

논문 2014-51-2-25

최적제어 기법을 이용한 밸런싱 로봇 제어기의 설계

(Design of Balancing Robot Controller using Optimal Control Method)

여 희 주*, 박 훈**

(Hee-Joo Yeo[©] and Hun Park)

요 약

본 논문에서는 밸런싱 로봇의 동역학적 모델의 해석으로부터 기울기와 조향이 독립되어 있어 서로 영향을 받지 않는 것을 증명하고, 다변수 시스템에 적합한 제어기로서 두 개의 최적 LQR 제어기 구조를 갖는 제어시스템을 제안하였다. 또한 제안한 제어시스템의 성능을 입증하기 위하여 밸런싱 로봇의 자세제어에 적용하여 모의실험과 실험을 수행하였고, PID 제어기와의 비교평가를 통하여 그 우수성을 검증하였다.

Abstract

In this paper, we get state equations based on wheel's rotation, tilt and steering are independent each other in balancing robot. Accordingly, we propose two LQR controllers which are appropriate for rotation and steering control of a balancing robot. And its superiority and appropriateness are demonstrated by a comparison to a PID method. Simulation results verify the possibility of upright balancing, rectilinear motion and position control. Moreover, experimental results show that it guarantees the performance to apply the two LQR controllers to balance the robot.

Keywords : Balancing Robot, LQR Controller, PID Controller

I. 서 론

최근 로봇제어에 관한 연구를 보면 밸런싱 로봇에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 밸런싱 로봇이란, 두 바퀴의 구조를 가진 도립진자 형태의 로봇으로써 균형을 유지하도록 각도센서와 모터의 힘을 이용하여 몸체의 균형을 제어하는 로봇이다.

두 개의 모터를 구동력으로 갖는 밸런싱 로봇의 구조적 특징은 대표적인 불안정한 비선형 시스템으로써, 3개의 입력과 6개의 상태변수로 표현되는 MIMO 구조의 시스템이고, 또한 제어 대상인 상태변수의 갯수보다 액추에이터의 갯수가 적은 언더 액추에이티드 시스템이

며, 기울기뿐만 아니라 조향도 동시에 제어해야 하기 때문에 제어에 어려움이 존재한다.

밸런싱 로봇제어에 있어서 가장 큰 핵심은 제어방법과 정확한 운동방정식의 제시이다. 밸런싱 로봇의 제어기는 일찍 1965년부터 연구되기 시작하여 1966년 Scheafer, Cannon는 밸런싱 로봇의 최초의 제어기인 Bang-Bang (On-Off) 제어기를 설계하였고, 1972년 Strugeon, Los-cutoff는 상태 공간기법을 이용한 출력궤환 제어기 (output-feedback controller)를 설계하여 불안정시스템의 동적 안정화를 시도한바 있다. 1994년 Yun-Su Ha, Shin'ichi Yuta는 3자유도 운동방정식을 기반으로 한 공간추적 제어기를 설계하여 밸런싱 로봇의 자세와 주행을 동시에 제어하였다^[1]. 2005년 김영훈은 Grasser가 제안한 운동방정식에서 생략된 자세각도 성분을 추가하여 선회각도 성분도 생략되어야 한다는 이론적 맹점을 해결한 최적화된 3자유도 운동방정식을 제안하였고, LQR 제어기를 사용하여 밸런싱 로봇을 설계하였다^[2]. 2008년

* 정회원, ** 학생회원, 대진대학교 전자공학과
(Department of Electronics Eng., Daejin University)

© Corresponding Author(E-mail: hjyeo@daejin.ac.kr)

접수일자: 2014년1월9일, 수정완료일: 2014년1월29일

Yorihisa Yamamoto는 LQR 제어기에 PID 제어를 동조시켜 LEGO로 만든 밸런싱 로봇을 제작하였고^[3], 2011년 Hamid Reza Karimi는 LQR 제어기에 Kalman Filter를 추가하여 강인성을 향상시킨 LQG 제어시스템을 설계하였다^[4].

