

시간지연 제어를 이용한 쿼드로터 시스템의 고도제어에 대한 연구

Altitude Control of a Quad-rotor System by Using a Time-delayed Control Method

임 정 근, 정 슬*
(Jeong Geun Lim¹ and Seul Jung^{1,*})

¹Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

Abstract: This paper presents the altitude control of a quadrotor system under the disturbance. The altitude is measured by an ultrasonic sensor attached at the bottom of the quadrotor system and the measured altitude data are used in the time-delayed controller. To test the robustness of the controller, a weight attached to the center of the system is dropped intentionally several times to cause disturbances to the system. Performances of the altitude control by the PID control and time-delayed control method are compared experimentally. Experimental studies are conducted to verify the outperformance of the time-delayed controller for controlling the altitude of the quadrotor system under disturbances.

Keywords: quadrotor system, altitude control, time-delayed control

I. 서론

현재 항공분야에서는 미래형 개인항공기와 무인 항공기에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 무인비행체는 군사지역에서의 정찰임무나 위험 지역에서의 탐사 등의 역할을 수행함으로써 그 관심이 더욱 커지고 있다. 이러한 임무를 수행하기 위해서 가장 먼저 이루어져야 할 것은 안전한 비행이다. 외란에 대해 강건하게 대처할 수 있어야 안정하게 비행을 할 수 있다.

항공기는 크게 두 가지의 형태로 나눌 수 있다. CTOL (Conventional Take-Off and Landing)은 동력효율이 좋은 반면 활주로와 같은 넓은 공간이 필요하다. 하지만 VTOL (Vertical Take-Off and Landing)은 동력효율이 CTOL에 비해 좋지 않지만 좁은 공간에서의 이착륙이 가능하고, 호버링이 가능하다.

대표적인 VTOL 시스템중의 하나인 쿼드로터 시스템은 빌딩이 많은 도심이나, 지형 지물이 복잡한 지형에서의 비행이 유리하다. 또한 4개의 로터로 자세를 유지하여 안정적인 호버링이 가능하고 전 방향으로 움직일 수 있는 장점을 가지고 있다[1-6]. 이러한 복잡한 지형에서 안전한 비행을 하기 위해서 가장 우선시 되는 것이 강건한 자세제어이다. 그래서 신경회로망이나 적응제어 등 많은 논문에서 자세제어에 대한 연구가 이루어져 왔다. 또한 외란에 대해 강건하도록 DOB 또는 시간 지연 제어등과 같은 강건 제어를 통한 자세제어 연구도 선행 연구로 진행되었다[7-14]. 최근에는 영상을 이용한 주행제어에 대한 연구도 활발하다[15-19].

무인비행체가 임무를 수행하기 위해서는 자세제어뿐만 아니라 고도제어가 중요하다[10]. 특히 호버링의 강점을 보여주는 VTOL 구조의 비행체에서는 더욱 그러하다. 바람과 같은 외란은 자세뿐만 아니라 고도 유지에도 영향을 미치기 때문에 본 논문에서는 외란에 강건하다고 알려져 있는 시간 지연 제어를 고도제어에 적용하였다[20,21].

선행연구에서는 외란관측기를 이용하여 쿼드로터 시스템을 실외에서 제어하였고[8] 시간지연제어를 이용하여 자세 제어를 수행하였다. 그리고 실험대위에 놓여 있는 쿼드로터의 자세를 제어하는 실험을 수행하였다[13].

본 논문에서는 시간지연 제어를 사용하여 고도제어를 수행하는 실험을 수행하였다. 초음파 센서를 통해 고도를 측정하였고 PID 제어방식과 시간지연 제어 방식의 성능을 비교하기 위해 외란이 주어진 상황에서 고도제어를 실험하였다.

외란이 포함된 z축 방향으로의 동적 모델을 시스템의 무게를 사용하였고, 가속도 성분은 3축 가속도 센서로 측정된 가속도를 자세에 대해 보정하여 z축 방향의 성분을 사용하였다. 센서를 통해 측정된 가속도는 잡음이 많이 포함되어 있어, 이를 제거하기 위해 1차 저역통과필터의 간단한 형태로 Q 필터를 설계하였다.

