

무한회전 터릿을 갖는 동기식 이동로봇 베이스의 개발

권오상[#]

Development of Synchro-drive Mobile Robot Base with Endless Rotate Type Turret

Oh Sang Kwon[#]

ABSTRACT

As the robot industry changes from industrial robot into personal robot used in home, the concept also changes from the existing fixed manipulator into Mobile Manipulator of free move in the aspect of appliance. For personal robot with such features, the role of mobile system is very important technology that rules the roost of robot functions. Especially, it is necessary to develop moving mechanism for free move in a narrow environment with obstacles such as home. This study introduces 3-axis structure in order to develop synchronous method that has turret capable of endless revolution for practical use as well as semi-omnidirectional function, and suggests applicable method to solve the problem of mechanical coupling.

Key Words : Mobile robot(이동로봇), Synchro-drive(동기식구동), Omnidirectional(전방향), Personal robot(퍼스널로봇)

1. 서론

최근 로봇산업에서의 패러다임이 산업용에서 인간과 공존하면서 인간에게 도움을 줄 수 있는 퍼스널로봇으로 천이 되면서 로봇에 대한 관심이 증가하고 있다. 이러한 로봇에서 특히 이동로봇에 관한 연구는 1980년대 후반부터 최근까지 많은 연구가 수행되어 왔다. 평지에서 3자유도를 갖는 전방향 (omnidirectional) 이동로봇은 센서에 기반하여 자율 주행하는 이동로봇에 가장 적합한 구조로서 최근까지 활발한 연구개발이 추진되고 있으

나 아직까지는 지면과 점 접촉이 가능해야 하는 근본적인 문제와 기구부의 복잡성 때문에 실용성이 결여되어 있는 상태이다. 따라서 1990년대 부터 전방향 이동로봇 처럼 3자유도를 갖고 있지는 않지만 준전방향 (semi-omnidirectional)의 기능을 가지면서 실용성이 있는 방식에 대한 연구가 활발히 추진되고 있다. 이러한 방식 중에서 가장 성능이 우수한 방식이 Synchro-drive 방식이다.

Synchro-drive 방식은 이동로봇 내에 부착되어 있는 바퀴들의 구동(driving)과 조향 (steering) 이 동시에 이루어지도록 구성된 방식으로 체인, 벨트,

접수일: 2005년 4월 22일; 게재승인일: 2005년 8월 9일

교신저자: (주)한울로보틱스 지능로봇연구소

E-mail oskwon@robotics.co.kr Tel. (042) 478-9093

기어들을 사용하여 각 바퀴들에 일치된 동력을 전달하도록 되어 있다. 즉 이동로봇 내 바퀴들은 동시에 구동되고, 또한 동시에 조향 된다. 이러한 방식은 자율주행용 이동로봇의 경우에 많은 장점을 갖고 있다. 동기식 이동 로봇(synchro-drive mobile robot)은 1980년대 사이버모션(Cybermotion)사¹에서 개발되었으며 동기식 이동 메커니즘은 아래와 같은 많은 장점을 가지고 있다.

- 우수한 odometry 성능
- 큰 주행 마찰력
- 회전반경 없는 회전성능
- 높은 조종성 및 쉬운 제어와 효율성

이러한 장점은 모든 바퀴가 평행하게 힘을 받아, 큰 마찰력과 상대운동의 정확한 측정(Odometry)의 특징을 갖는다. 그리고 모든 바퀴가 동일한 모터로부터 구동되기 때문에 한 바퀴의 부하를 다른 바퀴들이 감당하기에 이동 로봇은 이동하기 위한 마찰력을 잃지 않는다. 이 특징으로 인해 둔턱이나 미끄러짐에 의해 발생할 수 있는 각도오차를 최소화할 수 있다. 동기식 이동 로봇의 구동에는 매우 작은 반력만이 존재하므로, 로봇의 자체 움직임에 의한 배터리 손실이 적다.²

동기식 방식에서 제어와 동작의 효율성을 위해 구동부와 제어부를 분리하는 데 있어 무한회전이 불가능한 구조를 갖거나 가격이 고가인 슬립링을 이용하는 대신 본 논문에서는 저가격화를 위해 차동기어를 이용한 3중축 구조의 무한회전하는 터릿을 갖는 동기식(Synchro-drive) 방식에 대하여 설계하고 이를 통하여 제어성능이 향상되도록 축간의 커플링을 제거한 새롭게 설계된 동기식메카니즘에 대해 기술하기로 한다.