따라서 본 논문에서는 밸런싱 로봇의 동역학적 모델의 해석으로부터 기울기와 조향이 독립되어 있어 서로 영향을 받지 않는 것을 증명하고, 다변수 시스템에 적합한 제어기로서 두 개의 최적 LQR 제어기 구조를 갖는 시스템을 제안하였다. 또한 제안한 제어시스템의 성능을 입증하기 위하여 밸런싱 로봇의 두 가지 자세제어에 적용하여 모의실험과 실험을 수행하였고, PID 제어기와의 비교 평가를 통하여 그 우수성을 검증하였다.

II. 동역학적 모델링

모델링 과정은 먼저 센서를 사용하여 밸런싱 로봇의 입력값인 기울기 각(θ), 바퀴의 회전각(ψ), 조향각(ϕ)을 구한다. 여기에서 센서란 모터 엔코더와 기울기를 측정하는 관성 센서를 말하는 것이다. 다음 이러한 입력값에 삼각함수의 정리를 이용하면 로봇의 좌표를 계산할 수 있고, 라그랑지 역학에 대입시켜 상태값에 해당하는 힘(F_θ, F_ψ, F_ϕ)들을 구할 수 있다. 이러한 힘은 결국 DC 모터로 구동되기에 DC 모터의 토크 방정식과 연립하면 연립방정식으로부터 상태방정식을 얻을 수 있다.

다음은 위에서 설명한 밸런싱 로봇의 모델링 과정을 수식적으로 상세하게 서술한다.

먼저 그림 1에서 밸런싱 로봇의 측면도와 평면도로 부터 파라미터 값을 얻고 운동방정식 도출을 위해, 일반화한 로봇의 운동성분인 바퀴의 회전각도와 몸체 조향각도를 구하면 식(1)과 같다.

$$(\theta, \phi) = \left(\frac{1}{2}(\theta_l + \theta_r), \frac{R}{W}(\theta_r - \theta_l) \right) \quad (1)$$

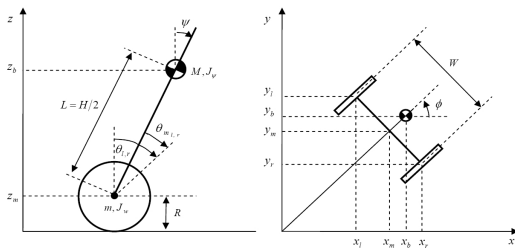


그림 1. 밸런싱 로봇의 측면도(좌)와 평면도(우)
Fig. 1. Side view(left) and ground view(right) of balancing robot.

여기서 두 바퀴의 중심좌표 변화율은 ϕ 가 관여하지 않고, 속도성분만 고려하므로 θ 만 미분한다. 왼쪽 바퀴와 오른쪽 바퀴에서의 좌표, 로봇의 무게중심 b 에서의 좌표는 삼각함수를 이용하여 식(2)~(4)와 같이 구할 수 있다.

$$(x_r, y_r, z_r) = \left(x_m - \frac{W}{2} \sin \phi, y_m + \frac{W}{2} \cos \phi, z_m \right) \quad (2)$$

$$(x_l, y_l, z_l) = \left(x_m + \frac{W}{2} \sin \phi, y_m - \frac{W}{2} \cos \phi, z_m \right) \quad (3)$$

$$(x_b, y_b, z_b) = \left(x_m + L \sin \psi \cos \phi, y_m + L \sin \psi \cos \phi, z_m + L \cos \psi \right) \quad (4)$$

동역학 방정식은 운동계에서 발생하는 에너지를 해석하여 운동을 표현하는 라그랑지 역학(Lagrange mechanics)을 이용하였다. 라그랑지안 함수 L 은 운동 에너지와 위치에너지를 이용하며 식(5)와 같이 정의한다.

$$L = T_T + T_R - U \quad (5)$$

위에서 구한 좌표값을 사용하여 병진 운동에너지 T_T , 회전 운동에너지 T_R , 위치 에너지 U 를 구하면 식(6)~(8)과 같다.

