

쿼드콥터 자세 안정화를 위한 이중루프 PID 제어기

전 두 선*, 이 상 록^o

Double-Loop PID Controller for Quadcopter Attitude Stabilization

Du-Seon Jeon*, Sangrok Lee^o

요 약

본 논문은 센서융합 필터와 이중루프 PID 제어기를 적용하여 안정적인 호버링과 비행이 가능한 쿼드콥터 시스템을 구현하였다. 이중루프 PID 제어기는 내부 루프와 외부 루프로 구성된다. 내부 루프는 각속도 PID 제어기이고, 외부 루프는 각도 P 제어기이다. 또한, 가속도센서와 자이로센서에 적용되는 마호니 기반의 센서융합 필터는 비행 자세를 보다 안정적으로 추정한다. 쿼드콥터 제어모듈은 32비트 MCU인 ST32F103RB와 3축 가속도센서 및 3축 자이로센서로 구성된 IMU 센서로 구현된다. 이중루프 PID 제어기에서 각각의 이득이 자세 안정화에 미치는 영향을 분석하였다. 결과적으로 각속도와 각도 기반의 이중루프 PID 제어기가 각도만을 적용하는 단일 PID 제어기보다 응답시간이나 자세 안정화에서 우수함을 확인하였다. 특히, 이중루프 PID 제어기가 기존의 단일 PID 제어기에 비해 자세 안정화 시간이 대략 20%로 단축됨을 확인하였다.

Key Words : Quadcopter, double loop PID controller, IMU sensor, Mahony filter, hovering

ABSTRACT

In this paper, we implemented quadcopter system using sensor-fusion filter and double loop PID controller in order to support stable hovering and flight. The double loop PID controller consists of an inner loop and an outer loop. Inner loop is an angular velocity PID controller, and outer loop is an angle P controller. And Mahony-based sensor-fusion filter using accelerometer and gyroscope is adopted to estimate the flight attitude. Quadcopter control module is implemented using ST32F103RB of 32-bit microcontroller and IMU sensor of 3-axis accelerometer and 3-axis gyroscope. We analyzed the effect of each gain factor on stabilization in double loop PID controller. Finally, the double loop PID controller using angle and angular velocity shows better response time and stabilization than the single PID controller using only angles. In particular, we confirmed that the stabilization time of the double loop PID controller is shortened by about 20% compared with the single PID controller.

I. 서 론

최근 MCU와 MEMS(Micro-Electro-Mechanical System) 기반의 센서 기술의 발달에 따라 UAV(Unmanned Aerial Vehicle) 또는 드론으로 불리는 무인기 관련 연구가 활발히 이루어지고 있다. 또

한, 드론은 Google, Amazon, DHL 등의 외국 기업들과 국내의 우체국과 같은 다양한 기업들이 무인 택배 시스템에 적용함으로써 실제 생활에 다양한 활용가능성을 입증하였다. 특히, 쿼드콥터형 드론은 제어가 용이하여 재난 지역이나 건물이 밀집된 도심에서와 같이 사람이 쉽게 다가갈 수 없는 환경에서 사람을 대신

* First Author : Shinhan University, Department of IT Convergence Engineering, jeonds1127@naver.com, 학생회원

^o Corresponding Author : Shinhan University, Department of IT Convergence Engineering, srlee@shinhan.ac.kr, 종신회원
논문번호 : 201811-359-D-RN, Received November 7, 2018; Revised February 8, 2019; Accepted February 21, 2019

하여 영상정보를 획득하고 임무를 수행할 수 있어 최근 다양하게 활용되고 있다. 쿼드콥터는 throttle, pitch, roll, yaw의 제어를 통해 모터의 변속으로 인한 프로펠러의 추력을 조절하여 상승/하강, 전진/후진, 좌진/우진, 좌회전/우회전으로 방향전환이 자유롭고 호버링(hovering)이 가능하다. 따라서, 쿼드콥터의 안정적인 비행을 제어하기 위한 다양한 논문들이 발표되었다¹⁻⁷⁾.

