

# 운반체의 위치제어를 위한 내부·외부오차 제어기 설계

## Internal-External Error Controller Design for Position Control of Vehicle

정 용 옥\*, 박 종 국  
(Yong-Oug Chung and Chong-Kug Park)

**Abstract :** In most case of previous research about vehicle control system, external error occurred by unexpected environmental situation was hardly considered. However, in this paper, to have more accurate position control of differential drive vehicle, we separate the error as an internal error and external error. To calculate the vehicle position in real time, we introduced the Dead-Reckoning algorithms and the simulation result show that the proposed internal and external error control system has fast and accurate position tracking with remarkable diminishment of orientation error. The results reported here can easily be extended to the control of similar type vehicle.

**Keyword :** vehicle, internal error, external error, dead-reckoning, denavit-hartenburg, higher-pair, DOF, nonholonomic constraint

### I 서론

바퀴형 차동 운반체는 작업 반경이 넓고, 이동속도가 빠르며 구조가 단순하고 제어가 용이하다는 장점을 가지고 있다. 이러한 여러 이유에 의하여 산업현장에서 기존의 고정된 매니플레이터의 역할을 대신하기 위하여 폭넓게 연구·개발이 이루어지고 있다. 차동 운반체에 대한 연구분야는 일반적으로 경로설계 및 장애물회피 분야와 운반체를 목적위치로 이동시키는 구동분야로 구분할 수 있는데, 현재까지 대부분의 차동 운반체에 대한 연구는 주어진 작업을 수행하기 위한 차동 운반체의 응용분야에 대한 연구에 집중되어 왔다. 또한 대부분의 제어 시스템은 설정되지 않은 주위환경에 의하여 발생할 수 있는 외부오차에 대한 고려는 거의 없는 실정이었다.

차동 운반체의 정확한 위치제어를 위하여 수학적인 모델링과 더불어 제어 시스템의 구성이 중요하다. 차동 운반체의 일반적인 궤환 제어 시스템은 위치와 방향을 하나의 루프로 묶어서 궤환하는 방법을 사용하였다[1,2]. 그러나 본 논문에서는 정확한 위치제어에 있어 큰 오차의 원인이 되는 방향오차의 최소화를 위하여 차동 운반체의 구동 시 발생할 수 있는 오차를 내부오차와 외부오차로 구분하였다.

차동 운반체의 방향 변경은 두 구동바퀴의 속도 차에 의하여 이루어지기 때문에 바퀴의 정확한 구동속도가 요구되어진다. 또한 운반체가 일정 시간동안에 일직선 운동을 할 경우, 두 구동바퀴의 구동속도와 이동거리는 동일해야 한다. 그러나 구동바퀴의 마모로 인하여 바퀴 반경의 차가 생기게 되면 동일한 구동바퀴의 속도에 대하여 이동거리의 차가 발생하며, 정확한 위치 이동이 불가능하다. 이러한 경우 이동거리의 차를 연산하여 구동바퀴의 속도에 각각 보상해주는 제어 시스템의 구성이 요구된다.

외부오차의 보상을 위하여 구동바퀴의 속도와 구동된 바퀴 이동거리의 차를 연산하여 그 결과를 각각의 구동바퀴 속도에 보상하는 제어 시스템을 구성하였다. 본 논문에서 구성한 제어기는 마모에 의한 구동바퀴 반경의 차이를 각각의 구동바퀴에 보상해 줌으로써 직접적으로 가장 중요한 오차의 하나인 방향 오차를 최소화 할 수 있으며 훌륭한 외란 방지 역할을 한다.

### II. 동작오차와 운반체의 특징

#### 1. 오차의 원인

차동 운반체의 동작오차의 원인은 내부 오차와 외부 오차로 분리할 수 있다. 시간에 따라 거의 변하지 않으나 잘못 설정된 파라메타 값들이나 측정에 의한 값의 입력으로 발생할 수 있는 오차는 내부오차로 취급하였으며, 외부오차는 설정되지 않은 주위 환경에 의하여 차동 운반체의 구동 시에 시간에 따라 변화 할 수 있는 여러 요인들은 외부오차로 취급하였다.

내부오차의 주된 원인은 시상수의 차이, 시스템 매개변수의 차이 등이며, 외부오차는 각각의 구동루프에 작용하는 베어링 마찰력의 차이와 구동바퀴의 마모에 의한 구동바퀴 반경의 차이 등이 있다.

그 외에도 오차의 원인은 1) 구동바퀴의 잘못된 배열 2) 바퀴의 미끄럼 3) 바닥의 거칠기 등이 있으나, 본 논문에서는 차동 운반체의 이동속도가 빠르지 않고 평면을 움직인다는 가정하에서 이루어지므로 이와 같은 오차의 원인은 무시하고자 한다.

#### 2. 오차의 분석

차동 운반체에서 동작 오차는 그림 1과 같이  $e_\theta$ ,  $e_c$ ,  $e_i$ 로 분리 할 수 있다. 여기서  $e_\theta$ 는 차동 운반체의 실제 방향과 목적 방향사이의 차이로서 정의되는 방향오차이다. 방향오차는 외관상의 오차에서 나타나는 결과이기 때문에 가장 뚜렷한 오차이며, 동작의 정확도에 가장 큰 영향을 미치는 오차의 원인이 된다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 2. 28., 채택확정 : 2007. 10. 26.

정용옥 : 진주국제대학교 자동차공학과(yochung96@hanmail.net)

박종국 : 경희대학교 전자공학과(ckpark@khu.ac.kr)

$e_c$ 는 실제 운반체의 위치와 원하는 운반체 위치사이의 거리로서 정의되며,  $e_t$ 는 추적 오차로서 이동 방향에서 실제 위치와 원하는 위치사이의 거리로서 정의한다.

추적오차( $e_t$ )는 차동 운반체의 동작의 정확도에는 큰 영향은 미치지 않고, 원하는 이동 속도의 변화에 의하여 제어할 수 있다. 방향오차의 최소화는 차동 운반체가 원하는 경로와 나란히 이동할 수 있게 하며 결과적으로 위치 오차를 최소화 할 수 있다.

3. 운반체의 특징

차동 운반체가 움직이는 평면에서, 바닥 좌표축 F는 고정된 기준 좌표축이며, 차동 운반체는 몸체 기준점 B에 대하여 정의한다. 좌표(X, Y)는 차동 운반체에 부착되어 있다고 가정한다.

고정된 로봇 매니퓰레이터는 좌표 시스템의 할당을 위해 Denavit-Hartenburg 표기법[3]을 사용하는 반면에, 차동 운반체에서 좌표 시스템을 할당하기 위하여 Sheth-Uicker 표기법을 적용한다. 이는 조인트의 접촉방법이 prismatic이나 혹은 revolute인 lower-pair인 경우와 점, 선 접촉을 갖는 higher-pair[4,5]의 경우와 구분된다.

