ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol.67, No.7, pp. 871~877, 2018
http://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.7.871

쿼드로터 자세 안정화를 위한 센서융합 기반 3중 중첩 PID 제어기

A Triple Nested PID Controller based on Sensor Fusion for Quadrotor Attitude Stabilization

조 영 완*
(Youngwan Cho)

Abstract - In this paper, we propose a triple nested PID control scheme for stable hovering of a quadrotor and propose a complementary filter based sensor fusion technique to improve the performance of attitude, altitude and velocity measurement. The triple nested controller has a structure in which a double nested attitude controller that has the angular velocity PD controller in inner loop and the angular PI controller in outer loop, is nested in a velocity control loop to enable stable hovering even in the case of disturbance. We also propose a sensor fusion technique by applying a complementary filter in order to reduce the noise and drift error included in the acceleration and gyro sensor and to measure the velocity by fusing image, gyro, and acceleration sensor. In order to verity the performance, we applied the proposed control and measurement scheme to hovering control of quadrotor.

Key Words : Quadrotor, Attitude Stabilization, Nested PID Control, Sensor Fusion, Complementary Filter

1. 서 론

드론(Drone)으로 통칭되는 무인 항공기(UAV : Unmanned Aerial Vehicle)는 초기에는 주로 군사적 목적으로 개발되고 활용되었지만 최근에는 사람이 쉽게 다가갈 수 없는 지역을 자유롭게 탐사하여 영상을 기록하거나 특정 임무를 수행하는 등 활용도가 매우 높아 농업, 물류배송, 항공 촬영, 방송, 교통상황모니터를 비롯한 감시 및 정찰 등 다양한 민간 분야에도 폭넓게 활용되고 있다[1-3]. 이에 따라 드론에 대한 관심은 세계적으로 높아지고 있어 중국의 DJI를 비롯하여 프랑스의 Parrot, 미국의 3D 로보틱스 등은 최근 민간 활용을 위해 다양한 목적으로 소형 드론을 개발하고 있으며 IT 기술과의 접목을 통해 다양한 형태로 발전을 모색하고 있어 드론 관련 산업 자체가 급부상하고 있다[2][4].

그 중 쿼드로터(Quadrotor)는 3차원 공간에서 정지 및 이동이 자유롭다는 장점으로 인해 많은 연구 및 개발이 진행되고 있다[2][5][7]. Amazon은 아마존 프라임 에어(Amazon Prime Air)라는 이름의 무인 배송 서비스를 개발하고 있고 DHL은 접근하기 어려운 지역에 긴급하게 수송하는 솔루션에 초점을 맞춰 패킷콥터(PacketCopter)를 개발하고 있으며, 미국 펜실베니아 주립대학교의 GRASP연구실은 모션 캡처 장비를 이용하여 실내에서 여러 대의 쿼드로터를 사용하여 군집 비행하거나 3차원 경로를 추종, 제어하여 특정 임무를 수행해내는 연구를 발표하였다[5][6].

* Corresponding Author : Dept. of Computer Engineering, Seokyeong University, Korea
E-mail: ywcho@skuniv.ac.kr
Received : May 15, 2018; Accepted : June 3, 2018

쿼드로터의 다양한 활용을 위해서는 원하는 경로를 안정적으로 비행하는 것이 필수적인데 기존의 민간용 쿼드로터는 대부분 사람에 의해 원격으로 조정하는 방식에 의해 비행이 이루어졌다. 원격 조정 방식에 의한 비행은 광범위한 지역의 탐사, 감시, 촬영 등의 활용에 있어 여러 가지 제약을 가질 수 있으므로 보다 다양한 활용을 위해서는 궁극적으로 사람이 개입하지 않는 자율 비행 기술이 요구된다. 그러나 쿼드로터는 추락하거나 충돌할 경우 재산과 인명피해가 발생할 수 있고 다수의 로터가 고속으로 회전하고 있어 더욱 큰 사고로 이어질 수 있으므로 안정성과 신뢰성 확보가 우선되어야 한다.

특히 민간용, 레저용 쿼드로터는 크기가 작아 바람과 같은 외란에 민감한데, 쿼드로터의 자세 각도와 추력을 조종함으로써 공간 위치를 직접 제어하는 방식으로는 조종 기술이 미흡한 일반인이 안정적으로 운용하는 것이 어렵다. 따라서 자세 각도를 조종하는 것 대신 공간 이동 속도나 위치를 자율적으로 제어할 수 있는 시스템이 필요하며 나아가 이를 위해 내부적으로 자세 측정 신뢰성을 높여야 하고 보다 빠르고 안정된 자세 제어가 요구된다.

