

# 능동 분할 오프셋 캐스터 기반 전방향 차량의 설계 및 제어

## Design and Control of the Active Split Offset Caster based Omni-directional Vehicle

김 한 결<sup>1</sup>, Do Ngoc Huan<sup>2</sup>, 박 종 찬<sup>3</sup>, 권 동 수<sup>†</sup>

Han-Gyeol Kim<sup>1</sup>, Do Ngoc Huan<sup>2</sup>, Jong-Chan Park<sup>3</sup>, Dong-Soo Kwon<sup>†</sup>

**Abstract** This research would investigate deeply the operation of an omni-directional mobile robot that is able to move with high acceleration. For the high acceleration performance, the vehicle utilizes the structure of Active Split Offset Casters (ASOCs). This paper is mainly focused on inverse kinematics of the structure, hardware design to secure durability and preserve the wheels' contact to the ground during high acceleration, and localization for the real time position control.

**Keywords:** Active Split Offset Caster, Omni-directional Vehicle, Position Control

### 1. 서론

전방향 차량에 관한 연구는 주행의 제약 없이 모든 방향으로 자유롭게 이동이 가능하다는 장점 때문에 운송분야나 로봇분야에 많은 응용이 이루어질 수 있다.

본 연구에서는 자동차 충돌예방 시스템(Collision Avoidance System, CAS)에 적용 가능한 전방향 차량 제작을 목표로 진행되었다. CAS에서 시험차량은 다이내모 위에서 가주행을 하고, 주변환경이 차량에 상대적으로 운동하면서 도로상황 시뮬레이션이 진행된다. 일반적으로 길 레일 위를 움직이는 더미로 주변 차량 운동을 구현하지만, 이 플랫폼으로는 다수의 차량을 구현하기 어렵고 좌우운동

에 제약이 있다. 그러므로 복잡한 도로환경을 구현하기 위해 보행자나 야생동물, 주위 차량의 역할을 할 수 있는 새로운 플랫폼으로서 전방향 차량이 제시되었다.

자동차 도로주행 상황을 구현하기 위해 전방향차량은 높은 가속도 주행이 가능해야 한다. 현재까지 진행된 전방향 차량의 대표적인 예로서 메카넘 휠(mecanum wheel)<sup>[1,2]</sup>과 홀로노믹 휠(holonomic wheel)<sup>[3,4]</sup>과 같은 전방향 바퀴를 이용한 차량을 들 수 있다. 전방향 바퀴 일반적인 바퀴와 달리 바퀴 바깥에 패시브 롤러가 90° 혹은 45°로 배치되어 있다. 그러므로 일반적인 바퀴가 축 방향과 진행방향에 미끄러짐 제한 조건이 걸리는 반면, 전방향 바퀴는 패시브 롤러의 축 방향에만 미끄러짐 제한 조건이 걸리게 되며 전방향 운동이 가능하다.

전방향 바퀴를 이용한 차량은 각 바퀴에 작용하는 정지 마찰력들의 합력으로 가속속을 한다. 정지 마찰력은 패시브 롤러의 축 방향으로 발생하므로, 전방향 운동을 위해 전방향 바퀴들은 각각 패시브롤러의 방향이 다르도록 배치된다. 이러한 차량은 진행 방향에 따라 각 바퀴의 회전을 조절하며 모든 모터의 출력을 최대로 사용하지 않는다. 결국 모터의 최대출력에 비해 차량의 가속도가 낮다.

위의 문제를 피하기 위한 전방향 운동 메커니즘으로 오프셋 스티어링 적용 방식이 있다<sup>[5]</sup>. 이 방식에서는 각 바퀴

Received : Sep. 14. 2012; Reviewed : Oct. 29. 2012; Accepted : Jan. 24. 2013

※ This paper has been performed by national support project, which is the Building infrastructure for the Collision Avoidance System Integrated Test Facility by Ministry of Knowledge Economy of Korea.