시간지연제어를 구성하기 위해 센서로 측정된 가속도와 시스템의 모델로 계산한 외란이 포함된 동적 모델과 외란이 포함되지 않은 이전 추력과의 차이를 통해 외란을 포함한 모델을 예측하였다. 그리고 제어기의 성능을 실험하기 위해 쿼드로터의 상단에서 무게추를 떨어뜨려 동일한 외란을 모사하여 선형제어기인 PID 제어기와 시간지연제어를 비교하였다.

II. 쿼드로터 동역학

쿼드로터 시스템은 반대방향으로 회전하는 2쌍의 로터에서 발생하는 추력 F_F, F_B, F_L, F_R 을 이용해 병진운동 $P =$

* Corresponding Author

Manuscript received July 26, 2013 / revised October 29, 2013 / accepted April 15, 2014

임정근, 정슬: 충남대학교 메카트로닉스공학과
(vest1028@nate.com/jungs@cnu.ac.kr)

※ 본 논문은 교육과학기술부 지원의 한국연구재단 2012년 기초연구 자지원사업과 지식 경제부의 서비스로봇 인력양성 AIM 센터에서 일부 지원에 의하여 연구되었으며, 지원에 감사드립니다.

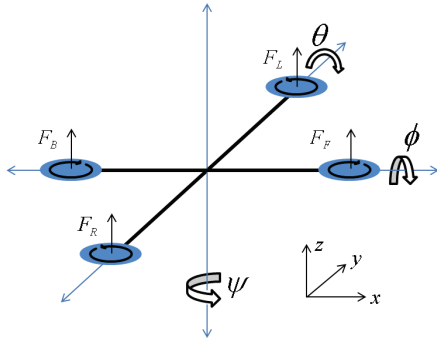


그림 1. 쿼드로터 시스템 모델.
Fig. 1. Quad rotor system model.

$[x \ y \ z]^T$ 과 회전운동 $q=[\phi \ \theta \ \psi]^T$ 을 하는 대표적인 과소작동기(underactuated system)이다. 글로벌 좌표에서 쿼드로터의 선속도와 각속도는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \dot{P} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad \omega = \dot{\Omega} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (1)$$

쿼드로터 시스템은 가속도의 영향을 많이 받는 시스템으로, 상대적으로 영향력이 적은 코리올리스 힘과 구심력의 영향을 무시하면 식 (2)와 같이 병진운동과 회전운동에 대한 단순화된 동역학식을 유도할 수 있다[9].

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= f_T(\cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi) \\ m\ddot{y} &= f_T(\cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi) \\ m\ddot{z} &= f_T\cos\phi\cos\theta - mg \\ I_{xx}\ddot{\phi} &= \tau_\phi \\ I_{yy}\ddot{\theta} &= \tau_\theta \\ I_{zz}\ddot{\psi} &= \tau_\psi \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} 는 x, y, z 축에 대한 관성모멘트이다.

쿼드로터의 제어 입력은 각 로터에서 발생하는 추력의 조합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} f_T &= u_T = F_F + F_B + F_L + F_R \\ \tau_\phi &= u_\phi = L(F_L - F_R) \\ \tau_\theta &= u_\theta = L(F_B - F_F) \\ \tau_\psi &= u_\psi = C(F_L + F_R - F_F - F_B) \end{aligned} \quad (3)$$

C 는 프로펠러에서 발생하는 추력과 회전으로 인한 반 토크와의 상관관계를 나타내는 상수이다.

그리고 쿼드로터 이동 시, 고도를 유지할 수 있도록 기울어짐에 따른 보상을 해주어야 한다.

$$u_T = m(\ddot{z} + g) \frac{1}{\cos\phi\cos\theta} \quad (4)$$

여기서 \ddot{z} 은 글로벌 좌표에서 z축 방향으로의 가속도를 나타내고, g 는 중력가속도이다.

