



쿼드로터 시스템의 자세 및 비행제어 실험을 위한 거치대 설계 및 제작

Design and Development of a Test-bed for Experimental Studies of Attitude and Flying Control of a Quad-rotor System

저자 (Authors)	임정근, 정슬 Jeong-Geun Lim, Seul Jung
출처 (Source)	제어로봇시스템학회 논문지 23(12) , 2017.12, 1043-1048 (6 pages) Journal of Institute of Control, Robotics and Systems 23(12) , 2017.12, 1043-1048 (6 pages)
발행처 (Publisher)	제어로봇시스템학회 Institute of Control, Robotics and Systems
URL	http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07273593
APA Style	임정근, 정슬 (2017). 쿼드로터 시스템의 자세 및 비행제어 실험을 위한 거치대 설계 및 제작. 제어로봇시스템학회 논문지, 23(12), 1043-1048.
이용정보 (Accessed)	충남대학교 168.***.117.203 2018/05/04 17:03 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독 계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

쿼드로터 시스템의 자세 및 비행제어 실험을 위한 거치대 설계 및 제작

Design and Development of a Test-bed for Experimental Studies of Attitude and Flying Control of a Quad-rotor System

임정근, 정슬*
(Jeong-Geun Lim¹ and Seul Jung^{1*})

¹Intelligent Systems and Emotional Engineering Laboratory(ISEE)
¹Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University, Korea

Abstract: This article presents the design and implementation of a test-bed for controlling the attitude of a quadrotor system in an indoor environment. The attitude control test should be done *a priori* before launching the quadrotor in outdoors. Testing the attitude control performance of a quadrotor system requires controlling three angles and the altitude. The novel design of a test-bed is presented to cover all the tests required for a quadrotor system. The altitude control of a quadrotor system can be tested in three orientation angles. In addition, a circular trajectory following control task can be tested on the same test-bed. Actual experimental works on the test-bed have been performed to evaluate the functionality of the test-bed.

Keywords: Test-bed, attitude control, thrust measurement, flying control, quad rotor

I. 서론

최근에 군사지역의 경찰 업무나 위험 지역의 탐사 등을 목적으로 무인 비행체에 대한 관심이 늘고 있다. 미국의 무인 정찰기는 이미 오래 전부터 사용되어 왔으며 최근에는 상용으로 쓰이게 되어 개인생활 보호 측면에서 사회적인 문제로 대두되었다.

우리나라는 최근에 북한에서 무인기가 넘어오면서 무인기에 대한 관심과 경계심이 최고이다. 이들 무인기는 대부분 CTOL (Conventional Take-Off and Landing) 방식으로 활주로가 필요하며 장거리 비행이 가능한 장점이 있다. 반면에 수직 이착륙방식의 VTOL (Vertical Take-Off and Landing) 구조의 무인 비행체는 복잡한 도심이나 근거리 작업에 적합하여 최근에 군용이나 상용으로 많이 사용되고 있다.

대표적인 VTOL 구조인 쿼드로터 시스템은 호버링 뿐만 아니라 전 방향 움직임이 가능한 장점이 있어 많은 분야에서 쿼드로터 시스템을 개발하고, 필요에 따라 여러 가지의 형태로 제작하고 있다.

이러한 복잡한 지형을 안정하게 비행하기 위해서는 안정적인 자세제어가 중요하다. 안정적인 자세제어를 위해 다양한 제어 방식이 적용되었다[1-7]. 신경회로망과 퍼지와 같은 지능 도구를 이용하거나[6], 적응 방식 등의 다양한 방법을 연구하고 있다. 또한 바람과 같은 외란에 강건하도록 센서를 이용한 가속도 측정 기반의 시간지연 제어 또는 외란 관측기 등을 사용하였고, 실험을 통해 성능을 검증하였다[7-12].

이처럼 다양한 제어 알고리즘을 실험으로 검증하기 위해서는 먼저 실내에서 실험을 해야 한다. 하지만 대부분의 실내에서의 실험 결과를 보면 3축 자세제어의 성능 검증에 국한되고 있다[10]. 현재 거치대로는 추가적인 고도제어나 추력 그리고 경로 추종 제어 등과 같은 실험을 수행하는데 제한이 있다.

