

무선통신을 이용한 주행 제어가 가능한 볼 로봇의 설계 및 제어

Design and Control of Ball Robot capable of Driving Control by Wireless Communication

이 승 열*, 정 명 진*

Seung-Yeol Lee*, Myung-Jin Chung*

Abstract

Recently, according to improvement of robot technology, research for mobile robot is increasing. Mobile robot having 2-wheels or 4-wheels is easy for straight driving but is difficult for direction change and rotation. So, ball robot having one contact point with base is interested by researchers. By characteristics of the one contact, ball robot is required the balancing and driving control. In this paper, smart phone application, which is usable for control by wireless communication, is proposed. The ball robot having the proposed smart phone application is designed and manufactured. Balancing and driving control by wireless communication is conducted. From the test, it is conformed that ball robot has the control performances as roll angle error is $\pm 0.8\text{deg}$, pitch angle error is $\pm 0.7\text{deg}$, x-axis position error is $\pm 0.1\text{m}$, and y-axis position error is $\pm 0.08\text{m}$ for 1m driving control.

요 약

최근 로봇 기술의 발전에 따라 모바일 로봇에 대한 연구가 주목을 받고 있다. 현재 모바일 로봇의 대부분은 2륜 및 4륜 기반으로 개발되어 직선 주행에는 강하지만 방향전환 및 제자리 회전에 제한이 있으며, 이러한 문제점을 극복하고자 구 형태의 바퀴를 사용하는 볼 로봇에 대한 연구가 진행되고 있다. 볼 로봇은 협소한 공간에서 큰 제약 없이 이동이 가능하다는 장점을 가지고 있지만, 구조적으로 불안정하여 안정적인 자세 및 주행 제어가 요구된다. 본 연구에서는 무선통신으로 자세 및 주행 제어가 가능한 스마트폰 어플리케이션을 제안하고, 이를 적용하여 제작된 볼 로봇을 이용하여 자세 및 주행 제어 실험을 수행하였다. 실험을 통해 Roll 각도 오차 $\pm 0.8\text{도}$, Pitch 각도 오차 $\pm 0.7\text{도}$ 이내에서 제어됨을 확인하였으며, 1m 주행제어에 대해 x축 방향 위치오차 $\pm 0.1\text{m}$, y축 방향 위치오차 $\pm 0.08\text{m}$ 이내에서 제어됨을 확인하였다.

Key words : Ball robot, Wireless communication, Control, Ballancing, Driving, Smart phone application

* Dept. of Mechatronics Engineering, Korea Polytechnic University

★ Corresponding author

E-mail : mjchung@kpu.ac.kr, Tel : +82-31-8041-0461

※ Acknowledgment

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(NRF-2018R1D1A1B07041829).

Manuscript received Dec. 3, 2019; revised Dec. 23, 2019; accepted Dec. 26, 2019.

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.

I. 서론

최근 로봇 기술의 발전에 따라 모바일 로봇에 대한 연구가 주목을 받고 있다. 대표적으로 관람객을 안내하여 정보를 제공하는 안내로봇, 장애물을 회피하며 이동하는 청소로봇, 스마트공장 및 물류창고에서 제품을 운반하는 운송로봇 등이 있다. 하지만, 현재 모바일 로봇의 대부분은 2륜 및 4륜 기반으로 개발되어 직선 주행에는 강하지만 방향전환 및 제자리 회전에 제한을 가지고 있다. 이러한 문제점을 극복하고자 구 형태의 바퀴를 사용하는 볼 로봇에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-9].

볼 로봇은 공 모양의 로봇이나 볼을 이용하여 이동을 수행하는 로봇의 형태이다. 일반적인 형태의 타이어가 가지는 단 방향 이동이라는 단점을 보완할 수 있는 전 방향 이동수단으로 사용할 수 있다 [1]. 따라서 협소한 공간에서 큰 제약 없이 이동이 가능하다는 장점을 가지고 있지만, 구조적으로 불안정한 시스템으로 안정적인 자세 제어가 요구된다. 특히, 주행 성능을 확보하기 위한 Roll 및 Pitch 제어가 요구된다[2-9].

