

조향 가능한 전방향 바퀴를 갖는 전방향 이동로봇의 에너지 효율 개선

Improvement of Energy Efficiency for an Omnidirectional Mobile Robot with Steerable Omnidirectional Wheels

송재복*, 김정근

(Jae-Bok Song and Jeong-Keun Kim)

Abstract : Since most autonomous mobile robots are powered by a battery, it is important to increase the continuous operating time without recharging. This can be achieved by improving the energy efficiency of a mobile robot, but little research on energy efficiency has been performed. This paper proposes two methods for improving the energy efficiency of an omnidirectional mobile robot. One method is to realize a continuously variable transmission (CVT) by adopting the mechanism of steerable omnidirectional wheels. The other is the proposed steering algorithm in which wheel arrangement of the mobile robot is continuously adjusted so as to obtain the maximum energy efficiency of the motors during navigation. In addition, new omnidirectional wheels which can be transformed to the conventional wheels depending on the driving conditions are proposed to compensate for less efficient omnidirectional drive mode. Various tests show that motion control of the OMR-SOW works satisfactorily and the proposed steering algorithm for CVT can provide higher energy efficiency than the algorithm using a fixed steering angle. In addition, it is shown that the differential drive mode can give better energy efficiency than the omnidirectional drive mode.

Keywords : omnidirectional mobile robot, energy efficient drive, continuously-variable transmission

I. 서론

산업용 이동로봇이나 서비스 로봇으로 많이 사용되는 로봇은 대체로 두 바퀴가 독립적으로 제어되는 차동구동(differential drive) 방식으로 구현된다. 이러한 이동로봇은 2자유도 운동이 가능하므로, 제자리에서 회전은 가능하지만, 자세의 전환 없이 직접 측면으로 움직이는 것은 불가능하다. 이러한 운동의 제약을 극복하기 위해서 전방향 이동로봇(omnidirectional mobile robot)이 제안되었으며, 2차원 평면에서 3자유도(전후, 좌우, 회전)의 운동이 가능해서 몸체의 자세 전환 없이 임의의 방향으로 주행이 가능하다. 현재까지 여러 종류의 전방향 이동로봇이 연구되어 왔는데, 유니버설 휠[1], 볼 휠[2] 등이 널리 알려져 있다.

오랫동안 전방향 이동로봇에 관한 연구 및 개발이 수행되었음에도 불구하고, 복잡한 구조의 전방향 바퀴, 수직 및 수평 진동유발, 낮은 에너지 효율, 노면과의 슬립, 낮은 통과장애물 높이 등 실용성의 문제로 인해 산업현장이나 서비스 분야 등에서의 전방향 이동로봇의 활용은 아직은 활발하지 못한 상황이다.

수동롤러 또는 볼로 구성된 전방향 바퀴를 사용하는 전방향 이동로봇은 대부분 3륜 또는 4륜의 형태로 전방향 구동을 수행한다. 주행의 안정성이 중요한 경우에는 4륜 로봇을 사용하게 되며[3], 이 경우 4개의 바퀴가 독립적으로 구동되지만, 이로 인해서 하나의 여유자유도가 발생하게 된다. 이 문제를 해결하기 위하여 3개의 액츄에이터를 사용하여 4개의

전방향 바퀴를 구동하는 메커니즘이 개발되기도 하였다[4]. 또한, 여유자유도를 이용하여 바퀴의 배치(wheel arrangement) 상태를 가변하는 variable footprint mechanism이 제안되었는데[5], 로봇속도와 바퀴속도의 관계는 바퀴의 배치에 의존하므로 가변적인 바퀴 배치는 변속기로 기능을 할 수 있다. 그러나 이 경우 로봇의 안정성을 위해서 바퀴의 정렬 범위가 제한되는 단점을 갖는다. 이러한 단점을 보완하기 위하여, 그림 1의 조향 가능한 전방향 바퀴를 갖는 전방향 이동로봇(Omnidirectional Mobile Robot with Steerable Omnidirectional Wheels; OMR-SOW)이 제안되었는데[6], 실제로 기어를 사용하지 않고 여유자유도를 이용하여 바퀴의 배치 형상만을 조절하여 로봇의 속도를 연속적으로 변화시킬 수 있으므로, 무단변속기(Continuously-Variable Transmission, CVT)로서의 기능을 갖게 된다.

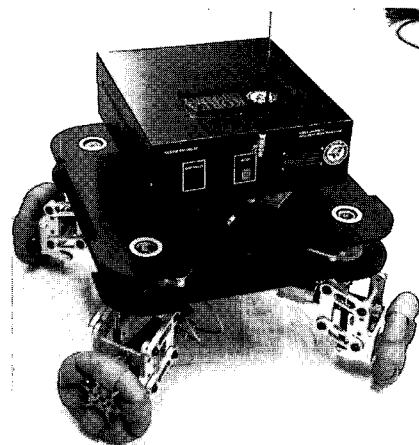


그림 1. 제안된 전방향 이동로봇 OMR-SOW.
Fig. 1. Proposed OMR-SOW.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 3. 8., 채택확정 : 2005. 4. 29.

송재복, 김정근 : 고려대학교 기계공학과

(jbsong@korea.ac.kr/tokmarines@korea.ac.kr)

※ 본 연구는 2003년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2003-041-D20038)에 의하여 연구되었음.

이동로봇의 주행에 있어서 독립성과 운동의 자유도를 높이기 위해서 축전지를 이동로봇에 탑재하여 동력을 공급하는 경우가 대부분이다. 이러한 경우에 에너지 효율은 제한된 동력을 가지는 시스템의 가동 가능 시간을 결정하는 중요한 성능지수가 된다. 에너지 효율을 향상시키기 위해서 모터 및 이를 구동하는 전자식 드라이브의 개선이 중요하데, 이에 대한 연구는 지난 수십 년간 지속되어 왔으므로 더 이상의 개선은 한계가 있다. OMR-SOW는 앞서 언급한 바와 같이 기어 트레인 없이 바퀴의 배치를 조절하여 연속적으로 로봇속도를 가변할 수 있는 무단변속 기능을 가지고 있는데, 이러한 기능은 높은 에너지 효율을 갖는 구동을 가능하게 한다. 그러나 이러한 에너지 효율의 향상은 적절한 제어 알고리즘을 통해서만 가능하므로, 본 연구에서는 최대 에너지 효율을 보장하는 제어 알고리즘을 제안한다.