2. 본 론

2.1 동기식 이동 메커니즘 개요

동기식 이동 로봇 메커니즘은 모든 바퀴가 동기하여 주행 및 조향된다. 즉 모든 바퀴가 일치되게 회전하고 평행하게 주행하므로 서로 같은 길이의 경로를 갖는다. 또한, 이동 플랫폼은 바퀴의 조향에 대해 회전하지 않으므로 어느 방향으로 이동하더라도 항상 같은 방향을 유지한다. 터릿이 스티어링과 일치하게 회전하면 이동로봇은 전진방향으

로 향하여 어떤 형상의 경로도 추종할 수 있다.

Fig. 1은 동기식 바퀴 구조의 개략도를 나타내었다. 주행 구동력은 드라이빙 축에 의해 베벨기어로 바퀴에 전달된다.

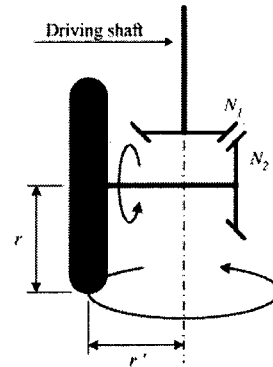


Fig. 1 Concept diagram of synchro-drive wheel

스티어링 구동시 드라이빙 축은 고정되고, 드라이빙 축 베벨 기어의 외주면을 따라 바퀴 베벨기어가 회전하며, 이때 미끄러짐 없이 회전하기 위한 조건은 다음과 같다

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{r'}{r} \quad (1)$$

식(1)에서 \$N_1\$은 구동축의 기어잇수, \$N_2\$는 바퀴축의 기어잇수, \$r\$은 바퀴의 반경, \$r'\$은 구동중심축으로부터 바퀴의 중심까지의 거리이다.³

바퀴 1개로 드라이빙 운동을 구동할 경우, 바퀴 몸체의 중심과 마찰력이 작용하는 바퀴의 지면 접촉점 사이의 간격으로 인하여 드라이빙 가/감속시 바퀴 몸체에 토크가 작용하므로 스티어링 운동에 영향을 주게 된다.

2.2 무한회전이 가능한 터릿을 갖는 동기식 이동 메커니즘 개발

동기식 이동 로봇의 터릿 위에 모터 및 모든 전자부를 배치하여 기계부와 분리하였다. 터릿의 회전에 의한 전선의 꼬임을 제거하여 터릿의 무한회전이 가능하도록 하였다. 터릿의 드라이빙 모터와 스티어링 모터로부터 바퀴까지 동력전달을 위해 Fig. 2와 같이 3중축을 구성하고 기어를 배치하였다. 다음의 동기식 바퀴는 Fig. 3과 같이 공회전 바퀴를 부착하여 2개의 바퀴가 지지할 수 있도록

로 구성하였다. 이를 통해 로봇의 하중이 분산되어 정확하고 안정적인 주행을 할 수 있도록 하였다.

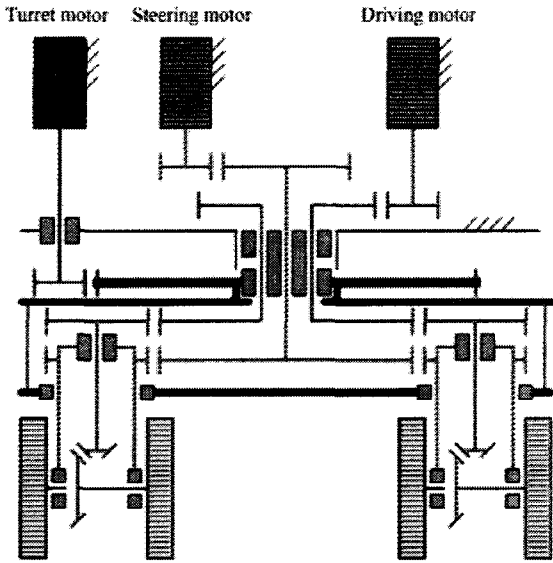


Fig. 2 Gear position diagram of a synchro drive mobile robot base

만약 드라이빙 축이 고정되어 있고, 스티어링 입력이 있다면, Fig. 3에서와 같이 다리 몸체의 회전에 의해 바퀴의 베벨기어(G_w)가 고정된 드라이빙 축의 베벨기어(G_d)에 맞물려 회전한다.

