

자전거로봇의 균형제어 및 주행제어를 위한 LQR 제어기 설계

LQR Controller Design for Balancing and Driving Control of a Bicycle Robot

강석원, 박경일, 이장명*
(Seok-Won Kang¹, Kyung-Il Park², and Jangmyung Lee^{1,2,*})

¹Department of Interdisciplinary Program in Robotics, Pusan National University

²School of Electronic Engineering, Pusan National University

Abstract: This paper proposes a balancing control and driving control of a bicycle robot based on dynamic modeling of the bicycle robot, which has been derived using the Lagrange equations. For the balancing control of the bicycle robot, a reaction wheel pendulum method has been adopted in this research. By using the dynamics equations of the bicycle robot, an LQR controller has been designed for a balancing and driving control of a bicycle robot. The performance of the balance control is verified experimentally before the driving control, which shows a stable posture within one degree vibrations. To show the dynamic characteristics of the bicycle robot during driving, a trapezoidal velocity trajectory is selected as the references. Through simulations and real experiments, the effectiveness of the proposed algorithm has been demonstrated.

Keywords: bicycle robot, LQR control, dynamics, reaction wheel pendulum, balancing control

I. 서론

로봇은 단순한 작업을 하는 산업분야뿐만 아니라, 가정에서의 서비스로봇, 군사목적으로 쓰이는 로봇, 우주탐사에 쓰이는 로봇까지 다양한 분야에서 연구되고 있다. 그 중 이동로봇의 연구는 국내외에서 활발하게 연구되고 있다. 4륜, 6륜 등 바퀴가 달린 로봇 중 본 논문에서는 2륜 구동의 자전거로봇에 대해 다룬다.

전 후방에 바퀴가 달려 이동하는 2륜 구동 로봇을 일명 자전거 로봇이라고 부른다. 자전거 로봇은 다른 4륜 이상의 로봇들의 비해 부피가 작고, 전방의 바퀴의 회전을 통한 곡선주행에 용이하다.

최근 이러한 자전거 로봇의 안정된 자세와 주행을 개선하기 위하여 많은 제어방법들이 제시되었다[1-6]. 자전거 로봇은 안정된 자세를 위한 Roll 제어가 필요하다. 자전거 로봇의 균형을 잡기 위한 방법으로는 Front Wheel의 각도를 이용하여 제어하는 방법[7-13], 무게중심을 이동시켜 제어하는 방법[14,15], Inverted Pendulum을 이용하여 제어하는 방법[16-19]과 Reaction Wheel Pendulum과 이외의 다양한 방법이 있다[19,20].

본 논문에서 사용하는 자전거로봇의 Roll 제어는 Reaction Wheel Pendulum을 사용한다. Reaction Wheel Pendulum은 로봇이 기울어지는 방향으로 Disk를 회전시켜 순간적인 가속을

발생시키고, Disk의 관성과 회전의 반작용으로 로봇 몸체가 회전방향의 반대방향으로 기울어지게 되는 힘을 이용한다. 자전거로봇의 Roll 제어에 사용된 제어기의 입력은 로봇몸체의 각도이다. 로봇 몸체의 각도는 IMU 센서를 통하여 구해진다. 자전거로봇은 Disk 회전을 위한 DC 모터와 주행을 위한 DC 모터가 사용되었다.

Reaction Wheel Pendulum을 이용한 자전거 로봇은 동역학 방정식을 구하는 과정이 복잡하였고, 이로 인해 제어기 설계 과정이 까다로운 문제로 이전의 연구에서는 비 모델링 기반의 PID제어기를 이용하여 제어하였다[21].

따라서 본 논문에서는 Lagrange 방정식을 통하여 Reaction Wheel Pendulum 방식의 자전거로봇을 해석한 동역학 방정식을 제시하고, 제시한 동역학 방정식을 이용한 모델링 기반 LQR제어기를 통하여 자전거 로봇의 균형제어 및 주행제어 가능성을 제시한다.

본 논문은 II 장에서 Reaction Wheel Pendulum을 이용한 자전거 로봇의 동역학 방정식을 구하는 과정에 대하여 설명한다. III 장에서는 로봇을 제어하기 위한 제어기에 대하여 설명한다. IV 장에서는 설계된 제어기를 통한 자전거로봇의 제어 성능과 주행성능에 대하여 시뮬레이션 및 실험으로 설명하고 V 장에서 결론을 맺도록 구성된다.