한편, 일반적인 직선 주행에서 전방향 구동 능력은 오히려 에너지 효율을 저하시키는 요인이 된다. 이러한 상황에서는 4개의 바퀴가 평행하게 배치되는 형상이 가장 효율적인 구동을 가능하게 한다. 본 연구에서는 기존의 OMR-SOW를 개량하여 전방향구동과 더불어 차동구동(differential drive)도 구현할 수 있는 로봇을 개발하였다. 차동구동의 경우 수동물리의 회전을 구속하게 되는데, 이는 로봇이 넘을 수 있는 장애물의 높이를 크게 하는 효과도 부수적으로 가져온다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 OMR-SOW의 구조와 기구학적 해석을 다루며, 차동구동이 가능한 전방향 바퀴를 제안한다. 3장에서는 OMR-SOW의 속도제어 방식과 에너지 효율의 향상을 위한 조향제어 알고리즘에 대하여 설명한다. 4장에서는 제안된 메커니즘의 효용성과 에너지 효율 향상을 실험을 통하여 검증하며, 5장에서 결론을 도출한다.

II. 전방향 이동로봇 OMR-SOW

1. 전방향 이동로봇의 구조

본 논문에서는 조향 가능한 전방향 바퀴를 갖는 전방향 이동로봇(Omnidirectional Mobile Robot with Steerable Omnidirectional Wheels; OMR-SOW)을 보완하여 2차원 평면상에서 3자유도 주행이 가능하고, 무단변속 기능을 이용하여 에너지 효율이 높으며, 상황에 따라 차동방식의 이동로봇과 유사한 메커니즘으로 변신할 수 있는 전방향 이동로봇을 개발하였다. 개발된 전방향 이동로봇은 alternate wheel[7]을 보완하여 본 연구실에서 개발한 CAW(Continuous Alternate Wheels)[8]를 장착하고 있다. DC모터(150W) 4개를 이용하였으며, 가반하중이 약 100kg이므로 성인 한 명이 탑승할 수 있다. OMR-SOW는 호스트 PC의 제어프로그램에 의해 조작될 수 있으며, 필요에 따라 사용자가 탑승할 수 있는 의자를 부착 후 무선 조이스틱을 이용해 직접 조작할 수도 있다.

OMR-SOW는 그림 2와 같이, 전방향 이동로봇 기구부, 모터 제어기, 마스터 제어기, 호스트 PC, 전원부 등의 5부분으로 구성되어 있다. OMR-SOW에는 소음이 작고, 소형이며, 응답속도가 빠른 DC 서보모터를 사용하였으며, 모터 제어기는 DSP에 기반한 제어기를 설계하여 1ms의 빠른 제어주기를 갖도록 하였고, 모터드라이버는 FET의 게이트 드라이버를 내장한 LM18200을 병렬로 장착하는 형태로 개발하였다. 또한, 마스터 제어기는 Texas Instrument사의 TMS320F2812를 사

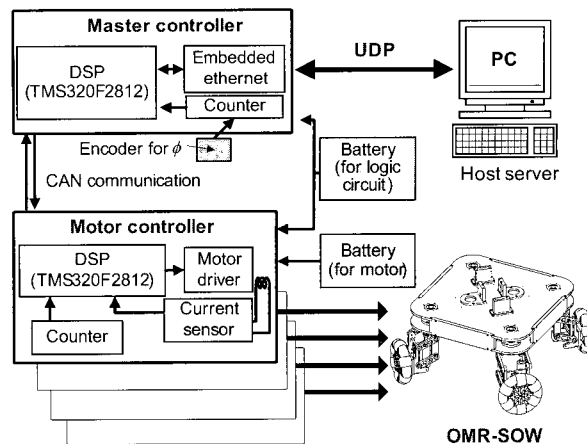


그림 2. OMR-SOW의 시스템 구성.
Fig. 2. System configuration of OMR-SOW.

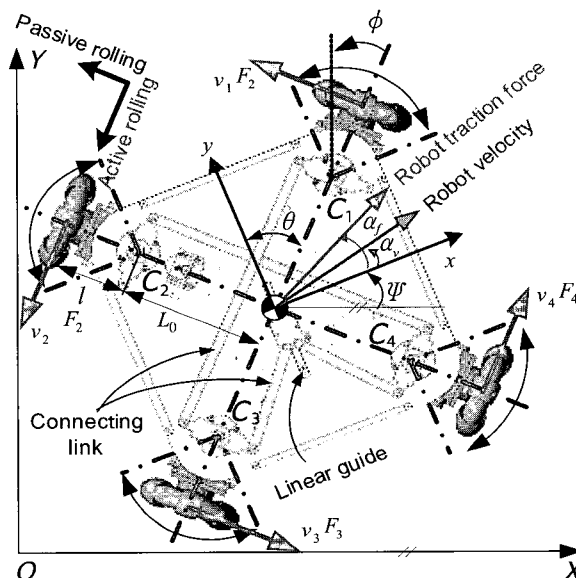


그림 3. OMR-SOW의 좌표계.
Fig. 3. Coordinate systems of OMR-SOW.

용하여 호스트 PC와는 임베디드 이더넷을 이용한 UDP 통신을 수행하였다. 이때, 마스터 제어기의 DSP는 기구학, 동역학 해석 등을 담당하는 반면에, 호스트 PC는 로봇의 속도, 가속도 등 사용자의 지령을 연산하여 OMR-SOW에 전송하고, OMR-SOW의 각종 정보를 분석하여 사용자에게 제공하고 파일로 저장하는 기능을 담당한다.