쿼드로터의 자세 추정에는 일반적으로 칼만 필터(Kalman Filter)와 확장 칼만 필터(EKF: Extended Kalman Filter)가 사용되고[8][13] 자세 제어는 PID 제어[9], LQG/LQR, 적응제어[10], 강인제어 기법[10] 등을 적용한 다양한 접근이 있으나 일반적으로 각도 PID 제어가 널리 사용되고 있다[7][8]. 칼만 필터는 선형 시스템을 위해 고안된 알고리즘이기 때문에 비선형 시스템에서는 짧은 동적 응답에 취약한 단점을 보인다. 이를 보완하고자 고안된 확장 칼만 필터는 구간 선형화로 비선형 시스템에서의 동적 응답을 가능하게 했지만 초기 추정과 시스템 모델 설계

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers

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.

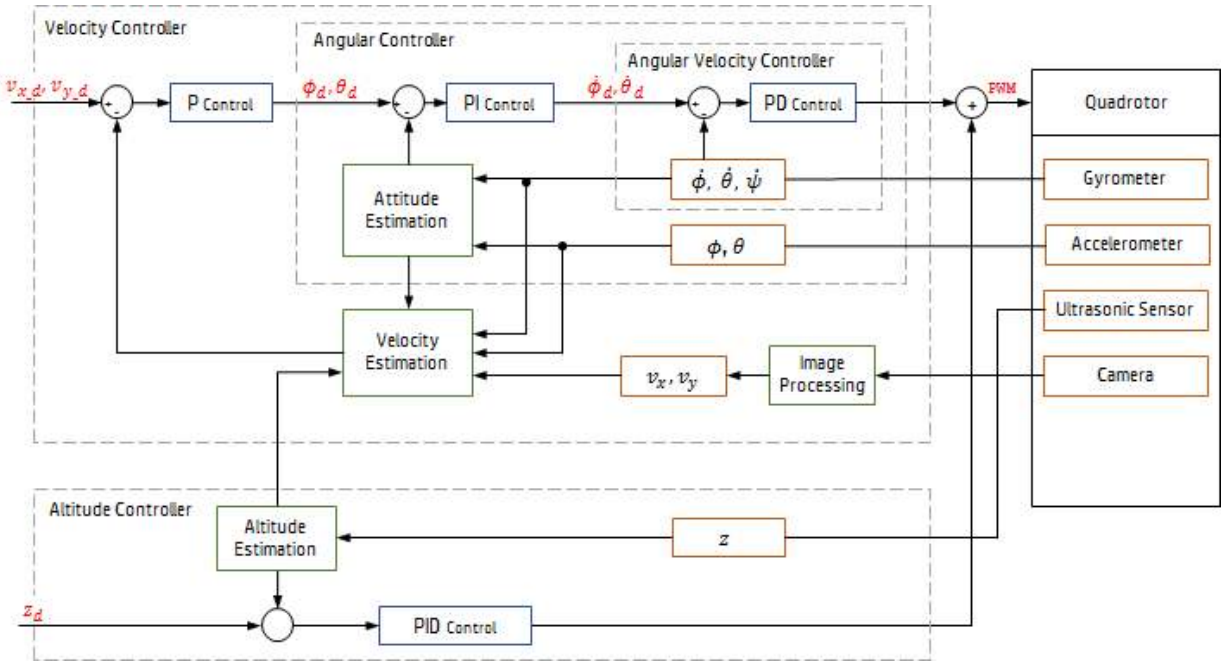


그림 1 제안하는 쿼드로터 제어 시스템 구조

Fig. 1 The proposed Quadrotor control system architecture

에 민감하기 때문에 발산할 가능성을 내포하고 있다. 파티클 필터(Particla Filter)는 비선형 시스템의 상태를 추정하기에 적합하지만 정확도를 높이기 위해 파티클 개수를 늘리면 연산량이 많아져 실시간 자세 추정에 어려움이 있다[13].

자세의 추정을 위해 사용하는 가속도 센서에는 일반적으로 로터의 회전으로 인한 고주파 노이즈가 포함되어 있고 자이로 센서는 적분 오차가 누적되는 성질이 있어 그대로 사용하기는 적합하지 않고 이로 인해 쿼드로터의 위치는 점점 드리프트하게 된다[14]. 본 논문에서는 쿼드로터의 자세 측정을 위해 가속도센서와 자이로 센서의 데이터를 상보필터를 통해 융합하여 사용하고 이를 기반으로 보다 빠르고 정확한 제어를 위해 각속도 PD 제어기, 각도 PI 제어기, 속도 제어기가 중첩된 구조를 갖는 제어기를 제안한다. 관성좌표계에서의 평면 속도 추정을 위해 바닥을 향해 스트랩다운 방식으로 장착된 카메라를 통해 취득한 영상 정보와 관성 센서 데이터를 상보필터를 통해 융합하여 속도를 추정하고 이를 제안한 3중 중첩 구조 PID 제어기의 속도 제어 루프에 적용한다.