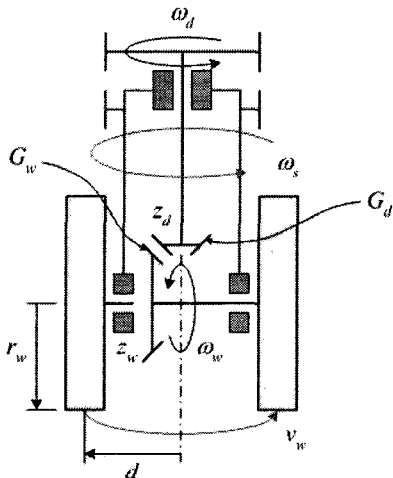


Fig. 3 Synchro-drive wheel structure with an idling wheel

다리의 몸체를 고정하고 드라이빙 축을 회전시키는 것과 드라이빙 축을 고정하고 다리의 몸체를 드라이빙 회전의 반대 방향으로 회전시키는 것은 바퀴의 입장에서 보면 상대적으로 같다. 이때 식(2)와 같이 기어비에 의해 드라이빙 축과 바퀴의 회전속도비를 계산할 수 있으며, 스티어링의 회전에 의한 바퀴의 회전속도(ω_{w1})는 드라이빙 축 회전속도(ω_d)를 상대적인 스티어링 운동(ω_s)으로 변환하여 식(3)과 같이 구해진다.

$$\frac{\omega_{w1}}{\omega_d} = \frac{z_d}{z_w} \quad (2)$$

$$\omega_{w1} = \frac{z_d}{z_w} \omega_d = -\frac{z_d}{z_w} \omega_s \quad (3)$$

여기서, Z_d 는 구동축의 기어잇수, Z_w 는 바퀴의 기어잇수, r_w 는 바퀴의 반경, d 는 구동중심축으로부터 바퀴의 중심까지의 거리이다. 스티어링 운동의 경우에 바퀴의 회전 운동은 스티어링 운동 방향으로 일어나며, 바퀴의 이동 속도(v_c)는 식(4)와 같다.

$$v_c = r_w \times \omega_{w1} = -r_w \times \frac{z_d}{z_w} \omega_s \quad (4)$$

스티어링 운동에 의해 요구되는 바퀴의 속도는 식(5)와 같다. 이를 만족하기 위해 드라이빙 입력에 의한 속도(v_d)가 요구되며, 식(6)에서 이를 계산하였다. 위 드라이빙 입력에 의한 바퀴의 회전 속도(ω_{w2})는 식(7)과 같다.

$$v_w = d \times \omega_s = v_d - v_c \quad (5)$$

$$\begin{aligned} v_d &= -r_w \times \omega_{w2} = v_w + v_c \\ &= d \times \omega_s - r_w \times \frac{z_d}{z_w} \omega_s \\ &= r_w \times \left(\frac{d}{r_w} - \frac{z_d}{z_w} \right) \times \omega_s \end{aligned} \quad (6)$$

$$\omega_{w2} = -\left(\frac{d}{r_w} - \frac{z_d}{z_w} \right) \times \omega_s \quad (7)$$

식(2)와 식(7)에 의해 드라이빙 축과 스티어링 축

의 커플링 관계는 식(8)과 같다.

$$\omega_d = -\frac{z_w}{z_d} \omega_{w2} = \left(1 - \frac{d}{r_w} \frac{z_w}{z_d}\right) \times \omega_s \quad (8)$$

식 (8)에 의해 스티어링 운동에 의한 드라이빙 운동 커플링을 제거하기 위해 식(9)의 조건을 만족하면 된다.

$$\frac{r_w}{d} = \frac{z_w}{z_d} \quad (9)$$

무한 회전하는 터릿의 회전에 의한 드라이빙과 스티어링의 커플링의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. T, D, S, Z, M은 각각 터릿, 드라이빙, 스티어링, 기어잇수, 모터를 의미한다.

