

# 외란관측기를 이용한 자동문 시스템의 성능 개선

劉永東\*, 李教範†, 洪錫教\*\*

## Performance Improvement of an Automatic Door System Using a Disturbance Observer

Young-Dong Yoo, Kyo-Beum Lee, and Suk-Kyo Hong

### 요 약

본 논문에서는 외란관측기를 이용한 자동문 제어기 설계 기법을 제안한다. 통상적으로 자동문의 제어기로 PID제어기를 주로 사용하고 있으나, 설치장소에 따라 문의 크기 및 무게가 다양하기 때문에 파라미터의 변동과 불확실한 동역학 및 외란 등을 고려한 강인한 제어기가 요구된다. 이를 위해 선형화된 자동문의 모델을 제시하고, 이를 기반으로 상태피드백 제어기와 관측기를 사용하여 LQR 제어기를 설계한다. 불확실한 요소를 보상하기 위하여 외란 관측기를 제시한다. 시뮬레이션과 실험결과는 제안한 제어기법의 타당성을 보여준다.

### ABSTRACT

This paper proposes a precise position control of an automatic door using a disturbance observer. Although the conventional PID controller is usually used for an automatic door system, the demand of the robust controller considering the parameter deviations and disturbances is increasing due to the various size and weight of a door. The linear model for an automatic door system is presented. Based on this model, the LQR controller using a state feedback controller and an observer are suggested. A disturbance observer to compensate the undesirable factors is also proposed. Simulation and Experimental results are presented to illustrate the feasibility of the proposed control strategy

**Key Words** : Automatic door systems, LQR, Disturbance observer

### 1. 서 론

슬라이딩 자동문(이하 자동문이라고 함)은 대형 유통매장, 병원, 음식점, 관공서등의 각종 건물에서는 고객을 위한 편의를 제공하기 위해서 출입문으로 이용하고, 공동주택에서는 출입문 및 외부 출입을 통제하는 방법의 편리성 등의 이유로 도어시설로 광범위하게

사용되고 있다. 자동문이 열손실도 방지해 결과적으로 에너지 절약에도 긍정적인 역할을 한다.

일반적으로 자동문은 제어부, 구동부 및 보행자 등을 검출하는 센서부로 구성되어 있다<sup>[1]</sup>. 동력 전달방식은 타이밍 벨트방식으로 설치, 운영된다. 구동장치로 사용되어지는 타이밍벨트는 고속, 고효율, 긴 전송길이 및 적은 비용 등의 장점을 가지고 있지만, 탄성, 컴플라이언스 및 스쿠류볼 구동보다 더 많은 마찰 등의 특성으로 높은 전송 에러를 발생한다. 결과적으로 낮은 반복 및 정밀도를 갖는다<sup>[2]</sup>. 자동문은 설치장소에 따라 문의 크기 및 무게가 다양하여 파라미터의 변동과 불확실한 동역학 및 외란 등으로 인하여 강인한 제어기가 요구된다.

\*교신저자 : 정회원, 아주대 전자공학부 부교수

E-mail : kyl@ajou.ac.kr

†정회원, 아주대 전자공학과 박사과정

\*\*정회원, 아주대 전자공학부 교수

접수일자 : 2010. 7. 26

1차 심사 : 2010. 8. 4

심사완료 : 2010. 8. 8

일반적으로 사용되는 기존의 PI, PD 또는 PID 제어기는 이득 값이 적절히 조절될 경우 좋은 운전 특성을 갖지만, 불확실한 변동이 크고, 외란의 폭이 큰 경우 만족할 만한 성능을 얻기 어렵다<sup>[3,4,5,6]</sup>. 본 연구에서는 자동문을 모델링하고, 정밀한 추종 제어성능을 만족하는 LQ 서보제어기를 설계하고자 한다<sup>[7]</sup>. 또한, 외란 관측기를 통하여 파라미터 변동 및 외란 등을 보상하는 제어기를 설계한다<sup>[8]</sup>. 목표치에 대한 추종성과 외란 등의 제어환경 변화에도 강인함을 시뮬레이션 및 실험을 통해 검토한다.

## 2. 자동문 시스템의 수학적 모델

일반적인 자동문은 그림 1과 같이 슬라이딩(미닫이) 자동문 구조이다. DC 전동기로 구동되는 벨트구동 시스템으로 구성된다.