2. 쿼드로터 자세 안정화 제어기 구조

본 논문은 쿼드로터 시스템의 자세, 속도, 위치 추정 기법과 이를 기반으로 한 제어 기법을 제안하여 쿼드로터 시스템의 호버링 안정성을 증진시키고자 하는 것이 목적으로 제안하는 쿼드로터 제어 시스템의 전체 구조는 그림 1과 같다. 가속도 센서와 자이로 센서의 측정치 및 이를 융합하여 추정한 자세각은 각각 이중 중첩 구조로 이루어진 PID 제어기의 각속도 제어 루프 및 각도 제어 루프에 궤환되어 제어되고 영상 처리를 통해 추정된 이동 속도 정보는 가속도 센서 및 자이로 센서의 측정치와 융합되어 3중 중첩 구조의 최외곽 속도 제어 루프에 속도 추정치로 제공되며 고도 제어는 별도의 PID 제어기를 통해 수행된다.

2.1 쿼드로터 자세 제어를 위한 이중 중첩 PID 제어기

본 논문에서는 안정적이고 응답이 빠른 2축 자세 제어를 위해 중첩 구조의 PID 제어기를 제안하여 사용한다. 쿼드로터의 현재 자세각과 목표 자세각을 입력으로 한 각도 PI 제어기의 출력은 내첩된 각속도 PD 제어기의 명령치로 인가되어 자이로 센서에서 제공하는 각속도 측정치와 비교하여 각속도 제어를 수행한다. 이때 각속도 제어기와 각도 제어 주기는 $N_c:1$로 하고 Roll, Pitch 축 각속도 제어는 식(1)과 같이 PD 제어기를 사용한다.

$$f_{\phi} = K_p e_{\dot{\phi}} + K_d \frac{d}{dt} e_{\dot{\phi}}$$
$$e_{\dot{\phi}} = (\dot{\phi}_{ref} - \dot{\phi}) \tag{1}$$

이 때 목표 각속도는 각도 PI제어기의 출력이므로 각속도 제어기가 N_c번 수행되는 동안 일정한 값을 유지하다가 갑자기 변하게 된다. 이러한 계단형 입력은 자세 제어를 불안정하게 하는 요인이 될 수 있으므로 본 논문에서는 큐 길이가 N_c인 이동평균필터(MAF : Moving Average Filter)를 이용하여 이를 보간하여 사용한다. 각속

도 제어기의 구조와 그에 따른 로터 제어 구조를 블록 다이어그램으로 표현하면 그림 2와 같다.

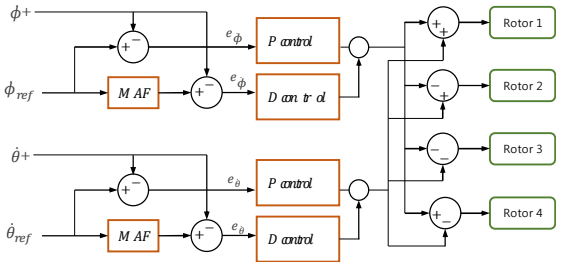


그림 2 각속도 제어기의 블록 다이어그램
Fig. 2 Block diagram of angular velocity controller

각도 제어기는 추정 오일러 각 ϕ와 목표 오일러 각 ϕ_{ref}을 입력으로 각속도 제어기에 제공하는 명령치를 제어하는 역할을 하는 것으로 식 (2)와 같은 PI 제어기를 사용한다.

$$\dot{\phi}_{ref} = f(t) = K_p e_\phi + K_i \int_0^t e_\phi$$
$$e_\phi = (\phi_{ref} - \phi) \tag{2}$$

이 때 추정 오일러 각 ϕ는 관성 센서의 가속도 측정값 및 자이로 측정값을 바탕으로 3장에서 설명하는 센서 융합을 통해 잡음 및 드리프트가 제거된 추정 값을 사용한다. 각도 PI 제어기의 출력과 각속도 제어기 입력 흐름을 블록 다이어그램으로 표현하면 그림 3과 같다.

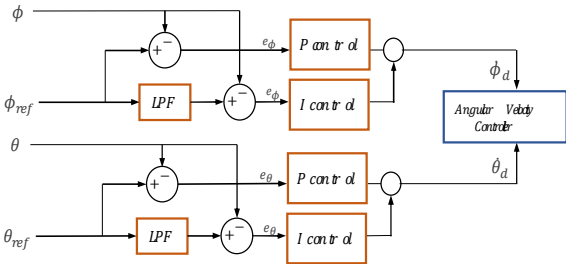


그림 3 각도 제어기의 블록 다이어그램
Fig. 3 Block diagram of angular controller

2.2 쿼드로터 고도 제어 및 Yaw 제어

본 논문에서는 쿼드로터의 고도를 제어하기 위해 PID 제어를 변형하여 사용한다. 일반적으로 사용하는 고도 PID 제어기에서는 적분 제어량이 누적되어감에 따라 이륙 초기에 이륙 지연이 발생하게 되며 이 때, 바닥 근처의 와류현상으로 기체가 다소 불안정해진다. 본 논문에서는 쿼드로터가 지구에 가하고 있는 힘만큼의 추력이 발생되는 제어량 PWM_{base}를 미리 측정하고 이를 기반으로 고도제어를 수행한다. PWM_{base}를 최소 이륙보다 약간 높게 설정하면 빠르게 이륙하여 보다 안정적인 제어를 가능하게 할 수 있다. 이러한 흐름을 블록 다이어그램으로 나타내면 그림 4와 같다.