논문 [1]에서는 쿼드콥터의 자세와 속도를 추정을 위해 가속도센서, 자이로센서, 초음파센서, 카메라를 적용하였다. 특히, 쿼드콥터의 자세 제어를 위해 3중첩 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 개선하였다¹⁾. 논문 [2]에서는 아두이노 메가2560, MPU6050 센서, BLDC 모터, ESC를 적용하여 쿼드콥터를 구현하였다. 특히, 진동에 의한 센서 데이터의 특성을 고려하여 PID 제어에서 자세의 변화량을 반영할 때 추정된 각도의 변화량을 사용하는 대신 자이로센서로부터 얻은 각속도를 D(미분) 성분에서 사용함으로써 보다 개선된 제어 효과를 얻고 있다²⁾.

본 논문에서는 안정적인 호버링 및 비행을 위해서 센서융합필터와 이중루프 PID 제어기를 적용하는 쿼드콥터 자세제어 시스템을 구현하고, 성능을 분석하였다. 2장에서는 구현된 드론 본체의 하드웨어 설계 결과를 설명한다. 3장에서는 안정적인 자세제어를 위한 마호니 필터 기반의 센서융합필터와 이중루프 PID 제어기의 동작과정을 설명한다. 4장에서는 이중루프 PID 제어기에 각각의 이득이 시스템 응답속도와 안정화에 미치는 영향을 분석하고, 제안된 이중루프 PID 제어기와 기존의 표준 PID 제어기와의 성능을 비교분석하였다.

II. 시스템 하드웨어 설계 및 구현

2.1 쿼드콥터 하드웨어 설계

쿼드콥터 본체는 원격제어 리모컨에서 전달된 자세 제어 명령과 IMU(Inertial Measurement Unit) 센서에서 측정된 현재 자세 상태를 활용하여 기체의 자세를 안정적으로 제어한다. 그림 1은 구현할 쿼드콥터 제어 모듈의 블록도를 보이고 있다. MCU는 STMicroelectronics사의 32비트 Cortex-M3 시리즈의 STM32F103RB를 사용하였고 최대 클럭속도는 72MHz이다. 무선 송수신 모듈인 nRF24L01은

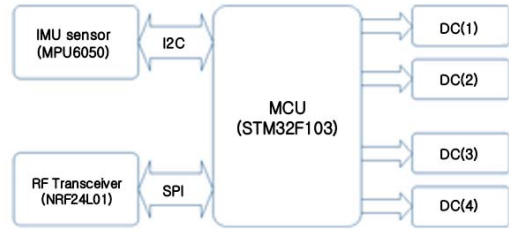


그림 1. 쿼드콥터 제어 모듈 블록도
Fig. 1. Block diagram of quadcopter control module

STM32F103RB MCU와 SPI 방식으로 인터페이스하여 설정되고 원격 리모컨으로부터 전달되는 자세 제어 명령을 수신한다. 쿼드콥터의 현재 자세 상태는 IMU 센서인 MPU6050을 사용하여 가속도 값과 각속도 값을 획득한다. MPU6050은 3축 가속도센서와 3축 자이로센서로 구성되고, 6개의 정보는 각각 16비트로 A/D 변환된 후 저장된다. MPU6050에서 A/D 변환된 정보들은 I2C 직렬통신방식으로 MCU에 전달되고, 인터페이스 속도는 100kbps로 설정하였다. 자이로센서와 가속도센서의 업데이트 주기는 각각 1kHz로 설정하였다.

2.2 쿼드콥터 하드웨어 구현

쿼드콥터 본체 제어 보드는 그림 1의 블록도를 기준으로 회로를 설계하고, PCB를 구현하였다. 그림 2(a)는 구현된 PCB이고, 그림 2(b)는 제작된 쿼드콥터의 본체 프레임이다. 쿼드콥터 제어모듈의 PCB 크기는 50mm x 60mm이다. IMU센서와 무선 송수신 모듈은 보드 하단에 위치한다. 4개의 DC 모터는 1x2 커넥터를 통해 연결되고, 보드 전원은 7.4V/850mA의 리튬배터리를 적용하였다. 그림 2(b)의 쿼드콥터 본체 프레임에서 프레임 크기는 550mm x 550mm이고, 무게는 219g이다.