II. 동역학

본 장에서는 자전거 로봇의 동역학 모델을 제시한다. 동역학 모델은 Matlab Simulink 를 이용하여 시뮬레이션 하였으며, 설계된 제어기와 비교 및 시스템 분석을 위해 사용하였다. 자전거 로봇의 동역학 모델을 위해 Lagrange Equation을 사용하였으며, 자전거 로봇은 Reaction Wheel Pendulum 형태로 가정하여 모델링 하였다. 모델링에 사용된 실제 로봇의 파라미터 값은 표 1에 나타내었다.

* Corresponding Author

Manuscript received November 19, 2013 / revised December 26, 2013 / accepted March 4, 2014

강석원: 부산대학교 로봇관련협동과정

박경일, 이장명: 부산대학교 전자전기공학부

(sucwon1696@pusan.ac.kr/La2zing5@pusan.ac.kr/jmlee@pusan.ac.kr)

※ 본 연구는 산업통상자원부 및 정보통신산업진흥원 융복합형 로봇 전문인력양성 특수환경 Navigation/Localization 로봇기술연구센터 지원 사업의 연구결과로 수행되었음 (H1502-13-1001).

※ 이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입 (NRF-2013R1A1A2021174).

표 1. 자전거 로봇의 파라미터.

Table 1. Parameter of the bicycle robot.

기호	파라미터	수치
g	중력가속도	$9.8[m/s^2]$
m_B	로봇 몸체 질량	$1.935[kg]$
m_W	디스크 질량	$0.77[kg]$
r_W	디스크 반지름	$0.060[m]$
l_1	바닥에서 몸체 무게중심까지 거리	$0.0544[m]$
l_2	바닥에서 디스크 무게중심까지 거리	$0.0995[m]$
J_B	로봇 몸체 관성(디스크 제외)	$0.0076[kg \cdot m^2]$
J_W	디스크 관성	$0.0014[kg \cdot m^2]$
r_m	모터 코일 저항	$0.68[\Omega]$
k_b	모터 역기전력 상수	$0.062[V/s/rad]$
k_t	모터 토크 상수	$0.039[Nm/A]$
f_m	모터 마찰 계수	$0.00041[Nms/rad]$
J_m	모터 전기자의 회전 관성	$0.0001[kg \cdot m^2]$

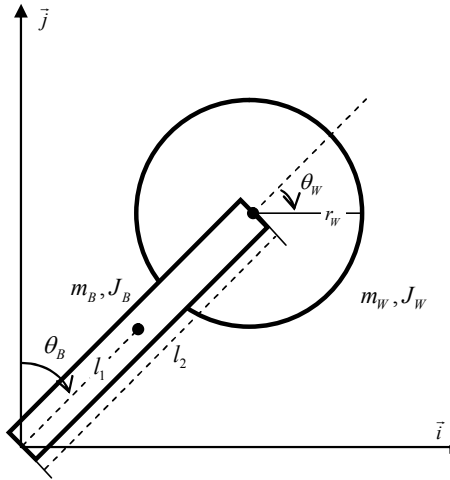


그림 1. 자전거 로봇의 모델.

Fig. 1. Model of the bicycle robot.

로봇의 좌표축 설정은 그림 1과 같다. l_1 은 Disk를 제외한 로봇몸체의 무게중심까지 길이, l_2 는 바닥에서 Disk 중심까지의 거리이다. m 은 질량을 의미하며 J 는 각각의 관성모멘트를 의미한다. θ_B 는 로봇 몸체의 각도이며 θ_W 은 Disk의 회전 각을 의미한다. J_m 은 모터 전기자의 회전관성이며, n 은 모터의 기어비다. 또한 모터역기전력 상수와 모터 토크 상수는 실험을 통하여 구한 것이다.

자전거 로봇을 구성하는 디스크와 몸체 각각의 위치벡터는 다음과 같다. 여기서 \vec{r}_1 은 로봇 몸체의 무게중심까지의 위치벡터이며, \vec{r}_2 는 Disk까지의 위치벡터이다.

$$\vec{r}_1 = l_1 \sin \theta_B \vec{i} + l_1 \cos \theta_B \vec{j} \quad (1)$$

$$\vec{r}_2 = l_2 \sin \theta_B \vec{i} + l_2 \cos \theta_B \vec{j} \quad (2)$$

위치벡터를 이용한 전체 운동 에너지 T 는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} m_B (\dot{\vec{r}}_1 \cdot \dot{\vec{r}}_1) + \frac{1}{2} m_W (\dot{\vec{r}}_2 \cdot \dot{\vec{r}}_2) + \frac{1}{2} J_B \dot{\theta}_B^2 + \frac{1}{2} J_W (\dot{\theta}_B + \dot{\theta}_W)^2 \quad (3)$$