$$T_T = \frac{1}{2} m (\dot{x}_l^2 + \dot{y}_l^2 + \dot{z}_l^2) + \frac{1}{2} m (\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2 + \dot{z}_r^2) + \frac{1}{2} M (\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2 + \dot{z}_b^2) \quad (6)$$

$$T_R = \frac{1}{2} J_w \dot{\theta}_l^2 + \frac{1}{2} J_w \dot{\theta}_r^2 + \frac{1}{2} J_\psi \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} J_\phi \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} n^2 J_m (\dot{\theta}_l - \dot{\psi})^2 + \frac{1}{2} n^2 J_m (\dot{\theta}_r - \dot{\psi})^2 \quad (7)$$

$$U = mgz_l + mgz_r + Mgz_b \quad (8)$$

다음 식(6)~(8)을 식(5)에 대입하면 식(9)와 같이 라그랑지안 함수 L 을 구할 수 있다.

$$L = (mR^2 + \frac{1}{2}MR^2)\dot{\theta}^2 + \frac{1}{4}mW^2\dot{\phi}^2 + \frac{1}{4}ML^2\dot{\psi}^2 \sin^2 \psi + \frac{1}{2}ML^2\dot{\psi}^2 + MRL\dot{\theta}\dot{\psi} \cos \psi + J_w\dot{\theta}^2 + \frac{1}{4}\frac{J_w W^2}{R^2}\dot{\phi}^2 + \frac{1}{2}J_\psi\dot{\psi}^2 + \frac{1}{2}J_\phi\dot{\phi}^2 + n^2 J_m \dot{\theta}^2 + \frac{1}{4}\frac{n^2 J_m W^2}{R}\dot{\phi}^2 + n^2 J_m \dot{\psi}^2 - 2n^2 J_m \dot{\theta} \dot{\psi} - 2mgR - MgR - LMg \cos \psi \quad (9)$$

라그랑지안 함수 L 을 이용하여 일반화 힘(generalized force)을 라그랑지 방정식으로 식(10)~(12)과 같이 정의한다.

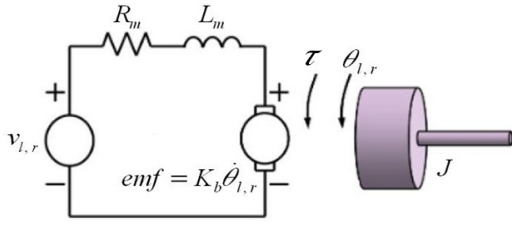


그림 2. DC 모터의 모델 도식도
Fig. 2. Diagram of a DC motor model.

$$\begin{aligned} & [2mR^2 + MR^2 + 2J_w + 2n^2J_m] \ddot{\theta} + \\ & (MRL \cos \psi - 2n^2J_m) \ddot{\psi} - MRL \dot{\psi}^2 \sin \psi = F_\theta \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & (MRL \cos \psi - 2n^2J_m) \ddot{\theta} + (ML^2 + J_\psi + 2n^2J_m) \ddot{\psi} \\ & - ML^2 \dot{\phi}^2 \sin \psi \cos \psi - MLg \sin \psi = F_\psi \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \left[\frac{1}{2} m W^2 + J_\phi + \frac{W^2}{2R^2} (J_w + n^2J_m) + ML^2 \sin^2 \psi \right] \ddot{\phi} \\ & + 2ML^2 \dot{\psi} \dot{\phi} \sin \psi \cos \psi = F_\phi \end{aligned} \quad (12)$$

DC모터는 전압으로 제어하기 때문에, DC모터의 특성 방정식을 전류 $i_{l,r}$ 에 대해 정리할 필요가 있다. DC모터를 간단히 표현하기 위해 그림 2와 같은 등가회로를 사용하였다.

DC 모터의 내부저항 R_m 과 권선코일 L_m 이 직렬로 연결되어 전류가 흐름에 따라 회전자가 회전하고, 모터 내부에 유도되는 역기전력(emf)으로 이루어진 회로로 모델링하여 전류에 대해 정리하면 다음과 같은 식(13)을 얻을 수 있다. 여기서 K_b 는 역기전력 상수이다.

$$i_{l,r} = \frac{v_{l,r} + K_b(\dot{\psi} - \dot{\theta}_{l,r})}{R_m} \quad (13)$$

