

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2018.26.3.048>

ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

적분누적 방지기법 기반 PI 자세제어기를 이용한 쿼드로터 개발과 호버링 자세 제어 비행 실험

박대진*, 박천건*, 이상철**

Development of Quad-rotor with Anti-Windup Based PI controller and Hovering Attitude Control Flight Test

Daejin Park*, Cheongeon Park*, Sangchul Lee**

ABSTRACT

This paper deals with a development of a quad-rotor for a hovering attitude control. First, a rotational dynamics are derived to design an attitude controller. The attitude controller is based on PI (Proportional-Integral) controller. For a stable attitude control, an anti-windup method applies to the PI attitude controller. Additionally, a complementary filter is used to obtain more reliable attitude. Gain values of the attitude controllers based on the anti-windup method are obtained through tests. Finally, the quad-rotor with the anti-windup based PI attitude controller is developed and a hovering attitude control flight tests are performed. As a result, the developed quad-rotor is capable of stable hovering.

Key Words : Quad-rotor(쿼드로터), Attitude Control(자세제어), PI Controller(PI 제어기), Complementary Filter(상보필터), Anti-Windup(적분누적방지)

1. 서 론

최근 무인항공기는 감시·정찰 등의 군사적 목적뿐만 아니라, 방송촬영, 농업, 물류/배송, 레저 등의 상업적 목적으로 사용되고 있어 그 활용범위가 넓다. [1] 모터와 프로펠러를 사용하는 무인항공기 중 하나인 쿼드로터 (Quad-rotor)는 수직 이·착륙과 호버링이 가능하다는 장점 때문에 다양한 분야에 사용되고 있다. [2]

쿼드로터가 수직 이·착륙과 호버링 등과 같은 기능을 안정적으로 수행하기 위해서는 신뢰할 수 있는 자세제어입력을 구동기에 전달하는 자세제어기가 필요하다. 김용영 외 6명(2010)은 쿼드로터의 자세제어를 위해 PID 제어기를 적용하는 연구를 수행하였고, 임현 외 3명(2012)은 Arducopter, Pixhawk 등과 같은 자동조종장치 (Autopilot)에 적용된 PID제어기의 구조에 대한 연구를 진행하였다. [3,4] Rui Huang 외 2명(2009)은 3개의 프로펠러로 제작된 무인비행체의 유도 및 자세 제어를 위해 PI 제어기를 적용하였다. [5]

Received : 12. Aug. 2018. Revised : 04. Sep. 2018.

Accepted : 25. Sep. 2018

* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

연락처 E-mail : slee@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 항공대학교 76

PID 제어기는 구조가 간단하고 구현이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 하지만, 제어하고자 하는 시스템의 비선형성과 구동기의 제한으로 인해 적분누적 (Integrator windup) 현상이 발생할 수 있다. [6] 적분누적 현상은 제어명령과 관측값의 잔차 (Residual)가 적분기에 의해 지속적으로 적분되어 제어기의 성능을 저하시키는 것을 말한다. [6,7] 적분누적 현상을 방지하기 위해 PID 제어기에 조건적분 (Conditional Integration), 추적역계산 (Tracking Back Calculation) 등과 같은 적분누적 방지 (Anti-windup) 기법을 적용시키는 연구가 수행되었다. [6-8] 최종우 외 1명(2005)은 전동기 구동시스템에 적분누적 방지기법을 적용하였을 때 일반적인 PI 제어기를 적용하였을 때보다 빠른 응답속도를 보이고, 적분기 출력 값도 감소하여 실험결과가 향상되는 것을 확인하였다. [7] 적분누적 방지기법을 이용한 쿼드로터의 제어와 관련된 연구로는 적분누적 방지기법을 추가한 쿼드로터의 강건 경로제어기와 소형 쿼드로터의 실외 자율 군집비행을 위한 자세제어기 등이 있다. [9,10]

본 논문에서는 회전익 드론에 대해 높은 자세 안정성이 요구되는 호버링 자세제어를 위해 적분누적 방지기법 기반 PI제어기가 적용된 쿼드로터의 개발과 실험에 대한 내용을 다루었다. 우선, PI제어기 적용을 위해 쿼드로터의 회전운동방정식이 유도되었다. 센서의 출력으로 보다 정확한 자세를 계산하기 위해 상보필터가 적용되었다. 쿼드로터의 자세제어를 위해 적분누적 방지기법 기반의 PI제어기가 적용되었다. 마지막으로, PI제어기의 이득값을 선정하기 위한 실험과 선정된 이득값을 이용한 실내비행시험을 수행하였다.