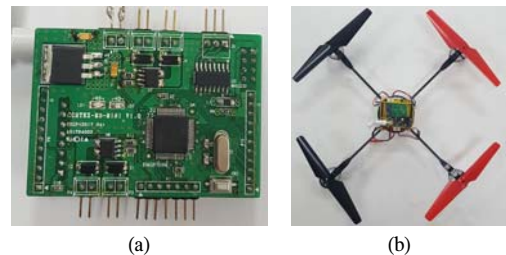


그림 2. 제작된 쿼드콥터 사진. (a) 제어 모듈, (b) 본체 프레임
Fig. 2. Photos of the manufactured quadcopter. (a) quadcopter control module, (b) quadcopter main frame

III. 쿼드콥터 자세 안정화 제어기 구조

3.1 센서 융합을 통한 자세 측정

본 논문에서는 쿼드콥터의 자세를 추정하기 위해서 IMU 센서로 3축 가속도센서와 3축 자이로센서로 구성된 MPU6050을 사용했다. 가속도 센서는 연직방향으로 작용하는 중력 가속도를 얼마나 받고 있는지 측정이 가능하므로 이를 이용해 기울어진 각도를 측정할 수 있지만 잡음(noise)에 민감하다는 문제점을 갖고 있다. 그리고 자이로 센서는 단위 시간당 각 축의 방향각의 변화를 나타내는 각속도를 적분하여 각도를 구할 수 있지만 센서의 온도영향 및 기타 요인으로 측정값에 오차가 발생하며 그 오차까지 적분하게 되면서 드리프트 현상이 발생하여 시간이 지날수록 정확한 측정을 하지 못하고 불안정해지는 문제점을 갖고 있다.

본 논문에서는 가속도 및 자이로 센서에 포함된 잡음과 드리프트 오차를 줄이기 위해서 확장 칼만 필터(EKF: Extended Kalman filter)를 기반으로 한 마호니 필터(Mahony filter)를 적용하여 두 센서를 융합함으로써 자세 측정 성능을 개선하였다^{8,9)}.

그림 3은 가속도 센서, 자이로 센서, 그리고 마호니 필터를 각각 적용하여 수평상태, 느린 움직임, 빠른 움직임을 가했을 때 어떠한 성능차이가 나는지 보여준다. 결과적으로 각각의 가속도와 자이로센서만을 이용하여 추정한 각도에서 나타나는 잡음 및 드리프트 오차 문제를 마호니 필터를 적용함으로써 개선하고 자세 측정 성능을 향상시켰다는 것을 보여준다.

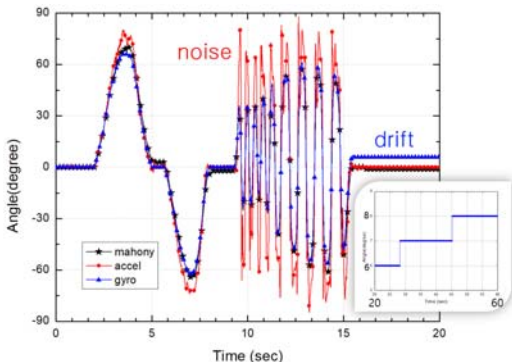


그림 3. 가속도센서, 자이로센서, 그리고 마호니 필터의 각도성능 비교
Fig. 3. Comparison of angle measurement between accelerometer and gyroscope and Mahony filter

3.2 이중루프 PID 제어기 구조

그림 4는 일반적으로 많이 사용되는 각도 PID인

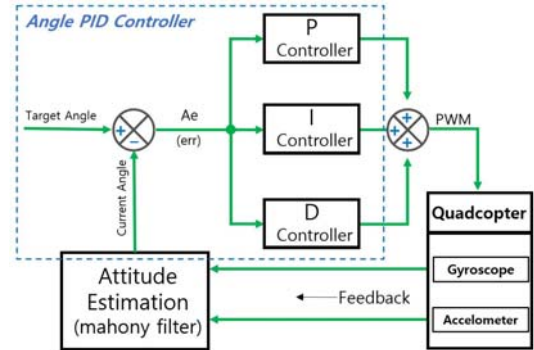


그림 4. 표준 PID 제어기의 블록도
Fig. 4. Block diagram of standard PID controller

표준 PID 제어기의 블록 다이어그램을 나타냈다. 사용자가 지정한 목표 자세각과 센서를 이용하여 측정되는 쿼드콥터의 현재 자세각의 오차를 이용하여 PID 제어기를 구성하게 되는데 각도라는 한 가지 축에만 의존하므로 매우 직관적이라고 볼 수 있다. 표준 PID 제어기는 식(1)과 같은 각도 PID 제어기를 사용하고, $Ae(t)$ 는 각도 오차(Angle error)를 나타낸다. 또한, K_p 는 비례(P) 이득상수, K_i 는 적분(I) 이득상수, K_d 는 미분(D) 이득상수를 나타낸다. 결과적으로 $Ae(t)$ 가 PID 제어기를 통해 제어 값(MV, manipulated variable)을 결정하게 된다.

