

시간지연 제어를 이용한 쿼드로터 시스템의 자세제어의 실험적 연구

Experimental Studies of Attitude Control of a Quad-rotor System using a Time-delayed Controller

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

¹Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

Abstract: In this paper, the attitude of a quadrotor system is controlled by a time-delayed control method which uses the previous information to cancel out uncertainties in the system. Although the linear controller works for the attitude control, the robust performance against disturbance is relatively poor. Therefore, a time-delayed controller as a robust controller is used. Experimental studies are conducted to validate the performance by the time-delayed control method. The performances of both a linear controller and a time-delayed controller are compared.

Keywords: TDC (Time-Delayed Controller), attitude control, quad-rotor system

I. 서론

최근에 무인 비행체에 대한 관심이 증가하고 있다. 무인비행체는 군사지역의 정찰업무나 사람의 경호 또는 위험지역의 탐사 등의 업무를 주로 수행한다. 무인비행체에서 가장 중요하게 대두되는 것은 안정한 주행이다. 바람과 같은 외란에 강건하게 대처할 수 있어야 목적지까지 안정하게 비행할 수 있다. 이는 무인비행체의 자율주행의 기본이 된다.

무인비행체는 착륙방식에 따라 VTOL (Vertical Take-Off Landing) 방식과 CTOL (Conventional Take-off and Landing) 방식으로 나뉜다. 쿼드로터 시스템은 대표적인 VTOL (Vertical take-Off landing) 방식의 무인비행체이다. 이 비행체는 CTOL 방식과 달리 활주로를 필요로 하지 않기 때문에, 빌딩이 많은 도심지역과 지형지물이 많은 복잡한 지형에 유리하다. 또한 4개의 로터로 자세제어를 유지하므로 안정적인 호버링 제어가 가능하고 전방향으로 움직일 수 있는 장점이 있다.

이러한 복잡한 곳을 안정하게 비행하기 위해서는 강건한 자세제어가 필요하다[1-6]. 특히, 쿼드로터 시스템은 작고 기체가 가볍기 때문에, 야외에서의 주행은 바람과 같은 외란에 쉽게 영향을 받는다.

비록 실내주행이지만 정확한 위치제어에 따른 비행의 데모[7]와 역진자를 패스하는 쿼드로터[8], 탁구를 연습하는 쿼드로터 등이 인터넷을 통해 선 보인다.

많은 논문에서 이러한 자세 안정성의 문제점을 극복하기 위해 다양한 형태의 제어방식에 대해 제안하였다. 쿼드로터

시스템은 4개의 로터로 6개의 움직임을 제어하는 대표적인 under-actuated 비선형 시스템으로 제어가 어렵다. 하지만 동역학 식이 상대적으로 간단화 될 수 있고 가속도가 중요한 시스템이므로 간단한 선형 제어를 사용하여 제어한다.

기존의 선형제어를 기반으로 모델 기반의 제어방식이나 신경회로망이나 퍼지같은 지능 도구를 사용하는 방식, 적응 방식 등 다양한 방법으로 자세제어에 대한 연구가 진행되었다[5].

선행연구에서는 가속도 센싱 기반의 외란 관측기를 설계하여 외란을 줄이는 제어방식을 쿼드로터 시스템에 적용하였다[6]. 실험을 통하여 외란제어기의 성능을 검증하였다[9].

본 논문에서는 쿼드로터 시스템의 자세제어를 잘 수행하기 위해서 외란에 강한 시간지연 제어방식을 사용하였다. 시간지연제어방식은 외란이나 동적 불확실성을 보상하기 위해 사용하여 왔으며, 그 제어구조가 간단하여 로봇팔을 제어하는데 널리 사용되어왔다[10-15]. 최근에는 쿼드로터에 적용한 사례도 있다[16].

시간지연제어 방식의 중요한 요소는 빠른 샘플링과 가속도 측정이다. 본 논문에서는 자이로 센서의 센서 값을 미분하여 각 가속도를 구하고, 모델변수 값을 곱하여 제어입력값을 모델링 하였다.

각축을 제어하여 성능실험을 하였고, 외란으로 인한 Yaw 축의 회전을 제어하기 위해 자이로 센서의 값을 이용하여 Yaw 축을 중심으로 회전하는 각속도에 대한 비례제어를 하였다. 비례제어기와 시간지연 제어를 기반으로 다양한 실험을 통해 쿼드로터 제어성능을 평가하고 비교하였다.

시간지연 제어기의 성능을 검증하기 위해 실험적 연구를 수행하였다. 외란을 의도적으로 주고 다양한 모델변수값에 따른 성능을 실험적으로 확인하였다. 또한 사용한 Q 필터 계수값, 컷오프 주파수와 이득값에 따라 성능에 미치는 영향도 실험을 통해 확인하였다.

* Corresponding Author

Manuscript received July 19, 2013 / revised October 29, 2013 / accepted December 5, 2013

임정근, 정슬: 충남대학교 메카트로닉스공학과

(vestal028@nate.com/jungs@cnu.ac.kr)

※ 본 논문은 교육과학기술부 2012년 기초연구지원사업과 지식경제부의 서비스로봇 인력양성 AIM 센터의 지원에 의하여 연구되었으며, 지원에 감사드립니다.