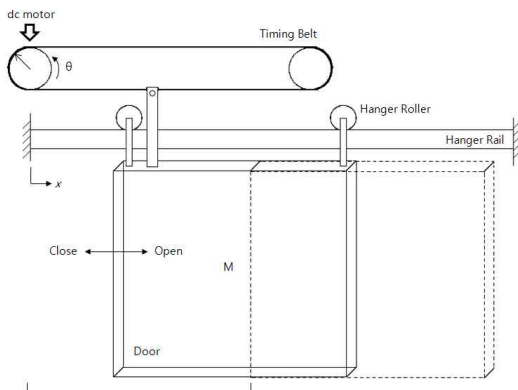


그림 1 자동문의 기계구조 및 구동 시스템  
Fig. 1 Mechanical structure and drive system of automatic door

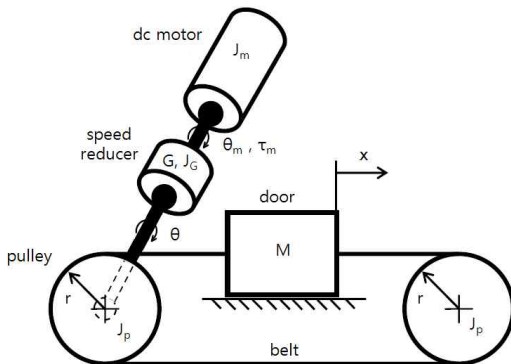


그림 2 벨트구동 자동문 모델  
Fig. 2 an automatic door model of the belt drive

자동문 시스템에 대한 수학적 모델은 다음의 수식 (1)-(5)로 나타낼 수 있다. 풀리의 마찰 및 관성, 벨트의 질량을 무시하며, 벨트구동은 벨트의 선형탄성 범위에서 동작하는 것으로 가정하였다. 자동문의 무게는 설치장소마다 달라지므로 발생하는 토크  $T_i$ 를 미지의 부하로 설정하고, 행어 롤러와 행어 레일사이에 발생하는 마찰토크  $T_f$ 는 알 수 없는 부하로 설정하였다. 또한, 외란 등은  $T_d$ 로 설정하여 모터측 부하토크  $T_L$ 에 반영하였다. 여기서  $J$ 는 모터와 기어의 관성을 합한 것이며,  $B$ 는 모터와 기어축의 쿨롱마찰을 합한 것이다. 감속기어비  $G$ 는 11.875이다.

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + k_e \omega_m = e_a \quad (1)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m + \frac{T_L}{G} = \tau_m = k_t i_a \quad (2)$$

$$T_L = T_i + T_f + T_d \quad (3)$$

$$T_i = Mr\ddot{x} = Mr^2\ddot{\theta} = \frac{Mr^2}{G} \ddot{\theta}_m \quad (4)$$

$$T_f = \mu Mg \quad (5)$$

여기서,

$\theta_m$  : 모터의 회전각

$\theta$  : 부하의 회전각

$\omega_m$  : 모터의 회전각속도

$e_a$  : 모터의 입력

$i_a$  : 전기자전류

$M$  : 도어질량

$g$  : 중력가속도

$\mu$  : 마찰토크상수

$T_d$  : 외란 토크

$R_a$  : 모터 전기자저항(=4.15  $\Omega$ )

$L_a$  : 모터 전기자인덕턴스(=0.00122 H)

$k_t$  : 모터 토크상수(=0.06101916 N·m/A)

$k_e$  : 모터 역기전력상수(=0.06101916 V·sec/rad)

$J$  : 모터측 회전자 관성모멘트(=0.5x10<sup>-5</sup> kg·m<sup>2</sup>)

$B$  : 모터측 점성 마찰계수(=0.2x10<sup>-4</sup> N·m·s/rad)

$G$  : 감속기어비(=11.875)

$r$  : 풀리 반지름(=2.2 cm)

상태변수  $x$ 를 다음과 같이 정의하면

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [\theta_m \ \omega_m \ i_a]^T \quad (6)$$

식 (6)에서 첨자 T는 행렬의 전치행렬(Transpose)을 의미한다. 자동문 시스템에 대한 상태방정식은 식 (7)과 같다.

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J} & \frac{k_t}{J} \\ 0 & -\frac{k_e}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ L_a \end{bmatrix} u(t) + d(t) \quad (7)$$

$$d(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{JG} \left( \frac{Mr^2}{G} \ddot{\theta}_m + \mu Mg + T_d \right) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$y(t) = [1 \ 0 \ 0]x(t) \quad (9)$$

여기서  $x(t)$ 는 상태변수,  $u(t)$ 는 제어 입력,  $d(t)$ 는 외란으로 자동문의 관성토크, 마찰토크 및 미지의 외란의 합으로 정의한다.  $y(t)$ 는 출력이다.

