

진동 및 제어 부문 특별세션

메카넘휠 기반의 전방향 이동로봇 주행성능 평가

주백석^{a*}, 성영휘^b**Mobile Performance Evaluation of Mecanum Wheeled
Omni-directional Mobile Robot**Baeksuk Chu^{a*}, Young Whee Sung^b^a Department of Intelligent Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Yangho-Dong, Gumi-Si, Gyeongbuk 730-701, Republic of Korea^b School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Yangho-Dong, Gumi-Si, Gyeongbuk 730-701, Republic of Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received 30 June 2014

Accepted 26 July 2014

Keywords:

Mobile performance evaluation

Omni-directional mobile robot

Mecanum wheel

Ultrasonic sensor

ABSTRACT

Mobile robots with omni-directional wheels can generate instant omni-directional motion without requiring extra space to change the direction of the body. Therefore, they are capable of moving in an arbitrary direction under any orientation even in narrow aisles or tight areas. In this research, an omni-directional mobile robot based on Mecanum wheels was developed to achieve omni-directionality. A CompactRIO embedded real-time controller and C series motion and I/O modules were employed in the control system design. Ultrasonic sensors installed on the front and lateral sides were utilized to measure the distance between the mobile robot and the side wall of a workspace. Through intensive experiments, a performance evaluation of the mobile robot was conducted to confirm its feasibility for industrial purposes. Mobility, omni-directionality, climbing capacity, and tracking performance of a squared trajectory were selected as performance indices to assess the omni-directional mobile robot.

1. 서론

자동차와 같은 전통적인 형태의 차륜구동형 이동 플랫폼은 2차원 평면상에서 병진과 회전을 포함하는 3자유도 운동을 생성할 수 있다. 이러한 형태의 이동 플랫폼은 각 방향의 운동을 독립적으로 제어할 수는 없는데, 이것을 비홀로노믹(non-holonomic) 특성이라고 한다^[1]. 예를 들어 조향장치를 구비한 차륜구동형 이동 플랫폼은 전후진 이동은 자유롭게 할 수 있으나, 차체의 회전 없이는 측방향 운동을 만들어 낼 수 없다. 그래서 측방향 운동을 만들기

위해서는 전진 및 후진과 차체의 회전을 모두 이용하는 다소 복잡한 경로계획과 이동조작이 필요하다. 이와 같은 전통적인 이동 플랫폼의 특성은 산업용 이동로봇의 개발에 있어서 쉬운 제어시스템의 구현과 단순한 기구적 설계의 관점에서 좋지 않은 영향을 주게 된다.

자동화 공정을 위한 이동로봇 시스템을 개발하기 위해 이 연구에서는 전방향 바퀴에 기반을 둔 이동 플랫폼을 제안하고자 한다^[2]. 이러한 형태의 이동 플랫폼은 전통적인 형태의 이동로봇이 가지고 있는 단점을 극복할 수 있다. 측방향 운동을 만들고자 할 때 차륜구동형 이동 플랫폼은 차체의 방향을 회전하기 위한 여분의 공간을

* Corresponding author. Tel.: +82-54-478-7398

Fax: +82-54-479-7319

E-mail address: bachu@kumoh.ac.kr (Baeksuk Chu).

필요로 하며, 이 공간의 크기는 대개 이동 플랫폼 자체의 크기보다 훨씬 크게 된다. 그러나 전방향 바퀴의 사용은 차체의 회전 없이 순간적인 측방향 운동을 가능하게 한다. 따라서 각 방향에 따른 이동을 위해서 여분의 공간이 전혀 필요 없으며, 좁은 복도나 복잡한 공간에서도 최종 목적지까지 도달하기 위해 매우 유연한 이동 궤적을 생성할 수 있다. 그리고 이와 같이 비좁고 복잡한 작업 환경이 생산라인이나 창고, 병원, 전시 공간 등 이동로봇의 활용이 예상되는 다양한 분야에서 종종 발견되는 것은 주목할 만한 사실이다^[3].

