

◆ 특집 ◆ 멀티 스케일 다중 전개형 협업 로봇의 설계 및 생산 기술 개발

다중이동로봇의 동적 모델링 및 구동성능 분석을 통한 새로운 바퀴 배치 제안

A New Wheel Arrangement by Dynamic Modeling and Driving Performance Analysis of Omni-directional Robot

신상재¹, 김한¹, 김성한^{1,✉}, 주종남¹
 Sang Jae Shin¹, Haan Kim¹, Seong Han Kim^{1,✉}, and Chong Nam Chu¹

¹ 서울대학교 기계항공공학부 (School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University)

✉ Corresponding author: mowgli00@snu.ac.kr, Tel: +82-2-880-7147

Manuscript received: 2012.11.10 / Accepted: 2012.11.19

Omni-directional robot is a typical holonomic constraint robot that has three degrees of freedom movement in 2D plane. In this study, a new omni-directional robot whose wheels are arranged in radial directions was proposed to improve driving performance of the robot. Unlike a general omni-directional robot whose wheels were arranged in a circumferential direction, moments do not arise in the proposed robot when the robot travels in a straight line. To analyze driving performance, dynamic modeling of the omni-directional robot, which considers friction and slip, was carried out. By friction measurement experiments, the relationship between dynamic friction coefficient and relative velocity was derived. Dynamic friction coefficient according to the angle difference between robot travel direction and wheel rotation direction was also obtained. By applying these results to the dynamic model, driving performance of the robot was calculated. As a result, the proposed robot was 1.5 times faster than the general robot.

Key Words: Omni-directional Robot (다중이동로봇), Dynamic Modeling (동적 모델링), Driving Performance Analysis (구동성능 분석), Dynamic Friction Coefficient (운동마찰계수)

기호설명

- D_i = Drive force of i th wheel
- F = Drive force of robot
- M = Rotational moment of robot
- T = Torque of motor
- ω = RPM of motor
- μ = Dynamic friction coefficient
- $v_{relative}$ = Relative velocity
- v_{linear} = Linear velocity of wheel

- v_{wheel} = Velocity of wheel (robot)
- δ = Angle difference between robot travel direction and wheel rotation direction

1. 서론

모바일 로봇(mobile robot)은 뛰어난 구동성과 기동성을 바탕으로 사람이 작업하기 힘든 환경인 방사능 오염지역, 폭발위험 지역, 사람이 작업하기 힘든 협소한 공간 등에서 임무수행이 가능하

다. 또한 최근 두각을 나타내고 있는 로봇서비스 분야에서도 모바일 로봇은 다양한 목적으로 활용되고 있다.¹ 따라서 로봇산업의 발전과 더불어 모바일 로봇에서도 많은 연구가 진행되고 있다.

모바일 로봇은 구속조건에 따라 홀로노믹 구속조건(holonomic constraint)과 비 홀로노믹 구속조건(non-holonomic constraint)을 가지는 로봇으로 분류된다. 홀로노믹 구속조건이란 로봇의 자유도와 로봇이 구동되는 평면의 자유도가 일치하는 것을 의미한다.² 전통적인 방식인 비 홀로노믹 구속조건을 가지는 로봇은 구동 가능한 2 개의 바퀴가 평행하게 설계되어 있어 제자리에서 회전운동 및 바퀴의 회전방향이 아닌 다른 방향으로의 병진운동이 어렵다. 그렇기 때문에 협소한 공간에서의 로봇의 구동이 제한되어 있다.^{1,3,4} 이와 반대로 홀로노믹 구속조건을 가지는 로봇들은 제자리에서 회전과 바퀴의 회전방향이 아닌 다른 방향으로의 병진운동이 가능하여 그의 활용에 대한 많은 연구가 수행되고 있다.⁵