식 (3)을 바탕으로 제어입력에 대해 쿼드로터가 발생시키는 추력은 식 (5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} F_F \\ F_B \\ F_R \\ F_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/4 & 0 & -\frac{1}{2L} & -\frac{1}{4C} \\ 1/4 & 0 & \frac{1}{2L} & -\frac{1}{4C} \\ 1/4 & -\frac{1}{2L} & 0 & \frac{1}{4C} \\ 1/4 & \frac{1}{2L} & 0 & \frac{1}{4C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_T \\ u_\phi \\ u_\theta \\ u_\psi \end{bmatrix} \quad (5)$$

III. 제어기 설계

비행체는 임무를 수행할 때, 바람과 같은 외란의 영향을 많이 받는다. 따라서 본 논문에서는 이러한 외란의 영향을 줄이고 성능을 개선하기 위해 시간 지연 제어를 시스템에 적용하였다.

1. PID 제어

PID 제어를 이용한 제어 입력식은 식 (6)과 같다.

$$F(t) = (K_p e + K_I \int edt + K_D(\dot{e})) + h \quad (6)$$

선형제어기를 사용했을 때에는 h 로 나타나는 외란과 같은 불확실성을 예측하기 어렵다. 따라서 외란에 의해 제어성은 큰 영향을 받게 된다.

본 논문에서 고도제어를 위해 사용한 PID 제어 입력은 식 (7)과 같다.

$$u_H = K_p(z_d - z) + K_I \int (z_d - z)dt + K_D(\dot{z}_d - \dot{z}) \quad (7)$$

여기서 z 는 고도이다. 그림 2에 PID 제어 블록 다이어그램이 나타나 있다.

2. 시간 지연 제어

시간 지연 제어는 방식이 매우 간단하고 실시간이 가능하여 제어 효과가 좋다. 시간 지연 제어는 외란이 포함된 동적 모델에서 외란이 포함되지 않은 이전 추력의 차이를 통해 불확실성을 예측한다. 이를 위해 이전 추력을 사용하기 때문에 제어주기는 시간 지연 제어기에서 가장 중요한 요소중의 하나이다. 하지만 이러한 문제는 성능이 좋은 상용 DSP를 사용함으로써 해결하였다.

본 논문에서 적용한 시간 지연 제어기의 제어 입력식은 식 (8)과 같다 [13].

$$F(t) = M(K_p e + K_I \int edt + K_D \dot{e}) + \bar{h} \quad (8)$$

PID 제어와 달리 시간 지연 제어는 \bar{h} 로 표현되는 불확실성을 식 (9)와 같이 이전 추력과 외란이 포함된 동적 모델의 차이를 통해 계산할 수 있다.

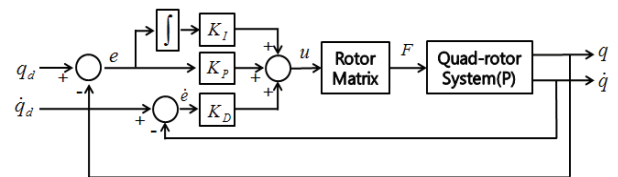


그림 2. PID 제어블록.
Fig. 2. PID control block.

$$\bar{h} = F(t - \lambda) - M\dot{q}(t - \lambda) \quad (9)$$

결과적으로 시간 지연 제어의 제어입력은 식 (10)과 같다.

$$F(t) = M(K_p e + K_I \int edt + K_D \dot{e}) + F(t - \lambda) - M\dot{q}(t - \lambda) \quad (10)$$

제어 주기가 충분히 빠르고 모델이 정확하면 불확실성을 정확히 예측할 수 있기 때문에 외란에 대해 PID 제어 보다 더 강건할 것이라는 것을 알 수 있다.

시간 지연 제어는 외란이 포함된 동적 모델을 얻기 위해 가속도 센서로 측정된 가속도 값과 시스템의 모델을 이용한다. 본 논문에서는 글로벌 좌표의 z축 방향의 성분만 관심이 있으므로 시스템의 무게를 관성으로 사용하였다.