바퀴형 차동 운반체의 대표적인 예로서, 4바퀴 2-자유도

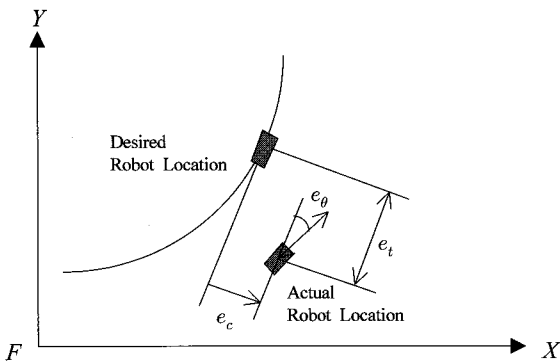


그림 1. 동작 오차의 분해.

Fig. 1. Motion error decomposition.

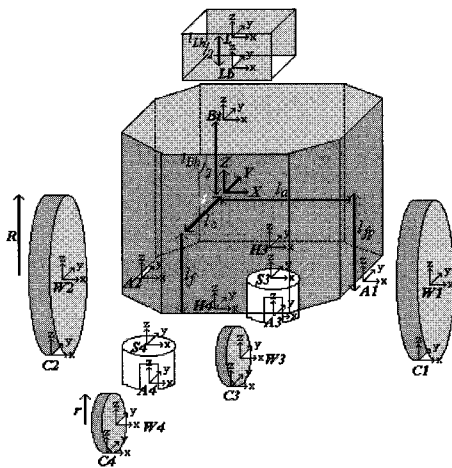


그림 2. 2-자유도 차동 운반체.

Fig. 2. 2-DOF differential vehicle.

를 갖는 차동 운반체에 대한 형태는 그림 2에서 나타난다. 바닥 좌표 시스템의 Z축은 운반체의 이동 표면에 직교하게 설정하며, 운반체 좌표 시스템 B은 바닥에 대해 수직인 Z축을 갖는 운반체 몸체에 할당한다. 운반체 좌표 시스템의 동작은 운반체의 동작으로서 해석된다. 운반체 몸체의 중앙에 운반체 좌표 시스템을 할당하고, 접촉점 좌표 시스템  $C_i(i=1, 2, 3, 4)$ 는 바퀴의 방향에 평행한 Y축을 갖는 바닥과 각각의 바퀴사이의 접촉점에 위치한다.

III. 궤환 제어 시스템

1. 일반적인 궤환 제어 시스템

4바퀴 2-자유도 차동 운반체의 실시간에서 위치와 방향의 계산을 위하여 dead-reckoning 알고리즘[6]을 기초로 하며, 위치와 방향을 하나의 변수로 묶어서 궤환하는 일반적인 궤환 제어 시스템에 대하여 알아본다.

차동 운반체 제어시스템의 설계시 구동하고자 하는 위치와 방향을 하나의 루프로 묶어서 궤환하는 기존의 궤환 제어 시스템은 Petrov, Kanayama [7,8]등에 의하여 연구되어졌다. Petrov는 강건한 궤적추적 알고리즘의 개발을 위한 궤환 제어 시스템을 연구하는데 있어 위치와 방향을 하나의 궤적으로 묶어서 사용하는 궤환 루프를 이용하였으며, Kanayama 또한 차동 운반체의 안정한 추적제어 방법을 제안하면서 운반체의 위치와 방향을 하나의 궤적으로 묶어서 궤환하는 제어방식을 사용하였다.

Petrov, Kanayama등에 의하여 제시된 제어방식을 적용하여, 4바퀴 2-자유도의 차동 운반체에 대한 기구학을 기초로 한 제어 시스템은 그림 3에서 보인다.

시간  $nT$ 에서 바퀴의 위치  $q_s(nT)$ 와 속도  $\dot{q}_s(nT)$ 는 바퀴의 엔코더와 원하는 운반체 위치벡터  ${}^F p_d(nT)$ 로부터 구한다. 계산된 운반체 위치의 오차를 구하기 위해서 구동된 운반체 위치와 원하는 운반체 위치를 비교하면 다음과 같이 구해진다.

$${}^F e_B(nT) = {}^F p_d(nT) - {}^F p_B(nT) \tag{1}$$

4바퀴 2-자유도에서 각각 구동바퀴에 대한 속도는 다음 식으로 변환되어진다.

$$\begin{bmatrix} \omega_{w1x}(nT) \\ \omega_{w2x}(nT) \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} -l_a S^{F\theta_{Bz}}(nT) K_x - l_a C^{F\theta_{Bz}}(nT) K_y l_a K_z \\ l_a C^{F\theta_{Bz}}(nT) K_x l_a S^{F\theta_{Bz}}(nT) K_y - l_a K_z \end{bmatrix} {}^F e_B(nT) \tag{2}$$

여기서 대각 전향이득 K의 원소  $K_x, K_y, K_z$ 는 기준궤적

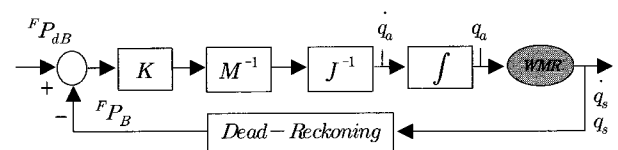


그림 3. 일반적인 궤환 제어 시스템.

Fig. 3. Conventional feedback control system.

에 대한 과도응답이나 떨림을 없애고, 빠른 운반체의 추적 응답을 갖기 위해 선택하게 되는 값으로 많은 경험에 의해 구해지게 된다.

2. 위치-방향 궤환 제어 시스템

일반적인 궤환 제어 시스템에서는 위치와 방향을 하나의 구성원으로 다루지만, 구성된 위치-방향 궤환 제어 시스템에서는 인코더로 부터 구해지는 바퀴의 속도와 위치를 원하는 차동 운반체의 위치와 방향에 대하여 각각 궤환한다. 위치 이득행렬  $K_p$ 와 방향 이득행렬  $K_o$ 는 위치와 방향에 대한 과도응답이나 떨림을 없애고, 빠른 운반체의 추적 응답을 갖기 위해 선택하게 되는 값으로서 많은 경험에 의한 적절한 선택에 의하여 차동 운반체의 원하는 위치와 방향에 대한 오차를 최소화한다[9].

