

# 볼 밸런싱 로봇에 관한 연구

김지태\* · 김대영\* · 이원준\* · 진태석\*\*

\*동서대학교

## A Research on Ball-Balancing Robot

Ji-Tae Kim\* · Dae-young Kim\* · Won-Joon Lee\* · Tae-Seok Jin\*\*

\* Dongseo University

E-mail : dufqkek100@naver.com\* tsjin69@gmail.com\*\*

### 요 약

본 논문의 내용은 기존의 차륜식 로봇과는 차별화된 전-방향 구동이 가능한 모듈 개발을 통하여, 기존 모듈의 이동로봇이 가지는 단점인 측면주행성능 저하, 단순 작업주행 경로, 회전-직진 반복 주행으로 인한 불필요한 주행소요시간의 증대 등의 단점을 극복할 수 있을 것이다.

볼-밸런싱 로봇을 구동하기 위한 전-방향 구형휠 구동모듈은 3개의 로터캐스터를 이용한 로봇의 전-방향으로 구동하기 위한 동력전달 메커니즘과 주행을 위한 알고리즘 개발이 요구된다. 3DoF(축) 전-방향 이동 알고리즘이 내장된 드라이버가 모듈에 내장되고, 주행 방향 및 속도를 위한 3DoF(축)의 구동 모터 모듈이 장착된다. 이동 메커니즘으로는 각 구동바퀴의 회전 벡터 합에 따른다. 두 개 또는 세 개의 구동바퀴의 회전과 벡터 합에 따른 다양한 이동방향을 만들어 낼 수 있다. 각 구동바퀴의 회전 벡터장의 여하에 따라 다른 방향으로도 이동이 가능하다.

전-방향 이동을 위한 보다 혁신적인 전-방향 구형휠 구동모듈이 개발되면, 이동로봇의 구동부에 사용되어 로봇의 성능을 기술적으로 좀 더 향상시킬 수 있으며, 구동모듈이 적용된 전-방향로봇 플랫폼을 통하여 기존 차륜식 로봇의 경우 각종 환경에 대한 저항성으로 인해 연속 직진 성능이 저하되는 단점을 극복할 수 있어서 미주, 유럽과 같은 환경에서 적용될 수 있는 청소로봇, 이동로봇뿐만 아니라 전-방향 주행 기능이 요구되는 안내로봇, 탑승형 로봇, 이동수단 등에 필수적인 기술이 될 것이고 지능형서비스로봇 시장과 미래형 자동차시장의 확대에 기여할 수 있을 것이다.

### ABSTRACT

The purpose of this paper is to develop a module capable of all-directional driving different from conventional wheeled robots, and to solve the problems of the conventional mobile robot with side driving performance degradation, It is possible to overcome the disadvantages such as an increase in the time required for the unnecessary driving.

The all - direction spherical wheel drive module for driving a ball - balancing robot is required to develop a power transfer mechanism and a driving algorithm for driving the robot in all directions using three rotor casters. 3DoF (Axis) A driver with built-in forward motion algorithm is embedded in the module and a driving motor module with 3DoF (axis) for driving direction and speed is installed. The movement mechanism depends on the sum of the rotation vectors of the respective driving wheels. It is possible to create various movement directions depending on the rotation and the vector sum of two or three drive wheels. It is possible to move in different directions according to the rotation vector field of each driving wheel.

When a more innovative all-round spherical wheel drive module for forward movement is developed, it can be used in the driving part of the mobile robot to improve the performance of the robot more technically, and through the forward-direction robot platform with the drive module Conventional wheeled robots can overcome the disadvantage that the continuous straightening performance is lowered due to resistance to various environments. Therefore, it is necessary to use a full-direction driving function as well as a cleaning robot and a mobile robot applicable in the Americas and Europe It will be an essential technology for guide robots, boarding robots, mobile means, etc., and will contribute to the expansion of the intelligent service robot market and future automobile market.

