

이륜 이동로봇의 균형 제어를 위한 시간지연 제어기의 실험 연구

Experimental Studies of a Time-delayed Controller for Balancing Control of a Two-wheel Mobile Robot

조성택 · 정 슬[†]
Sung Taek Cho and Seul Jung[†]

*충남대학교 메카트로닉스공학과
[†]Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

요 약

본 논문에서는 두 바퀴 구동 이동로봇(이륜이동로봇)의 균형제어에 대해 논한다. 이륜이동로봇은 두 바퀴로 구동되며 균형을 유지하면서 목표점으로 이동하는 이동로봇이다. 선형제어기인 PD제어기로 균형을 유지할 수 있지만 강건한 제어를 위해서 비선형제어인 시간지연제어기를 사용하였다. PD제어기와 시간지연 제어기의 성능을 비교하기 위해 이륜이동로봇에 적용하여 실험하였다. 로봇의 각도를 위해 시간지연제어방식, 위치제어를 위한 시간지연제어방식, 그리고 각도와 위치 제어를 위한 시간지연제어 방식 등 3가지로 나누어서 실험을 시행하였다. 제어기의 이득값을 달리하며 실험을 통해 시스템의 성능을 평가하였다.

키워드 : 두 바퀴 이동로봇, 시간지연제어기, 밸런싱 제어

Abstract

This paper presents balancing control of a two-wheel mobile robot (TWMR). TWMR is aimed to maintain balance while moving. Although TWMR can be controlled by linear controllers such as PD controller, time-delayed controller is employed for robustness. Performances of PD controllers and time-delayed controllers are compared. Especially, experimental studies on different acceleration estimation for the time-delayed controller are conducted. Performances by different acceleration estimations of the balancing angle, of the position, and of both angle and position are compared empirically.

Key Words : Two-wheel mobile robot, Time-delayed controller, Balancing control

Received: Aug. 5, 2015
Revised : Dec. 22, 2015
Accepted: Jan. 27, 2016
[†]Corresponding author
jungs@cnu.ac.kr

본 논문은 2013년 한국연구재단 일반연구지원(NRF-2010-0024904)과 2014년 한국연구재단 기초연구(NRF-2014R1A2A11049503)의 지원을 받아 수행되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

최근에 이동로봇에 대한 연구는 대부분 자기위치인식을 통한 자율주행에 초점이 맞추어 있다. 좀 더 완벽하고 정확한 SLAM 알고리즘 개발을 통해 무인으로 운행하는 이동로봇이나 자율차량제어에 많은 관심과 연구가 집중되고 있다.

다른 측면의 이동로봇 연구로는 탑승용 이동로봇에 대한 연구이다. 전기자동차와 이동로봇은 점점 하나로 합쳐져 가는 추세에 있어 이동로봇이 탈것으로 사용되는 경우가 늘어나고 있다.

Segway는 대표적인 탑승용 이동로봇으로 두 바퀴로 구동된다 [1]. 두 바퀴의 장점은 좁은 공간에서 제자리 회전이 가능하고 혼잡한 도심이나 실내에서 사용이 가능하다는 것이다. Segway의 출현은 두 바퀴 구동 이동로봇에 대한 관심과 연구에 큰 영향을 끼쳐 다양한 형태의 이륜이동로봇이 소개되었다 [2-12].

그림 1에 보여진 두 바퀴 구동 이동로봇의 핵심은 균형제어기술이다. 정확한 균형각을 검출하여 제어해야 하는데 각의 제어와 위치제어가 서로 합해져 바퀴의 토크를 생성하므로 제어기의 이득값 설정이 중요하다. 또한 외란에 대처할 수 있는 강건한 제어기가 요구된다.

선행 연구에서는 신경회로망과 퍼지를 이용하여 외란 하에서 균형 각도를 제어하였다 [3,4]. 균형각을 정확하게 검출하기 위해 저가의 틸트센서와 자이로센서를 융합하여 이륜이동로봇을 제어했다 [4]. 센서의 정확성을 높이기 위해서 complementary 필터와 Kalman 필터를 사용했다. 이륜이동로봇의 동역학을 구하여 시뮬레이션을 수행하고 실제 시스템을 제작하여 제어하였다.

