

BLDC 모터의 강인한 H_∞ 속도 제어기 설계

(Robust H_∞ Speed Controller Design for BLDC Motor)

장소현* · 조남훈**

(Sohyun Jang · Nam-Hoon Jo)

Abstract

Due to low cost and high reliability, Brushless DC (BLDC) motors have been widely used in control applications such as robotics, aerospace and automobile. In the high performance control systems, it is very important to maintain the desired speed even in the face of parameter uncertainties, modeling errors, and disturbance signals. In this paper, we present an H_∞ controller for the speed control of BLDC motors to achieve better performance of disturbance rejection. In particular, we discuss how to reduce an initial peaks of control input in the proposed H_∞ controller. Some experimental results are provided to establish the effectiveness of the proposed method.

Key Words : BLDC Motor, Disturbance Attenuation, Speed Controller, H_∞ Controller

1. 서 론

브러시리스 DC(brushless direct current; BLDC) 모터는 직류 전동기와 전기적인 특성은 유사하지만 전자적인 정류를 사용하여 유지보수가 필요한 기계적인 접촉 구조의 정류 기구를 제거하여 신뢰성을 향상시킨 모터이다. 유도 전동기에 비해 높은 효율을 가지고 있고 고성능 토크 컨트롤을 수행하기 쉽다[1]. BLDC 모터는 이러한 고효율, 비 관성에 의한 큰 토

크, 제어의 단순성, 가벼운 중량, 컴팩트한 디자인, 유지보수가 쉬운 점과 같은 뚜렷한 장점들 때문에 일반적으로 로봇공학 및 자동화, 항공 우주, 자동차, 수치 제어, 기계, 제조 및 군사와 같은 응용 분야에 널리 사용된다. 따라서 일정한 속도를 유지하는 것이 중요하다[2-4].

BLDC 모터는 무게, 온도, 외부 환경에 의한 파라미터 변화와 제조환경에서의 모델링 오차, 부하토크 외란이 항상 존재한다. 하지만 일반적인 제어기 설계방법만으로는 제어 시스템에서 항상 문제가 되는 외란, 모델링 오차 등의 영향에 효과적으로 대응하는 것이 쉽지 않다. 따라서 적응 제어, 최적 제어와 같은 고급 제어기법들의 적절한 응용이 필요하지만, 이러한 기법들은 그 구조가 복잡하여 구현하는데 어려움이 있어서, 저가로 고급 제어사양을 만족하는 제어 시스템을

* Main author : Graduate student, Soongsil University, Dept. Electrical Engineering

** Corresponding author : Professor, Soongsil University, Dept. Electrical Engineering

Tel : 02-820-0643, Fax : 02-817-7961

E-mail : nhjo@ssu.ac.kr

Received : 2015. 8. 31

Accepted : 2015. 9. 21

구현하기는 쉽지 않다[5].

본 논문에서는 강인 제어 기법 중 하나인 H_∞ 제어기법을 BLDC 모터에 적용하여 속도제어기를 설계하였다. 제어기 설계 시 실제 파라미터를 알 수 없는 경우로 가정하여 DSP 실험을 통하여 공칭모델을 추정하였다. 또한 DSP 구현을 통하여 일반적으로 널리 사용되는 PI 제어기 보다 H_∞ 속도 제어기가 외란 제거, 모델링 오차 보상 등에 대하여 우수함을 보였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 고려하는 BLDC 모터의 모델링을 소개하고, 3장에서는 H_∞ 제어기를 소개한다. 4장에서는 DSP 실험을 통해, 제안된 H_∞ 제어기가 일반적인 PI 제어기보다 우수한 제어 성능을 나타낸다는 것을 보인다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 제시한다.

2. BLDC 모터의 모델링

BLDC 모터의 출력 P_e 는 식 (1)과 같이 표현되며, 출력 전력 P_e 와 회전자의 각속도 w_m 으로부터 모터의 토크는 식 (2)와 같이 표현된다[6].

$$P_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (1)$$

$$T_e = \frac{P_e}{w_m} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{w_m} = k_T I_a \quad (2)$$

식 (2)에서 기계 각속도 $w_m = \frac{w_r}{P}$ 이며, w_r 은 전기 각속도, P 는 극쌍수이다. 또한 기계 시스템의 운동 방정식은 다음과 같다[6].

$$T_e = T_L + J \frac{dw_m}{dt} + B w_m \quad (3)$$

여기서 T_L 은 부하토크, J 는 관성모멘트, B 는 마찰 계수이다. BLDC 모터의 등가회로는 그림 1과 같고 전압방정식은 아래와 같다.