대표적인 홀로노믹 구속조건을 가지는 로봇인 다중이동로봇(omni-directional robot)은 일반적으로 Fig. 1 과 같이 3 개 이상의 구동 가능한 바퀴를 가지고 있으며, 바퀴의 회전방향이 로봇의 질량중심의 원주방향으로 향하도록 배치되어 있다. 이러한 특이한 바퀴배치로 인하여 많은 연구자들은 다중이동로봇의 구동성과 동적 제어에 대한 연구를 진행하고 있다. 특히 여러 환경조건에서 병진운동 및 회전운동의 신뢰성 있는 궤도 선형화 제어(TLC: Trajectory Linearization Control)를 얻기 위한 동적 모델링(dynamic modeling)을 바탕으로 하는 컨트롤러의 개발에 주력해왔다.⁶



Fig. 1 Three wheeled omni-directional robot⁷

그러나 동적 모델 및 궤도 제어 모델을 개발하는 것 이외의 다중이동로봇의 구동성능 향상을

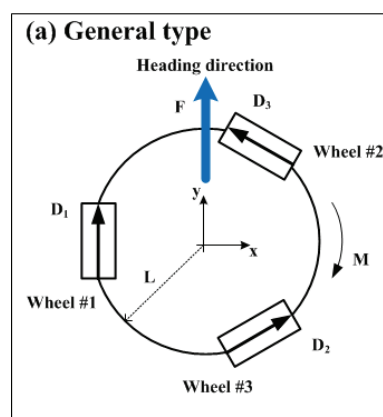
위한 설계에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서는 바퀴 배치의 변화를 통해 구동성능이 향상된 새로운 형태의 다중이동로봇을 제안한다.

다중이동로봇의 구동력은 바퀴와 지면의 마찰력에 의해 생성된다. 더욱이 다중이동로봇의 경우 바퀴의 회전방향과 로봇의 진행방향이 일치하지 않고, 바퀴의 선속도와 로봇의 이동속도가 일치하지 않기 때문에 미끄러짐(slip)이 발생하여 구동력에 영향을 미쳐 전체적인 다중이동로봇의 제어 및 기동성에 영향을 미친다.⁸ 기존의 동적 모델들은 이러한 마찰과 미끄러짐에 대한 고려가 이루어지지 않고 있어 설계 변경에 따른 성능 차이를 분석하기에는 한계가 있다.

본 연구에서는 바퀴 배치 변경을 통해 구동성능이 향상된 새로운 형태의 다중이동로봇의 설계를 제시하며, 마찰과 미끄러짐이 고려된 동적 모델을 통하여 구동성능의 차이를 검증하고자 한다.

2. 다중이동로봇의 설계 및 동적 모델링

다중이동로봇은 2 차원 평면상에서의 병진운동이나 회전이 가능한 홀로노믹 메커니즘을 목적으로 설계되기 때문에 주로 Fig. 2 와 같이 3 개의 바퀴를 원주 위에 등 간격으로 배치하게 된다. 이 때 일반적인 다중이동로봇의 바퀴의 배치는 Fig. 2(a)와 같이 바퀴의 회전방향이 로봇의 질량중심에서 원주방향을 향하도록 배치되어 있다. 이와 달리 본 연구에서 Fig. 2(b)에서 보이는 바와 같이 바퀴회전방향이 로봇의 질량중심을 향하도록 설계하였다.