궤환된 차동 운반체의 위치와 방향오차를 구하기 위해서 구동된 운반체 궤적과 원하는 운반체 궤적을 비교하면 다음과 같이 구해진다.

$${}^F p_{eB}(nT) = {}^F p_{dB}(nT) - {}^F p_B(nT) \quad (3)$$

$${}^F \theta_{eB}(nT) = {}^F \theta_{dB}(nT) - {}^F \theta_B(nT) \quad (4)$$

차동 운반체 구동바퀴의 속도는 다음과 같은 기구학 궤환 제어 시스템에 의한 행렬 벡터의 곱에 의해서 계산되어진다.

$$\dot{q}_a(nT) = J_a^{-1} M^{-1}(nT) \begin{bmatrix} K_p^F P_{eB}(nT) \\ K_o^F \theta_{eB}(nT) \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서  $\dot{q}_a(nT)$ :(2×1),  $J_a^{-1}$ :(2×3),  $M^{-1}(nT)$ :(3×2)차수를 갖는다.

4바퀴 2-자유도의 차동 운반체에서 구동바퀴의 속도는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} \omega_{w1x}(nT) \\ \omega_{w2x}(nT) \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} -S\theta & C\theta & l_a \\ -S\theta & C\theta & -l_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_p^F P_{eB}(nT) \\ K_o^F \theta_{eB}(nT) \end{bmatrix} \quad (6)$$

전향이득  $K_p$ ,  $K_o$ 의 값은 기준궤적에 대한 과도응답이나 떨림을 없애고, 빠른 운반체의 추적 응답을 갖기 위해 선택하게 되는 값이다.

(6)에서 R은 구동바퀴의 반경,  $l_a$ 는 운반체 몸체중심에서 구동바퀴 축 중심까지의 X축 상의 거리를 나타내며 그 차동운반체의 매개변수는 표 1에서 표시한다.

그림 4에서와 같이, 차동 운반체의 위치와 방향을 각각

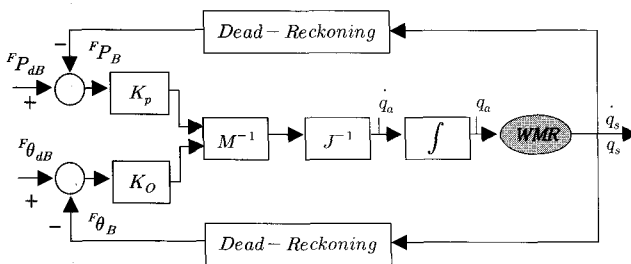


그림 4. 위치-방향 궤환 제어 시스템.

Fig. 4. Position-orientation feedback control system.

분리된 궤환 보상 방법을 사용하는 제어 시스템은 차동 운반체의 동작오차 중에서 특히 시상수, 시스템 매개변수의 차이 등에 의하여 발생하는 내부오차의 최소화를 위하여 구성한다.

3. 외부오차 제어 시스템

차동 운반체의 주된 한계는 궤적 추적의 정확성이다. 이 문제의 해결은 새로운 동작 제어기의 구성에 의하여 개선할 수 있다.

본 논문에서 사용하는 차동 운반체의 경우에, 독립적으로 구동되는 두개의 다른 모터에 의해서 구동 바퀴가 구동되며, 차동 운반체의 조향은 두 구동바퀴의 속도 차이에 의하여 이루어진다.

차동 운반체의 구동 시 발생할 수 있는, 베어링 마찰력의 차이, 타이어의 마모에 의한 구동바퀴 반경의 차이와 같은 외란에 의한 오차를 보상해 주기 위한 제어 시스템을 구성한다. 제어 시스템은 구동바퀴 속도의 궤환과 구동된 바퀴의 이동거리 차를 연산하여 구동바퀴의 속도에 보상해주는 루프로 구성된다.

추적오차는 차동 운반체의 동작의 정확도에는 큰 영향은 미치지 않고, 원하는 이동속도의 적용에 의하여 제어 할 수 있다.

외부오차의 개념은 기계의 공구제어를 위하여 Koren[10]이 처음으로 도입하였으며, 현재에도 여러 관련 분야를 통하여 외부오차에 대한 연구가 계속되고 있다[11,12].

외부오차의 보상을 위하여 구성된 제어기는 그림 5에서 보인다. 일반적으로 안정한 시스템에서 측정된 구동바퀴 속도비와 제어기의 이득 값의 비는  $\dot{q}_{1s}/\dot{q}_{2s} = C1/C2$ 의 관계를 만족시키며, 이를 통하여 연속적인 외란에 의해서 발생하는 안정된 방향오차는 제거된다.

그림 5에서 양 제어루프의 이득 C1, C2를 통하여 각 구동 바퀴의 움직인 거리가 계산되는데, 양 구동바퀴의 움직인 거리의 차는 다음에 의하여 구해진다.

$$E(t) = | P_1(t) | - | P_2(t) | \quad (7)$$

여기서 거리 오차 E(t)가 "0"이 아닌 것은 한 바퀴의 구동모터가 다른 바퀴의 구동 모터보다 빨리 움직였음을 의미한다.

본 논문에서 외란으로 취급하고 있는 마모에 의한 구동 바퀴 반경의 차이는 운반체의 방향 변화를 측정할 수 있는

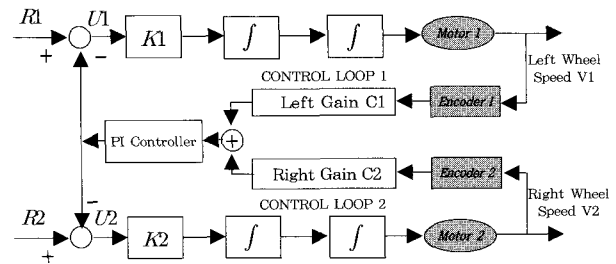


그림 5. 외부오차 제어 시스템.

Fig. 5. External error control system.

자이로센서를 이용하며, 이로부터 계산되어지는 운반체의 방향오차를 통하여 구동바퀴 반경의 차이를 구할 수 있다 [13,14]. PI제어기는 상수 연속 외란에 의하여 발생할 수 있는 오차를 제거하여 두 구동 모터에 대하여 동일한 속도의 제동이 가능하게 한다.

그림 5에서 K1, K2는 구동바퀴 1, 2에 대한 이득행렬로서 많은 경험에 의하여 적절히 선택된 값이며, 각 구동바퀴의 궤적추적 오차를 최소화한다.

3.1 방향오차

외부오차 제어는 두 구동 제어루프의 동등한 속도에 의해서 방향오차를 직접 줄이거나 혹은 소거시킨다. 외부오차 제어에서 가장 중요한 장점은 가장 현격한 오차 즉, 방향오차를 직접제어 한다는 것이다. 그림 5에서 보이는 바와 같이 두 구동바퀴의 이동거리 차가 발생한 경우, 이동거리의 차를 구동바퀴의 속도로 연산하여 각각의 구동바퀴에 서로 상반되는 부호의 값으로 보상해준다. 그 결과는 짧은 수렴 시간 뿐만 아니라 탁월하게 외란을 방지한다.