본 연구에서는 볼링 공, 옴니 휠, 모터, 센서, 배터리 및 제어회로를 포함하는 차체와 무선통신으로 주행 제어를 위한 스마트폰 어플리케이션을 제안하였다. II장에서는 4개의 옴니 휠 사이에 바퀴를 끼워 넣는 방식으로 볼에 강한 토크를 전달할 수 있는 2축 볼 로봇을 구성하였으며, III장에서는 볼 로봇의 구동부, 제어부, 통신부를 설계 및 제작하였다. 구동부 설계에서는 제어에 요구되는 토크에 기반한 모터를 선정하였으며, 제어부 설계에서는 자세 및 주행 제어를 위한 PID 제어를 설계하였다. 통신부는 무선통신으로 볼 로봇의 주행을 제어하기 위해 블루투스 통신을 이용하는 스마트폰 어플리케이션을 구현하였다. VI장에서는 제작된 볼 로봇을 이용한 자세 및 주행 제어 실험을 통해 제어성능을 확인하였다.

II. 볼 로봇 구성

볼 로봇은 그림 1과 같이 하부는 볼링공에 DC 모터와 연결된 옴니 휠이 4 위치에 접해 있으며, 각각의 모터에는 엔코더가 장착되어 있다. 볼 로봇의 상부는 모터 드라이버, 배터리, AHRS 센서, 블루

투스 모듈 및 MCU 제어보드가 배치되어 있다.

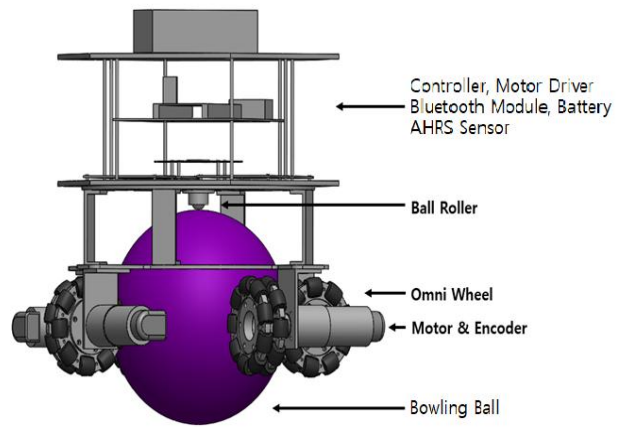


Fig. 1. Configuration of ball robot.
그림 1. 볼 로봇의 구성도

III. 볼 로봇 설계 및 제작

그림 2는 볼 로봇 구성품의 기능 및 신호의 흐름을 나타낸다. 가속도 센서와 자이로 센서가 내장된 AHRS 센서(EBIMU-9DOFv4)에서 각도 신호가 MCU(NUCLEO-F429ZI) 제어보드에서 기준값과의 차이에 의해 모터를 동작하기 위한 제어신호가 생성되고, 이 신호는 모터 드라이버(Cytron MD30C)를 통해 옴니 휠(NEX) 및 엔코더(512P/R)가 부착된 감속기어(1/49) DC 모터(IG-42GM)에 인가되어 볼 로봇이 자세제어와 주행제어가 가능하게 된다. 이때 기준신호는 스마트폰에서 블루투스 통신으로

