

쿼드로터 자세제어를 위한 센서융합 연구

Study of Sensor Fusion for Attitude Control of a Quad-rotor

유 동 현, 임 대 영, 설 남 오, 박 종 호, 정 길 도*

(Dong-Hyeon Yu¹, Dae Young Lim¹, Nam O Sel², Jong Ho Park², and Kil to Chong^{1,3,*})

¹School of Department of Electronic Engineering, Chon-buk National University

²School of Department of Electronic & Electronic Engineering, Seonam University

³Advanced Electronics and Information Research Center, Chon-buk National University

Abstract: We presented a quad-rotor controlling algorithm design by using sensor fusion in this paper. The controller design technique was performed by a PD controller with a Kalman filter and compensation algorithm for increasing the stability and reliability of the quad-rotor attitude. In this paper, we propose an attitude estimation algorithm for quad-rotor based sensor fusion by using the Kalman filter. For this reason, firstly, we studied the platform configuration and principle of the quad-rotor. Secondly, the bias errors of a gyro sensor, acceleration and geomagnetic sensor are compensated. The measured values of each sensor are then fused via a Kalman filter. Finally, the performance of the proposed algorithm is evaluated through experimental data of attitude estimation. As a result, the proposed sensor fusion algorithm showed superior attitude estimation performance, and also proved that robust attitude estimation is possible even in disturbance.

Keywords: Attitude control, Kalman filter, sensor fusion, quad-rotor

I. 서론

쿼드로터는 수직이착륙(Vertical Take-off and Landing) 및 호버링(Hovering)이 가능하고 다른 종류의 무인 비행체에 비해 구조가 간단하다[1]. 이러한 장점으로 인하여 국내·외 유수의 대학연구소 뿐만 아니라 국가기술연구소, 국방과학연구소 등에서 쿼드로터에 관한 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 무인 쿼드로터의 자율 운행과 관련하여 실외 환경에서는 위성항법장치(Global Positioning System)를 사용한 자율 항법 제어[2]와 자세 제어 등에 관한 연구가 수행 중이고, 실내 환경에서는 다중 카메라를 이용한 쿼드로터의 위치 및 자세 제어 시스템이나 지그비의 수신신호강도(Received Signal Strength Indication) 등을 이용한 실내에서 자기 위치 확인 등에 관한 연구가 진행되고 있다[3,4]. 그러나 이런 연구들의 경우 실험 환경 구축과 쿼드로터의 정밀한 측정 요구 등을 만족시키기 위해 고가의 장비가 필요하다. 이미 상용화된 쿼드로터 비행제어보드인 Naza, Wookong, A2 등이 있지만 제어보드가 고가이고 센서 데이터 추출 및 데이터 융합 알고리즘을 시스템에 추가로 적용

하기가 매우 어렵다.

최근 들어 쿼드로터는 영화 촬영, 물품 운송, 경찰 분야에서부터 교육까지 다양한 분야에서 관심을 받고 있다. 이처럼 머지않은 미래에 쿼드로터의 활용 분야는 광범위하게 늘어날 것이며 이에 쿼드로터 자세에 대한 안정성 및 신뢰성에 대한 연구가 필요하다. 택배 업체인 아마존은 쿼드로터를 이용하여 물품 운송을 위한 많은 연구개발을 수행하고 있지만 정확한 자세 및 위치의 신뢰성 확보 때문에 실질적인 활용을 망설이고 있다. 그러기에 쿼드로터 기체의 안정성 향상을 위해 쿼드로터 자세를 먼저 안정화해야 하며, 이를 위해 사용되는 센서의 경우 매우 제한적이며 측정할 때 센서 데이터 자체 노이즈 및 모터의 진동 현상이 발생할 수 있기 때문에 쿼드로터 기체 및 자세 제어에 이를 반영해야만 한다.

본 논문에서는 쿼드로터의 안정화와 자세제어에 대한 성능 향상을 위하여 쿼드로터 자세 제어 시스템의 신뢰성 향상과 쿼드로터의 비행제어보드에 제어 알고리즘을 실제로 구현하는 것을 목표로 한다. 구현된 제어 시스템을 실제 쿼드로터에 적용하기에 앞서 Matlab 시뮬링크를 이용하여 쿼드로터의 자세 제어를 위한 센서융합 알고리즘과 안정적인 비행제어를 PD 제어기에 대한 성능을 검증하였고, Matlab 시뮬링크를 통하여 검증된 알고리즘과 제어기들을 실제 쿼드로터 시스템에 적용하여 실험을 진행하였다.