II. 본 론

2.1 쿼드로터 회전운동방정식

Figure 1에서 X_E, Y_E, Z_E 는 지구고정좌표계, X_B, Y_B, Z_B 는 기체고정좌표계를 나타낸다.

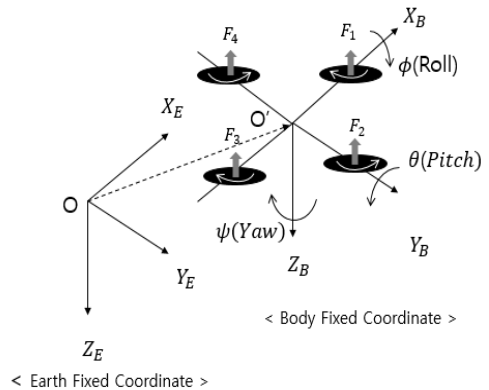


Fig 1. Coordinate System of Quad-Rotor

쿼드로터를 강체로 가정했을 때, 쿼드로터의 회전운동방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. [11]

$$\tau = I_B \dot{\omega}_B + \omega_B \times (I_B \omega_B) \quad (1)$$

여기서, B 는 쿼드로터의 기체고정좌표계, I_B 는 쿼드로터의 관성모멘트행렬, ω_B 는 쿼드로터의 각속도, τ 는 토크이다.

쿼드로터의 관성곱(Product of inertia)은 무시할 수 있다는 가정 하에, 식 (1)은 식 (2)~(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\omega}_x = \frac{(I_y - I_z)}{I_x} \omega_y \omega_z + \frac{u_\phi}{I_x} \quad (2)$$

$$\dot{\omega}_y = \frac{(I_z - I_x)}{I_y} \omega_x \omega_z + \frac{u_\theta}{I_y} \quad (3)$$

$$\dot{\omega}_z = \frac{(I_x - I_y)}{I_z} \omega_x \omega_y + \frac{u_\psi}{I_z} \quad (4)$$

여기서, $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 는 쿼드로터의 각속도, I_x, I_y, I_z 는 쿼드로터의 관성모멘트, u_ϕ, u_θ, u_ψ 는 자세제어명령이다.

쿼드로터의 자세인 ϕ, θ, ψ 는 식 (5)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi \sec\theta & \cos\phi \sec\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 상보필터

쿼드로터의 호버링은 정확한 ϕ 와 θ 를 이용하여 수행할 수 있다. 쿼드로터의 ϕ 와 θ 는 각 속도계의 출력을 이용해 계산할 수 있지만, 쿼드로터가 정지해 있는 호버링 상태의 ϕ 와 θ 는 각 속도계의 출력을 사용하여 계산할 수 있다. [12] 각속도계의 출력을 사용하여 자세를 구하는 방법은 시간이 경과함에 따라 누적오차를 포함하게 된다. 가속도계의 출력을 사용하여 자세를 구하는 방법은 누적오차는 발생하지 않지만, 순간적인 자세 변화를 감지하기 어렵다. [12] 상보필터는 가속도계와 각속도계와 같이 서로 다른 주파수 영역에서 장점을 갖는 센서의 출력들을 활용하여 보다 정확한 추정치를 얻을 수 있는 방법이다. [13] Figure 2는 1차 상보필터의 블록다이어그램이다. Figure 2에서 볼 수 있듯이, 쿼드로터의 ϕ , θ 를 구하기 위해 적용된 1차 상보필터는 필터는 식 (6), (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_f = \frac{as}{\alpha s + 1} \left(\frac{1}{s} \dot{\phi}_{gyro} \right) + \frac{1}{\alpha s + 1} \phi_{acc} \quad (6)$$

$$\theta_f = \frac{as}{\alpha s + 1} \left(\frac{1}{s} \dot{\theta}_{gyro} \right) + \frac{1}{\alpha s + 1} \theta_{acc} \quad (7)$$

여기서, ϕ_f 와 θ_f 는 각각 상보필터를 이용하여 구해진 ϕ 와 θ 의 추정치, ϕ_{acc} 와 θ_{acc} 는 각각 가속도계의 출력을 이용하여 구해진 ϕ 와 θ 의 계산값, $\dot{\phi}_{gyro}$ 와 $\dot{\theta}_{gyro}$ 는 각각 각속도계의 출력이다.