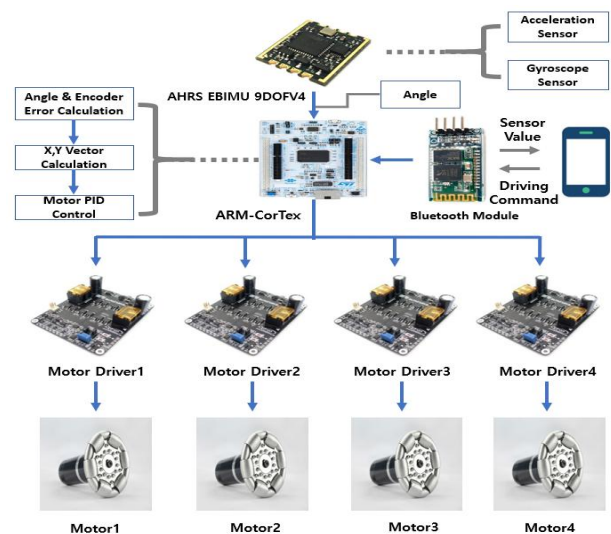


Fig. 2. Functions and signal flow of ball robot parts.
그림 2. 볼 로봇 구성품의 기능 및 신호 흐름도

볼 로봇에 장착되어 있는 블루투스 모듈(HC-06)로 전달된다.

중양에 배치된 볼링공 측면에 90도 간격으로 모터에 연결된 옴니 휠을 배치하고, 볼링공에 대해 옴니 휠이 접촉 회전하도록 하여 Roll 및 Pitch 각도와 x축 및 y축 방향의 위치를 각각 제어할 수 있도록 볼 로봇을 설계하였다. 볼 로봇 차체의 중앙에 AHRS 센서를 배치하고, 센서의 x축 및 y축 방향을 차체의 x축 및 y축 방향과 동일하게 배치하여 Roll, Pitch 각도를 측정하고 이 값을 이용하여 자세 및 위치 제어를 수행하도록 하였다.

1. 구동부

볼 로봇의 구동부는 90도 간격으로 배치되는 4쌍의 옴니 휠이 부착되는 엔코더 장착형 감속기어 DC 모터와 모터 드라이버로 구성된다. 볼링공과 접촉하는 옴니 휠의 회전을 통해 볼에 충분한 토크를 전달할 수 있는 모터를 선정하였다. 선정된 모터는 정격전압 24V, 감속비 1/49, 정격 토크 9.2 kgf-cm, 및 정격 회전수 152 rpm을 갖는다. 정격 토크(T_{rate})와 정격 회전수(ω_{rate})는 식 (1) 및 식 (2)를 사용하여 계산하였다.

$$T_{rate} = T_m \times N \times \eta \tag{1}$$

$$\omega_{rate} = \omega_m \times N \tag{2}$$

여기서, T_m 은 모터 토크, N 은 감속비, η 는 감속기 전달효율, ω_m 은 모터 회전수를 나타낸다.

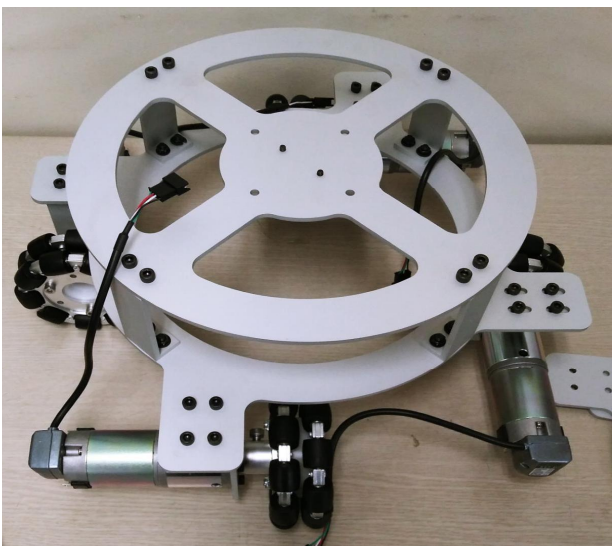


Fig. 3. Driving part and frame of ball robot.
그림 3. 볼 로봇의 구동부 및 차체

그림 3은 설계된 볼 로봇의 구동부와 구동부가 장착된 차체를 나타낸다.

볼 로봇은 볼링공, 구동부 및 차체의 질량이 7.46kg으로 설계 되었다.

