
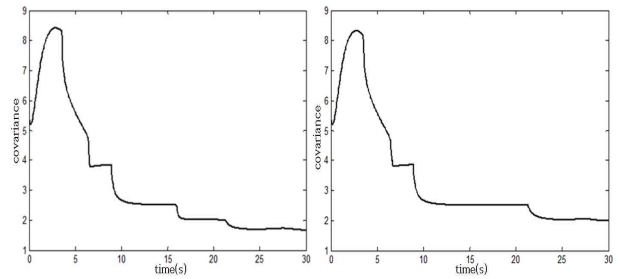
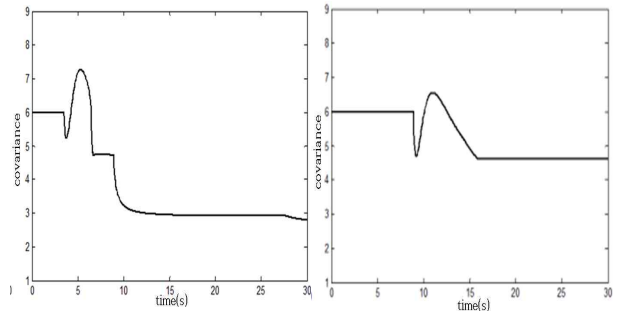


그림 10. 랜드마크 개수 변화에 대한 랜드마크 위치 오차 공분산
 Fig. 10. landmark position error covariance for the number of landmark



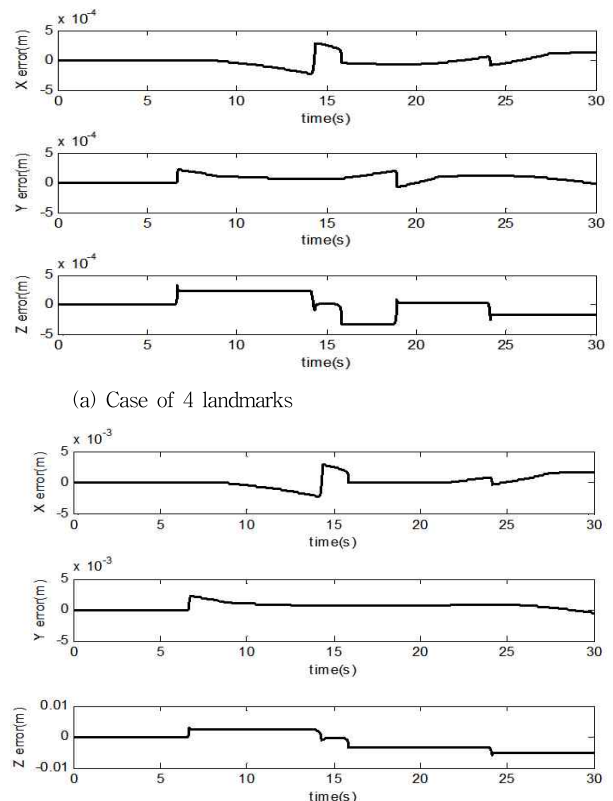
(a) Case of 4 landmarks (b) Case of 3 landmarks