앞서 사용한 신경망제어기의 경우 연산시간이 많이 필요한 단점이 있어 연산이 빠른 하드웨어가 필요하다. 본 논문에서는 연산이 간단한 시간지연제어기를 사용하고자 한다. 시간지연제어는 오래 전부터 로봇팔의 제어나 쿼드콥터 제어에 사용되어 왔으며, 실제 시스템에 구현이 간단하고 외란에 강건한 특성을 보인다 [13,14].

시간지연제어기의 경우 이전 정보와 관성과 가속도의 평가치를 사용하여 시스템의 비선형과 외란의 영향을 제어하는 방식이다. 따라서 샘플링의 속도와 가속도의 평가치의 정확성에 따라 제어 성능이 달라지게 된다.

최근에는 제어기의 샘플링이 충분히 빠르므로 결국 관성과 관련된 가속도 평가의 정확성이 성능에 영향을 미치는 주요인이다. 따라서 본 논문에서는 각도에 시간지연제어기 사용, 위치에 시간지연 제어기 사용, 각도와 위치에 모두 시간지연제어기 사용 등 3가지 경우의 제어기를 정하고 다양한 제어기 이득값을 통한 실험을 통해 제어기의 성능을 비교하고자 한다.

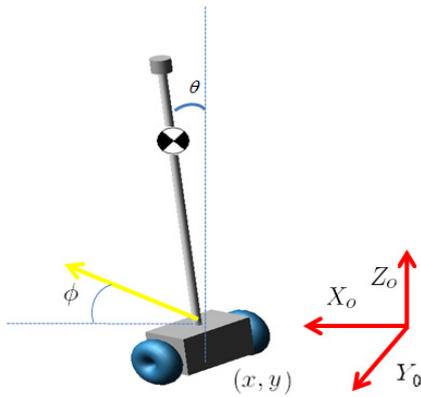
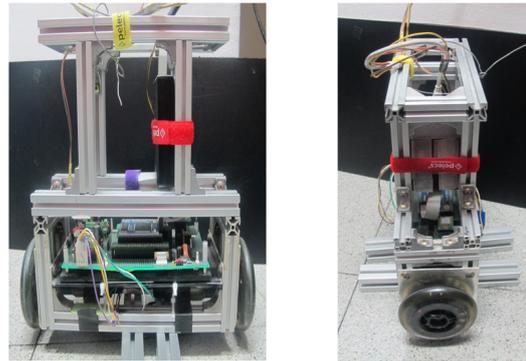


그림 1. 두바퀴 구동 이동로봇 구조
Fig. 1. Two-wheel mobile robot structure

2. 이륜로봇시스템

2.1 전체시스템

그림 2는 실제 제작한 이륜이동로봇 시스템이다. 표 1은 로봇의 제원을 나타낸다. 모든 하드웨어를 아래쪽에 위치하게 하여 무게중심을 낮추었다. 오른쪽 왼쪽 바퀴의 구동으로 균형 각도와 로봇의 위치를 제어한다. 각 바퀴의 모터는 위치제어를 위해 엔코더가 달린 DC모터를 사용하였다.



(a) Front view (b) Side view

그림 2. 이륜이동로봇
Fig. 2. Two-wheel mobile robot

표 1. 로봇에 사용된 주요 부품 및 프로그램
Table 1. Specifications of parts and program

Parts	Specifications	
MCU	TI DSP2812	
Emulator	SY-XDS510	
Communication	Firmtech FB755AC	
Sensors	Gyro sensor	Murata ENV-05G
	Tilt sensor	DAS SA1
Motor	Gear ratio 1/17, 24V	
Motor Driver	LM18200	
Program	Downloader	CCS Studio v3.3
	Data capture	Labview 2010
	Data processing	Matlab 2008b

2.2 제어 하드웨어

그림 3은 제어 하드웨어의 사진이다. 보드에 장착된 주요 부품이 나타나 있다. 그림에서 보면, 각도를 측정하기 위해 Tilt(SA1)센서와 Gyro(ENV-05G)센서를 사용했다. 이는 두 센서의 특성을 이용한 complementary 센서 융합 방법을 사용하여 정확한 각도를 검출하였다. 제어기로 사용된 TMS320F2812는 최고 150MHz로 구동되는데, 틸트 센서와 자이로 센서 값을 받아들여 로봇의 각도를 알아내고, 모터 엔코더 값을 받아들여 로봇의 위치, 속도 등을 알아내어 제어방식을 통해 PWM을 발생하여 모터를 구동시킨다.