† Corresponding author: Mechanical Engineering Department and Human-Robot Interaction Research Center, KAIST, Daejeon Korea (kwonds@kaist.ac.kr)

<sup>1</sup> Mechanical Engineering Department and Human-Robot Interaction Research Center, KAIST, Daejeon Korea (kimhg@robot.kaist.ac.kr)

<sup>2</sup> Mechanical Engineering Department and Undergraduate Research Program at HRI Research Center, KAIST, Daejeon Korea (do\_huan@kaist.ac.kr)

<sup>3</sup> Mechanical Engineering Department and Human-Robot Interaction Research Center, KAIST, Daejeon Korea (parkjc@robot.kaist.ac.kr)

가 캐스터의 모양을 하고 있으며, 바퀴회전모터와 캐스터 각을 컨트롤하는 모터가 부착되어있다. 캐스터의 각도를 조절함으로써 각 바퀴에 작용하는 마찰력의 방향을 일치시켜 모터의 사용효율을 높이는 구조이나 캐스터의 각도를 조절하는 모터는 차량의 가감속에 영향을 미치지 않는다는 점에서 역시 모터의 사용효율이 좋지 못하다.

모터의 출력을 최대한으로 활용하기 위해서 2004년 Haoyong Yu등이 개발한 능동분할오프셋캐스터(ASOC)구조<sup>[6]</sup>를 채택하였다. ASOC구조는 각 캐스터당 두 개의 바퀴가 부착되어 있으며 각 바퀴는 따로 제어된다. 캐스터는 메인 바디에 패시브 조인트로 연결되어 있으며, 각도는 두 바퀴의 속도 차이로 제어된다. 이 구조는 바퀴의 방향을 가속방향으로 정렬시키는 역할과 차량을 가감속 시키는 역할을 동시에 수행하므로 모터의 사용 효율이 다른 구조에 비해 좋다. 그러므로 본 연구에서는 구조의 장점이 목적과 부합되는 ASOC 기반의 전방향 차량을 설계하였다.

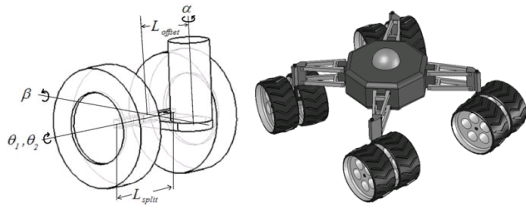


Fig. 1. ASOC & ASOC based vehicle

## 2. 역기구학

그림 2의  $V_x, V_y, \omega$ 는 차량의 x방향, y방향, 회전 목표 속도이고,  $\theta'_1, \theta'_2$ 는 각 바퀴의 각속도를 나타낸다.  $V_{c1x}, V_{c1y}$ 는 ASOC좌표계상에서 점 C1의 x, y방향 속도이며,  $\vartheta_{c1x}$ 와  $\vartheta_{c1y}$ 는 메인 바디 좌표계상에서 점 C1의 x, y방향 속도이다.

각 캐스터는 일반적인 이륜 이동 로봇으로 볼 수 있다. 이 구조의 역기구학은 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \theta'_1 \\ \theta'_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \times \begin{bmatrix} \frac{b}{2a} & 1 \\ -\frac{b}{2a} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{c1x} \\ V_{c1y} \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \times J_{ASOC}^{-1} \times \begin{bmatrix} V_{c1x} \\ V_{c1y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$V_{c1x}, V_{c1y}$ 는  $\vartheta_{c1x}, \vartheta_{c1y}$ 를 회전 변환하여 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{c1x} \\ V_{c1y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & \sin\alpha_1 \\ -\sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \vartheta_{c1x} \\ \vartheta_{c1y} \end{bmatrix} = [R(\alpha_1)]^{-1} \times \begin{bmatrix} \vartheta_{c1x} \\ \vartheta_{c1y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

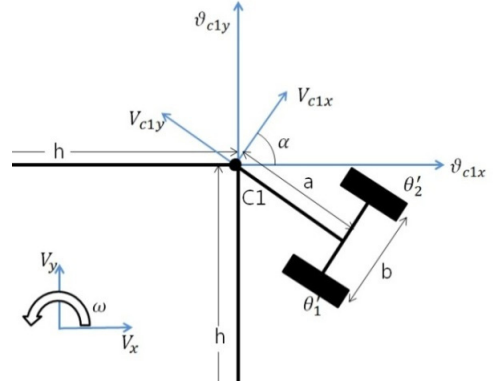


Fig. 2. Notation

$\vartheta_{c1x}, \vartheta_{c1y}$ 는 식 (3)처럼  $V_x, V_y, \omega$ 에 변환 행렬을 곱해서 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \vartheta_{c1x} \\ \vartheta_{c1y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{h}{2} \\ 0 & 1 & \frac{h}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega \end{bmatrix} = T_{C1} \times \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

