Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (2013) 19(3):190-194
http://dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2013.12.1811 ISSN:1976-5622 eISSN:2233-4335

관성 센서를 이용한 투로터 시스템 제어에 관한 연구

A Study on Control for the Two-Rotor System Using Inertial Sensors

장 재 훈, 정 은 태, 권 성 하*
(Jae Hoon Jang[1], Eun Tae Jeung[1], and Sung-Ha Kwon[1])
[1]Changwon National University

Abstract: This paper presents experimental results of the attitude control for a two-rotor system with 3-DOF(degree-of-freedom). Two DC motors are equipped at the two ends of a rectangular beam to generate lift force and the relation between motor voltage and lift force is found experimentally. And inertial sensors are mounted at the center of the beam to measure the roll angle and a complementary filter is designed to get the angle during DC motors driving. A controller with nonlinear compensation, integrator and state feedback to achieve asymptotic tracking for a step input and reject input disturbance is designed and experimented.

Keywords: two-rotor system, inertial sensor, complementary filter, asymptotic tracking

I. 서론

로터 기반의 VTOL (Vertical Take-Off and Landing)은 기구 적으로 구조가 간단하며 소형화의 장점을 가진다. 이러한 VTOL은 무인항공기(UAV)로써 탐색지점에서의 정찰과 제자리 비행(hovering) 상태에서 영상정보 등을 획득하는 것이 주목적이다. 로터 기반의 비행체는 구동환경 상 많은 불안정성을 가지며, 안정된 성능을 보장하려면 동체의 기울어지는 각도 및 각속도를 신뢰성 있게 측정하는 것이 중요하다. 또한, 비행체의 자세유지를 위해 각각의 로터에서 발생하는 양력이 균형을 이뤄야 한다. 두 개의 로터를 가지는 투로터 시스템은 VTOL이 수직이착륙 시 좌우 균형을 맞추는 상황과 유사하며[1,2], 이에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다.

3 자유도를 가지는 헬리콥터의 제어기 설계에 관한 연구가 많이 이루어져 왔으며[3-8], 대부분의 논문에서 사용하고 있는 기구는 Quanser Consulting Inc.에서 제작한 3-DOF 헬리콥터가 대표적이다. 헬리콥터와 같은 비행체를 제어하기 위해서는 우선적으로 그 시스템을 제작하여 모델링하고 파라미터들을 찾아내야 한다. 따라서 본 연구에서는 투로터 시스템을 직접 제작하여 시스템을 수학적으로 모델링하고 자세유지 제어기를 설계하여 실험 결과를 제시하고자 한다. 그리고 투로터 시스템의 궁극적인 목적은 헬리콥터를 구속장치 없이 3차원 공간에서 자유롭게 비행시키는 것이므로 관성센서를 이용하여 자세를 검출한다. 관성센서로 가속도 센서와 자이로 센서를 이용하고, 이 센서들의 출력을 이용하여 투로터 시스템의 롤 각을 검출한다. 또한 로터에 장착된 DC 모터의 인가전압 대 로터의 양력에 대한 관계를 실험적으로 찾아낸다. 논문 구성은 II 장에서 투로터 시스템의 기구 구성을 나타내고 이 시스템에 대한 수학적 모델링 및 파라미터를 구하여 자세유지에 적합한 제어기를 설계한다. III 장에서 실험 데이터를 이용하여 관성 센서의 상보필터의 이득을 Kim 등[9], Min 등[10,11]이 제안한 기법을 이용하여 구하고, 모터의 전압과 양력 사이의 관계를 실험적으로 구한다. 마지막으로 IV 장에서 결론을 맺는다.

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수: 2012. 7. 24., 수정: 2012. 10. 30., 채택확정: 2012. 12. 27.
장재훈, 정은태, 권성하: 창원대학교 제어계측공학과
(hc6147@gmail.com/jet26@changwon.ac.kr/shkwon@changwon.ac.kr)
※ 본 논문은 국립창원대학교 교내공모과제[2011-0388-0000]의 지원으로 연구하였음.