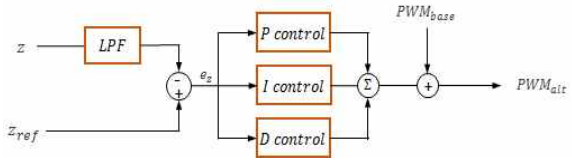


그림 4 고도 제어기의 블록 다이어그램
Fig. 4 Block diagram of altitude controller

Yaw축 제어는 로터 회전 속도 차이로 인한 반토크를 동력으로 삼기 때문에 목표 각도로의 수렴이 Roll, Pitch에 비해 느리다. 따라서 본 논문에서는 Yaw축 제어 안정성을 확보하기 위해 각속도 비례 제어를 사용하고, 목표 각도로의 수렴을 위해 각속도 적분 제어를 병행한다. 각속도 적분 제어기는 각도 비례 제어와 같은 효과로 목표 각도를 향해 제어한다. 마찬가지로 각속도 비례 제어기는 각도 미분 제어와 같은 효과로 Yaw축 회전을 안정화시키는 작용을 한다.

3. 센서융합을 통한 자세 및 속도 측정

3.1 쿼드로터 2축 자세 측정

본 논문에서는 쿼드로터의 2축 자세를 측정하기 위해 가속도 센서와 자이로 센서의 데이터를 관성 좌표계와 기체 좌표계의 회전 관계로 변환한 후 상보필터로 융합하여 자세를 측정한다. 3축 가속도 센서의 데이터(a_X, a_Y, a_Z)와 오일러 각(ϕ, θ)의 관계는 식 (3)과 같다.

$$\phi = atan\left(\frac{a_Y}{\sqrt{a_X^2 + a_Z^2}}\right),\ \theta = atan\left(\frac{a_X}{\sqrt{a_Y^2 + a_Z^2}}\right) \tag{3}$$

3축 자이로 센서는 기체 좌표계의 x, y, z 축을 중심으로 한 회전 각속도를 측정하는 센서로서 기체 좌표계를 기준으로 하므로 자이로 센서와의 융합을 위해서는 식 (4)와 같이 오일러 각의 변화량($\dot{E}$)으로 변환하는 과정이 필요하다.

$$\dot{E} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p + (q\sin\phi + r\cos\theta)\tan\theta \\ q\cos\phi - r\sin\phi \\ (q\sin\phi + r\cos\phi)\sec\theta \end{bmatrix} \tag{4}$$

식 (4)에서 $E = [\phi\ \theta\ \psi]^T$는 오일러 각(roll, pitch, yaw)이고 $\Omega = [p\ q\ r]^T$는 각각 자이로 센서의 x, y, z축 출력 값으로 기체 좌표계 상의 회전 각속도[rad/s]이다.

가속도 센서는 병진운동(translation)과 진동(vibration)에 취약하지만 오차가 누적되지 않고, 자이로 센서는 오차가 누적되지만 병진운동과 진동에 영향을 잘 받지 않는 특징이 있다. 두 센서는

같은 물리량을 측정할 수 있는 센서이고 특성이 상호보완적이므로 융합을 통해서 각 센서의 단점을 보완할 수 있다. 본 논문에서는 그림 5와 같은 구조의 상보필터(Complementary Filter)를 통해 두 센서를 융합하는 방식을 사용하며 이는 식 (5)로 나타낼 수 있다[2].

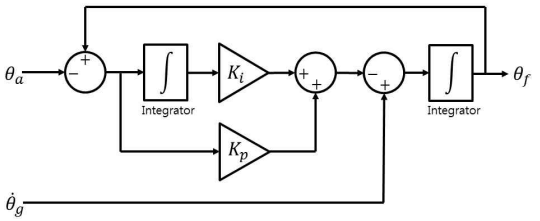


그림 5 가속도 센서와 자이로 센서의 상보융합필터

Fig. 5 Complementary fusion filter of acceleration sensor and gyro sensor

$$\dot{\theta}_g - \dot{\theta}_f = K_p\theta_e + K_i\int \theta_e dt \tag{5}$$

식 (5)의 우항은 일반적인 PI 제어식의 형태로 본 논문에서는 정상상태 오차가 없는 시스템이기 때문에 K_i는 0이나 미소한 값을 사용하고 K_p는 너무 큰 경우 θ_a의 오차까지 반영될 수 있으므로 θ_g의 누적오차만 해소할 정도로 작은 값을 사용한다.