C2, C3, C4에 대해서도 같은 방법으로 변환행렬을 구하면 식 (4)와 같다.

$$T_{C2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{h}{2} \\ 0 & 1 & -\frac{h}{2} \end{bmatrix} T_{C3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{h}{2} \\ 0 & 1 & -\frac{h}{2} \end{bmatrix} T_{C4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{h}{2} \\ 0 & 1 & \frac{h}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (1)에 식 (2)와 식 (3)을 대입하면  $\theta'_1, \theta'_2$ 를  $V_x, V_y, \omega$ 로 나타낼 수 있고 식 (5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \theta'_1 \\ \theta'_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \times J_{ASOC}^{-1} \times [R(\alpha_1)]^{-1} \times T_{C1} \times \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

다른 ASOC모듈에서도 같은 식을 적용시킬 수 있다. 최종적인 역기구학은 식 (6)과 같다.

$$\dot{\theta} = \frac{1}{r} \times M_J \times M_R \times M_T \times \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$M_J = \begin{bmatrix} J_{ASOC}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{ASOC}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{ASOC}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{ASOC}^{-1} \end{bmatrix}$$

$$M_R = \begin{bmatrix} [R(\alpha_1)]^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [R(\alpha_2)]^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [R(\alpha_3)]^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [R(\alpha_4)]^{-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$M_T = \begin{bmatrix} T_{C1} \\ T_{C2} \\ T_{C3} \\ T_{C4} \end{bmatrix}$$

### 3. 하드웨어 디자인

#### 3.1 서스펜션

급가감속 주행 중 관성의 영향으로 바퀴가 지면과의 접촉을 잃을 때 비 미끄럼 조건(No-slip condition)이 만족되지 않게 되어 제어 상의 문제가 발생할 수 있으므로, 바퀴의 높이가 수동적으로 조절되는 서스펜션을 구현하였다.

##### 3.1.1 4평행 보 서스펜션

메인 바디가 지면과 평행을 이루기 위해서는 캐스터 축과 메인 바디의 각도가 수직을 유지해야 한다. 그러나 일반적인 선형조인트는 수직방향 힘에 대한 내구성이 떨어지므로 이 힘을 분산시키기 위해 보를 평행 사변형으로 배치시킨 구조를 사용하였다. 서스펜션에는 탄성과 제동자 역할을 하는 속 업소버를 부착하였다.

##### 3.1.2 피벗 조인트(pivot joint)

Haoyong Yu는 2004년에 ASOC 방식을 제안하는 과정<sup>[6]</sup> 중 불 균일 노면 상에서 바퀴의 지면접촉유지를 위해 ASOC모듈의 바퀴 축 각도를 패시브하게 변화시키는 피벗 조인트를 설계하였다. 본 차량에는 고속 운동 중 지면접촉을 유지시키기 위해 이 구조를 사용하였다. 피벗 조인트로 인해 바퀴 축이 패시브하게 최대 10° 기울어지며 두 바퀴의 높이 차를 만든다.

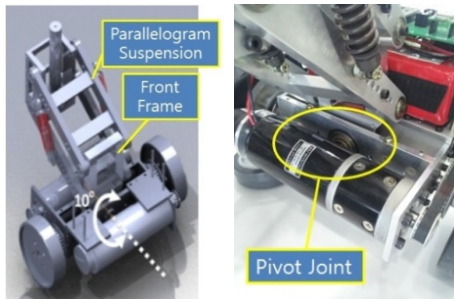


Fig. 3. Design of a suspension and a pivot joint

#### 3.2 충돌 시 응력해석 및 충격에 대한 내구성 강화

기본적으로 차체와 ASOC모듈의 프레임은 무게와 강도를 고려하여 알루미늄 합금으로 제작되었다. 고속주행 중 충격을 고려해 응력해석을 하였다. 충돌 시 충격력은 종형(Bell Shape)로 가정하고 충돌시간은 일반적인 자동차 충돌실험 결과<sup>[7]</sup>를 참고하였다. 이 데이터들을 바탕으로 충돌 시 차체에 작용하는 응력을 해석한 결과, ASOC축에 작용하는 응력이 알루미늄 합금의 항복응력(110MPa)을 넘

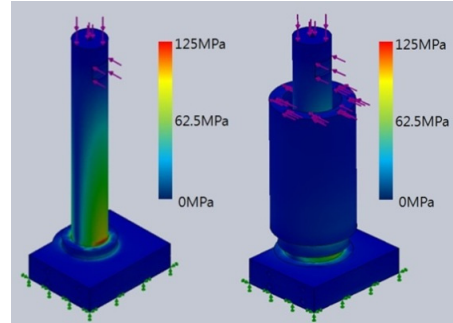


Fig. 4. Stress Analysis before and after reinforcing



Fig. 5. Cylindrical holder

기는 결과가 나왔다. 이를 보강하기 위해 메인 바디에 원통형 홀더를 부착시킴으로써 ASOC축의 상단부와 하단부를 같이 고정시켜 작용하는 응력을 분산시켰고, 최종적으로 안전계수 2를 확보하였다.