II. 쿼드로터 모델링

1. Quad Rotor 시스템의 기구학

쿼드로터는 서로 반대 방향으로 회전하는 두 쌍의 프로펠러에서 발생하는 추력 F_F, F_B, F_L, F_R 을 이용하여 병진운동 $P=[x \ y \ z]^T$ 과 회전운동 $q=[\phi \ \theta \ \psi]^T$ 의 6자유도 운동을 하는 underactuated 시스템이다. 그림 1에서 $[\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T$ 와 $[\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T$ 로 나타나는 글로벌 좌표에서의 선속도, V 와 각속도, ω 는 회전행렬 R 과 서로 다른 프레임의 각속도 관계를 나타내는 T 행렬을 통해 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V &= \dot{P} = R\dot{V}_b \\ \omega &= T\omega_b \end{aligned} \quad (1)$$

R 은 회전행렬로 식 (2)와 같이 표현한다.

$$R = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

T 행렬은 서로 다른 프레임의 각속도 관계를 나타내는 행렬이다.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

식을 간단하게 표현하기 위해 $s\phi = \sin\phi$, $c\phi = \cos\phi$, $t\phi = \tan\phi$, $s\theta = \sin\theta$, $c\theta = \cos\theta$, $t\theta = \tan\theta$, $s\psi = \sin\psi$, $c\psi = \cos\psi$, $t\psi = \tan\psi$ 로 나타내었다.

2. Quad Rotor 시스템의 동역학

식 (1)을 미분하면 쿼드로터 시스템의 가속도와 각 가속도에 대한 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{P} &= \dot{R}V_b + R\dot{V}_b \\ &= R(\omega_b \times V_b + \dot{V}_b) \\ \dot{\omega} &= \dot{C}\dot{q} + C\ddot{q} \quad (C = T^{-1}) \end{aligned} \quad (4)$$

가속도에 큰 영향을 받는 쿼드로터 시스템은 상대적으로 영향력이 작은 코리올리스 힘과 구심력을 무시하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

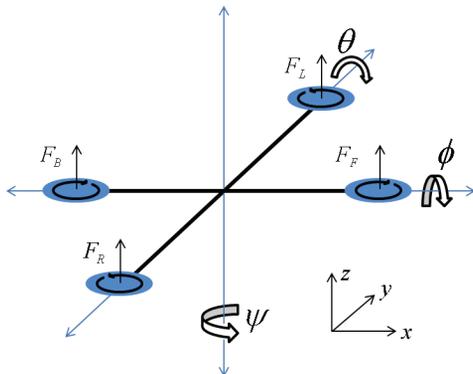


그림 1. 쿼드로터 시스템의 좌표계.

Fig. 1. Coordinates of quad-rotor system.

$$\begin{aligned} \ddot{P} &= R\dot{V}_b \\ \dot{\omega} &= C\ddot{q} \end{aligned} \quad (5)$$

글로벌 좌표에서 병진운동의 경우, 식 (5)에서 중력가속도를 고려하여 나타낼 수 있다. 그리고 실제 쿼드로터 시스템을 동작하기 위해서 발생시키는 추력은 시스템의 Yaw 축 방향으로만 발생하므로, 병진운동에 관한 동역학식을 식 (6)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m\ddot{x} \\ m\ddot{y} \\ m\ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_T \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

f_T 와 g_0 는 각각 추력의 합과 중력가속도를 나타낸다.

글로벌 좌표에서 회전운동의 경우, 식 (5)에서 관성모멘트를 고려하여 나타낼 수 있다.

$$C\ddot{q} = \dot{\omega} = \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{I_{xx}}\tau_\phi \\ \frac{1}{I_{yy}}\tau_\theta \\ \frac{1}{I_{zz}}\tau_\psi \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} 는 x, y, z축의 관성 모멘트이다.

따라서 병진운동과 회전운동에 관한 동역학식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= f_T(\cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi) \\ m\ddot{y} &= f_T(\cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi) \\ m\ddot{z} &= f_T \cos\phi \cos\theta - mg \\ I_{xx}\ddot{\phi} &= \tau_\phi \\ I_{yy}\ddot{\theta} &= \tau_\theta \\ I_{zz}\ddot{\psi} &= \tau_\psi \end{aligned} \quad (8)$$

쿼드로터의 제어입력은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} f_T &= u_T = F_F + F_B + F_L + F_R \\ \tau_\phi &= u_\phi = L(F_L - F_R) \\ \tau_\theta &= u_\theta = L(F_B - F_F) \\ \tau_\psi &= u_\psi = C(F_L + F_R - F_F - F_B) \end{aligned} \quad (9)$$

C 는 프로펠러에 대한 force-moment 상수이다. 식 (9)를 바탕으로 제어입력에 대해 쿼드로터가 발생시키는 힘은 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_F \\ F_B \\ F_R \\ F_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/4 & 0 & -1/2L & -1/4C \\ 1/4 & 0 & 1/2L & -1/4C \\ 1/4 & -1/2L & 0 & 1/4C \\ 1/4 & 1/2L & 0 & 1/4C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_T \\ u_\phi \\ u_\theta \\ u_\psi \end{bmatrix} \quad (10)$$

III. 제어기 설계

1. PD 제어

본 논문에서는 에러 누적에 대한 문제를 피하기 위해 일반적으로 많이 사용하는 PID제어 대신 PD 제어를 사용하였다.

$$\tau(t) = (K_p e + K_D(-\dot{q})) + h \quad (11)$$

여기서 $e = q_d - q$ 이다. PD 제어는 선형제어기로서 h 로 표현되는 불확실성을 예측할 수 없기 때문에, 외란에 의해서 제어성능에 큰 영향을 받게 된다.