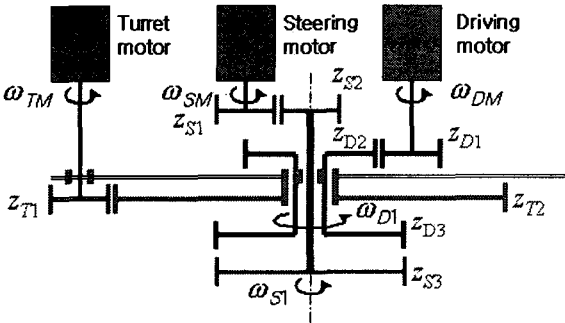


Fig. 4 Explanation diagram about coupling of driving and steering motor by Turret rotation

터릿 모터의 회전에 의해 터릿 원판에 고정된 스티어링과 드라이빙 모터가 회전한다. 터릿 원판의 회전 운동의 경우, 터릿 원판에 고정된 스티어링과 드라이빙 모터에 의해 각각의 동력 전달축이 회전하지 않도록, 드라이빙과 스티어링 모터를 터릿 원판과 같이 회전시킨다. 식(11)~(13)의 기어비에 의해 식(14)의 터릿 모터와 주행 모터의 커플링된 회전 속도비 그리고 식(15)의 터릿 모터와 조향 모터의 커플링된 회전 속도비를 구할 수 있다.

$$\omega_T = \omega_{S1} = \omega_{D1} \quad (10)$$

$$\frac{\omega_T}{\omega_{TM}} = -\frac{z_{T1}}{z_{T2}} \quad (11)$$

$$\frac{\omega_{S1}}{\omega_{SM}} = -\frac{z_{S1}}{z_{S2}} \quad (12)$$

$$\frac{\omega_{D1}}{\omega_{DM}} = -\frac{z_{D1}}{z_{D2}} \quad (13)$$

$$\omega_{DM} = -\frac{z_{D2}}{z_{D1}} \omega_{D1} \quad (14)$$

$$= -\frac{z_{D2}}{z_{D1}} \omega_T = \frac{z_{D2}}{z_{D1}} \frac{z_{T1}}{z_{T2}} \omega_{TM}$$

$$\omega_{SM} = -\frac{z_{S2}}{z_{S1}} \omega_{S1} = -\frac{z_{S2}}{z_{S1}} \omega_T \quad (15)$$

$$= \frac{z_{S2}}{z_{S1}} \frac{z_{T1}}{z_{T2}} \omega_{TM}$$

2.3 완전 디커플된 동기식 이동 메커니즘 개발

완전 디커플된 동기식 이동 메커니즘은 드라이빙 모터와 스티어링 모터에 차동기어를 설치하여 터릿의 회전과 드라이빙 기어열 및 스티어링 기어열의 작동 사이에 발생하는 커플링을 제거하고 드라이빙 모터와 스티어링 모터의 순수한 동력만을 바꾸로 전달할 수 있도록 구성된 디커플된 터릿 구조를 구비한 동기식 이동 메커니즘이다. 이동로봇 베이스 부의 바퀴에 동력을 전달하는 모터가 무한 회전하는 터릿 상에 배치되면, 터릿의 회전에 의해 바퀴 구동 모터가 회전하여, 이에 물려있는 바퀴 기어열을 회전시키고, 베이스 부의 바퀴가 회전하게 된다. 따라서 터릿의 운동과 바퀴 운동을 디커플 하기 위해서는 터릿의 회전 성분과 바퀴 구동 모터의 회전 성분을 차분하여 베이스 부의 바퀴에 연결된 기어열에 전달해야 한다. 터릿의 회전 성분과 구동 모터의 회전 성분을 차분하기 위해 사용된 차동기어의 입출력은 일반적으로 식(16)과 같다.

$$\omega_{output} = \frac{\omega_{Motor} - \omega_{Turret}}{2} \quad (16)$$

드라이빙-터릿, 스티어링-터릿 사이에 적용된 디커플용 차동기어를 드라이빙-스티어링 디커플에 활용하면 완전 디커플된 기계구조를 만들 수 있다. 구조적으로 보면 터릿 디커플을 위한 차동기어의 기어구조에서 드라이빙 모터에 연결된 차동기어의 터릿쪽 입력이 스티어링 중심기어의 입력으로 대치된 것이 차이점이다.

드라이빙과 스티어링 모터를 고정하고 터릿을 회전할 경우, 드라이빙, 스티어링 차동기어 몸체는 중심기어를 따라 회전하게 된다. n_1 에서 2배 증속, 스티어링 차동기어에서 1/2 감속, n_2 에서 등속이므로 스티어링 차동기어의 몸체는 터릿과 등속으로 회전하여, 터릿의 회전에 의한 스티어링의 커플이 제거됨을 알 수 있다. 그리고 n_3 에서 등속, 드라이빙 차동기어에서 1/2 감속, n_4 에서 2배 증속하므로 드라이빙 차동기어의 몸체도 터릿과 등속으로 회전함을 알 수 있음. 따라서 터릿의 회전에 의한 스티어링과 드라이빙의 커플관계가 제거된다.