이때 $\dot{\vec{r}}_i = \frac{d\vec{r}_i}{dt}$ 이며, 위치에너지 V 는 다음 식 (4)와 같다.

$$V = g l_1 m_B \cos \theta_B + g l_2 m_W \cos \theta_B \quad (4)$$

이를 이용해 라그랑지안(Lagrangian) L 을 구하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} L &= T - V \\ &= \frac{1}{2} \{-2g(l_1 m_B + l_2 m_W) \cos \theta_B \\ &\quad + (J_B + J_W + l_1^2 m_B + l_2^2 m_W) \dot{\theta}_B^2 \\ &\quad + 2J_W \dot{\theta}_B \dot{\theta}_W + J_W \dot{\theta}_W^2\} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)를 다음과 같은 라그랑지(Lagrange) 방정식

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \tau_q \quad \text{where, } \mathbf{q} = [\theta_B \ \theta_W]^T \quad (6)$$

에 대입하여 정리하면, 다음과 같은 Roll 동역학을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} (J_B + J_W + l_1^2 m_B + l_2^2 m_W) \ddot{\theta}_B \\ + J_W \ddot{\theta}_W - g(l_1 m_B + l_2 m_W) \sin \theta_B = Fc, \end{aligned} \quad (7)$$

$$J_W (\ddot{\theta}_B + \ddot{\theta}_W) = \tau$$

여기서 τ 는 Disk에 부착된 모터에 의해 발생하는 토크다. 시뮬레이션을 위해 동역학 식을 각각 $\ddot{\theta}_B$ 와 $\ddot{\theta}_W$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\ddot{\theta}_B = \frac{g(l_1 m_B + l_2 m_W) \sin \theta_B - \tau}{J_B + l_1^2 m_B + l_2^2 m_W} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_W = \{-J_W - g J_W (l_1 m_B + l_2 m_W) \sin \theta_B + (J_B + J_W \\ + l_1^2 m_B + l_2^2 m_W) \tau\} / J_W (J_B + l_1^2 m_B + l_2^2 m_W) \end{aligned} \quad (9)$$

이때, 외력으로 작용하는 모터토크 τ 는 전류에 비례하여 발생하며, 다음 식 (10)과 같다.

$$\tau = \frac{k_b \theta_W + V_m}{r_m} k_t - f_m \dot{\theta}_W \quad (10)$$

k_b 는 모터의 역기전력 상수를 의미하며, v_m 은 모터에 입력되는 전압, k_t 는 토크상수, r_m 은 모터 코일의 저항을 의미한다. 또한 f_m 은 모터가 회전할 때 발생하는 마찰계수이며 모터의 회전속도에 비례한다.

III. 제어기

이 부분은 그림 2는 Controller에서 Roll 축에 구성된 LQR 제어기의 구성을 나타내는 block diagram이다. Block diagram에 표시된 이득 K는 앞장에서 도출된 동역학을 이용하여 Matlab에서 제공하는 LQR toolbox로 얻어졌다.

시스템 행렬은 아래와 같고,

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (11)$$

시스템 상태는 $x = [\theta_B \ \dot{\theta}_B \ \theta_W \ \dot{\theta}_W]$ 로 설정하였다. 여기서 u 는 전압을 뜻하고, 식 (7)을 식 (10)을 이용해 변환하여 얻어지는

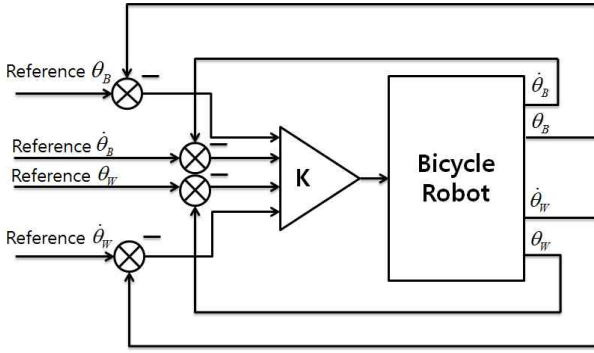


그림 2. Roll 축 제어기의 block diagram.

Fig. 2. Block diagram of roll controller.