디지털 제어를 위해서 식 (7)로 표현된 시스템을 샘플링주파수가 5[ms]인 경우, 비선형 성분인  $d(t)$ 를 고려하지 않은 이산 상태 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$x[k+1] = \Phi x[k] + \Gamma u[k] \quad (10)$$

$$y[k] = Hx[k] \quad (11)$$

여기서,

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0.0034 & 0.0118 \\ 0 & 0.4024 & 1.5445 \\ 0 & -0.0063 & -0.0241 \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 0.0259 \\ 9.5719 \\ 0.1060 \end{bmatrix},$$

$$H = [1 \ 0 \ 0]$$

### 3. 제어 알고리즘

#### 3.1 추가 상태 궤환 시스템

자동문 시스템에서 고려하는 기준입력,  $r[k]$ 은 계단(step) 입력 혹은 경사(ramp) 입력이다. 외란에 관계없이 기준입력의 추종을 위해서 두 개의 이산 적분기를 출력 측에 추가시키고 이들을 궤환시킨다. 새로운 상

태변수  $z_1, z_2$ 를 식 (12), (13)과 같이 정의하고, 앞서 정의한 시스템 상태방정식에 추가한다.

$$z_1[k+1] = z_1[k] + 0.005z_2[k] \quad (12)$$

$$z_2[k+1] = z_2[k] + 0.005(x_1[k] - r[k]) \quad (13)$$

추가된 상태 궤환 시스템은 식 (14), (15)와 같다.

$$x_a[k+1] = \Phi_a x_a[k] + \Gamma_a u[k] + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} r[k] \quad (14)$$

$$y[k] = H_a x_a[k] \quad (15)$$

$$\Phi_a = \begin{bmatrix} 1 & 0.0034 & 0.0118 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4024 & 1.5445 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0063 & -0.0241 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.005 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\Gamma_a = \begin{bmatrix} 0.0259 \\ 9.5719 \\ 0.1060 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$H_a = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (18)$$

여기서  $x_a[k]$ 는  $[x_1 \ x_2 \ x_3 \ z_1 \ z_2]^T$ 이고  $u[k]$ 는 제어입력,  $r[k]$ 는 기준입력을 나타낸다.

외란 부분을 고려하지 않은 선형 시스템을 안정시킬 수 있는 제어기  $u[k]$ 는 다음과 같다.

$$u[k] = -(k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 + k_4 z_1 + k_5 z_2) + k_1 r[k]$$

$$= -Kx_a[k] + k_1 r[k] \quad (19)$$

상태변수 궤환 시스템의 이득 설계를 위하여 식 (19)와 같은 시스템의 성능지수를 다음과 같이 정의한다.

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (x_a^T[k] Q x_a[k] + u^T[k] R u[k]) \quad (20)$$

$$(Q \geq 0, R > 0)$$

이를 최소화하는 최적 상태궤환 제어기 설계문제는 다음과 같은 이산 Riccati 방정식을 만족하는 양한정 행렬  $P$ 를 구하는 문제로 정리된다.

$$\Phi_a^T P \Phi_a - P + Q - \Phi_a^T P \Gamma_a (R + \Gamma_a^T P \Gamma_a)^{-1} \Gamma_a^T P \Phi_a = 0 \quad (21)$$

이때의 최적 제어입력은 다음과 같이 주어진다.

$$u[k] = -(R + \Gamma_a^T P \Gamma_a)^{-1} \Gamma_a^T P \Phi_a x_a[k] \quad (22)$$

$$K = (R + \Gamma_a^T P \Gamma_a)^{-1} \Gamma_a^T P \Phi_a \quad (23)$$

### 3.2 전차원 외란 관측기

제어기 입력  $u[k]$ 는 선형 시스템만을 고려했기 때문에 식 (24)과 같이 비선형 요소와 외란에 대한 보상이 필요하다.

$$u[k] = -Kx_a[k] - \hat{d}[k] \quad (24)$$

여기서  $\hat{d}[k]$ 는 보상된 값을 의미하며 외란 관측기 통해서 구할 수 있다.

외란 변화는 제어기의 제어 샘플링 주기에 비해 상당히 늦으므로 외란의 변화율은 0이라 볼 수 있다. 따라서 다음과 같이 외란을 상태변수로 도입할 수 있다.

$$\dot{d}(t) = 0 \quad (25)$$

외란상태변수가 포함된 확장된 상태방정식은 다음과 같다.

$$x_e[k+1] = \Phi_e x_e[k] + \Gamma_e u[k] \quad (26)$$

$$y[k] = H_e x_e[k] \quad (27)$$

$$\Phi_e = \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \Gamma_e = \begin{bmatrix} \Gamma \\ 0 \end{bmatrix}, H_e = [H \ 0] \quad (28)$$

식 (29)와 같이  $W_o$ 를 정의하고,  $W_o$ 가 역행력이 존재한다면 이 시스템은 관측 가능하므로 전차원 관측기는 식 (30)과 같다.

$$W_o = [H_e \ H_e \Phi_e \ H_e \Phi_e^2 \ H_e \Phi_e^3]^T \quad (29)$$

$$\hat{x}_e[k+1] = \Phi_e \hat{x}_e[k] + \Gamma_e u[k] + L(y[k] - H_e \hat{x}_e[k]) \quad (30)$$

여기서  $L$ 은 관측기 이득행렬이다.

