

전방향성을 갖는 네 바퀴 이동로봇

강수민¹, 성영휘^{1*}

¹금오공과대학교 전자공학부

A Four-Wheeled Mobile Robot with Omnidirectionality

Su Min Knag¹, Young Whee Sung^{1*}

¹School of Electronics, Kumoh National Institute of Technology

요약 전통적인 자동차 또는 전통적인 두 바퀴형 차동 구동 로봇은 기구적인 구조 때문에 이동 동작에 제한이 있을 수밖에 없다. 자동차 산업에서 내연기관 자동차가 전기차로 빠르게 전환되면서 자동차에 로봇 공학 기술의 적용이 활발하게 모색되고 있다. 로봇 공학 분야에서는 이동체의 자세를 변화시키지 않고도 다양한 방향으로 이동할 수 있는 전방향 이동로봇에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며 주목할 만한 연구 결과들도 많다. 하지만 대부분의 연구에서 이와 같은 전방향 이동을 구현하기 위해서는 메카넘휠 등과 같은 특수한 형태의 바퀴를 사용해야 하는 제한점이 있다. 우리는 전방향 이동을 위한 특수한 바퀴를 사용하지 않고도 전방향성을 구현할 수 있는 두 바퀴를 갖는 모듈형 로봇을 제안하였다. 본 논문에서는 모듈형 로봇 2대를 전후로 결합하여 네 바퀴를 갖는 전방향 이동로봇을 새로이 제안하였다. 제안된 로봇은 차동 구동 방식의 이동로봇으로 전자 브레이크를 사용하여 바퀴부와 로봇 몸체부를 선택적으로 분리, 결합하는 방식을 사용하며 두 개의 절대치형 엔코더와 네 개의 증분형 엔코더를 사용하여 로봇 바퀴부의 위치와 로봇 바퀴의 속도를 제어한다. 제안된 로봇은 일반적인 타이어 바퀴를 채택하고도 전방향 이동이 가능하다. 로봇을 실 제작하여 대각선 궤적과 정사각형 궤적에서의 주행 실험을 통하여 제안된 로봇의 유용성과 안정성을 검증하였다.

• **주제어** : 4 바퀴 로봇, 이동 로봇, 모듈형 로봇, 전방향성, 차동 구동

Abstract Traditional automobile or 2-wheeled robot have limitations on mobility because of their mechanical structure. As traditional automobile is being replaced by electric cars, robot technology is applied to the car industry. In robotics, many researchers worked on omnidirectional mobile robot and produced lots of noticeable results. However in many of the results, specialized wheels such as Mecanum wheels are required. That imposes restrictions on robot speed and outdoor driving. We proposed a 2-wheeled modular robot that has omnidirectional mobility without using specialized wheels. In this paper, we propose a 4-wheeled omnidirectional mobile robot that consists of those two modular robots. The proposed robot adopts electric brakes to combine wheel housings and the robot body or to separate wheel housings from the robot body. Two absolute-type encoders and four incremental encoders are used to control the position of the wheel housing and velocities of the wheels. The proposed robot has omnidirectional mobility and can move fast and outdoor with normal tire wheels. We implemented the proposed robot and the feasibility and stability of the robot is verified by two separate experiments.

• **Key Words** : 4-wheeled robot, Mobile robot, Modular robot, Omnidirectional, Differential drive

Received 16 March 2022, Revised 26 March 2022, Accepted 28 March 2022

* **Corresponding Author** Young Whee Sung, School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 1 Ynagho-dong, Gumi, Gyeongbuk, 730-701, Korea. E-mail: ywsung@kumoh.ac.kr