### 키워드

Ball-Balancing Robot(볼 밸런싱 로봇), 3DoF(3축), All-direction(전-방향), Mechanism(메카니즘)

## I. 서 론

최근 가정용 로봇 중에서 청소로봇이 대표적으로 일상생활에 많은 보급이 이뤄지고 있다. 이러한 생활공간에서의 이동주행을 실현하기 위해서는 다양한 이동장치가 필요하게 된다. 특히, 좁은 환경에서 이동 로봇이나 여러 대에서 함께 작동하는 이동로봇에는 높은 기동성이 요구된다. 다리형 이동로봇은 그 제어가 복잡한데 비하여 차륜형 이동 로봇은 기구가 간단하고 제어가 용이하나 평지 주행에 제한되어 있다. 그런데 대부분의 전통적인 차륜형 이동로봇은 비홀로노믹 구조로 인한 자유자재로운 기동성을 갖지 못하고 경로 계획이 복잡하다. 그래서 높은 이동성을 가질 차륜형 이동 로봇으로 홀로노믹 구조를 갖는 전-방향 이동 로봇이 주목 받게 되었다. 전-방향 이동 로봇에서는 평면 위를 이동하는데 3 자유도 (병진 2 자유도, 선회 1 자유도)가 필요하다. 지금까지 개발된 비홀로노믹 전-방향 이동 로봇은 몇 가지 유형으로 분류 수 있지만 각각 구동기구 및 제어 측면에서 단점이 있었다. 본 연구에서는 홀로노믹 전-방향 이동 로봇은 한 방향으로만 구동력을 발생 할 수 있는 패시브 롤러를 갖는 특수 바퀴 (혹은 크롤러) 구조를 제안하고자 한다. 장착된 세 개의 특수 바퀴를 120도마다 배치하고 각 바퀴를 각각의 액추에이터로 구동하는 방식을 적용하였고 로봇의 위치이동은 세 액추에이터의 회전 운동이 각 이동 자유도 방향의 운동에 상호 간섭으로 작용하게 된다. 그래서 본 논문은 볼 벨런싱 로봇에 대한 이동 기구학을 제시하고, 실험 결과를 제시한다.

## II. 이동 메카니즘

볼 벨런싱 로봇을 구동하기 위한 전-방향 구형휠 구동모듈은 3개의 로터캐스터를 이용한 로봇의 전-방향으로 구동하기 위한 동력전달 메커니즘과 주행을 위한 알고리즘 개발이 요구되며, 3축 전-방향 이동 알고리즘이 내장된 드라이버가 모듈에 내장되고, 주행 방향 및 속도를 위한 3축 구동 모터 모듈이 장착된다. 각 구동바퀴의 회전 벡터 합에 따른 이동 메커니즘을 제시한다.

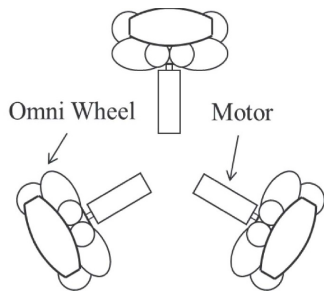


그림 1. 전-방향 구형 휠 구성

두 개 또는 세 개의 구동바퀴의 회전과 벡터 합에 따른 다양한 이동방향을 만들어 낼 수 있다. 본 절에서는 360° 전-방향 중에서 대표적인 이동 방식의 예를 나타내었지만, 각 구동바퀴의 회전 벡터장의 여하에 따라 다른 방향으로도 이동이 가능하다.

### 1) 전후 이동

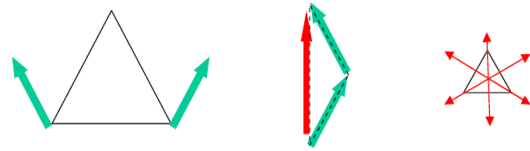


그림 2. 전-후 방향 이동 메커니즘

3개의 구동바퀴 중 2개를 사용하여 상하 방향으로 이동하는 예를 그림 2 과 같이 나타내었다. 진행 방향에 직교하는 면에 접근하면서 구동바퀴를 진행 방향으로 회전함으로써 이동이 이뤄지게 된다. 이와 동일한 방식으로 그림 2 과 같이 전후, 좌우 대각선 상하 방향으로 총 8방향으로 이동이 가능하다.

### 2) 좌우 이동

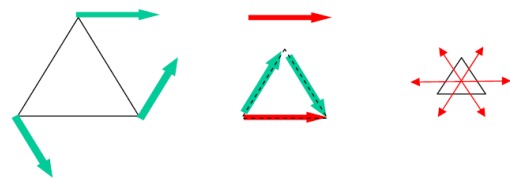


그림 3. 좌-우 방향 이동 메커니즘

3개의 구동바퀴를 사용하여 좌우 방향으로 이동하는 예를 그림 3 와 같이 나타 내었다. 진행 방향 벡터를 진행 방향에 평행하는 면에 접하는 두 구동바퀴의 회전에 의한 벡터 합이 나머지 구동바퀴의 벡터와 같이 조정함으로써 좌우 방향으로 이동하게 된다. 이와 동일한 방식으로 좌우를 비롯한 다른 6방향으로도 이동이 가능하다.