이 연구에서는 메카넘휠에 기반을 둔 전방향 이동로봇이 설계 및 제작되었다. 본문에서는 개발된 이동로봇과 메카넘휠에 대한 소개와 주요 주행성능을 평가하기 위한 다양한 실험 방법 및 결과가 제시된다. 제안된 시스템이 이동로봇이므로 이동성(mobility)이 첫 번째 성능지표로 선택되었다. 전후좌우 네 방향에 대한 병진운동이 수행된 후 각 방향별 거리 및 속도 프로파일이 획득되었다. 두 번째 성능지표로는 전방향성(omni-directionality) 또는 전방향 이동 정밀도가 선정되었다. 이 지표는 네 방향에 대하여 지정된 직선 경로와 실제 경로 사이의 각도오차를 측정하여 확인된다. 다양한 지면의 변화를 수용할 수 있는 능력을 평가하기 위해 경사면에 대한 등판능력(climbing capacity)이 그 다음 성능지표가 된다. 마지막으로 이러한 성능을 종합적으로 판단하기 위해 사각형 궤적을 이동한 후 초기 위치로의 정확한 복귀여부를 판별하는 실험을 수행하였다.

2. 전방향 이동로봇의 기본 특성

2.1 전방향 바퀴의 구조적 특성

다양한 형태의 전방향 바퀴 중에서 특히 메카넘휠(Mecanum wheel)과 직교휠(orthogonal wheel)은 회전축 주변에 배치된 롤러의 축 방향으로서는 견인력을 활성화시키고 그에 수직인 방향으로서는 수동적인 회전(passive rotation)을 허용하는 원리를 활용하여 전방향성을 획득한다^[4]. 이 연구에서는 산업현장에서 가장 광범위하게 활용되고 있는 메카넘휠이 이동로봇의 전방향성 확보를 위하여 선택되었다. 순간적인 전방향 운동을 생성하는 홀로노믹(holonomic) 특성 때문에 전방향 바퀴를 내재한 이동 플랫폼은 평면 공간에서 전후진 및 좌우이동 그리고 회전을 포함한 유연한 3자유도 운동을 수행할 수 있다. 이러한 각 방향별 이동을 독립적으로 생성하는 특성은 직관적인 조작을 통해 단순한 제어를 가능하게 한다. Fig. 1은 이 연구에서 설계된 메카넘휠의 3차원 도면을 보여준다. 메카넘휠은 중앙의 림휠(rim wheel)과 그 주변에 특정 각도로 배치된 서브롤러(sub-roller)로 구성되는데, Fig. 1(d)에는 림휠 주변에 45도의 각도로 서브롤러가 부착된 측면형상이 나타나있다^[5].

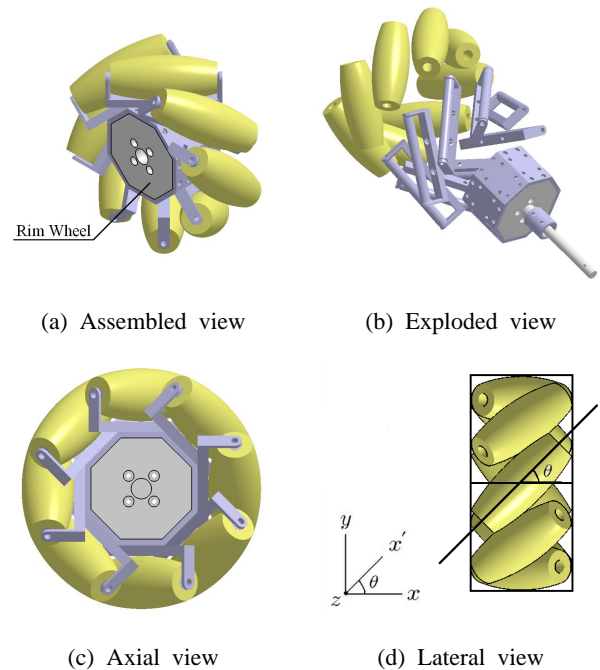


Fig. 1 3-dimensional design of the Mecanum wheel

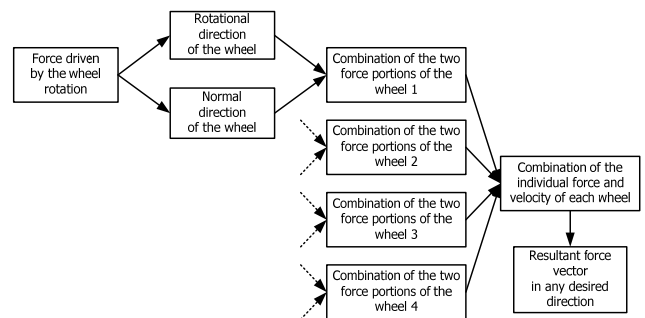


Fig. 2 Overview of the motion mechanism of the 4-wheeled omni-directional mobile robot