I. 서론

전통적인 자동차는 주로 에커만 조향(Ackerman Steering)원리를 기반으로 한 조향 방식을 채택해왔다. 에커만 조향방식의 한계는 이동 동작에 제약이 있다는 것이다. 근래에 들어 내연기관 자동차는 빠르게 전기 차로 전환되고 있으며 이에 따라 다양한 형태의 이동 방식이 가능해지고 있으며 특히 전방향 이동에 대한 요구가 많아지고 있다[1-5]. 로봇공학 분야에서는 전방향 이동과 관련하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 전방향 이동이란 이동체의 방향 전환 없이도 2차원 평면 상의 모든 방향으로 즉각적인 이동이 가능한 것을 말한다. 로봇공학 분야에서의 전방향 이동은 대부분 메카넘휠(Mecanum wheel)[6], 직교휠(Orthogonal wheel)[7] 등과 같은 특수한 형태의 바퀴를 이용해서 이루어지고 있다. 이러한 특수 바퀴들을 채택한 이동체의 경우 바퀴의 구조적인 특징으로 인하여 고속 주행이 어렵고, 실외 주행에 제약을 갖게 된다[8]. 이러한 제약을 극복하기 위하여 차동 구동 바퀴를 갖는 두 바퀴 이동로봇 모듈이 제안되었다[9]. 본 논문에서는 기존에 제안된 로봇 모듈 두 개를 부착하여 일반적인 타이어 바퀴를 장착하고도 전방향 이동이 가능하며 고속 주행과 실외 주행이 가능하고 주행 안정성이 향상된 새로운 형태의 네 바퀴 로봇을 제안한다.

II. 로봇 시스템

2.1 기구부 구성

그림 1은 로봇 모듈의 외형을 나타낸다. 이 로봇 모듈의 기구적인 구성은 바퀴부와 몸체부의 두 부분으로 되어 있다. 바퀴부는 두 개의 바퀴와 이를 각각 구동하는 두 개의 모터, 그리고 모터와 바퀴가 장착되어 있는 하우징(housing), 이 하우징의 중앙에 부착된 샤프트(shaft)로 이루어진다. 바퀴부를 제외한 나머지 부분들이 몸체부이다. 바퀴부의 중심에는 수직 방향으로 샤프트가 설치되어있는데 이 바퀴부 샤프트는 그림 2에서와 같이 바퀴부의 서스펜션에서 시작되어, 몸체부의 베어링 그리고 전자브레이크 순서로 연결되고 마지막으로 로봇 몸체부의 최상단에 부착된 절대치(absolute-type) 엔코더까지 커플링을 거쳐서 연결되어 있다.

전자브레이크는 그림 3과 같이 아마추어 허브, 아마추어, 그리고 스테이터로 구성된다.

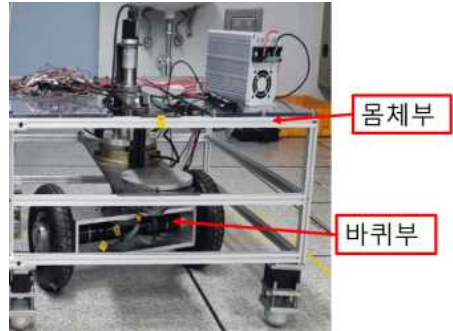


Fig. 1. The proposed robot module



Fig. 2. Components of the robot module



Fig. 3. Electric brake

전원이 공급되면 스테이터는 코일에 의해 전자석이 되어 아마추어 허브와 강하게 고정되어 있기 때문에 아마추어는 회전할 수 없게 된다. 따라서 전자브레이크에 연결되어 있는 샤프트 또한 회전할 수 없어 고정되고 로봇 몸체부와 바퀴부가 강하게 결합된다. 반대로 전원을 공급하지 않으면 아마추어와 스테이터는 떨어져 있게 되어 아마추어는 자유로운 회전이 가능해진다. 즉, 전자브레이크를 걸면 모듈 로봇은 일반적인 차동 구동로봇과 동일한 동작을 수행할 수 있고 전자브레이크를 풀면 바퀴부만을 독립적으로 회전시킬 수 있다.

본 논문에서 제안된 이동로봇은 그림 4에서와 같이 모듈 로봇 두 대가 연결된 구조로 앞쪽에 위치한 로봇이 전면부, 뒤쪽에 위치한 로봇이 후면부이다.