2. 제어부

Roll 및 Pitch 각도값($\phi_{(R,P)}$)과 x축 및 y축 위치값(θ_M)의 기준입력을 모두 0으로 설정하여 볼 로봇이 한 위치에서 자세를 유지하도록 제어 한다. AHRS 센서의 x축 및 y축 방향과 차체의 x축 및 y축 방향이 정렬이 되도록 설계하여 Roll 자세제어 및 y축 위치제어 시스템과 Pitch 자세제어 및 x축 위치제어 시스템을 서로 분리할 수 있도록 하였다. 각각 분리된 제어 블록선도는 동일하며 그림 4와 같다.

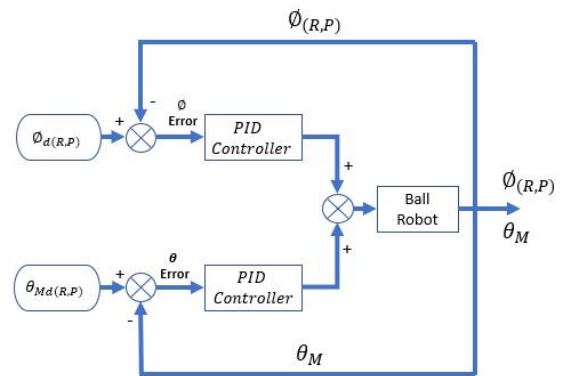


Fig. 4. Control block diagram of ball robot.
그림 4. 볼 로봇의 제어블록선도

자세에 대한 PID제어 신호와 위치에 대한 PID제어 신호가 통합되어 PWM 신호 형태로 모터 드라이버를 통해 Roll 자세제어 및 y축 위치제어 모터

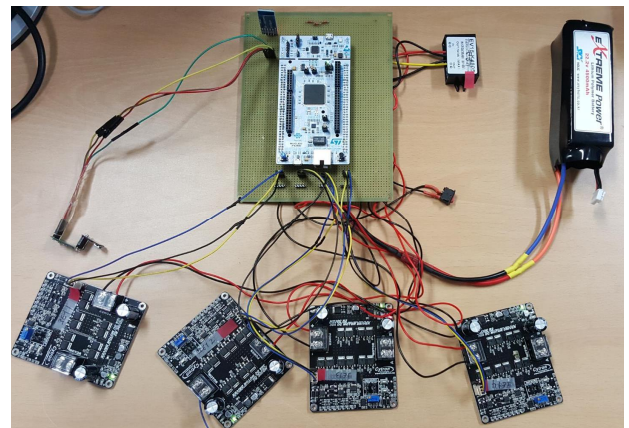


Fig. 5. Parts connected on control part of ball robot.
그림 5. 볼 로봇의 제어부 연결 부품

2개와 Pitch 자세제어 및 x축 위치제어 모터 2개에 각각 인가 되도록 배치하였다. 그림 5는 볼 로봇의 제어부에 연결된 부품을 나타낸다.

볼 로봇은 2개의 구동축으로 구성되어 각 축마다 각도 제어를 위한 PID 게인과, 위치 제어를 위한 PID 게인으로 총 6개의 제어 변수가 있다. 각 축의 제어 게인값을 동일하게 설정하여 총 6개의 제어 변수를 사용하였다.

3. 통신부

볼 로봇의 제어 상태를 실시간으로 확인하고, 무선통신을 이용해서 주행 제어 신호를 전송하기 위해 스마트폰 어플리케이션을 적용하였다. 어플리케이션은 Android Studio를 이용하여 Java를 기반으로 제작하였다. 볼 로봇의 AHRS센서에서 측정된 Roll 및 Pitch 값은 블루투스 모듈을 통해 스마트폰으로 송신되고, 이를 이용해 어플리케이션에서는 실시간으로 볼 로봇의 Roll 및 Pitch 값을 텍스트와 그래프로 확인할 수 있다. 측정된 Roll 및 Pitch 값은 0.125msec 주기 및 ±10도 범위로 그래프에 출력된다. 그림 6과 같이 어플리케이션에는 볼 로봇의 주행 제어를 위해 전후좌우 이동 버튼 및 제자리 자세 유지 버튼과 비상시 볼 로봇의 동작을 정지할 수 있는 비상 정지 버튼을 배치하였다.