2.2 메카넘휠에 기반을 둔 이동 메커니즘

제안된 이동로봇은 모션제어를 위한 계산을 단순화하기 위해 각 모서리에 메카넘휠을 장착한 사각형 형태로 설계되었다. 메카넘휠의 림휠 주변에 45도의 각도로 부착된 서브롤러는 바퀴 전체의 회전에 의한 추진력을 서브롤러의 회전방향 분력과 서브롤러의 측방향 분력으로 나눈다. 이 때 서브롤러의 회전방향 분력은 서브롤러의 수동회전에 의해 소멸되고 서브롤러의 측방향 분력만이 남게 된다. 서브롤러의 측방향 분력은 서브롤러의 부착 각도에 의해 이동로봇의 전후방향 뿐만이 아니라 좌우방향의 힘 성분도 생성하게 된다. 이동로봇의 네 모서리에 부착된 메카넘휠의 회전속도를 독립적으로 제어하여 각각의 분력을 적절히 조합할 경우 임의의 방향으로 최종 합력을 생성해낼 수 있다. 따라서 이동로봇은 차체의 방향의 변화 없이 힘 벡터가 향하는 전방향으로 이동이 가능하다. Fig. 2는 4륜 전방향 이동로봇의 이동 메커니즘을 요약한 것이다.

3. 전방향 이동로봇 하드웨어 설계

3.1 제어시스템 구성

제안된 이동로봇의 제어시스템을 구성하기 위해 National Instrument사의 CompactRIO(cRIO)와 C 시리즈 모션 모듈 및 I/O 모듈이 사용되었다^[6]. 독립형 임베디드 실시간 프로세서인 cRIO는 다양한 신호처리 및 I/O 모듈을 장착할 수 있어서 센서 및 액추에이터를 이용한 제어 및 데이터 획득용 시스템으로 사용된다. Table 1은 이 연구에서 사용된 제어시스템 구성요소를 정리한 것이다. NI cRIO-9082는 임베디드 실시간 제어기로 C 시리즈 모션 모듈 및 I/O 모듈 장착을 위한 8개의 슬롯이 있는 사시를 내장하고 있다. 4개의 메카넘휠을 독립적으로 제어하기 위해 4개의 NI 9512 모션 모듈이 사용되며, 아날로그 및 디지털 신호 획득 및 생성을 위하여 NI 9205 및 NI 9403 I/O 모듈이 이용되었다. 4개의 800W급 서보모터 및 Yaskawa사의 시그마시리즈 서보팩이 바퀴 구동을 위하여 사용되었다. 바퀴가 지정된 각도만큼 회전하기 위하여 작업자가 사용자 인터페이스 화면에 특정 각도를 입력하면 cRIO-9082 실시간 제어가 사전에 정의된 최대속도와 가속도에 따라 지령신호를 생성한다. 이 신호에 따라 모터는 회전하고 회전하는 바퀴의 실제 각도 정보는 Yaskawa 서보팩에 내장된 증분형 로터리 엔코더에 의하여 측정된다.

3.2 데이터 획득용 센서 및 조작 장치

이동로봇의 평면운동을 위한 조작 장치로 이 연구에서는 3축 조이스틱을 사용하였다. Fig. 3(a)는 이 시스템에 채용된 조이스틱(HFX-44R10, CH Products)을 보여준다. 이동로봇 자체의 방향 전환이나 추가적인 공간 없이 전후진 및 좌우이동 그리고 회전이 조이스틱을 전후좌우 및 회전 방향으로 조작하는 것에 의해 가능하다. 조이스틱으로부터 송출된 아날로그 전압신호는 NI 9205 아날로그 입력 모듈을 경유하여 cRIO-9082 실시간 제어기로 전달된다. 이 신호에 대응하는 모터 지령신호가 제어기에 의해 계산 및 생성되고 NI 9512 모션 모듈을 통하여 각 모터에 전달되어 메카넘휠을 구동한다. 3개의 초음파센서가 이동로봇과 주변에 존재하는