#### 3.3 오프셋길이 조정

기구학적 등방성(Kinematic isotropy)는 방향에 따른 입출력 속도의 비를 나타내는 척도로서 차량의 전방향 기동성에 큰 영향을 미친다<sup>[9]</sup>. Martin Udengaard의 2007년 논문에 의하면 기구학적 등방성을 최대화하기 위해서는 캐스터 바퀴간 간격이 오프셋 길이의 두 배가 되어야 한다<sup>[8]</sup>. 또한 캐스터들 간의 충돌을 막기 위해 오프셋 길이에 제한을 두어 전체적인 하드웨어 사이즈를 선정하였다.

#### 3.4 최종 완성된 하드웨어 플랫폼

위의 사항들을 고려하여 최종적으로 완성된 하드웨어 플랫폼은 그림 6-8과 같다. 메인 바디의 무게는 9kg, ASOC모듈 하나의 무게는 7kg이다.

### 4. Localization

실제 주행환경에서는 노면의 상태나 제어상의 오차로 인해 발생하는 미끄러짐 등이 원인이 되어 목표 속도를 정확히 따라가지 못한다. 이를 보완하기 위해 차량의 위치인

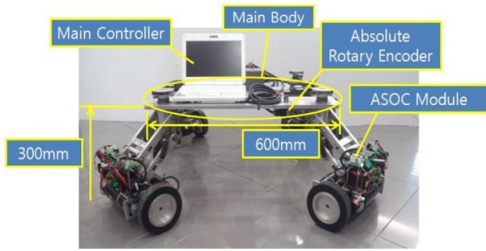


Fig. 6. Finished hardware

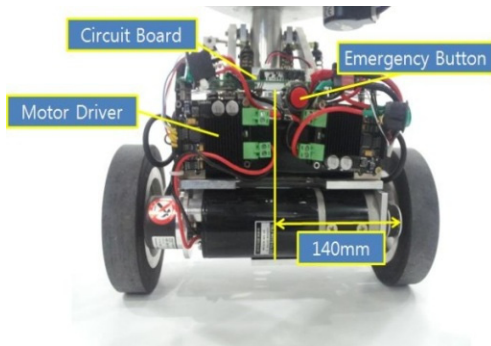


Fig. 7. Front view of ASOC

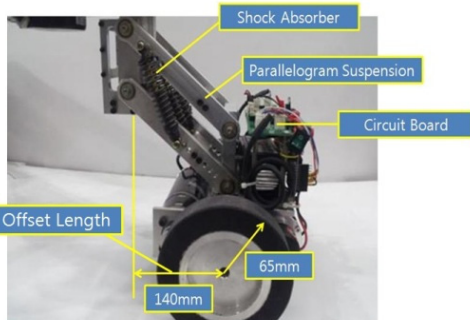


Fig. 8. Side view of ASOC

식 기술을 적용하여 위치제어를 시행하였다.

위치인식 기술은 크게 차량에 부착된 센서를 이용하여 주위환경의 로컬 정보를 모아 자신의 위치를 찾는 방법과 외부에 설치되어있는 카메라나 센서를 이용해 글로벌 위치를 찾는 방법(GPS)으로 나눌 수 있다<sup>[10]</sup>. 로컬 정보를 이용한 위치인식은 차체에 부착된 센서만으로 사용할 수 있으므로 시스템이 간편하다는 장점이 있으나, 미리 구현되어 있는 지도가 존재하거나 로컬 정보를 얻는 동시에 지도를 구현할 수 있는 환경(SLAM)에서만 사용할 수 있다. 반면, GPS는 환경은 복잡해질 수 있으나, 지도가 구현되지 않는 변화가 심한 환경에서도 사용할 수 있다.

