Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (2013) 19(9):834-838
http://dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2013.13.1903 ISSN:1976-5622 eISSN:2233-4335

역진자 기반 공 로봇의 균형제어

Balancing Control of a Ball Robot Based on an Inverted Pendulum

강 석 원, 박 찬 익, 변 규 호, 이 장 명*
(Seok-Won Kang[1], Chan-Ik Park[1], Gyu-Ho Byun[1], and Jang-Myung Lee[2])
[1]Department of Interdisciplinary Program in Robotics, Pusan National University
[2]School of Electronic Engineering, Pusan National University

Abstract: This paper proposes a new ball robot which has a four axis structure and four motors that directly actuate the ball to move or to maintain the balance of the robot. For the Balancing control, it is possible to use non-model-based controller to control simply without complex formula. All the gains of the controller are heuristically adjusted during the experiments. The tilt angle is measured by IMU sensors, which is used to generate the control input of the roll and pitch controller to make the tilt angle zero. The performance of the designed control system has been verified through the real experiments with the developed ball robot.

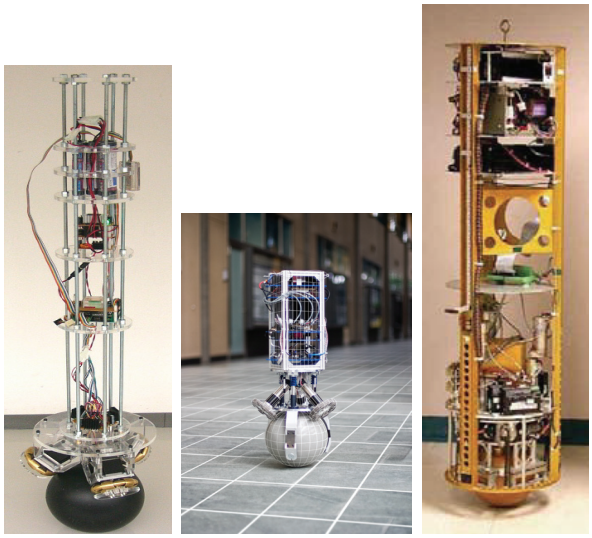
Keywords: ball robot, balancing control, PD control, inverted pendulum, dynamics

I. 서론

인간의 편리함을 위한 기술은 시대의 변화에 따라 점점 발전하고 있다. 이런 기술의 발전 속에 현재 가장 손꼽히는 분야는 단연 로봇 시스템이라 생각한다. 로봇시스템은 산업 현장에서 쓰이는 산업용 로봇을 비롯하여 사람의 실생활에 서비스를 제공하는 지능형 로봇 등 다양한 분야에서 주요한 역할을 하고 있다. 로봇의 여러 분야 중에서 이동로봇 관련 기술 분야는 현재 많은 연구개발이 진행되고 있다. 그 중 무인 주행로봇은 자율기법을 통해 사람이 접근할 수 없는 특수 환경으로의 이동, 감시 및 정찰 등에 다방면으로 활용 되고 있다. 이러한 무인 주행 시스템의 대부분은 4륜 및 6륜을 기반으로 개발되었고, 운영부분에 있어 에너지의 효율적 사용과 특수한 환경 요소인 좁은 공간에서의 이동 및 회전 등의 필요성을 만족하지 못하는 경우가 있다. 이 문제점을 극복하기 위하여 공을 이용한 공 로봇의 균형제어 및 주행제어에 대해 국내외에 연구가 진행되어 왔다. 본 논문에는 공 로봇의 균형제어에 대해 다룬다.

공을 이용하여 이동을 수행하는 로봇을 일명 공 로봇이라고 부른다. 공 로봇은 다른 이동로봇에 비하여 땅과의 접점이 하나이기 때문에 공간의 제약성에 훨씬 자유롭고 그래서 좁은 공간에서 이동이 편리하다. 또한 바퀴가 달린 이동로봇에 비하여 방향전환에 편리하다. 공 로봇은 사람이나 물건을 이동시키는 운송수단, 몸이 불편한 사람들을 위한 안내로봇 등 실생활에 응용적으로 사용될 수 있다.