3.2 평면 이동 속도 측정

관성좌표계에서의 평면 위치는 실외에서 GPS를 이용하여 직접 측정할 수 있지만 오차가 3~5m 정도이고 1Hz로 동작하기 때문에 짧은 제어 주기에서 정확한 위치를 취득하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 짧은 주기로 평면상의 위치를 추정하기 위해 기체 하단부에 스트랩다운 방식으로 장착된 카메라로부터 취득한 영상과 가속도, 자이로 센서를 융합하는 방법을 제안한다.

3.2.1 영상과 자이로 센서 융합 기반 속도 측정

본 논문에서는 지면 영상의 픽셀 변위 속도를 추출하고 이로부터 지평면에 대한 쿼드로터의 상대 이동 속도를 구한다. 영상으로부터 구한 상대 이동 속도에는 쿼드로터의 자세 변화에 기인한 성분이 포함되어 있는데 자이로 센서에 기반하여 이 성분을 제거하여 쿼드로터의 평면 이동 속도를 추정한다.

본 논문에서는 영상의 픽셀 변위를 측정하기 위해 옵티컬 플로우(Optical Flow) 알고리즘을 사용하는데 프레임 내 모든 픽셀에 대해 변위를 구하는 밀집 옵티컬 플로우(Dense Optical Flow)는 연산량이 많아 실시간 처리에 적합하지 않으므로 연산량을 줄인 방법으로 희소 옵티컬 플로우(Spare Optical Flow)방법을 사용한다. 희소 옵티컬 플로우에서는 일반적으로 SIFT, HOG, Haar, Ferns와 같은 특징점을 사용하여 픽셀 변위를 측정하지만 이는 또다시 연산량 문제를 야기하므로 본 논문에서는 고정 특징점에 대해 옵티컬 플로우를 적용하고 설정된 특징점들의 변위를 구하는 방법으로 루카스-카나데(Lucas-Kanade) 알고리즘[12]을 사용한다.

특징점들의 변위 d_{ij}로부터 영상의 픽셀 변위 d_I는 다음 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$d_I = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\sum_{i=1}^{m} d_{ij})}{n \cdot m} \tag{6}$$

카메라의 화각 θ_c와 해상도 n_p는 정해져 있고 바닥면과 카메라간의 거리 h는 초음파센서를 통해 알 수 있으므로 평면에 대한 쿼드로터의 이동 속도 v_I는 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$v_I = \tan\left(\frac{\theta_c}{2}\right)\cdot\frac{2h}{n_p}\cdot\frac{d}{dt}d_I \tag{7}$$

식 (7)로부터 구한 평면 이속 속도 v_I에는 쿼드로터의 평면 이동 속도뿐만 아니라 자세 변화($\dot{\phi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\psi}$)에 따른 성분도 포함되어 있으므로 자세변화에 의한 속도 성분을 제거하여야 한다. 쿼드로터의 자세변화에 의한 속도 성분 v_R은 쿼드로터 기체좌표계의 z축 z_B와 관성좌표계의 z축 z_N이 이루는 각을 θ_R이라고 하고 쿼드로터의 고도를 h라 할 때 다음 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$v_R = h\cdot\frac{\dot{\theta_R}}{\cos^2\theta_R} \tag{8}$$

쿼드로터의 자세가 ϕ, θ, ψ일 때, 기체좌표계의 z축 z_B와 관성좌표계의 z축 z_N이 이루는 각 θ_R은 관성좌표계와 기체좌표계의 변환 행렬을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다. 관성좌표계에 대한 기체 좌표계의 회전 행렬 R은 다음 식 (9)과 같이 표현된다.

$$R = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi \\ c\theta s\psi & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix} \tag{9}$$

식 (9)에서 s, c는 각각 sin과 cosine을 나타낸다. 각 θ_R은 z_B를 관성좌표계로 나타내었을 때의 벡터 a_N^B와 z_N이 이루는 각이므로 변환행렬 R을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$\cos\theta_R = \frac{a_{N_z}^B}{|a_N^B|}, \quad a_N^B = R^T\cdot[0\ 0\ 1]^T \tag{10}$$

3.2.2 영상, 자이로, 가속도 센서 융합 기반 속도 측정

쿼드로터 평면 이동 속도는 이상에서 설명한 영상 및 자이로 센서 융합 방법으로 구할 수도 있지만 가속도 센서의 값을 적분하는 방법으로도 구할 수 있다. 이 때, 가속도 센서 값에는 중력

가속도 성분이 포함되어 있으므로 이를 제거하여야 하는데 중력 가속도는 지구 중심 방향으로 9.8[m/s]이지만 실제 측정하면 항상 정확하게 측정되지 않는다. 본 논문에서는 HSR(Heuristic Scale Regulation) 알고리즘을 사용하여 이를 보정하였으며 보정된 가속도 센서 값 p_x, p_y, p_z로부터 관성좌표계에서 가속도 a는 다음 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \bullet \sin\phi \\ \cos\theta \bullet \cos\phi \end{pmatrix} \times 9.8 \tag{11}$$