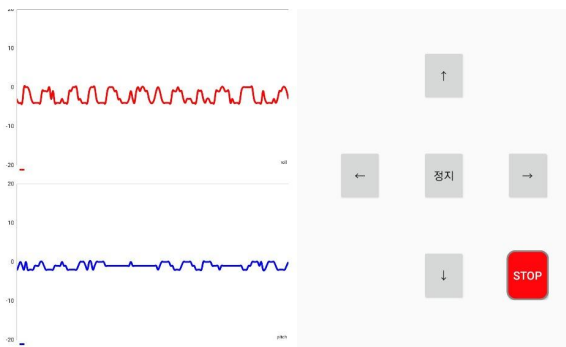


Fig. 6. Application for wireless communication of ball robot. 그림 6. 볼 로봇의 무선통신용 어플리케이션

사용자가 버튼을 누르면 해당 명령 신호가 블루투스 통신을 통해 볼 로봇의 블루투스 모듈로 송신되고, 제어기는 수신된 명령에 해당하는 동작을 수행하기 위한 제어신호를 생성하게 된다. 그림 7은 제작된 스마트폰 어플리케이션을 이용해서 무선통신을 통해 볼 로봇의 모터를 제어하는 동작을 나타낸다.

표 1은 설계 및 제작된 볼 로봇의 구동부, 제어

부, 통신부의 사양을 나타내며, 그림 8은 설계 과정을 통해 제작된 볼 로봇을 나타낸다.

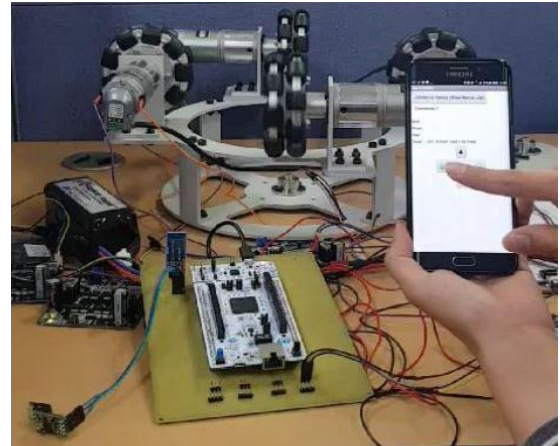


Fig. 7. Motor control by wireless communication of ball robot. 그림 7. 볼 로봇의 무선통신을 통한 모터제어

Table 1. Specifications of driving part, control part, and wireless communication part of ball robot.

표 1. 볼 로봇의 구동부, 제어부, 통신부 사양

Parameters		Value	Unit
Driving part	Rated torque	9.2	kgf-cm
	Rated speed	152	rpm
	Rated voltage	24	V
	Reduction rate	1/49	-
Control part	Encoder resolution	512	ppr
	Roll/Pitch resolution	0.01	deg
	Sampling time	0.125	msec
Wireless communication part	PWM frequency	20	kHz
	Communication rate	19,200	bps
	Display time	0.125	msec