본 논문에서 PD 제어를 사용한 제어입력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_T &= m(\ddot{z} + g) \frac{1}{\cos\phi \cos\theta} \\ u_\phi &= K_{p\phi}(\phi_d - \phi) + K_{D\phi}(-\dot{\phi}) \\ u_\theta &= K_{p\theta}(\theta_d - \theta) + K_{D\theta}(-\dot{\theta}) \\ u_\psi &= K_{D\psi}(-\dot{\psi}) \end{aligned} \quad (12)$$

u_T 는 기울어짐을 보상한 추력에 대한 제어입력을 나타낸다. u_ϕ, u_θ, u_ψ 는 각각 Roll, Pitch, 그리고 Yaw 축에 대한 제어입력이다. 그림 2는 PD 제어 블록도이다.

2. 시간 지연 제어

시간 지연 제어는 매우 간단하여 실시간으로 운용이 가능하므로 제어 효과가 좋다. 시간 지연 제어는 외란이 포함된 동적 모델에서 외란이 포함되지 않은 이전 토크와의 차이를 통해 외란을 예측한다. 이전 토크를 사용하기 때문에 시간 지연 제어가 성능을 발휘하기 위해서는 빠른 제어주기를 요구한다. 이는 성능이 좋은 상용 DSP를 사용함으로써 해결하였다.

시스템의 일반적인 동역학식은 다음과 같다.

$$\hat{D}\ddot{q}(t) + h(t) = \tau(t) \quad (13)$$

시간 지연 제어는 식 (13)에서 나타난 불확실성 $h(t)$ 를 이전 정보를 사용하여 예측할 수 있다.

$$\bar{h} = \tau(t - \lambda) - \hat{D}\ddot{q}(t - \lambda) \quad (14)$$

여기서 λ 는 샘플링이고 \hat{D} 은 D 의 평가치이다. 평가치를 상수로 사용하는 것에 대한 안정성 분석은 이미 발표되었다 [17,18]. 따라서 시간 지연 제어를 이용한 제어입력은 다음과 같다.

$$\tau(t) = \hat{D}(K_p e + K_D(-\dot{q})) + \tau(t - \lambda) - \hat{D}\ddot{q}(t - \lambda) \quad (15)$$

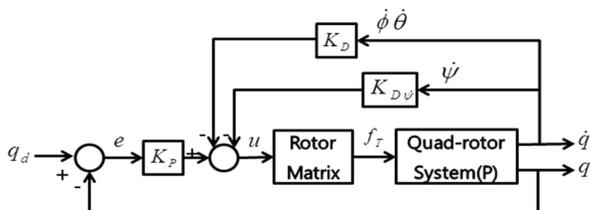


그림 2. PD 제어 블록선도.

Fig. 2. PD control block diagram.

제어 주기가 충분히 빠르고 모델이 정확하면 불확실성을 정확히 예측 할 수 있기 때문에 외란에 대해 PD 제어보다 더 강건할 것이라는 것을 알 수 있다.

시간 지연 제어는 각 가속도 값을 사용하기 때문에 잡음을 포함하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 Q 필터를 사용하였다. Q 필터는 일반적으로 다항식으로 설계하나, 본 논문에서는 1차 저역 통과 필터의 간단한 형태로 설계하였다.

$$Q = \frac{K_q}{\tau s + 1} \quad (16)$$

시간 지연 제어기와 Q 필터를 적용한 최종 제어 입력은 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned} u_T &= m(\ddot{z} + g) \frac{1}{\cos\phi \cos\theta} \\ u_\phi &= I_{xx}(K_{p\phi}(\phi_d - \phi) + K_{D\phi}(-\dot{\phi})) \\ &\quad + [C_R u_\phi(t - \lambda) - I_{xx} \ddot{\phi}(t - \lambda)] \frac{Q}{C_R} \\ u_\theta &= I_{yy}(K_{p\theta}(\theta_d - \theta) + K_{D\theta}(-\dot{\theta})) \\ &\quad + [C_R u_\theta(t - \lambda) - I_{yy} \ddot{\theta}(t - \lambda)] \frac{Q}{C_R} \\ u_\psi &= K_{D\psi}(-\dot{\psi}) \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)에서 $\tau(t - \lambda) = C_R u(t - \lambda)$ 로 C_R 은 DSP프로 그래밍의 제어입력과 토크와의 관계를 나타내는 상수이다. 그림 3 은 시간지연제어 블록도를 나타낸다.

일반적으로 로터의 추력은 식 (18)과 같이 로터의 각속도의 제곱에 비례한다.

$$F \approx \alpha_{thrust} \omega^2 \quad (18)$$

이것을 실제로 측정하기는 어렵기 때문에 본 실험에서는 추력과 제어입력과의 비례상수를 실험을 통해 구하였다. 구현

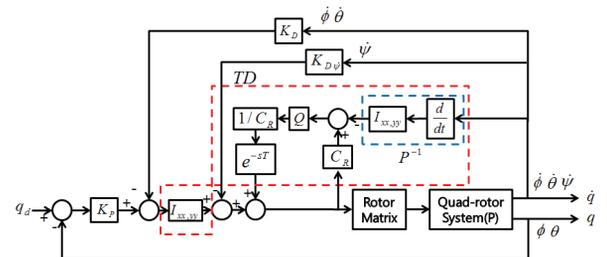


그림 3. 시간 지연 제어의 블록선도.

Fig. 3. A time-delayed control block diagram.

표 1. 제어 입력과 토크와의 상관관계.

Table 1. Relationship between torque and control input.