또한 쿼드로터 시스템을 제작하고 비행 여부를 테스트하는 과정에서 시스템이 파손되거나 인명 피해가 발생하는 일이 발생할 수 있다[11]. 실내에서의 실험은 매우 위험하여 격리된 공간에서 실험이 가능한데 공간적으로 여유가 없으면 이 또한 문제가 된다. 이런 경우에 대부분 고정 거치대 위에서 실험을 하게 되는데 대부분의 거치대는 3개의 각도, 즉 롤, 피치, 요의 각도만을 제어할 수 있다.

하지만 쿼드로터 제어에서 중요한 사항은 payload가 얼마인지, 추력은 얼마인지, 경로 추종제어는 잘 되는지 등을 실험으로 확인하는 것이다.

따라서 본 논문에서는 실내에서 쿼드로터 시스템의 안전한 테스트를 위한 실험거치대(test-bed)를 제작하였다. 새로운 거치대 위에서는 3개의 각도제어뿐만 아니라 고도제어도 수행이 가능하다. 리프트구조를 사용하여 3차원공간에서 경로 추종 제어 또한 가능하도록 설계하였다. 또한 쿼드로터의 추력을 측정할 수 있도록 센서도 부착할 수 있어 실내에서 쿼드로터 실험에 필요한 대부분의 실험을 수행할 수 있다.

이러한 목적을 위해 3D 캐드 프로그램인 CATIA를 이용하여 자세제어와 추력 테스트가 가능하도록 모델링하였고, 이를 바탕으로 test-bed를 제작하였다. 실험대 각각의 기능을 확인하기 위해 다양한 실험을 하였다. 각도제어, 고도제어 그리고 비행이 가능한 경로 추종제어 등을 쿼드로터 시스템을 이용하여 test-bed의 기능을 평가하였다.

* Corresponding Author

Manuscript received July 10, 2014 / revised June 19, 2017 / accepted November 8, 2017

임정근, 정슬: 충남대학교 메카트로닉스공학과

(vesta1028@nate.com/jungs@cnu.ac.kr)

* 본 연구는 충남대학교 자체연구 일부지원과 연구재단 기초연구에 의하여 연구되었으며 감사드립니다.

II. Test-bed 설계

1. 각도 제어 실험을 위한 설계

Test-bed는 불안정한 쿼드콥터 시스템을 적정한 제어를 선정하여 안정하도록 실험할 목적으로 만든다. 그래서 쿼드콥터의 성능이 좋지 못하여 불안정 하더라도 시스템의 파손이나 인명피해가 발생하지 않도록 고정장치에 거치해야 하는데 그림 1과 같이 알루미늄 프로파일을 이용해 제작한다. 가운데 아래 위로 움직이는 막대가 있고 그 끝에 볼 조인트가 있어 3축으로 움직일 수 있다. 그림 2에서 보면 실험거치대의 3축의 움직임을 보여준다.

쿼드콥터의 자세를 제어하기 위해 쿼드콥터와 test-bed의 연결부는 3축에 대한 회전이 자유롭도록 제작하였다. 볼 캐스터 위에 연결부를 설치하여 쿼드콥터와 연결할 수 있도록 설계하였다. 볼 캐스터를 사용하였기 때문에 자세제어에 대한 성능을 실험할 수 있다.

2. 고도 제어 실험 및 추력 측정을 위한 설계

쿼드콥터의 추력을 테스트하기 위해서 그림 3과 같이 Test-bed가 상승하도록 제작하였다.

기존의 test-bed는 대부분 그림 2에서 보여진 것처럼 3 축 각도제어만이 가능하도록 제작 되었다. 본 논문에서 제안하는 test-bed는 가운데 축이 움직일 수 있도록 하여 기체의 추력에 따라 상승하도록 하여 비행할 수 있는 추력을 안전하게

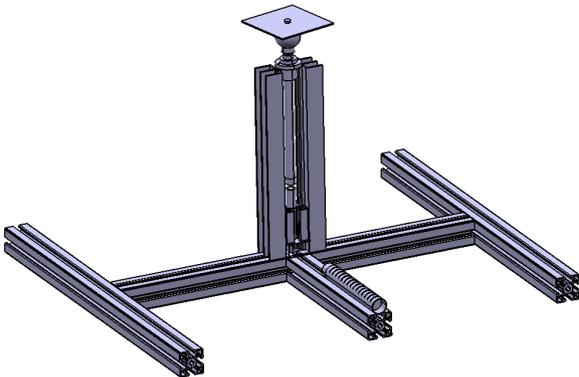


그림 1. 실험 거치대.
Fig. 1. Test bed.