본 논문의 구성은 먼저 II 장에서 쿼드로터의 자세 추정을 위한 쿼드로터 플랫폼의 구성과 비행제어보드 프로그래밍 개발 환경에 대한 설명 및 쿼드로터 움직임의 원리를 기술하였고, III 장에서는 쿼드로터에 대한 동역학적 모델링을 수행하였다. IV 장에서는 다중 센서 융합을 이용한 자세 추정 제어 시스템을 제안하고, V 장에서는 Matlab을 이용하

* Corresponding Author

Manuscript received November 24, 2014 / revised January 28, 2015 / accepted January 30, 2015

유동현, 임대영, 정길도: 전북대학교 전자공학부

(yupolone@naver.com/nicecapijiang@naver.com/kitchong@jbnu.ac.kr)

설남오, 박종호: 서남대학교 전기전자공학과

(selnamo@nate.com/74small@daum.net)

※ 본 논문은 한국연구재단 BK21 플러스 사업과 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단에서 지원하여 연구하였음 (No.2013R1A1A2A10009458(일반), (No.2013R1A2A2A01068127(중견)).

※ 상기 논문은 2014 ICROS 전북제주지부 학술대회에서 초안이 발표되었음.

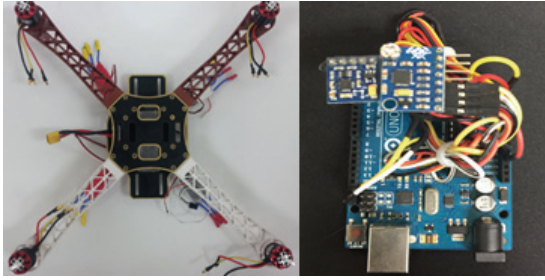


그림 1. 쿼드로터의 기체 및 센서.

Fig. 1. Body frame of quad-rotor and sensor.

여 제안된 알고리즘과 PD 제어기의 성능을 검증한 후 실제 쿼드로터 시스템에 적용된 실험 결과를 보여주었다.

II. 자세 추정을 위한 쿼드로터 플랫폼 구성 및 원리

1. 쿼드로터의 플랫폼 구성

실험용 쿼드로터의 하드웨어 구성은 그림 1과 같다. 실험에 사용된 쿼드로터 프레임은 DJI사의 F450을 사용하였고, 기체의 무게는 282g이다. 그리고 로터 구동을 위한 BLDC모터 (Brushless DC motor)는 KV1000와 10인치 카본 프로펠러를 사용하였다. 기체 중심에서 쿼드로터의 날개까지의 길이는 6cm이며, 쿼드로터의 반경은 16cm이다.

비행제어보드와 자세측정에 대한 다중센서시스템을 쿼드로터 중심에 장착하고 자세측정을 위한 다중센서시스템으로부터 출력되는 센서 데이터는 비행제어보드를 거쳐 시리얼 통신으로 컴퓨터로 전송하여 데이터를 검증하게 된다. 본 연구에서 비행제어보드는 ‘아두이노 우노’를 사용하고 쿼드로터 제어 알고리즘과 제안한 다중센서융합 알고리즘을 개발하였다. 이때, 다중센서에서 출력되는 센서 데이터와 쿼드로터의 자세를 모니터링 하였다.

쿼드로터의 비행제어보드를 이용하여 가속도계와 자이로 센서, 지자기 센서의 측정값을 받아 제안된 알고리즘에 적용한 후 쿼드로터의 최종 자세 정보를 도출하게 된다. PD 제어기에 최종자세정보를 입력하여 출력된 비행제어 명령은 4개의 ESC (Electronic Speed Control)을 통하여 BLDC모터를 동작하게 한다. BLDC모터를 제어함에 따라 안정적인 쿼드로터 자세를 유지할 수 있다.

2. 쿼드로터의 동작 원리

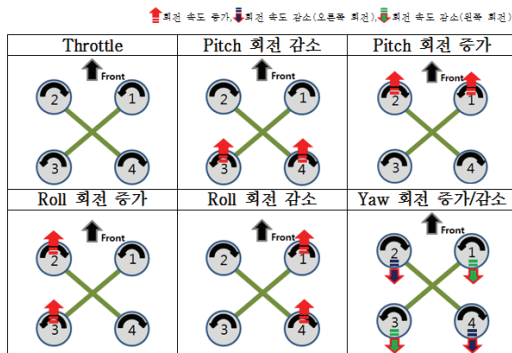


그림 2. 쿼드로터의 동작 원리.

Fig. 2. Operation principle of the quad rotor.