다음 앞에서 구한 일반화된 힘을 전압에 대한 관계식으로 정리한 식과 라그랑지역학으로 구한 운동방정식을 연립하면 식 (14)~(17)과 같은 상태방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_1 &= [\theta \ \psi \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T \\ x_2 &= [\phi \ \dot{\phi}]^T \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} u &= [u_1 \ u_2]^T \\ \dot{x}_1(t) &= A_1 x_1(t) + B_1 u(t) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\dot{x}_2(t) = A_2 x_2(t) + B_2 u(t) \quad (16)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & A_1(3,2) & A_1(3,3) & A_1(3,4) \\ 0 & A_1(4,2) & A_1(4,3) & A_1(4,4) \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ B_1(3) & B_1(3) \\ B_1(4) & B_1(4) \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{K} \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{K}{J} & \frac{K}{J} \end{bmatrix}$$

상태방정식에 존재하는 행렬식의 행렬값을 정리하면 식(18)과 같다.

$$\begin{aligned} A_1(3,2) &= -MgLE(1,2)/\det(E) \\ A_1(4,2) &= MgLE(1,1)/\det(E) \\ A_1(3,3) &= -[(\beta + f_w)E(2,2) + 2\beta E(1,2)]/\det(E) \\ A_1(4,3) &= -[(\beta + f_w)E(1,2) + 2\beta E(1,1)]/\det(E) \\ A_1(3,4) &= \beta(E(2,2) + 2E(1,2))/\det(E) \\ A_1(4,4) &= -\beta(E(1,2) + 2E(1,1))/\det(E) \\ B_1(3) &= \alpha(E(2,2)/2 + E(1,2))/\det(E) \\ B_1(4) &= -\alpha(E(1,2)/2 + E(1,1))/\det(E) \\ \det(E) &= E(1,1)E(2,2) - (E(1,2))^2 \end{aligned} \quad (18)$$

III. 최적 LQR 제어기 설계

본 연구에서는 밸런싱 로봇의 자세를 정확히 제어하는 것을 목적에 두고 제어기를 설계하였다. LQR 제어기는 시스템의 상태방정식(state equation)을 만족하고 가중된 상태변수의 제곱과 가중된 제어입력 신호의 제곱의 합으로 표현한 평가함수를 최소화하는 제어방법으로 식(19)와 같이 정의한다.

$$J = \int_0^\infty [x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)] dt \quad (19)$$

식(19)의 $\int [x^T(t)Qx(t)]dt$ 항은 평형상태에서 벗어난 상태 $x(t)$ 의 궤적에 가중치를 부가하고 있다. 이 가중치는 2차식의 형태로 주어지므로 오차가 클수록 더 많은 가중치를 부여한다. 또한 $\{x^T(t)Qx(t)\}$ 항은 시간적으로 적분하고 있기 때문에 수렴속도가 늦을수록 부가되는 가중치가 커지게 된다.

두 번째 적분 항 $\int [u^T(t)Ru(t)]dt$ 항이 평가함수 J 에 포함되어 있는 이유는 입력의 크기를 적절하게 유지하기 위함이다. 이와 같이 평가함수 J 값을 최소로 하는 것은 비교적 작은 크기의 입력으로 가능하면 빠르게 영으로 수렴시키고자 하는 두 개의 상반되는 요구에 대한 타협으로 볼 수 있다. 이러한 상반된 요구를 만족시키는 최적 제어입력 $u^*(t)$ 와 평가 함수 J 값을 최소로 하는 피드백 이득 행렬 K 는 식(20)~(21)과 같은 상태 피드백으로 주어진다.

$$u^*(t) = -Kx(t) \quad (20)$$

$$K = R^{-1}B^TP \quad (21)$$

최적 제어이론에 따르면 제어법칙은 유일하게 존재하고 식(22)와 같이 리카티 방정식(riccati equation)의 유일한 해로 표현된다.

$$A^TP + PA - PBR^{-1}B^TP + Q = 0 \quad (22)$$

그림 3은 일반적인 밸런싱 로봇의 LQR 제어시스템이다. LQR 제어를 이용한 시스템 구성은 PID 제어기와 마찬가지로 3개의 초기 입력값인 바퀴 회전각, 로봇 몸체 기울기각, 조향각이 작용되어 LQR 제어기에 의해 좌우모터의 입력을 결정하고 상태변수를 피드백 받는다.