$$MV(t) = K_p Ae(t) + K_i \int_0^t Ae(t) + K_d \frac{dAe(t)}{dt} \quad (1)$$

그림 5는 표준 PID 제어기의 호버링 및 비행성능을 더욱 향상시키고자 제안된 이중루프 PID 제어기의 블록도이다. 이중루프 PID 제어기는 표준 PID 제어기와 달리 외부 루프와 내부 루프로 구성되고, 외부 루프는 각도 P 제어기, 내부에 각속도 PID 제어기로 각도와 각속도의 두 가지 축에 의존하는 P-PID 제어기로 이루어져있다.

사용자가 지정한 목표 자세각과 센서를 이용하여 측정되는 쿼드콥터의 현재 자세각의 오차를 외부에 P 제어기를 통해 목표 각속도로 설정하고, 설정한 목표 각속도와 측정되는 쿼드콥터의 현재 각속도의 오차를 이용하여 내부에 PID 제어기를 구성했다. 각도와 각속도라는 두 가지 축에 의존하므로 덜 직관적이고, 실질적으로 모터 반응에 큰 영향을 주는 축은 각속도이므로 각도제어였던 표준 PID보다 뛰어난 응답 속도와 안정성을 기대할 수 있다.

이중 루프 PID 제어기는 식(2), 식(3)과 같은 각도

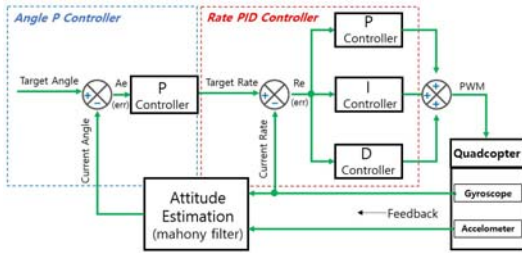


그림 5. 이중루프 PID 제어기의 블록 다이어그램
Fig. 5. Block diagram of double-loop PID controller

와 각속도 제어를 사용하게 되는데 식(2)에서 목표 각도(Target Angle)와 현재 각도(Current Angle)의 오차인 $Ae(t)$ 는 각도 오차(Angle error)를 나타내고, 외부 비례(outer P) 이득상수인 K_{op} 는 $Ae(t)$ 와 목표 각속도(Target Rate)를 형성하게 된다. 그리고 식(3)의 목표 각속도와 현재 각속도(Current Rate)의 오차인 $Re(t)$ 는 각속도 오차(Rate error), K_p 는 비례(P) 이득상수, K_i 는 적분(I) 이득상수, K_d 는 미분(D) 이득상수를 나타내는데, 결과적으로 $Re(t)$ 가 PID 제어를 통해 제어 값(MV, manipulated variable)을 결정하게 된다.

$$TargetRate(t) = K_{op} * Ae(t) \quad (2)$$

$$MV(t) = K_p Re(t) + K_i \int_0^t Re(t) + K_d \frac{dRe(t)}{dt} \quad (3)$$

IV. 이중루프 PID 제어기의 성능분석

4.1 각각의 이득이 안정화에 미치는 영향

본 시스템에서는 이중루프 PID 제어기의 계환 주기를 400Hz로 구성하였고, 이중루프 PID의 각각의 P-PID 이득을 튜닝하기 위해서 지글러-니콜스(Ziegler-Nichols) 튜닝 방법을 거친 후 메뉴얼 튜닝을 이용하여 다시 한번 튜닝을 진행하였다[10]. 지글러-니콜스 및 메뉴얼 튜닝으로 구한 최종적인 이득 값은 각각 $K_{op} = 20$, $K_p = 7$, $K_i = 2$, $K_d = 0.8$ 이다.

그림 6부터 그림 9는 이중루프 PID 제어기에서 각각의 이득이 안정화에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 pitch축은 고정시켜놓고 roll축의 목표 각도를 -30도로 순간적으로 변화시키면서 쿼드콥터의 자세를 측정하였다.