그림 3은 OMR-SOW에 사용되는 좌표계를 나타낸다. 공간상에 기준좌표계 $O-XY$, 이동로봇의 중심에 이동좌표계 $o-xy$ 를 설정한다. y 축과 로봇 몸체의 대각선이 이루는 각 θ 는 로봇 몸체의 모양에 따라서 그 값이 결정된다. (즉, 정사각형의 몸체에 대하여 $\theta = 45^\circ$) 4개의 바퀴모들은 몸체의 코너에 위치한 피봇점 C_1, \dots, C_4 를 중심으로 회전할 수 있지만, 리니어 가이드와 연결링크 등으로 구성되는 메커니즘에 의해서 구속되므로 모든 바퀴는 서로 동기화되어 전체적으로 단지 1자유도의 조향만을 수행할 수 있다. 이때 조향은 별도의 조향용 모터에 의해서 구현되는 것이 아니라, 각 바퀴 속도의 백

터함에 의해서 간접적으로 결정된다는 점에 유의하여야 한다. 그림 3에서 조향각 θ 는 몸체의 대각선 C_1C_3 또는 C_2C_4 로부터 바퀴가 회전한 각도로 정의되며, 반시계 방향을 양(+)으로 정의하였다. 조향각은 전방향구동 모드에서는 $-30^\circ \sim +30^\circ$ 의 범위에서 가변되지만, 차동구동 모드에서는 $+45^\circ$ 또는 -45° 로 유지된다.

2. 전방향 바퀴

본 연구실에 개발된 CAW(Continuous Alternate Wheel)는 그림 4와 같이 회전의 중심이 되는 허브가 수동롤러로 둘러싸인 형상으로 구성되어 있다. CAW는 내측롤러와 외측롤러가 교대로 배치되어 있으며, 두 롤러 사이에 간극이 거의 없으므로, 구동시에 기존의 전방향 바퀴에서 발생하는 수직 및 수평 진동이 거의 발생하지 않는 장점을 갖는다. CAW는 수동회전과 능동회전의 두 가지 운동을 수행한다. 능동회전에서는 모터에 의해 바퀴가 허브축을 중심으로 회전하는 반면에, 수동회전은 자유로운 회전이 가능한 수동롤러가 지면과의 접촉하여 회전함으로써 수행된다. 그러므로 CAW의 속도는 능동방향(즉, v_a)의 속도성분과 수동방향의 속도성분으로 분리될 수 있으며, 이들 속도의 벡터 합이 바로 바퀴속도에 해당한다. 이들 바퀴는 기어를 통해서 DC모터와 연결되어 있다. OMR-SOW의 4륜이 모두 항상 지면과 접촉하고 있는 것이 필요하며, 이를 위하여 현가장치가 사용된다. 이 현가장치는 바퀴를 통하여 전달된 충격이나 진동을 흡수하는 기능도 갖게 된다.

한편, 본 연구를 위해서 개량된 CAW에서는 차동구동 시에는 조향각이 $+45^\circ$ 또는 -45° 로 고정될 수 있도록 하였다(그림 12의 (d)에 해당함). 차동구동은 전방향구동에 비하여 다음의 두 가지 측면에서 장점이 있다. 첫째, 전방향 구동이 필요하지 않은 상황에서는 차동구동을 하는 일반적인 이동로봇과 유사한 수준까지 OMR-SOW의 에너지 효율이 향상된다. 둘째, 바퀴가 넘을 수 있는 장애물의 높이가 높아져 노면이 고르지 못한 환경에서의 주행이 원활해진다. 이는 전방향 바퀴의 경우 수동롤러의 존재로 인하여 넘을 수 있는 요철의 최대 높이가 수동롤러의 반경보다 작게 되는데, 수동롤러가 구속되는 차동주행의 경우에는 넘을 수 있는 요철의 최대 높이가 바퀴의 반경으로 확대되기 때문이다.

차동구동을 위하여 바퀴 조향각을 $+45^\circ$ 또는 -45° 로 정렬할 경우 OMR-SOW는 수동롤러를 제어할 수 없게 된다. 즉, 바퀴가 정렬한 방향과 수직하게 로봇에 힘을 가하면 수동롤러의 자유회전에 의해서 로봇이 밀려나게 된다. 이러한 경우에 수동롤러를 구속하여 회전하지 못하게 하면, 전방향 바퀴인 CAW는 능동회전만을 하게 되므로 로봇은 차동구동형 이동로봇과 같은 구조를 갖게 된다. 이러한 점에 착안하여 본 연구에서는 전방향 바퀴의 수동롤러에 구속력을 부가하는 브레이크 장치를 설계하여 장착하였다.

그림 5(a)는 수동롤러 브레이크를 부착한 CAW의 분해도이다. 수동롤러 브레이크는 CAW를 구성하고 있는 수동롤러를 구속하기 위해 12개의 브레이크 패드(brake pad)가 부착되어 있는데, 이들은 CAW의 허브축 방향으로 병진운동을 하여 수동롤러와 접촉함으로써 수동롤러를 구속하게 된다. 브레이크 패드가 수동롤러를 구속하는 원리를 그림 5(b)에 나타내

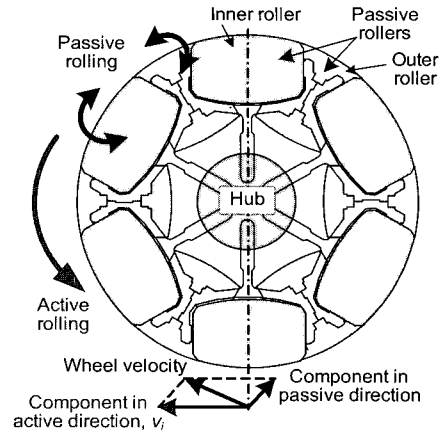


그림 4. CAW의 외양 및 능동회전과 수동회전.
Fig. 4. Appearance of CAW and active and passive rolling.