본 논문에서는 최적 LQR 제어기법을 사용하고자 3자유도 운동방정식을 기반으로 밸런싱 로봇의 동역학을 해석하였다. 동역학적 모델에서 보면 수직적으로 밸런싱 로봇의 기울기를 유지하기 위한 바퀴 회전각 θ , 기울기 각 ψ 와 조향을 유지하기 위한 조향각 ϕ 가 서로

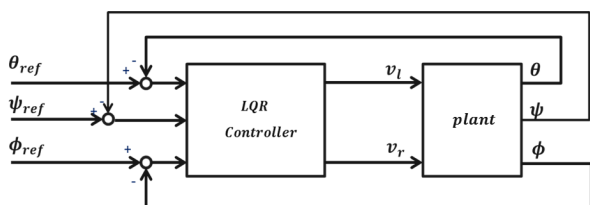


그림 3. MIMO 제어기를 적용한 LQR 제어시스템
Fig. 3. LQR system applying MIMO controller.

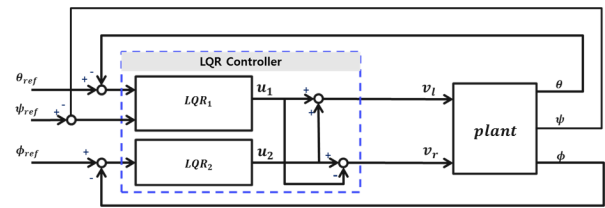


그림 4. 제안한 두 개 구조의 LQR 제어시스템
Fig. 4. The proposed two LQR control system.

독립이 되어 있어 영향을 받지 않는 것을 확인하였다. 따라서 기울기와 조향을 나누어 두개 LQR 제어기 구조를 갖는 시스템을 제안하였다. 그림 4는 본 논문에서 제안한 밸런싱 로봇의 LQR 제어시스템이다.

본 논문에서 제안한 제어기의 성능을 검증하기 위하여 이와 구조적으로 같은 시스템인 PID 제어시스템을 설계하여 두 제어기를 비교하고 확인하는 작업을 수행하였다.

IV. 시뮬레이션

3장에서 제시한 내용을 고려하여 Matlab에서 시뮬레이션하기 위해 LQR 제어시스템을 그림 5와 같이 설계하였다. LQR 제어기 최적인 피드백 이득행렬을 찾는 방법은 초기 기울기 $\psi_{ref} = 20^\circ$ 와 초기 조향 $\phi_{ref} = 20^\circ$ 을 설정한 상태에서 영점에 수렴하기까지 가중치 Q와 R을 튜닝하여 각각 기울기, 조향의 최적 피드백 이득행렬 K_1, K_2 를 찾는 시뮬레이션을 수행하였다.

LQR 제어기에서 최적피드백 이득행렬을 구하기 위하여 상태방정식의 행렬식으로부터 식(23)을 얻을 수 있다.

$$x_1 = [\theta \ \psi \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$$

$$x_2 = [\phi \ \dot{\phi}]^T$$

$$u = [u_1 \ u_2]^T$$

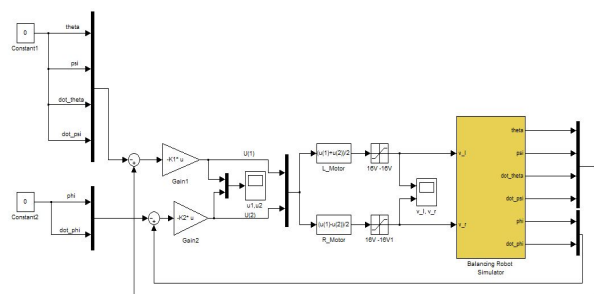


그림 5. LQR 제어기를 이용한 시스템 설계
Fig. 5. System design using LQR controller.