가속도 성분은 3축 가속도 센서를 이용하여 측정하였다. 가속도 센서는 기체에 설치되어 있기 때문에 기체의 자세에 따라 축의 방향이 달라진다. 따라서 글로벌 좌표의 z축으로의 가속도 성분을 구하기 위해 식 (11)과 같은 회전 행렬을 이용하여 보정한다.

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{bx} \\ a_{by} \\ a_{bz} \end{bmatrix} \quad (11)$$

그리고 행렬식을 계산하여 z축 방향의 가속도 성분을 구하면 식 (12)와 같다.

$$z = -x_s s\theta + y_s c\theta s\phi + z_s c\theta c\phi \quad (12)$$

식 (12)와 같이 보정한 가속도와 시스템의 z축 방향으로의 관성인 무게를 곱하여 외란이 포함된 동적 모델을 계산할 수 있다.

하지만 센서를 통해 측정된 가속도는 많은 노이즈를 포함하고 있다. 따라서 본 논문에서는 1차 저역통과필터의 형태로 설계된 Q 필터를 사용하여 노이즈 성분을 제거하였다.

$$Q = \frac{K_q}{\tau s + 1} \quad (13)$$

Q 필터의 이득 값은 1로 주어 시간 지연 제어의 입력을 그대로 사용하였고, 컷 오프 주파수는 실험적으로 구하였다.

따라서 본 논문에서 시스템에 적용한 최종 제어 입력은 식 (14)와 같고 제어블록 다이어그램은 그림 3에 나타나 있다.

$$F(t) = M(K_p e + K_I \int edt + K_D \dot{e}) + (u(t - \lambda)C_{RF} - M\dot{q}(t - \lambda))Q \frac{1}{C_{RF}} \quad (14)$$

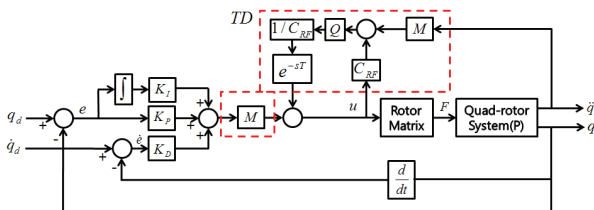


그림 3. 시간지연제어블록.
Fig. 3. Time-delayed control block.

실제로 시스템에서 동적 모델을 통해 이전 제어 입력과의 차이를 계산하고자 할 때, 추력과 DSP 프로그램상의 제어입력과 차이를 보정해 주어야 한다. 이를 위해 PWM에 따른 추력시험을 하였고, 실제 추력과 프로그램의 제어 입력상의 상관관계 C_{RF} 을 실험적으로 구하였다.

IV. 쿼드로터 시스템

1. 센서 실험

고도 제어를 하기 위해 사용한 센서는 SRF05초음파 센서로 특징은 표 1과 같다.

초음파 센서의 거리는 식 (15)를 통해 계산할 수 있다.

$$S = \frac{340(\text{ultrasonic pulse velocity}) \times t}{2} \quad (15)$$

여기서 S는 거리이고, t는 왕복 시간이다.

센서의 성능을 테스트 하기 위해 실측 거리와 센서로 측정된 거리를 비교하였다. 그 결과 그림 4에 나타난 것처럼 0.6m 안쪽에서 선형적인 결과를 얻을 수 있었다. 0.6m 이상에서는 오차가 점점 크게 나타났다. 따라서 본 실험에서는 고도의 높이를 0.5m로 설정하고 실험하였다.

2. 자세 변화에 따른 센서 값 보정

고도를 측정하기 위해 그림 5와 같이 초음파 센서를 설치하였다. 쿼드로터 아래 부분에 장착되어 있어 그라운드로부터의 높이를 측정한다.