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + E_a = v_t(t)$$

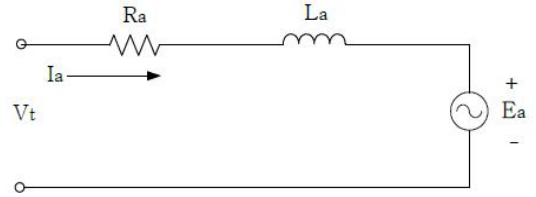


Fig. 1. The equivalent circuit of BLDC motor

따라서 BLDC 모터의 전달함수를 계산하기 위한 시스템의 방정식은 식 (4)와 같다.

$$V_t(s) = (sL_a + R_a)I_a(s) + E_a(s)$$

$$E_a(s) = k_E w_m(s)$$

$$T_e(s) = k_T I_a(s)$$

$$T_e(s) = T_L(s) + (sJ + B)w_m(s) \quad (4)$$

마찰계수 B 가 매우 작아서 무시할 수 있고, 부하토크 $T_L = 0$ 이라고 가정하면 입력 $V_t(s)$ 와 출력 $w_m(s)$ 사이의 전달함수를 식 (5)와 같이 구할 수 있다. 여기서 기계적 시정수 τ_m 과 전기적 시정수 τ_e 을 식 (6)으로 정의한다.

$$G(s) = \frac{w_m(s)}{V_t(s)} = \frac{1}{k_E(s^2\tau_m\tau_e + s\tau_m + 1)} \quad (5)$$

$$\tau_m = \frac{R_a J}{k_T k_E}, \tau_e = \frac{L_a}{R_a} \quad (6)$$

인덕턴스가 매우 작은 경우 τ_m 은 τ_e 보다 훨씬 크며 ($\tau_m \gg \tau_e$), $\tau_e \ll 1$ 인 경우 식 (5)를 근사하여 최종적인 BLDC 모터의 전달함수를 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$G(s) = \frac{w_m(s)}{V_t(s)} = \frac{1}{k_E(s\tau_m + 1)} \quad (7)$$

3. H_∞ 제어기

일반적인 PID 제어기 설계방법만으로는 제어 시스템에서 항상 문제가 되는 외란, 모델링 오차에 대응하

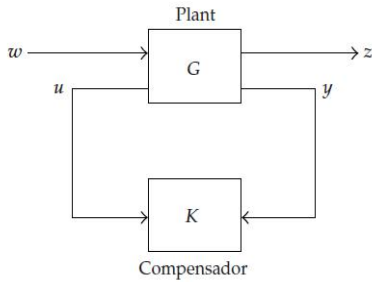


Fig. 2. Structure of H_∞ Controller

기 어렵다. 따라서 적응 제어, 비선형 제어와 같은 고급제어기법들의 적절한 응용이 필요하지만, 이러한 기법들은 구조가 복잡하여 구현하는데 어려움이 있다. 이에 비해서 H_∞ 제어기는 상대적으로 구조가 간단하면서도 위에 언급된 문제에 대해 뛰어난 성능을 보여주는 것으로 알려져 있다[7-8]. 그림 2는 H_∞ 제어시스템의 표준 구조를 나타낸다. 기본적으로 플랜트 G와 제어기 K로 구성되어 있으며, G는 각각 2개의 입력과 출력을 가지는 시스템으로 간주한다. w는 시스템에 들어오는 모든 외부의 입력 신호, z는 외란에 의한 출력으로 성능과 안정도를 위해 최소화되어야 하는 값이고 y는 실제로 측정이 가능하여 제어기 K에서 쓸 수 있는 신호, 그리고 u는 제어기에서 플랜트로 보내는 제어 신호이다. 그림 4를 플랜트와 제어기의 전달함수로 표현하면 식 (8)과 같고

$$\begin{aligned} z &= G_{zw}w + G_{zu}u \\ y &= G_{yw}w + G_{yu}u \\ u &= Ky \end{aligned} \tag{8}$$

이를 다시 z에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$z = [G_{zw} + G_{zu}K(I - G_{yu}K)^{-1}G_{yw}]w = T_{zw}w \tag{9}$$