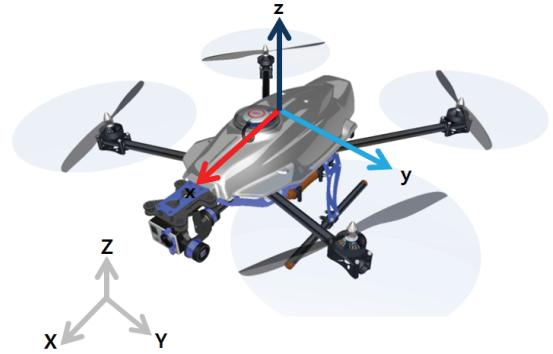


그림 3. 쿼드로터의 좌표계.

Fig. 3. Coordinate frame of quad-rotor.

쿼드로터의 기본동작은 그림 2와 같다. 이를 보다 자세히 설명하면 모터의 회전은 마주 보는 BLDC모터끼리 서로 같은 방향으로 회전하며, 인접한 모터는 역방향으로 동작하도록 ESC를 연결한다. 프로펠러는 시계방향과 반시계방향 두 종류이며, BLDC 모터에 각각 장착한다.

더불어 쿼드로터 동작은 크게 4가지로 나눌 수 있다. 프로펠러는 모터 추력을 조정하여 쿼드로터의 고도 조절이 가능하게 하고, roll과 pitch를 통하여 전 방향으로 이동이 가능하게 한다. 마지막으로 yaw는 대각선에 배치되어 있는 2개 프로펠러의 회전 속도를 이용하여 쿼드로터가 시계방향으로 회전하거나 반시계방향으로 회전을 가능하게 한다.

III. 쿼드로터의 모델링

1. 쿼드로터의 좌표 변환

쿼드로터에 대한 3차원 공간상에서의 회전을 수학적으로 나타내기 위해서 오일러 각을 이용하여 쿼드로터의 회전행렬을 구했으며, 쿼드로터 각축에 대한 회전행렬은 식 (1)과 같다.

$$R(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix}$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

식 (1)을 기초로 쿼드로터의 회전 행렬을 나타내면 식 (2)와 같다.

$$R_{xyz} = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & c\theta s\psi & -s\theta \\ s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & s\phi c\theta \\ c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi & c\phi c\theta \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서, s는 sin을, 그리고 c는 cos을 의미한다[5].

2. 쿼드로터의 동역학 모델링

쿼드로터의 동역학 모델링을 하기 위해서 위치에너지와 병진, 회전 운동에너지를 각각 구해야한다. 쿼드로터의 위치 에너지의 방정식은 식 (3)과 같다.

$$U = mgz \tag{3}$$

회전 운동에너지 방정식은 식 (4), 병진운동 에너지 방정식은 식 (5)와 같다.

$$T_r = \frac{1}{2} J \dot{\eta}^T \dot{\eta} \quad (4)$$

$$T_t = \frac{1}{2} m \dot{\xi}^T \dot{\xi} \quad (5)$$

여기서 η 는 $[\phi \ \theta \ \psi]^T$ 을, ξ 는 $[x \ y \ z]^T$ 을 의미한다.

식 (3)부터 식 (5)를 라그랑지안 방정식에 대입하여 전개하면 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} L &= T_t + T_r - U \\ &= \frac{1}{2} m \dot{\xi}^T \dot{\xi} + \frac{1}{2} J \dot{\eta}^T \dot{\eta} - mgz \end{aligned} \quad (6)$$

쿼드로터의 동역학 방정식은 오일러-라그랑지안 방정식을 통하여 도출할 수 있으며 이는 식 (7)과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} = F \quad (7)$$

여기서 F 는 $[F_\xi \ \tau]^T$ 을 의미한다.

이에 주어진 식 (6)을 식 (7)에 대입하여 전개하면 식 (8)과 같다. 단, $J\ddot{\eta}$ 는 매우 작은 값이므로 무시할 수 있다.

$$\begin{aligned} m \ddot{\xi} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} &= F_\xi \\ F_\xi &= \begin{bmatrix} -u \sin \theta \\ u \cos \theta \sin \phi \\ u \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 u 는 쿼드로터의 추력의 합력이다.

각각의 오일러 각에 대한 외부 토크는 식 (9)와 같다.

$$\tau = \begin{bmatrix} (f_1 - f_3)l \\ (f_4 - f_2)l \\ \tau_\psi \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 f_i 는 i 번째의 모터의 추력을 나타내고, l 은 쿼드로터의 무게중심으로부터 모터 회전축 중심까지의 거리이다.