전압과의 관계식에서 얻어진다. 전압과의 관계식을 정리하여 표현하면,

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_B = & [\alpha J_W V_{in} + g J_W m_B \sin \theta_B \\ & + g J_W l_2 m_W \sin \theta_B + g J_m l_1 m_B n^2 \sin \theta_B \\ & + g J_m l_2 m_W n^2 \sin \theta_B - \beta J_W \dot{\theta}_B \\ & + \beta J_W \dot{\theta}_W / J_m (l_1^2 m_B + l_2^2 m_W) n^2 \\ & + \{J_B (J_W + J_m n^2) + J_W (l_1^2 m_B + l_2^2 m_W + J_m n^2)\}] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_W = & \{\alpha J_B V_{in} + \alpha l_1^2 m_B v \\ & + \alpha l_2^2 m_W V_{in} + g J_m l_1 m_B n^2 \sin \theta_B \\ & + g J_m l_2 m_W n^2 \sin \theta_B + \beta (J_B + l_1^2 m_B + l_2^2 m_W) \dot{\theta}_B \\ & - \beta (J_B + l_1^2 m_B + l_2^2 m_W) \dot{\theta}_W\} / J_m (l_1^2 m_B + l_2^2 m_W) n^2 \\ & + \{J_B (J_W + J_m n^2) + J_W (l_1^2 m_B + l_2^2 m_W + J_m n^2)\} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= (n * K_t) / R_m \\ \beta &= (\alpha * K_b) + f_m \end{aligned} \quad (14)$$

이다.

u 는 V_{in} 을 나타낸다. 위의 식을 정리하여 시스템 행렬로 표현 할 수 있다.

간단히 나타내면

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_B = & (g J_m l_1 m_B \sin \theta_B + g J_W l_2 m_W \sin \theta_B \\ & + g J_m l_1 m_B n^2 \sin \theta_B + g J_m l_2 m_W n^2 \sin \theta_B \\ & - \beta J_W \dot{\theta}_B + \beta J_W \dot{\theta}_W - \alpha J_W V_{in}) \\ & / \{J_m (l_1^2 m_B + l_2^2 m_W) n^2 + J_B (J_W + J_m n^2) \\ & + J_W (l_1^2 m_B + l_2^2 m_W + J_m n^2)\} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_W = & \{g J_m l_1 m_B n^2 \sin \theta_B + g J_m l_2 m_W n^2 \sin \theta_B \\ & + \beta (J_W + l_1^2 m_B + l_2^2 m_W) \dot{\theta}_B - \beta (J_B + l_1^2 m_B \\ & + l_2^2 m_W) \dot{\theta}_W + \alpha J_B V_{in} + \alpha l_1^2 m_B V_{in} \\ & + \alpha l_2^2 m_W V_{in}\} / (J_m (l_1^2 m_B + l_2^2 m_W) n^2 \\ & + \{J_B (J_W + J_m n^2) + J_W (l_1^2 m_B + l_2^2 m_W + J_m n^2)\}) \end{aligned} \quad (16)$$

이다. u 는 V_{in} 을 나타낸다. 위의 식을 $\ddot{\theta}_B$, $\ddot{\theta}_W$ 에 관한 θ_B , $\dot{\theta}_B$, θ_W , $\dot{\theta}_W$ 로 정리하여 표 1의 값을 대입하게 되면, 다음과 시스템 행렬로 표현할 수 있다. 식을 정리하는 데 있어 Mathematica tool를 이용하여 정리하였다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_B \\ \ddot{\theta}_B \\ \dot{\theta}_W \\ \ddot{\theta}_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & A_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ A_{41} & A_{42} & 0 & A_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_B \\ \dot{\theta}_B \\ \theta_W \\ \dot{\theta}_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_{21} \\ 0 \\ B_{41} \end{bmatrix} u$$

A는 4 X 4행렬이며, B는 4 X 1행렬로 구성되어 있다. 표 1에 나오는 값으로 대입하여 정리하면,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 15.46 & -0.18 & 0 & 0.18 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.047 & 5.84 & 0 & -5.84 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.25 \\ 0 \\ 8.26 \end{bmatrix}$$

이득 K를 구하기 위해서 가중치 행렬 R과 Q도 결정을 해야 한다. R값은 1이고, 가중치 행렬 Q는 다음과 같다.

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

위의 과정을 통해서 구해진 행렬들을 이용하면 이득 행렬 K는 다음과 같이 얻어진다.

$$K = [-668.9 \quad -167.8 \quad -2.2 \quad -3.4]$$

최종 입력 전압 u 는 $u = Kx$ 로 결정되고 x 는 시스템 행렬에서 설정된 상태와 동일하다.