관측기 이득행렬  $L$ 은 Ackermann 공식을 이용하여 다음 같이 구할 수 있다.

$$L = \alpha_e(\Phi_e) W_o^{-1} [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \alpha_e(z) &= (z - \beta_1)(z - \beta_2)(z - \beta_3)(z - \beta_4) \\ &= z^4 + \alpha_1 z^3 + \alpha_2 z^2 + \alpha_3 z + \alpha_4 \end{aligned} \quad (32)$$

여기서 식 (31)의  $\alpha_e(z)$ 는 원하는 폐루프 근들 ( $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ )로 구성된 특성방정식이며,  $\alpha_e(\Phi_e)$ 는  $z$  대신에  $\Phi_e$ 를 대입한 행렬 다항식이다.

### 3.3 Bessel 다항식을 이용한 관측기 이득행렬

폐루프(closed-loop) 극점의 위치를 선정하는 방법 중에 하나는 이미 알고 있는 여러 프로타입 시스템의 스텝응답을 고려하는 것이다.  $B_k(s)$ 를 정규화된  $k$ 차수 Bessel 다항식이라고 하자. 표 1에서  $k$ 차수에 해당하는 근(root)들을 보여주고 있다. Bessel 다항식의 근으로 모든 시스템의 극점을 가지는 시스템은 원하는 시스템 응답을 가진다<sup>[9]</sup>. 그러한 시스템의 전달함수는  $B_k(0)/B_k(s)$ 이다. 이러한 시스템의 스텝응답은 그림 3과 같다. 모두 1초의 정착시간(settling time)을 가지는 스텝응답을 나타낸다. 다른 정착시간을 원하면 해당 차수의 Bessel 다항식의 근 모두의 크기를 일정 비율로 조정하면 된다. 예를 들면,  $T_s$  초의 정착시간을 얻기 위해서는 원하는 차수의 Bessel 다항식 근들의 실수 및 허수값 모두  $T_s$ 로 나누어야 한다. 디지털 제어를 하기 위해서는 샘플링 시간  $T_s$ 를 가지는 시스템에서 Bessel 다항식 근들로 나온 값을 식 (33)을 이용하여  $z$ -domain에서의 근으로 만들며, 식 (31)을 이용하여 Ackermann 공식으로 관측기 이득행렬을 구한다. 그림 4는 제안한 전체 알고리즘의 블록도이다.

$$z = e^{T_s s} \quad (33)$$

## 4. 전체 시스템 구성

제안한 자동문 제어기의 성능을 검증하기 위하여 시

표 1 정착시간이 1초에 해당하는 정규화된 Bessel 다항식의 근

Table 1 Roots of normalized Bessel polynomials corresponding to a settling time of 1 second

k	Pole locations of $B_k(s)$
1	-4.6200
2	-4.0530 ± j2.3400
3	-5.0093, -3.9668 ± j3.7845
4	-4.0156 ± j5.0723, -5.5281 ± j1.6553
5	-6.4480, -4.1104 ± j6.3142, -5.9268 ± j3.0813
6	-4.2169 ± j7.5300, -6.2613 ± j4.4018, -7.1205 ± j1.4540
7	-8.0271, -4.3361 ± j8.7519, -6.5714 ± j5.6786, -7.6824 ± j2.8081
8	-4.4554 ± j9.9715, -6.8554 ± j6.9278, -8.1682 ± j4.1057, -8.7693 ± j1.3616
9	9.6585, -4.5696 ± j11.1838, -7.1145 ± j8.1557, -8.5962 ± j5.3655, -9.4013 ± j2.6655
10	-4.6835 ± j12.4022, -7.3609 ± j9.3777, -8.9898 ± j6.6057, -9.9657 ± j3.9342, -10.4278 ± j1.3071

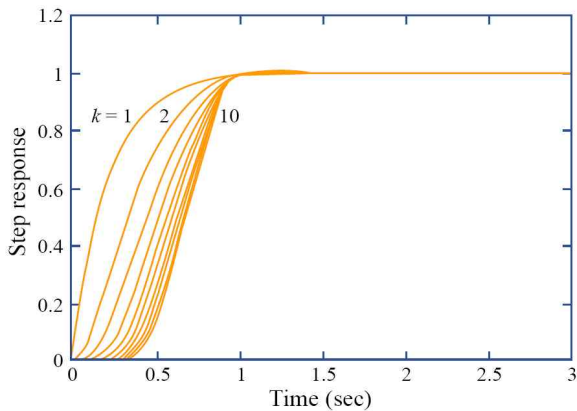


그림 3  $B_k(0)/B_k(s)$  스텝응답,  $k = 1, \dots, 10$

Fig. 3 Step Responses  $B_k(0)/B_k(s)$  for  $k = 1, \dots, 10$

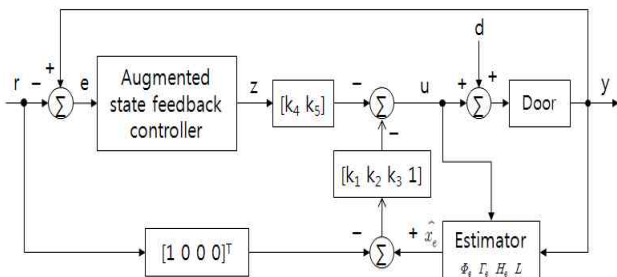


그림 4 제안된 알고리즘의 블록도

Fig. 4 Block diagram of the proposed algorithm

물레이션 및 실험을 수행하였다. 시물레이션은 매트릭스사에서 개발한 MATLAB을 사용하였다. 시물레이션 및 실험에는 90[W], DC 24[V], 관성계수는  $0.5 \times 10^{-5}$