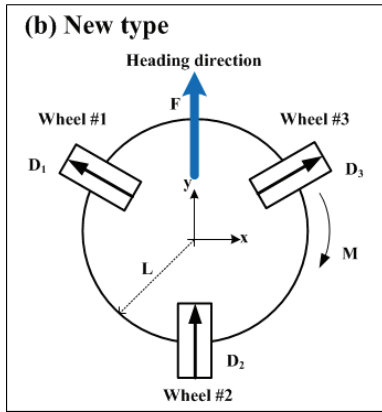


Fig. 2 Schematic design of omni-directional robot

2.1 기존 다중이동로봇의 동적 모델

기존 다중이동로봇의 경우 바퀴 배치로 인하여 로봇이 직진주행 시에 바퀴와 지면과의 마찰력에 의해 로봇의 원주방향으로 구동력이 생긴다. 생성된 구동력은 로봇의 질량중심에서의 바퀴까지의 거리 L 만큼의 회전 모멘트를 생성시키며, 이 회전 모멘트는 로봇이 병진운동을 할 수 없게 만든다. 따라서 일반적인 다중이동로봇이 직진주행을 하기 위해서는 회전 모멘트 제거를 위한 모터 출력의 제어가 필요하다. 기존 다중이동로봇의 동적 모델은 다음 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} 0 & \cos \frac{\pi}{6} & -\cos \frac{\pi}{6} \\ -1 & \sin \frac{\pi}{6} & \sin \frac{\pi}{6} \\ L & L & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 진행방향으로 회전 없이 나아가기 위해서는 x 방향의 합력(F_x)이 0 이 되어야 하며 로봇의 회전 모멘트(M) 또한 0 이 되어야 한다. 이 조건을 만족시키기 위한 각각 바퀴의 구동력의 관계는 다음의 식 (2)와 같으며 이를 바탕으로 로봇 전체의 구동력은 식 (3)과 같이 나타내어진다.

$$\frac{1}{2} D_1 = D_2 = D_3 \quad (2)$$

$$F_y = -D_1 + 2D_2 \sin \frac{\pi}{6} \quad (3)$$

이와 같이 일반적인 다중이동로봇의 경우 개별 바퀴에서의 구동력을 제어함으로써 로봇의 회전 모멘트를 제거하여 병진운동을 구현할 수 있지만, 모터의 출력을 모두 사용할 수 없기 때문에 전체적인 구동성능이 저하된다.

2.2 새로운 다중이동로봇의 동적 모델

본 연구에서 제시하는 다중이동로봇의 경우 바퀴회전 방향이 로봇의 중심을 향하도록 되어 있기 때문에 로봇의 회전 모멘트가 발생하지 않는다. 따라서 새로운 다중이동로봇의 동적 모델은 아래의 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} 0 & -\cos \frac{\pi}{6} & \cos \frac{\pi}{6} \\ -1 & -\sin \frac{\pi}{6} & -\sin \frac{\pi}{6} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)를 정리하여 로봇이 진행방향으로 이동하기 위한 조건을 구해보면 식 (5)가 된다. 즉 기존의 다중이동로봇에서의 조건인 식 (2)와는 달리 구동력의 제한이 줄어든다. 이 때의 로봇 전체의 구동력은 식 (6)과 같다.

$$D_2 = D_3 \quad (5)$$

$$F_y = D_1 - 2D_2 \sin \frac{\pi}{6} \quad (6)$$

3. 바퀴의 구동력 모델링

로봇의 동적 모델에 적용되는 구동력은 일반적으로 바퀴와 지면 사이의 마찰력이다. 다중이동로봇의 경우 Fig. 3 과 같은 바퀴배치로 인하여 로봇의 진행방향과 바퀴의 회전방향이 일치하지 않게 된다. 이러한 불일치로 인하여 로봇이 이동할 때 미끄러짐이 발생하게 된다. 또한 바퀴의 선속도와 로봇의 이동속도의 차이도 미끄러짐을 발생시키는 주요한 요인이 된다. 따라서 다중이동로봇의 동적 모델에 적용을 위한 구동력을 엄밀하게 구하기 위해서는 마찰력, 특히 미끄러짐에 의하여 변화되는 운동마찰계수에 대한 분석이 필수적이다.

미끄러짐은 서로 다른 두 속도 차이의 비율로

정의되며, 이 때의 두 속도의 차이에 의한 상대속도는 운동마찰계수에 영향을 준다. 또한 Fig. 3 과 같이 로봇의 진행방향과 바퀴의 회전방향이 일치하지 않아 사이각 δ 이 형성될 경우에도 운동마찰계수가 변하게 된다. 따라서 상대속도 크기의 차이와 로봇의 진행방향과 바퀴의 회전방향 사이각 δ 의 차이에 의한 운동마찰계수의 변화에 대한 실험을 통해 바퀴의 구동력에 대한 모델을 구하였다.