두 구동바퀴의 반경이 동일하지 않을 경우, 두 구동바퀴가 동일한 각속도로 회전하여도 운반체는 일정한 곡률에 따라 좌 또는 우측으로 방향오차가 발생하게 된다.

운반체의 방향각을 변화를 측정할 수 있는 자이로 센서를 이용하여 운반체의 방향오차 계산이 가능하며, 방향오차는 다음과 같은 과정을 통하여 구동바퀴 반경의 차이를 구할 수 있다.

두 구동바퀴의 반경이 일정하지 않을 경우 운반체의 동작을 그림 6에 나타내었다. 여기서  $e_\theta$ 는 방향오차,  $\rho$ 는 곡률반경,  $e_x, e_y$ 는 이탈변위에 대한 x, y성분을 나타낸다.

그림 6으로부터 구동바퀴 1, 2의 주행거리  $\Delta P_1, \Delta P_2$ 를 다음과 같이 방향오차와 곡률반경으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= e_\theta(\rho - l_a) \\ \Delta P_2 &= e_\theta(\rho + l_a) \end{aligned} \tag{8}$$

여기서  $l_a$ 는 측정된 차축간격을 나타낸다. (8)을 이용하여 방향오차의 변화량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

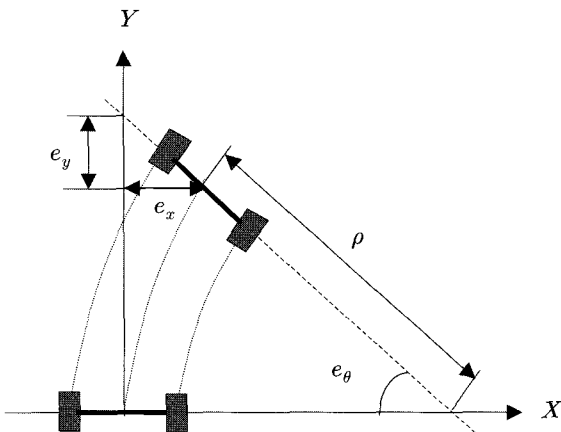


그림 6. 외부오차발생시 운반체의 동작.

Fig. 6. Vehicle motion for external error.

$$\Delta e_\theta = \frac{\Delta P_2 - \Delta P_1}{2l_a} \tag{9}$$

이때 구동바퀴 1,2의 주행거리는 주행동안 발생한 좌우 엔코더의 펄스수로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= \beta_1 \Delta q_1 \\ \Delta P_2 &= \beta_2 \Delta q_2 \end{aligned} \tag{10}$$

여기서  $\Delta q_1, \Delta q_2$ 은 이동 동안에 엔코더에서 발생한 펄스수이며,  $\beta$ 는 단위펄스당 구동바퀴의 이동거리이다.

$$\beta_{1,2} = \frac{2\pi R_{1,2} \bar{g}}{\Gamma} \tag{11}$$

여기서  $\Gamma$ 는 엔코더의 해상도(resolution)를,  $\bar{g}$ 는 기어비(gear ratio)를 나타내며,  $R_1, R_2$ 는 측정된 구동바퀴의 반경을 나타낸다. 따라서 (9)-(11)을 이용하여 방향오차 각을 다음 각과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_\theta = \frac{\pi \bar{g} \Delta q (R_2 - R_1)}{l_a \Gamma} \tag{12}$$

(12)를 이용하여 두 구동바퀴 반경의 차이를 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_2 - R_1 = \frac{e_\theta l_a \Gamma}{\pi \bar{g} \Delta q} \tag{13}$$

즉 센서를 통하여 측정되어지는 운반체의 방향오차를 이용하여 두 구동바퀴의 이동거리차를 계산할 수 있으며, 이를 이용하여 두 구동바퀴 반경의 차이를 구할 수 있다.

3.2 외부오차 제어기 보상이득

보상이득은 운반체가 커브경로를 이동하거나 혹은, 알고 있는 내부오차를 보상하기 위하여 사용된다. 외부오차 이득 C1, C2는 운반체가 커브경로를 움직이는 것을 가능하게 한다. 차동 운반체가 복잡한 커브경로를 이동할 경우 이 경로는 선형과 타원형의 구간으로 구성되어 진다.

동작 제어기에 있어서 외부오차 제어기는 외부오차에 대한 보상을 위하여 사용되어지고 (9)에서 주어진 방향오차 모델을 기초로 하여 기준 모델은 다음과 같이 선택한다.

$$\theta_t = \theta_{t-1} + \frac{R}{4l_a} [(\dot{q}_{1s}(t-1) + \dot{q}_{1s}(t)) - (\dot{q}_{2s}(t-1) + \dot{q}_{2s}(t))] \tag{14}$$

각각의 구동바퀴의 각 속도는 외부오차 이득과 기준 각속도의 연산에 의하여 안정한 상태의 값을 다음과 같이 갖는다.

$$\begin{aligned} \dot{q}_1 &= C1(\dot{q}_{1d} + \dot{q}_{2d}) / (C1 + C2) \\ \dot{q}_2 &= C2(\dot{q}_{1d} + \dot{q}_{2d}) / (C1 + C2) \end{aligned} \tag{15}$$

여기서  $q_{1d}$ 과  $q_{2d}$ 은 요구되어지는 입력 속도이고  $\dot{q}_1$ 과  $\dot{q}_2$ 은 바퀴의 속도이다.

4. 외부-내부오차 제어 시스템

외부오차의 발생시, 기준궤적 추적에 대한 정확도의 개

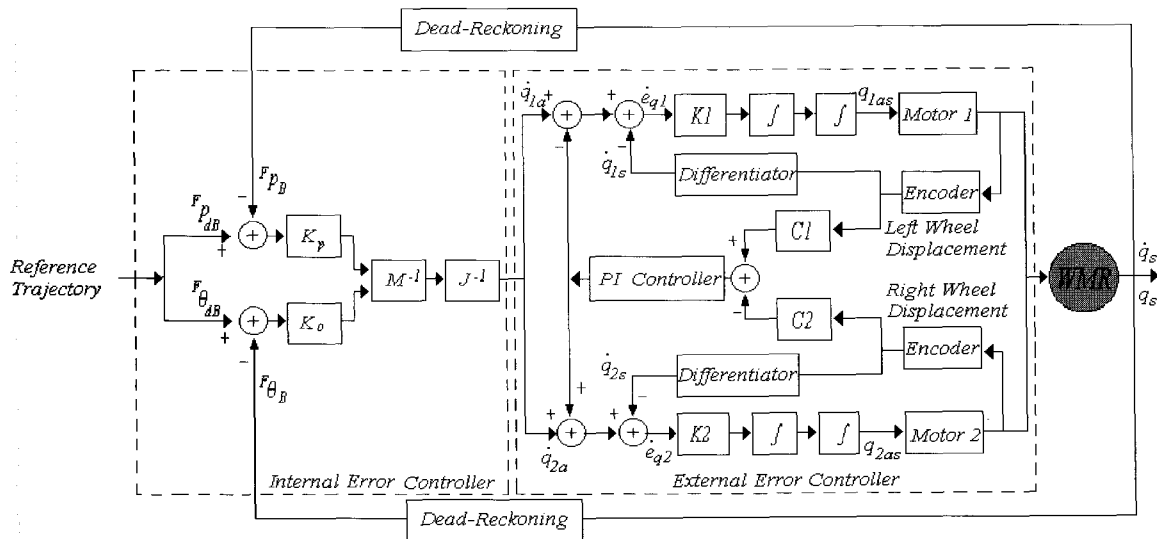


그림 7. 내부·외부오차 제어 시스템.  
Fig. 7. Internal-external error control system.