H_∞ 제어기 설계 문제는 모든 입력 w의 에너지를 1보다 작거나 같도록 제약하는 가운데 출력 z를 최소화 할 수 있는 안정 제어기 K를 찾는 것이고 이는 w에서 z로의 전달함수 T_{zw} 의 H_∞ 노름(norm)을 최소화

하는 것과 같다[9]. 제어기 설계시 가중함수가 포함된 플랜트(augmented plant)를 고려하는데, 그림 3은 혼합민감도(mixed sensitivity) 문제에서 가중함수 W_1, W_2, W_3 가 포함된 형태를 나타낸다. 혼합민감도 문제의 제어 목적을 달성하기 위해서, 일반적으로 출력은 $z_1 = W_1e, z_2 = W_2u, z_3 = W_3y$ 로 선택되며, 관련 전달함수는 식 (10)과 같이 주어진다.

$$T_{y1u1} = \begin{bmatrix} W_1S \\ W_2R \\ W_3T \end{bmatrix}, \begin{aligned} S &= (I + GK)^{-1}, \\ R &= K(I + GK)^{-1}, \\ T &= GK(I + GK)^{-1}, \end{aligned} \tag{10}$$

여기서 W_1 은 기준 입력에 대한 가중함수, W_2 는 제어 입력에 대한 가중함수, W_3 는 강인성과 시스템의 대역폭(Bandwidth)에 대한 가중함수이다[10].

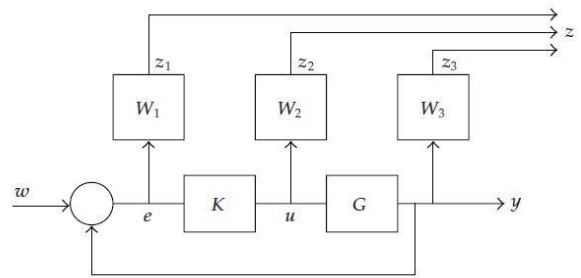


Fig. 3. Plant with weighting functions for H_∞ design

지금까지 기술된 H_∞ 제어기의 특징들은 본 논문에서 고려하는 BLDC 모터의 속도 제어에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 보인다. 이에 4장에서는 BLDC 모터의 속도 제어를 설계하고 그 효과를 DSP 구현을 통하여 입증할 것이다.

4. 실험

본 장에서는 DSP 실험을 통하여 BLDC 모터의 H_∞ 속도 제어기가 외란 제거에 우수한 성능을 가짐을 검증해 보도록 한다. 그림 4는 BLDC 모터의 속도 제어 시스템이다. BLDC 모터 시스템의 구조는 크게 감속기, BLDC 전동기, DSP, 홀센서, 인버터로 구성된다.

BLDC 모터의 강인한 H_∞ 속도 제어기 설계

BLDC 전동기는 4극, 20W, 정격전압 24V, 정격속도 3000rpm이며, 감속비 6:1의 감속기를 사용하였다. 또한 인버터는 Fairchild사의 FSB50250을 사용하였으며, DSP는 TI사의 TMS320F28335 (150MIPS, 32bit)를 사용하였다. 그림 5는 실험에 사용된 DSP 보드와 BLDC 모터를 나타내며, 모터에 추를 연결하여 정현파 외란을 생성시켰다.