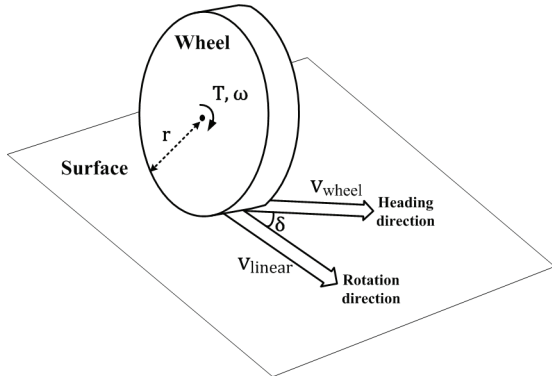


Fig. 3 Schematic of individual wheel

3.1 운동마찰계수 분석 실험 구성

Fig. 4 는 운동마찰계수 분석을 위한 실험장비의 개략도이다. 모터가 설치된 리니어 스테이지를 이용하여 바퀴의 이동을 구현 하였다. 모터에는 우레탄 재질의 바퀴를 장착하고 스피드 컨트롤러를 이용하여 회전속도(RPM)를 제어할 수 있도록 하였다. 모터를 회전 시키며 스테이지를 이송시키면서 접촉해 있는 3 축 로드셀(load cell)를 이용하여 바퀴로부터 발생한 힘을 측정하였다. 로드 셀의 표면에는 바닥재와 벽지재로 많이 이용되어 일반적인 실내 바닥 면이라 할 수 있는 폴리염화비닐(PVC)를 부착하였다.

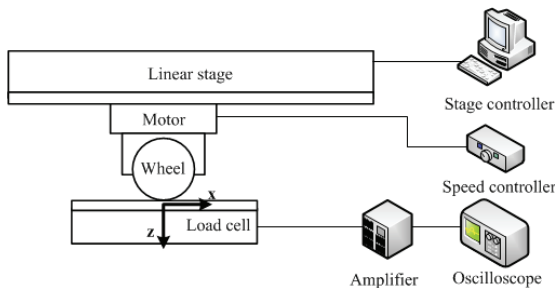


Fig. 4 Experimental setup

상대속도의 차이를 발생시키기 위하여 리니어 스테이지의 이송속도와 모터의 회전속도를 각각 조절할 수 있도록 하였다. 또한 모터 장착방향을 바꾸어 리니어 스테이지의 이동방향과 모터의 회전 방향을 일치하지 않게 함으로써 사이각 δ 를 만들 수 있었다.

운동마찰계수는 식 (7)과 같이 수직항력(F_N)에 대한 구동력(F_D)으로 정의될 수 있다.

$$\mu = \frac{F_D}{F_N} \tag{7}$$

본 실험에서 구동력은 로드 셀의 Fig. 4 의 x 방향 힘에 해당하며 수직항력은 z 방향의 힘에 해당한다. 따라서 상대속도와 사이각 δ 에 따른 x 방향과 z 방향의 힘을 분석함으로써 운동마찰계수를 구할 수 있다.

3.2 운동마찰계수 분석 실험 결과

실험결과 Fig. 5 에서 보는 바와 마찬가지로 상대속도가 증가함에 따라 마찰계수 또한 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 바퀴의 회전방향과 바퀴의 진행방향의 차이에 따라서도 마찰계수의 변화가 나타났다. 상대속도가 낮은 구간에서 바퀴의 회전방향과 바퀴의 진행방향 사이의 사이각 δ 가 클수록 마찰계수가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과를 토대로 바퀴의 구동력식을 도출하기 위한 상대속도 및 사이각 δ 에 대한 운동마찰계수식을 구하였다.