현재 연구되는 대부분의 공 로봇의 구조는 공을 이동시키는 축의 개수에 따라 크게 두 가지로 나누어 지는데, (1) 그림 1(a), (b)와 같이 3축 형태의 구조[1,2]와 (2) 그림 1(c)과 같이 4축으로 구성된 구조[3]가 있다. (1)의 구조를 갖는 로봇은 토크의 힘이 로봇의 하중을 포함하여 공을 이동시킬 수 있는 모터를 필요로 하며, 3축제어의 복잡성 때문에 균형제어 및 방향제어에 어려움으로 로봇이 제어 불안정성을 가지는 문제점이 있다. 반면에 (2)의 구조를 갖는 로봇은 기본적으로 안정하므로 이동제어가 상대적으로 쉽지만, 축이 하나 더 증가함에 따라 부피가 증가하는 단점이 있고, 지금까지 개발된 공 로봇은 높이가 필요이상으로 높은 단점이 있다. 또한 모터가 공과 직접 마찰하며 구동하는 형식이 아닌, 동력을 전달하는 복잡한 구조[15]로 설계되어 있다.



(a) (b) (c)

그림 1. 공 로봇의 종류.
Fig. 1. Types of ball robots.

* 책임저자(Corresponding Author)
Manuscript received March 29, 2013 / revised April 10, 2013 / accepted May 30, 2013
강석원, 박찬익, 변규호: 부산대학교 로봇관련협동과정
(sucwon1696@pusan.ac.kr/chanik1696@pusan.ac.kr/zbyun@naver.com)
이장명: 부산대학교 전자전기공학부(jmlee@pusan.ac.kr)
※ 본 연구는 산업통상자원부 및 정보통신산업진흥원 융복합형 로봇 전문인력양성 특수환경 Navigation/Localization 로봇기술연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(H1502-13-1001).
※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학IT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2013-H0301-13-2006).

Copyright© ICROS 2013

공 로봇은 Wheel이 전후방, 좌우로 위치하고 있어 안정된 자세를 위한 Pitch & Roll 제어가 필요하다. 최근 이러한 공 로봇의 안정된 자세와 주행을 개선하기 위하여 많은 제어방법들이 제시되었다[4-6]. 로봇의 균형을 잡기 위한 방법으로는 Inverted Pendulum을 이용하여 제어하는 방법[7-9]과 Reaction Wheel pendulum과 이외의 방법이 있다[10-13]. 하지만 이러한 종래의 제어방법에는 복잡한 모델링과 수식을 필요로 한다.

본 논문에서는 모터를 통해 공에 직접 동력을 전달하는 새로운 형태의 4축 공 로봇을 개발하였다. 개발한 공 로봇을 복잡한 수식이 필요 없는 비 모델링 기반의 제어기를 이용하여 균형제어 가능함을 보였다.

본 논문의 II 장에서는 공 로봇의 구조를 동역학으로 해석하였고, III 장에서는 개 발한 공 로봇을 이용하여 실험하였으며, IV 장에서 결론을 맺는다.

II. 공 로봇의 구조와 동역학

1. 모델링

본 장에서는 공 로봇의 동역학 모델을 제시한다[14]. 동역학 모델은 Matlab Simulink를 이용하여 시뮬레이션 하였으며, 설계된 공 로봇의 하드웨어 및 시스템 분석을 위해 사용하였다. 공 로봇의 동역학 모델을 위해 Lagrange Equation 을 사용하였으며, 공 로봇은 Inverted Pendulum 두 개가 합쳐진 형태로 가정하였다.

그림 2와 같이 로봇의 좌표축을 설정한다. L 은 회전바퀴의 중심에서 질량중심까지의 거리이다. R_w 는 회전바퀴의 반지름, θ 는 회전바퀴의 회전변위, ψ 는 로봇의 Pitch 축 회전변위를 의미한다. m 는 회전바퀴의 질량, M 는 로봇몸체 질량을 의미한다.

원점에서 회전바퀴 중심까지 위치벡터 $\vec{r}_1$, 원점에서 무게중심 M 까지의 위치벡터 $\vec{r}_2$ 는,

$$\vec{r}_1 = R\vec{i} + R\theta\vec{j} \tag{1}$$

$$\vec{r}_2 = \left(R + L\cos\psi\right)\vec{i} + \left(R\theta + L\sin\psi\right)\vec{j} \tag{2}$$

이다. 위치벡터를 이용한 전체 운동에너지 T 는 다음과 같다.