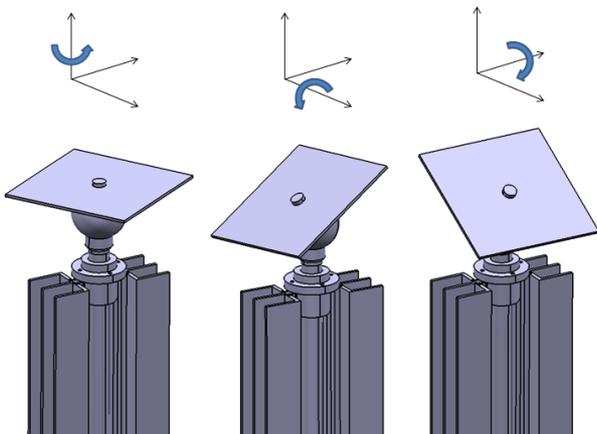


그림 2. 각도 측정을 위한 3축 회전.
Fig. 2. 3 axes rotation for angle measurement.

측정할 수 있고 payload 를 측정할 수 있도록 제작하였다. 움직이는 바의 아래 끝 단에는 추력을 측정할 수 있는 센서를 부착할 수 있게 된다. 가운데 지지축의 홈을 통해 센서와 연결한다. 축이 일정하게 올라가도록 하기 위해 베어링을 설치하여 가이드 역할을 하도록 하였으므로 고도제어를 수행할 수 있다.

3. 경로 추종 제어 실험을 위한 설계

제안하는 구조의 장점은 비행제어를 할 수 있다는 것이다. 쿼드콥터의 비행 여부를 실험하기 위해 test-bed의 축이 움직일 수 있도록 제작하였다. Test-bed 위에서 자세제어의 성능이 우수해도 실제 비행 시 제어의 성능이 좋지 않을 때가 있다. 그래서 비행 테스트를 할 때 기체가 파손 또는 손상되는 일이 종종 발생한다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 test-bed 위에서도 비행 테스트를 할 수 있도록 제작하였다. 그림 4에서처럼 고도제어를 위한 바의 축이 유니버설 조인트를 이용하여 구부러지도록 설계하였다. 따라서 3차원 공간에서 경로를 설정하고 제어를 설계하여 쿼드콥터가 잘 추종하는지 검증하는 실험을 수행할 수 있다.

III. 실험대 제작

1. 각도 측정

Test-bed의 성능을 검증하기 위해 비행이 가능한 쿼드콥터 시스템을 이용해 실험하였다. 그림 5는 실제로 쿼드콥터 시스템을 장착한 실험 거치대이다. 시스템이 불안정하더라도 안정하도록 지지부는 프로파일을 이용하여 지면과 넓은 면적이

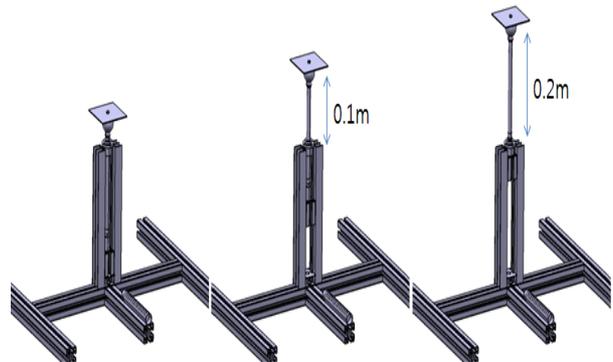


그림 3. 고도제어.
Fig. 3. Altitude control.



그림 4. 직교좌표 공간에서의 움직임.
Fig. 4. Movements in the Cartesian coordinates.

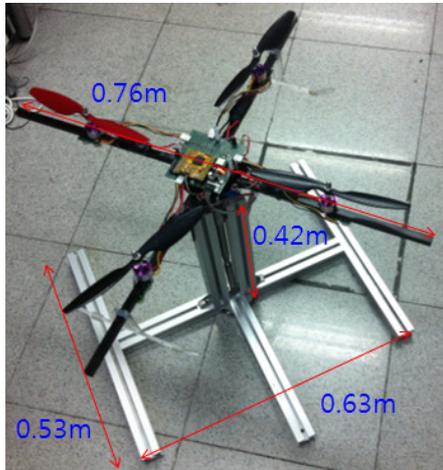


그림 5. 실험대 제작.