쿼드로터의 평면 이동 속도는 식 (13)에서 구한 가속도를 적분하여 구할 수 있는데 가속도 센서의 잡음 성분도 함께 적분되므로 잡음이 누적되는 문제가 있다. 가속도 센서로 추정한 속도 v_a는 오차의 누적으로 인해 점점 발산하는 문제가 있고 영상 및 자이로 센서의 융합 방법으로 측정한 속도 값은 잡음을 포함하고 있다. 따라서 본 논문에서는 두 속도 정보의 단점을 해결하기 위해 가속도 센서와 자이로 센서의 융합에 적용하였던 상보필터를 적용하여 융합된 평면 이동 속도 v_f를 식 (12)와 같이 추정한다.

$$\begin{aligned} \dot{v}_a - \dot{v}_f &= K_p v_e + K_i \int v_e \, dt \\ v_e &= v_f - (v_I - v_R) \end{aligned} \tag{12}$$

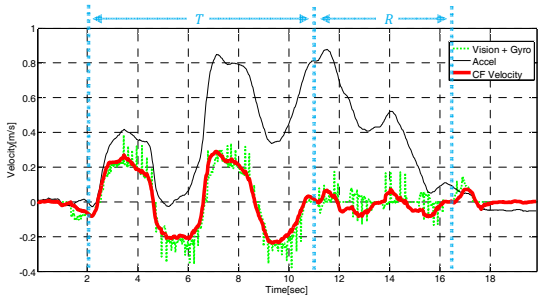


그림 6 센서 융합 실험 결과
Fig. 6 Experimental results of sensor fusion

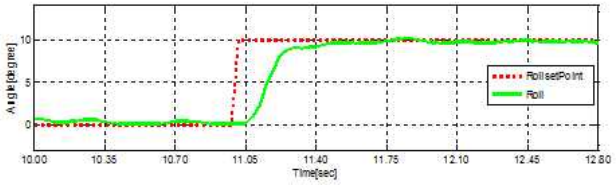
그림 6은 이상에서 논의한 영상, 자이로 센서, 가속도 센서의 융합을 통한 속도 측정 성능을 살펴보기 위해 수행한 실험에서의 속도 측정 결과이다. 영상으로부터 추정한 속도에 포함된 자세로 인한 바이어스 성분은 자이로 센서 융합을 통해 제거되었고 영상 기반 측정값의 잡음 성분 및 가속도 센서의 드리프트 성분은 가속도 센서와의 융합으로 제거되었음을 확인할 수 있었다.

4. 실험 및 결과

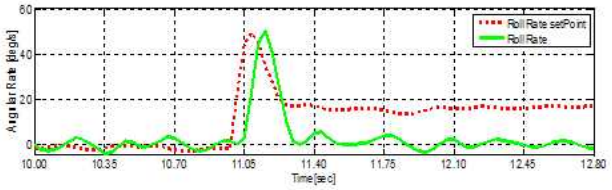
본 논문에서는 제안한 3중 중첩 구조의 PID 제어기와 상보필터 기반 센서 융합 방법의 성능을 검증하기 위해 자세 제어 및 속도 제어 실험을 수행하였으며 그 결과를 제시하면 다음과 같다.

4.1 자세 제어 실험 결과

본 논문에서는 제안된 3축 중첩 PID 제어기를 Roll 축과 Pitch 축 제어에 적용하였으며 Roll 축에 대한 제어 결과를 그림 8에 제시하였다.



(a) 각도 제어 루프의 제어 결과



(b) 각속도 제어 루프의 제어 결과

그림 7 Roll 축에 대한 자세 제어 결과
Fig. 7 Results of attitude control for roll axis

그림 7은 각각 각도 제어 루프(a)와 각속도 제어 루프(b)의 결과를 나타낸다. 각도 제어는 초기에 안정적 호버링을 유지하다 약 11초경 변경된 목표 각도에 대해 제어 결과가 잘 추종하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이에 비해 각속도 제어 루프에서는 오프셋 오차가 있는 것처럼 나타나는데 이는 중첩 PID 제어기의 특성으로 중첩 구조의 외곽에 있는 각도 제어 루프의 오차를 줄이기 위한 제어 결과로 해석된다.

Yaw 축 회전 제어는 Roll과 Pitch 축에 비해 z축 방향 추력에 미치는 영향이 크므로 본 논문에서는 Yaw 축 제어가 고도 변화에 주는 영향을 줄이기 위해 간섭 보완 기법을 적용한 별도의 제어를 수행하였다. 그림 8은 Yaw제어가 z축 방향 추력에 미치는 영향을 줄이기 위해 제안된 제어기의 실험 결과를 나타내는 것으로 약 26초의 순간에 행해진 Yaw 축 제어에 의해 약 $10cm$ 정도의 고도 변화를 나타냈지만 고도가 다시 안정화되고 있음을 알 수 있다.