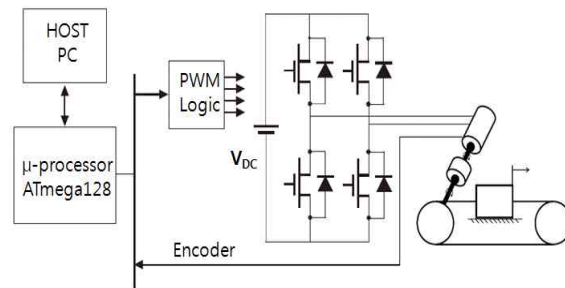


그림 5 실험 시스템 구성

Fig. 5 Configuration of experimental system

[kg·m<sup>2</sup>], 128펄스의 엔코더가 부착된 DC 모터를 사용하였다.

그림 5는 실험에 사용된 전체 시스템을 나타낸다. Atmel사의 ATmega128을 탑재한 주제어기부, gate drive 및 PWM로 구성된 전력회로부, 모터의 현재 위치를 발생시키는 엔코더부로 구성되어 있다.

디지털제어기의 샘플링 시간은 5[ms]로 하였고, 모든 시물레이션과 실험은 동등한 조건으로 수행되었다. 그림 6은 실험에 사용된 자동문이다. 사양은 폭이 115 [cm], 높이가 210[cm], 무게가 73[kg]이다.

### 5. 시물레이션 및 실험 결과

부하가 없는 시스템과 부하가 있는 시스템으로 시물레이션 및 실험을 수행하였다. 자동문에서 일반적으로 사용되어지는 열림(open) 및 닫힘(close) 동작 시 사용되는 위치 프로파일은 그림 7과 같다. 정상구간 및 안

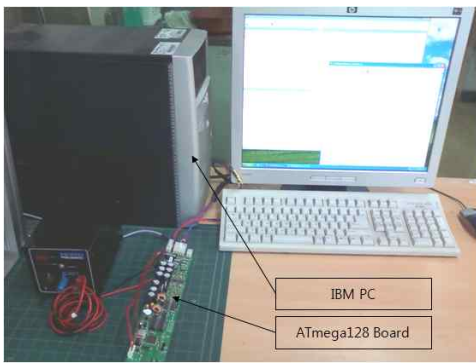


그림 6 자동문과 구동시스템  
Fig. 6 Automatic door and total driving system

전상 문의 끝지점 도달 시 저속구간으로 2가지의 다른 속도값을 갖는다. 시뮬레이션 및 실험에서는 총 이동 거리는 1200[mm]이며, 저속구간의 길이는 50[mm]이다.

정상속도는 0.3[m/s], 저속속도는 0.05[m/s]이며, 모든 가속도는 0.3[m/s<sup>2</sup>], 감속도는 0.3[m/s<sup>2</sup>]이다.

그림 8은 적분기 및 외란관측기가 없는 제어에 극 배치 방법을 이용한 것으로, Bessel 다항식을 이용하여 정착시간이 50[ms]로 설정한 것으로, 표 1에서  $k$ 가 3인 경우의  $s$ -영역에서의 근은  $[-5.0093, -3.9668 + j3.7845, -3.9668 - j3.7845]$ 이며, 식 (35)의  $T_s$ 가 50 msec이므로  $z$ -영역에서의 근은 제어 샘플링이 5[ms]인 경우,  $[0.6060, 0.6250 + j0.2485, 0.6250 - j0.2485]$  가 되며, Ackermann의 공식으로  $[k_1 \ k_2 \ k_3]$ 이  $[1.6005 \ -0.0236 \ -2.7599]$  인 경우이다. 그림에서 점선은 원하는 위치값이며, 실선은 시뮬레이션을 통한 실제 위치값이다. 설계된 정착시간인 50[ms]만큼의 지연을 확인할 수 있다.