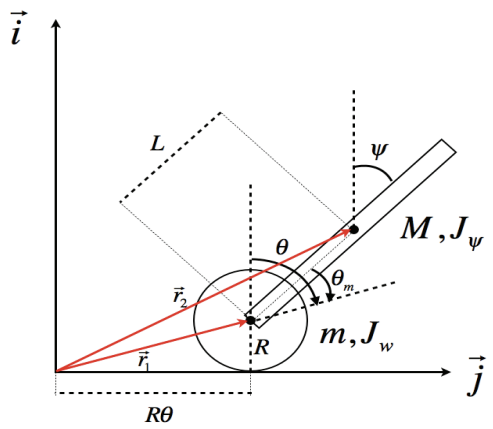


그림 2. 공 로봇의 모델링.
Fig. 2. Modeling of ball robot.

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2}m(\vec{v}_1 \bullet \vec{v}_1) + \frac{1}{2}M(\vec{v}_2 \bullet \vec{v}_2) \\ &+ \frac{1}{2}J_w\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}J_\psi\dot{\psi}^2 + \frac{1}{2}n^2 J_m(\dot{\theta} - \dot{\psi})^2 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 $\vec{v}_i = \frac{d\vec{r}_i}{dt}$ 이다. J_w 는 회전바퀴의 회전관성, J_ψ 는 로봇몸체의 회전관성, J_m 은 모터 전기자의 회전관성이다. n 은 모터의 기어비율이다.

위치에너지 V 는 다음과 같다.

$$V = mgR_w + Mg(R_w + L\cos\psi) \tag{4}$$

이를 통해 라그랑지안(Lagrangian) L 을 구해보면,

$$\begin{aligned} L &= T - V \\ &= \frac{1}{2}m(\vec{v}_1 \bullet \vec{v}_1) + \frac{1}{2}M(\vec{v}_2 \bullet \vec{v}_2) \\ &+ \frac{1}{2}J_w\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}J_\psi\dot{\psi}^2 + \frac{1}{2}n^2 J_m(\dot{\theta} - \dot{\psi})^2 \\ &- mgR_w - Mg(R_w + L\cos\psi) \end{aligned} \tag{5}$$

와 같다.

다음과 같은 라그랑지(Lagrange)방정식

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \tau_q \quad \text{where,} \quad \mathbf{q} = [\theta \;\; \psi]^T \tag{6}$$

에 대입하여 정리하면, 동역학 식은 다음과 같다.

$$J_1\ddot{\theta} + J_3\ddot{\psi} + LMR_w \sin\psi\dot{\psi}^2 = -\tau_p \tag{7}$$

$$J_2\ddot{\theta} + J_4\ddot{\psi} - gLMR_w \sin\psi = \tau_p \tag{8}$$

여기서

$$J_1 = J_w + J_m n^2 + (m + M)R_w^2 \tag{9}$$

$$J_2 = LMR_w \cos\psi - J_m n^2 \tag{10}$$

$$J_3 = LMR_w \cos\psi - J_m n^2 \tag{11}$$

$$J_4 = J_\psi + L^2 M + J_m n^2 \tag{12}$$

이다.

τ_p 는 회전바퀴의 모터에 의해서 발생하는 토크이며 Pendulum에 작용하는 토크는 그와 크기는 같고 방향은 반대인 토크로 작용한다.

시뮬레이션은 이러한 모델과 Matlab의 Simulink 프로그램을 이용하여 실행하였다. 본 논문에서 설계한 모델은 비선형의 성질을 가진 모터 특성과 각각 상수들의 정확한 측정이 불가능하므로 실제 시스템과 많은 차이를 보이게 된다. 따라서 시뮬레이션은 제어기 설계와 시스템 분석 및 데이터 비교용으로 사용한다.

그림 3은 동역학으로 해석한 뒤 시뮬레이션을 통한 결과이다. 시뮬레이션에서 초기치를 0.3도를 설정하였으며, ±0.1이내로 제어가 가능함을 알 수 있다. 공 로봇의 구조를 2개의 Inverted Pendulum가 놓인 것으로 가정하였으므로, 두 개의 축 각각의 값이 동일하기 때문에 하나의 축을 기준으로 시뮬레이션 한 결과만을 나타내었다. 시뮬레이션 결과를 통해 4축

표 1. 동역학에서 사용된 parameter값.
Table 1. A value of symbol used in dynamic equation.