IV. 시뮬레이션 & 실험

본 장에서는 시뮬레이션을 통하여 균형제어가 가능함을 보이고, 설계된 자전거로봇의 균형제어와 주행제어를 각각 실험을 통하여 성능을 확인한다. 모든 실험은 평평한 바닥을 기준으로 실험되었으며, 바닥의 미끄러움은 거의 없는 상태이다. 또한 배터리는 항상 11.1 V 이상 충전된 상태에서 실험하였다.

1. 시뮬레이션

동역학을 통해 구현된 시스템을 LQR 제어기 의한 시뮬레이션을 통해서 제어가능인지 확인한다.

그림 3은 자전거로봇의 몸체의 기울기를 나타낸 시뮬레이션이다. 그래프를 통하여 초기값이 5로 지정해주었을 때, -1도 정도로 감소하지만 1초안에 기준 값으로 수렴하는 것을 통해 제어가 가능함을 알 수 있다.

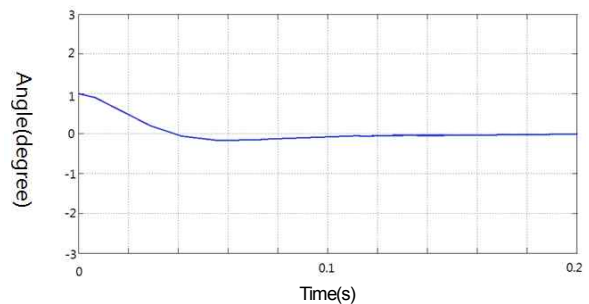


그림 3. Roll 축의 Body 각도 제어 시뮬레이션.

Fig. 3. Simulation of Body Angle (Roll axis).

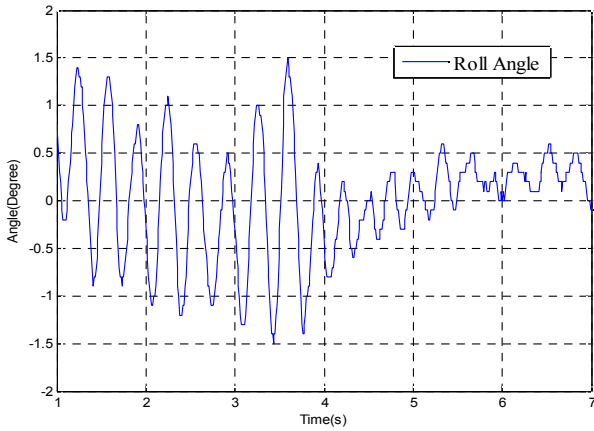


그림 4. Roll축 각도 데이터.
Fig. 4. Roll axis angle data.

2. 균형 제어 실험

자전거 로봇의 균형제어 할 때, Roll 각도 변화는 그림 4와 같다. 이때 로봇의 중심각도인 0도 값은 직접 설정해야 되므로 손으로 로봇의 균형을 잡았을 때의 값을 설정한다.

그림 4를 통해, 약 ±1도 내에서 각도 변화를 통해, 자전거 로봇이 균형을 유지하는 것을 알 수 있다. IMU 센서가 미세하게 값이 진동하기 때문에, 균형을 잡는 기준 값이 0도 이하로 미세하게 내려가고 올라가는 모습을 보인다.

3. 주행 제어 실험

자전거 로봇의 속도 제어 성능을 확인하기 위해 단위계단 함수 입력과 등가속, 등속, 등감속 운동을 실험하였다. 실험에 사용한 Rear Wheel 인코더의 분해능이 낮아 결과 데이터에 많은 노이즈 성분이 발생하게 된다. 이러한 노이즈를 제거하기 위해 결과 데이터에는 이동평균필터를 적용하였다. 다음 그림 5는 단위계단 입력에 대한 결과 데이터이다. 주행제어 시의 몸체의 각도는 그림 4와 거의 동일함을 보인다.

실선은 모터에 부착된 인코더의 속도 데이터에 이동평균 필터를 적용한 값이다. 로봇의 속도는 설계된 제어기에 의해 입력을 따라가는 것을 확인 할 수 있다. 이때 단위계단 입력에 대한 오차특성은 그림 6과 같다. 자전거 로봇은 단위계단 입력에 대해 오차가 약 0.5초 후에 최소화 되는 것을 확인할 수 있다. 이때 오차는 약 ±15 mm/s의 진동이 발생한다.