그림 9는 제안된 LQR 및 외란관측기를 적용하였을 때 자동문의 위치응답이다.  $Q=[1 \ 0 \ 0 \ 10 \ 1000]$ ,  $R=1$ 인 경우로  $[k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ k_5]$ 를  $[2.8857 \ 0.0147 \ 0.0530 \ 0.8918 \ 2.4376]$ 로 설정하였으며, 그림 8의 극배치방법

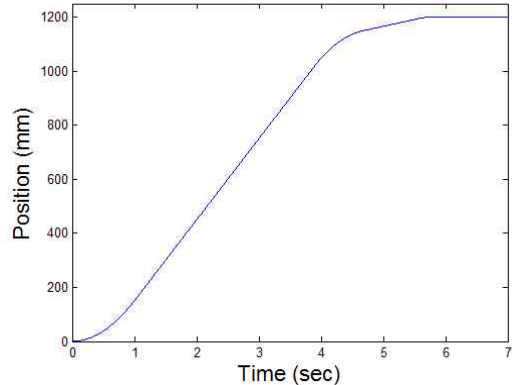


그림 7 자동문 위치 프로파일  
Fig. 7 Position profile of automatic door

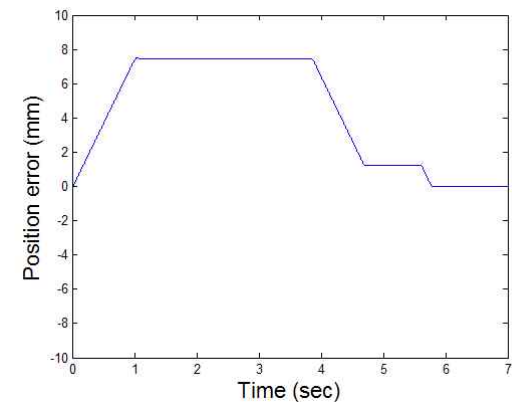
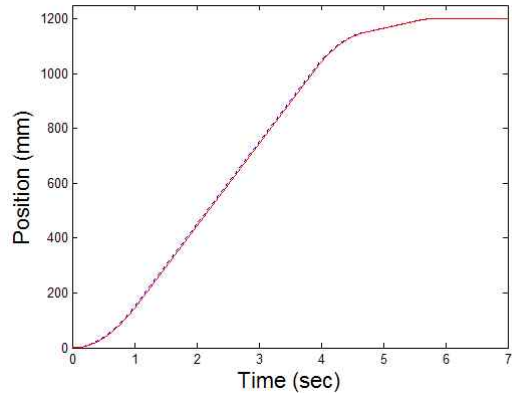


그림 8 무부하 시뮬레이션 결과 (극배치방법)  
Fig. 8 Simulation results under no-load (pole placement)

에 비해 위치오차가 전반적으로 줄었으며, 특히 위치 과도상태의 위치추종 성능이 많이 개선되었음을 볼 수 있다. 관측기 이득행렬은 정착시간이 10[ms]가 되도록 설정하였다.

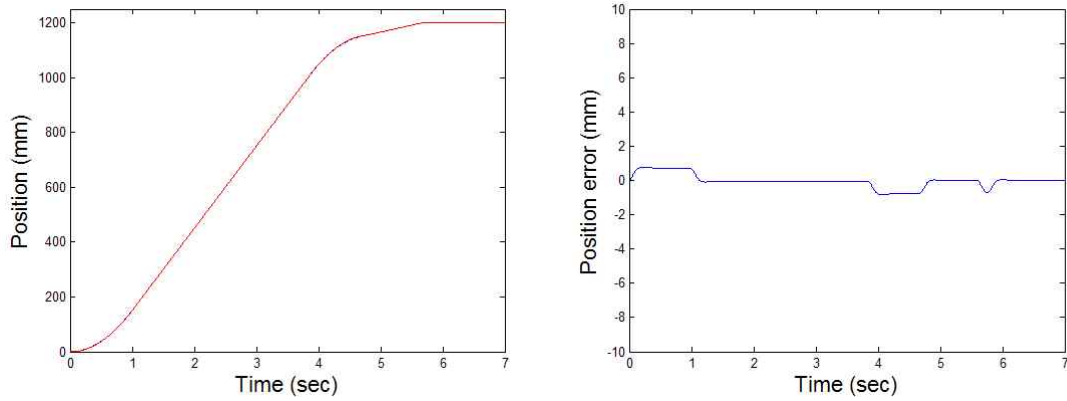


그림 9 무부하 시뮬레이션 결과(추가상태배환, 외란관측기)  
 Fig. 9 Simulation results under no-load (augmented state feedback, disturbance observer)