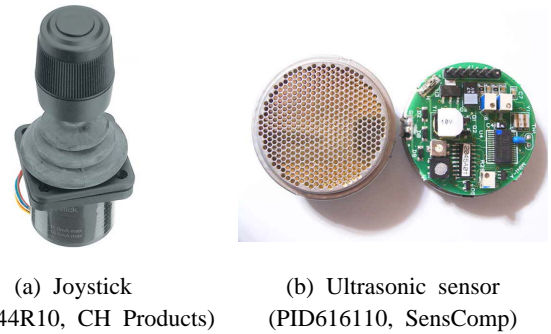


Fig. 3 Joystick and ultrasonic sensor

벽면 사이의 거리를 측정하기 위하여 사용된다. Fig. 3(b)는 이 연구에서 사용된 초음파센서(PID616110, SensComp)를 보여준다. 이 센서는 주변 벽면과의 거리에 비례하는 아날로그 전압신호를 생성하며, 이 신호는 NI 9205 아날로그 입력 모듈을 경유하여 cRIO-9082 실시간 제어기로 전송된다.

4. 성능평가를 위한 실험

실험에 사용되는 이동로봇의 전면과 측면에 설치된 초음파센서가 이동로봇과 주변의 벽면 사이의 거리를 실시간으로 측정한다. 이동로봇의 위치와 회전변위 그리고 속도가 이 거리정보에 의하여 계산된다. Fig. 4는 초음파신호를 반사하기 위하여 설치된 인공 벽면으로 둘러싸인 실험 환경을 보여준다.

4.1 이동성(mobility)

개발된 시스템이 ‘이동’로봇인 것을 감안하여 이동성(mobility)이 첫 번째 성능지수로 선정되었다. 전후좌우 네 방향의 병진운동이 수행된 후 지정된 거리에 대한 속도 및 가감속 특성을 확인하기 위해 각 방향별 속도 프로파일이 획득되었다. Fig. 5는 네 가지 방향 각각에 관하여 이동로봇에 장착된 초음파센서로부터 측정된 벽면과의 거리와 그 변화율을 계산하여 획득한 속도 프로파일이다.

Table 1 CompactRIO (cRIO) controller and C series I/O modules

| Controller or Module name | Purpose | Specification |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| NI cRIO-9082 | Embedded real-time controller | 8 slots for I/O modules |
| NI 9512 | Motion generation | Stepper drive |
| NI 9205 | Analog input | 8 channels |
| NI 9403 | Digital input/output | 32 channels |