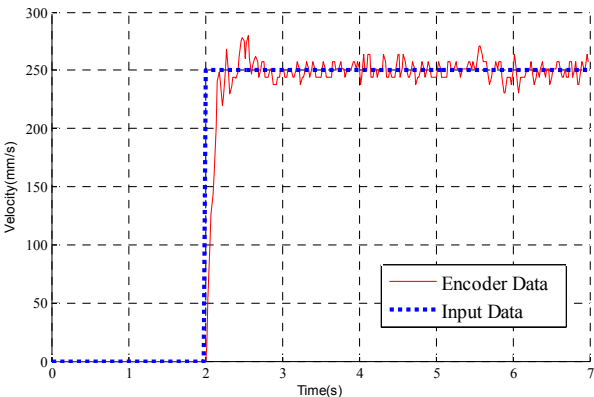


그림 5. 단위계단 입력 응답 특성.
Fig. 5. Characteristics of the step-function input.

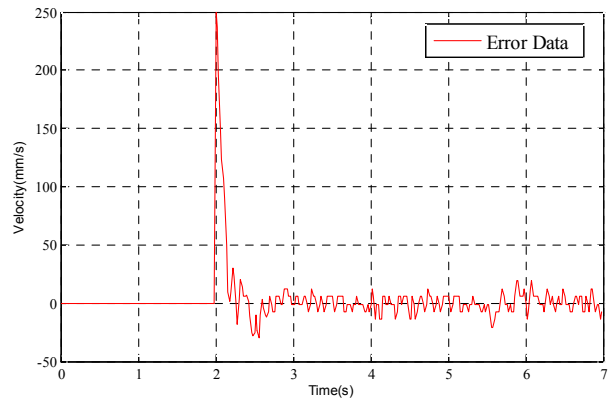


그림 6. 단위계단 입력 오차 데이터.
Fig. 6. Error data of the step-function input.

그림 7은 로봇의 등가속, 등속, 등감속 주행 실험 결과이다. 점선은 입력 데이터이고, 실선은 모터에 부착된 인코더의 속도 데이터에 이동평균필터를 적용한 값이다. 자전거 로봇이 입력에 따라 속도를 제어하는 것을 확인할 수 있다. 이때 속도 레직에 추종 따른 오차는 그림 8과 같다.

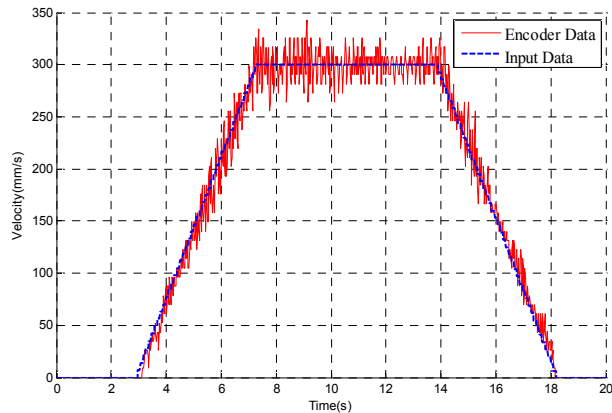


그림 7. 등가속-등속-등감속 운동특성.
Fig. 7. Motion characteristics of constant acceleration, velocity, and deceleration.

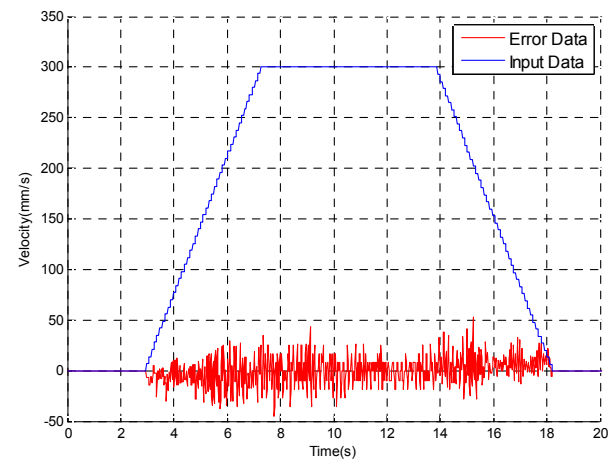


그림 8. 등가속-등속-등감속 운동에 따른 오차.
Fig. 8. Error data of constant acceleration, velocity, and deceleration.