PWM	τ_L	τ_R	τ_F	τ_B
11500	0.057	0.064	0.054	0.062
12000	0.140	0.140	0.127	0.143
12500	0.220	0.221	0.204	0.219
13000	0.329	0.332	0.290	0.332

을 위한 DSP 프로그램의 제어입력과 실제 추력과의 상관관계는 표 1과 같다. 표 1에서 세로 축은 DSP 프로그램의 PWM값이고, 가로 축은 로터의 추력으로 생기는 토크이다. 실험을 통해 C_R 을 대략 0.18로 추측할 수 있었다.

IV. 실험

1. 실험 환경

그림 4는 한 축 제어를 하기 위해 쿼드로터를 설치한 모습이다. 외란에 대한 응답을 보기 위해 그림에 표시된 것과 같이 50g의 추를 매달아 주기적으로 외란을 주었다.

실험에 사용한 쿼드로터의 제원은 표 2에 나타나 있다. 표 3과 4는 실험에 사용한 PD 제어기와 시간지연 제어기의 변수값을 나타낸다.

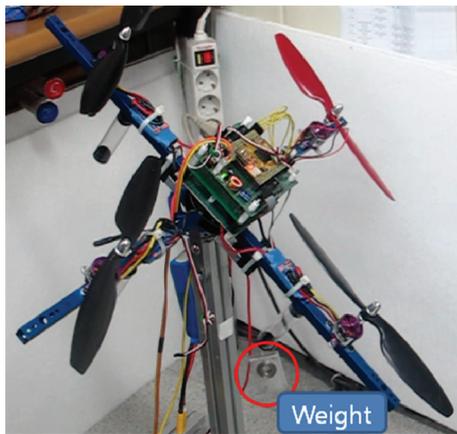


그림 4. 제어실험 환경.
Fig. 4. Experimental setup.

표 2. 쿼드로터 시스템의 제원.
Table 2. Characteristic of a quadrotor system.

Total weight	1.028kg
Distance from COG to the rotor	0.2m
The full length	0.6m
The full width	0.6m
Overall height	0.19m
MCU	DSP28346
Control method	RF radio control

표 3. PD 제어 게인 값.
Table 3. PD gains.

$K_{P\phi, \theta}$	12.8
$K_{D\phi, \theta}$	4
$K_{D\psi}$	50

표 4. 시간 지연 제어 게인 값.
Table 4. Gains for time-delayed control.

$K_{P\phi, \theta}$	12.8
$K_{D\phi, \theta}$	4
$K_{D\psi}$	50
C_R	0.18

2. 실험 결과

호버링 제어 비교, Q 필터의 계수 값 및 cutoff frequency에 따른 성능비교, 관성에 따른 성능비교, 그리고 PD 제어와 시간 지연 제어의 성능을 비교하기 위해 Roll과 Pitch 축의 제어를 수행하였다.

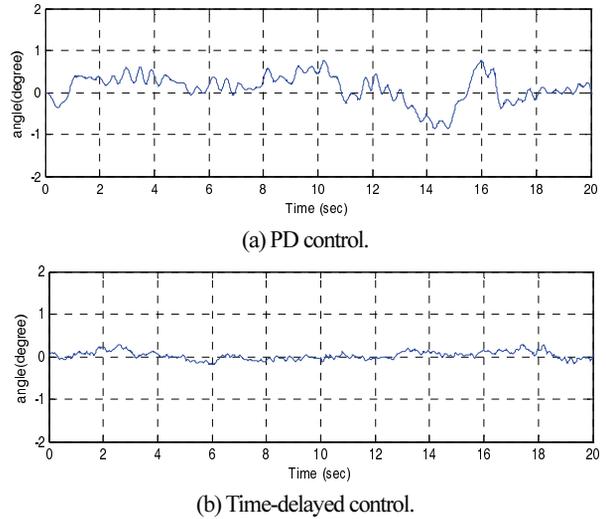


그림 5. Roll 축에 대한 호버링 제어.
Fig. 5. Hovering about Roll axis.

표 5. Roll 축 호버링 제어에 대한 RMS error.
Table 5. RMS error of the roll angle.

	RMS error (Degree)
PD control	0.2835
TD control	0.0785

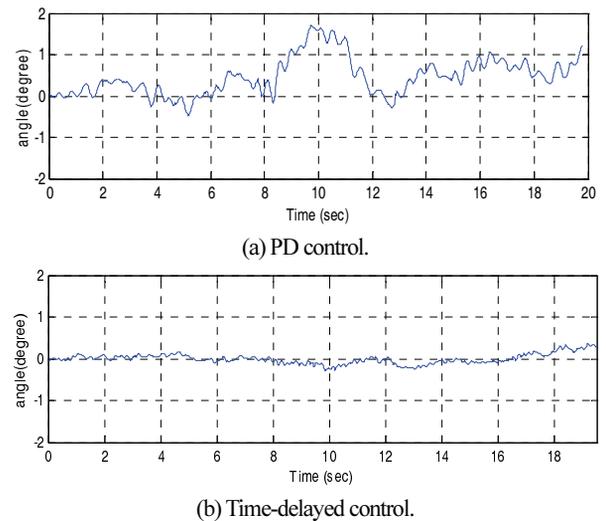


그림 6. Pitch 축에 대한 호버링 제어.
Fig. 6. Hovering about Pitch axis.

표 6. Pitch 축 호버링 제어에 대한 RMS error.
Table 6. RMS error of the pitch angle.