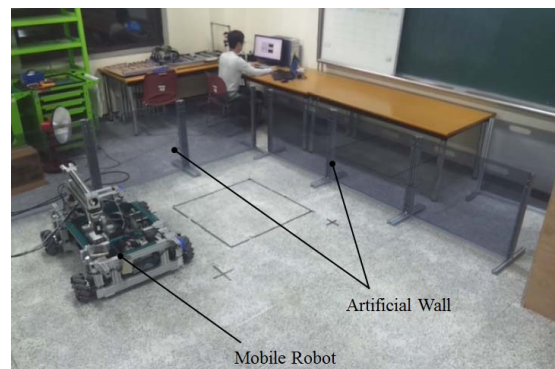


Fig. 4 Laboratory view for experiments

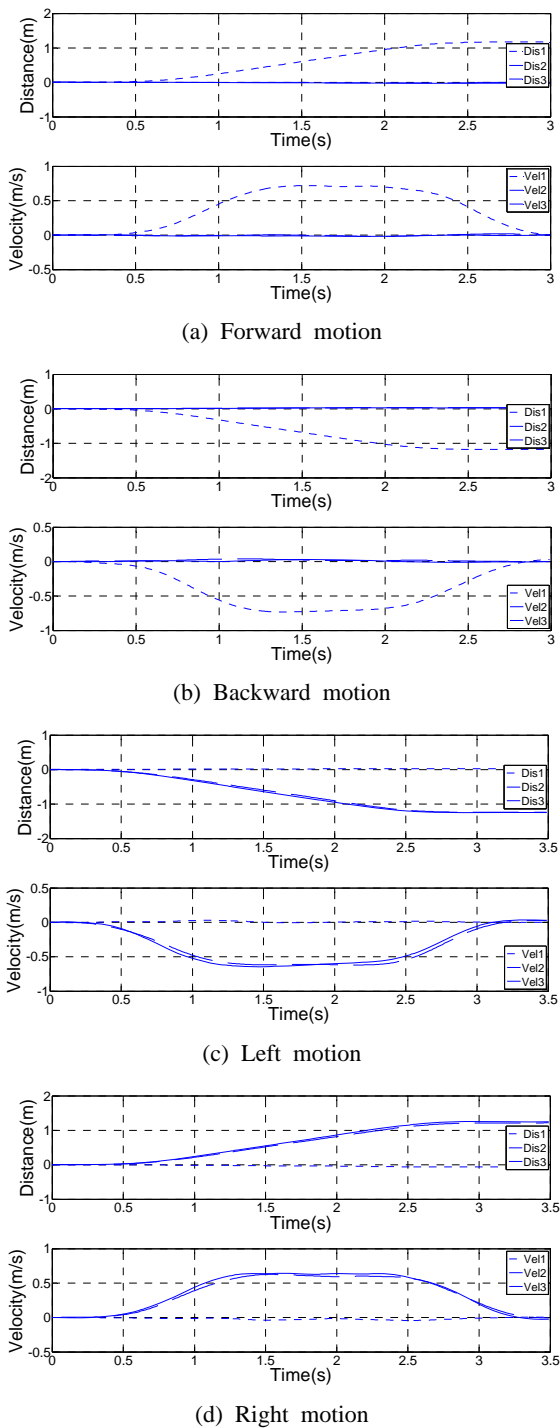


Fig. 5 Distance and velocity profile for forward, backward, left and right translation

그림의 결과에서 1번 신호는 이동로봇의 전면부에 부착된 센서로부터 전방에 위치한 벽면과의 거리를 측정하는 결과이고, 2번 및 3번 신호는 이동로봇의 측면에 부착된 센서로부터 측방에 위치한 벽면과의 거리를 측정하는 결과이다. 따라서 1번 신호는 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)에서 이동로봇의 전진 및 후진 주행에 관한 결과를 나타내고, 2번 및 3번 신호는 Fig. 5(c)와 Fig. 5(d)에서 이동로봇의 좌측방향

Table 2 Linear velocities for four-directional motions

| Direction | Linear velocity (m/s) |
|-----------|-----------------------|
| Forward | 0.72 |
| Backward | 0.73 |
| Left | 0.64 |
| Right | 0.64 |

및 우측방향 주행에 관한 결과를 나타낸다.

Table 2는 이 네 가지 방향에 관한 선속도 결과를 요약한 것이다. 동일한 거리를 이동하기 위하여 동일한 제어지령을 이용하여 주행을 실험했음에도 불구하고 전진 및 후진 주행실험에서의 선속도가 좌우 주행실험에서의 선속도에 비하여 약 13% 가량 크게 측정되었다. 이와 같은 차이가 발생한 이유는 메카넘휠의 구조적인 특징에 기인하는 것으로 판단된다. 전진 및 후진을 하는 동안에 메카넘휠은 서브롤러의 수동회전을 활용하지 않고 전통적인 형태의 바퀴와 같이 구동한다. 그러나 좌우 주행을 하는 경우 서브롤러의 수동회전과 지면과의 슬립(slip)을 적절히 활용하여 바퀴의 회전에 따른 전후방향 분력은 서로 상쇄하고 좌우방향 분력만이 존재하여 이동로봇은 좌측 및 우측으로 이동하게 된다. 이러한 분력의 변환 과정에서 발생하는 마찰 등이 속도의 손실을 가져오는 것으로 분석된다.