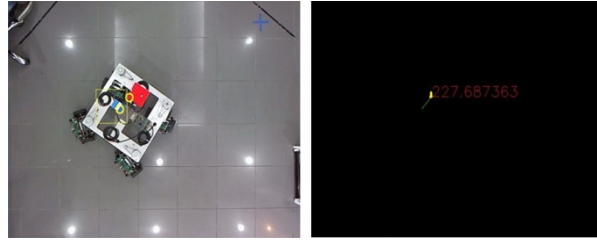


Fig. 9. Image before and after marker detection



Fig. 10. Block diagram of position control

CAS에서는 실시간으로 도로상황을 시뮬레이션 하므로 환경의 변화가 매우 심한 편이다. 또한 시뮬레이션은 실내에서 진행이 되므로 외부에 센서를 설치하기에 용이하다. 이러한 점을 미루어보아 CAS에서는 GPS를 이용한 위치인식 방법이 적절하다는 판단을 내렸다.

일본의 Yoshiro HADA 등은 IR LED와 천장에 설치된 카메라를 이용하여 실내GPS(indoor GPS, iGPS)를 구현하였다<sup>[11]</sup>. CAS에서는 여러 개의 전방향차량이 동시에 운용된다는 점과 실내 환경은 밝기 변화가 심하지 않다는 점을 고려하여 IR LED 대신 다양한 색깔로 구분 가능한 마커를 이용하였다. 차량의 위치와 방향을 인식하기 위해 하나의 차체에 서로 다른 두 색깔의 마커를 이용하였다. 비전데이터에서 지정한 색 범위 안의 픽셀을 1, 그 이외의 픽셀을 0으로하는 바이너리 이미지를 만들고, 이 이미지의 모멘트를 구하여 마커의 위치를 찾는다. 비전처리는 컴퓨터비전용 오픈 소스 라이브러리인 OpenCV를 사용하였다.

## 5. 시스템 컨트롤 아키텍처

그림 11은 차량 시스템의 컨트롤 아키텍처를 나타낸다. 메인 컨트롤러에서는 절대형 엔코더를 이용해 실시간으로 각 캐스터의 각도를 측정한다. 사용자가 속도명령을 내리

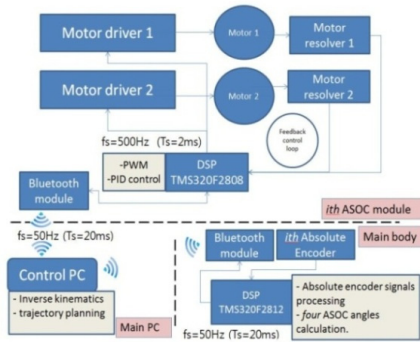


Fig. 11. System control architecture

면 측정된 각도와 역기구학으로 각 바퀴의 요구 속도를 계산한다. ASOC의 자유로운 회전을 위해 바퀴의 속도는 무선통신(Bluetooth)으로 각 모듈에 전달한다. 속도 명령을 받은 ASOC컨트롤러는 두 개의 모터를 각각 제어한다. 메인PC의 제어주기는 20ms이며 각 ASOC모듈의 제어주기는 2ms이다.

그림 12는 컨트롤 블록다이어그램을 나타낸다. 각 바퀴는 PID컨트롤러로 제어되며, 큰 피드백루프가 위치제어루프이다. 위치제어도 PID제어를 기반으로 한다.

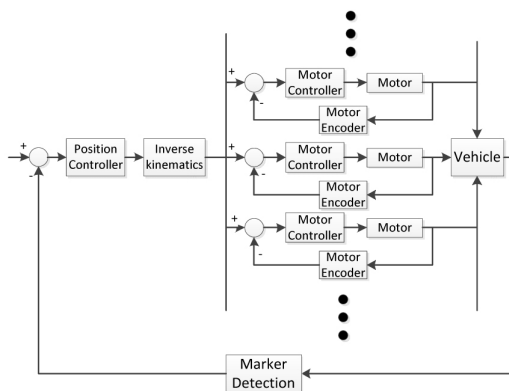


Fig. 12. Control block diagram

## 6. 실험 및 결과

### 6.1 가속도 측정

자동차부품연구원 능동안전연구동 내 충돌예방시스템 시험장에서 차량의 가속도를 측정하였다. x방향으로 최고 속도로 주행시킨 후 다시 정지하는 경로를 미리 설정하여 바퀴의 엔코더 정보로부터 차량의 속도를 계산하였다. 측정된 속도 그래프의 기울기로 최대 가속도를 측정하였다. 이렇게 얻은 최대 가속도는  $2.5\text{m/s}^2$  ( $\approx 0.25G$ )였다.