II. 투로터 시스템 제작 및 제어기 설계

1. 투로터 시스템 제작

투로터 시스템의 기구형태는 그림 1과 같으며, 동체는 알루미늄 재질의 빔으로 구성하였고 회전하는 각 축에는 엔코더(Autonics-E30S500)를 장착하였다. 양력을 발생하는 로터 어셈블리는 2개 조가 있으며, 각각 DC 모터(RK-370SD-2870)와 프로펠러(GWS-EP-1063×3)로 구성되어

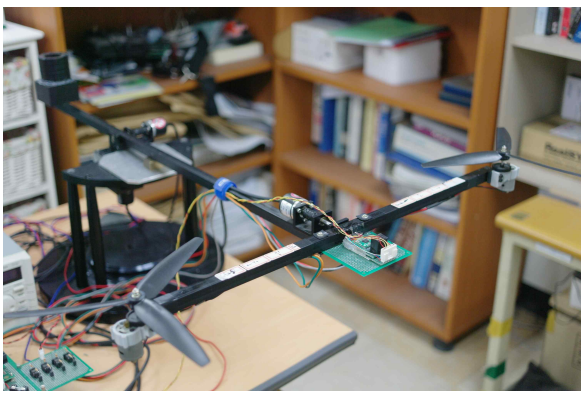

그림 1. 투로터 시스템.
Fig. 1. The Two-Rotor system.

Copyright© ICROS 2013

있다. 로터 어셈블리 중심에 자이로 센서(IDG300)와 가속도 센서(MMA7260QT)가 장착되어 있고, TMS320F2812를 CPU로 사용하였고 샘플링 주기는 10ms로 하였다.

2. 투로터 시스템의 동역학 방정식

투로터 시스템은 원점에 대한 x, y, z축을 기준으로 회전 운동하는 3자유도 비행체로 그림 2에 투로터 시스템의 자유물체도(free-body diagram)를 나타낸다. 각 변수와 파라미터의 정의는

θ: x축을 중심으로 회전한 각도[rad](pitch)
ϕ: y축을 중심으로 회전한 각도[rad](roll)
ψ: z축을 중심으로 회전한 각도[rad](yaw)
F_1, F_2: 각 로터에서 발생시키는 양력[N]
m_a: 투로터 시스템 전체를 지지하는 빔의 질량[0.8kg]
m_b: 로터가 장착되어 있는 빔의 질량[0.46kg]
m_c: 투로터 시스템의 균형추(counterweight)의 질량[1.1kg]
m_r: 로터의 질량[0.07kg]
M: 투로터의 중심(O_1)에 미치는 질량[0.09kg]
L_a: 원점(O)에서 점 O_1까지의 길이[0.54m]
L_b: 투로터의 중심(O_1)에서 로터까지의 길이[0.3m]
L_c: 원점(O)에서 균형추까지의 길이[0.24m]
J_θ: x축에 대한 관성모멘트[0.316kg·m^2]
J_ϕ: y축에 대한 관성모멘트[0.025kg·m^2]
J_ψ: z축에 대한 관성모멘트[0.341kg·m^2]
g: 중력 가속도[9.8m/s^2]

이다. 각각의 로터에서 발생하는 양력을 F_1과 F_2라 두고 각 축에 작용하는 힘을 회전 토크에 대해 나타내면, 투로터 시스템의 동역학은

$$\begin{aligned} J_\theta\ddot{\theta} &= (F_1+F_2)L_a\cos\phi - MgL_a\cos\theta \\ J_\psi\ddot{\psi} &= -(F_1+F_2)L_a\sin\phi \\ J_\phi\ddot{\phi} &= (F_1-F_2)L_b \end{aligned} \tag{1}$$

이며 마찰력은 무시한다. 동역학 (1)에서 각 축의 관성 모멘트 J_θ, J_ϕ, J_ψ은 각 부품의 무게중심에서의 관성 모멘트와 관성 모멘트의 평행축정리(parallel-axis theorem)를 이용하여 구한다.

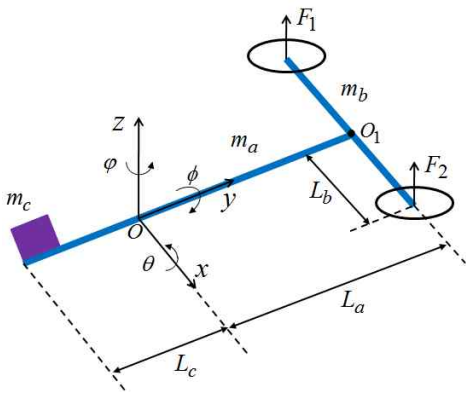

그림 2. 투로터 시스템의 자유물체도.
Fig. 2. Free body diagram of the Two-Rotor system.