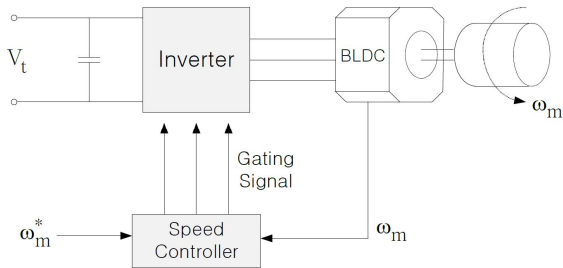


Fig. 4. Speed control system for BLDC motors

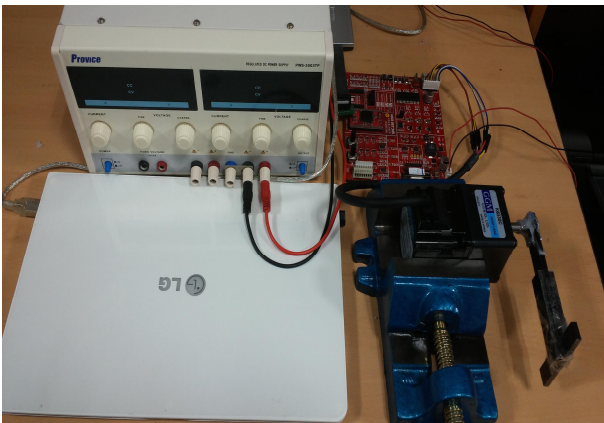


Fig. 5. DSP experimental apparatus

제어기 설계 시 사용된 공칭모델은 기준 전압을 모터에 인가하여 얻은 Open Loop 속도 파형을 통하여 식 (11)과 같이 정하였다.

$$P_n(s) = \frac{3500}{0.03s + 1} \quad (11)$$

우수한 외란제거 성능을 얻을 수 있는 H_∞ 제어기를 설계하기 위하여 우선 가중함수 W_1, W_3 는 식 (12)와 같이 선정하였으며 W_2 는 고려하지 않았다.

$$W_1(s) = \gamma \frac{1}{\left(\frac{1}{100}s + 1\right)^2} \frac{1}{s}, \quad W_3(s) = \frac{s^2}{1100} \quad (12)$$

위와 같은 가중함수를 이용할 경우 Matlab을 이용하여 다음과 같은 H_∞ 제어기를 얻을 수 있다.

$$C(s) = \frac{7.096s^3 + 1695s^2 + 1.251 \times 10^5 s + 2.548 \times 10^6}{s^4 + 2.532 \times 10^4 s^3 + 5.034 \times 10^6 s^2 + 2.512 \times 10^8 s - 1.451 \times 10^{-6}}$$

그림 6으로부터 우수한 외란 제거 성능을 얻을 수 있지만 과도 상태에서 제어입력에 매우 큰 오버슈트가 발생함을 알 수 있다. 이를 해결하기 위하여 제어입력에 대한 가중함수인 W_2 를 고주파통과필터로 설계하면 초반의 고주파 부분의 제어입력을 제한하고 결과적으로 오버슈트를 개선시킬 수 있을 것이다. 본 논문에서는 이를 고려하여 가중함수 W_2 를 식 (13)으로 선정하여 H_∞ 제어기를 재설계하였다.

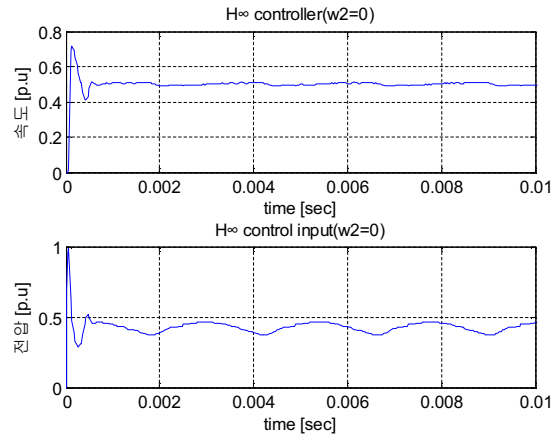


Fig. 6. The experimental results of the proposed H_∞ controller ($W_2=0$)

$$W_2(s) = \sigma \frac{s + 0.01c}{s + c} \quad (13)$$

위에서 σ 와 c 는 여러 번의 실험을 통하여 $\sigma=100$, $c=20$ 으로 선정하였으며 아래와 같은 H_∞ 제어기를 얻을 수 있었다.

$$C(s) = \frac{5.41s^3 + 851.3s^2 + 3.362 \times 10^4 s + 3.752 \times 10^5}{s^4 + 1.929 \times 10^4 s^3 + 2.302 \times 10^6 s^2 + 3.834 \times 10^7 s - 3.588 \times 10^{-5}}$$

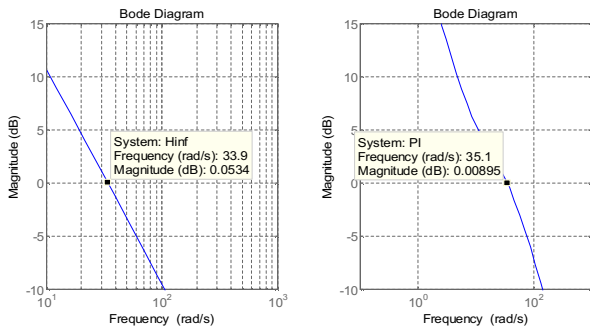


Fig. 7. Comparison of open loop crossover frequency between the proposed H_{∞} controller and PI controller