Fig. 5. Test-bed.

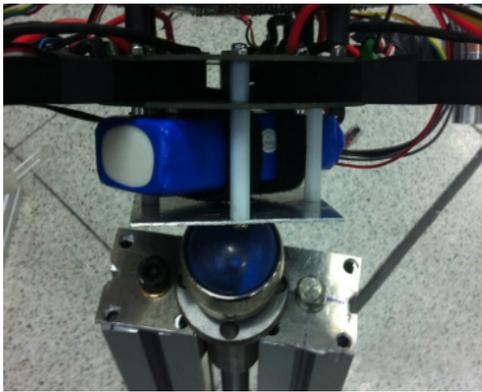


그림 6. 3축 연결부.

Fig. 6. 3 axis connection part.

접촉하도록 제작하였고, 크기는 가로 0.63 m, 세로 0.53 m, 그리고 높이 0.42 m이다.

그림 6은 쿼드로터 시스템과 실험대와의 연결부를 자세하게 보여준다. 그림 6을 보면 지지대와 비행체의 연결 부분의 간격을 이용해 배터리의 공간을 만들었고 볼 캐스터를 이용해 3축의 자세를 자유롭게 움직일 수 있도록 제작하였다.

2. 고도 및 추력측정

그림 7은 쿼드로터 시스템의 고도제어와 추력을 테스트하는 것을 나타낸 그림이다. 이 부분이 다른 실험 거치대와 다른 점이다. Test bar는 가운데에서 위아래로 움직이며 베어링으로 체결되어 있어 마찰력을 줄이고자 하였다. 무게는 약 0.7 kg으로 제작되었고, 쿼드로터의 자중과 Test bar의 무게의 합보다 큰 추력이 발생하면 바는 z축 방향으로 올라가게 된다. 또한 바의 다른 끝에는 센서를 달아 쿼드로터의 추력을 측정할 수 있도록 하였다.

3. 경로추종 오차 측정

실내에서 가장 중요한 비행 실험은 경로 추종 제어이다. 이 실험거치대를 사용하면 공간이 제한되어 비행을 하기 어려운 환경에서도 비행 실험을 할 수 있다. 비행 테스트를 하기 위해서는 유니버설 조인트를 이용해 여러 방향으로 기울어질 수 있도록 제작하였다.



그림 7. 고도제어.

Fig. 7. Altitude control.

일정 추력 이상이 되어 유니버설 조인트 부분이 베어링을 빠져 나오게 되면 3차원 직교좌표 공간에서의 움직임을 실험할 수 있다. 다양한 궤적을 추종하면서 비행 테스트를 할 수 있다.

그림 8을 보면 유니버설 조인트가 휘어지는 것을 볼 수 있다. 아래위, 좌우로 움직일 수 있어 3차원 공간에서 경로를 설정하고 추종하는 제어를 실험할 수 있다.

그림 9는 유니버설 조인트의 역할로 인해 실제 직교좌표 공간에서의 비행이 가능함을 보여준다. 최대 추종할 수 있는 원의 반지름은 0.2m이다.

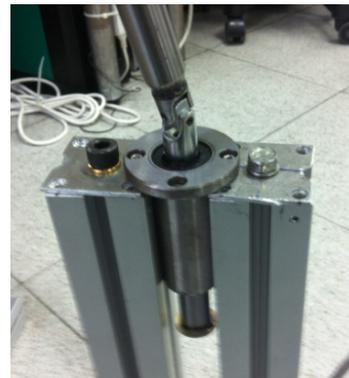


그림 8. 비행 테스트를 위한 유니버설 조인트.

Fig. 8. Universal joint for flying test.

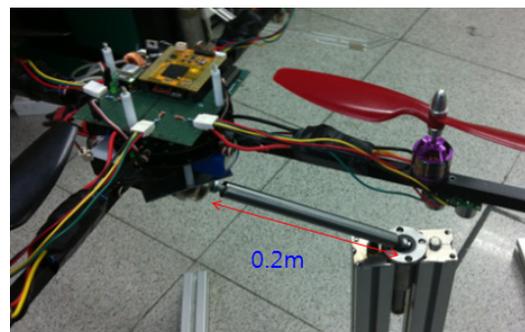


그림 9. 직교좌표공간에서 제어.