4.2 전방향성(omni-directionality)

개발된 이동로봇의 두 번째 성능지수는 전방향성 또는 전방향 이동 정확도이다. 이 성능은 이동로봇이 전후좌우 네 방향의 병진운동을 수행함에 있어서 지정된 직선궤적과 실제 주행궤적 사이의 각도오차를 측정함에 의해 평가된다. 병진운동의 각도오차를 측정하기 위해 이동로봇의 전면 및 측면에 설치된 초음파센서가 사용된다. 전면에 1개, 측면에 2개로 구성된 초음파센서로부터 획득된 거리정보를 활용하면 2차원 평면상의 이동로봇의 위치 및 방향이 계산되고, 주행궤적 초기위치와 최종위치를 파악하여 주행동안 이동로봇이 얼마나 지령궤적을 벗어났는지를 알 수 있다. Fig. 6은 지령궤적과 주행궤적 사이의 각도오차를 계산하는 원리에 관하여 설명한다. 이 그림에서 (x, y)는 이동로봇의 위치이고 θ 는 각도오차이다. 이 연구에서 초음파센서는 로봇의

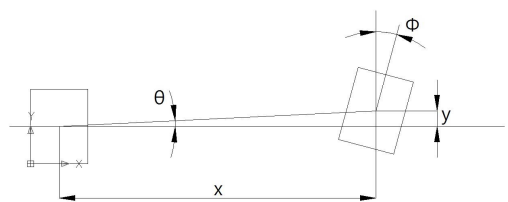


Fig. 6 Angular error calculation for straightness

Table 3 Angular errors for four-directional motions

| Direction | Angular error (°) |
|-----------|-------------------|
| Forward | 0.86 |
| Backward | 1.45 |
| Left | 1.32 |
| Right | 3.13 |

성능 측정을 위해서만 사용되었으며 서보팩에 내장된 엔코더를 이용한 dead-reckoning만이 제어에 사용되었다. Table 3은 네 방향 주행에 관한 각도오차를 요약한 것이다. 이 실험에서는 이 동로봇이 주행하는 동안 슬립 등에 의하여 누적된 오차를 보상하는 알고리즘이 적용되지 않았으므로 이것으로 인한 각도오차가 발생하게 된다. 상당수의 이동 플랫폼이 활용되는 현장에서 지면과 바퀴 사이의 일정량의 슬립은 불가피하다. 따라서 이와 같은

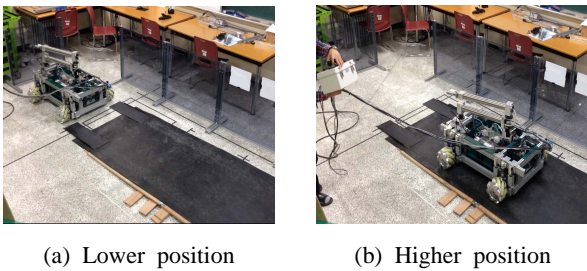


Fig. 7 Climbing experiments for ascending and descending

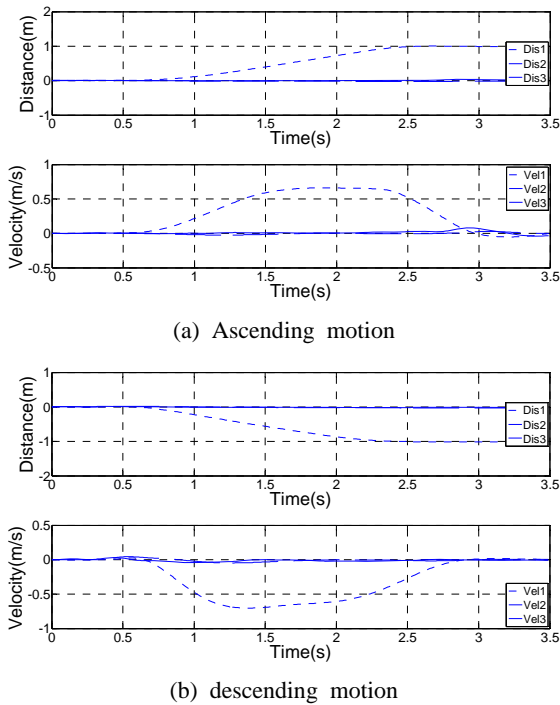


Fig. 8 Distance and velocity profile for ascending and descending motions

이동 플랫폼은 정밀한 위치 정확도가 요구되지 않는 상황에서 사용되는 것이 일반적이다. 그럼에도 불구하고 정밀한 위치 정확도가 요구된다면 추가적인 위치보상 제어 알고리즘이 적용되어야 한다.