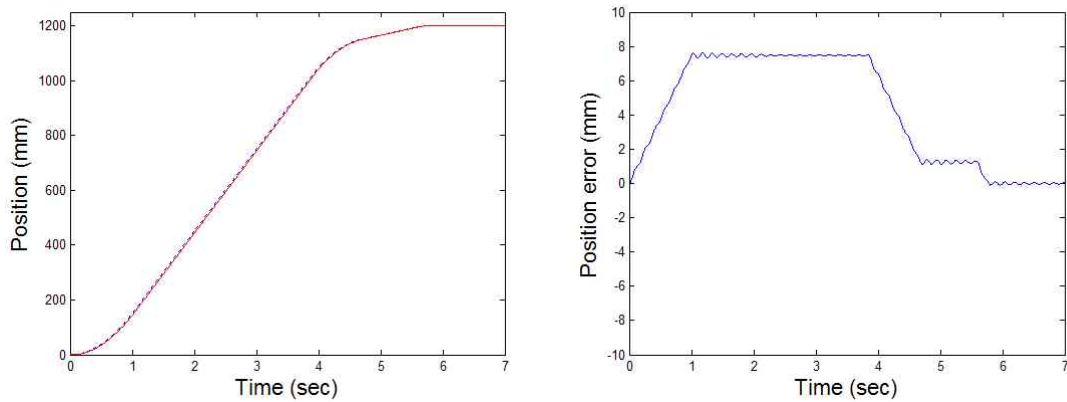


그림 10  $J=10J$  시뮬레이션 결과 (극배치방법)  
 Fig. 10 Simulation results under  $J=10J$  (pole placement)

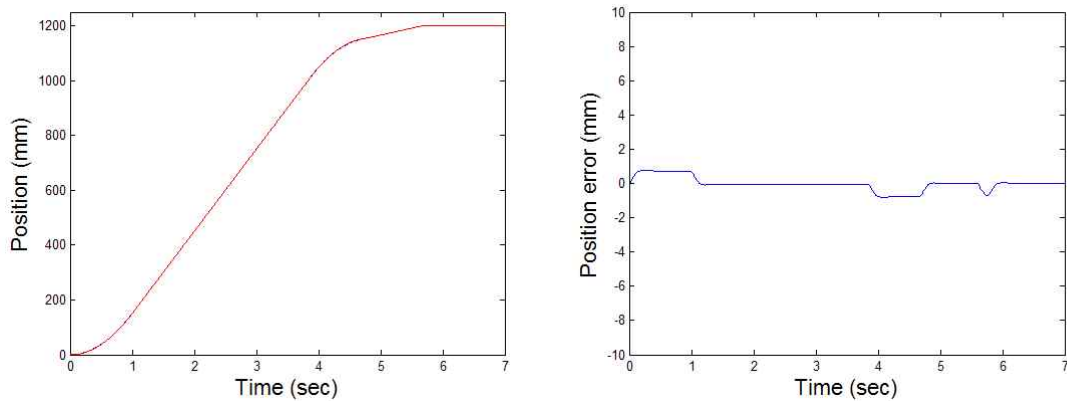


그림 11  $J=10J$ 인 경우 시뮬레이션 결과 (추가상태배환, 외란관측기)  
 Fig. 11 Simulation results under  $J=10J$  (augmented state feedback, disturbance observer)

관성의 변화에 대한 위치 응답 특성을 살펴보기 위하여  $J=10J$ 로 설정하여 시뮬레이션 한 결과를 그림

10과 그림 11에 도시하였다. 그림 10은 그림 8에서 사용한 방법으로 나온 결과이며, 그림 11는 그림 9에서

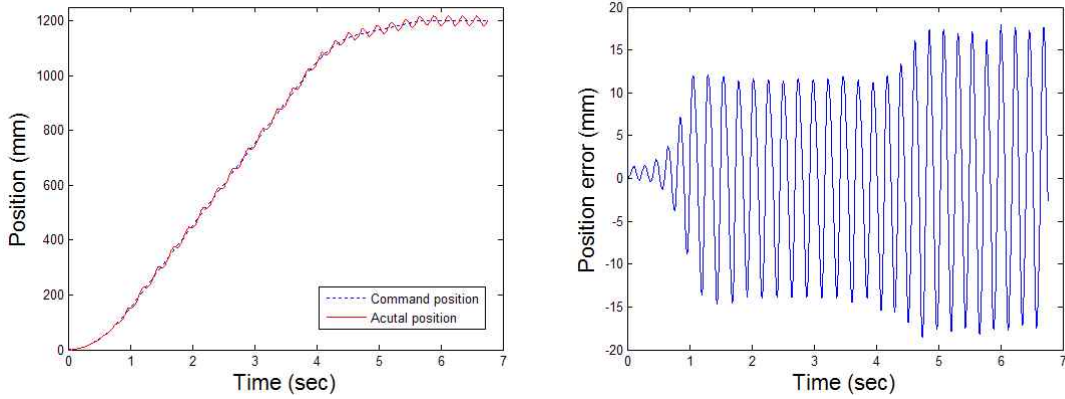


그림 12 실험 결과 (극배치방법)  
 Fig. 12 Experiment results (pole placement)