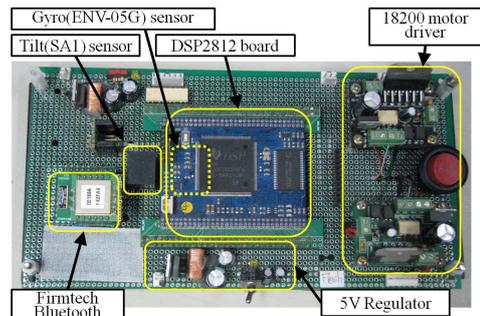


그림 3. 전체 하드웨어 구성
Fig. 3. Overall hardware structure

3. 제어구조

3.1 PD 제어

이륜이동로봇은 균형각도, 위치, 헤딩각도를 동시에 제어해야 한다. 로봇의 균형각도를 제어한다는 것은 넘어지지 않도록 제어하는 것이다. 즉 각도를 0이 되게 하는 것이다. 위치를 제어한다는 것은 로봇의 처음 시작 위치를 0으로 놓았을 때 다른 명령을 주지 않으면 0을 유지하게 만들고, 위치명령에 따라서 앞이나 뒤로 이동하게 만드는 것이다.

이륜이동로봇은 로봇의 각도, 위치를 합한 토크를 두 바퀴에 전달하여 제어를 하는 MIMO(Multi-Input Multiple-Output) 시스템이다. 이 시스템을 제어하기 위해서 본 논문에서는 PD 제어와 시간지연제어를 적용했다. 각도와 위치제어 그리고 헤딩각 제어를 위해 다음과 같이 제어기를 사용한다.

$$\begin{aligned} u_b(t) &= k_{bp}(q_{ab} - q_b) + k_{bd}(\dot{q}_{ab} - \dot{q}_b) \\ u_p(t) &= k_{pp}(q_{dp} - q_p) + k_{pd}(\dot{q}_{dp} - \dot{q}_p) \\ u_h(t) &= k_{hp}(q_{dh} - q_h) + k_{hd}(\dot{q}_{dh} - \dot{q}_h) + k_{hi} \int (q_{dh} - q_h) dt \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $k_{pp}, k_{pd}, k_{bp}, k_{bd}, k_{hp}, k_{hd}, k_{hi}$ 는 제어기의 이득값이다. 그림 4는 선형제어기의 블록다이어그램을 보여주고 있다.

오른쪽, 왼쪽 바퀴의 토크입력은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_R(t) &= u_b(t) + u_p(t) + u_h(t) \\ \tau_L(t) &= u_b(t) + u_p(t) - u_h(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 τ_R, τ_L 은 각각 오른쪽, 왼쪽 바퀴의 토크값이다.

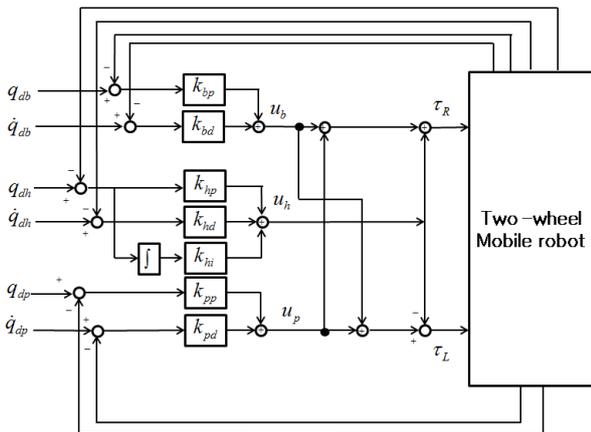


그림 4. 이륜로봇제어를 위한 PD 제어 블록
Fig. 4. PD control for a two-wheel robot

3.2 시간지연제어

시간지연 제어기는 신경망제어처럼 연산시간이 많이 필요하지 않고 간단하여 실시간으로 운용이 가능한 장점이 있다. 일종의 관측기로 관성과 가속도를 제외한 모든 요소들