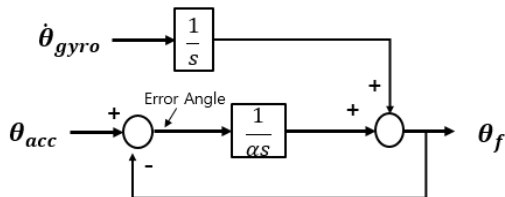


Fig 2. Block Diagram of Complimentary Filter

식 (6)과 (7)에서 ϕ_{acc} 와 θ_{acc} 는 식 (8)와 (9)를 이용해 구할 수 있다.

$$\phi_{acc} = \tan \frac{a_z}{a_y} \quad (8)$$

$$\theta_{acc} = \tan \frac{a_z}{a_x} \quad (9)$$

여기서, a_x , a_y , a_z 는 각각 가속도계의 출력을 나타낸다.

2.3 Anti-Windup 기반 PI 자세제어기

Figure 3은 일반적인 PI 제어기의 블록다이어그램을 보여주고 있다. 일반적인 PI제어기의 경우, 제어하고자 하는 시스템의 비선형성에 의한 잔차와 구동기의 출력 제한, 외란에 의한 급격한 자세 명령의 변화 등으로 인해 적분누적 (Integrator windup) 현상이 발생할 수 있다. [6-10] 적분누적 현상은 큰 오버슈트 (Overshoot)과 긴 정착시간 (Settling time)을 유발하게 된다. [6]

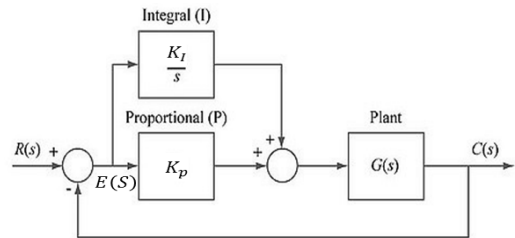


Fig 3. General PI Control Block Diagram

적분누적 현상은 적분누적 방지 (Anti-windup) 기법을 이용한 제어기를 이용하여 완화시킬 수 있다. [6-10] Figure 4는 PI 제어기를 이용한 자세 제어기를 보여주고 있다. [14,15] Figure 4에서 볼 수 있듯이, 외란에 의해 자세명령이 크게 변하게 된다면 outer loop의 PI제어기는 적절한 제어입력을 출력하지 못하게 된다. Figure 5는 적분누적 방지기법을 이용한 자세제어 블록다이어그램을 나타낸다. Figure 5에서 볼 수 있듯이, outer loop의 PI제어기는 적분누적 방지기법을 적용하여 자세가 제어되도록 구성된다.

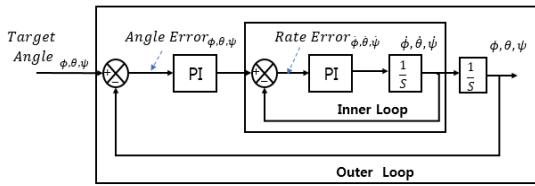


Fig 4. PI Controller Block Diagram

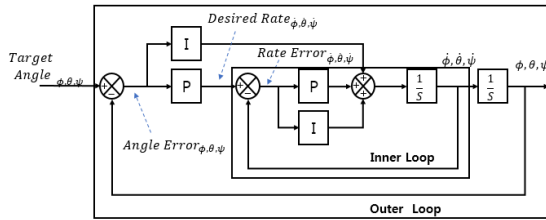


Fig 5. Anti-Windup based PI Controller Block Diagram

2.4 적분누적 방지기법 기반 자세제어기를 이용한 쿼드로터 제작

Figure 6은 제작된 쿼드로터의 아키텍처를 보여주고 있다. Figure 6에서 볼 수 있듯이, 지상 제어시스템(Ground Control System, GCS)은 노트북을 사용하였다.

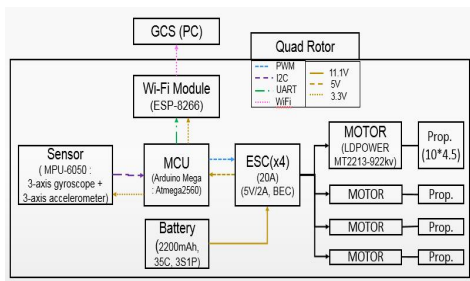


Fig 6. Architecture of Quad-robot

제작된 쿼드로터를 구성하고 있는 부품은 Table 1과 같다. 쿼드로터의 추력은 약 12 N으로 선정하였다. 지상제어시스템과 쿼드로터의 통신은 ESP8266 Wi-Fi 모듈을 사용하였다. Figure 7은 ESP8266 모듈의 형상을 보여주고 있고, ESP8266 모듈의 주요 사양은 Table 2와 같다.