Fig. 4. The proposed 4-wheeled mobile robot

제안된 로봇은 그림 5에서와 같이 전방향 이동 동작 외에도 다양한 회전 동작을 만들어 낼 수 있게 된다. 그림 5에서 정사각형은 로봇 모듈의 몸체부를, 정사각형 내의 직사각형은 로봇 모듈의 바퀴부를 나타낸다. 그림에서와 같이 두 개의 바퀴부를 전자 브레이크를 사용하여 두 개의 로봇 몸체부와 선택적으로 연결, 분리함에 따라 다양한 이동 동작을 만들어 구현할 수 있으며 네 바퀴 로봇의 중심, 전면부의 중심, 후면부의 중심 등 다양한 회전 중심에 대한 회전 동작도 구현할 수 있다.

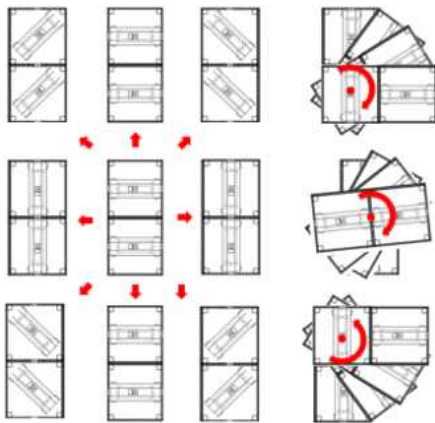


Fig. 5. Various motions of the proposed robot

2.2 제어기 및 제어

제안된 로봇의 제어부는 그림 6과 같다. 제어기의 프로세서는 STM32F446ZE ARM Cortex-M4 32비트 마이크로컨트롤러이며 상용의 누클레오 보드 F446ZE를

사용하였다. 네 개의 바퀴를 구동하기 위해서 맥스사의 200W급 DC 모터 RE50 네 개를 사용하였다. 모터에는 26:1의 기어비를 갖는 GPC52 기어헤드와 1회전당 500펄스를 발생하는 HEDL5540 엔코더가 부착되어 있다.

모터 제어를 위한 모터 드라이브로는 상용의 문위커 MW-MDC24D200D를 사용하였다. 이 드라이브는 두 개의 DC 모터를 구동할 수 있다. 따라서 전면부와 후면부, 네 개의 바퀴 구동을 위하여 두 개의 드라이브를 사용하였다. 전자 브레이크는 동작 전압 24V, 최대 회전 속도 3,000rpm의 성능을 가지며 절대치 엔코더는 10비트의 분해능을 갖는 축형 싱글-턴 로터리 엔코더를 사용하였다. 즉 절대치 엔코더는 360°를 1024 분할하며 출력각은 0.3515°이다. 또한 스마트폰을 이용하여 이동로봇을 제어하기 위해 블루투스 모듈이 장착되어있다.



Fig. 6. Controller of the proposed robot

제안된 로봇에서는 먼저 이동하고자 하는 방향으로 로봇의 바퀴부만을 해당 방향으로 위치시키는 것이 필요한데 이를 위해 그림 7과 같이 PID 위치 제어를 수행한다.

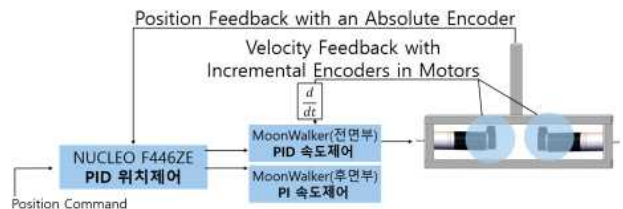


Fig. 7. PID position control

사용자가 위치 명령을 제어기로 전송하면 PID제어에 의해 필요한 속도 명령을 모터 드라이버로 전송하게 된다. 바퀴부의 위치는 로봇의 최상단에 위치한 10

비트 분해능의 절대치 엔코더의 값을 피드백 받아 감지하게 된다. 모터 드라이버 내부의 제어기는 그림 8과 같다. 전류 제어기가 가장 내부에 위치하며, 속도 제어기와 위치 제어기가 차례로 위치한다. 모터의 속도는 모터의 회전축에 부착된 증분형(incremental-type) 엔코더를 통하여 감지한다.