Symbol	Value
m	1.92 $[kg]$
M	2.695 $[kg]$
R	0.068 $[m]$
L	0.17$[m]$
G	9.81 $[m/s^2]$
J_w	0.1307 $[kg\,m^2]$
J_ψ	0.0389 $[kg\,m^2]$
J_m	0.0001 $[kg\,m^2]$

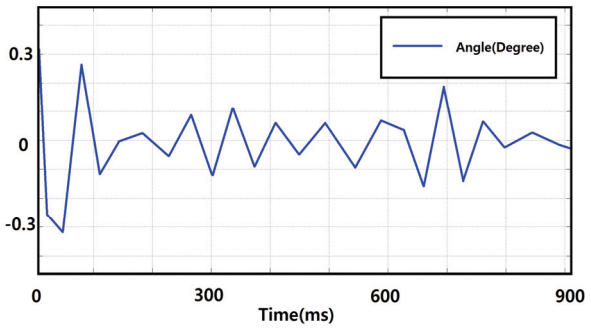


그림 3. 시뮬레이션 결과.
Fig. 3. Result of simulation.

형태의 Inverted Pendulum을 이용한 공 로봇의 제어가 가능함을 볼 수 있다.

2. 시스템 구조

전체 시스템은 MCU를 중심으로 구성되며 그림 4와 같다.

MCU는 설계된 제어기에 따라 10 ms의 주기로 모든 모터에 대한 PWM 제어신호를 출력한다. 각 축의 기울기 값은 UART 통신을 통하여 전송된다. NT-ARS는 UART 통신을 통하여 10 ms의 주기로 데이터를 전송하며, Roll 축 각도 값과 Pitch축 각도 값을 얻는데 사용한다.

각도데이터는 절대값이 아닌 상대적인 값이므로 사용시 평형인 지점을 0도 지점으로 설정하여 사용한다.

3. 제어 구조

제어기의 구조는 그림 5와 같다. 제어기는 비 모델 기반의 PID 제어기를 이용하였다. PID 제어기는 기존의 연구 개발된 제어 알고리즘들 중에서 가장 오래되고 널리 알려진 알고리즘이며, 마이크로 프로세서의 발전과 함께 모든 산업현장에서 사용되는 신뢰성이 높은 알고리즘이다. 구조가 간단하고

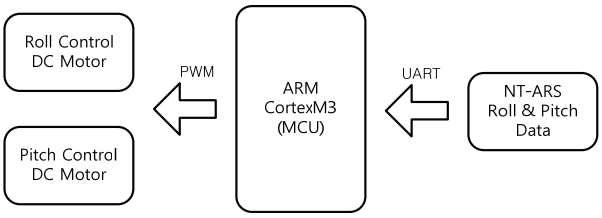


그림 4. 전체 시스템 구조.
Fig. 4. Overall system structure.

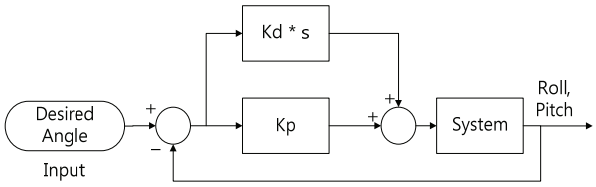


그림 5. 제어부의 구조.
Fig. 5. Control structure.

표 2. 각 제어기의 이득 설정.
Table 2. Gain of each controller.

제어기	파라미터	값
Pitch 제어기	P 항	20
	I 항	0
	D 항	0.1
Roll 제어기	P 항	18
	I 항	0
	D 항	0.2

제어성능이 우수하다. 왜냐하면 2/3개의 변수인 오차와 오차 적분/오차 미분으로만 구성되어 무엇보다 간단하며 응답이 빠르고, 궤환구조로 궤환(feedback)의 장점을 보유하고 있으며, 적분동작에 의하여 정상상태의 오차가 영이 되고, 구동부(actuator)의 포화(saturation)문제에 대처할 수 있고, 다양한 프로세서의 특히 느린 프로세서의 동특성에 알맞은 성능요건에 대해 안정하고 우수한 제어성능을 유지하며, 이득 조정(tuning)이 어렵지만 한번 이루어지면 강인하게 아주 잘 동작하여 실제적인 검증을 이미 획득하였으며 현재 산업 현장 엔지니어들에게 익숙해져 있기 때문이다[16,17].