3. 제어기 설계

투로터 시스템의 좌우 양력을

$$\begin{aligned} u_1 &= F_1+F_2 \\ u_2 &= F_1-F_2 \end{aligned} \tag{2}$$

와 같이 두면

$$\begin{aligned} J_\theta\ddot{\theta} &= L_a(\cos\phi u_1 - Mg\cos\theta) \\ J_\psi\ddot{\psi} &= -L_a\sin\phi u_1 \\ J_\phi\ddot{\phi} &= L_b u_2 \end{aligned} \tag{3}$$

이다. 제어입력 u_1은 피치와 요 각에 영향을 끼치는 것으로 보이지만, 롤 각 ϕ가 작은 값이라면 요 각에는 거의 영향을 주지 못하기 때문에 u_1을 피치 제어에 주로 사용되는 제어입력으로 간주할 수 있다. 그리고 u_2는 롤 각을 직접적으로 제어하는 제어입력이며, 롤 각을 제어함으로써 요 각을 간접적으로 제어할 수 있는 제어입력이다.

투로터 시스템 (3)의 피치 동역학에서 중력에 의한 토크가 포함되어 있으므로

$$u_1 = u_0 + u_\theta \tag{4}$$

$$u_0 = \frac{\cos\theta}{\cos\phi}Mg \tag{5}$$

와 같이 두고, 이를 투로터 시스템 (3)에 대입하면

$$\begin{aligned} J_\theta\ddot{\theta} &= L_a\cos\phi u_\theta \\ J_\psi\ddot{\psi} &= -L_a\sin\phi u_\theta - MgL_a\tan\phi\cos\theta \\ J_\phi\ddot{\phi} &= L_b u_2 \end{aligned} \tag{6}$$

이다. 투로터 시스템을 동작시키고자 하는 구간, 즉 $\phi\approx 0$, $\theta\approx 0$, $u_\theta\approx 0$에 대해 선형화하면

$$\begin{aligned} J_\theta\ddot{\theta} &= L_a u_\theta \\ J_\psi\ddot{\psi} &= -MgL_a\phi \\ J_\phi\ddot{\phi} &= L_b u_2 \end{aligned} \tag{7}$$

이다. 선형화한 동역학 (7)은 피치 시스템과 요-롤 시스템으로 분리되어 있기 때문에, 피치 시스템과 요-롤 시스템의 상태방정식을 각각

$$\Sigma_i:\ \begin{cases} \dot{x}_i = A_i x_i + B_i u_i \\ y_i = C_i x_i \end{cases},\ i=1,2 \tag{8}$$

$$A_1=\begin{bmatrix}0 & 1\\ 0 & 0\end{bmatrix},\ B_1=\begin{bmatrix}0\\ \dfrac{L}{J_\theta}\end{bmatrix},\ x_1=\begin{bmatrix}\theta\\ \dot{\theta}\end{bmatrix},\ u_1=u_\theta$$

$$A_2=\begin{bmatrix}0 & 1 & 1 & 0\\ 0 & 0 & -\dfrac{MgL}{J_\psi} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix},\ B_2=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 0\\ \dfrac{l}{J_\phi}\end{bmatrix},\ x_1=\begin{bmatrix}\psi\\ \dot{\psi}\\ \phi\\ \dot{\phi}\end{bmatrix},$$

$$C_1=[1\ \ 0],\ C_2=[1\ \ 0\ \ 0\ \ 0]$$

으로 표현하여 각각의 제어기를 설계한다. 투로터 시스템의 고도와 방향을 제어하기 위해, 기준입력을 피치와 요 각으로 두고 상태궤환과 적분제어가 포함된 제어기를 설계한다.