현재 구현된 차량은 메인 바디의 크기가 600mm x 600mm로서 일반적인 자동차의 약 1/3의 크기를 갖고 있는 미니어처라고 할 수 있다. 제작된 차량이 실제 자동차 크기로 구현되었다고 가정하고 측정된 값을 3배로하여 환산하면, 가속도는  $7.5\text{m/s}^2$  ( $\approx 0.75G$ )로 계산된다. 이 값은 충돌 예방시스템에 필요한 요구 가속도인 0.5G를 넘는 값으로, 능동 분할 오프셋 캐스터 기반 전방향 차량은 충돌예방시스템에 사용되기 위한 조건을 만족한다.

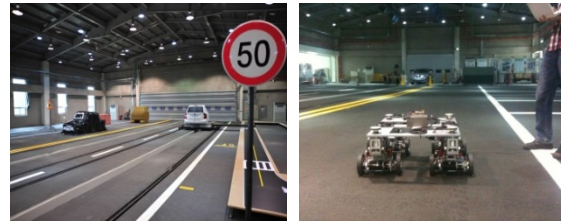


Fig. 13. Test environment and running test

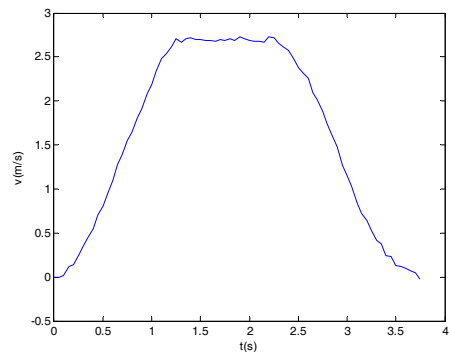


Fig. 14. Velocity measurement

### 6.2 위치제어 실험

가로, 세로 각각 3m, 천장높이 3.2m의 실내 실험실 환경에서 위치제어 실험을 진행하였다. x방향으로 1.5m/s 속

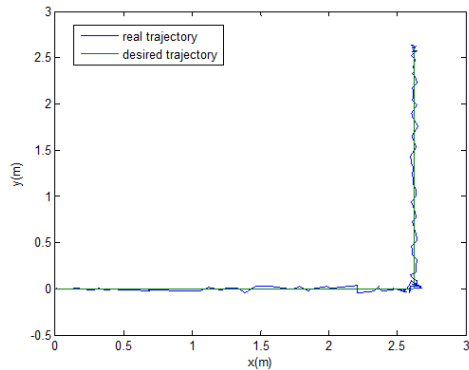


Fig. 15. Path with position control

도로 2.6m이동 후 멈추고 다시 y방향으로 1.5m/s 속도로 2.6m이동 후 멈추는 경로를 미리 설정하여 위치제어의 정밀도를 측정하였다. 그림 15의 위치경로 그래프를 보면 최대 6cm정도의 오차가 있지만 경로를 이탈하지 않고 제어가 됨을 알 수 있다. 그림 15, 그림 16의 위치 및 속도 경로 그래프 상에서의 오차의 원인은 마커 인식 과정에서의 흔들림으로 예상된다.

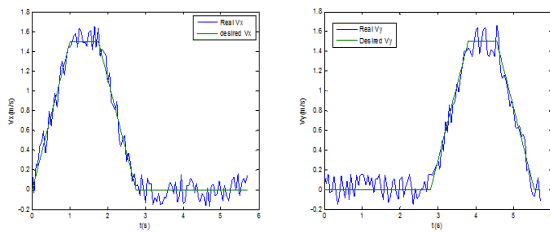


Fig. 16. Velocity through the x and y direction

## 7. 결론

본 연구에서는 높은 가속도 주행이 가능한 전방향 차량을 설계하고 제어하였다. 기존 전방향 차량은 각 모터의 성능을 효율적으로 사용하기 힘들다는 한계점을 지니고 있으므로, 이를 개선하기 위해 능동 분할 오프셋 캐스터 구조를 채택하였다.