제안된 H_{∞} 제어기의 제어성능은 산업계에서 주로 사용하는 PI 제어기와 비교하였다. 객관적인 성능비교를 위하여 PI 제어기는 제안된 제어기와 유사한 대역폭(Bandwidth)을 갖도록 선정하였다. 그림 7은 제안된 H_{∞} 제어기와 PI 제어기 (14)를 적용하였을 때의 개루프 진폭응답을 보여주고 있는데, 두 시스템의 개루프 교차주파수(Open loop crossover frequency)가 거의 유사함을 알 수 있다. 따라서 PI 제어기 (14)와 제안된 H_{∞} 제어기는 거의 유사한 페루프 대역폭을 갖게 될 것이다.

$$C(s) = \frac{0.004(0.1s + 1)}{s} \quad (14)$$

실험에서 기준입력은 모터의 정격 속도의 50%인 $0.5p.u.$, $1500rpm$ 으로 정하였다. 또한 외란의 영향을 분석하기 위하여 모터 축에 추를 달아 정현파 형태의 외란을 발생시켰다. 그림 8은 PI 제어기와 H_{∞} 제어기를 적용했을 때의 속도 파형인데, H_{∞} 제어기를 사용했을 때 외란의 영향을 더욱 감소시킬 수 있다. 또한 오버슈트도 작아지고 정착시간도 짧아지는 등 과도응답이 좋아짐을 알 수 있다. 그림 9는 PI 제어기와 H_{∞} 제어기를 적용했을 때의 제어 입력 파형인데, H_{∞} 제어기의 초기 오버슈트가 작음에도 불구하고 외란 제거능력이 더 좋은 것을 알 수 있다. 또한 그림 7의 H_{∞} 제어기와 비교하여 초반의 오버슈트가 상당히 줄어들음을 알 수 있다. 이는 $W_2(s)$ 에 고주파

통과 필터를 사용한 결과로서 제어 입력 한계 값이 존재할 경우에 효과적으로 사용될 수 있음을 보여준다.

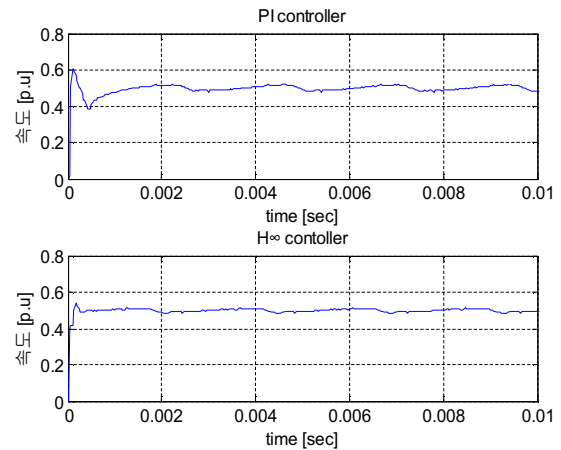


Fig. 8. Experimental results when speed reference is set to $0.5p.u.$

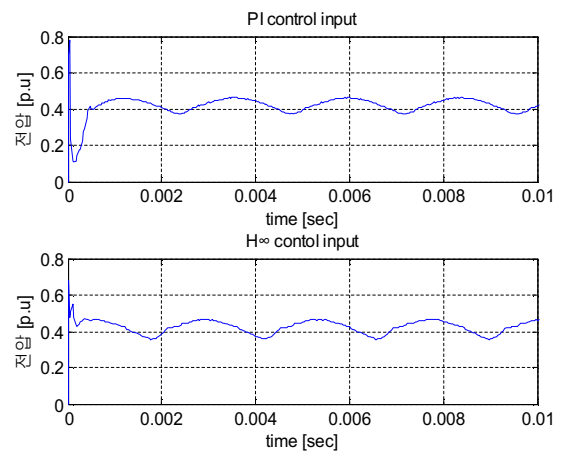


Fig. 9. Experimental results when speed reference is set to $0.5p.u.$

마지막으로 속도지령치가 $0.4p.u.$ 에서 $0.6p.u.$ 로 변하는 경우에 대해서 실험을 수행하였으며 그 결과를 그림 10에서 볼 수 있다. 그림으로부터 속도지령치가 변하는 순간 발생하는 오버슈트는 별 차이가 없지만 앞서와 마찬가지로 H_{∞} 제어기를 사용했을 때 외란의 영향을 더욱 감소시킬 수 있음을 다시 한번 확인할 수 있다.