	RMS error (Degree)
PD control	0.5001
TD control	0.0923

2.1 Hovering 제어

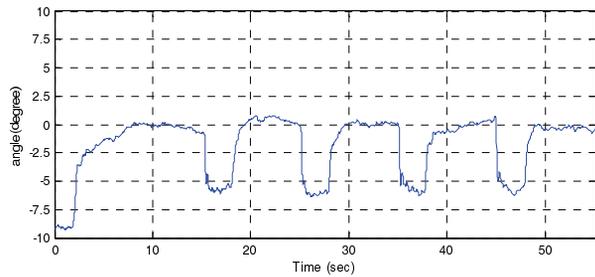
그림 5와 6은 PD 제어와 시간 지연 제어를 사용하였을 때의 호버링을 비교한 것이다. 표 5와 6은 오차를 정리한 것이다. 쿼드콥터 시스템은 내부적인 진동이나 로터에서 발생하는 바람 때문에 자체적으로 외란이 발생한다. 그래서 PD 제어기만을 사용하였을 때에는 이러한 외란에 대한 영향이 제어 성능에 반영되어 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만 시간 지연 제어는 이러한 외란을 줄이기 때문에 오차가 작은 것을 확인할 수 있다.

2.2 Q 필터의 계수 값에 따른 성능 비교

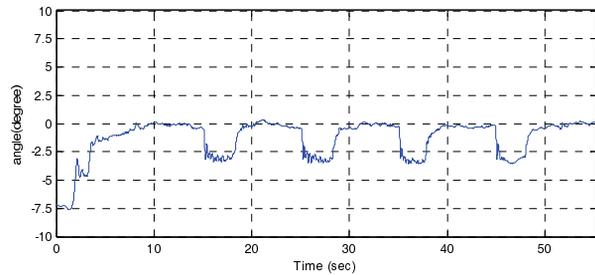
그림 7과 8은 Q 필터의 계수 값의 변화에 따른 제어기의 성능을 나타낸 그림이다. 이득값이 클수록 외란에 대해 더 강건해 진다는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 계수 값을 너무 크게 하면 오실레이션이 커지면서 발산하므로, 적절한 값을 실험적으로 찾아야 한다.

2.3 Q 필터의 Cutoff frequency에 따른 성능비교

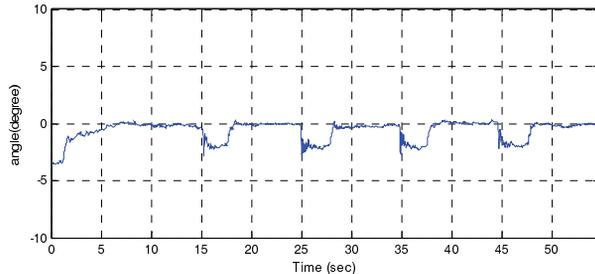
그림 9, 10은 Cutoff frequency에 따른 제어기의 성능을 비교한 그림이다. 시간 지연 제어에서 동적 모델을 구할 때에는 각 가속도 값이 필요하다. 하지만 이 성분은 잡음성분을 많이 포함하고 있기 때문에 필터를 설계해야 한다. 1차 저역 통과 필터의 형태로 설계된 Q 필터의 Cutoff frequency는 실험적으로 찾아내었다.



(a) $K_q = 0.6$ $I_{xx} = 0.036$.



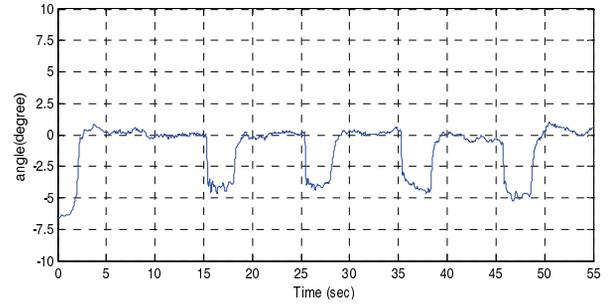
(b) $K_q = 1$ $I_{xx} = 0.036$.



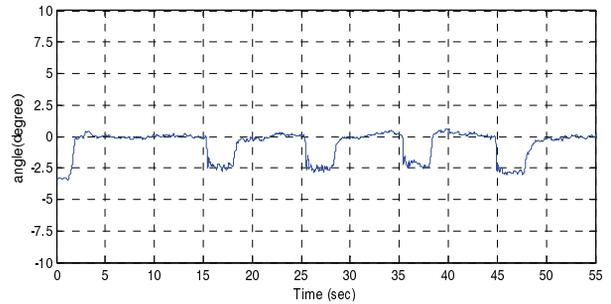
(c) $K_q = 1.4$ $I_{xx} = 0.036$.

그림 7. K_q 의 변화에 따른 롤각.

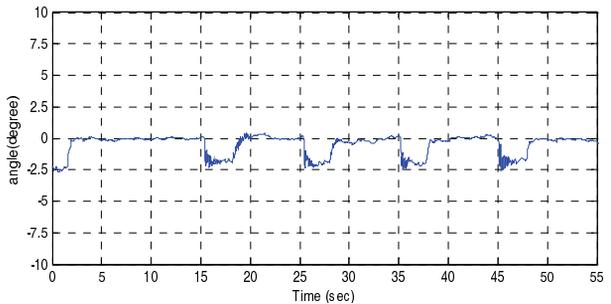
Fig. 7. Roll axis with K_q of Q filter.



(a) $K_q = 0.6$ $I_{yy} = 0.036$.



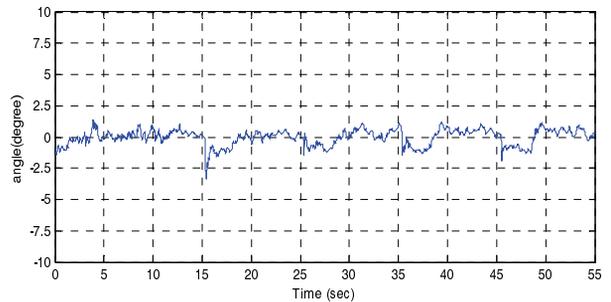
(b) $K_q = 1.0$ $I_{yy} = 0.036$.