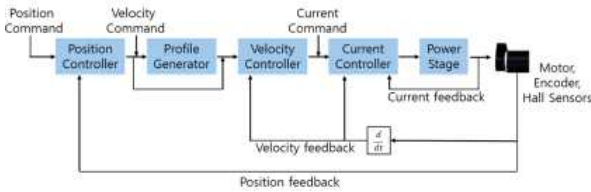


Fig. 8. PID velocity control

로봇의 구동을 위한 과정을 요약하여 나타내면 그림 9와 같다.

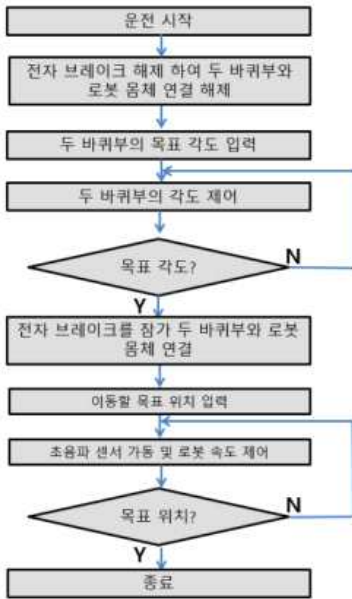


Fig. 9. Sequence of a robot motion

2.3 로봇 위치 및 방향

제안된 로봇의 이동 성능을 검증하기 위해서는 로봇의 이동 후 위치 및 방향을 파악할 수 있어야 한다. 이를 위해서 그림 10과 같이 전면부 모듈 로봇의 앞 중앙과 각 모듈 로봇의 좌측면 중앙에 초음파 센서를 부착하였다. 그림에서 d_1, d_2, d_3 는 각각 초음파 센서

에서 측정된 벽까지의 거리를 나타낸다. h 는 측면 초음파 센서들 사이의 거리, L 는 로봇 모듈 몸체부의 길이를 나타낸다. 그림 10에서와 같이 좌표계를 설정하였을 때, 로봇의 위치를 나타내는 좌표 x, y 와 방향을 나타내는 ϕ 는 기하학적 관계로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi = \text{atan}\left(\frac{d_3 - d_2}{h}\right) \quad (1)$$

$$x = \left(\frac{-d_2 - d_3 - L}{2}\right) \cos(\phi), y = \left(d_1 + \frac{L}{2}\right) \cos(\phi) \quad (2)$$

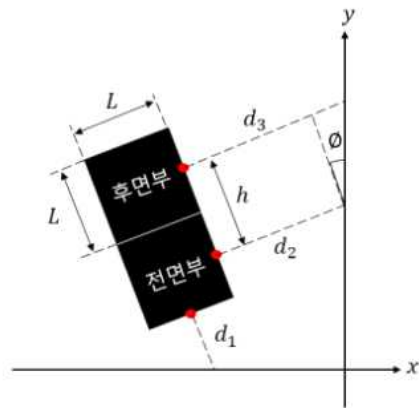


Fig. 10. The position and orientation of the robot

III. 실험

제안된 로봇의 전방향 이동성을 검증하기 위해 두 가지의 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험은 2.7m 사각형의 대각선 방향으로 이동 후 제 자리로 돌아오는 왕복 운동 실험으로 두 번의 대각선 방향 이동을 하게 된다. 이동이 완료된 후 출발 시와 도착 시 로봇의 위치와 방향을 비교한다.

그림 11은 대각선 왕복 이동에서 로봇의 동작을 순서대로 나타낸 것이다. 그림에서 (a)는 초기 위치이며 (b)에서 바퀴부가 정사각형의 대각선을 이동하기 위해 +45° 회전한다. 그림에서 로봇의 우측이 전면부, 좌측이 후면부이다. (c)에서는 로봇이 우측 뒤 방향으로 대각 이동하고 있으며 (d)에서는 목표 지점에 도달하여 정지한 상태이다. (e)에서 초기 위치로 돌아가기 위해 좌측 앞 방향으로 대각 이동하고 있으며 (f)에서는 최종 복귀 위치에 도달한 상태를 나타낸다.