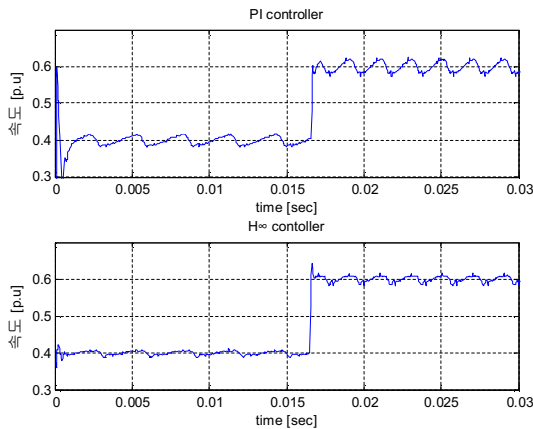


Fig. 10. Experimental results when speed reference is changed from 0.4p.u to 0.6p.u

5. 결론

본 논문에서는 강인 제어 기법 중 하나인 H_∞ 제어 기법을 BLDC 모터에 적용하여 속도제어기를 설계하였다. BLDC 모터를 구동할 때 외부에서 외란이 존재하는 경우 발생하는 속도변동을 억제하는 것을 제어 목표로 하였다. DSP 구현을 통하여 일반적으로 널리 사용되는 PI 제어기와의 비교를 통해 H_∞ 속도 제어기가 외란이 존재 할 경우 PI 속도 제어기 보다 뛰어난 외란제거 성능을 보임을 알 수 있었다. 또한 가중함수 W_2 를 적절히 선택할 경우, 제어입력의 초기 오버슈트를 효과적으로 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

본 연구는 2013년도 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (NO. 20134010200570)

References

[1] G. Bauerlein, "A brushless DC motor with solid-state commutation", IRE National Convention Record, pp. 184-190, 1962.
 [2] J. Fang, X. Zhou, and G. Liu, "Instantaneous torque control of small inductance brushless DC motor", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no.12, pp. 4952-4964, Dec. 2012.
 [3] S. R. Gurumurthy, A. Sharma, S. Sarkar and S. S. Kumar,

"Effect of leakage inductance on the performance of BLDC machine used in flywheel energy storage applications", International Conference on Power, Signals, Controls and Computation (EPSICON), 2014 International Conference on. IEEE, pp. 1-5, Jan. 2014.
 [4] F. Aghili, "Fault-tolerant torque control of BLDC motors", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 2, pp. 355-363, Feb. 2011.
 [5] A. V. Sant and K. R. Rajagopal, "PM synchronous motor speed control using hybrid fuzzy-PI with novel switching functions", IEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 10, pp. 4672-4675, Oct. 2009.
 [6] S. Kim, Control of DC and AC motors, Bokdo, 2007.
 [7] L. Xie, "Output feedback H_∞ control of systems with parameter uncertainty", International Journal of Control, vol. 63, no.4, pp. 741-750, 1996.
 [8] V. A. Ugrinovskii "Robust H_∞ infinity control in the presence of stochastic uncertainty", International Journal of Control, vol. 71, no.2, pp. 219-237, 1998.
 [9] T. Kang, K.J. Yoon, T.H. Ha, and G. Lee., "H-infinity Control System Design for a Quad-rotor", Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, vol. 21, no. 1, p. 14-20, 2015.
 [10] Ximena Celia Mendez Cubillos and Luiz Carlos Fadelha de Souza, "Using of H-infinity control method in attitude control system of rigid-flexible satellite", Mathematical Problems in Engineering, 2010.

◇ 저자소개 ◇



장소현 (張韶賢)

1991년 1월 17일생. 2014년 숭실대 공대 전기공학부 졸업. 2014년~현재 숭실대 공대 전기공학부 석사과정 재학중. 연구 분야는 강인제어, 모터 제어시스템 설계.



조남훈 (趙南薰)

1970년 3월 18일생. 1992년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(박사). 2002년~현재 숭실대학교 전기공학부 교수.