그림 6은 내부 P, I, D 이득을 고정한 상태에서 외부 P 이득을 {16, 18, 20, 22, 24}으로 변화시키면서 상태를 측정하였다. 외부 P가 작을 때는 오버슈트가

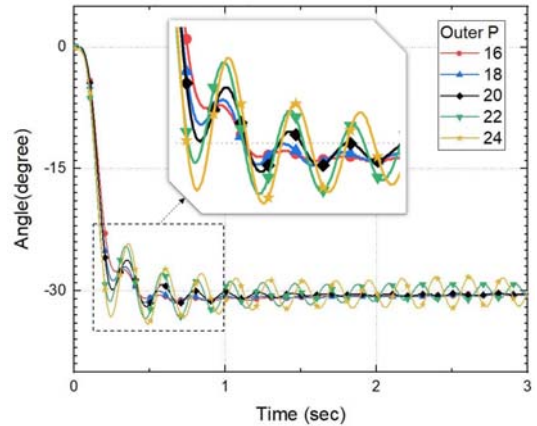


그림 6. 외부 P 이득 변화에 따른 안정화 특성 비교
Fig. 6. Comparison of stabilization characteristics in variation of the outer P gain

거의 발생하지 않아서 상대적으로 목표 각도에 느리게 접근하게 되고, 외부 P가 클 때는 오버슈트가 증가하여 상대적으로 목표 각도에 빠르게 접근하지만 불안정하여 안정화까지 도달하는 시간이 상대적으로 많이 걸리는 단점을 갖고 있다. 외부 P 이득은 결과적으로 목표 각속도를 설정하는 역할을 하기 때문에 쿼드콥터가 목표 각도까지 접근하는 속도에 직접적인 영향을 주게 된다.

그림 7은 외부 P와 내부 I 및 D 이득을 고정한 상태에서 내부 P 이득을 {5, 6, 7, 8, 9}로 변화시키면서 안정화 상태를 측정하였다. 내부 P 이득이 작을 때는 오버슈트가 거의 발생하지 않아서 상대적으로 목표 각도에 느리게 접근하지만 내부 P 이득이 클 때는 오버슈트가 증가하여 상대적으로 목표 각도에 빠르게

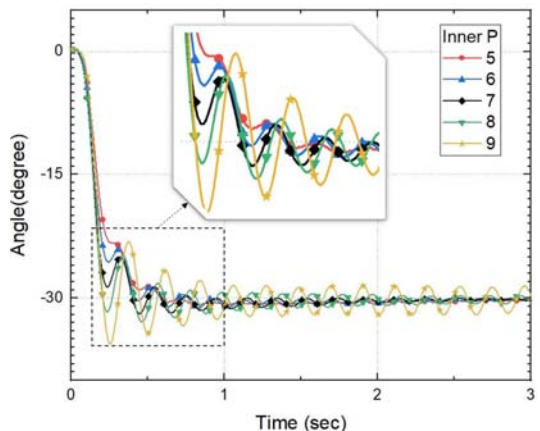


그림 7. 내부 P 이득 변화에 따른 안정화 특성 비교
Fig. 7. Comparison of stabilization characteristics in variation of the inner P gain

접근하지만 불안정하여 안정화까지 도달하는 시간이 상대적으로 많이 걸리는 단점을 갖고 있다. 내부 P 이득의 경향은 외부 P 이득과 거의 유사하고 빠른 수렴을 위해서는 내부 P보다 외부 P 이득이 커야한다.

그림 8은 외부 P와 내부 P 및 D 이득을 고정한 상태에서 내부 I 이득을 {0, 1, 2, 3, 4}로 변화시키면서 안정화 상태를 측정하였다. 내부 I 이득이 커질수록 오버슈트가 증가하고 전체적인 시스템 주기까지 증가하는 결과를 보여주지만 이중루프 PID 제어기에서 I 이득의 영향은 거의 없었다.

그림 9는 외부 P, 내부 P 및 I 이득을 고정한 상태에서 내부 D 이득을 {0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1}로 변화시키면서 안정화 상태를 측정하였다. 내부 D 이득이 커질수록 오버슈트를 억제하는 효과를 띄게 되는데 이득이 너무 큰 경우에는 오버슈트가 거의 발생하지 않

아서 상대적으로 목표 각도에 느리게 접근하게 된다. 반대로 이득이 너무 작다면 오버슈트가 증가하기 때문에 상대적으로 목표 각도에 빠르게 접근하지만 불안정하여 안정화까지 도달하는 시간이 상대적으로 많이 걸리는 단점을 갖고 있다.