즉, 제어입력은

$$u_i(t) = -K_i \int_0^t e_i(\tau)d\tau - F_i x_i(t) \tag{9}$$

이고 여기서 $e_i = y_i - r_i$ 이다. 그림 3과 같이 상태궤환과 적분제어를 포함한 제어기법은 계단입력에 대해 정상상태 오차가 '0'이고, 외란 w_i의 영향이 시간이 흘러감에 따라 출력 y_i에서 사라진다[12]. (9)와 같은 제어기를 설계하는 것은

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_i \\ \dot{z}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & C_i \\ 0 & A_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_i \end{bmatrix} v_i, \quad i = 1, 2 \tag{10}$$

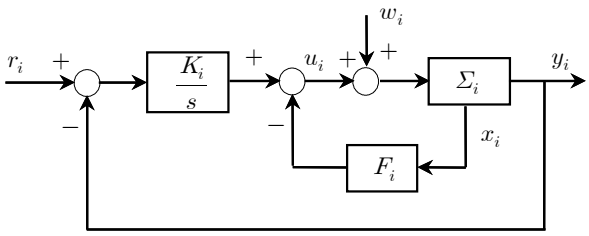

그림 3. 투로터 제어시스템.

Fig. 3. Two-Rotor control system.

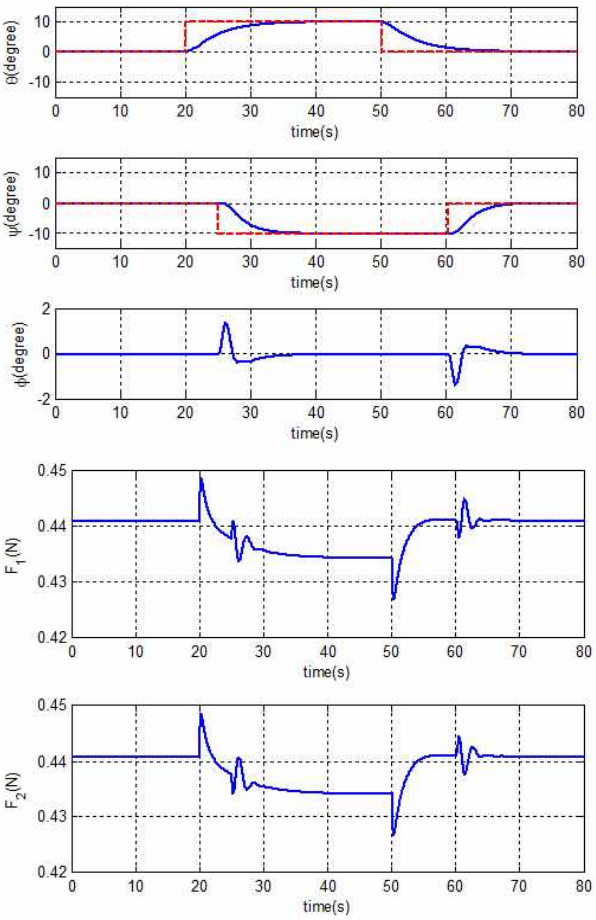

그림 4. 투로터 시스템 시뮬레이션 결과.

Fig. 4. Results of the Two-Rotor system simulation.

의 상태궤환 제어기

$$v_i = -K_i e_i - F_i z_i \ , \quad i = 1, 2 \tag{11}$$

를 구하는 문제와 같다. 하중행렬을

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 25 \end{bmatrix}, \quad R_1 = 1$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 70 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 50 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}, \quad R_2 = 100$$

와 같이 두고, LQR 제어기를 구하면

$$\begin{aligned} K_1 &= 1, \ F_1 = [5.5884 \quad 5.6153] \\ K_2 &= -0.316, \ F_2 = [-1.336 \quad -1.714 \quad 1.347 \quad 0.396] \end{aligned} \tag{12}$$

이다. 그림 4는 각 축의 각도에 대한 시뮬레이션 결과이다. 피치 각과 요 각의 기준 명령에 따라 투로터 시스템의 자세 출력을 나타낸 것으로 목표치를 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있다.