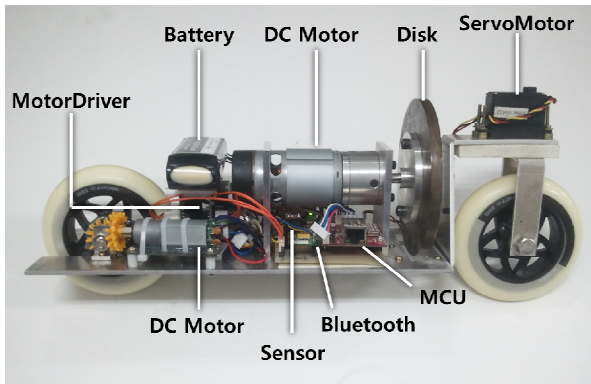


그림 9. 실제 자전거 로봇.

Fig. 9. Designed the bicycle robot.

표 2. 자전거로봇에 사용된 부품.

Table 2. Parts used in the bicycle robot.

	제조사	품명
Wheel	Looka Technics	Xaris Wheel 105mm
MCU	TI	LM3S8962
Servo Motor	Hitec	HSR-5995TG
Disk DC Motor	D&J	IG-42GM 01TYPE 1/4
Rear DC Motor	D&J	RA20GM 03TYPE 1/52
Motor Drive	NTREX	NT-DC20A
Roll Sensor	NTREX	NT-ARS V1
Yaw Sensor	E2BOX	EBIMU-9DOF
Bluetooth	COMFILE	ACODE-300
Battery	ANYRC	11.1V LiPo-Battery

등가속 구간에서는 약 20 mm/s에 근사한 정상상태 오차를 가지며, 등속구간에서는 약 ± 30 mm/s의 오차 진동을 확인할 수 있다. 등감속 구간에서 역시 약 20 mm/s 정도의 정상상태 오차를 가진다.

4. 하드웨어 구성

설계된 자전거로봇은 그림 9와 같다. 자전거 로봇은 크게 Roll 축 균형을 제어하기 위한 균형제어부와 주행을 제어하기 위한 주행제어부로 나누어진다. 각각 제어부는 Disk를 회전하기 위한 DC모터, 이동을 위한 DC모터가 사용되었다.

관성센서는 로봇몸체의 각도를 얻기 위해 로봇의 Roll 축을 따라 몸체의 중앙에 위치하게 된다. 로봇의 몸체에 부착된 NT-ARS 센서는 Roll 축 각도를 얻는데 사용하며, EBIMU 센서는 Yaw 축의 각도를 얻는데 사용한다. 회전 토크와 반작용을 발생시키기 위한 Disk는 Roll 축 중앙에 위치하며 무게는 770g 이다. 이를 포함한 로봇 전체의 무게는 2,705g 이며, Disk에 토크를 인가하는 DC모터의 무게는 630g이다. 로봇에 사용된 부품은 첨부된 표 2와 같다.

V. 결론

본 논문은 Reaction Wheel Pendulum 기반 자전거 로봇의 균형제어와 주행제어에 관해 본 연구를 위해 자체 제작된 자전거 로봇을 활용하여 연구하였다. 균형제어와 주행제어를 하기 위해 자전거 로봇의 동역학 방정식을 유도하여 모델링 하였다.

자전거 로봇의 균형 제어를 위한 Reaction Wheel Pendulum을 LQR 제어알고리즘으로 구동하였다. 시뮬레이션과 실험을 통해 설계된 LQR 제어기가 자전거로봇의 균형 제어에 적합함을 알 수 있었고, 균형제어를 바탕으로 직선 주행 시 속도제적 제어도 가능함을 확인하였다. 이를 통해서 본 연구에서 제안한 Reaction Wheel Pendulum 기반 자전거로봇의 동역학 방정식을 통한 모델 기반 제어기가 자전거로봇의 균형제어와 주행제어에 적합 함을 알 수 있었다.