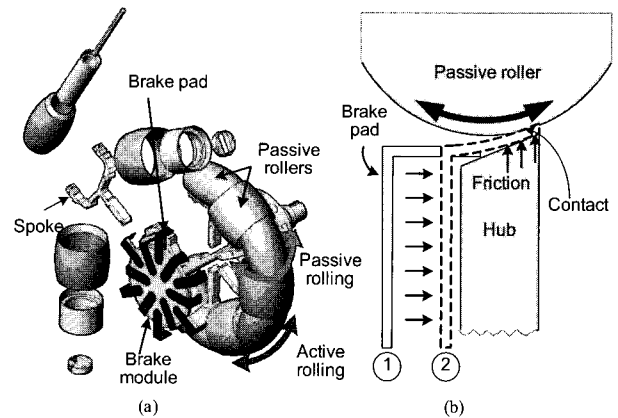


그림 5. (a) 수동롤러 브레이크를 갖는 전방향 바퀴의 분해도 (b) 수동롤러 브레이크 메커니즘.
Fig. 5. (a) Disassembled appearance of CAW with brake module (b) passive roller brake mechanism.

었다. OMR-SOW가 전방향 구동을 수행할 때는 브레이크 패드가 ①의 자리에 위치하여 수동롤러와 접촉하지 않으므로 구속력이 작용하지 않는다. 그러나 OMR-SOW가 차동구동을 수행할 때는 수동롤러 브레이크가 작동하여 브레이크 패드가 ②의 자리에 위치하게 된다. 이 경우 전방향 바퀴의 허브와 스포크(spoke)의 경사면을 따라 브레이크 패드가 탄성변형을 일으켜 수동롤러와 접촉하게 된다. 이때, 수동롤러와 브레이크 패드는 마찰하게 되며, 수동롤러는 회전하지 않도록 구속된다.

3. 기구학적 모델링

각 바퀴의 속도벡터 V_w 와 이동로봇의 속도벡터 V_r 의 관계는 다음과 같다.

$$V_r = J V_w \quad \text{or} \quad V_w = J^{-1} V_r \quad (1)$$

여기서, $V_w = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4]^T, V_r = [v_x \ v_y \ \psi \ \dot{\phi}]^T$ 이다. v_1, v_2, v_3, v_4 는 바퀴속도, v_x, v_y 는 로봇 몸체의 선속도 성분, ψ 는 로봇 몸체의 각속도, $\dot{\phi}$ 는 바퀴모듈의 각속도를 각각 나타낸다. 한편, 자코비안 행렬 J 은 다음과 같다.

$$J = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -1/C & -1/C & 1/C & 1/C \\ 1/S & -1/S & -1/S & 1/S \\ 1/L & 1/L & 1/L & 1/L \\ 1/l & -1/l & 1/l & -1/l \end{bmatrix}, \quad \begin{cases} C = \cos(\theta - \phi) \\ S = \sin(\theta - \phi) \\ L = L_0 \cos \phi + l \end{cases} \quad (2)$$

(2)에서 $0 < \theta - \phi < 90^\circ$ 이면 $C \neq 0$ 이며, $S \neq 0$ 이므로 행렬이 full rank가 되어 역행렬 J^{-1} 이 존재한다. (1)에서 보듯이 4개의 바퀴를 구동하는 각 모터의 제어에 의해서 로봇의 속도 및 바퀴 배치를 가변시키는 바퀴모듈의 각속도를 완전히 결정할 수 있다.

이때, 로봇속도 V_r 과 바퀴속도 V_w 를 정량적으로 크기를 직접 비교할 수는 없으므로, 다음과 같이 이들 벡터의 놈인 $\|V_r\|$ 와 $\|V_w\|$ 의 크기의 비를 속도비(velocity ratio)로 정의한다.

$$r_v = \frac{\|V_r\|}{\|V_w\|} = \frac{\|J V_w\|}{\|V_w\|} \quad (3)$$

한편, 로봇의 힘과 모멘트는 그림 4로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_r = J^{-T} F_w \text{ or } F_w = J^T F_r \quad (4)$$

여기서, $F_w = [F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4]^T$, $F_r = [F_x \ F_y \ T_z \ T_\phi]^T$ 이다. $F_i (i=1, \dots, 4)$ 는 전방향 바퀴에서의 능동회전 방향으로의 구동력이며, F_x 와 F_y 는 무게중심에 작용하는 힘의 x 및 y 방향의 성분, T_z 는 로봇의 무게중심에 z 축에 대한 모멘트, 그리고 T_ϕ 는 바퀴모듈을 회전하는 데 필요로 하는 토크를 각각 나타낸다. 즉, 바퀴구동력의 조합에 의해서, 로봇 몸체에 임의의 구동력 (F_x, F_y, T_z) 및 바퀴모듈을 조향하는 모멘트 (T_ϕ)가 얻어질 수 있다.

로봇구동력과 바퀴구동력 역시 정량적으로 크기를 직접 비교할 수 없으므로, 이들 벡터의 놈인 $\|F_r\|$ 와 $\|F_w\|$ 의 크기의 비를 힘비(force ratio)로 정의한다.

$$r_f = \frac{\|F_r\|}{\|F_w\|} = \frac{\|J^{-T} F_w\|}{\|F_w\|} = \frac{1}{r_v} \quad (5)$$

힘비와 속도비는 서로 역수의 관계에 있음에 유의하여야 한다.

III. 에너지 효율을 위한 조향제어 알고리즘

이 절에서는 에너지 효율을 향상시키기 위하여 OMR-SOW의 CVT에 기반하여 수행되는 조향제어 알고리즘에 대하여 논하기로 한다. 자동차의 CVT는 여러 다양한 차량조건 하에서 연료효율이나 성능의 관점에서 엔진이 최적의 범위 내에 있도록 동작점을 조절하는 역할을 수행한다. 이에 비하여, OMR-SOW의 CVT 제어 알고리즘은 4개 모터의 영향을 모두 반영할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 모터의 동작점에 대한 해석에 근거하여, 단순하지만 효과적인 CVT 제어 알고리즘을 제안한다.