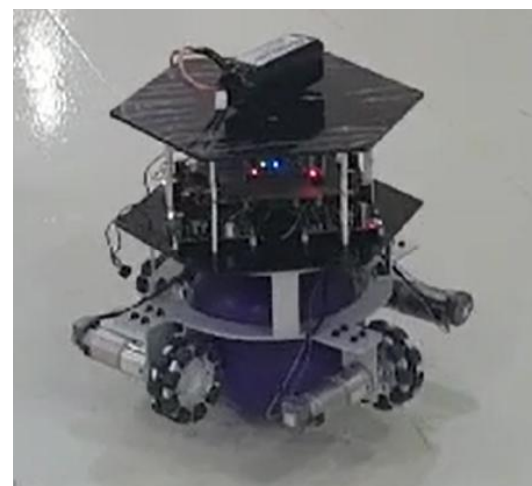


Fig. 8. Manufactured ball robot. 그림 8. 제작된 볼 로봇

VI. 실험 및 고찰

제작된 볼 로봇과 스마트폰 어플리케이션을 이용하여 자세제어 및 주행제어 성능을 평가하였다. 그림 9는 자세제어 실험에서 AHRS센서를 통해 측정된 Roll 및 Pitch의 각도 오차를 나타낸다. Roll 각도 오차는 ± 0.8 도 이내에서 제어됨을 알 수 있으며, Pitch 각도 오차는 ± 0.7 도 이내에서 제어됨을 알 수 있다. 그림 9(b)에서 Pitch 각도 오차가 +방향으로 편향되게 측정되는데, 이는 볼 로봇의 질량중심이 편심되어 있기 때문으로 예측된다.

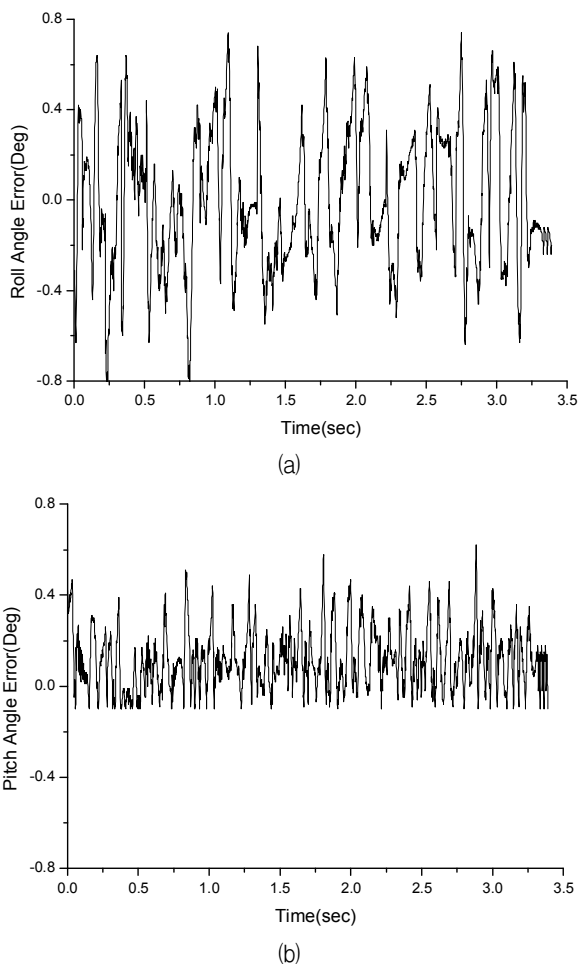


Fig. 9. Balancing control error of ball robot:
(a) roll angle, (b) pitch angle.
그림 9. 볼 로봇의 자세제어 오차;
(a) roll 각도, (b) pitch 각도

그림 10은 스마트폰 어플리케이션을 이용하여 무선통신으로 볼 로봇의 주행제어 시에 Roll 및 Pitch 오차 각도를 측정하는 실험장치를 나타낸다.



Fig. 10. Balancing control error measuring equipment by wireless communication of ball robot.

그림 10. 볼 로봇의 무선통신 자세제어 오차 측정 장치

그림 11은 일정거리 주행 시에 발생하는 위치 오차를 측정하기 위한 실험장치를 나타낸다. X축 방향으로 1m를 주행한 후 멈추고, x축 방향 및 y축 방향의 위치오차를 측정하였다.

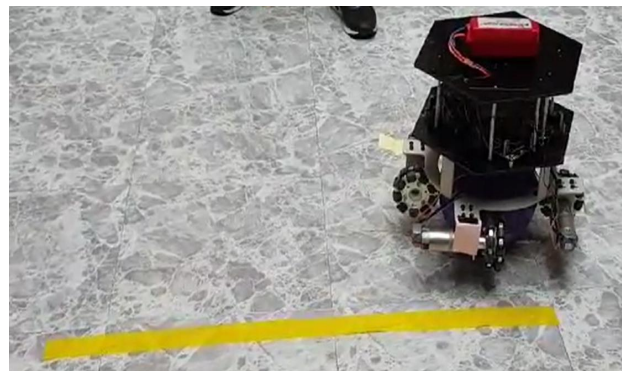


Fig. 11. Driving control error measurement by wireless communication of ball robot.