초음파 센서는 직선 거리만을 측정하기 때문에 같은 고도에 있어도 시스템의 자세에 따라 측정 거리가 달라지게 된다. 또한 초음파 센서가 시스템의 특성으로 회전축의 중심에 올 수 없기 때문에 이에 따른 보정이 필요하다.

표 1. SRF05 초음파 센서의 특징.

Table 1. Characteristics of an ultra sonic sensor.

| Specifications | |
|----------------|---|
| frequency | 40kHz |
| Max Range | 4 meters |
| Min Range | 3 centimeters |
| Input Trigger | 10uSec minimum TTL level pulse |
| Echo pulse | Positive TTL level signal proportional to range |

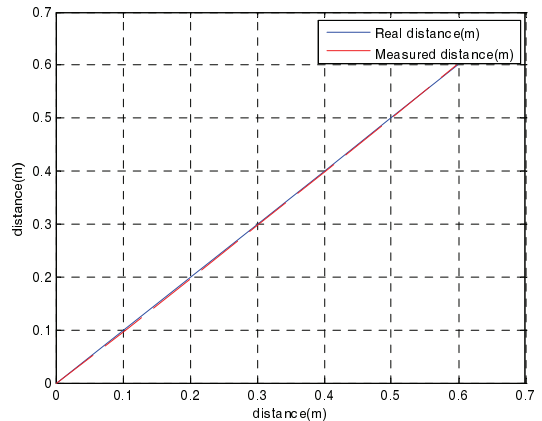


그림 4. 실측거리와 센서로 측정된 거리 비교.
Fig. 4. Comparison between sensor data and real distance.

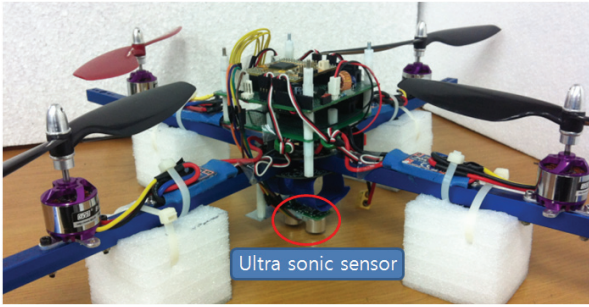


그림 5. 실제 쿼드로터 시스템.
Fig. 5. Quad-rotor System.

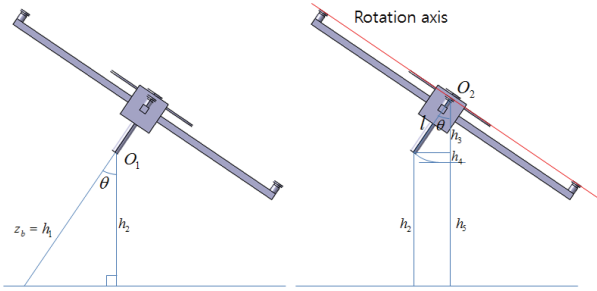


그림 6. 자세에 따른 고도변화.
Fig. 6. Altitude configuration of sensor location.

센서에서 측정하는 실제 거리는 h_1 이다. 2차원 평면에서는 그림 6과 같이 $\cos\theta$ 를 곱하여 보상하면 되지만 3차원 공간이기 때문에 식 (16)과 같이 회전행렬을 이용하여 센서의 높이를 구한다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서 x, y, z 는 글로벌 좌표계에서의 위치를 나타내고, x_b, y_b, z_b 는 물체 좌표계에서의 위치를 나타낸다. 본 논문에서 알고자 하는 고도 z 에서 센서 끝을 x, y 축으로 움직이지 않는 고정점으로 간주하면 물체 좌표계의 $x_b = y_b = 0$ 이고 $z_b = h_1$ 이기 때문에 센서 끝에서 평면까지의 거리는 식 (17)과 같다.

$$z = z_b \cos\theta \cos\phi \quad (17)$$

쿼드로터의 회전축은 그림 6과 같이 로터의 높이와 같다. 따라서 h_3 은 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_3 = l \cos\theta \cos\phi \quad (18)$$

여기서 l 은 COG에서 센서까지의 거리이다. 그리고 기울어지지 않았을 때의 센서의 고도는, 현재 측정하고 있는 h_2 에서 기울어지면서 높아진 센서의 높이 h_4 를 빼주어야 한다. 따라서 시스템의 자세와 센서위치에 대한 보상을 한 실제 고도는 식 (19)와 같다.

$$h_5 = z_b \cos\theta \cos\phi - l(1 - \cos\theta \cos\phi) \quad (19)$$

표 2. 쿼드로터 시스템의 제원.