Table 1. Parts of Developed Quad-robot

Parts	Specification	Weight (g)
Frame	DJI F450 (450mm)	295
MCU	Arduino Mega (ATmega2560)	25
Wi-Fi Module	ESP8266 Wi-Fi Module	2
Sensor	MPU6050 Module	12
Motor	LDPOWER x 4 (MT2213-922KV)	221.2
ESC	TURNIGY Super Brain x 4 (ESC-20A)	92
Propeller	Carbon Fiber T-Style x 4 (10x4.5)	60
Battery	Zippy EP POWER (2200mAh 11.1v, 35C Li-Po)	218
Total		925.2

Table 2. Specification of ESP8266

Items	Parameters
Operating Voltage	2.5~3.6 V
Operating Current	Avg.Value : 80mA
Wi-Fi Protocols	802.11 b/g/n/e/i
Network Protocols	IPv4, TCP/UDP/HTTP/FTP
Frequency Range	2.4~2.5 GHz (Receiver, Transmitter)
Frequency Channel	No.1~14
Security	WPA/WPA2
GPIOs	17



Fig 7. ESP 8266 Wi-Fi Module

Figure 8은 지상제어시스템인 노트북에서 사용되는 쿼드콥터의 무선조종 패넬을 보여주고 있다. Figure 8에서 볼 수 있듯이, 제작된 쿼드콥터는 제어명령이 지상제어시스템에서 쿼드콥터로 전송되는 방법을 이용해 조종한다. Figure 9는 완성된 쿼드콥터를 보여주고 있다.



Fig 8. Quad-rotor Remote Control



Fig 9. Completed Quad-rotor

2.5 제어기 이득값 설정

적분누적 방지기법 기반의 PI 제어기 이득값을 설정하기 위해 단축실험과 2축실험은 Fig.10, Fig.11과 같이 진행되었다. 적분누적 방지기법

기반의 PI 제어기 이득값은 쿼드콥터의 반응을 실시간으로 확인하면서 지상제어시스템과의 통신을 이용하는 방법으로 수정하였다. 실험을 통해 구해진 적분누적 방지기법 기반의 PI 제어기 이득값은 Table 3과 같다.



Fig 10. Single-axis Control Test



Fig 11. 2-axis Control Test

Table 3. Anti-Windup based PI Controller Gain Values

	Gain	Value
Angle	K_P	0.5
	K_I	0.04
Rate	K_P	0.25
	K_I	0.04

Figure 12는 이득값을 실시간으로 수정하는데 사용된 프로그램을 보여주고 있다. Figure 13은 구해진 이득값을 이용하여 수행된 실내 비행시험을 보여주고 있다.

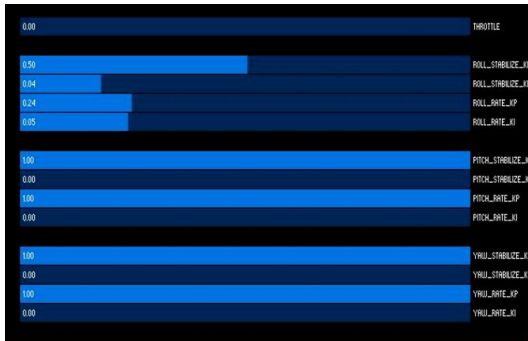


Fig 12. Gain Tuning Software



Fig 13. Indoor flight test

III. 결 론

본 논문에서는 적분누적 방지기법 기반의 PI 제어기를 적용한 쿼드로터의 개발과 실험에 대한 내용을 다루었다. 적분누적 방지기법은 외란 등에 의해 자세명령이 급격하게 변하거나 구동기의 최대 RPM을 상회하게 되면 적분기에서 오차의 적분값이 누적되는 것을 완화하기 위해 적용되었다. 가속도계와 각속도계의 출력을 이용해 쿼드로터의 자세를 보다 정확하게 추정하기 위해 상보필터가 적용되었다. 적분누적 방지기법 기반의 PI제어기 이득값은 단축실험과 2축실험으로 쿼드로터의 자세를 확인하는 것과 동시에 실시간 통신으로 수정하면서 선정되었다. 선정된 PI제어기 이득값을 자세제어기에 적용한 후, 제작된 쿼드로터를 이용하여 실내비행시험이 수행되었다. 실내비행시험 결과, 자세제어를 위해 적분누적 방지기법 기반의 PI제어기가 적