Fig. 9. Control in the Cartesian space.

IV. 제어기 설계

1. PD control

쿼드로터의 자세 제어를 위해 간단한 PD 제어를 사용한다. 미분 제어를 위한 값은 자이로 센서를 이용해 측정된 데이터를 직접 사용한다.

각 롤(ϕ), 피치(θ), 요(ψ)의 각도를 위한 제어는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_\phi &= K_{P\phi}(\phi_d - \phi) + K_{D\phi}(-\dot{\phi}) \\ u_\theta &= K_{P\theta}(\theta_d - \theta) + K_{D\theta}(-\dot{\theta}) \\ u_\psi &= K_{P\psi}(-\dot{\psi}) \end{aligned} \quad (1)$$

자세제어에서 z축으로 상승 하강 이동을 할 때 쿼드로터가 떨어지지 않도록 추력에 대한 제어 입력 값을 보상해 주어야 한다.

$$u_T = m(\ddot{z} + g) \frac{1}{\cos \phi \cos \theta} \quad (2)$$

Yaw축에 대한 제어는 2축 제어실험을 할 때, coupled effect의 영향으로 쿼드로터가 회전하는 것을 방지하기 위해 각속도에 대한 P제어를 사용하여 Yaw축으로의 회전속도가 0이 되도록 하였다.

2. Time-delayed control

쿼드로터 시스템은 바람, 내부적으로는 로터의 진동 또는 coupled effect 등과 같은 외란에 취약하다. 이들 외란에 강건하게 대응할 수 있도록 시간지연 제어기를 사용한다 [10, 12].

시간지연제어기는 이전 토크 식을 통해 외란을 제거하는 방식으로 구성이 매우 간단하다. PD제어기를 사용하는 제어 법칙은 다음과 같다.

$$F(t) = \hat{I}(K_P e + K_D \dot{e}) + \bar{h} \quad (3)$$

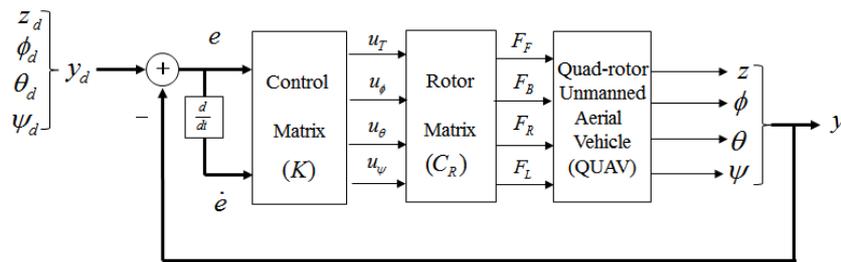


그림 10. PD제어기의 블록선도.

Fig. 10. PD Control.

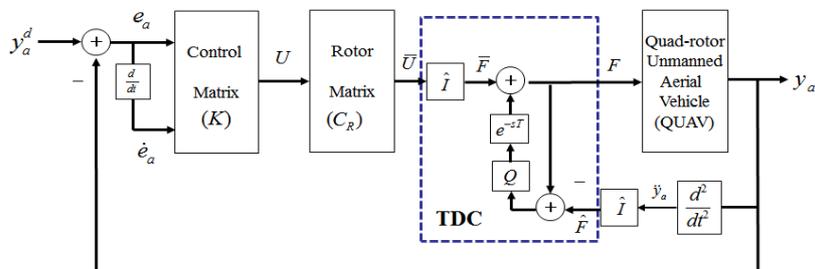


Fig. 11. 시간지연제어기의 블록선도.

Fig. 11. Time delayed Control.

$$\bar{h} = F(t - \lambda) - \hat{I}\dot{q}(t - \lambda) \quad (4)$$

$$F(t) = \hat{I}(K_P e + K_D \dot{e}) + F(t - \lambda) - \hat{I}\dot{q}(t - \lambda) \quad (5)$$

여기서 \hat{I} 는 관성행렬이다. 식 (5)를 살펴보면 두 가지 요소들에 대한 정보가 필요하다. 첫번째는 이전 값을 사용하므로 샘플링 λ 가 빨라야 한다. 두 번째는 각 가속도 정보 \dot{q} 가 필요하다. 각 가속도 값은 노이즈에 약한 단점을 가지고 있어 저역통과 필터를 사용하였다.