REFERENCES

- [1] K.-T. Park, D.-H. Kim, G.-B. Jo, and H.-M. Kim, "Steering control of 5-DOF vehicle model based on 2-DOF bicycle model," *2011 ICROS Conference*, pp. 245-246, 2011.
- [2] Y. Li, X. Ren, and J. Liu, "A new fuzzy control and dynamic modeling of bicycle robot," *2012 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, vol. 2, 2012.
- [3] X. Meng, L. Guo, and Q. Liao, "Analysis of nonholonomic constraints about a variable structure bicycle robot," *2012 IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL)*, Aug. 2012.
- [4] A. Suebsomran, "Balancing control of bicycle robot," *2012 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, May 2012.
- [5] M. Kawaguchi and M. Yamakita, "Stabilizing of bike robot with variable configured balancer," *SICE Annual Conference 2011*, pp. 13-18, Sep. 2011.
- [6] J.-H. Yang, S.-Y. Lee, S.-Y. Kim, Y.-S. Lee, and O.-K. Kwon, "Optimal posture control for unmanned bicycle," *Journal of the Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 10, pp. 1006-1013, 2011.
- [7] T. Takei, M. Tsuruta, J. Okumura, T. Nakabayashi, and T. Tsubouchi, "Stabilized motion of a small sized bike robot only by steering control," *The 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 466-471, Mar. 2010.
- [8] Y. Huang, Q. Liao, S. Wei, and L. Guo, "Dynamic modeling of a bicycle robot with front-wheel drive based on kane's method," *Proc. of the 2010 IEEE International Conference on Information and Automation*, pp. 758-764, Jun. 2010.
- [9] Z. Yizhai, L. Jingliang, Y. Jingang, and S. Dezhen, "Balance control and analysis of stationary riderless motorcycles," *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3018-3023, May 2011.
- [10] S. C. Peters, E. Frazzoli, and K. Iagnemma, "Differential flatness of a front-steered vehicle with tire force control," *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 298-304, Sep. 2011.
- [11] J.-H. Yang, S.-Y. Lee, S.-Y. Kim, Y.-S. Lee, and O.-K. Kwon, "Linear controller design for circular motion of unmanned bicycle," *2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 893-897, Oct. 2011.
- [12] Y. Huang, Q. Liao, S. Wei, and L. Guo, "Balanced motions realization for a mechanical regulators free and front-wheel drive bicycle robot under zero forward speed," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, 317, May 2013.
- [13] S. Lee and W. Ham, "Self-stabilizing strategy in tracking control

of unmanned electric bicycle with mass balance,” *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2200-2205, 2002.

- [14] C.-L. Hwang, H.-M. Wu, and C.-L. Shih, “Hybrid under-actuated control for autonomous dynamic balance of a running electrical bicycle including motor dynamics and in the presence of huge uncertainty,” *Journal of Vibration and Control*, vol. 19, no. 1, pp. 56-74, 2013.
- [15] C.-H. Huang, W.-J. Wang, and C.-H. Chiu, “Design and implementation of fuzzy control on a two-wheel inverted pendulum,” *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 7, pp. 2988-3001, Jul. 2011.
- [16] H. Fukushima, M. Kakue, K. Kon, and F. Matsuno, “Transformation control to an inverted pendulum for a mobile robot with wheel-arms using partial linearization and polytopic model set,” *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 29, no. 3, Jun. 2013.
- [17] S.-H. Lee, “A derivation of the equilibrium point for a controller of a wheeled inverted pendulum with changing its center of gravity,” *Journal of the Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 5, pp. 496-501, 2012.
- [18] S.-W. Kang, C-I P, G.-H. B, and J.-M. Lee, “Balancing control of a ball robot based on an inverted pendulum,” *Journal of the Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 9, pp. 834-838, 2013.
- [19] D. Block, K. Åström, and M. Spong, “The reaction wheel pendulum,” *Synthesis Lectures on Control and Mechatronics*, Morgan & Claypool Publishers, Princeton, NJ, 2007.
- [20] K. N. Srinias and L. Behera, “Swing-up strategies for a reaction wheel pendulum,” *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 39, no. 12, pp. 1165-1177, 2008.
- [21] S.-I. Lee, I.-W. Lee, M.-S. Kim, H. He, and J.-M. Lee, “Balancing and driving control of a bicycle robot,” *Journal of the Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 6, pp. 532-539, 2012.



강석원

2012년 영남대학교 전자공학과 졸업.
2014년 부산대학교 대학원 로봇관련협동과정 석사과정 졸업. 관심분야는 로봇 벨런싱, 마이크로프로세서 응용, 제어 공학.



박경일

2014년 부산대학교 전자전기공학부 학사과정 졸업. 관심분야는 제어공학.



이장명

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업.
1982년 동 대학원 석사. 1990년 USC 공학박사. 1992년~현재 부산대학교 전자전기공학부 정교수. 관심분야는 지능로봇 시스템 설계 및 제어, 마이크로프로세서 응용, 센서융합, Navigation/Localization.