추정하는 제어기이다. 이전 토크정보를 사용하여 외란이 포함된 동적 모델을 제거하므로 빠른 제어주기를 필요로 하는데, 상용 DSP로 이 문제를 해결할 수 있다.

이륜이동로봇의 제어를 위해서는 식(2)에서처럼 균형각 제어기, 위치 제어기, 그리고 헤딩각 제어기가 각각 필요하다. 하지만 본 실험에서는 균형각과 위치제어에 초점을 맞추어 헤딩각 제어는 사용하지 않았다.

시간지연제어기를 사용하는 경우에 균형각 제어에 시간제어기를 사용하는 경우(그림 5의 Scheme 1), 위치제어에 시간제어기를 사용하는 경우(그림 6의 Scheme 2), 그리고 마지막으로 양쪽에 모두 사용하는 경우(그림 7의 Scheme 3)를 나누어 실험하였다.

균형각제어를 위한 시간지연제어는 다음과 같다.

$$u_{b_TDC}(t) = \hat{M}_b u_b(t) + (u_b(t - \lambda) K_{TR} - \hat{M}_b \ddot{q}_b(t - \lambda)) \frac{K}{K_{TR}} \quad (3)$$

여기서 \hat{M}_b 는 관성 행렬의 평가치이고 K 는 이득값, K_{TR} 는 토크상수, \ddot{q}_b 는 각가속도이며 그리고 λ 는 샘플링 시간이다. 마찬가지로 위치제어를 위한 시간지연제어기는 다음과 같다.

$$u_{p_TDC}(t) = \hat{M}_p u_p(t) + (u_p(t - \lambda) K_{TR} - \hat{M}_p \ddot{q}_p(t - \lambda)) \frac{K}{K_{TR}} \quad (4)$$

여기서 \hat{M}_p 는 관성 행렬의 평가치이고 \ddot{q}_p 는 가속도이다. 따라서 다음과 같이 3가지 경우의 제어법칙을 구현하였다.

- 1) Scheme 1(Fig. 5): $\tau_R = \tau_L = u_{b_TDC}(t) + u_p(t)$
- 2) Scheme 2(Fig. 6): $\tau_R = \tau_L = u_{p_TDC}(t) + u_b(t)$
- 3) Scheme 3(Fig. 7): $\tau_R = \tau_L = u_{b_TDC}(t) + u_{p_TDC}(t)$

그림 5는 시간지연제어기의 각도 보상을 나타내고 그림 6은 위치보상을 그림 7은 각도와 위치를 모두 보상한다.

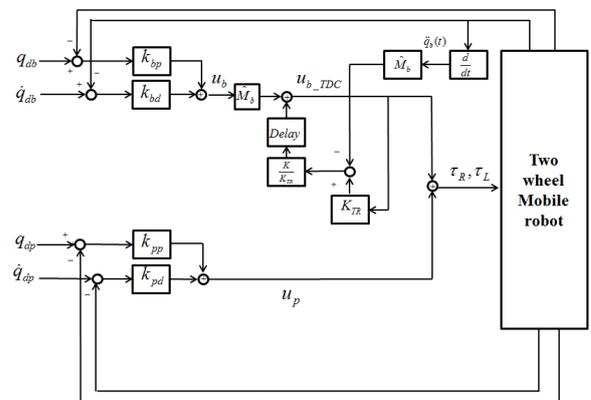


그림 5. Scheme 1: 균형제어를 위한 각도 시간지연제어
Fig. 5. Scheme 1: A time-delayed control for angle