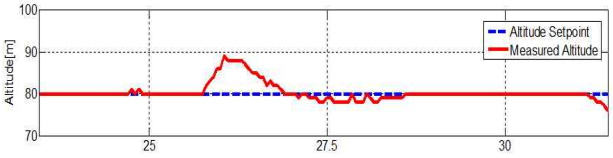


그림 8 Yaw 제어기 실험 결과
Fig. 8 Results of Yaw axis control

4.2 속도 제어 실험 결과

본 논문에서는 제안된 속도 제어기의 성능을 평가하기 위해 속도 및 각도 명령치를 2축 원점으로 고정한 원점 호버링에 대해 실험하였다. 외란을 가하지 않았을 경우와 일정한 외란(충격)을 가했을 경우에 대해 실험하였으며, 결과는 추정된 평면 이동 속도를 적분하여 위치로 나타내었다. 외란을 가하지 않은 상태에서 속도 제어기를 적용한 경우의 실험 결과는 그림 9와 같다.

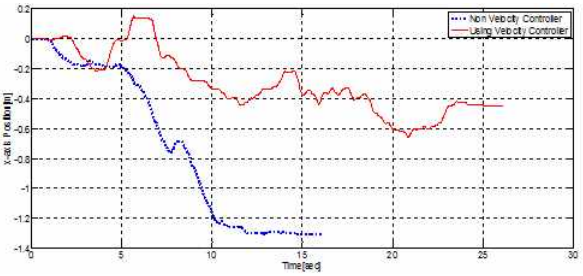
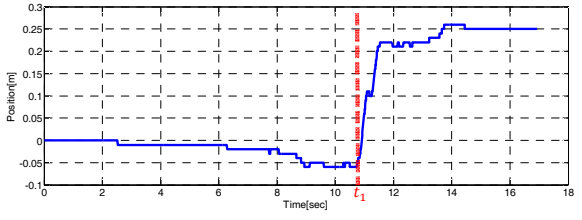
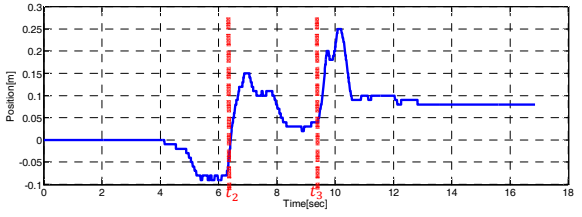


그림 9 원점 호버링 실험의 x축 위치 변화

Fig. 9 Changes in x-axis position for hovering experiment at origin



(a) 속도 제어기를 적용하지 않은 경우



(b) 속도 제어기를 적용한 경우

그림 10 외란을 가한 경우 원점 호버링 실험 결과

Fig. 10 Experimental results of hovering at origin with disturbance

그림 9의 결과에서 속도 제어기를 적용한 경우의 결과는 실선으로 나타내었고 자세 제어(각도 제어)만을 적용한 경우의 결과는 점선으로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 속도 제어기를 적용한 경우는 자세 제어만을 수행한 경우보다 위치 변화가 훨씬 적어 안정적인 호버링을 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

본 논문에서는 외란에 대한 성능을 평가하기 위해 호버링하고 있는 쿼드로터의 x축 방향으로 외력을 가하면서 속도 제어기를 적용하지 않은 경우와 적용한 경우에 대해 각각 위치 변화를 측정하였다. 그림 10은 t_1의 시점에 1초 동안의 가해진 외력에 대해 속도 제어기를 적용하지 않은 경우의 결과(a)와 t_2와 t_3 시점에 두 차례 가해진 외력에 대해 속도 제어기를 적용한 경우의 결과(b)를 나타낸다.

속도 제어기를 적용하지 않은 경우(a)는 t_1에서 가해진 외란에 대해 자세 제어를 수행하기는 하나 외력이 가해지는 동안 속도 제어가 이루어지지 않아 결과적으로 약 $30cm$ 정도의 위치 변화가 발생한 것을 알 수 있다. 반면 속도 제어기를 적용한 경우(b)는 t_2와 t_3에서 가해진 외력에 대해 속도 제어가 수행되고 결과적으로 위치 변화량이 적은 것을 확인할 수 있다. 본 실험에서는 정위치 유지 호버링 시에 속도 제어기를 적용한 경우 기존에 비해 약 70% 정도 성능이 향상된 것을 확인하였고 외란을 가했을 때는 약 66% 정도 성능이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 쿼드로터 시스템의 안정된 호버링을 위해 3중 중첩 구조의 PID 제어 방식을 제안하고 이에 필요한 3축 자세, 고도 및 속도 측정의 성능 향상을 위해 상보필터 기반 센서 융합 기술을 적용하여 센서의 잡음 및 드리프트 오차 문제를 개선하였다.