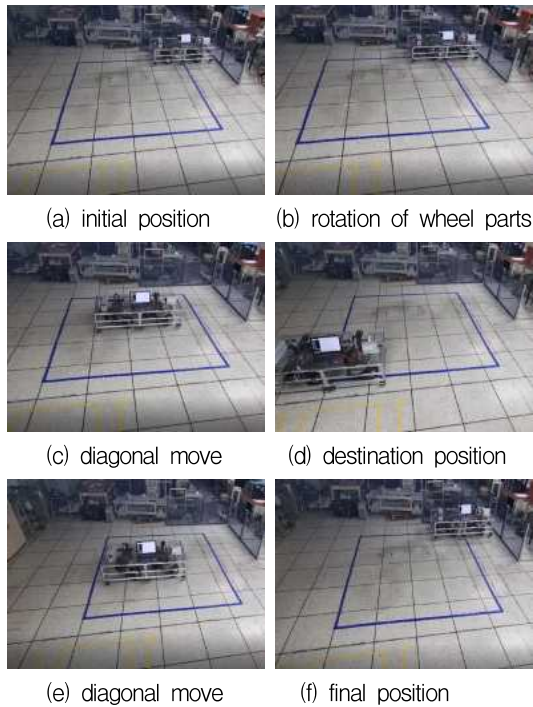
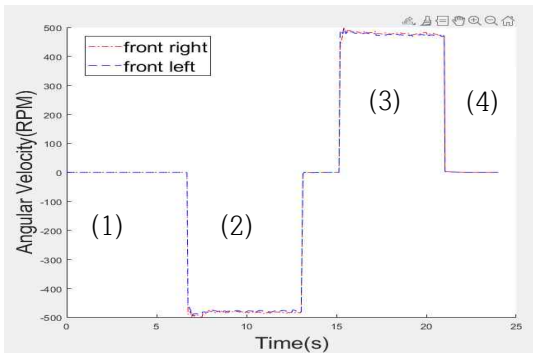
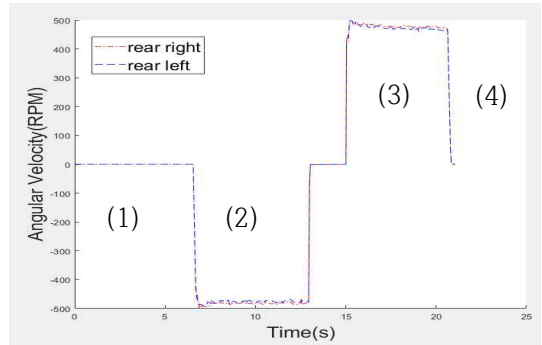


Fig. 11. Experiment for diagonal move

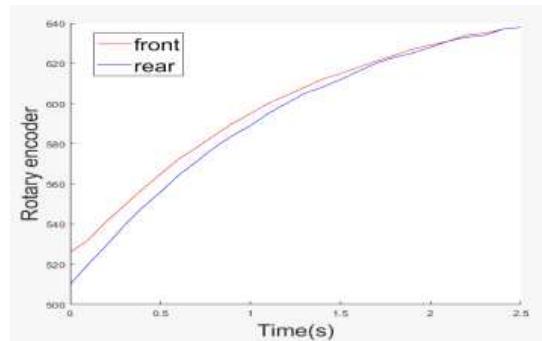
그림 12는 로봇 이동 시 바퀴의 각속도와 절대치 엔코더의 값, 즉 바퀴부의 방향을 나타낸다. 그림 12의 (a)에서 front right, front left는 전면부 오른쪽 모터와 왼쪽 모터의 각속도를 나타내고 (b)에서 rear right와 rear left는 후면부 오른쪽, 왼쪽 모터의 각속도를 나타낸다. 그림에서 (1) 부분은 바퀴부 회전을 하는 과정이고 (2)와 (3)은 대각주행과 복귀 주행 과정이다. 로봇의 초기 위치는 -624.9mm , 974.6mm , 방향은 0.4° 이고 최종 위치는 -651.9mm , 996.6mm , 방향은 0.57° 로 x 축 위치 오차는 27.0mm , y 축 방향 오차는 22.0mm , 방향 오차는 0.17° 정도로 작다.