Table 2. Quadrotor specifications.

| | |
|--|------------------|
| Total weight | 1.028kg |
| Distance from COG to the rotor | 0.185m |
| The full length | 0.6m |
| The full width | 0.6m |
| Body height | 0.19m |
| Overall height | 0.255m |
| MCU | DSP28346 |
| Sampling time of system | 2ms |
| Sampling time of ultrasonic distance sensors | 26ms |
| Control method | RF radio control |

3. 시스템의 구현

표 2는 본 논문에서 실험한 쿼드로터 시스템의 제원이다. 총 무게는 약 1kg이고 크기는 0.6m 로 실내에서도 비행할 수 있도록 소형으로 제작하였다. MCU는 DSP28346을 사용하였고 자세제어에 대한 제어주기는 2ms이다. 고도제어를 할 때에는 초음파 센서의 특징 때문에 주기가 큰 주파수를 입력으로 주어야 더 먼 거리를 측정할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 고도제어에 대한 제어주기를 26ms로 설정하였다.

V. 실험

1. 실험환경

시간지연제어기와 PID 제어기의 성능을 비교하기 위해서 그림 7과 같이 시스템을 구성하였다. 자세제어에 영향을 주지 않기 위해서 시스템의 무게중심에 외란이 가해지도록 가운데 부분에 무게추가 있는 원통을 설치하였다. 무게추는 원통 안에서 자유롭게 움직일 수 있도록 시스템을 설계하였다.

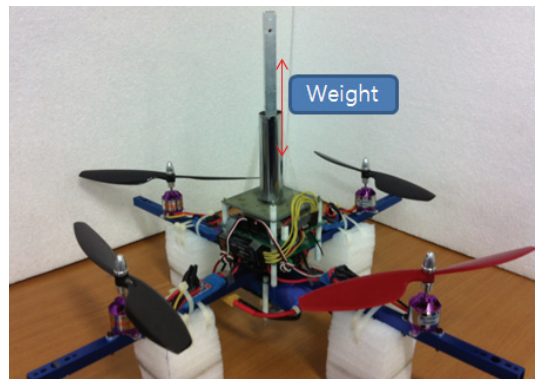


그림 7. 실험환경.
Fig. 7. Experimental setup.



그림 8. 무게 추.
Fig. 8. The weight.

표 3. PID 이득 값.

Table 3. PID gains.

| | |
|-------|-----|
| K_P | 30 |
| K_D | 0.8 |
| K_I | 20 |

표 4. 시간지연제어기의 이득 값.

Table 4. Time delayed control gains.

| | |
|----------|-------|
| K_P | 30 |
| K_D | 0.8 |
| K_I | 20 |
| K_q | 1 |
| f_c | 12Hz |
| C_{RF} | 0.973 |

외란을 주기 위해 그림 8에 보여진 것처럼 160g의 무게 추를 약 0.1m의 일정한 높이에서 손으로 잡고 있다가 주기적으로 떨어뜨려 실험을 하였다.

표 3은 실험에 사용된 PID 제어기의 이득값이고 표 4는 시간지연제어기에 사용된 변수값이다. PID와 시간지연제어기에서 같은 제어기의 이득값을 사용하였다. 제어기의 이득값은 여러 번의 실험을 통해 구한 것이다. 필터의 컷오프 주파수도 실험을 통해 구한 주파수이다.