관성 좌표계에서 기체의 위치는 기체의 자세 각도에 의해 만들어지기 때문에 빠르고 정확한 자세 제어가 우선되어야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 각속도 PD 제어기를 내첩하고 각도 PI 제어기를 외첩한 형태의 중첩 PID 제어기를 제안하여 자세 제어를 수행하고 이에 속도 제어를 위한 루프를 추가하여 외란에 대해서도 안정적 호버링이 가능하도록 하였다. 또한 본 논문에서는 기체 각 측정을 위해 사용하는 가속도 및 자이로 센서에 포함된 잡음과 드리프트 오차를 줄이기 위해 상보필터를 적용하여 두 센서를 융합함으로써 자세 측정 성능을 개선하였다. 나아가 쿼드로터 평면 이동 속도 측정을 위해 고가의 속도 측정 장비 없이 영상과 자이로 및 가속도 센서를 융합하여 속도를 측정하는 방법을 제안하였다.

본 논문에서는 쿼드로터의 원점 호버링 제어에 제안한 자세 제어 및 속도 제어, 센서 융합 기반 자세 및 속도 측정 방법을 적용하여 성능을 확인하였다. Roll 축과 Pitch 축 자세 안정화 실험 결과 변경된 자세 명령에 대해 빠른 속도로 추종함을 확인하였고 Yaw각 제어에 대해서는 추력과 로터 회전 속도와의 관계를 이용하여 제어기 출력을 조절하는 기법을 적용하여 고도제어에 미치는 영향을 약 47% 정도 줄일 수 있음을 확인하였다. 센서 융합 기반 속도 측정 및 3중 중첩 제어기가 적용된 속도 제어의 경우 외란을 가하지 않았을 때 약 70% 정도 성능이 개선되었으며 외란을 가했을 때는 약 50% 정도 성능이 개선되어 호버링이 더 용이함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2015학년도 서경대학교 교내연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

References

[1] M. Hassanalian and A. Abdelkefi, "Classifications, applications, and challenges of drones: A review", *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 91, pp. 99-131, 2017.

[2] I. Sa and P. Corke, "Estimation and control for an open-source quadcopter", *in Proc. Australian Conf. Robotics and Automation*, 2011.

[3] S. K. Hong, "Fuzzy logic based closed-loop strapdown attitude system for unmanned aerial vehicle (UAV)", *In Sensors & Actuators: A. Physical*, vol. 107, no. 2, pp. 109-118, 2003.

[4] P. J. Bristeau, F. Callou, D. Vissiere, N. Prtit, "The Navigation and Control technology inside the AR.Drone micro UAV", *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), 18(PART 1)*: pp. 1477-1484, 2011.

[5] D. Mellinger, M. Shomin, V. Kumar, "Control of quadrotors for robust perching and landing", *International Powered Lift Conference*, pp 119-126, 2010.

[6] N. Michael, D. Mellinger, Q. Lindsey, and V. Kumar, "The GRASP multiple micro UAV testbed", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 17, no. 3, pp. 56-65, 2010.

[7] A. Zulu and S. John, "A Review of Control Algorithms for Autonomous Quadrotors", *Open Journal of Applied Science*, vol. 4, pp. 547-556, 2014.

[8] S. Bouabdallah and R. Siegwart, "Full Control of a quadrotor", *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 153-158, 2007.

[9] J. Li and Y. Li, "Dynamic Analysis and PID Control for a Quadrotor", *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pp. 573-578, 2011.

[10] I. Palunko and R. Fierro, "Adaptive Control of a Quadrotor with Dynamic Changes in the Center of Gravity", *Proceedings of the 18th IFAC World Congress*, pp. 2626-2631, 2011.

[11] C. Tony and W. Mackunisy, "Robust Attitude Tracking Control of a Quadrotor Helicopter in the Presence of Uncertainty", *Proceedings of the IEEE 51st Annual Conference on Decision and Control (CDC)*, pp. 937-942, 2012.

[12] B. Lucas and T. Kanade, "An iterative image registration technique with an application to stereo vision", *In Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 674-679, 1981.

[13] Y. Cho and J. Hwang, "A Study on EKF-SLAM Simulation of Autonomous Flight Control", *International Journal of Software Engineering and its Applications*, vol. 9, no. 9, pp. 269-282, 2015.

[14] H. Kim and Y. Cho, "A Design of Hovering System for Quadrotor UAV using Multi-Sensor Fusion", *International Journal of Smart Device and Appliance*, vol. 4, no. 2, pp. 13-20, 2016.

저 자 소 개

조 영 완 (Youngwan Cho)

1991년: 연세대학교 전자공학과 공학사
1993년: 연세대학교 전자공학과 공학석사
1999년: 연세대학교 전자공학과 공학박사
2000년~2003년: 삼성전자 책임연구원
2003년~현재: 서경대학교 컴퓨터공학과 교수
관심분야 : 지능제어시스템, 무인이동체제어, 딥러닝 및 강화학습