(a) wheel velocities of the front module



(b) wheel velocities of the rear module



(c) orientations of the wheel parts

Fig. 12. Velocities of wheels and orientations of wheel parts

그림 12의 (c)는 전면부 바퀴부와 후면부 바퀴부와 연결되어 있는 절대치 엔코더의 값으로 바퀴부의 회전 각도를 나타낸다.

두 번째 실험은 정사각형 궤적을 따라 이동하는 실험으로 로봇의 이동 과정은 그림 13에 나타내어져 있다. 그림 13의 (a)는 초기 위치이고 (b)는 후진을 하는 과정이다. (c)에서 후진을 완료한 후에 (d)에서 우측으로 이동하는 우진을 수행한다. (e)에서 우진을 종료하고 (f)에서 직진을 수행한다. (g)에서 직진을 종료하고 (h)에서 좌측으로 이동하는 좌진을 수행한다. (i)는 초기에 출발하였던 초기 위치로 복귀한 상태를 나타낸다.



(a) initial position

(b) backward move

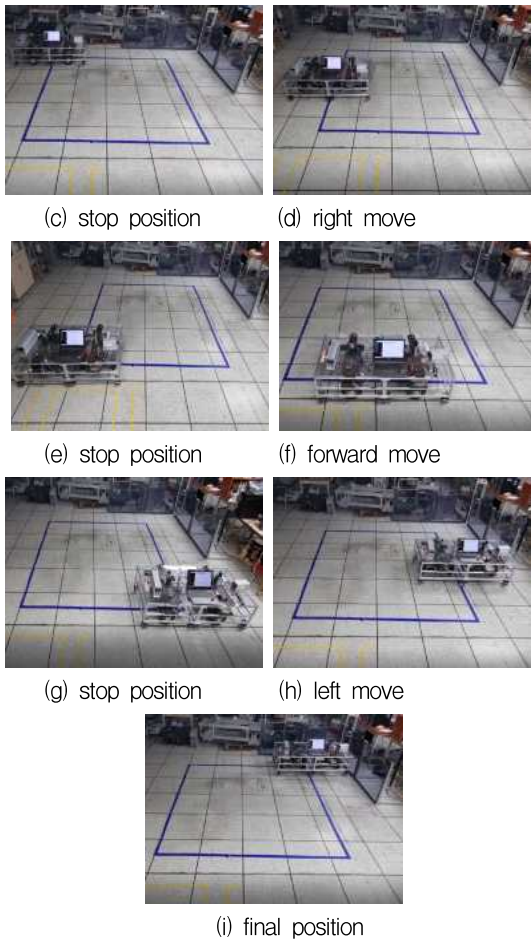


Fig. 13. Experiment for a square path

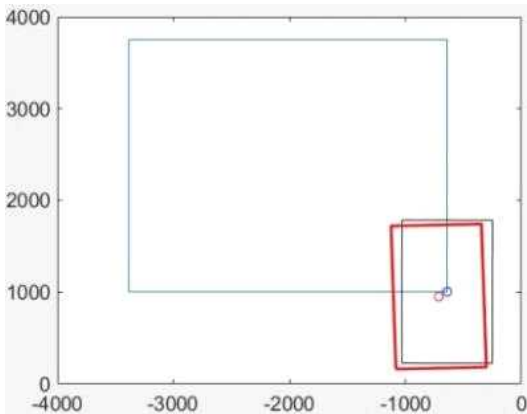


Fig. 14. Robot poses for the initial position and the final position

사각형 궤적 주행 실험에서 로봇의 초기 위치는

-339mm, 1005mm이고, 방향은 -0.05° 이다. 주행을 완료한 후 로봇의 최종 위치는 -712.7mm , 952.4mm 이며 방향은 -1.58° 이다. 따라서 x 축 위치 오차는 73.7mm , y 축 방향 오차는 52.6mm , 방향 오차는 1.53° 이다. 이는 초음파 센서의 정밀도, 바닥 면의 상태, 로봇이 오차 수정을 위한 외부 센서를 사용하지 않았다는 사실 등을 고려하였을 때 감내할 수 있는 정도의 오차이다. 그림 14에서 중앙의 정사각형은 로봇의 이동 궤적을 나타내고 아래 우측 일반 직사각형은 로봇의 초기 자세를, 붉은 직사각형은 로봇의 최종 자세를 나타낸다.