4.3 등판능력(climbing capacity)

이동로봇이 여러 작업장을 이동하면서 작업을 수행할 때 작업장 간의 이동능력 및 다양한 지면의 변화를 수용할 수 있는 능력을 평가하기 위해 경사면에 대한 등판능력을 성능지수의 하나로 선정하였다. 이동로봇의 등판능력을 확인하기 위해 이 연구에서는 개발 목표치를 4도로 선정하고 4도의 경사각을 갖는 판넬을 준비하였다. Fig. 7은 등판용 판넬을 등판하는 실험 과정을 보여준다. 전후방향으로 등판하는 실험에서 획득한 상승 및 하강에 대한 거리 및 속도 데이터가 Fig. 8에 제시되어 있다.

4.4 사각형 궤적 복귀능력

전방향 이동로봇의 주행성을 종합적으로 판단하기 위하여 특정한 형상의 지령궤적을 입력하고 이 궤적을 그린 후 처음 상태로 복귀하는 주행실험을 수행하였다. 이 연구에서는 전방향 이동로봇

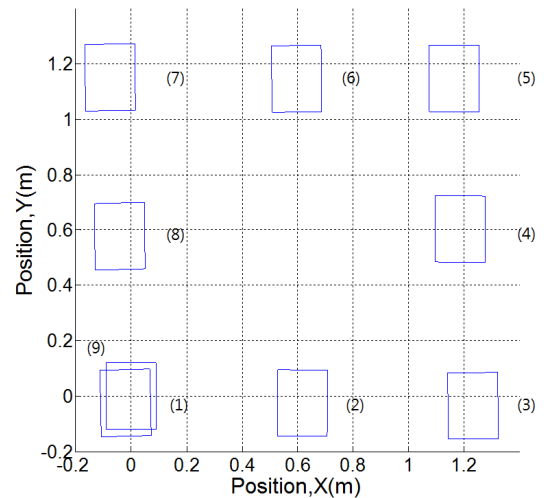


Fig. 9 Squared trajectory of the omni-directional mobile robot

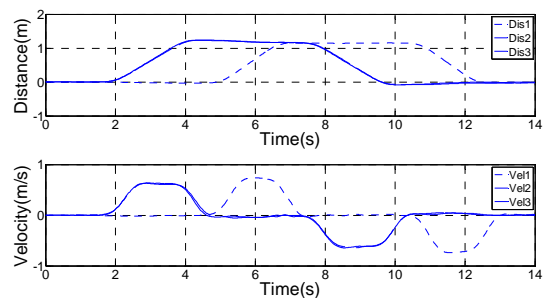


Fig. 10 Distance and velocity profile for squared trajectory

Table 4 Linear velocities for four-directional motions

| Position | X-coordinate | Y-coordinate | Orientation |
|----------|--------------|--------------|-------------|
| (1) | 0 | 0 | 0 |
| (2) | 0.5587 | -0.0231 | 0.6956 |
| (3) | 1.2329 | -0.0347 | -0.4048 |
| (4) | 1.1939 | 0.4955 | 0.1361 |
| (5) | 1.1649 | 1.1471 | -0.0575 |
| (6) | 0.5327 | 1.1479 | -0.8451 |
| (7) | -0.0744 | 1.1516 | -0.5614 |
| (8) | -0.0408 | 0.5776 | -1.0692 |
| (9) | -0.0191 | -0.0239 | -1.0948 |