선은 구동바퀴 속도 궤환 제어와 두 구동바퀴의 이동거리 차를 연산하여 구동바퀴의 속도에 보상해주는 제어방법에 의하여 이루어진다. 이러한 방법에 의하여 위치 궤적제어의 가장 큰 오차의 원인이 되는 요소를 직접적으로 제어할 수 있다.

구동바퀴 속도 궤환 제어는 두 구동 제어루프의 동등한 속도에 의해서 방향오차를 직접 줄이거나 혹은 소거시킨다. 구동바퀴 속도 궤환에서 가장 중요한 장점은 가장 현격한 오차 즉, 방향오차를 직접 제어 한다는 것이다. 구동바퀴 속도 궤환 제어의 또 다른 장점은 두 제어 루프에서 동시에 오차의 수정을 위한 구동바퀴 속도의 보상이 일어나며, 그 결과는 짧은 수렴시간 뿐만 아니라 탁월하게 외란을 방지할 수 있다는 점이다.

일직선 기준궤적일 경우에 이동거리의 차는 (16)과 같이 표현된다.

$$E_{dw}(t) = C1 * d_{w1}(t) - C2 * d_{w2}(t) = d_{w1} - d_{w2} \quad (16)$$

여기서 C1, C2는 설정되어지는 기준궤적의 형태에 따라 달라지는 이득상수 이다. 두 바퀴의 이동거리 차  $E_{dw}(t)$ 는 차동 운반체가 일직선 운동을 할 경우에, 동일한 C1, C2의 선정에 의하여 구해지고, 구동바퀴의 반경 R1, R2가 차를 갖는 경우에 C2의 값은 두 구동바퀴 반경의 비에 비례하여 변화하게 된다.

만약에 R1, R2 가 동일하다면 동일한 바퀴의 구동거리에 의하여 차동 운반체가 일직선 방향으로 이동한다.

그러나 바퀴의 마모에 의하여 바퀴 지름의 차이를 갖는 경우는 동일한 바퀴 속도를 갖을지라도 이동바퀴 거리의 차에 의하여 방향이 변화하게 된다. 이때 차동 운반체 바퀴의 구동거리 차를 각 구동바퀴에 보상해주는 시스템이 필요하며, 사용되어지는 이득행렬 C1, C2는 C1=1이고 C2 = R1/R2의 사용에 의하여 오차는 보상되어진다.

즉, 일직선의 기준궤적에 대하여, 두 구동바퀴가 마모에

의하여 반경의 차이를 갖는 경우에 이동거리의 차는 다음 식과 같이 표현된다.

$$E_{dw}(t) = C1 * d_{w1}(t) - C2 * d_{w2}(t) = d_{w1} - \frac{R1}{R2} d_{w2} \quad (17)$$

각 구동바퀴의 거리 차  $E_{dw}(t)$ 는 비례 제어기와 적분 제어기의 사용에 의하여 구동바퀴의 속도에 보상해 주기 위한 구동바퀴의 보상속도가 구해진다.

$$C_{VW3}(t) = Edw(t) * K3 + K4 \int_{(n-1)T}^{nT} E_{dw} d(t) \quad (18)$$

위의 값은 각각의 구동바퀴의 속도에 +, - 값으로 각각 보상되어진다. 즉 차동 운반체가 일직선 운동을 해야 할 경우  $E_{dw}(t)$ 가 +이라면 바퀴 1의 구동거리가 바퀴 2의 구동거리보다 더 많음을 의미하므로 바퀴 1의 구동속도는 감소하고, 대신에 바퀴 2의 구동속도는 가속함을 의미한다.

4-바퀴 2-자유도를 갖는 차동 운반체에서 각각의 구동 바퀴에 대한 각 가속도는 내부오차 보상을 위하여 구성된 위치-방향 궤환 제어 시스템과 외부오차 보상 제어 시스템 으로부터 다음식과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_{w1x}(nT) \\ \dot{\omega}_{w2x}(nT) \end{bmatrix} = (J^{-1} M^{-1} \begin{bmatrix} K_p(FP_{eB}(nT)) \\ K_o(F\theta_{eB}(nT)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -(d_{w1} * C1 - d_{w2} * C2) * C_{VW3}(t) \\ +(d_{w1} * C1 - d_{w2} * C2) * C_{VW3}(t) \end{bmatrix}) - \begin{bmatrix} \dot{q}_{1s} \\ \dot{q}_{2s} \end{bmatrix} \quad (19)$$

그림 7은 본 논문에서 최종적으로 제안한 내부·외부오차 제어 시스템을 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 제어 시스템을 내부오차 제어기와 외부오차 제어기로 각각 분리하여 구성하였으며, 최종적으로 두 제어기를 합하여 하나의 제어기로 구성하였다. 앞부분에 구성된 내부오차 제어기는 시스템의 시상수 혹은 매개변수의 잘못된 입력으로 인하여 발생할 수 있는 내부오차의 최소화를 위하여 구성

한 제어기이다. 이 제어기는 주어진 목적궤적의 위치와 방향을 하나의 궤적으로 묶어서 위치궤적의 추적에 중점을 두었던 기존의 일반적인 제어기와는 달리, 위치와 방향궤적을 각각 분리하여 궤환하는 제어기를 구성하였다. 이 제어기에서 실시간 위치와 방향의 계산을 위하여 dead-reckoning 알고리즘을 사용하였는데, 이는 차동 운반체가 고정된 매니플레이터와는 달리 higher-pair 조인트에 의한 비-홀로노믹 시스템이기 때문에 도입한 알고리즘이다.

외부오차와 내부오차를 제어하기 위하여 본 논문에서 최종적으로 내부·외부오차 제어기는 본 논문에서 기준 모델로 설정한 4-바퀴 2-자유도를 갖는 차동 운반체에 적용한다. 내부·외부오차 제어기는 두 구동바퀴의 방향과 속도 제어에 의하여 직접적으로 가장 중요한 오차의 하나인 방향 오차를 최소화 할 수 있으며, 훌륭한 외란 방지 역할을 한다.