1. OMR-SOW의 속도제어

OMR-SOW의 운동은 바퀴속도를 통해서 제어할 수 있다. 즉, 원하는 로봇속도 V_{rd} 가 주어지면, 이를 구현하기 위한 각 바퀴의 기준속도(즉, 속도명령) V_{wd} 는 (1)에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$V_{wd} = J^{-1} V_{rd} \quad (6)$$

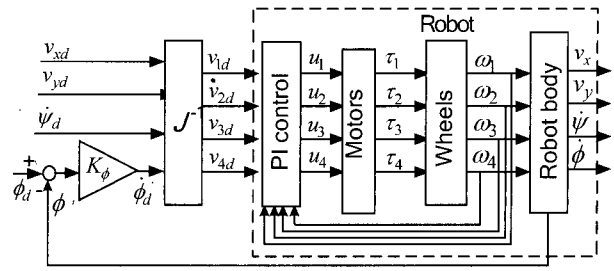


그림 6. 조향각 제어를 포함한 OMR-SOW의 제어시스템.
Fig. 6. Control system of OMR-SOW including steering angle control.

OMR-SOW의 제어시스템에 대한 블록선도인 그림 6에서 보듯이 각 모터에 속도명령 $V_{wd} = [v_{1d} \ v_{2d} \ v_{3d} \ v_{4d}]^T$ 가 주어지면 PI 제어기에 의해서 DC모터에 인가될 제어신호 $u_i (i=1, \dots, 4)$ 가 계산되어 모터의 속도제어가 수행된다.

4개의 바퀴가 주어진 속도명령을 정확히 추종한다면, 원하는 로봇속도가 얻어지지만, 실제 환경에서는 바퀴와 지면 사이에 슬립이 존재할 수 있으므로, 이로 인해 실제 운동과 원하는 운동 사이에 차이가 발생한다. 그러나 로봇에는 로봇 몸체의 속도를 측정할 수 있는 센서가 없으므로 어느 정도의 오차는 불가피하며, 이러한 오차는 거리센서를 이용한 로봇의 위치추정을 통해서 보정되어야 하지만, 이는 본 논문의 범위를 벗어나므로 여기서는 언급하지 않기로 한다.

한편, OMR-SOW에서는 4개의 바퀴가 독립적으로 제어되므로, 임의의 3자유도의 로봇속도를 구현하면서도 1자유도의 조향을 $-30^\circ \sim +30^\circ$ 의 조향각 범위 내의 임의로 조절할 수 있다. 이 때 원하는 기준 조향각 ϕ_d 는 뒤에서 설명할 최대 에너지 효율을 위한 조향 알고리즘에 의해서 결정되며, 실제 조향각 ϕ 는 조향축에 설치된 엔코더에 측정된다. 따라서 기준 조향속도 $\dot{\phi}_d$ 는 기준 조향각을 추종하기 위한 제어기로부터 계산된다.

$$\dot{\phi}_d = K_\phi (\phi_d - \phi) \quad (7)$$

여기서, K_ϕ 는 조향의 제어이득이다.

2. 모터의 동작영역과 에너지 효율

그림 7은 OMR-SOW에 사용된 DC 서보모터의 동작영역에 따른 효율을 보여준다. T_{max} 는 모터의 최대 연속토크, ω_{max} 는 최대 허용속도, P 는 출력이며, η 는 효율이다. 입력전력은 입력 전류와 전압의 곱으로, 출력전력은 모터의 각속도와 토크의 곱으로 표시되며, 효율은 출력전력과 입력전력의 비에 해당한다. 이 그림에서 보듯이, 점선으로 표시된 일정한 출력전력 곡선 위에서 모터의 동작점이 변하면 효율도 따라서 변하게 되는데, 이는 동일한 출력을 내기 위해서 요구되는 입력이 동작점에 따라서 다르다는 점을 의미한다. 이러한 동작점은 CVT에 의해서 조절될 수 있다. 동일한 출력 P 에 대해서, CVT에 의해 속도비가 감소하면(즉, 힘비가 증가하면), 모터의 속도는 증가하고, 토크는 감소하게 되어, 에너지 효율이 증가하게 된다. 결론적으로, 모터가 힘비가 최대가 되는 고속도/저토크의 영역에서 동작되도록 CVT를 조절하는 것이 에너지 효율면에서 바람직하다.

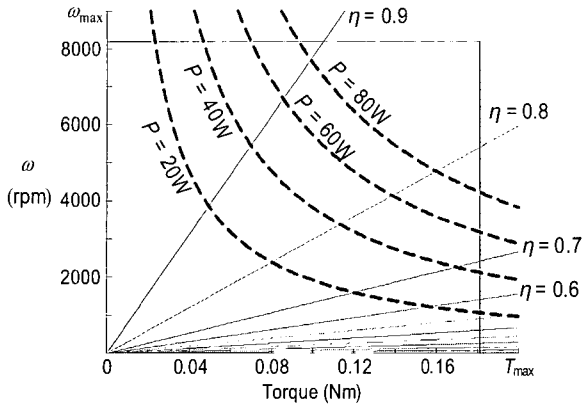


그림 7. DC 서보모터의 동작영역에 따른 효율.
Fig. 7. Efficiency depending on the operating range of a DC motor.

3. 조향제어 알고리즘

3.1절에서 설명한 바와 같이, 로봇이 추종하여야 하는 로봇 속도 V_m 가 주어지면, 이를 달성하기 위해서 각 바퀴의 속도 제어가 독립적으로 수행된다. 이 때 동일한 로봇속도에 대해서 $-30^\circ \sim +30^\circ$ 의 조향각 범위 내에서 임의의 조향각을 선택할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 조향제어 알고리즘에서는, 조향각 범위 내에서 최대의 에너지 효율을 발생시킬 수 있는 조향각을 계산하며, 이렇게 결정된 조향각은 앞서 설명한 (7)에 의해서 그림 6의 제어시스템에 의해서 구현된다.