그림 11. 볼 로봇의 주행제어 오차 측정

그림 12는 1m 주행제어 시에 발생하는 주행 위치 오차를 나타낸다. 주행 위치 오차는 x축 방향으로 ± 0.1 m이고 y축 방향으로 ± 0.08 m임을 확인하였다. 주행 제어 시에 볼 로봇의 위치에 대한 정보는 모터에 장착된 엔코더의 값을 이용하게 되는데, 절대좌표계에서 위치를 측정하는 센서를 사용하지 않고 모터에 부착된 엔코더를 사용함으로써 옴니휠과 볼링공 사이의 미끄러짐이나 볼링공과 지면과의 미끄러짐이 오차로 나타날 수 있다. 주행 제어 시에 위치 오차의 발생 원인을 최소화하기 위해서는 볼 로봇의 절대 위치를 측정할 수 있는 센서의 적용이 필요하다.

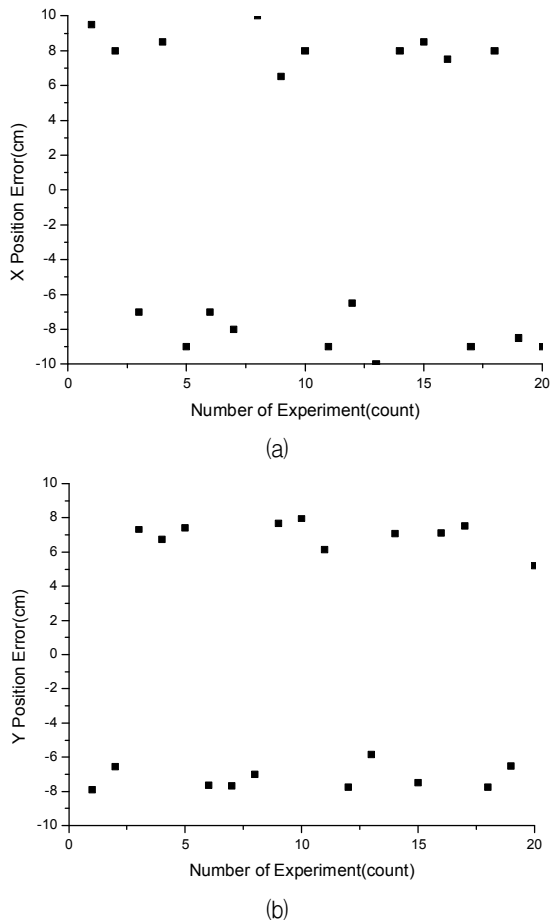


Fig. 12. Driving control error of ball robot:
(a) x position, (b) y position.

그림 12. 볼 로봇의 주행제어 오차; (a) x 위치, (b) y 위치

V. 결론

본 연구에서는 4쌍의 옴니 휠이 부착되는 모터, 볼링공, PID 제어를 사용하는 제어기, 스마트폰 어플리케이션으로 구성되는 무선통신을 이용하여 자세제어와 주행제어에 대한 명령 입력과 출력 모니터링이 가능한 볼 로봇을 설계 및 제작하고, 자세제어 및 주행제어 실험을 통해 볼 로봇의 제어 성능을 확인하였다. 볼 로봇의 구동부 설계에서 4 쌍의 옴니 휠을 90도 간격으로 배치하여 구동 축과 차체를 정렬하고, AHRS 센서의 축 방향과 차체의 x, y축 방향이 정렬이 되도록 설계하여 Roll 자세제어 및 y축 위치제어 시스템과 Pitch 자세제어 및 x축 위치제어 시스템을 서로 분리하였다. 이를 통해 복잡한 연산 과정 없이 각 구동 축에 대한 PID 제어신호를 생성할 수 있었다. 제작된 볼 로봇과 스마트폰 어플리케이션을 이용하여 무선통신으로