IV. 모의실험 결과

산업용 매니플레이터의 한계점을 보완해 주기 위하여, 공장 자동화 및 무인화 시스템에서 차동 운반체에 대한 연구·개발이 한창이다. 차동 운반체에 대한 모델링과 내부·외부오차 제어 시스템의 성능을 기존의 일반적인 제어 시스템과 비교·평가하기 위하여 모의실험을 하였다.

1. 차동운반체의 구성요소

모의실험에서 기준궤적은 고정된 바닥 좌표 시스템에 대한 차동 운반체 몸체의 위치궤적으로 주어진다. 실제 적용하고자 하는 4-바퀴 2-자유도 차동 운반체의 형태는 그림 8에 주어지고, 모의실험에서 사용된 시스템 매개변수 값은 표 1과 같다.

2. 대각선 기준 궤적에 대한 결과분석

그림 9-21은 기준궤적이 대각선으로 주어진 경우에 대한 각 제어 시스템의 X, Y축의 위치 해 궤적, 위치 오차 궤적, 방향 해 궤적, 방향 오차 궤적, 각 구동바퀴의 속도 해 궤적 그리고 각 축에 대한 몸체 속도궤적을 나타낸다.

여기서 그림 9은 위치와 방향을 하나의 궤적으로 묶어서 궤환하는 기존의 일반적인 제어 시스템의 위치해 궤적이고, 그림 10은 위치와 방향을 각각 분리하여 궤환하는 위치-방

표 1. 2-DOF 차동 운반체의 매개변수 값.

Table 1. Parameter value of 2-DOF vehicle.

기호	수치값	의미
$l_{Lh}/2$	0.25m	부하 높이/2
$l_{Bh}/2$	0.30m	몸체 높이/2
$l_a$	0.32m	몸체 폭/2
$l_c$	0.32m	보조바퀴 y-거리
$l_f$	0.22m	보조바퀴 z-거리
$l_{fp}$	0.24m	구동바퀴 z-거리
$l_s$	0.10m	보조바퀴 높이
$l_g$	0.02m	보조바퀴 조향링크 길이
$R1$	0.11m	왼쪽 구동바퀴 반경
$R2$	0.11m	오른쪽 구동바퀴 반경
$r$	0.03m	보조바퀴 반경

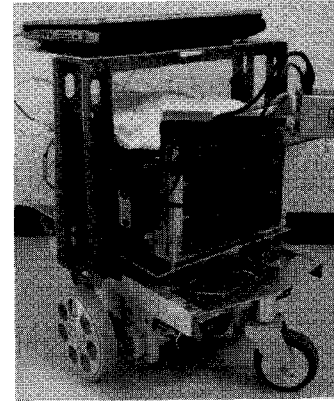


그림 8. 4-바퀴 2-자유도 차동 운반체의 형태.

Fig. 8. Configuration of 4-Wheeled 2-DOF differential drive vehicle.

표 2. 대각선 기준궤적에 대한 X축 위치궤적.

Table 2. X-axis position trajectory.

	일반적인 제어기	위치-방향 제어기	내부·외부오차 제어기
수렴정도	지속적인 떨림	양호	아주 양호
수렴시간	2.87sec	0.77sec	0.001sec

표 3. 대각선 기준궤적에 대한 Y축 위치궤적.

Table 3. Y-axis position trajectory.

	일반적인 제어기	위치-방향 제어기	내부·외부오차 제어기
수렴정도	지속적인 떨림	양호	아주 양호
수렴시간	2.75sec	0.66sec	0.012sec

표 4. 대각선 기준궤적에 대한 방향 궤적.

Table 4. Orientation trajectory.

	일반적인 제어기	위치-방향 제어기	내부·외부오차 제어기
방향한계	계속 작아짐	1.34~0.23rad	0.75rad
수렴시간	수렴 안됨	0.87sec	0.002sec

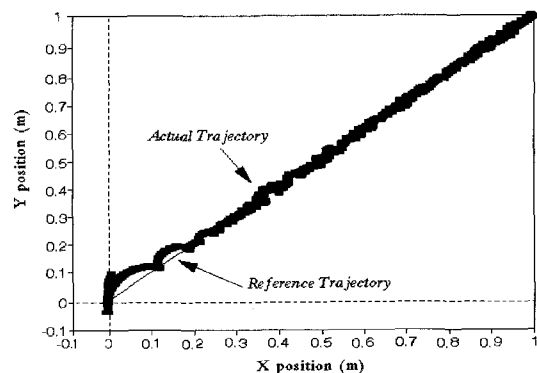


그림 9. 기존 제어기의 위치해 궤적.

Fig. 9. Position solution trajectory of conventional controller.

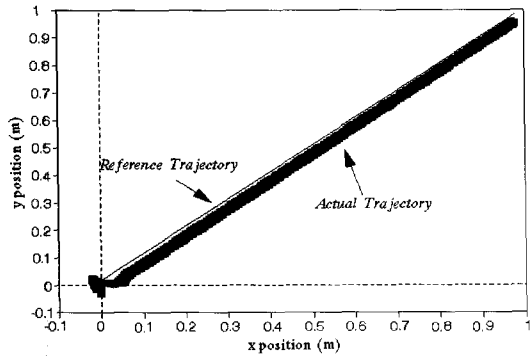


그림 10. 위치-방향 제어기의 위치해 궤적.  
Fig. 10. Position solution trajectory of position-orientation controller.

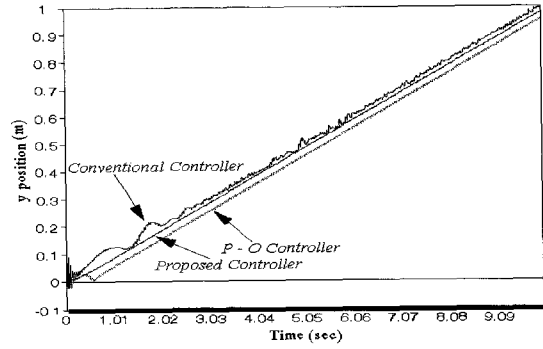


그림 13. Y축에 대한 위치해 궤적.  
Fig. 13. Position solution trajectory for Y-axis.

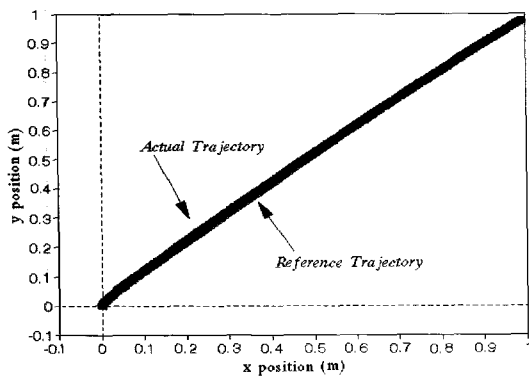


그림 11. 제안된 제어기의 위치해 궤적.  
Fig. 11. Position solution trajectory of proposed controller.