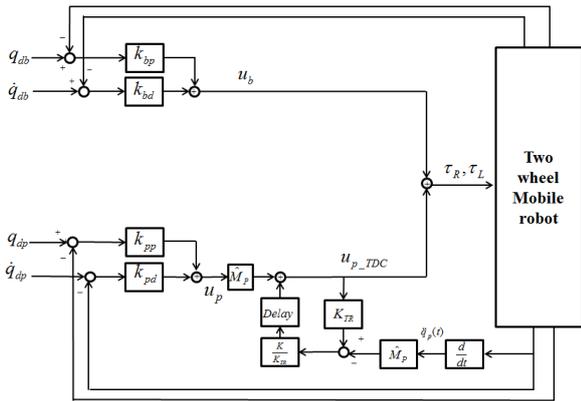


그림 6. Scheme 2: 균형제어를 위한 위치 시간지연제어
Fig. 6. Scheme 2: A time-delayed control for position

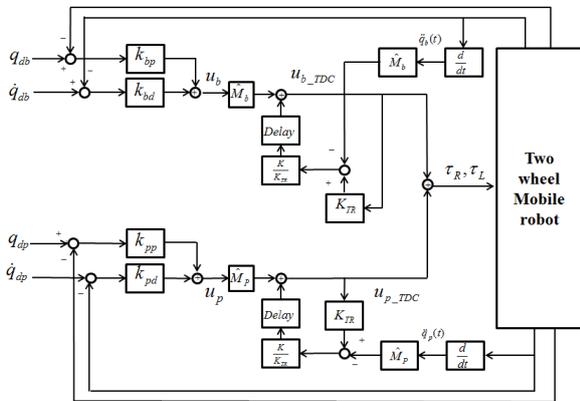


그림 7. Scheme 3: 균형제어를 위한 각도 및 위치 시간지연제어
Fig. 7. Scheme 3: A time-delayed control for angle and position

표 2는 실제 실험에서 사용한 관성 행렬의 평가치와 토크상수 값 그리고 게인값을 나타낸다. 각각의 값은 실험을 통해 구하였다.

표 2. TDC 제어변수
Table 2. TDC Control parameters

Variables	Value
\hat{M}_b, \hat{M}_p	1
K_{TR}	0.5
K	0.2

4. 실험결과

4.1 실험 환경

같은 환경에서 3가지 시간지연제어 방식을 PD제어기의 이득값을 달리하며 실험하고 PD제어기와 시간지연제어기의 성능을 비교하여 보았다. PD제어기는 적절히 조정되었고 그 범위 안에서 차이를 두어 실험하였다. 표 3은

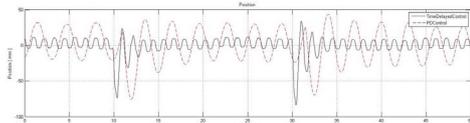
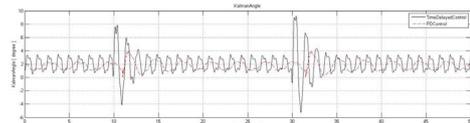
실험에 사용된 제어기의 이득값을 나타낸다. 각 제어 방법에 따라 6가지 다른 제어이득값을 실험하여 총 9 경우를 실험하였다. 위치제어기의 이득을 고정하고 각도의 비례제어기 이득값을 달리하며 실험하였다.

표 3. 3가지 제어방법에 따른 제어기 이득값
Table 3. Control gains for three control schemes

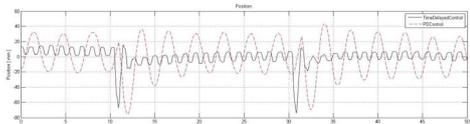
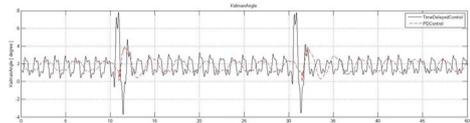
Gain/Acceleration Estimation	Scheme 1 Fig. 8	Scheme 2 Fig. 9	Scheme 3 Fig. 10
Angle P gain : -75, D gain : -10 Position P gain : -10, D gain : -20	(a)	(a)	(a)
Angle P gain : -85, D gain : -10 Position P gain : -10, D gain : -20	(b)	(b)	(b)
Angle P gain : -100, D gain : -10 Position P gain : -10, D gain : -20	(c)	(c)	(c)