그림 6에서 각 모터의 PI 제어에 의해서 모터의 속도제어가 수행된다. 이 때, 모터 드라이브에 설치된 전류센서로부터 각 모터에 흐르는 모터전류를 측정할 수 있으며, 이 전류에 토크상수를 곱하면 각 모터의 발생 토크 $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ \tau_4]^T$ 를 구할 수 있다. 발생된 모터토크 중에서 바퀴 자체의 가속 및 바퀴축에서의 마찰의 극복에 사용되는 토크를 제외한 나머지 토크는 바퀴구동력 F_w 로 사용된다.

$$F_w = (\tau - I_w \dot{\omega}_w - c_w \omega_w) / r \tag{8}$$

여기서 r 은 바퀴의 반경, I_w 는 바퀴축에 대한 관성모멘트, c_w 는 바퀴의 점성마찰계수, $\omega_w = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4]^T$ 는 바퀴의 각속도이다. (8)을 (4)에 대입하면, 로봇구동력 F_w 를 구할 수 있다. 이로부터 그림 3에서와 같이 로봇구동력이 x 축과 이루는 각도인 로봇구동력 각도 α_f 를 계산할 수 있다.

그림 8은 로봇구동력 각도 α_f 및 조향각 ϕ 의 향으로 (5)의 힘비 r_f 를 나타낸 것이다. 로봇구동력 각도 및 조향각에 따라 동일한 바퀴구동력에 대해서도 로봇구동력이 상당히 차이가 발생한다는 점을 알 수 있다. 3.2절에서 설명한 바와 같이 CVT 기능을 가지는 전방향 이동로봇은 힘비가 최대가 되는 영역에서 동작되는 경우에 최대의 에너지 효율을 가지게 된다. 즉, 로봇구동력 각도가 90° 인 경우에는 조향각이 -30° 로 조정되는 경우가 힘비가 최대가 되어 최대 에너지 효율을 보이게 된다.

앞서 언급한 바와 같이 최대 에너지 효율은 CVT에서 힘비가 최대가 될 때 얻어진다. 그림 9에서 Curve 1은 각 로봇구동력 각도 α_f 에서 최대 힘비에 해당하는 조향각을 연결한 곡선이다. 그러나 $\alpha_f = 45^\circ$ 를 전후하여 조향각이 $+30^\circ$ 에서 -

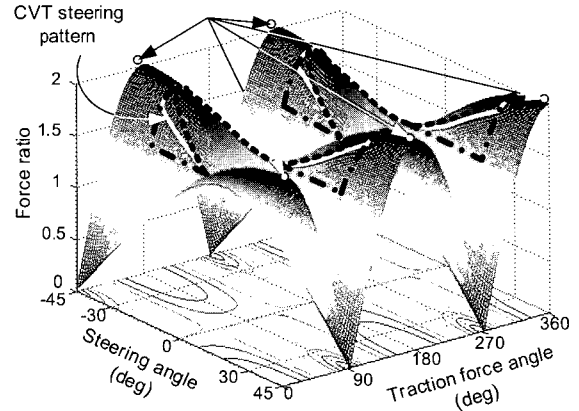


그림 8. 구동력 각도 및 조향각에 따른 힘비의 변화.
Fig. 8. Force ratio as a function of traction force angle and steering angle.

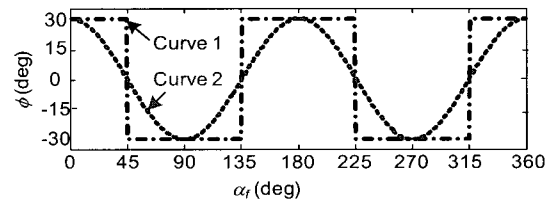


그림 9. 로봇구동력 각도에 따른 최대 힘비를 갖는 조향각 곡선
Fig. 9. Steering angle curve with maximum force ratio as a function of robot traction force angle.

30° 로 급격히 불연속적으로 변하여야만 최대 힘비를 유지할 수 있다. 실제로 이러한 급격한 조향각의 변화는 구현하기도 어려우며, 구현이 가능하더라도 불연속적인 운동은 여러 면에서 바람직하지 않다. 이를 개선하기 위하여 불연속점이 발생하지 않도록 단순한 사인함수에 해당하는 Curve 2를 사용하여 조향각을 변화시키는 제어 방식을 제안한다.

IV. 실험 및 고찰

본 장에서는 앞서 제안된 메커니즘 및 알고리즘의 성능을 평가하기 위한 실험을 수행하였으며, 그 결과를 고찰하고자 한다.

그림 10은 원 궤적에 대한 OMR-SOW의 추적성능을 보여주는 실험 결과이다. 로봇은 x 축 방향으로 $0.4m/s$ 의 속도로 병진운동을 하면서, 동시에 z 축에 대한 회전을 수행한다. 로봇이 위치제어를 수행하지 않으므로, 위치오차가 누적되어 최종위치와 초기위치 간에 다소의 오차가 관찰되지만, 실선으로 표시된 실제 궤적이 점선으로 표시된 기준궤적을 비교적 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

고정된 조향각을 사용하는 경우와 제안된 조향제어 알고리즘에 의해서 조향각을 조절한 경우에 대한 에너지 효율을 실험적으로 비교하였다. 그림 11은 $1.2m \times 1.2m$ 의 정사각형 궤적을 $0.05m/s$ 의 속도로 주행하는 경우의 실험 결과이다. 그림 11(a)는 고정된 조향각을 사용한 결과로 $221.3J$ 의 에너지가 소모되었다. 그러나 조향제어 알고리즘으로 최대효율을 갖는 조향각을 산출하여 수행한 (b)의 경우에는 에너지 소모량이 $179.5J$ 로 (a)에 비하여 15% 정도 감소하였다.