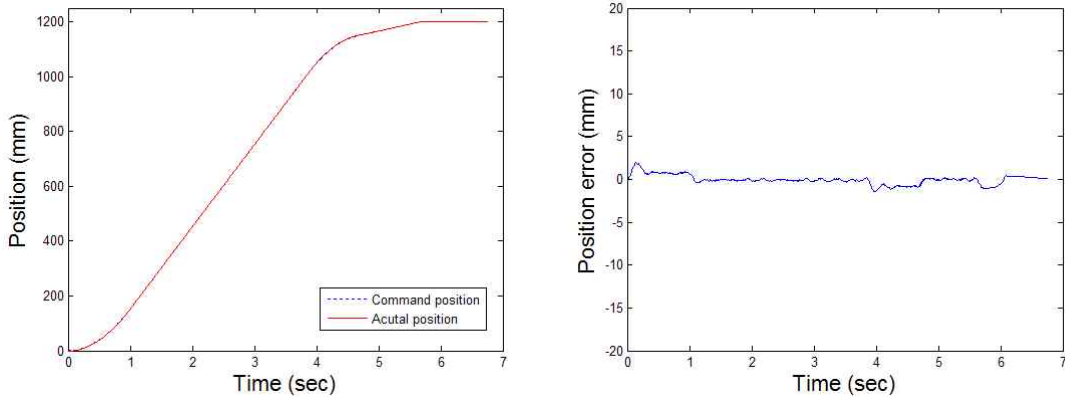


그림 13 실험 결과 (추가상태귀환, 외란관측기)  
 Fig. 13 Experiment results (augmented state feedback, disturbance observer)

설정된  $Q=[1 \ 0 \ 0 \ 10 \ 1000]$ ,  $R=1$ 인 경우의 결과이다. 파라미터 변동과 외란의 변화에 외란 관측기가 잘 보상해주고 있음을 보여준다.

그림 12과 그림 13은 실제 자동문에 실험한 위치 추적 결과이다. 그림 12는 극배치 방법만을 사용하여 그림 8의 제어기를 사용한 것으로, 시뮬레이션 결과에 보인 것처럼 파라미터 변동과 외란에 대한 보정을 하지 않아 위치응답에 맥동성분이 존재한다. 그림 13은 제안된 제어기를 적용한 실험결과이다. 그림 9와 같은 제어기를 사용하였으며, 맥동이 없는 원하는 위치 추적 결과를 나타낸다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 일반적으로 사용하는 자동문의 수학

적 모델을 제시하였고, 강인한 자동문 위치 제어를 위해 적분기가 추가된 LQR 제어기 및 외란관측기를 제안하였다. 관측기의 이득행렬을 구하기 위해서 Bessel 다항식을 이용하였다. 적분기가 추가된 LQR 제어기를 설계하여 자동문에서 일반적으로 사용되는 사다리꼴 속도파형에 적절히 동작함을 확인하였다. 추가한 외란 관측기를 이용하여 파라미터의 변동이나 부하외란을 모델링함으로써 강인한 서보시스템의 설계가 가능하였다.

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (20100019658)



## 참 고 문 헌

- [1] 한국산업표준(KS), 자동문 개폐 장치의 시험 방법, KS F 2633, 2007.
- [2] M. Kagotani, T. Koyama, and H. Ueda, "A study on transmission error in timing belt drives", *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 115, No. 12, pp. 1038-1043, 1993.
- [3] 권세현, "속도와 가속도 제한에서 진향 보상기를 이용한 벨트 구동의 정밀제어", *한국마린엔지니어링학회지*, Vol 33, No. 5, pp. 713-720, 2009. 7.
- [4] K. B. Lee and F. Blaabjerg, "Robust and Stable Disturbance Observer of Servo System for Low Speed Operation Using the Radial Basis Function Network", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 43, No. 3, pp. 627-635, 2007.
- [5] 고종선, 이태훈, "외란관측기와 파라미터 보상기를 이용한 PMSM의 정밀위치제어", *전력전자학회 논문지*, 제9권 제1호, pp. 42-49, 2004. 2.
- [6] 김현식, 강경우, 고종선, "외란관측기를 이용한 유도전동기의 정밀 위치 제어", *전력전자학회 논문지*, 제11권, 제1호, pp. 38-45, 2006. 2.
- [7] B. D. O. Anderson and J. B. Moore, *Optimal Control: Linear Quadratic Methods*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1990.
- [8] G. F. Franklin, J. D. Powell, and M. L. Workman, *Digital Control of Dynamic Systems*, Addison Wesley, 1998.
- [9] Richard J. Vaccaro, *Digital Control - A State-Space Approach*, McGraw-Hill, 1995.

## 저 자 소 개



### 유영동(劉永東)

1968년 12월 10일생. 1991년 아주대 제어계측공학과 졸업. 1993년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자공학과 박사과정.



### 이교범(李敎範)

1972년 6월 30일생. 1997년 아주대 공대 전자공학부 졸업. 1999년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2003년 고려대 전기공학과 졸업(공학박). 2003년~2006년 The Institute of Energy Technology, Aalborg University in Denmark. 2006년~2007년 전북대 전자정보공학부 조교수. 2007년~현재 아주대 전자공학부 부교수. 당 학회 JPE 편집위원.



### 홍석교(洪錫敎)

1948년 8월 23일생. 1971년 서울대 전기공학과 졸업. 1973년 동 대학원 졸업(석사). 1981년 동 대학원 졸업(공학박). 1976년~현재 아주대 전자공학부 교수.