Q필터는 1차 저역통과필터의 간단한 형태로 설계하였다.

$$Q = \frac{K_q}{\tau s + 1} \quad (6)$$

V. 비행실험

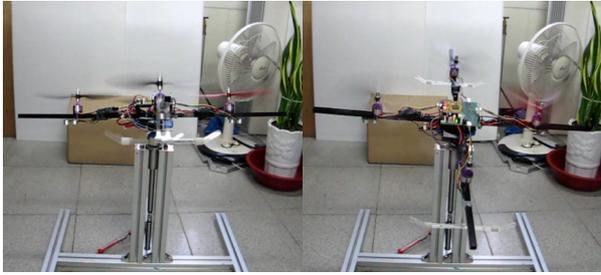
Test-bed의 성능을 확인하기 위해 test-bed위에서 자세제어, 고도제어 그리고 경로 추종제어를 실험하였다.

1. 자세제어 실험

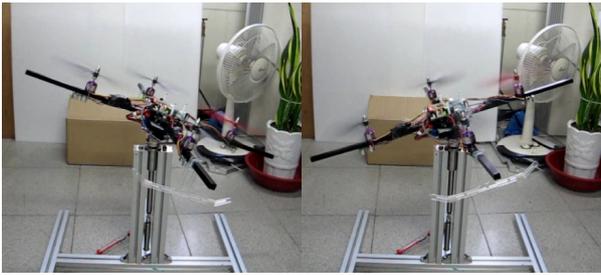
고정 위치에서 자세제어는 3축 각도를 제어하는 것이다. 3축 각도 제어는 호버링 자세를 유지하는데 가장 중요하다. 그림 12는 test-bed위에서 쿼드로터의 자세제어 실험을 나타내고 있다. 그림 12(a), (b), (c)는 각각 test-bed의 볼 캐스터를 중심으로 Roll, Pitch, 그리고 Yaw 축에 대한 움직임을 잘 나타내고 있다. 그림 13은 2축 호버링에 대한 제어 성능을 나타낸 것이다. PD제어의 경우보다 시간지연 제어기를 사용하면 더 안정되는 것을 확인할 수 있다.

표 1에 각 제어기의 오차를 수치적으로 표현하여 비교하였다. 시간지연 제어기를 사용할 경우에 오차가 줄어들어 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

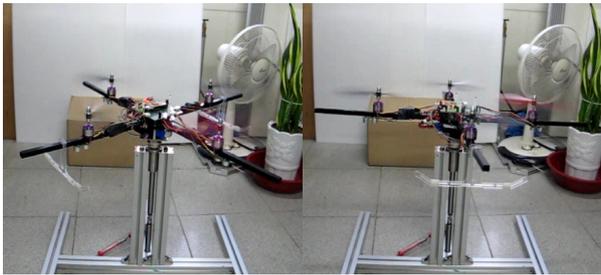
시간지연 제어기를 사용하였을 때, PD제어기만을 사용했을 때보다 제어 성능이 더 좋아진 것을 확인할 수 있다.



(a) Rotation about roll axis

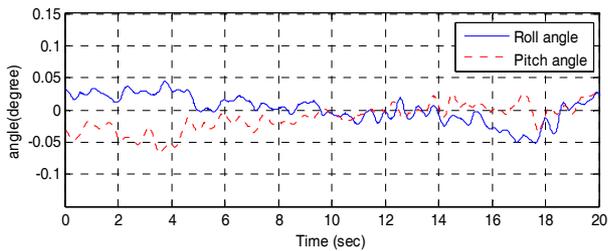


(b) Rotation about pitch axis

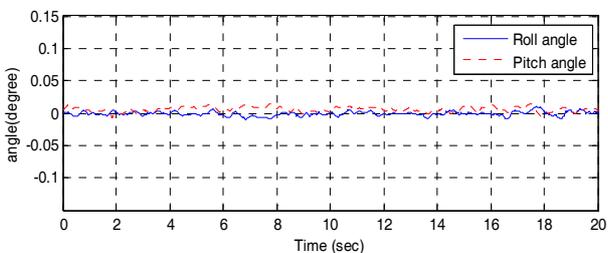


(c) Rotation about yaw axis

그림 12. Test bed 위에서의 자세제어 실험.
Fig. 12. Attitude of quad rotor system on the test bed.