2. 실험결과

먼저 고도제어를 수행하였다. 그림 9와 같이 목표고도를 0.5m로 주고 호버링을 하도록 하였다. 그 다음에 호버링 상태에서 무게 추를 주기적으로 떨어뜨려 시스템에 외란을 주었다. 그림 9(a)는 PID 제어기일 경우이고 그림 9(b)는 시간지연 제어기의 경우이다. 실제 동영상에서는 그 차이를 판별할 수 있지만 캡처된 그림으로는 제어기의 성능을 판별하기 어렵다.

하지만 그림 10에서처럼 실험결과와의 고도 데이터를 그려 보면 차이가 남을 알 수 있다. 그림 10(a)에서 보면 32초, 45초, 그리고 60초 부근에서 3번의 외란이 주어졌던 것을 볼 수 있다. 초기에 나타나는 0.05m의 오버슈트는 스텝응답의 오버슈트이다. 외란이 주어질 때마다 쿼드로터는 아래로 움직인 후에 다시 위로 올라 오는 것을 볼 수 있다. 아래 위로 움직이는 거리가 약 0.15m로 나타났다.

그림 10(b)는 같은 실험을 했을 때 시간지연제어기의 결과이다. 실험에서 모두 4번의 외란이 주어졌다. 외란이 주어졌을 때에 아래위로 움직인 거리를 살펴보면 약 0.07m정도로 상대적으로 작은 것을 알 수 있다.

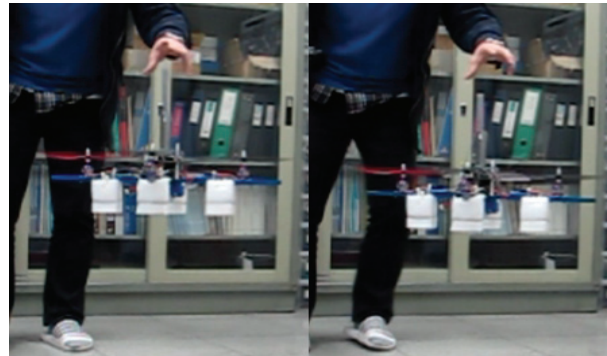
그림 10에서와 같이 외란에 대한 영향력이 시간지연제어기의 경우에 PID 제어기보다 약 1/2만큼 줄어든 것을 확인할 수 있다. 따라서 시간지연제어기를 사용하였을 때가 PID 제어기를 사용하였을 때보다 낙하 거리가 더 짧은 것을 확인할 수 있다.

또한 0.5m로의 수렴하는데 PID 제어기는 5초 이상 걸리는데 반해 시간지연제어기의 경우에는 3초이내로 수렴시간이 더 짧은 것을 볼 수 있다.

결과적으로 외란에 대해 시간지연 제어기가 더 잘 대처하고 있다고 볼 수 있다.



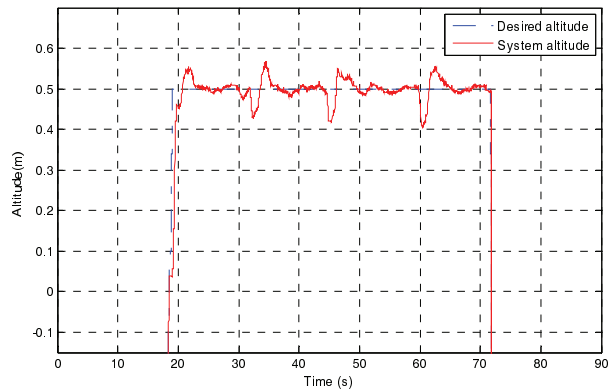
(a) PID control.



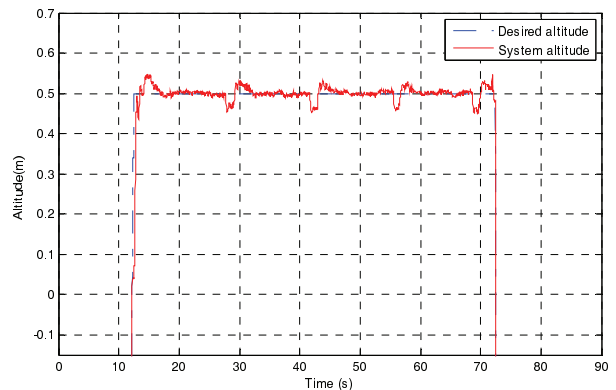
(b) Time-delayed control.