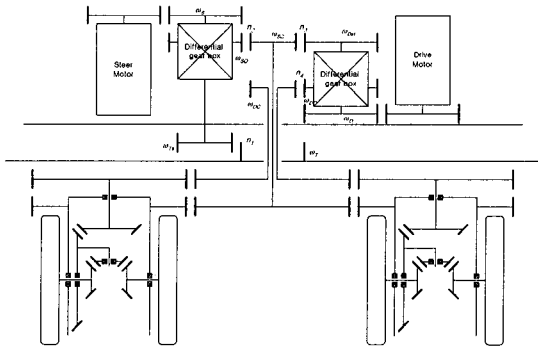


Fig. 5 Mobile mechanism structure with fully decoupled

터릿과 드라이빙이 고정되어 있을 때, 스티어링 모터를 회전하면, 스티어링 차동기어의 몸체가 회전하고 이와 맞물린 스티어링 중심기어가 회전하며, 스티어링 중심기어와 맞물린 바퀴의 몸체의 스티어링 기어가 회전하게 된다. 또한, 스티어링 중심기어에 맞물린 드라이빙 차동기어도 회전하여 드라이빙 중심축을 거쳐 바퀴의 드라이빙 회전축을 회전시킨다. 스티어링 중심기어 회전에 n_3 에서 등속, 드라이빙 차동기어에서 1/2 감속, n_4 에서 2배 증속하므로 드라이빙 중심기어의 회전속도는 스티어링 중심기어 회전 속도와 동일하다. 따라서, 중심기어와 바퀴의 드라이빙,

스티어링의 감속비가 둘다 1:1이므로, 바퀴 스티어링 회전에 바퀴 드라이빙 축이 동일한 속도로 회전하여, 두 회전축 사이의 상대속도는 '0'이 되어 커플이 없어진다

차동기어부는 Fig. 5에서 나타나 있듯이 동기식 이동 메커니즘에 포함되며 백래시, 자체 마찰 등의 성능지수는 전체 이동모듈의 성능에 영향을 끼친다. 차동기어부를 구성하는 내부부품(베벨기어, 베어링, 핀 등)의 공차와 재질에 따라 Fig. 6과 같이 비가역적인 백래시 선도로 나타난다.

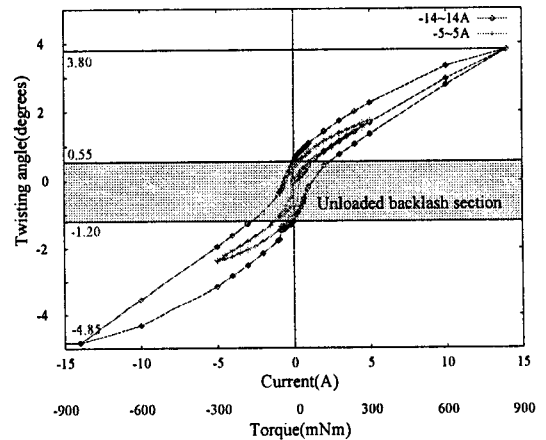


Fig. 6 Torque vs. Backlash of differential gear

베벨기어가 양단지지 안된 경우 무부하/부하 백래시가 다소 발생하여, 베벨기어에 베어링과 핀으로 양단 지지하는 구조를 설계하였다. 정밀하고 균일한 백래시 오차를 갖는 차동기어 제작하기 위해 Fig. 7과 같이 금형 설계를 수행하였다.

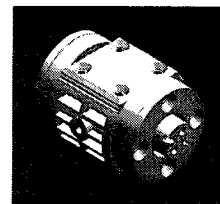


Fig. 7 Differential gear 3D Detailed drawing

금형설계에서 양단지지를 위한 핀 구조의 추가 뿐만 아니라, 베벨축과 이와 연결되는 기어와 바퀴의 체결시 볼트의 유격으로 백래시가 발생하는 것을 방지하

기 위해 베벨축에 요철 구조를 설계하였다. 차동기어의 제작 방식에 따른 백래시 변화를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Comparison of backlash by the manufacturing method of differential gear

차동기어 제작법	무부하	부하(3kgfcm)
가공품(핀 지지없음)	6°	36°
가공품(핀 지지)	4°	12°
금형 시작품	0.6 - 0.8°	3.3 - 3.5°

Fig. 8은 금형으로 설계된 차동기어부를 적용하여 전술한 완전히 디커플된 이동로봇 메커니즘을 적용한 이동로봇이다. 전방향으로 24개의 초음파센서와 비전센서를 장착하고 내부는 USB (universal serial bus)로 구성되어 알고리즘 개발 및 로봇 연구용으로 제작되었다.