제어기의 입력은 로봇몸체의 기울기를 사용한다. 로봇 몸체의 중심을 기준 각도로 설정하고, 로봇 중심으로부터 기울어진 각을 error 값으로 정의한다. 제어기 각각의 이득 값은 실험을 통하여 도출하였다.

P 제어는 error 값에 P 이득 값을 곱하여 제어 값을 출력하는 비례제어이다. D 제어는 error 값을 미분하여 D 이득 값을 곱하여 제어 값을 출력하는 미분제어이다. 실험에서 D 이득 값을 조절함에 따라 P 제어에서 발생하는 Overshoot를 감소시켰다. I 제어는 누적오차가 발생하여, I 제어의 이득은 0으로 제한하였다.

본 논문에서는 제어주기가 10 ms이며 사용된 제어기의 모든 제어이득은 실험을 통해 결정하였다. 그 값은 표 2와 같다.

III. 공 로봇 개발 및 실험

1. 하드웨어 설계

실제 로봇은 그림 6과 같다. 4개의 Wheel과 DC모터, IMU Sensor, Controller(MCU) 등으로 구성되어 있다.

Sensor와 Controller는 DC 모터와 공의 위인 로봇 몸체 중심에 위치하고 있다. Wheel은 Rota caster 사의 Omni wheel을 사용했다. 사용된 Controller는 ARM - CortexM3이다. 모터드라이버는 PWM 파형을 입력으로 하여 모터를 구동한다. 사용된 센서는 NTREX 사의 NT-ARSv1 이며, 이 센서를 이용하의 몸체의 기울기 Roll축과 Pitch축의 기울어짐을 알 수 있다. 공은 Wilson 사의 농구공이며 크기는 1호(공 둘레 약 43 cm,

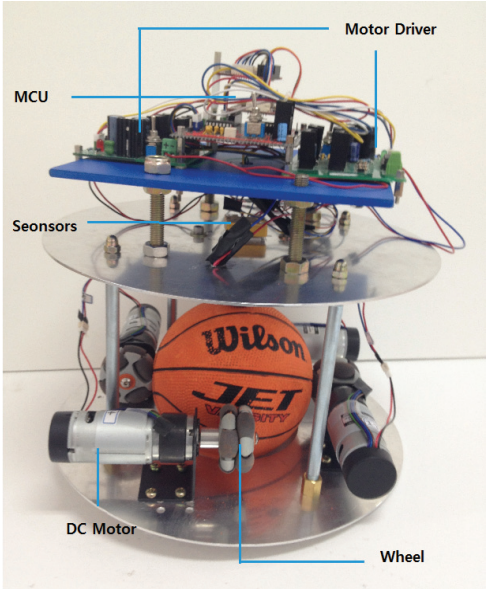


그림 6. 실제 공 로봇.
Fig. 6. Real image of ball robot.

표 3. 공 로봇에 사용된 부품.
Table 3. Part used in the ball robot.

	제조사	품명
Wheel	Rota caster	Omni Wheel
MCU	TI	LM3S8962
DC Motor	D& J WITH	IG-32PGM 01TYPE 1/14
Motor Drive	NTREX	NT-DC20A
Pitch, Roll Sensor	NTREX	NT-ARS V1
Bluetooth	COMFILE	ACODE-300
Basket Ball	WILSON	JET VARSITY WTB17170

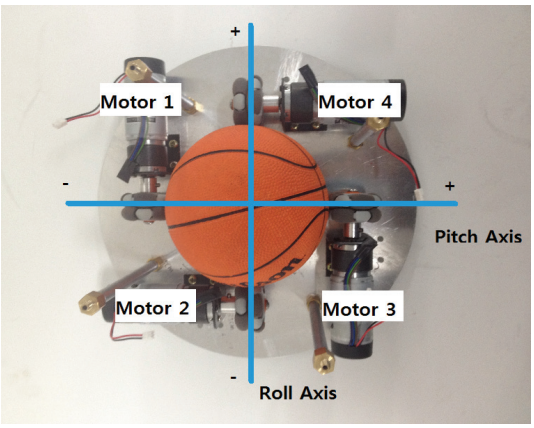


그림 7. 분해한 공 로봇의 윗모습.
Fig. 7. Top side view of decomposed ball robot.