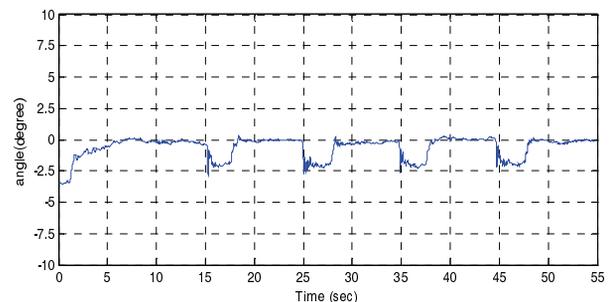
(c) $K_q = 1.4$ $I_{yy} = 0.036$.

그림 8. K_q 의 변화에 따른 Pitch각.

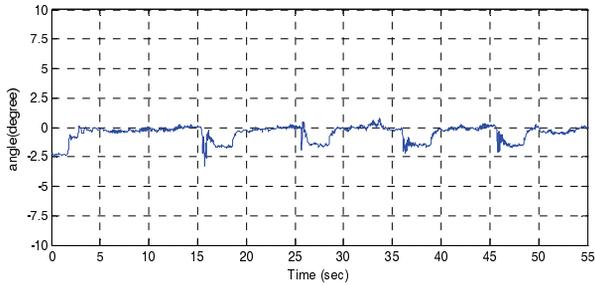
Fig. 8. Pitch axis with K_q of Q filter.



(a) $K_q = 1.4$ $I_{xx} = 0.036$ $f_c = 0$.



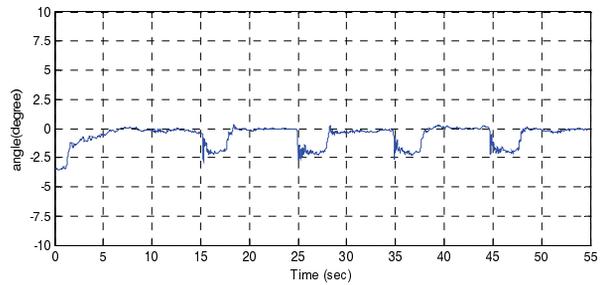
(b) $K_q = 1.4$ $I_{xx} = 0.036$ $f_c = 15$.



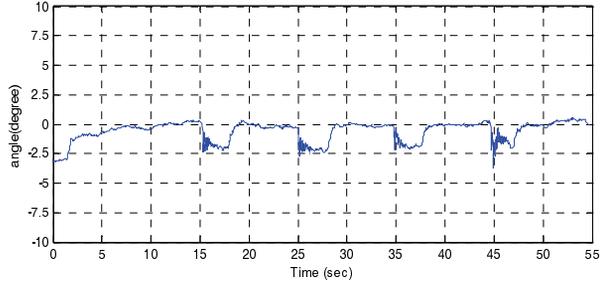
(c) $K_q=1.4$ $I_{xx}=0.036$ $f_c=50$.

그림 9. f_c 의 변화에 따른 Roll 축의 성능.

Fig. 9. Performance of Roll axis by f_c .



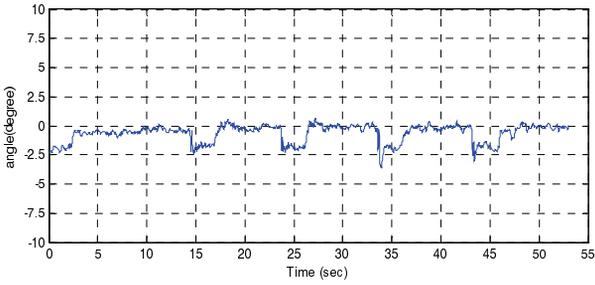
(b) $K_q=1.4$ $I_{xx}=0.036$.



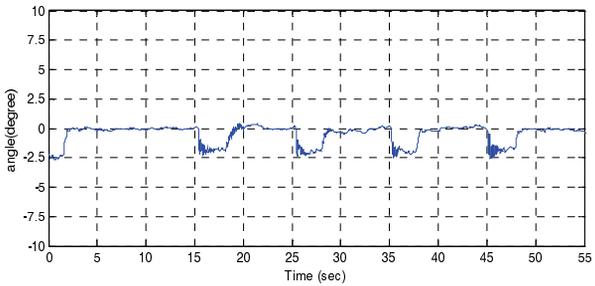
(c) $K_q=1.4$ $I_{xx}=0.045$.

그림 11. \hat{D} 의 변화에 따른 Roll 축 성능.

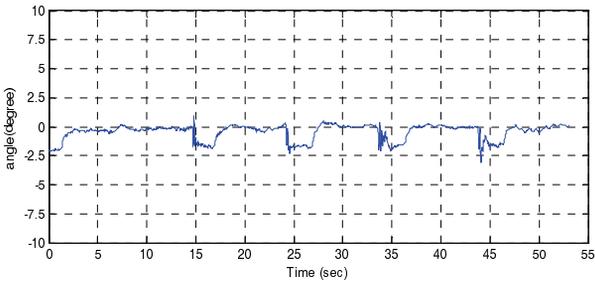
Fig. 11. Performance of Roll axis with \hat{D} .



(a) $K_q=1.4$ $I_{yy}=0.036$ $f_c=0$.