그림 8,9,10은 표 3의 조건별로 (a)~(c)까지 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 실선은 시간지연제어기를 사용한 것이고, 점선은 PD제어기를 사용한 결과이다. 각 그림에서 위의 그래프는 로봇의 각도오차를 아래 그래프는 로봇의 위치오차를 나타낸다. 전체적으로 로봇의 각도는 PD제어기나 시간지연제어기가 거의 비슷한 정도의 성능을 보이지만 로봇의 위치를 보면, 로봇이 제자리에 서 있도록 명령을 줬을 때, 시간지연제어기가 월등한 성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 시간지연제어기의 경우 각도와 위치제어 응답이 2배 이상 빠르게 나타남을 볼 수 있다.

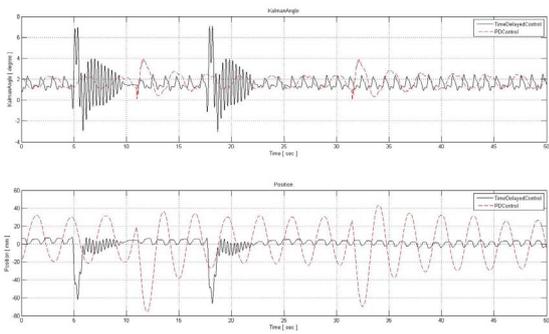
4.2 Scheme 1 : 각도에 시간지연제어기 사용



(a) Angle P gain:-75, D gain: -10, Position P gain: -10, D gain : -20



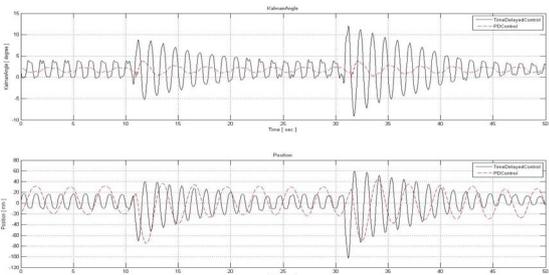
(b) Angle P gain:-85, D gain: -10, Position P gain: -10, D gai : -20



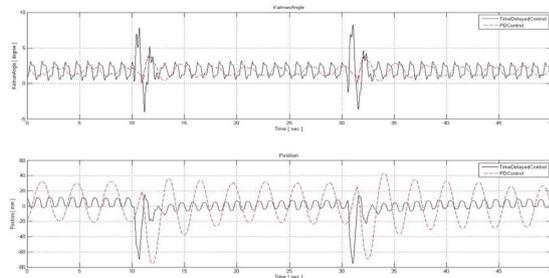
(c) Angle P gain: -100, D gain: -10, Position P gain: -10, D gain: -20

그림 8. Scheme 1
Fig. 8. Scheme 1

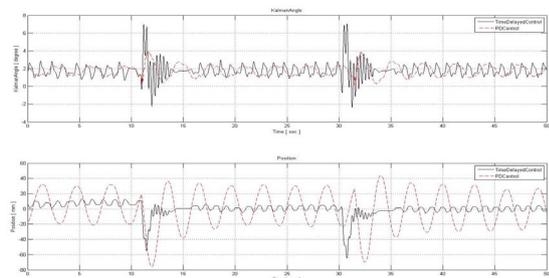
4.2 Scheme 2: 위치에 시간지연제어기 사용



(a) Angle P gain : -75, D gain : -10, Position P gain : -10, D gain : -20



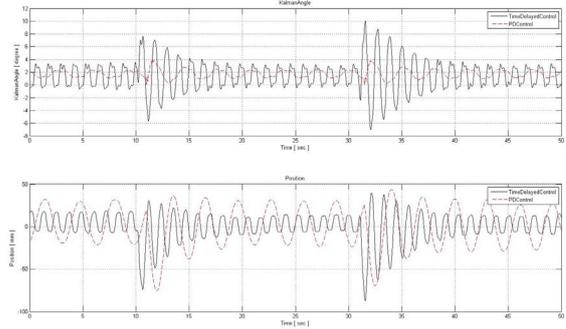
(b) Angle P gain: -85, D gain: -10, Position P gain: -10, D gain: -20