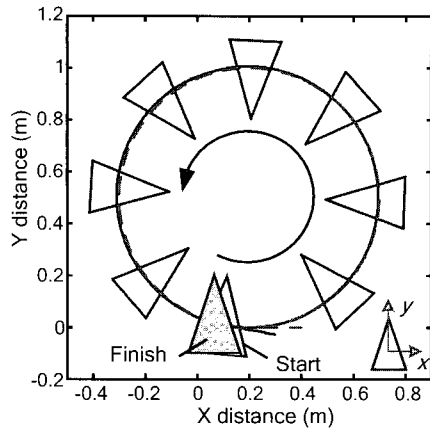
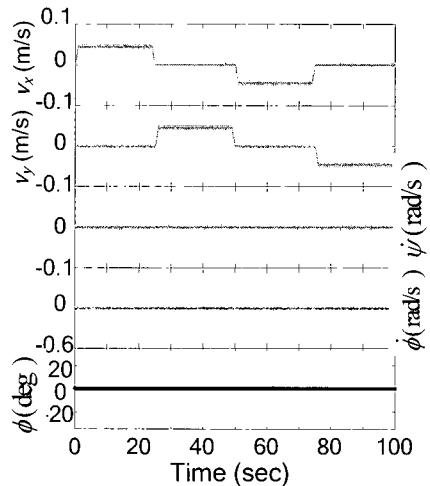
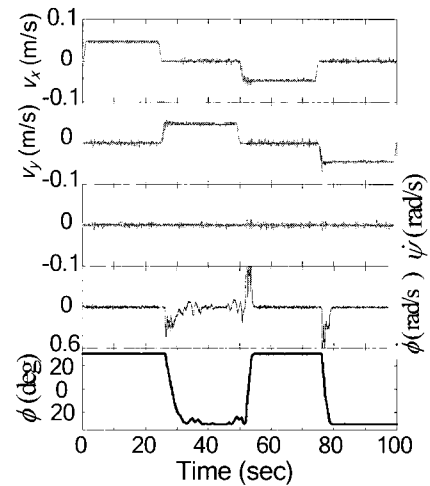


그림 10. 원 궤적 추적성능에 대한 실험결과.
 Fig. 10. Experimental results of tracking performance for a circular trajectory. (solid line: actual trajectory, dashed line: reference trajectory)



(a) Fixed steering angle



(b) Variable steering angle by steering algorithm

그림 11. 조향제어 알고리즘의 미적용 및 적용시의 실험 결과.
 Fig. 11. Experimental results without and with steering algorithm.

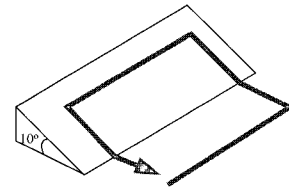


그림 12. 경사면을 갖는 정사각형 궤적.
 Fig. 12. Square trajectory with ramp.

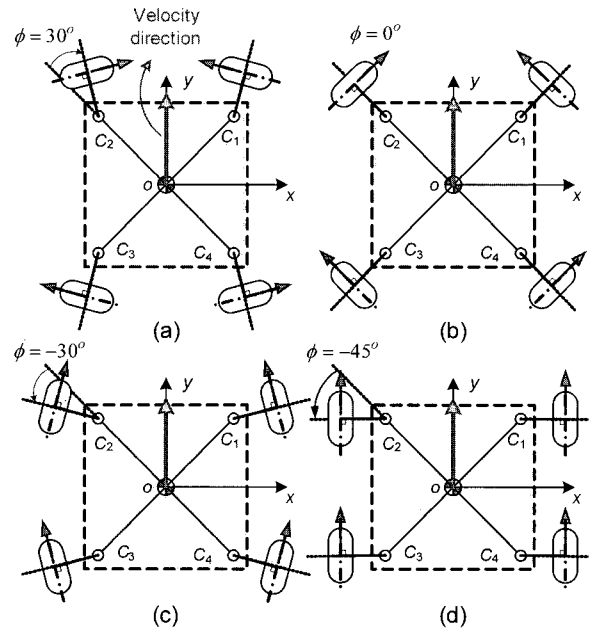


그림 13. 전방향 및 차동 구동에 대한 실험 조건 (a) $\phi = 30^\circ$, (b) $\phi = 0^\circ$, (c) $\phi = -30^\circ$, (d) $\phi = -45^\circ$.

Fig. 13. Experimental conditions for omnidirectional and differential drive (a) $\phi = 30^\circ$, (b) $\phi = 0^\circ$, (c) $\phi = -30^\circ$, (d) $\phi = -45^\circ$.

이번에는 앞의 정사각형 궤적이 그림 12에서 보듯이 10°의 경사면에 걸쳐 있는 경우의 주행 결과이다. 주어진 속도를 추종하기 위해서 경사면에서는 모터의 토크가 훨씬 증가되어야 하며, 이는 모터의 측정전류에 반영된다. 즉, 측정전류는 노면의 조건이나 기타 외란에 대한 정보를 간접적으로 반영하게 된다. 그러므로 3.3절에서 설명한 바와 같이 측정전류에 기반한 조향제어 알고리즘은, 경사면이나 외란이 있더라도 에너지 효율을 위한 적절한 조향각을 찾아낼 수 있다. 이와 같은 결과로, 고정된 조향각을 사용한 경우의 767.5J에 비하여, 조향제어 알고리즘을 사용한 경우에는 635.4J의 에너지가 소모 대략 14%정도의 에너지가 감소하였다.

그림 13은 OMR-SOW의 주행 실험시의 바퀴 배치 상태와 주행 방향을 나타낸다. 총 4회에 걸쳐 조향각을 변화시키면서, 로봇이 0.05m/s의 속도로 동일한 주행방향(즉, y축 방향) 및 주행시간을 유지하도록 하였다. OMR-SOW의 운전 모드는 전방향 구동과 차동 구동으로 나눌 수 있다. 그림 13의 (a), (b), (c)와 같이 조향각이 30°, 0°, -30°가 되도록 하여 전방향 구동 실험을 수행하였으며, (d)와 같이 바퀴의 수동롤러를 구속한 상태에서 조향각이 45°가 되도록 하여 차동 구동 실험을 수행하였다.

표 1. 전방향 및 차동 구동에 대한 실험 결과.

Table 1. Experimental results for omnidirectional and differential drive.