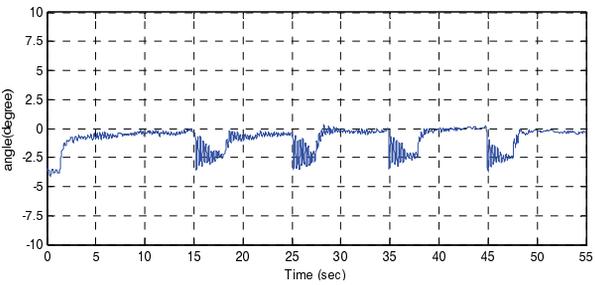
(b) $K_q=1.4$ $I_{yy}=0.036$ $f_c=15$.



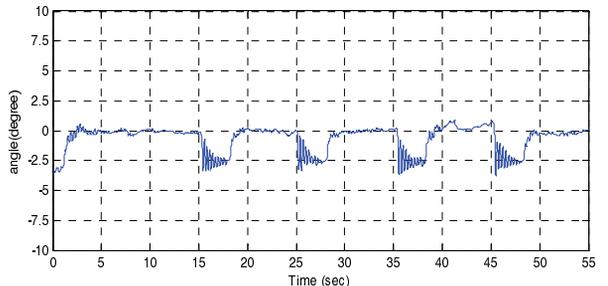
(c) $K_q=1.4$ $I_{yy}=0.036$ $f_c=50$.

그림 10. f_c 의 변화에 따른 Pitch 축 성능.

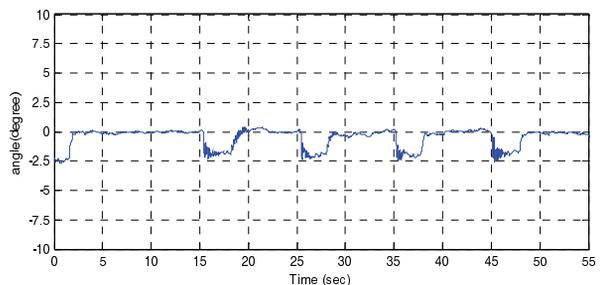
Fig. 10. Performance of Pitch axis by f_c .



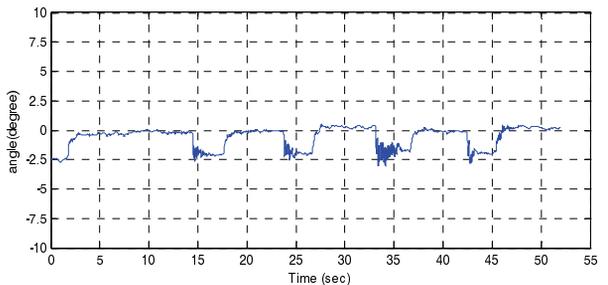
(a) $K_q=1.4$ $I_{xx}=0.02$.



(a) $K_q=1.4$ $I_{yy}=0.02$.



(b) $K_q=1.4$ $I_{yy}=0.036$.



(c) $K_q=1.4$ $I_{yy}=0.045$.

그림 12. \hat{D} 의 변화에 따른 Pitch 축 성능.

Fig. 12. Performance of Pitch axis by \hat{D} .

2.4 관성에 따른 성능비교

시간 지연 제어는 모델기반 제어기로서 관성이 정확하지 않으면 동적 모델의 값을 정확하게 예측할 수 없다. 하지만 관성은 정확한 값을 모델링 하기 어렵기 때문에 본 논문에서는 실험을 통해 구하였다. 그림 11, 12는 관성값에 따른 제어기의 성능을 비교한 그림이다.

관성을 너무 작게 예측하면 Fig. 11(a)와 같이 오실레이션이 많이 발생한다. 이것은 이전 토크의 영향력이 상대적으로 높아져 한 샘플링이 지연된 PD 제어와 같아지기 때문이다. 하지만 관성을 크게 예측하면 이전 토크보다 측정된 가속도 성

분의 영향력이 커져 오실레이션은 줄어들지만 잡음의 영향력이 커지게 된다.

2.5 PD 제어기와 시간지연제어기의 성능 비교

그림 13과 14는 PD 제어기와 시간지연제어기의 경우를 비교한 것이다. PD 제어기만을 사용했을 때보다 시간 지연 제어를 사용하였을 때, 외란에 대해 더 강건한 것을 확인할 수 있다.

그림 13의 roll 축의 제어를 보면 PD 제어의 경우에 오차는 약 7.5도 정도인데 시간지연제어기의 경우에는 오차가 약 2.5도로 오차가 70% 정도 줄어든 것을 알 수 있다.

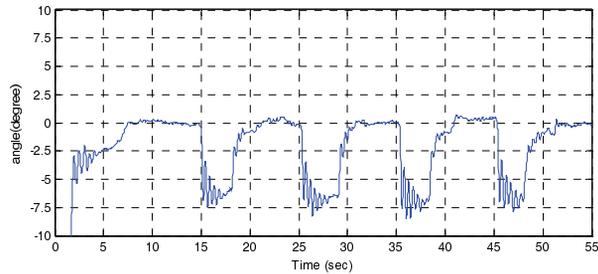
그림 14의 pitch 축의 경우도 마찬가지로 PD 제어의 경우에 오차는 약 7.5도 정도인데 시간지연제어기의 경우에는 오차가 약 2.5도로 오차가 70%정도 줄어든 것을 알 수 있다.