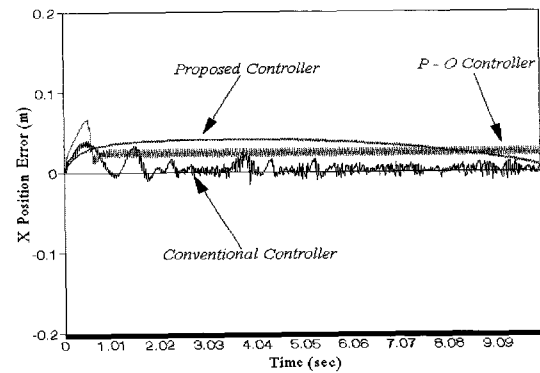


그림 14. X축에 대한 위치 오차 궤적.  
Fig. 14. Position error trajectory for X-axis.

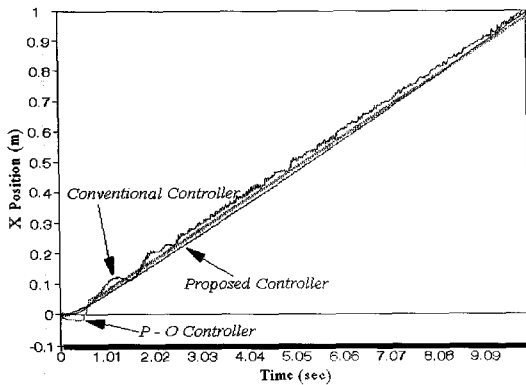


그림 12. X축에 대한 위치해 궤적.  
Fig. 12. Position solution trajectory for X-axis.

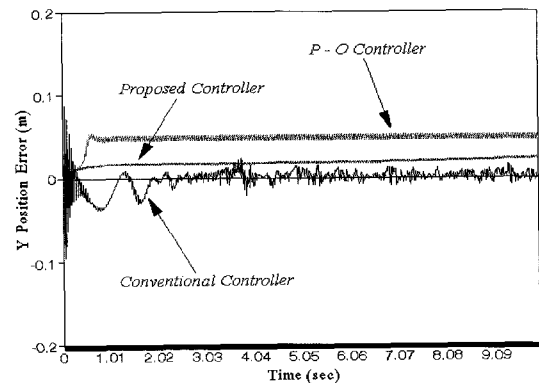


그림 15. Y축에 대한 위치 오차 궤적.  
Fig. 15. Position error trajectory for Y-axis.

향 궤환 제어 시스템의 결과이다. 그리고 그림 11은 본 논문에서 최종적으로 내부·외부오차 제어 시스템의 결과를 나타낸다. 대각선 기준궤적은 직각 좌표에서 (0,0)에서 (1,1)까지를 시간의 증가에 비례하여 움직이는 궤적으로 설정하였다.

그림 12~13은 세가지 제어시스템의 X축, Y축에 대한 위치궤적을 각각 비교한다. 그림 14~15는 세가지 제어시스템의 X축, Y축에 대한 위치오차궤적을 각각 비교한다.

그림 16~17은 기준 방향궤적을  $45^\circ$ , 즉  $0.78$  rad 정도로 설정하였을 경우에 대한 세 가지 제어기의 방향 해궤적 및 방향오차궤적을 각각 나타내며, 그림 18~21은 세가지 제어시스템의 바퀴1,2에 대한 속도해궤적 및 X축, Y축에 대한 몸체속도궤적을 각각 비교한다.

기존의 제어시스템은 위치와 방향을 하나의 궤적으로 묶어서 동일한 궤환 이득값을 사용함으로써 기준궤적에 대한 방향 해 궤적의 수렴성은 아주 미비하다. 또한 위치-방향을

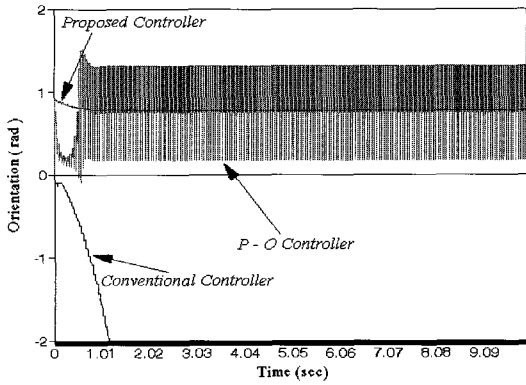


그림 16. 방향 해 궤적.  
Fig. 16. Orientation solution trajectory.

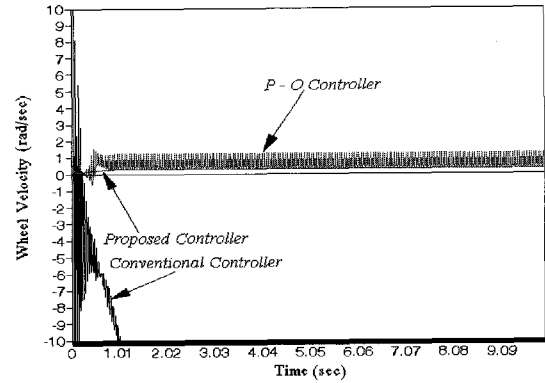


그림 19. 바퀴 2의 속도 해 궤적.  
Fig. 19. Velocity solution trajectory of wheel 2.

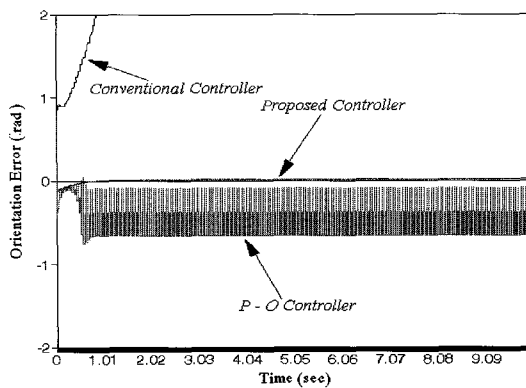


그림 17. 방향 오차 궤적.  
Fig. 17. Orientation error trajectory.

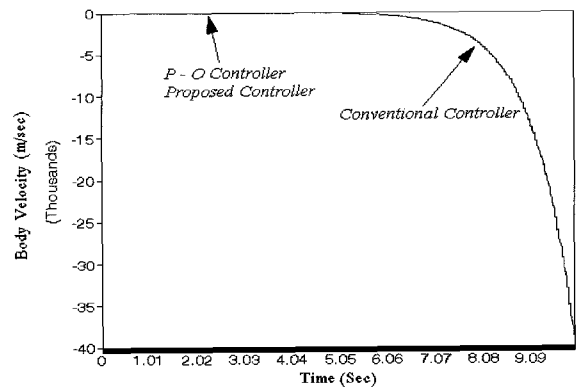


그림 20. X축에 대한 몸체 속도.  
Fig. 20. Body velocity for X-axis.