### 3) 선회 이동

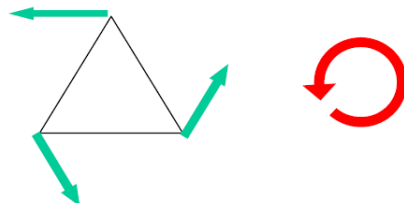


그림 4. 회전 방향 이동 메커니즘

선회 시 그림 4 과 같이 3개의 구동바퀴를 각각의 진행방향으로 회전시킴으로써 로봇은 회전하게 된다. 이와 동일한 방식으로 좌우 다른 6방향으로 이동이 가능하다.

### III. 전방향 이동 운동학

3개의 구동바퀴를 사용하여 원활한 전-방향 이동을 위해 운동학 모델을 다음과 같이 제시하고자 한다. 전-방향 이동기구에서는 그림 8과 같이 3개의 구동벡터  $V_1, V_2, V_3$ 의 합력이 임의의 진행 방향을 향한 합 벡터  $V$ 와 동일하도록 각 구동바퀴의 회전수를 구할 수 있다. 따라서 필요한 역기구학 식(1), (2), (3)에 의해서 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

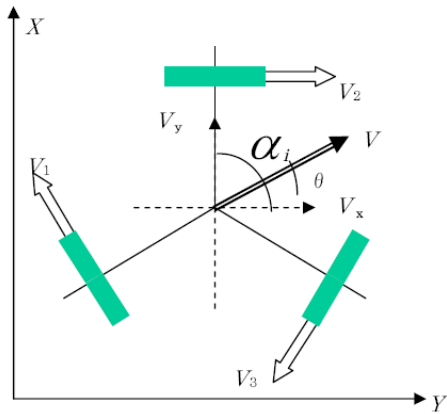


그림 5. 전-방향 이동기구학

$$V_i = V_x(\alpha_i - \frac{\pi}{2}) + V_y \sin(\alpha_i - \frac{\pi}{2}) + \dot{\theta}l \quad (1)$$

$$= V_x \sin \alpha_i - V_y \cos \alpha_i + \dot{\theta}l$$

$$\alpha_1 = -\frac{2}{3}\pi, \alpha_2 = \frac{1}{2}\pi, \alpha_3 = -\frac{1}{6}\pi \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_x &= V \cos \theta \\ V_y &= V \sin \theta \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \frac{2}{3}\pi & \cos \frac{2}{3}\pi & l \\ \sin \frac{1}{2}\pi & -\cos \frac{1}{2}\pi & l \\ -\sin \frac{1}{6}\pi & \cos \frac{1}{6}\pi & l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (4)$$

앞서 말한 3가지 이동 메커니즘을 기반으로 각

링크에서의 속도는 바퀴에 위치한 지점의 속도와 각속도를 이용해서 구할 수 있다.

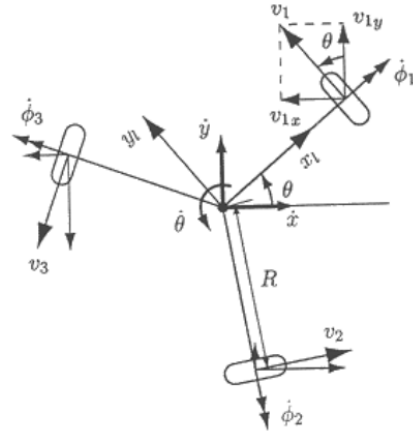


그림 6. 기구학 모델

그림 6의 시스템에서 속도 관계를 나타내면 식 (5)와 같다.

$$v_i = -x \sin \theta + y \cos \theta + R\dot{\theta} \quad (5)$$

여기서  $\theta$ 는 헤딩 각이고 R은 무게중심점과 바퀴 사이의 거리이다. 각 바퀴에 대한 선속도를 행렬 식으로 표현하면 식(6)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & R \\ -\sin(\theta + 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) & R \\ -\sin(\theta + 240^\circ) & \cos(\theta + 240^\circ) & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

각 바퀴의 선속도와 좌표계에서의 속도와의 관계는 식(7)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & \cos(\theta) & R \\ -(\frac{\sqrt{2}}{2}\cos(\theta) - \frac{2}{2}\sin(\theta)) & -(\frac{\sqrt{2}}{2}\sin(\theta) + \frac{2}{2}\cos(\theta)) & R \\ (\frac{\sqrt{2}}{2}\cos(\theta) + \frac{2}{2}\sin(\theta)) & \frac{\sqrt{2}}{2}\sin(\theta) - \frac{2}{2}\cos(\theta) & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