Experiments	ϕ	Average current (A)	Power (W)	Energy (J)
(a)	30	0.385	9.246	924.6
(b)	0	0.296	7.112	711.2
(c)	-30	0.275	6.605	660.5
(d)	-45	0.266	6.402	640.3

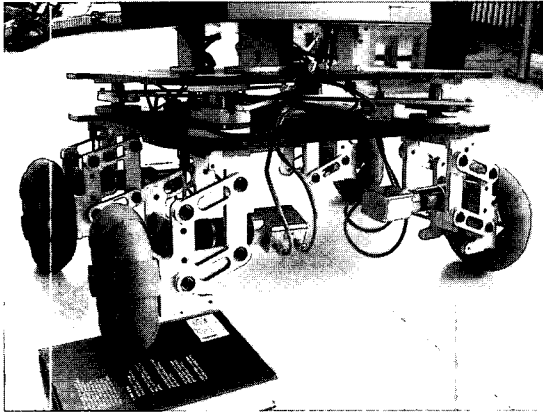


그림 14. 5cm 높이의 장애물을 통과하는 전방향 이동로봇.
Fig. 14. Photo of surmounting a 5cm high bump.

총 10회에 걸쳐 수행한 실험결과를 정리하면 표 1과 같다. 실험 (b)의 결과를 기준으로 (a)는 23%의 에너지가 더 소비되었으며, (c)는 7.1%의 에너지가 감소된 것을 보여준다. 또한, 차동구동을 수행한 실험 (d)는 전방향 구동에서 에너지 효율이 가장 좋은 실험 (c)보다 소모 에너지가 3.1% 정도 감소하였다. 이는 주행 방향인 y 축 방향으로 바퀴가 정렬할수록 좀 더 효율적인 주행을 할 수 있다는 직관과 일치되는 결과이다. 그러나 주행 방향이 계속 변하거나 복잡한 경우에는 제안한 조향제어 알고리즘을 사용하여야 체계적으로 최대 효율을 갖는 조향각을 찾을 수 있게 된다.

자동차에 사용되는 일반적인 바퀴는 수동롤러를 갖는 전방향 바퀴에 비하여 노면이 고르지 못한 환경에서 주행성능이 우수하다. 이는 수동롤러를 갖는 전방향 바퀴의 통과 가능한 요철의 높이는 바퀴의 가장 작은 수동롤러의 반경과 롤러의 마찰력에 의해 결정되는 반면에, 일반적인 바퀴는 바퀴의 반경과 타이어의 마찰력에 의해 결정되기 때문이다. 앞에서 제안한 수동롤러 브레이크를 장착한 CAW과 바퀴정렬 메커니즘을 이용하여 차동주행 상태로 OMR-SOW를 운전할 경우 일반적인 바퀴와 유사한 주행성능을 발휘할 수 있다. 그림 14은 수동롤러의 반경보다 큰 5cm 높이의 요철을 통과하는 그림이다.

VI. 결론

본 논문에서는 조향 가능한 전방향 바퀴를 갖는 전방향 이동로봇에서 바퀴의 배치 형상의 가변을 이용한 무단변속기 (CVT) 기능을 구현하였다. 또한, 전방향 바퀴의 수동롤러를 구축하여 2자유도의 차동 구동도 가능하게 한 새로운 개념의 전방향 바퀴를 제안하였다. 이러한 연구의 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) CVT 기능을 사용하여 모터의 동작점을 고속도/저토크 영역에서 운영되도록 조정함으로써 에너지 효율을 크게 향상시킬 수 있었다. 즉, 로봇의 구동력의 방향에 따라 최대 에너지 효율을 갖도록 로봇의 조향각을 제어하는 알고리즘을 구현함으로써 고정된 조향각을 갖는 경우에 비하여 15-20%의 소요에너지를 감소시킬 수 있었다.

2) 직선 주행과 같이 전방향 구동이 필요하지 않는 상황에서 차동구동을 구현함으로써, 에너지 효율을 더욱 높일 수 있었으며, 전방향 구동 모드시보다 더 높은 장애물을 통과할 수 있었다.

현재 에너지 효율을 더 높일 수 있도록 하는 제어 알고리즘을 개발 중에 있다.

참고문헌

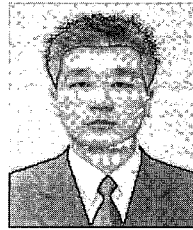
- [1] J. F. Blumrich, "Omnidirectional vehicle," United States Patent 3,789,947, 1974.
- [2] M. West, H. Asada, "Design of ball wheel mechanisms for omnidirectional vehicles with full mobility and invariant kinematics," *Journal of Mechanical Design*, vol. 119, pp. 153-161, 1997.
- [3] P. Muir, C. Neuman, "Kinematic modeling of wheeled mobile robots," *Journal of Robotic Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 281-340, 1987.
- [4] H. Asama, M. Sato, N. Goto, A. Matsumoto, I. Endo, "Mutual transportation of cooperative mobile robots using forklift mechanisms," *Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1754-1759, 1996.
- [5] M. Wada, H. Asada, "Design and control of a variable footprint mechanism for holonomic omnidirectional vehicles and its application to wheelchairs," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 15, no. 6, pp. 978-989, 1999.
- [6] J.-B. Song, K.-S. Byun, "Design and control of an omnidirectional mobile robot with steerable omnidirectional wheels," *Journal of Robotic Systems*, Wiley Europe, vol. 21, no. 4, pp. 193-208, April, 2004.
- [7] B. E. Ilou, "Wheels for a course stable self-propelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base," United States Patent 3,876,255, 1975.
- [8] K.-S. Byun, J.-B. Song, "Design and construction of continuous alternate wheels for an omni-directional mobile robot," *Journal of Robotic Systems*, Wiley Europe, vol. 20, no. 9, pp. 569-579, September, 2003.



송재복

1960년 8월 5일생. 1983년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1985년 서울대학교 기계설계학과(공학석사). 1992년 MIT 기계공학과(공학박사). 1993년~현재 고려대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 이동로봇의 주행, 햅틱스, 지능로봇 시

스템의 설계 및 제어.



김정근

1977년 4월 3일생. 2003년 동아대학교 공과대학 기계공학과(공학사). 2005년 고려대학교 메카트로닉스학과(공학석사). 현재 삼성전자 근무 중. 관심분야는 로봇틱스.