(a) PD control



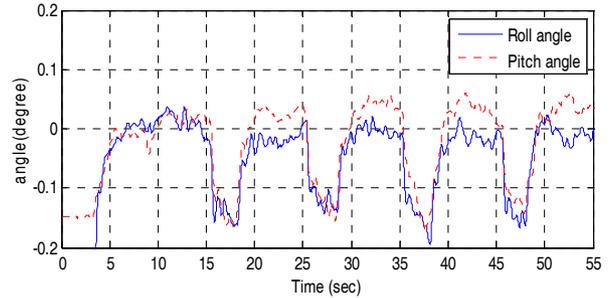
(b) Time-delayed control

그림 13. 2축에 대한 호버링 제어.
Fig. 13. Hovering control.

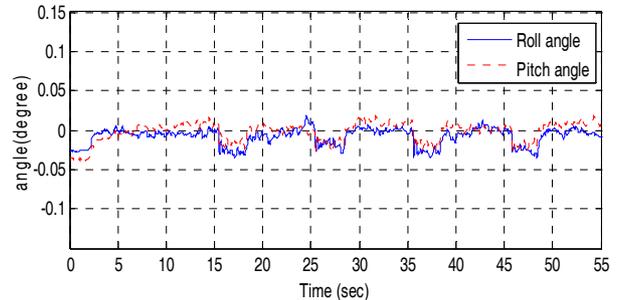
표 1. 2축 호버링 제어에 대한 RMS error.

Table 1. RMS errors of two axes hovering control

RMS error		Degree	Radian
PD control	Roll	0.9972	0.0174
	Pitch	1.0452	0.0182
TD control	Roll	0.1588	0.0027
	Pitch	0.3304	0.0058



(a) PD control



(b) Time-delayed control

그림 14. 외란이 있을 때 제어기의 성능비교.
Fig. 14. Performances under disturbances.



(a) Before elevation

(b) After elevation

그림 15. Test bed 위에서의 추력 실험.
Fig. 15. Thrust test of quad rotor system on the test bed.

그림 14는 외란에 대한 제어기의 성능을 나타낸다.

2. 고도제어 및 추력 실험

그림 15는 test-bed위에서 고도제어 실험을 하는 그림이다. 무게가 0.7 kg인 payload를 들어올리면서 원하는 위치로 상승하는 고도제어를 한다. 그림 15에서 보면 추력을 측정하는 센서가 부착되어 있어 일정한 고도를 유지하는데 필요한 추력을 측정한다.

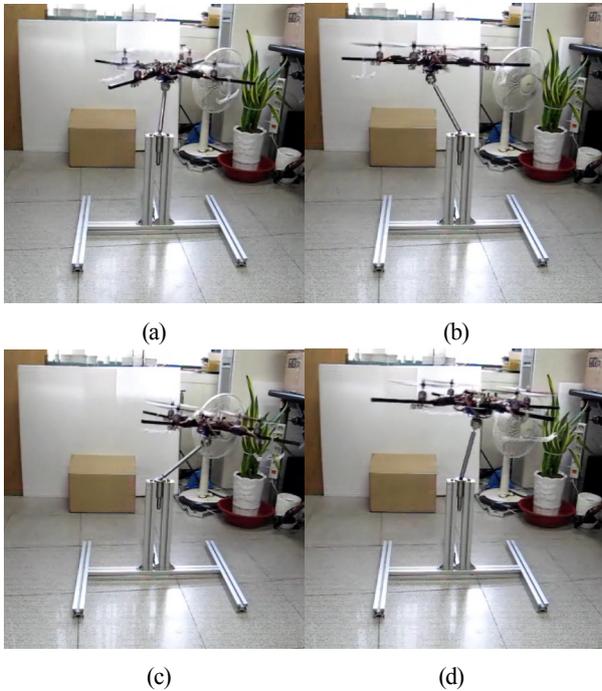


그림 16. 경로추종제어 실험.

Fig. 16. Trajectory tracking control.