최종적으로 쿼드로터의 동역학 방정식은 식 (10)과 같다. 이때 g 는 중력가속도이다.

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= -u \sin \theta \\ \ddot{y} &= u \cos \theta \sin \phi \\ \ddot{z} &= u \cos \theta \cos \phi - g \\ \ddot{\psi} &= u_\psi \\ \ddot{\theta} &= u_\theta \\ \ddot{\phi} &= u_\phi \end{aligned} \quad (10)$$

IV. 센서 융합을 이용한 자세 제어 알고리즘

쿼드로터 자세 제어를 위해 가속도계와 자이로 센서, 지자기 센서 등 다중 센서를 융합하여 사용하는데 이를 위해 각각의 센서들이 가지고 있는 바이어스 오차를 유의해야 하며, 특히 자이로 센서의 경우 누적 오차로 인한 문제가 발생할 수 있다. 따라서 각각의 오차를 HDR (Heuristic drift

reduction)알고리즘과 칼만 필터를 이용한 다중 센서융합 과정을 통해 쿼드로터 자세제어 수행에 적용한다.

1. 센서

가속도계와 자이로 센서, 지자기 센서는 여러 산업 현장에서 많이 사용되어지고 있는 센서로서 물체의 움직임을 감지하여 이에 맞는 반응을 보여준다[6]. 쿼드로터에 사용되어지는 센서들은 기본적으로 물체의 자세를 측정할 때 사용되어진다. 이러한 센서를 이용하여 쿼드로터의 자세를 도출할 수 있다.

1.1 가속도계, 자이로 센서 (MPU 6050)

MPU6050은 자이로 및 가속도계 센서가 함께 있는 원칩 센서로 가속도 값과 자이로 값을 각각 3개씩 출력한다.

가속도계 센서는 3차원공간속에서 x축, y축, z축 방향의 가속도를 측정한다. 가속도계 센서는 움직이지 않는 상태일 때 x축과 y축은 가속도가 출력 되지 않고, z축 방향으로 중력가속도 값을 출력한다. 한쪽 축 방향으로 기울어진 상태일 때 다른 두 축에서 가속도 값을 측정할 수 있다. 기울어진 정도를 이용하여 센서의 기울어진 각도를 알 수 있다.

쿼드로터를 진행 방향 쪽으로 기울어져 가속을 하게 되면 각 축에서 측정되는 가속도 값이 변하게 되며 이런 경우 쿼드로터의 자세를 정확히 측정할 수가 없다. 왜냐하면 움직임이 생겨 어느 한 방향으로 가속도가 생기게 되면 출력 값은 중력에 의해 측정되는 가속도 값과 구분이 되지 않는다. 정지하지 않은 움직임 상태에서는 가속도계 센서만으로 기울기 값을 측정 할 수 없다[7].

자이로 센서는 각속도를 측정한다. 각속도는 시간당 회전하는 각도를 의미 하고 각도를 구하려면 전체 시간에 해당하는 만큼 적분을 해야 한다. 자이로 센서는 이와 같이 각속도를 출력으로 내보내기 때문에 전체 시간동안 이 각속도를 적분하면 기울어진 각도를 계산할 수 있다. 그러나 센서에서 측정되는 각속도는 노이즈가 생기거나 다른 이유에 의하여 측정값에 잡음이 계속 나타난다. 이러한 현상 때문에 적분시에는 누적이 되어서 최종으로 출력되어지는 각도가 드리프트 되는 현상이 나타난다. 자이로 센서에서 측



그림 4. 자이로, 가속도계 센서 (MPU6050).

Fig. 4. Gyro and Acceleration sensor (MPU6050).



그림 5. 지자기 센서 (GY-271).

Fig. 5. Geomagnetic sensor.

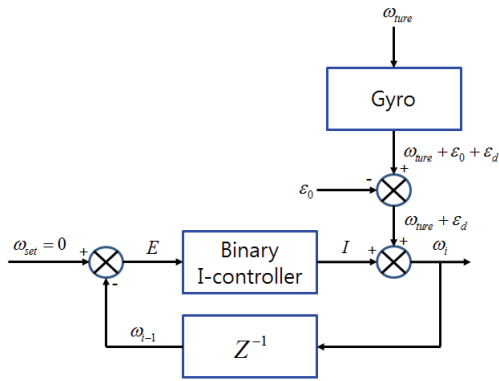


그림 6. 드리프트 현상 최소화 알고리즘.
Fig. 6. Heuristic drift reduction Algorithm.