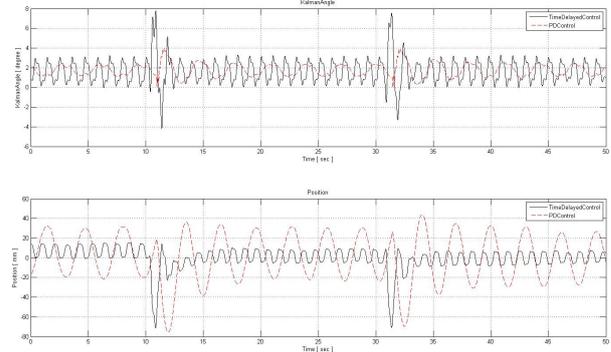
(c) Angle P gain: -100, D gain: -10, Position P gain: -10, D gain: -20

그림 9. Scheme 2
Fig. 9. Scheme 2

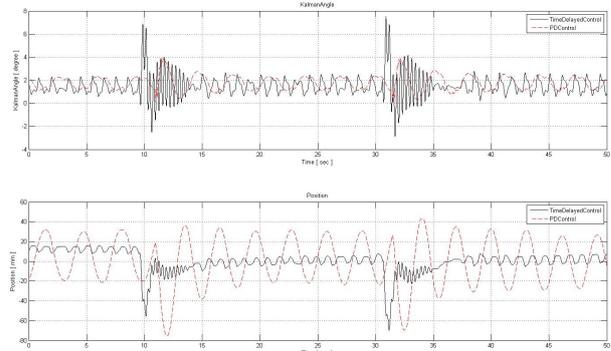
4.3 Scheme 3: 양쪽에 시간지연제어기 사용



(a) Angle P gain: -75, D gain: -10, Position P gain: -10, D gain: -20



(b) Angle P gain: -85, D gain: -10, Position P gain: -10, D gain: -20



(c) Angle P gain: -100, D gain: -10, Position P gain: -10, D gain: -20

그림 10. Scheme 3
Fig. 10. Scheme 3

4.4 결과분석

실험결과를 보면 먼저 시간지연제어기의 경우 PD 제어기보다 성능이 우수했다. 세 가지 제어방식의 경우에서 각각의 가속도 추정이 로봇의 성능에 미치는 영향은 없다고 봐도 될 정도로 무방했다.

표 4는 각 결과에 대해서 오차의 평균과 분산을 구한 것이다. 외란의 영향 때문에 반드시 일치하는 것은 아니지만, 각도의 P게인이 클수록 분산이 작아지는 경향을 볼 수 있다. 표 4에서 평균보다는 얼마나 중심에 모여 있는가를 보이는 분산이 작은 것이 제어성능이 좋다고 할 수 있다. 전

체 오차를 기준으로 보면 Scheme 3이 가장 낮은 오차값을 나타내었다.

표 4. 제어 성능 비교

Table 4. Comparison of control performances

	Cases	Error Average	Error variance
Scheme 1	(a)	2,0485	2,3057
	(b)	1,7603	1,2345
	(c)	1,5615	0,7771
Scheme 2	(a)	1,8817	9,7159
	(b)	1,8428	1,3345
	(c)	1,8009	0,6497
Scheme 3	(a)	1,4313	5,2886
	(b)	1,6302	1,5621
	(c)	1,5048	0,8173

Scheme 3의 경우 (a)일 때 오차가 가장 낮았다. 마찬가지로 오차의 분산도 Scheme 3이 가장 낮았고 (c)일 때 작았다.

5. 결론

본 논문에서는 이륜 이동로봇의 균형제어를 위해 PD제어와 시간지연제어기의 성능에 대해서 알아보았다. 시간지연제어 방식의 경우 보상하는 변수에 따라 3가지 형태의 제어방식을 제안하였다. 다양한 제어기의 이득값에 따른 3가지 제어기의 성능을 비교하여 보았다. 모든 제어기가 이륜 이동로봇에서 균형을 유지하였는데 이 때 제어기의 성능은 위치오차에 의해 좌우된다. 시간지연제어기는 PD제어에 비해서 위치오차가 작았다. 시간지연제어기의 경우 3가지 형태의 제어기의 성능이 비슷하지만 위치와 각도에 모두 보상을 경우가 전반적으로 우수함을 알 수 있었다. 이는 각도제어와 위치제어가 상호 영향을 미치고 있기 때문으로 판단된다.