III. 실험

1. 관성 센서 오차 보정을 위한 상보 필터 설계

투로터 시스템의 롤 각을 측정하기 위해 엔코더를 사용할 수 있지만, 실제 비행 시에는 엔코더로 각도를 측정할 수 없다. 따라서 자이로 센서와 가속도 센서를 투로터 시스템에 장착하여 롤 각을 측정한다. 저가형 MEMS 자이로 센서와 가속도 센서를 이용하여 ARS(Attitude Reference System)를 구성하는 경우, 자이로 센서는 출력 각속도를 적분하는 과정에서 적분 오차가 발생하고, 가속도 센서는 센서 회전축과 동체 회전축이 다르면 병진운동성분을 포함한 오차가 발생하는 단점을 가지고 있다. 또한 투로터 시스템은 로터가 회전하며 발생시키는 진동이 관성센서에 직접적으로 영향을 끼친다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 상보필터[9-11]를 설계한다. 상보필터의 블록선도는 그림 5와 같고, θ_c는 가속도 센서의 각도, $\dot{\theta}_g$는 자이로 센서의 각속도, θ_f는 상보 필터의 출력 각도이다. 필터의 이득 K_p와 K_i를 최소자승법(least square method)을 이용하여 구하면

$$\begin{bmatrix} K_p \\ K_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.0485 \\ 1.1471 \end{bmatrix} \tag{13}$$

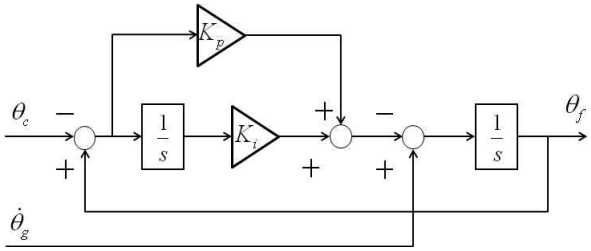

그림 5. 상보 필터.

Fig. 5. The complementary filter.

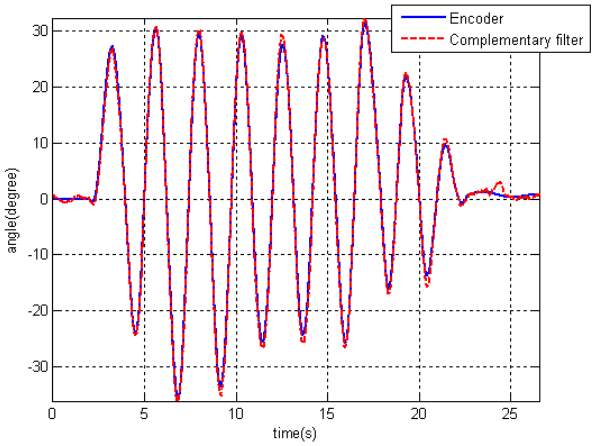

그림 6. 상보 필터와 엔코더의 각도 출력 비교.

Fig. 6. The angles of the complementary filter and encoder.

이다. 로터가 회전하고 있는 상황에서 필터의 출력 각과 엔코더의 출력 각을 그림 6에 나타내며 필터의 출력이 각도를 잘 추정함을 확인할 수 있다.

2. 양력과 인가전압의 관계

투로터 시스템에 양력을 발생하기 위해 로터가 좌우에 장착되어 있다. 로터는 DC 모터에 의해 구동되므로 투로터 시스템의 제어를 위하여 모터에 인가되는 전압과 양력 사이의 관계가 필요하다.

투로터 시스템의 거동보다 모터의 거동이 상대적으로 빠르기 때문에, DC 모터의 동역학을 고려하기 보다는 정상상태의 응답을 이용하여 전압 대 DC 모터에서 발생시키는 양력의 관계를 실험적으로 도출한다. 양력 대 전압 사이의 관계를 도출하기 위한 다음과 같이 실험하였다.

[양력 대 전압 관계 실험]

(1) 피치 각이 '0'이 되도록 투로터 시스템을 저울 위에 올려 놓음.

(2) m_0: 인가전압이 $v_0 = 0$일 때, 투로터 시스템의 무게

(3) m_i: 인가전압이 v_i일 때, 투로터 시스템의 무게

(4) 양력(F_i): $F_i = (m_0 - m_i)g,\ g = 9.8$

좌우 로터에 대한 실험을 각각 10회 실시하여 얻은 결과를 그림 7에 나타내고, 이를 최소자승법을 이용하여 2차 함수로 근사화하면

$$\begin{aligned} F_1 &\cong 0.0542\,V_r^2 - 0.0445\,V_r - 0.002 \\ F_2 &\cong 0.0558\,V_l^2 - 0.034\,V_l - 0.0136 \end{aligned} \tag{14}$$

이다. 각 로터에서 필요한 양력을 발생하기 위해 각 DC 모터에 공급할 전압은 (14)를 만족하는 전압 중 양의 값을 선택함으로써 얻을 수 있다.