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -28.6563 & -3.5737 & 1.4371 \\ 0 & 84.0206 & 2.6182 & -1.9309 \end{bmatrix} \\
 B_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 10.1921 & 10.1921 \\ -13.6942 & -13.6942 \end{bmatrix} \\
 A_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1.5367 \end{bmatrix} \\
 B_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0.3298 & 0.3298 \end{bmatrix} \tag{23}
 \end{aligned}$$

다음 최적 LQR 제어기에 적용할 가중행렬 Q와 R을 설정하고 Matlab상의 LQR 툴박스를 사용하여 최적 피드백 이득행렬인 K_1, K_2 를 구하였다.

$$K = LQR(Q, R, A, B) \tag{24}$$

본 절에서는 제안한 LQR 제어기의 성능과 우수성을 검증하기 위하여 기울기, 조향, 모터 출력, 바퀴 회전각에 대하여 PID 제어기와 비교하여 확인하였다. LQR 제어기의 가중치 설정은 여러 번의 실험적이고 경험적인 튜닝방식을 사용하였다. 이 중 R 값이 클수록 시스템의 안정성에 더 좋은 영향을 미치는 반면 응답시간이 더 길어진다. 밸런싱 로봇은 빠른 응답속도를 요구하는 특성 때문에 R값은 제일 작은 값 1로 두고 Q값만 조절하여 기울기와 조향의 최적피드백 이득행렬을 구하였다.

LQR 제어기의 게인값 설정은 밸런싱 로봇의 반응속도를 고려하여 기울기와 조향에서의 Q값을 각각 식(25)와같이 설정하였다.

$$\begin{aligned}
 Q_\theta &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 Q_\psi &= \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{25}
 \end{aligned}$$

LQR 제어기와 PID 제어기의 기울기 값을 비교해보면, 그림 6에서와 같이 LQR 제어기의 오버슈트는

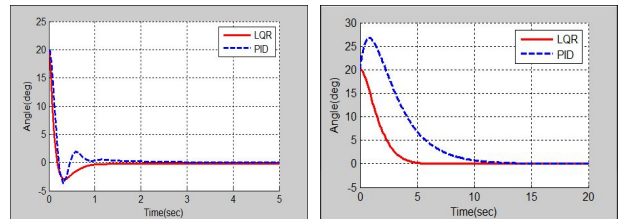


그림 6. 제어기법에 따른 기울기(왼쪽),조향(오른쪽)비교
Fig. 6. Comparison of tilt(left), steering(right) for control method.

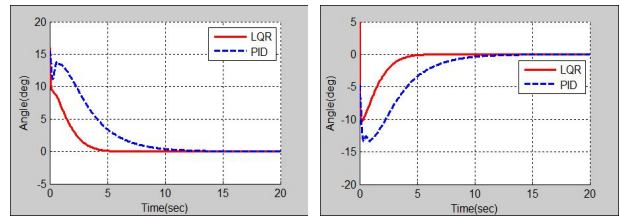


그림 7. 제어기법에 따른 왼쪽/오른쪽 모터 출력 비교
Fig. 7. Comparison of left/right motor output for control method.

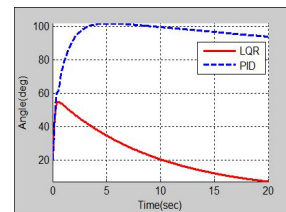


그림 8. 제어기법에 따른 바퀴 회전각 비교
Fig. 8. Comparison of wheel's rotation angle for control method.

0.17% 향상되고, 응답시간은 0.8초 향상됨을 알 수 있고, 조향값을 비교해보면, LQR 제어기의 오버슈트는 2.1% 향상되고, 응답시간은 6초 향상됨을 알 수 있다. 모터출력을 비교해보면, 그림 7에서와 같이 LQR 제어기의 안정성이 PID 제어기보다 안정적이라는 것을 확인할 수 있다. 또한 바퀴의 회전각을 비교해보면, 그림 8에서와 같이 LQR 제어기가 다시 원점으로 복귀하는 특성을 확인할 수 있다.

V. 실험

본 절에서는 IV장에서 구현한 제어기로 밸런싱 로봇 제어를 수행하여 LQR, PID 제어기의 성능을 비교, 평가 하였다.