차량 제어를 위해 역기구학을 풀고 고속주행 시 내구성 과 지면접촉 유지를 고려하여 하드웨어를 설계하였다. 높은 가감속 운동 시 바퀴의 지면접촉을 유지하기 위해 서스펜션으로서 충돌 시 가해지는 전단응력을 분산시키기 위해 평행 사변형 서스펜션 구조를 사용하였다. 응력 해석을 이용하여 캐스터 축의 취약부를 발견하고 원통형 홀더를 부착하여 응력을 분산시켰다. 천장에 설치된 카메라를 이용하여 차량의 위치제어를 함으로써 정밀한 경로 설정을 가능케 하였다.

최대가속도는 0.25G로 측정되었고, 이 값으로부터 차량을 일반적인 자동차와 같은 크기로 제작할 시 예상되는 최대 가속도를 구하면 충돌예방시스템에서 사용되기 위한 조건을 만족하는 0.75G로 계산된다. 개발된 능동 분할 오프셋 캐스터 기반 전방향 차량은 도로상황 시뮬레이션 중 보행자나 야생동물 같은 오브젝트의 역할을 수행할 것으로 기대된다.

## References

- [1] Jae-Bok Song, Kyung-Seok Byun, "Design and Control of an Omnidirectional Mobile Robot with Steerable Omnidirectional Wheels", *Journal of Robotic Systems* Vol.21, pp193-208, 2004.
- [2] Masayoshi Wada, "Omnidirectional and Holonomic Mobile Platform with Four-Wheel-Drive Mechanism for Wheelchairs", *Journal of Robotics and Mechatronics* Vol.19 No.3, 2007
- [3] Olaf Diegel, Aparna Badve, Glen Bright, "Improved Mecanum Wheel Design for Omni-directional Robots", *Proceedings 2002 Australasian Conference on Robotics and Automation*, Auckland, 27-29, November 2002.
- [4] Ioan Doroftei, Victor Grosu and Veaceslav Spinu, "Omnidirectional Mobile Robot - Design and Implementation"
- [5] Yuki Ueno, Takashi Ohno and Kazuhiko Terashima, Hideo Kitagawa, "The Development of Driving System with Differential Drive Steering System for Omni-directional Mobile Robot", *International Conference on Mechatronics and Automation*, 2009.
- [6] Haoyong Yu, Adam Skwersky, "Omni-directional Mobility using Active Split Offset Casters", *Journal of Mechanical Design*, Volume 126, Issue 5, 822, Sep 2004.
- [7] Michael S.Varat, Stein E. Husher, "Crash Pulse Modeling for Vehicle Safety Research", 18th ESV Paper KEVE Engineering, USA.
- [8] Martin Udengaard and Karl Iagnemma, "Kinematic Analysis and Control of an Omnidirectional Mobile Robot in Rough Terrain", *Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007.
- [9] Park, T., Lee, J., Yi, B., Kim, W., You, B., "Optimal Design and Actuator Sizing of Redundantly Actuated Omni-directional Mobile Robots", *IEEE ICRA*, pp.732-7, 2002.
- [10] J. Borenstein, H. R. Everett, and L. Feng, "Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning", *University of Michigan, Tech.*

Report , 1996

- [11] Y.Hada, K.Takase, "Multiple Mobile Robot Navigation Using The Indoor Global Positioning System(iGPS)", IROS2001, pp.1005-1010, 2001.



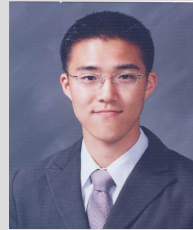
**김 한 결**

2012 한국과학기술원 기계공학과(공학사)  
2012~현재 한국과학기술원 기계공학과 석사과정  
관심분야: 시스템 제어, 인간 로봇상호작용



**Do Ngoc Huan**

2012 한국과학기술원 기계공학과(공학사)  
2012~현재 한국과학기술원 기계공학과 석사과정  
관심분야: 로보틱스, 시스템 제어



**박 종 찬**

2004 한국과학기술원 기계공학과(공학사)  
2004~현재 한국과학기술원 기계공학과 석박사 통합과정  
관심분야: 로봇 성격/감정/행동선택, 인간로봇 상호작용



**권 동 수**

1980 서울대학교 기계공학과(공학사)  
1982 한국과학기술원 기계공학과(공학석사)  
1991 미국 Georgia Institute of Technology 기계공학과(공학박사)  
1991~1995 미국 Oak Ridge 국립 연구소 선임 연구원  
1995~현재 한국과학기술원 기계공학과 교수  
관심분야: HRI, Haptics, Medical Robots