3. 투로터 시스템의 자세유지 실험

본 실험은 관성 센서를 이용해 ϕ의 상태만 측정하였으며, ψ, θ는 엔코더를 이용해 측정하였다. 투로터 시스템의 실험 구동 영상을 웹페이지에 게시하였으며 그림 8은 피치와 요 각의 기준입력에 대한 투로터의 자세유지 실험 결과이다. 피치와 요 각은 시뮬레이션 결과와 비슷하지만, 롤

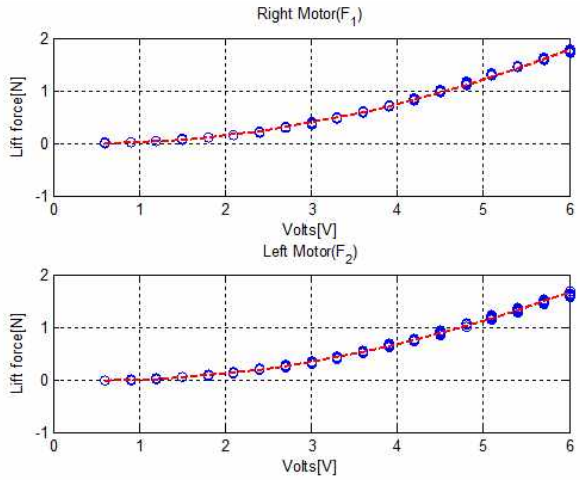

그림 7. 모터의 전압 대 양력의 실험 그래프.

Fig. 7. Results between motor voltage and lift force.

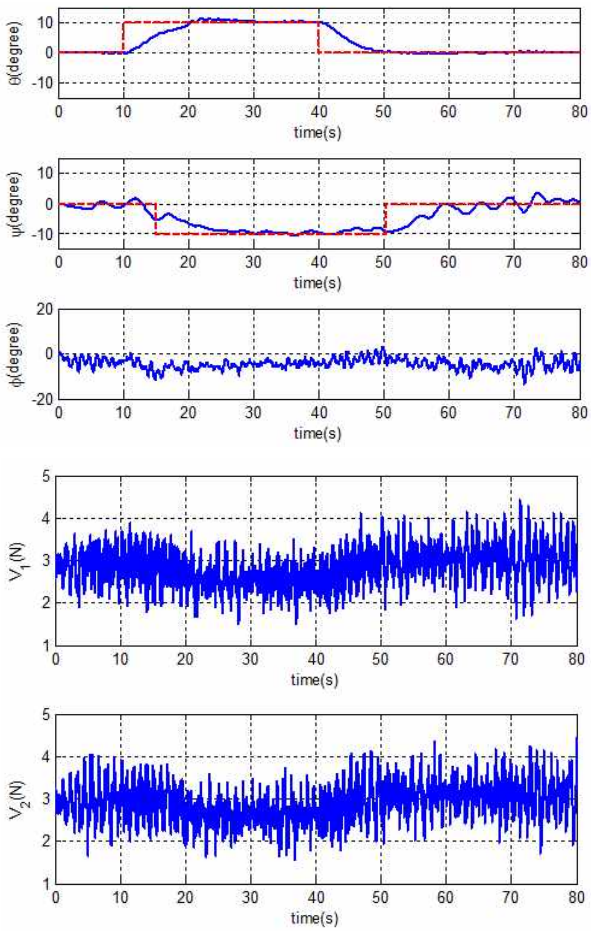

그림 8. 자세 유지 실험 결과.

Fig. 8. Experimental results for attitude control.