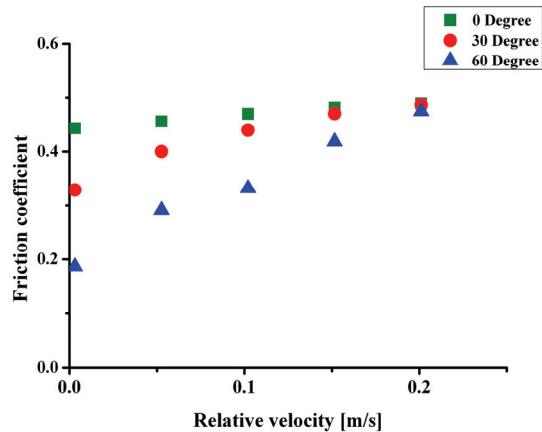


Fig. 5 Relative velocity according to friction coefficient

3.3 바퀴 구동력 수치 해석

바퀴 구동에 있어 상대속도($v_{relative}$)와 바퀴의 선속도(v_{linear})는 각각 식 (8), 식 (9)와 같이 정의 된다.

$$v_{relative} = v_{linear} - v_{wheel} \quad (8)$$

$$v_{linear} = r\omega \quad (9)$$

바퀴 회전속도의 경우 모터의 출력 특성 조건에 따라 토크(T)의 관한 함수로 표현이 가능하다. 또한 운동 마찰계수 분석 실험결과를 토대로 상대속도는 마찰계수에 대한 함수로 표현할 수 있다. 이를 종합하면 식 (10)과 같이 바퀴의 구동력에 대한 식을 도출할 수 있다.

$$v_{relative}(\mu) = r\omega(T) - v_{wheel} \quad (10)$$

이를 토대로 Fig. 6의 해석 알고리즘을 통해 SIMULINK를 이용하여 계산한 사이각이 $\delta = 0$ 과 $\delta \neq 0$ 인 두 가지 경우의 바퀴의 가속도에 대한 결과는 Fig. 7과 같다. 시간이 지남에 따라 바퀴의 가속도는 일정한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. $\delta \neq 0$ 의 경우 가속도가 음수값을 가지는 것을 볼 수 있다. 이를 통하여 로봇의 이동속도가 최종속도에 도달하여 평형상태에 도달하였을 때, $\delta \neq 0$ 인 바퀴는 로봇이 이동함에 있어 저항으로 작용하게 된다는 것을 확인 할 수 있다.

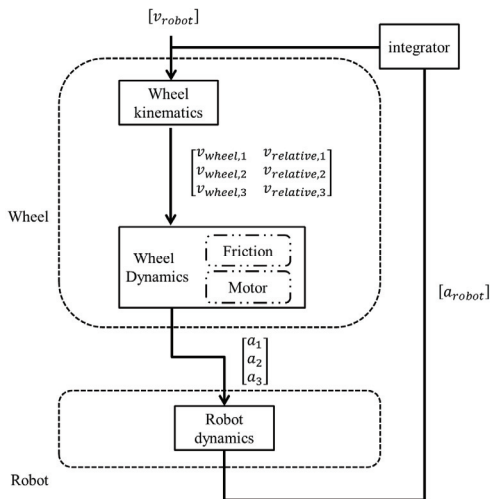


Fig. 6 Block diagram of analysis algorithm

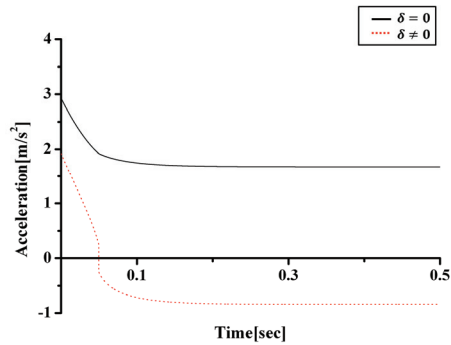


Fig. 7 Relative velocity according to friction coefficient

4. 구동성능 비교

Fig. 8은 마찰과 미끄러짐이 고려된 다중이동로봇의 동적 모델을 바탕으로 기존 다중이동로봇과 새로운 다중이동로봇의 구동속도를 비교한 결과이다. 평형속도에 도달하였을 때의 새로운 다중이동로봇의 속도는 0.28 m/s로 기존 다중이동로봇의 속도인 0.19 m/s보다 약 1.5배 빠른 것을 확인 할 수 있었다.