4.2 표준 PID와 이중루프 PID의 성능비교

본 논문에서는 최종적으로 제한한 이중루프 PID와 표준 PID 제어기의 성능을 실험을 통해 비교분석하였다. 지글러-니콜스와 매뉴얼 튜닝을 이용하여 튜닝한 두 제어기를 각각 적용하여 목표 각도를 {-15, -30, -45, -60}으로 변화시키면서 응답 속도 및 안정성을 측정된 결과를 그림 10에 나타냈다. 검정색은 표준 PID 제어기이고, 붉은색은 제안된 이중루프 PID 제어기의 결과이다. 목표 각도에 +2 정도의 오차를 계속 유지하는 시작점을 안정화 기준으로 잡았고, 결과적으로 표 1을 보면 표준 PID 제어기에 비해 이중루프 PID 제어기는 안정화 시간이 평균 20% 정도로 단축되어 더 안정된 호버링 및 비행이 가능하다는 것을 알 수 있다.

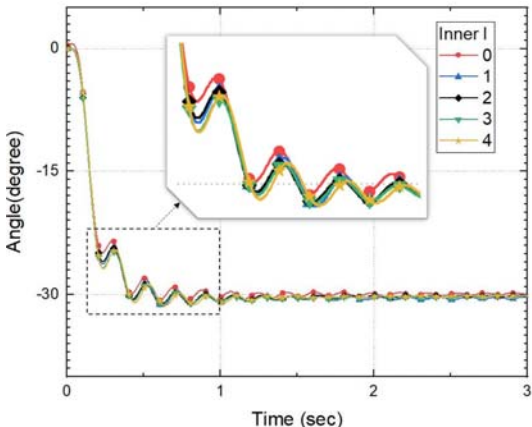


그림 8. 내부 I 이득 변화에 따른 안정화 특성 비교
Fig. 8. Comparison of stabilization characteristics in variation of the inner I gain

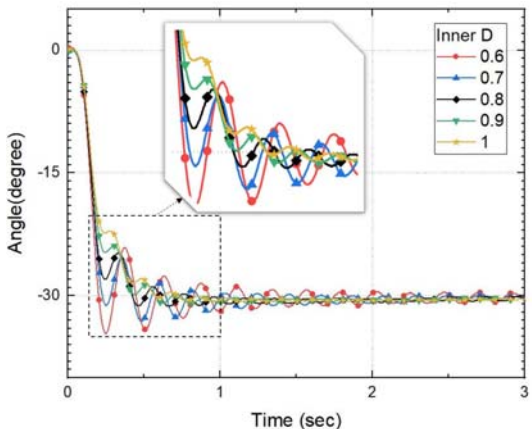


그림 9. 내부 D 이득 변화에 따른 안정화 특성 비교
Fig. 9. Comparison of stabilization characteristics in variation of the inner D gain

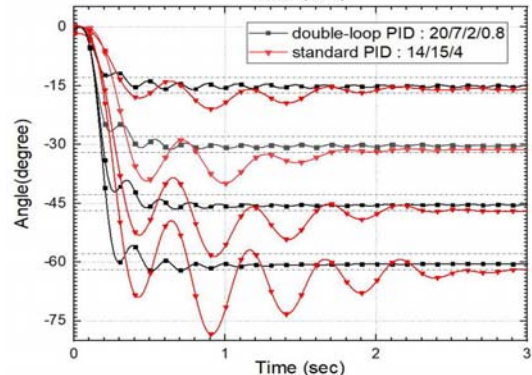
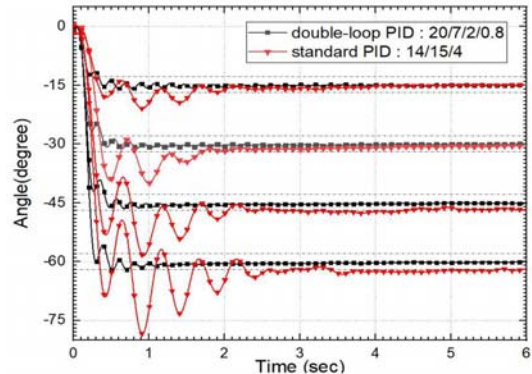


그림 10. 목표 각도 변화에 따른 안정화 시간 비교
Fig. 10. Comparison of stabilization time in variation of target angle

표 1. 두 PID 제어기의 안정화 시간 비교
Table 1. Comparison of stabilization time between two PID controller

	standard PID	double-loop PID	
angle	stabilization time		result
-15	1.55s	0.32s	22.65%
-30	1.7s	0.39s	22.94%
-45	2.1s	0.41s	19.52%
-60	2.9s	0.43s	14.83%
			19.99%

V. 결 론

본 논문에서는 쿼드콥터 시스템의 안정된 호버링 및 비행을 위해 이중루프 PID 제어기를 제안하고 이에 필요한 쿼드콥터의 자세각을 얻기 위해서 가속도 센서와 자이로 센서를 마호니 필터에 적용하여 두 센서를 융합함으로써 센서의 잡음 및 드리프트 오차 문제를 개선하고 자세 측정 성능을 향상시켰다.