IV. 결론

본 논문에서는 메카닉 휠과 같은 특수 바퀴를 사용하지 않고도 전방향 이동 기능은 물론 다양한 회전 기능을 갖는 이동로봇을 제안하였다. 제안한 로봇은 전자브레이크를 사용하여 로봇의 바퀴부와 몸체부를 선택적으로 결합 또는 분리하여 이동할 수 있는 모듈형 로봇 두 대를 부착한 형태로 네 개의 바퀴를 갖추고 있다. 제안한 로봇을 실제로 제작하여 전방향 이동성과 이동 동작의 용이성을 검증하기 위하여 대각선 이동 실험과 사각형 궤적 이동 실험을 진행하였다. 실험 결과 약간의 위치 오차와 방향 오차가 발생하였으나 로봇의 위치와 방향을 추정하기 위해 사용한 초음파 센서의 정밀도가 높지 않았고 또한 외부 센서를 사용하지 않고 추측 항법(Dead-reckoning)으로만 이동하였음을 감안하면 감내할 수 있는 정도의 오차라고 할 수 있다. 제안된 로봇은 전방향 이동성 및 다양한 회전 기능을 활용하여 전통적인 자동차 또는 차동 구동 이동로봇에 비해 직관적이고 용이하게 로봇의 경로를 계획하여 이동 할 수 있다는 장점을 가졌다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음(202001720001).

REFERENCES

- [1] C. Buhler, R. Hoelper, H. Hoyer, W. Humann, "Autonomous robot technology for advanced wheelchair and robotic aids for people with disabilities," *Robotics and Autonomous Systems*, 14, pp. 213-222, 1995
- [2] Y. J. Choi, B. K. Kim, T. Y. Do, J. R. Yoo, "Intention Reading for Operation of a Motorized Skateboard with Mecanum Wheels," *Proc. of ICROS Annual Conference 2013*, pp.110-111, 2013.
- [3] A. Cheong, M. Lau, E. Foo, J. Hedley, J. W. Bo, "Development of a Robotic Waiter System," *IFAC-PapersOnLine*, Volume 49, Issue 21, pp. 681-686, 2016
- [4] K. S. Yoon, M. S. Lee, Y. W. Sung, "A study on an omni-directional mobile robot for moving a double-parked car," *The Trans. of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 67, no. 3, pp. 440-447, 2018.
- [5] KUKA, <https://www.kuka.com>
- [6] J. Kim, H. S. Kim, Y. H. Kim, S. Y. Jung, "Design of a stair cleaning robot using mecanum wheels," *Proc. of ICROS Annual Conference 2013*, pp.441-442, 2013.
- [7] G. Mourioux, C. Novales, G. Poisson, P. Vieyres, "Omni-directional robot with spherical orthogonal wheels: concepts and analyses," *2006 IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3374-3379, May, 2006.
- [8] N. Ushimi, M. Yamamoto, and A. Mohri, "Two wheels caster type odometer for omni-directional vehicles," *Proc. of the 2003 IEEE International Conf. on Robotics & Automation*, pp. 497-502, Sep., 2003.
- [9] M. C. Kim, Y. W. Sung, "A Differential Drive Mobile Robot with Omnidirectionality," *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers* 69(5), pp. 698-705, 2020.

저자 소개

강 수 민 (Su Min Kang)



2020년 2월 : 금오공과대학교
전자공학부(공학사)
2022년 3월~현재 : 금오공과대학교
전자공학과 석사과정
관심 분야: 지능로봇, 임베디드
시스템

성 영 휘 (Young-Whee Sung)



1991년 2월 : KAIST
전기및전자공학과(공학석사)
1996년 2월 : KAIST
전기및전자공학과(공학박사)
1998년 3월~현재 : 금오공과대학교
전자공학과 교수
관심 분야: 지능로봇, 지능형자동차