용된 쿼드로터가 안정적인 호버링이 가능한 것을 확인하였다. 이는 회전익 드론에 대해 높은 자세 안정성이 요구되는 호버링 자세제어의 구현에 기여할 것이 기대된다.

후 기

본 논문은 방위사업청, 산업통상자원부의 “EO/IR 탑재 감시정찰용 450g급 초소형 멀티콥터 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

Reference

- [1] Morgenthaler, S., Braun, T., Zhao, Zhongliang., Staub, T., and Anwender, M., “UAVNet: A mobile wireless mesh network using unmanned aerial vehicles,” IEEE Globecom Workshops, Dec. 2012, CA, USA, pp. 1603-1608.
- [2] Park, D., Lee, S., Park, S., and Song, T., “Design Modification of Airframe Shape for Ultra Light Quad-Rotor Development,” Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, Vol. 25, No. 4, 2017, pp. 44-51.
- [3] Kim, Y., Shin, J., Lee, S., Lee, H., Lim, H., Kim, K., Lee, S., “Quadrotor Attitude Stabilization by Using PID Controller,” Journal of Aerospace System Engineering, Vol. 4, No. 4, 2010, pp. 18-27.
- [4] Lim, H., Park, J., Kim, D., and Kim, H., “Build Your Own Quadrotor,” IEEE Robotics and Automation Magazine, Sep. 2012, pp. 33-45.
- [5] Huang, R., Liu, Y., and Zhu J. J., “Guidance, Navigation, and Control System Design for Tripropeller Vertical-Take-Off-and-Landing Unmanned Air Vehicle,” Journal of Aircraft, Vol. 46, No. 6, 2009, pp. 1831-1856.
- [6] Bohn, C., and Artherton, D. P., “An Analysis Package Comparing PID Anti-windup Strategies,” IEEE Control Systems, Vol. 15, Issue 2, 1995, pp. 34-40.

- [7] Choi, J.-W., and Lee, S.-C., "New Anti-windup Strategy for PI-type Speed Controller," *The Transaction of The Korean Institute of Electrical Engineers B*, Vol. 54B, No. 12, 2005, pp. 629-637.
- [8] Visioli, A., "Modified Anti-windup Scheme for PID Controllers," *IEE Proceedings - Control Theory and Application*, Vol. 150, Issue 1, 2003, pp. 49-54.
- [9] Lee, H., and Kim, H., "Robust Trajectory Control for Quadrotor Using Geometric Control," *Proceeding of KSAS Fall Conference*, Jeju, Korea, Nov. 2012, pp. 514-518.
- [10] Lee, D., Cho, S., and Shim, H., "Development of Mini Quadrotor Platform and Experiments on Outdoor Autonomous Swarming Flight," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 23, No. 11, 2017, pp. 905-911.
- [11] Yang, S., and Lee, S., "Dynamic Modeling and Design of Controller based on Thrusters for Korean Lunar Module," *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, Vol. 23, No. 1, 2015, pp. 49-55.
- [12] Lee, Y., Doh, T., and Ryoo, J., "Yaw Attitude Compensation in a Quadrotor using Complementary Filter and Geomagnetic Sensor Tilt Compensation," *Proceeding of ICROS 2015, Daejeon, Korea, May 2015*, pp. 85-86.
- [13] Min, H., Yoon, J., Kim, J., Kwon, S., and Jeung, E., "Design of Complementary Filter using Least Square Method," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 17, No. 2, 2011, pp. 125-130.
- [14] Wang, J., Lee, S., Yang, S., Lee, S., and Joo, S., "Attitude Control of the Quad-rotor using the Modified PID Controller," *Proceedings of KIEE Summer Conference*, Jul. 2011, pp. 1800-1801.
- [15] Özdemir, A., and Erdem, Z., "Double-loop PI Controller Design of the DC-DC Boost Converter with A Proposed Approach for Calculation of the Controller Parameters," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 232, No. 2, 2018, pp. 137-148.