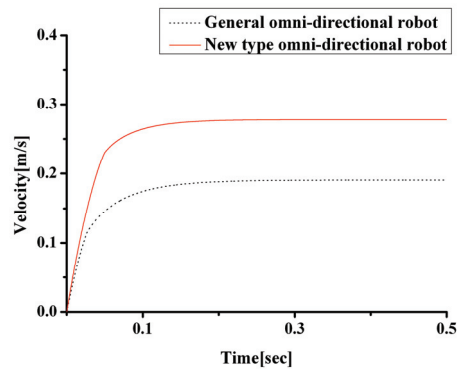


Fig. 8 Velocity analysis by proposed dynamic model

5. 결론

본 연구에서는 기존 다중이동로봇의 바퀴 배치와는 다르게 바퀴회전방향이 로봇의 질량중심을 향하도록 하여 로봇의 구동성능을 향상시킬 수 있는 로봇의 설계를 제안하였다. 동적 모델을 통하여 기존 다중이동로봇과는 달리 회전 모멘트를 발생시키지 않아 더 큰 구동력을 발생시킬 수 있음을 확인하였다.

또한 바퀴의 구동력 모델링을 위하여 상대속도

의 크기와 사이각에 따른 운동마찰계수의 관계를 실험적으로 도출하였고 마찰력 측정 실험을 통하여 상대속도의 크기와 사이각이 증가함에 따라 운동마찰계수 또한 증가하는 것을 확인하였다. 마지막으로 이를 적용시킨 모델의 해석을 통하여 로봇의 구동성능을 수치적으로 구하였다. 구동성능 분석 결과 새로운 다중이동로봇이 기존 다중이동로봇의 속도보다 약 1.5 배 빠르다는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012-0000348).

참고문헌

1. Yi, B.-J. and Kim, W. K., "The Kinematics for Redundantly Actuated Omnidirectional Mobile Robots," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 19, No. 6, pp. 255-267, 2002.
2. Yi, B.-J. and Kim, W. K., "Minimum-Time Trajectory for Three-Wheeled Omnidirectional Mobile Robots Following a Bounded-Curvature Path With a Referenced Heading Profile," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 27, No. 4, pp. 800-808, 2011.
3. d'Andréa-Novel, B., Campion, G., and Bastin, G., "Control of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots by State Feedback Linearization," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 14, No. 6, pp. 543-559, 1995.
4. Asama, H., Sato, M., Bogoni, L., Kaetsu, H., Mitsumoto, A., and Endo, I., "Development of an Omni-Directional Mobile Robot with 3 DOF Decoupling Drive Mechanism," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1925-1930, 1995.
5. Hashemi, E., Jadidi, M. G., and Jadidi, N. G., "Model-based PI-fuzzy control of four-wheeled omnidirectional mobile robots," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 59, No. 11, pp. 930-942, 2011.
6. Liu, Y., Zhu, J. J., Williams, R. L., and Wu, J., "Omni-directional mobile robot controller based on trajectory linearization," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 56, pp. 461-479, 2008.
7. Indian Institute of Technology Bombay, "Robotics : omnibot," <http://www.cse.iitb.ac.in/~erts/ertswiki/doku.php>
8. Carter, B. E., Gallina, P., and Rosati, G., "Dynamic model with slip for wheeled omnidirectional robots," *Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 3, pp. 285-293, 2002.