쿼드로터와 0.7 kg의 Test bar보다 큰 추력이 발생하면 쿼드로터는 Test bar와 함께 위로 상승한다. 이것을 통해 쿼드로터가 비행을 할 충분한 추력을 가지고 있는지, 또는 얼마만큼의 하중을 들어올릴 수 있는지 테스트할 수 있다. 또한 부착된 센서를 통해 정확한 추력을 측정할 수 있다.

3. 비행 실험

실내에서의 비행제어는 거치대 위에서 주어진 경로를 추종하는 제어로 무선통신으로 기준 경로를 보내면 쿼드로터가 추종하게 된다.

먼저 고도제어를 통해 0.42 m를 상승한 다음 유니버설 조인트를 사용하여 좌우로 움직이게 되므로 직교좌표 공간에서 움직이게 된다. 그림 16은 원경로를 추종하고 있는 실험의 동영상 캡처한 그림이다.

VI. 결론

본 논문에서는 실외에서 비행 실험을 할 때에 충돌이나 추락 등의 사고를 줄이고자 실내환경에서 다양한 실험을 할 수 있도록 실험거치대를 설계 및 제작하여 그 위에서 실험하였다.

기본적으로 볼 캐스터를 이용해서 3축의 자세 제어를 실험할 수 있도록 제작하였고 Test bar가 상승하도록 하여 고도제어 및 추력 실험을 할 수 있도록 제작하였다. 자세제어뿐만 아니라 제한된 공간에서 경로 추종 제어의 성능을 검증할 수 있도록 Test bar 끝을 유니버설 조인트로 제작하여 test-bed 위에서도 한정된 공간을 비행할 수 있도록 제작하였다.

다양한 제어 실험을 통해 실험거치대의 성능을 확인하였다. 호버링제어를 위한 각도제어를 비롯하여 고도제어를 수행하였다. 추가적으로 3차원 공간에서의 위치제어를 수행할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] A. Tayebi and S. McGilvray, "Attitude stabilization of a four-rotor aerial robot," *43rd IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1216-1221, 2004.
- [2] E. Altug, J. P. Ostrowski, and R. Mahony, "Control of a quadrotor helicopter using visual feedback," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 72-77, 2002.
- [3] Y. S. Sub, "Robust control for a quad-rotor aerial vehicle," *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 18, pp. 103-114, 2003.
- [4] R. Zhang, X. Wang, and K. Y. Cai, "Quadrotor aircraft control without velocity measurements," *IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 5213-5218, 2009.
- [5] S. H. Jeong, M. K. Lee, and S. Jung, "Calibration and control of rotor actuation of flymobile by force measurements," *URAI*, pp. 395-398, 2010.
- [6] T. Dierks and S. Jagannathan, "Output feedback control of a quadrotor UAV using neural networks," *IEEE Trans on Neural Networks*, vol. 21, no. 1, pp. 50-66, 2010.
- [7] S. H. Jeong, S. Jung, and M. Tomizuka, "Attitude control of a quad-rotor system using an acceleration-based disturbance observer: empirical approach," *IEEE Conf. on AIM*, pp. 916-921, 2012.
- [8] S. H. Jeong and S. Jung, "Design and experimental studies of a disturbance observer for attitude control of a quad-rotor system," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 11, pp. 1-7, 2013.
- [9] H. W. Jeon and S. Jung, "Embedded Kalman filter design using FPGA for estimating acceleration of a time-delayed controller for a robot arm," *Journal of institute of control, robotics and systems (in Korean)*, vol. 15, no. 2, pp. 148-154, 2012.
- [10] J. G. Lim and S. Jung, "Experimental studies of attitude control of a quad-rotor system using a time-delayed controller," *Journal of Institute of Control, Robotics, and Systems (in Korean)*, vol. 20, no. 4, pp. 381-388, 2014.
- [11] S. H. Jeong and S. Jung, "Design, control, and implementation of small quad-rotor system under practical limitation of cost effectiveness," *Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 324-335, Sep. 2013.
- [12] J. G. Lim and S. Jung, "Altitude control of a quad-rotor system by using a time-delayed control method," *Journal of Institute of Control, Robotics, and Systems (in Korean)*, vol. 20, no. 7, pp. 724-729, 2014.

임 정 근

제어·로봇·시스템학회 논문지, 제20권 제7호 참조.

정 슬

제어·로봇·시스템학회 논문지, 제23권 제10호 참조.