실험방법은 밸런싱 로봇의 한쪽 바퀴에 순차적으로 정, 역의 인위적인 힘을 가하여 로봇의 몸체 기울기 $\psi = 10^\circ$ 와 조향 $\phi = 15^\circ$ 을 동시에 기울여줌으로써 나

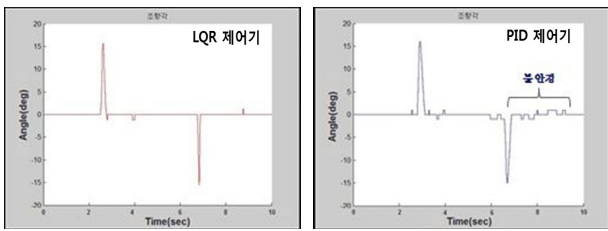


그림 9. 제어기법에 따른 조향각의 비교결과
Fig. 9. Comparison of steering angle for control method.

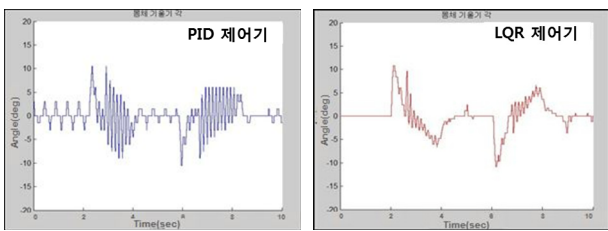


그림 10. 제어기법에 따른 기울기 값의 비교결과
Fig. 10. Comparison of rotation angle for control method.

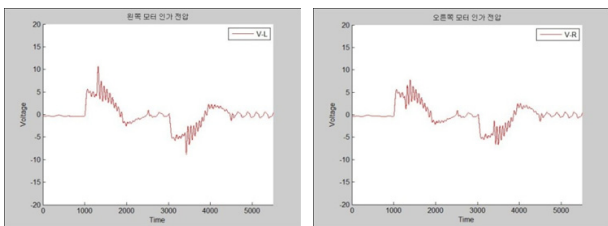


그림 11. LQR 제어기를 사용한 좌우 모터출력
Fig. 11. Left/right motor output using LQR controller.

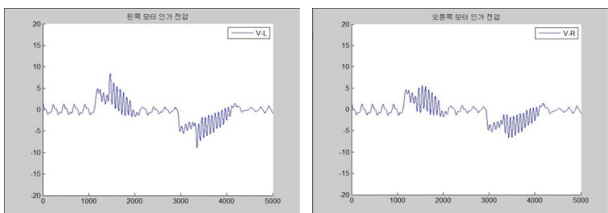


그림 12. PID 제어기를 사용한 좌우 모터출력
Fig. 12. Left/right motor output using PID controller.

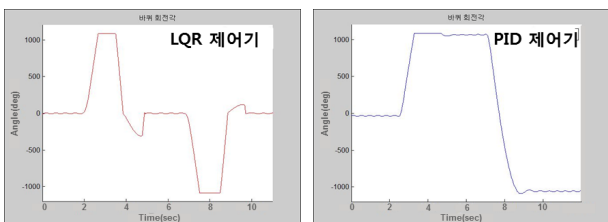


그림 13. 제어기법에 따른 바퀴 회전각 비교결과
Fig. 13. Comparison of wheel's rotation angle for control method.

타나는 두 제어기의 자세 및 조향 제어의 특성을 관찰하였다. 본 실험은 인위적인 요소가 들어가기에 여러 번의 실험을 수행한 결과 값들의 평균값을 사용하여 비

교하였다. 제어기법에 따른 조향각의 비교실험은 그림 9와 같다.

제어기법에 따른 조향각의 비교에서 LQR 제어기로 제어할 경우 상대적으로 안정적인 반면 PID 제어기로 제어하면 불안정한 구역에서 떨림 현상이 존재하는 것을 확인하였다. 이로부터 LQR 제어기의 안정성이 PID 제어기보다 우수함을 확인하였다. 제어기법에 따른 기울기 값의 비교실험은 그림 10과 같다.