정되는 각속도를 이용하면 시간이 지날수록 각도는 오차가 쌓여 기울기 값이 변하게 된다. 이러한 이유 때문에 일차적으로 바이어스 오차를 찾기 위해 일정 시간동안 수평을 유지한 상태에서 자이로와 자이로 센서의 데이터를 추출한다. 각각의 센서데이터를 이용하여 바이어스 오차를 계산하여 보상을 해준다. 또한 자이로 같은 경우에는 누적 오차를 제거 할 수 있는 알고리즘을 사용하여 보상 해준다.

1.2 지자기 센서

지자기 센서는 지구 주변의 자기장을 측정한 후 각도로 변환한다. 비행제어보드에서 I2C 통신을 이용하여 지자기 센서에서 필요한 정보를 추출한다.

지자기 센서를 사용하는 이유는 자이로 센서의 적분 오차 때문에 정확한 yaw값을 찾을 수 없기에 지자기 센서를 이용하여 yaw값을 보상하기 위함이다.

2. HDR 알고리즘과 칼만 필터를 이용한 센서 융합

2.1 HDR 알고리즘

자이로 센서에서 출력 되는 각속도를 적분하여 회전각을 계산하며, 드리프트 바이어스 오차를 최소화하기 위한 알고리즘이다. w_{true} 는 예러가 포함되지 않은 이상적인 값이고 ϵ_0 와 ϵ_d 를 포함하고 있다[8]. 여기서 ϵ_0 는 센서가 움직이지 않는 일정한 시간 동안 측정값을 저장하여 평균을 구한 값이고, ϵ_d 는 시간에 따라 미소하게 변하는 바이어스 값이다. 자이로 센서의 정지 상태를 가정하면 w_{true} 는 0을 의미하고 바이어스 드리프트 ϵ_0 를 제거하면 자이로 센서의 출력 ϵ_d 가 되고, I-컨트롤러는 서서히 변하는 ϵ_d 를 추정 하게 된다. 이상적인 조건일 경우엔 I는 $-\epsilon_d$ 가 성립한다. 하지만 이상적인 w_{true} 는 0인 경우는 거의 존재하지 않는다. I-컨트롤러는 오차신호 E의 값에 둔감하게 반응해야 한다. 이것은 오차 신호 E를 양의 부호와 음의 부호만을 고려하여 해결 한다. 그리고 HDR 알고리즘을 수행하는데 있어 w_{set} 은 0의 값을 유지한다[9]. Binary I-컨트롤러는 작은 오차에는 민감하게 반응하고 큰 오차에는 둔감하게 반응해야 하기 때문에 오차의 부호만을 고려한다.

$$I = I_{i-1} - SIGN(w_{i-1})\epsilon_c \tag{11}$$

여기서 $SIGN(w_{i-1})$ 은 아래와 같다.

$$SIGN(w_{i-1}) = \begin{cases} 1 & w_{i-1} > 0 \\ 0 & w_{i-1} = 0 \\ -1 & w_{i-1} < 0 \end{cases} \tag{12}$$

I-컨트롤러의 I값이 결정이 되면 자이로 센서의 측정값에 I를 적용하여 보정된 회전율을 구하게 된다.

$$w_i = w_{true} + \epsilon_d + I_i \tag{13}$$

2.2 센서 융합 알고리즘

칼만 필터는 시스템의 모델과 측정값을 이용하여 시스템의 상태 변수를 찾아내는 최적 추정기법이다[10,11]. 실제 상태값과 추정된 상태값의 오차 공분산을 최소화 하는 알고리즘이다. 칼만 필터는 유도, 항법, 제어의 여러 분야에서 적용되고 있고, 자세 추정 및 위치 추정 등에 많이 쓰이고 있다. 본 논문에서는 쿼드로터의 자세 추정에 칼만 필터를 사용한다. 칼만 필터의 전체 동작은 그림 7에 나타나있다. 칼만 필터는 상태변수의 값 \hat{x}_{k-1} 과 P_{k-1} 가 가질 값을 예측하여 입력하며 이러한 과정은 초기에만 사용한다. 그 다음으로 추정값과 오차 공분산을 예측하게 된다. 추정값은 전체적인 시스템 모델과 밀접하게 관련되어 있다. 변수 P_k 는 보정과정의 오차공분산 값이고, P_k^- 은 예측과정의 오차 공분산이며 시스템 모델 A와 시스템 잡음 오차 Q를 이용하여 예측한다. 이렇게 얻어진 오차 공분산 P_k^- 값을 사용하여 칼만 이득을 계산한다. 추정값 \hat{x}_k 은 측정된 센서값 z_k 과 예측값 \hat{x}_k^- 의 차이를 칼만 계인을 곱해주고 추정 예측값을 더하여 최종 추정값을 출력한다. 마지막으로 오차 공분산은 추정값이 얼마나 정확한지를 알려주는 척도이며, 이 오차 공분산을 검토하여 앞서 계산한 추정값을 사용할 것인지 사용하지 않을 것인지를 판단할 수 있다. 오차 공분산이 크면 이 값의 신뢰도는 그만큼 떨어지는 것이기 때문에 사용할 가치가 없다고 판단한다.