References

[1] <http://www.segway.com>
 [2] F. Grasser, A. Darrigo, S. Colombi, and A. Rufer, "JOE: A mobile, inverted pendulum", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 49, No. 1, pp. 107-114, 2002
 [3] H. J. Lee and S. Jung, "Development of two wheeled car-like mobile robot using balancing mechanism: BalBOT VII", *Journal of Korean*

Robotics Society, vol. 4, no. 4, pp. 289-297, 2009
 [4] H. J. Lee and S. Jung, "Balancing and navigation control of a mobile inverted pendulum robot using sensor fusion of low cost sensors", *Mechatronics*, vol. 22, Iss. 1, pp. 95-105, 2012
 [5] K. Pathak, J. Franch, and S. Agrawal, "Velocity and position control of a wheeled inverted pendulum by partial feedback linearization", *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 21, pp. 505-513, 2005
 [6] S. H. Jeong and T. Takayuki "Wheeled Inverted Pendulum Type Assistant Robot: Design Concept and Mobile Control", *IEEE Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1932-1937, 2007
 [7] R. Imamura, T. Takei, and S. Yuta, "Sensor drift compensation and control of a wheeled inverted pendulum mobile robot", *IEEE Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 137-142, 2008
 [8] S. S. Kim and S. Jung, "Control experiment of a wheel-driven mobile inverted pendulum using neural network", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 16, no. 2, pp. 297-303, 2008
 [9] C. C. Tsai, H. C. Huang, and S. C. Lin, "Adaptive neural network control of self-balancing two-wheeled scooter", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 4, pp. 1420-1428, 2010
 [10] 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, 2011
 [11] H. W. Kim and S. Jung, "Fuzzy Logic Application to a Two-wheel Mobile Robot for Balancing Control Performance", *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, vol.12, no. 2, pp. 154-161, 2012
 [12] H. W. Kim, S. T. Cho, S. Jung, "Implementation and Balancing Control of a Robotic Vehicle for Entertainment", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 20, no. 7, pp. 736-740, 2014.
 [13] J. G. Lim and S. Jung, "Experimental Studies on Attitude Control of a Quad-rotor System Using a Time-delayed Controller", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 1-8, 2014.
 [14] J. G. Lim and S. Jung, "Altitude Control of a Quad-rotor System by Using a Time-delayed Control Method", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 20, no. 7, pp. 724-729, 2014.

저 자 소 개



조성택 (Sung-Taek Cho)

2006년 : 경희대학교토목공학과 졸업

2014년 : 충남대학교

메카트로닉스공학과

지능로봇 전공 석사졸업

2014년~현재 : 한국과학기술연구원

(KIST)석사후 인턴 연구원

관심분야 : 두 바퀴 밸런싱 로봇, 제어 알고리즘, 모바일
로봇, Optical tracking system.

Phone : +82-42-821-7232

Fax : +82-2-958-5759

E-mail : savagegard_n@nate.com



정 슬 (Seul Jung)

1988년 : 미국 웨인 주립대 전기
컴퓨터공학과 졸업.

1991년 : 미국 캘리포니아대 데이비스
전기 컴퓨터공학과 석사 졸업.

1996년 : 미국 캘리포니아대 데이비스
전기 컴퓨터공학과 박사 졸업.

1997년~현재 : 충남대학교 메카트로닉스
공학과 교수

관심분야 : 지능 시스템 및 지능 로봇, 밸런싱 시스템
응용, 자이로 시스템, 지능형 서비스 로봇,
미래형 지능형 운송시스템, 로봇교육.

Phone : +82-42-821-6876

Fax : +82-42-823-4919

E-mail : jung_s@cnu.ac.kr