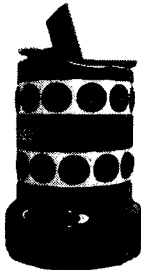


Fig. 8 Synchro-drive Mobile Robot with Endless Rotate Type Turret

제작된 메커니즘의 전체적인 백래시는 백래시 테스트를 위한 시험장치를 제작하여 시험되었다. 시험결과 전체 백래시는 터릿, 스티어링이 각각 5.5도, 1.5도 이내로 측정되었다. 이는 차동기어의 백래시를 줄였음에도 불구하고 기어열의 누적에 의해 발생된 값이다. 제작된 메커니즘의 주행 특성은 직선운동을 반복하게 하여 측정되었으며 3.5m를 반복 주행시 55mm의 벗어남이 있었으며 이는 1.5% 이내의 에러 특성을 가진다.

백래시나 반복 주행에서 일어나는 오차는 추후 시스템 오차를 보정하는 연구가 필요하며 Fig. 8의 로봇에서는 백래시를 저감하는 로봇의 동작제어나 실험에 의한 오차 보정을 통해 이를 보상하였다. 보상 후에도 로봇의 주행에 따라 생기는 오차는 로봇에 장착된 초

음파 등의 거리측정 센서와 비전에 의한 절대위치 및 자세 측정에 의해 알고리즘상에서 주기적으로 보정하도록 하여 오차를 최소화 할 수 있다.

기존의 동기식 메커니즘에 대한 특허를 가지고 있는 사이버모션사의 경우 스티어링과 드라이빙 사이에 디커플된 바퀴구조를 갖고 있으며 터릿의 경우 고가의 슬립링을 이용하여 디커플을 시도하였다.⁴⁵ 본 연구에서의 차이점은 전기적 제한이 있는 고가의 슬립링을 사용하지 않고 기구적으로 디커플되는 3중축 구조를 가지도록 하여 무한회전이 가능한 구조의 동기식 메커니즘의 구현이라고 할 수 있다.

3. 결론

본 연구는 가정과 같이 좁고 장애물이 산재해 있는 환경에서 로봇이 자유롭게 이동할 수 있도록 전방향 기능의 동기식 이동 메커니즘을 개발하였다. 무한회전하는 터릿을 갖는 3중축 구조의 동기식 이동 메커니즘을 설계 제작하여 동기식 이동모듈을 구현하였고, 구현된 동기식 이동 메커니즘에서 튜릿 회전시 발생하는 드라이빙 및 스티어링의 커플링 요소를 차동기어를 이용하여 기구적으로 디커플함으로써 모터간의 제어성에 따른 오차를 최소화 하였다. 본 연구를 통하여 개발된 동기식 이동 메커니즘은 터릿의 무한 회전으로 인해 이동로봇의 작업 효율을 높일 수 있으며, 터릿과 구동모터의 커플 제거로 인해 수월하고, 정확한 모터 제어가 가능하며, 커플링을 제거하기 위해 바퀴 구동모터가 터릿의 회전에 맞추어 회전하지 않아도 되므로 바퀴 구동모터의 전력 소모가 적은 효과가 있다.

개발된 동기식 이동로봇 베이스는 현재 국제특허출원중이며 연구용, 가정용, 공공용 등의 퍼스널 로봇 분야에 활용될 예정이다.

참고문헌

1. <http://www.cybermotion.com>
2. Seo, Y.C., "The Control Algorithm of Synchro-drive Mobile Robot," MS. D. thesis, Konyang University, Korea, 2000.
3. Holland, M. John, " Mobile Base for Robots and the Like, " U.S.Patent No. 4,573,548, Mar. 1986.
4. Holland, M. John, " Concentric Shaft Mobile Base

- for Robots and the Like, " U.S.Patent No. 4,657,104, Apr. 1987.
5. Holland, M. John, " Mobile Base Having Leg Assemblies with Two Wheels, " U.S.Patent No. 5,609,216, Mar. 1997.