자세제어 및 주행제어를 수행하였다. 실험을 통해 Roll 각도 오차 ± 0.8 도 이내, Pitch 각도 오차 ± 0.7 도 이내에서 제어됨을 확인하였으며, 1m 주행제어에 대해 x축 방향 위치오차 ± 0.1 m 이내, y축 방향 위치오차 ± 0.08 m 이내에서 제어됨을 확인하였다. 절대좌표계에서 위치를 측정하는 센서를 사용하지 않고 모터에 부착된 엔코더를 사용함으로써 옴니 휠과 볼링공 사이의 미끄러짐이나 볼링공과 지면과의 미끄러짐이 주행제어에서 오차를 유발하는 요인으로 확인되었다.

향후 연구에서 볼 로봇의 절대 위치를 측정할 수 있는 센서의 적용을 통해 주행제어 오차의 발생 요인을 배제하고 주행 제어 성능 확인 실험을 수행할 계획이다.

References

- [1] J. H. Park, S. C. Kim, and S. Y. Yi, "Development of Stable Ballbot with Omnidirectional Mobility," *Int. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 19, No.1, pp.40-44, 2013. DOI: 10.5302/J.ICROS.2013.19.1.040
- [2] S. I. Hwang, H. M. Ha, and J. M. Lee, "Balancing and Driving Control of a Mecanum Wheel Ball Robot," *Journal of Institute of Control Robotics and Systems*, Vol.21, No.4, pp.336-341, 2015. DOI: 10.1109/URAI.2015.7358812
- [3] J. H. Yeon, Y. C. Ha, E. H. Kong, M. Y. Chung, and M. J. Chung, "Balancing Ball Robot Movable as Any Direction," *Proc. of the KSME 2017 Annual Meeting*, p.244, 2017.
- [4] M. J. Chung and J. H. Lim, "Design of Gyroscope System for Increase of Balancing Control Performance of Ball Robot," *Proc. of the KSME 2018 Annual Meeting*, p.280, 2018. DOI: 10.1177/1729881418770865
- [5] J. H. Yoon and M. J. Chung, "A Method for Attitude Control Based on a Mathematical Model for an Inverted Pendulum-Type Mobile Robot," *Int. Journal of Electrical and Computer Eng.*, Vol.6, No.1, pp.198-204, 2016. DOI: 10.11591/ijece.v6i1.
- [6] M. J. Chung, "Ball Robot using Gyroscope

System,” *Proc. of the KSME 2019 Annual Meeting*, pp.2056–2057, 2019.

[7] S. Y. Lee, K. M. Lee, H. E. Lee, and M. J. Chung, “Balancing Ball Robot having Driving Function,” *Proc. of the KSME 2019 Annual Meeting*, pp.2035–2037, 2019.

[8] M. J. Chung, “Controller Design for Performance Improvement in the Balancing Control of Ball Robot,” *The 6th Japan–Korea Joint Symposium on Dynamix and Control*, pp.183–184, 2019.

[9] Y. Yamamoto, “NXT Ballbot Model-based Design: Control of Self-balancing on a Ball, built with LEGO Mindstorm NXT,” Cybernet Systems Co., Ltd., 2009.

BIOGRAPHY

Seung-Yeol Lee (Member)



2020 : BS degree in Mechatronics Engineering, Korea Polytechnic University.

Myung-Jin Chung (Member)



1989 : BS degree in Mechanical Engineering, Hanyang University.
1991 : MS degree in Production Engineering, KAIST.
2002 : PhD degree in Mechanical Engineering, KAIST.

1989~1997 : Research Engineer, Hyundai Electronics.
1997~2004 : Researcher, Hynix Semiconductor.
2004~current : Professor, Dept. of Mechatronics Engineering, Korea Polytechnic University.