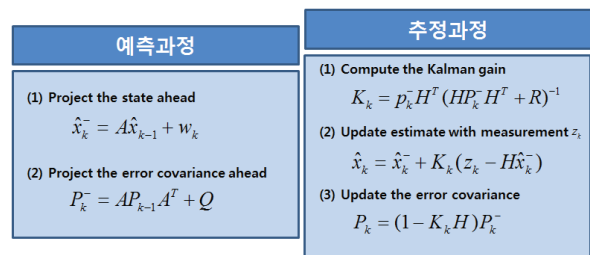


그림 7. 칼만 필터 알고리즘.
Fig. 7. Kalman filter algorithm.

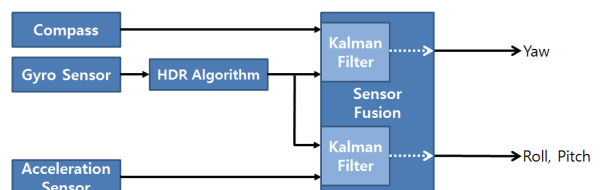


그림 8. 제안한 다중 센서 융합 알고리즘.
Fig. 8. Proposed multi-sensor fusion algorithm.

시스템 모델의 A, H, Q, R 네 개의 변수가 칼만 필터의 설계 인자가 되며, 이 값을 어떻게 선정하느냐에 따라 칼만 필터의 성능이 달라진다[8]. 본 연구에서는 지자기와 자이로 센서 데이터를 칼만 필터를 통해 융합하여 강인한 쿼드로터 yaw를 구하며, 이를 위해 시스템에 근접한 첫 번째 칼만 필터의 설계인자 A, H, Q, R을 설계하였다. 더불어 가속도계와 자이로 센서 또한 칼만 필터를 이용하여 roll, pitch를 구하며, 이를 위해 두 번째 칼만 필터의 설계인자 A, H, Q, R을 설정하였다. 칼만 필터의 성능은 시스템 모델이 실제 시스템과 가까울수록 좋아진다.

본 논문에서는 다중 센서융합 알고리즘의 주요 센서는 자이로가 되며, 이를 보정하기 위한 보조 센서는 가속도계 센서와 지자기 센서이다. 자이로에서 측정된 각속도를 이용하여 쿼드로터의 자세를 구하며, 이때 자이로의 누적 오차 및 센서 오차가 나타난다. 이를 위해 가속도계는 roll과 pitch를 보상하고 지자기센서로 yaw값을 보상하게 된다.

V. 실험

Matlab 시뮬링크를 이용하여 쿼드로터 시스템 모델링 및 PD제어기 그리고 설계된 설계하여 센서융합 알고리즘을 검증하였고, 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실제 쿼드로터에 적용하여 실험하였다.

1. Matlab을 이용한 쿼드로터 시뮬레이션

그림 9에서 입력 부분은 센서 데이터를 이용하여 얻어진 자세 정보이다. 다중 센서 융합 알고리즘을 거쳐 나온 데이터 값은 PD 제어기에 사용이 되고, 이전 자세 정보를 피드백 받아 사용한다. PD 제어기의 출력은 U1, U2, U3, U4와 같다. PD 제어기에서 계산되어진 출력은 쿼드로터 시스템의 입력이 된다. 이러한 입력을 받은 쿼드로터 시스템의 출

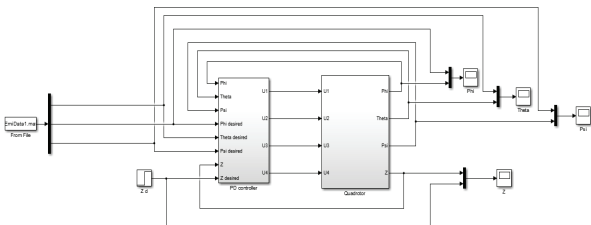


그림 9. 매틀랩 시뮬링크를 이용한 쿼드로터의 모델링.
Fig. 9. Modeling of the quad-rotor using MATLAB/Simulink.