그림 9. 외란을 주었을 때 제어기의 성능 비교.

Fig. 9. Performances of two controllers under disturbance.



(a) PID control.



(b) Time-delayed control.

그림 10. 그림 9의 제어성능 비교 데이터.

Fig. 10. Corresponding data of Fig. 9.

VI. 결론

본 논문에서는 대표적인 VTOL 시스템인 쿼드로터 시스템의 고도제어에 대해 기술하였다. 외란에 약한 쿼드로터 시스템의 성능을 개선하기 위해 시간지연제어기를 적용하였다. 외란에 대한 제어기의 성능을 실험하기 위해서 시스템의 무게 중심에 원통을 설치하고 일정한 높이에서 무게 추를 주기적으로 낙하시키며 시간지연제어기와 PID 제어기의 성능을 비교하였다. 시간지연제어기를 사용하였을 때, 고도의 오차가 반으로 줄었으며, 기준고도로의 수렴시간이 더 짧은 것을 확인할 수 있었다. 결론적으로 외란에 대한 시간지연제어기의 성능이 PID제어기의 성능보다 나은 것을 확인할 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. Electrumagn. 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 and S. Jung, "Novel Design and Position Control of an Omni-directional Flying Automobile (Omni-Flymobile)," *ICCAS*, pp. 2480-2484, 2010.
- [8] 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.
- [9] S. Jung, "An Impedance Force Control Approach to a Quad-rotor System Based on an Acceleration-Based Disturbance Observer," *Journal of Intelligent Robot Systems*, September 2013.
- [10] J. G. Lim and S. Jung, "Trajectory planning and control for safe landing of a quadrotor system," *Summer Conference of KIEE*, 2013.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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*, September, vol. 13, no. 4, pp. 324-335, 2013.
- [15] M. Achtelik, T. Zhang, K. Kuhnlenz, and M. Buss, "Visual tracking and control of a quadcopter using a stereo camera system and inertial sensors," *IEEE Conf. on Mechatronics and Automation*, pp. 2863-2869, 2009.
- [16] E. Altug, J. P. Ostrowski, and R. Mahony, "Control of a quad-rotor helicopter using visual feedback," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 72-77, 2002.
- [17] N. Guenard, T. Hamel, and R. Mahony, "A practical visual servo control for an unmanned aerial vehicle," *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 24, no.2, pp. 331-340, 2008.
- [18] M. Schwager, B. Jullian, M. Angermann, and D. Rus, "Eyes in the sky : Decentralized control for the deployment of robotic camera networks," *Proceeding of IEEE*, vol. 99, no. 9, pp. 1514-1516, 2011.
- [19] B. Herrise, T. Hamel, R. Mahony, and F. Russotto, "Landing a VTOL unmanned aerial vehicle on a moving platform using optical flow," *IEEE Trans. on Robotics*, 2011.
- [20] T. C. Hsia and L. S. Gao, "Robot manipulator control using decentralized linear time invariant time-delayed joint controllers," *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2070-2075, 1990.
- [21] K. Youcef-Toumi, "Stability of uncertain linear system with time delay," *ASME Trans. on Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 113, pp. 558-567, Dec. 1991.



임 정 군

2012년 충남대학교 기계설계공학과 졸업.
2012년~현재 충남대학교 대학원 메카트로닉스공학과 석사과정 수료. 관심분야는 지능로봇시스템, 쿼드로터 시스템.



정 슬

1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터 공학과 석사. 동 대학 박사. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 지능제어 및 지능로봇 시스템, 장애우를 위한 보행 및 휠체어 로봇 설계 및 개발, 가정용 서비스 로봇 개발, 유무인수송체 시스템, 로봇 교육.