각도라는 한 축에 의지하는 표준 PID 제어기는 상대적으로 느린 응답속도와 안정성을 보여준다. 이는 바람과 같은 외부 요인에 의해서 쿼드콥터의 자세가 불안정해져도 안정적으로 자세를 회복하지 못하는 결과를 초래한다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 각도와 각속도의 두 축에 의지하는 외부 루프에 각도 P 제어기와 내부 루프에 각속도 PID 제어기를 구성한 P-PID 구조의 이중루프 PID 제어기를 제안함으로써 표준 PID 제어기에 비해 안정화 시간을 평균 20% 정도로 단축시킨 것을 확인하였다.

추후에 안정화 시간을 더욱 단축시키기 위해 여러 가지 센서융합필터의 적용과 추가 센서 및 PID 제어기 구조의 변형에 대한 연구를 진행하고자 한다.

References

[1] Y. Cho, "A tripple nested PID controller based on sensor fusion for quadrotor attitude stabilization," *The Trans. KIEE*, vol. 67, no. 7, pp. 871-877, Jul. 2018

[2] Y. Cho and H.-S. Kim, "Posture stabilization control of quadcopter using sensor fusion and modified PID control," *J. Inst. Korean Electr. and Electron. Eng.*, vol. 18, no. 3, pp. 376-382, Sep. 2014.

[3] W.-H. Jung and J.-P. Chung, "Implementation of

quad-rotor hovering systems with tracking," *J. Advanced Navig. Technol.*, vol. 20, no. 6, pp. 574-579, Dec. 2016.

[4] J.-S. Kim, Y.-D. Lim, and J.-Y. Heo, "The simulator for control of quadcopter using sensor combination," *J. KIIT*, vol. 10, no. 7, pp. 1-11, Jul. 2012.

[5] G. H. Cha, I. Sim, S. G. Hong, J. H. Jung, and J. Y. Kim, "A study of method and algorithm for stable flight of drone," *J. Satellite, Inf. and Commun.*, vol. 10, no. 3, pp. 32-37, 2015.

[6] J.-W. Youn, J.-D. Park, B.-H. Park, and H.-K. Seong, "Development of the quadcopter level control system using the arduino," *Proc. Symp. KICS*, vol. 59, pp. 376-377, Jan. 2016.

[7] Y. Choi and C.-H. Kim, "Embedded board design for drone flight control," in *Proc. Symp. KICS*, pp. 1282-1283, Jun. 2017.

[8] A. Cavallo, A. Cirillo, P. Cirillo, G. De Maria, P. Falco, C. Natale, and S. Pirozzi, "Experimental comparison of sensor fusion algorithms for attitude estimation," *The Int. Fed. Automatic Control Cape Town*, pp. 7585-7591, South Africa, Aug. 2014.

[9] R. Mahony, T. Hamel, and J.-M. Pflimlin, "Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 53, no. 5, pp. 1203-1218, Jun. 2008.

[10] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *Trans. A.S.M.E.*, pp.759-768, Nov. 1942.

전 두 선 (Du-Seon Jeon)



2019년 2월 : 신한대학교 전자공학과 학사

2019년 3월~현재: 고려대학교 전기전자공학과 석사과정

<관심분야> IoT, Drone, 임베디드시스템, Localization

이 상 록 (Sangrok Lee)



1991년 2월 : 고려대학교 전자
전산공학과 졸업

1993년 2월 : 고려대학교 전자
공학과 석사

1997년 8월 : 고려대학교 전자
공학과 박사

1997년 12월~2000년 4월 : 한
국전자통신연구원

2000년 5월~2002년 8월 : (주)텔리언

2002년 9월~현재 : 신한대학교 IT융합공학부 전자공
학전공 교수

<관심분야> 임베디드시스템, IoT