그림 10. 쿼드로터 테스트 짐벌.
Fig. 10. Quad-rotor Test Gimbal.

력은 자세 정보로 나타난다. 이런 과정을 통해 다중 센서 융합 알고리즘을 검증하였고, 이를 결과를 바탕으로 실제 쿼드로터 시스템에 적용해 보았다.

2. 실제 쿼드로터 시스템을 활용한 실험 결과

쿼드로터를 직접 실험하는 것은 위험성이 높은 관계로 보다 안전하게 실험을 하기 위해 쿼드로터 테스트 짐벌을 만들었으며, 그림 10과 같다. 센서 데이터는 쿼드로터가 수평을 유지하고 있을 때 측정된 자세 값이다. 제안한 다중 센서 융합 알고리즘을 실제 시스템에 적용하여 실시간으로 연동하여 실험하였다. 센서 융합 알고리즘을 적용한 쿼드로터의 roll, pitch, yaw는 다음과 같다.

0초부터 5초까지는 쿼드로터가 짐벌에 수평이 되지 않은 상태에서 동작하고 있다. 이 경우 쿼드로터가 동작을 하고 있지만 띄울 수 있는 추력을 가지고 있지 않기 때문에 수평이 되지 않는다. 조종기의 쓰로틀을 천천히 50% 이상 올려 수평이 유지된다고 판단되면 쓰로틀을 50%로 설정한다. 5초부터 25초까지는 짐벌 위에서 쿼드로터가 수평을 유지하고 있다. 일정 시간동안 유지한 후 쿼드로터의 쓰로틀 값을 줄이게 되면 다시 수평을 유지할 수 없다. 그림 11에서는 제안한 알고리즘이 적용된 가속도계와 자이로 센서의 각각의 roll, pitch, yaw값과 칼만 필터를 이용하여 센서 융합한 roll, pitch, yaw값을 보여주고 있다.

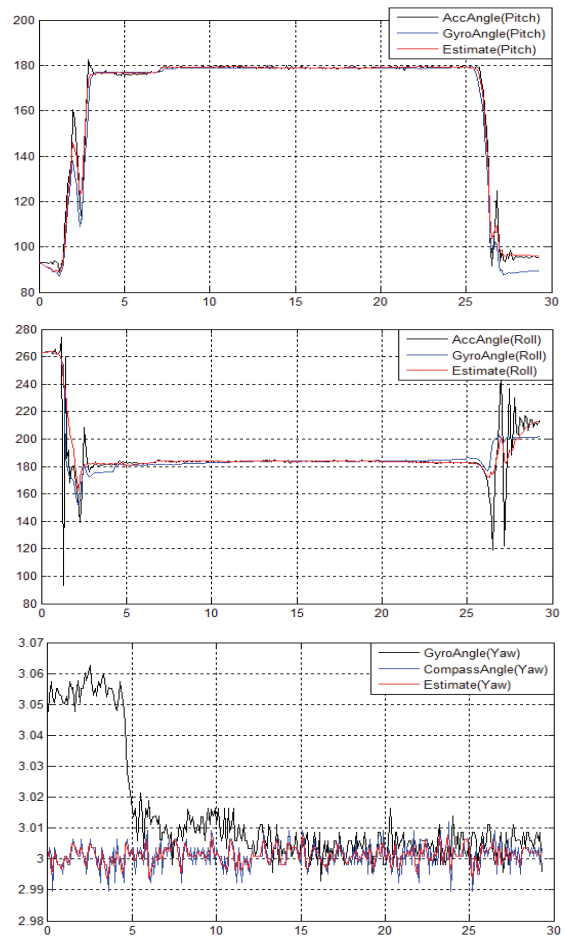


그림 11. 쿼드로터의 자세 분석.
Fig. 11. Attitude analysis of quad-rotor (pitch, roll, yaw).

VI. 결론

본 논문에서는 쿼드로터의 자세 제어와 비행제어 알고리즘 구현 및 시스템 적용에 목적을 두었다. 쿼드로터의 자세 제어를 위해 가속도계와 자이로센서, 지자기 센서 등의 다중 센서 데이터를 융합하여 쿼드로터의 개선된 자세 추정 알고리즘을 제안하였다. 알고리즘을 구현하기 앞서 자이로센서의 바이어스 오차를 보상하였고, HDR 알고리즘을 사용하여 초기 드리프트 오차를 보상하였다. 가속도계 센서는 일정 시간동안 측정을 한 후 바이어스 오차를 구해 보충했다. 가속도계 센서와 같은 방법으로 지자기 센서 또한 바이어스 오차를 보상하였고, 출력되는 데이터를 각도로 변환하였다. 이러한 센서 데이터에 대하여 칼만 필터를 적용하여 쿼드로터의 자세 정보를 비행제어보드에 제공한다.