제어기법에 따른 기울기 값의 비교에서 정지 상태에서는 LQR 제어기의 안정성이 더 우수함을 확인하였고, 한쪽 바퀴에 힘을 가하면 두 제어기 모두 진동이 발생하는 것을 확인하였다. 진동은 외란에 대한 진동으로 볼 수 있고 이러한 외란을 완화시키는 능력이 LQR 제어기가 더 우수한 것을 확인하였다. 따라서 기울기 값의 비교에서는 LQR 제어기의 안정성, 강인성이 PID 제어기보다 우수함을 확인하였다. 제어기법에 따른 좌우 모터의 출력은 그림 11, 12와 같다.

제어기법에 의한 좌우 모터 출력은 주로 기울기 값의 영향을 받아 LQR 제어기의 안정성, 강인성이 PID 제어기보다 우수함을 확인하였다. 제어기법에 따른 바퀴의 회전각도의 비교실험은 그림 13과 같다.

제어기법에 따른 바퀴 회전각 비교결과는 모의실험에서의 결과와 같이 LQR 제어기의 특성상 출발점으로 다시 복귀하는 현상을 확인하였다.

VI. 결 론

본 논문에서는 밸런싱 로봇의 동역학적 모델의 해석을 통해 기울기와 조향이 수식적으로 서로 독립이 되어 있어 영향을 받지 않는다는 것을 검증하였다. 이에 따라 두 개의 LQR 제어기가 밸런싱 로봇의 기울기와 조향을 각각 제어하는 시스템을 제안하였고, 이러한 시스템의 성능을 검증하기 위하여 모의실험과 실험을 수행하여 기존의 PID 제어기 보다 강인성 및 안정성이 우수함을 검증하였다.

본 논문에서 제안한 제어시스템이 다중 상태변수의 시스템을 제어하면서도 빠른 정정시간을 가지며, PID 제어기보다 약 1.5배의 성능 향상이 이루어지는 것을 확인하였다. 또한 기울기와 조향을 각각 제어할 수 있으므로, 로봇의 동작환경에 따라 여러 가지 특성을 갖는 게인값을 독립적으로 튜닝할 수 있다는 장점이 있다.

REFERENCES

- [1] Yun-Su Ha, Shin'ichi Yuta, "Trajectory tracking control for navigation of the inverse pendulum type self-contained mobile robot," Robotics and Autonomous Systems Vol. 17, pp. 65-80, 1996.
- [2] YeonHoon Kim, "Dynamic Analysis of a Non-holonomic Two-Wheeled Inverted Pendulum Robot," Journal of Intelligent and Robotic Systems Vol. 44, pp. 25 - 46, 2005.
- [3] YoriHisa Yamamoto, "NXTway-GS Model-Based Design Control of self-Balancing two-wheeled robot built with LEGO Mindstorms NXT," First edition, Feb 29, 2008.
- [4] Hamid Reza Karimi, "LQG Control Design for Balancing an Inverted Pendulum Mobile Robot," Intelligent Control and Automation, Vol. 2, pp. 160-166, 2011.
- [5] Felix Grasser, "JEO: A Mobile, Inverted Pendulum," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 1, Feb 2002.
- [6] Kanchit Pawanant1, "Design LQR Controller for the Balancing robot," The Eighth PSU Engineering Conference pp. 22-23, April 2010.
- [7] E.poulin and A. Pomerleau, "PID tuning for integrating and unstable processes," IEE Proc. Control Theory Appl. 143(5), pp. 429-435, 1996.
- [8] A. Visioli, "Optimal Tuning of PID Controllers for Integrating and Unstable Processes," IEE Proc. Control Theory Appl. 148(2), pp. 180-184, 2001.

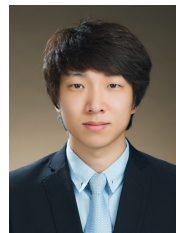
저 자 소 개



여 희 주(정희원)

1988년 한양대학교 전자공학과
공학사1990년 한양대학교 전자공학과
공학석사1997년 한양대학교 전자공학과
공학박사

1997년~현재 대전대학교 전자공학과 교수
 <주관심분야 : 머시비전, 지능제어, 센서기반 로
 봇제어, 배관로봇, 다중 로봇시스템의 협조제어>



박 훈(학생회원)

2013년 대전대학교 전자공학과
석사졸업

2014년 노아닉스 연구원

<주관심분야 : 임베디드시스템 기
 반 모터제어, 최적제어, 로봇제
 어>