V. 결론

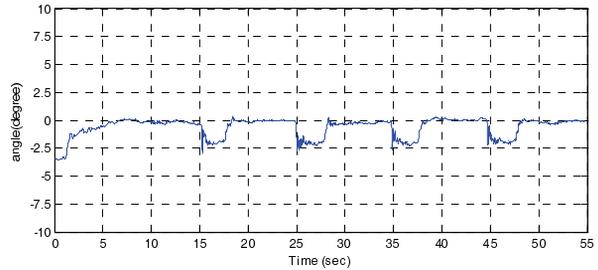
본 논문에서는 외란의 영향을 많이 받는 쿼드로터 시스템의 성능을 시간 지연 제어를 사용하여 개선하고자 하였다. Q 필터의 계수 값을 적절히 증가시키면 외란에 대해 더 강건해지는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 자이로 센서의 각속도 값을 미분하여 얻은 각 가속도 값은 잡음을 포함하고 있는데 1차 저역 통과필터의 형태로 설계한 Q 필터를 사용하여 잡음성분은 상당부분 제거할 수 있었다. 또한, 시스템의 복잡성 때문에 정확하게 예측할 수 없는 관성은 실험적으로 구했는데, 관성이 작으면 PD 제어기와 같이 외란에 의해 오실레이션이 생기고, 관성이 크면 각 가속도 잡음의 영향이 커져 진동하는 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 시간지연제어기가 PD 제어기 보다 외란에 강건하여 성능이 좋은 것을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] A. Das, K. Subbarao, and F. Lewis, "Dynamic inversion with zero-dynamics stabilization for quadrotor control," *IET Control Theory and Applications*, vol. 3, no. 3, pp. 303-314, 2009.
- [2] R. Zhang, X. Wang, and K. Y. Cai, "Quadrotor aircraft control without velocity measurements," *IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 5213-5218, 2009.
- [3] H. Huang, G. M. Hoffmann, S. L. Waslander, and C. J. Tomlin, "Aerodynamics and control of autonomous quadrotor helicopters in aggressive maneuvering," *IEEE Conf. on Robotics & Automations*, pp. 3277-3282, 2009.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] GRASP, https://www.grasp.upenn.edu/success_story/aggressive_maneuvers_autonomous_quadrotor_flight
- [8] ETH Zurich, http://www.idsc.ethz.ch/Research_DAndrea/FM
- [9] S. H. Jeong and S. Jung, "Design and experimental studies of a



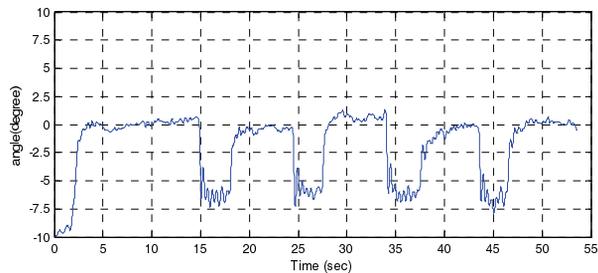
(a) PD control.



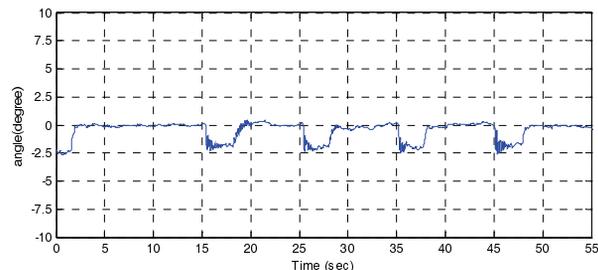
(b) Time-delayed control.

그림 13. Roll축의 성능비교.

Fig. 13. Performance of Roll axis.



(a) PD control.



(b) Time-delayed control.

그림 14. Pitch축의 성능비교.

Fig. 14. Performance of Pitch axis.

- 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.
- [10] 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.
- [11] K. Youcef-Toumi and O. Ito, “A time delay controller for systems with unknown dynamics,” *Journal of Dynamic Systems, measurement, and Control*, vol. 112, pp. 133-142, 1990.
- [12] K. Youcef-Toumi, “Stability of uncertain linear system with time delay,” *Trans. of ASME*, vol. 113, pp. 558-567, Dec. 1991.
- [13] K. Youcef-Toumi, “Analysis of linear time invariant system with time delay,” *Trans. of ASME*, vol. 114, pp. 544-555, Dec. 1992.
- [14] S. Jung, T. C. Hsia, and R. G. Bonitz, “Force tracking impedance control for robot manipulators with an unknown environment: Theory, simulation, and experiment,” *Journal of Robotics Research*, vol. 29, no. 9, pp. 765-774, 2001.
- [15] 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.
- [16] J. O. Lee, C. S. Yoo, Y. S. Park, B. J. Park, S. J. Lee, D. G. Gweon, and P. H. Chang, “An experimental study on time delay control of actuation system of tilt rotor unmanned aerial vehicle,” *Mechatronics*, 2012.
- [17] S. Jung, T. C. Hsia, and R. G. Bonitz, “Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment,” *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 474-483, 2004.
- [18] T. C. Hsia, “Simple robust schemes for Cartesian space control of robot manipulators,” *International Journal of Robotics and Automation*, vol. 9, no. 4, 167-174, 1994.



임 정 근

2012년 충남대학교 기계설계공학과 졸업. 2012년~현재 충남대학교 대학원 메카트로닉스공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 지능로봇시스템, 쿼드콥터 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, 서비스로봇 개발, 장애우를 위한 보행 및 휠체어 로봇 설계 및 개발, 가정용 서비스 로봇 개발, 무인비행체 시스템, 로봇 교육.