지름 약 13.6 cm)이다. 로봇에 사용된 부품은 표 3과 같다.

그림 7은 2개의 축을 보여주고 있다. 각각의 축은 기울기로부터 2쌍의 DC모터를 통하여 평형을 유지한다. 만약 Pitch 값이 증가하게 되면 motor3과 motor1이 균형을 유지하기 위하여 (+) pitch 방향으로 이동한다. 다른 축들 역시 같은 원리로 평형을 유지한다.

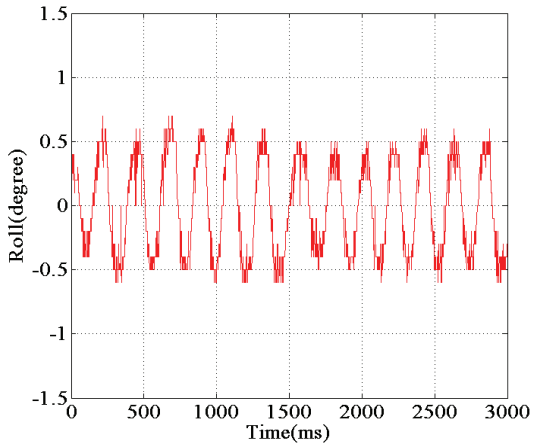


그림 8. Roll 축 각도 데이터.
Fig. 8. Roll axis angle data.

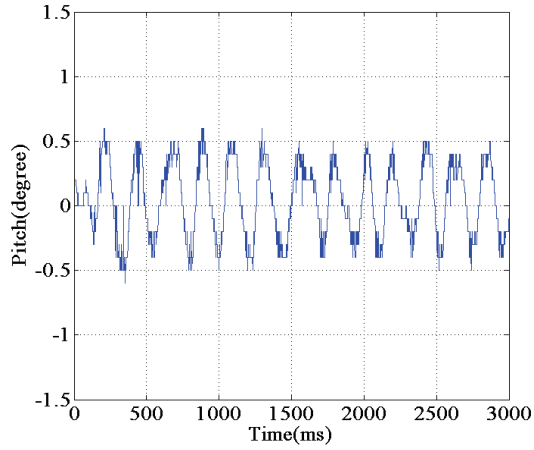


그림 9. Pitch 축 각도 데이터.
Fig. 9. Pitch axis angle data.

2. 제어 성능 분석

본 실험은 평평한 바닥에서 진행하였다. 이때 컨트롤러의 제어루프는 10 ms 단위로 동작하도록 설정하였다.

위의 실험은 공 로봇이 제자리에서 균형을 유지하는 실험이다. 그림 8과 9를 통해, Pitch와 Roll축의 각도가 ±0.5도 이내로 균형을 유지하는 것을 알 수 있다. 이를 통해, 개발한 4축구조의 공 로봇이 비 모델링 기반의 제어기를 이용하여 균형제어가 가능함을 보인다.

IV. 결론

본 논문에서는 기존의 공 로봇과 비교하여 모터를 통해 직접 동력을 전달하는 새로운 형태의 4축 구조의 공 로봇을 개발하였다. 제안한 공 로봇은 4축 구조의 공 로봇으로 기본적으로 전방과 후방 그리고 좌우에 모터가 위치하여 안정적인 형태를 지니고 있으며, 또한 3축보다 4축의 모터를 통하여 비교적 큰 토크를 통하여, 안정적 균형제어가 가능하다. 또한 복잡한 모델링과 수식 대신 간략하게 제어하기 위해 비 모델링 기반의 제어기를 Inverted pendulum 형태로 적용하였다. Lagrange Equation을 이용하여 동역학을 유도 하였으며, 실험을 통해 검증을 하였다. 차후 연구에서는 공 로봇의 주행제

어의 속도 특성 향상을 위하여 모델링 기반의 제어에 관하여 연구를 할 것이다.

REFERENCES

[1] M. Kumagai and T. Ochiai, "Development of a robot balanced on a ball," *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation Kobe International Conference Center Kobe*, Japan, May 2009.