(c) Case of 2 landmarks (d) Case of 1 landmark

그림 11. 랜드마크 개수 변화에 대한 쿼드콥터 위치 오차 공분산

Fig. 11. Quadcopter position error covariance for the number of landmark



(b) Case of 3 landmarks

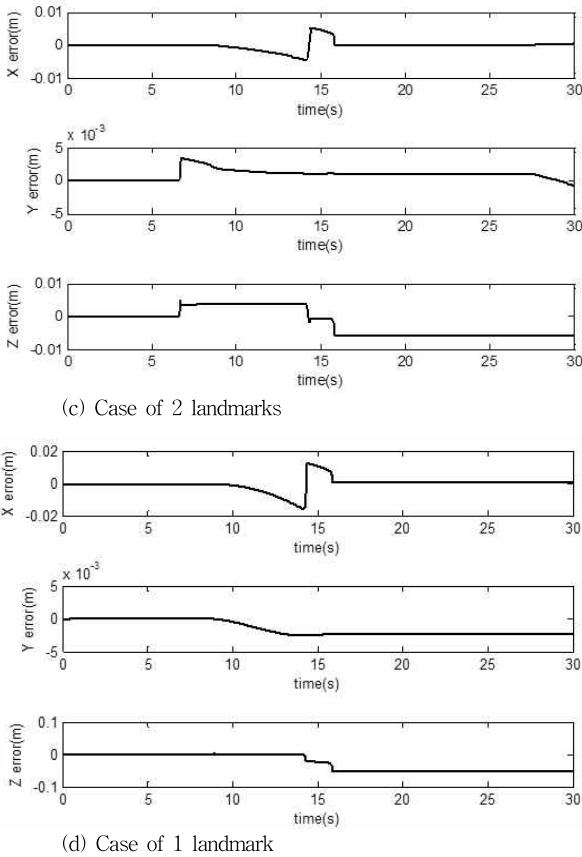


그림 12. 랜드마크 개수 변화에 대한 궤적 추종 오차
 Fig. 12. trajectory tracking error for the number of landmark

V. 결론

본 논문에서는 쿼드콥터의 위치추정을 위한 EKF-SLAM을 소개하고 이를 위한 시뮬레이션을 설계하였다. 모바일 로봇의 자율비행을 위해서는 로봇의 행동범위 안에서의 정확한 위치인식이 필요하며 이러한 목적에 가장 부합하는 연구분야가 SLAM이다. SLAM은 다양한 분야에서 다양한 형태로 적용되고 있으며 아직도 활발히 연구 중인 분야이다. 하지만 쿼드콥터에는 아직 적용된 사례가 국내에는 드물며 이를 적용하기 위해 간소화된 쿼드콥터의 동역학 모델을 이용하였으며 최종적으로는 모델링 한 쿼드콥터의 상태방정식을 이용하여 EKF-SLAM의 운동모델을 결정하고 방향정보와 거리정보를 취득할 수 있는 가상의 센서를 모델링 하여 SLAM기술을 쿼드콥터에 적용하였으며 이를 시뮬레이션 하였다.

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] Z. Yan, S. Peng, J. Zhou, and H. Jia, "Research on an improved dead reckoning for AUV navigation," *Proc. of Control and Decision Conference (CCDC)*, pp. 1793-1797, 2010

[3] H. Zhang, J. Rong, X. Zhong, H. Yang, L. Xiao, and L. Zhang, "The application and design of EKF smoother based on GPS/DR integration for land vehicle navigation," *Computational Intelligence and Industrial Application*, vol. 1, pp. 704-707, 2008.

[4] J. Song, and S. Hwang. "Past and State-of-the-Art SLAM Technologies," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems* (in Korean) 20(3), 372-379, 2014

[5] A. Pratik, and T. Brady. "SLAM Strategy for an Autonomous Quadrotor," University of Michigan

[6] Montemerlo, Michael, et al. "FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem," AAAI/IAAI. 2002.

[7] Durrant-Whyte, Hugh, and Tim Bailey. "Simultaneous localization and mapping: part I," *Robotics & Automation Magazine*, IEEE 13.2, pp. 99-110, 2006

[8] B. Tim, and H. D. Whyte, "Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II," *IEEE Robotics & Automation Magazine* 13.3, pp. 108-117, 2006

[9] G. Klein and D. Murray, "Parallel tracking and mapping for small AR workspaces," *Proc. of the 6th IEEE ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality*, Nov. 2007.

[10] J. S. Gutmann and K. Konolige, "Incremental mapping of large cyclic environments," *Proc. of the IEEE Int. Symp.*

on *Computational Intelligence in Robotics and Automation*, 1999.

[11] S. Robert, and N. Roy, "Global a-optimal robot exploration in slam," *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 661-666, April, 2005.

[12] A. Giviansky, Quadcopter Dynamics, Simulation, and Control, from <http://andrew.gibiansky.com/blog/physics/quadcopter-dynamics>, 2012.

BIOGRAPHY

Youngwan Cho (Member)



1991 : BS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.

1993 : MS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.

1999 : PhD degree in Electronic Engineering, Yonsei University.

2000~2003 : Research Engineer, Samsung Electronics.

2003~Present : Associate Professor, Seokyeong University

Jaeyoung Hwang (Student Member)



2012 : BS degree in Computer Engineering, Seokyeong University.

2014 : MS degree in Electronics and Computer Engineering, Seokyeong University.

Heejin Lee (Member)



1987 : BS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.

1989 : MS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.

1998 : PhD degree in Electronic Engineering, Yonsei University.

1989~1993 : Research Engineer, Daewoo Telecom Ltd.

1998~Present : Professor, Hankyong National University