의 네 가지 방향에 대한 주행성능을 파악할 수 있도록 1200 mm × 1200 mm 크기의 사각형 지평궤적을 차체의 회전 없이 주행하도록 명령하였다. 그리고 복귀한 위치가 처음 위치로부터 벗어난 거리를 성능지수로 선정하였다. Fig. 9는 주행실험을 수행한 후 이동로봇에 설치된 초음파센서로부터 측정된 거리정보를 이용하여 이동로봇이 이동한 궤적을 그린 것이다. (1)의 초기위치에서 출발하여 사각형 궤적을 그린 후 (9)의 최종위치가 표시되어 있으며 그림에 나타난 각 위치의 좌표와 로봇의 방향을 Table 4에 표시하였다. 이상적인 경우에는 (1)의 초기위치와 (9)의 최종위치가 동일해야 하지만 지면과의 슬립과 이동로봇의 동역학적 비대칭성 등의 영향에 의해 그림의 (1)과 (9)의 위치처럼 정확하게 일치하지는 않는 결과를 보여주었다. 성능지수로 선정된 초기위치와 최종위치의 거리오차는 (-19.1 mm, -23.9 mm)로 측정되었다. Fig. 10은 실험에서 획득한 사각형 궤적에 관한 이동로봇의 위치 및 속도 데이터이다.

5. 결론

이 연구에서는 메카넘휠에 기반을 둔 전방향 이동로봇의 기본적인 특성과 제어용 하드웨어 시스템 그리고 주행성능 평가를 위한 다양한 실험이 이루어졌다. 4개의 바퀴를 갖는 보편적인 플랫폼 구조를 갖는 이 이동로봇은 각각의 바퀴를 조화롭게 제어함으로써 즉각적인 전후좌우 및 회전을 가능하게 하는 전방향성을 보유하게 된다. 전기적 하드웨어 설계 측면에서는 National Instrument사의 CompactRIO 임베디드 실시간 제어기와 C시리즈 모션 모듈 및 I/O 모듈이 사용되었다. 이동로봇의 전면 및 측면에 설치된 초음파 센서는 이동로봇과 주변 벽면 사이의 거리를 측정하고 이 거리정보를 이용하여 평면상의 이동로봇의 위치를 계산할 수 있다. 이와 같은 기구적, 전기적 설계를 바탕으로 전방향 이동로봇 시작품이 제작되었으며, 다양한 주행실험을 통해 개발된 전방향 이동로봇의 기본적인 성능을 확인하였다. 네 방향 움직임에 대한 기본적인 주행

실험이 수행되었고, 각 방향별 직진성을 파악하여 전방향성을 평가하였다. 다양한 바닥면에서의 경사를 수용할 수 있는 능력을 평가하기 위해 4도의 경사각에서의 등판실험이 수행되었다. 그리고 마지막으로 이러한 전방향 이동로봇의 종합적인 주행능력을 평가하기 위해 사각형 궤적을 주행한 후 원점으로 복귀하는 실험을 수행하였다. 바닥과의 슬립 등의 영향으로 이동로봇의 경우 정확한 위치 정밀도를 요구하는 작업에는 주로 사용되지는 않으나, 향후 연구로 이동로봇이나 주변에 설치된 센서 등을 이용하여 위치를 보정하고 정밀도를 높여 비교적 높은 정밀도가 필요한 상황에서도 사용 가능한 이동로봇을 개발하는 시도를 할 예정이다.

후기

이 논문은 2012년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2012R1A1A1040562).

References

- [1] Doroftei, I., Grosu, V., Spinu, V., 2007, Omnidirectional Mobile Robot - Design and Implementation, Bioinspiration and Robotics: Walking and Climbing Robots, I-Tech Education and Publishing, Vienna, 511-528.
- [2] Chu, B., Sung, Y. W., 2013, Development of Educational Robot Platform Based on Omni-directional Mobile Mechanism, Journal of the Korean Society of Precision Engineering 30:11 1161-1169.
- [3] Adascalitei, F., Doroftei, I., 2011, Practical Applications for Mobile Robots based on Mecanum Wheels - a Systematic Survey, The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics 20 21-29.
- [4] Muir, P. F., Neuman, C. P., 1987, Kinematic Modeling for Feedback Control of an Omnidirectional Wheeled Mobile Robot, In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation 1172-1178.
- [5] Chu, B., Sung, Y. W., 2013, Kinematic Modeling and Position Compensation Based on Mecanum Wheeled Omni-directional Mobile Robot, In Proceedings of International Symposium on Green Manufacturing and Applications A-10-3.
- [6] Chu, B., Sung, Y. W., 2013, Mechanical and Electrical Design about a Mecanum Wheeled Omni-directional Mobile Robot, In Proceedings of International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence 4-1.