바퀴의 각속도로 표현하면 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_1 &= (-\sin(\theta)\cos(\theta)\dot{x}_L + \cos^2(\theta)\dot{y}_L + R\dot{\theta})/r \\ \dot{\phi}_2 &= (-\sin(\theta + \alpha_2)\cos(\theta)\dot{x}_L + \cos(\theta + \alpha_2)\cos(\theta)\dot{y}_L + R\dot{\theta})/r \\ \dot{\phi}_3 &= (-\sin(\theta + \alpha_3)\cos(\theta)\dot{x}_L + \cos(\theta + \alpha_3)\cos(\theta)\dot{y}_L + R\dot{\theta})/r \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $\dot{\phi}_i$ 는 i바퀴의 회전각속도이다. 이러한 것을 바탕으로 작품을 제작하여 실험하였는데, 로봇이 진행할 때 각종 방해물과 장애물을 회피하는데 기존의 차륜형 휠 이동로봇보다 볼 밸런싱 로봇이 이동 극복 시간이 더 적게 걸리고 방해물 극복 속도도 기존의 것보다 좀 더 증가한 것을

확인 할 수 있었다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 다양한 센서 기술들을 이용하여 실내 또는 실외에서 활용하기 적합한 다목적 이동 로봇을 설계 및 제작하였다. 볼 밸런싱 로봇은 지면과 점접촉을 가지게 되어 이동에 필요한 에너지가 적으며, 또한 전-방향 이동성을 갖는다는 장점이 있다. 체계적인 방법을 통해 작품을 제작하였고, 실험을 통해 검증 하였다. 볼 밸런싱 로봇의 안정적인 제어를 하기 위해서는 향후에 여러 가지 센서를 보다 효율적으로 처리하여 최적의 데이터를 얻는 알고리즘을 개발하고 세심한 제어가 필요하다. 그리하여 전-방향 이동을 위한 보다 혁신적인 전-방향 구형휠 구동모듈이 개발 되면, 이동로봇의 구동부에 사용되어 로봇의 성능을 기술적으로 좀 더 향상시킬 수 있으며, 구동모듈이 적용된 전-방향로봇 플랫폼을 통하여 기존 차륜식 로봇의 경우 각종 환경에 대한 저항성으로 인해 연속 직진 성능이 저하되는 단점을 극복할 수 있어서 미주, 유럽과 같은 환경에서 적용될 수 있는 청소로봇, 이동로봇뿐만 아니라 전-방향 주행 기능이 요구되는 안내로봇, 탑승형 로봇, 이동수단 등에 필수적인 기술이 될 것이고 지능형 서비스로봇 시장과 미래형 자동차시장의 확대에 기여할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- [1] Park Jae-Han, Kim Soon-Chul, Lee Soo-Young, Development of Stable Ball-bot with Omnidirectional Mobility, Journal of Control, Automation, and Systems Engineering Volume 19, Issue 1, June 2013, pp. 40-44 (5 pages)
- [2] Jae-Soon Park, Tae-Keun Kim, Dong-Seop Kim, Development of Omni-directional Mobile Platform Using Spherical Wheel, Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference, 2016.5, 275-275 (1 pages)
- [3] Kang Jin-gu, Kim Jae-Jin, A Study on the Horizontal Driving of 2 Wheel Balancing Robot Using a IMU, Journal of Korea Computer Information Society, Vol. 19, No. 1, 2011., 279-280 (2 pages)
- [4] Sang-Dae Kim, Seung-Woo Kim, Young-Wan Cho, A Study on the Posture Control of Omni-Directional Mobile Robot Using Gyro Sensor, Joint Conference of the Korean Society of Robotics, 2009.12, 177-180 (4 pages)
- [5] Baeg-Seog Ju, Gang-Ig Jo, Yeong-Hwi Seong, Position Control Algorithm and Experimental Evaluation of an Omni-directional Mobile Robot,

Journal of the Korean Manufacturing and Manufacturing Society Vol.24 No.2, 2015.4, 141-147 (7 pages)

[6] Jung-Won Choi, Eun Kim, Hyun-ju Yoo, Min-Soo Jung, The Analysis of Algorithm for a Stable Attitude Control on Arduino-based small Multi-copter, Korea Electronics and Telecommunications Research Institute Conference (Winter) 2015, 2015.1, 577-578 (2 pages)