[2] Y. Yamamoto, "NXT ballbot model-based design-control of a self-balancing robot on a ball, built with LEGO Mindstorms NXT," Apr. 2009.

[3] T. Lauwers, G. Kantor, and R. Hollis, "One is enough!," *Robotics Research*, vol. 28, pp. 327-336, 2007.

[4] C.-C. Tsai, M.-H. Juang, C.-K. Chan, C.-W. Liao, and S.-J. Chan, "Self-balancing and position control using multi loop approach for ball robots," *2010 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE 2010)*, Taiwan, Jul. 2010.

[5] Y. Zhang, J. Li, J. Yi, and D. Song, "Balance control and analysis of stationary riderless motorcycles," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3018-3023, 2011.

[6] U. Nagarajan, G. Kantor, and R. L. Hollis, "Trajectory planning and control of an underactuated dynamically stable single spherical wheeled mobile robot," *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation Kobe International Conference Center Kobe*, Japan, May 2009.

[7] H. U. Ha and J. M. Lee, "A control of mobile inverted pendulum using single accelerometer," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 5, pp. 440-445, May 2010.

[8] C.-H. Huang, W.-J. Wang, and C.-H. Chiu, "Design and implementation of fuzzy control on a two-wheel inverted pendulum," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 58, no. 7, pp. 337-345, Jul. 2011.

[9] 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 Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 5, pp. 496-501, May 2012.

[10] S. I. Lee, I. W. Lee, M. S. Kim, He He, and J. M. Lee, "Balancing and driving control of a bicycle robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 6, pp. 532-539, Jun. 2012.

[11] P. Cieslak, T. Buratowski, T. Uhl, and M. Giergiel, "The mono-wheel robot with dynamic stabilization," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 59, no. 9, pp. 611-619, 2011.

[12] L. Keo, K. Yoshino, M. Kawaguchi, and M. Yamakita, "Experimental results for stabilizing of a bicycle with a flywheel balancer," *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation Shanghai International Conference Center, Shanghai*, China, pp. 6150-6155, May 2011.

[13] H. Jin, J. Hwang, and J. Lee, "A balancing control strategy for a one-wheel pendulum robot based on dynamic model decomposition: Simulations and experiments," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 16, no. 4, pp. 763-768, Aug. 2011.

[14] S.-H. Kim, J.-O. Lee, J.-M. Hwang, B.-H. Ahn, and J.-M. Lee, "Dynamic modeling and performance improvement of a unicycle robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 11, pp. 1074-1081, Nov. 2010.

[15] T. B. Lauwers, G. A. Kantor, and R. L. Hollis, "A dynamically stable single-wheeled mobile robot with inverse mouse-ball drive," *2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation Orlando*, Florida , May 2006.

[16] J.-H. Lee, "Re-analysis of lyapunov stability of PI(D) controllers for regulation of second order servo systems," *13th KACC*, Oct. 1998.

[17] K. J. Astrom and T. Hagglund, Automatic Tuning of PID Controllers. *Instrument society of America*, 1988.

[18] J.-H. Yang, S.-Y. Lee, S.-Y. Kim, Y. S. Lee, and O.-K. Kwon, "Optimal posture control for unmanned bicycle," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 10, pp. 1006-1013, Oct. 2011.

[19] J.-O. Lee, S.-I. Han, I.-W. Han, S.-I. Lee, and J. M. Lee, "Attitude and direction control of the unicycle robot using fuzzy-sliding mode control," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 3, pp. 275-284, Mar. 2012.

강 석 원

2012년 영남대학교 전자공학과 졸업. 2012년~현재 부산대학교 대학원 로봇관련협동과정 석사과정 재학. 관심분야는 로봇 벨런싱, 마이크로프로세서 응용.

박 찬 익

2012년 동아대학교 전자공학과 졸업. 2012년~현재 부산대학교 대학원 로봇관련협동과정 석사과정 재학. 관심분야는 비쥬얼 서보잉, 머신비젼.

변 규 호

2012년 계명대학교 기계자동차공학과 졸업. 2012년~현재 부산대학교 대학원 로봇관련협동과정 석사과정 재학, 관심분야는 무인자동차, 로봇제어.

이 장 명

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.