제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 Matlab를 이용하여 확인 해본 결과, 제안된 알고리즘이 기존 융합 알고리즘인 측정치 융합방법보다 자세 오차 평균은 약 2° 정도 줄어들었다. 제안한 알고리즘을 적용한 쿼드로터는 적용하지 않은 쿼드로터 보다 출력에 잡음이 나타나지 않았고, 알고리즘을 적용한 쿼드로터는 기존의 쿼드로터 시스템 보다 자세 제어에 도움이 되었음을 보여주고 있다. 제안한 알고리즘은 잦은 변화에 강인한 자세 추정이 가능하다는 것을 증명하였다. 향후 연구로는 본 연구에서 제안한 알고리즘에 추가로 비선형 문제 해결에 적합한 UKF 알고리즘에 적용하거나 제안 알고리즘의 각 센서에서 나오는 상태변수에 가중치를 줄 수 있는 기법에 대한 연구가 필요하다.

REFERENCES

- [1] Vicente martinez martinez, "Modelling of the flight dynamics of a quadrotor helicopter," *Cranfield*, pp. 36-45, Sep. 2007.
- [2] J. G. Lim and S. Jeong, "Design and experimental studies of a disturbance observer for attitude control of a quad-rotor system," *Journal Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 11, pp. 1004-10010, Nov. 2013.
- [3] M. D. Schmidt, "Simulation and control of a Quadrotor unmanned aerial vehicle," *University of Kentucky*, pp. 1-26, Apr. 2011.
- [4] S.-H. Choi, Y.-K. Kim, Y.-S. Hwang, H.-W. Kim, and J.-M. Lee, "EKF base outdoor positioning system using multiple GPS receivers," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 8, no. 2, pp. 129-135, Mar. 2013.
- [5] R. W. Beard, "Quadrotor dynamics and control," Brigham Young University, Oct. 2008.
- [6] P. Martin and E. Salaiin, "The true role of accelerometer feedback in quadrotor control," *hal-00422423*, version. 1-6, Oct. 2009.
- [7] J.-S. Kim, "The simulator for control of quadcopter using sensor combination," *Dong a University*, pp. 23-25, 2011.
- [8] D. K. Nam, J. Y. Park, H. W. Park, and D. Y. Kim,

"Some observations on drift-reduction methods for low-cost gyro sensors," *Proc. of KIIS Fall Conference 2010*, vol. 20, no. 2, 2010.

- [9] J. Borenstein and L. Ojeda, "Heuristic reduction of gyro drift in gyro-based vehicle tracking," *Journal of Navigation*, vol. 62, no. 1, pp. 41-58, Dec. 2008.
- [10] S. Haykin, "Kalman filtering and neural networks," *Awiley-Interscience Publication*, pp. 16-53, 2001.
- [11] J. Y. Choe and S. G. Kim, "Study on the localization improvement of the dead reckoning using the INS calibrated by the fusion aensor network information," *Journal Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 8, pp. 744-749, Oct. 2012.



유 동 현

2012년 군산대학교 제어로봇공학과 졸업. 2015년도 전북대학교 대학원 전자공학부 공학석사. 2015년~현재 전북대학교 전자공학부 박사과정. 관심분야는 쿼드로터 제어, SLAM 등.



임 대 영

2010년 전북대학교 전자공학부 졸업. 2012년 전북대학교 대학원 전자공학 공학 석사. 2013년~현재 (유)삼신기업 재직 및 전북대학교 대학원 전자공학부 박사 과정. 관심분야는 자동제어, 지능제어 등.



설 남 오

1998년 전북대학교 전기공학과 공학 박사. 1997년~현재 서남대학교 전기전자공학과 교수. 2006년~현재 서남대학교 산학협력단 단장. 관심분야는 제어계측, 원격제어, 융합기술 등.



박 종 호

1999년 전북대학교 대학원 전기공학과 석사 졸업. 2001년 전북대학교 대학원 전자공학과 박사 수료. 2011년~현재 서남대학교 전기전자공학과 교수. 관심분야는 로봇제어, 제어 이론 등.



정 길 도

1984년 Oregon State University 기계공학. 1986년 Georgia Institute of Technology 기계공학 석사 졸업. 1992년 Texas A&M University 기계공학 박사 졸업. 1996년~현재 전북대학교 전자공학부 교수. 관심분야는 Time -Delay, Robotics, 인공지능 등.