각은 다소 차이를 보인다. 이는 기구부의 불균형성, 마찰, 전선의 장력 등이 투로터 시스템에 영향을 끼친 것으로 판단한다. DC 모터에 인가된 전압은 평균적으로 3V를 조금 넘으며, 이는 0.44N에 해당하는 전압으로 시뮬레이션 결과와 유사함을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문은 관성 센서를 이용하여 투로터 시스템의 자세 유지에 관한 연구를 수행하였다. 시스템의 동역학은 로터 어셈블리에서 발생하는 양력에 대해 각 축의 회전하는 토크로 모델링하였고, 각 축의 관성 모멘트를 각 부품의 무게 중심에서의 관성 모멘트와 관성 모멘트의 평행축정리(parallel-axis theorem)를 이용하여 구하였다. 그리고 저가의 MEMS 관성센서를 이용하여 롤 각을 측정하는 상보필터를 최소자승법으로 설계하였고, 모터의 전압과 양력 사이의 관계를 실험적으로 구하였다. 또한 제어기 설계에서 중력에 의한 토크를 제거하기 위한 비선형 보상기를 이용하였고, 계단입력명령에 점근적 추종성능을 보장하고 입력측 외란에 강인한 제어기법으로 적분기와 상태궤환을 포함한 제어기를 설계하였다. 이 제어기를 실제 투로터 시스템에 적용하여 실험한 결과를 제시하였고, 만족할 만한 제어 성능을 얻었다. 투로터 시스템의 실험 구동 영상은 웹페이지[13]에 게시하였다.

참고문헌

[1] J. Hauser, S. Sastry, and G. Meyer, “Nonlinear control design for slightly non-minimum phase systems: Application to V/STOL aircraft,” *Automatica*, vol. 28, no. 4, pp. 665-697, 1992.

[2] P. Martin, S. Devasia, and B. Paden, “A different look at output tracking: Control of a VTOL aircraft,” *Proc. 33rd IEEE Conference Decision and Control*, pp. 2376-2381, 1994.

[3] A. T. Kutay, A. J. Calise, M. Idan, and N. Hovakimyan, “Experimental results on adaptive output feedback control using a laboratory model helicopter,” *IEEE Trans. Control Systems Tech.*, vol. 13, no. 2, pp. 196-202, 2005.

[4] T. Kiefer, A. Kugi, K. Graichen, and M. Zeitz, “Feedforward and feedback tracking control of a 3DOF helicopter experiment under input and output constraints,” *Proc. 45th IEEE Conference Decision and Control*, pp. 1586-1593, 2006.

[5] B. Andrievsky, D. Peaucelle, and A. L. Fradkov, “Adaptive control of 3DOF motion for LAAS helicopter benchmark: Design and experiments,” *Proc. Amer. Control Conference*, pp. 3312-3317, 2007.

[6] J. Witt, S. Boonto, and H. Werner, “Approximate model predictive control of a 3-DOF helicopter,” *Proc. 46th IEEE Conf. Decision and Control*, pp. 4501-4506, 2007.

[7] M. Aria, “PID control of a three-degrees-of-freedom model helicopter,” *Majalah Ilmiah UNIKOM*, vol. 9, no. 2, pp. 207-214, 2011.

[8] B. Zheng and Y. Zhong, “Robust attitude regulation of a 3-DOF helicopter benchmark: Theory and experiments,” *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 660-670, Feb. 2011.

[9] J. H. Kim, H. G. Min, J. D. Cho, J. H. Jang, S. H. Kwon, and E. T. Jeung, “Design of angular estimator of inertial sensor using the least square method,” *Proc. of World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 60, pp. 502-505, Dec. 2009.

[10] H. G. Min, J. H. Kim, J. H. Yoon, E. T. Jeung, and S. H. Kwon, “A control of balancing robot,” *Journal of Institude of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 12, pp. 1201-1207, 2010.

[11] H. G. Min, J. H. Yoon, J. H. Kim, S. H. Kwon, and E. T. Jeung, “Design of complementary filter using least square method,” *Journal of Institude of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 2, pp. 125-130, 2011.

[12] C.-T. Chen, *Linear System Theory and Design*, Oxford Univ. Press, 1999.

[13] YouTube link, http://www.youtube.com/watch?v=85mwGhOqZeY.

장 재 훈

2009년 창원대 제어계측 공학과 졸업. 2012년 동 대학원 석사. 2012년~현재 창원대학교 제어계측공학과 박사 과정 이수중. 관심분야는 모델링 및 현대제어기법.

정 은 태

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지, 제16권 제8호 참조.

권 성 하

1977년 고려대학교 전기공학과 공학사. 1981년, 1986년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 공학박사. 1985년~현재 창원대학교 공과대학 제어계측공학과 전임강사, 조교수, 부교수, 교수. 1993년~현재 창원대학교 공과대학장, 기획연구실장, 중앙도서관장 역임. 주 관심분야는 가변구조 제어, 적응제어, 견실제어 등.