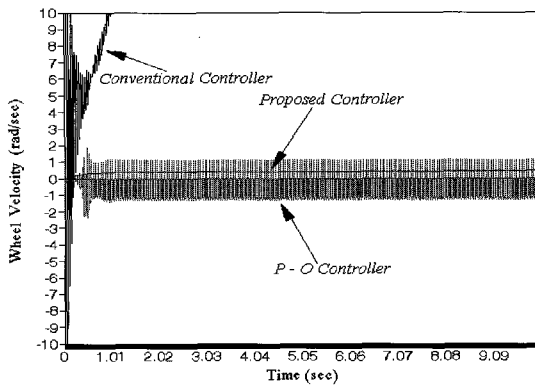


그림 18. 바퀴1의 속도 해 궤적.  
Fig. 18. Velocity solution trajectory of wheel 1.

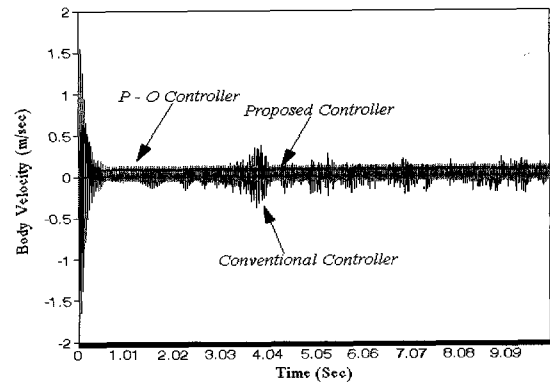


그림 21. Y축에 대한 몸체 속도.  
Fig. 21. Body velocity for Y-axis.

각각 분리하여 위치와 방향에 대한 이득  $K_p$ ,  $K_0$ 를 따로 사용하는 경우 기존의 제어를 사용하는 경우보다는 빠른 수렴정도를 보이나 일정한 범위 내에서 계속적으로 떨림을 갖는 현상을 보인다.

최종적으로 구성된 제어 시스템은 0.75 rad정도의 떨림없는 일정한 방향궤적을 계속적으로 갖음을 보인다. 이로서 본 논문에서 최종적으로 구성된 제어 시스템은 방향궤적오차의 최소화에 의하여 위치궤적의 수렴성이 아주 탁월함을

알 수 있다.

각각의 구성된 제어 시스템의 성능비교는 표 2-4를 통하여 나타낸다.

### V. 결론

본 논문에서는 대부분의 산업현장에서 고정된 로봇 매니퓰레이터의 기능 및 작업범역 확장을 위해 연구대상으로 각광받고 있는 운반체의 여러 종류 중에서 특히, 4바퀴 2



자유도를 갖는 운반체의 위치제어를 위한 궤환제어 알고리즘의 구성과 이에 대한 모의실험을 통하여 제안한 제어기의 유효성을 입증하였다.

구동바퀴 반경의 차이를 각각의 구동바퀴에 보상해 줌으로써 가장 중요한 오차의 하나인 방향 오차를 최소화 할 수 있음을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 외부오차의 한 종류인 바퀴의 미끄럼이나 바닥의 거칠기는 제안한 제어기에서 고려하지 않았지만 실제 WMR의 위치를 파악하기 위하여 사용된 dead-reckoning에서 바퀴의 미끄럼과 거칠기는 위치오차의 가장 큰 원인으로 대두되고 있다. 이점에 좀더 신중한 연구가 필요하며 지금까지의 모델과 제어 알고리즘을 기초로하여 계속적으로 Fuzzy 및 신경회로망을 이용한 운반체의 위치제어에 많은 연구를 하고자한다.

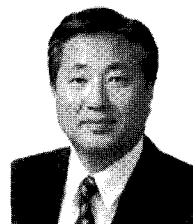
### 참고문헌

- [1] P. P. Petrov, "Robust trajectory tracking algorithms for a wheeled mobile robot," *IECON '91*. 1991.
- [2] J. Thomas and H. F. Durrant, "Kinematics for modular wheeled mobile robots." *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1130-1135, Apr. 1991.
- [3] K. S. Fu, R. C. Gonzalez, C. S. G. Lee, "Robotics control, sensing, vision, and intelligence," by *McGraw-Hill*. 1987.
- [4] S. K. Saha and J. Angeles, "kinematics and dynamics of a three-wheeled 2-DOF AGV," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1572-1577, 1989.
- [5] P. Muir and C. Newman, "Kinematic modelling of Wheeled Mobile Robots," *Journal of Robotic Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 281-333, 1987.
- [6] P. Muir and C. Newman, "Kinematic modelling for feedback control of an omnidirectional wheeled mobile robot," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1772-1778, May 1987.
- [7] P. P. Petrov, "Robust trajectory tracking algorithms for a wheeled mobile robot," *IECON '91*. 1991.
- [8] Y. Kanayama, "Two dimensional wheeled vehicle kinematics," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 3079-3084, 1994.
- [9] Y. O. Chung, and C. K. Park, "Design of feedback control system for position control of wheeled mobile robot," *Proceeding of the International Workshop on Advanced Mechatronics '95*, pp. 348-352, 1995.
- [10] Y. Koren, "Biaxial computer control for manufacturing systems," *ASME J. Dynamic Syst., Meas., Control*, vol. 102, pp. 265-272, Dec. 1979.
- [11] P. Muir and C. Newman, "Kinematic modeling of wheeled mobile robots," *Journal of Robotic Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 281-333, 1987.
- [12] K. Fujiyama, R. Katayama, T. Hamaguchi, and K. Kawakami, "Digital controller design for recordable optical disk player using disturbance observer," *Proceedings of International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 141-146, 2000.
- [13] J. W. Moon, C. S. Kim, and S. S. Park, "Kinematic correction of differential drive mobile robot and a design for the reference-velocity trajectory with acceleration-resolution constraint on motor controllers" *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. g, no. 6, June 2002.
- [14] J. J. Crowley, "Asynchronous control of orientation and displacement in a robot vehicle," *IEEE Inter. Conf. on Robotics and Auto.*, pp. 1277-1282, 1989.
- [15] T. L. Chung, H. T. Bui, T. T. Nguyen, and S. B. Kim, "Sliding mode control of two-wheeled welding mobile robot for tracking smooth curved welding path," *KSME International Journal*, vol. 18, no. 7, pp. 1094-1106, 2004.
- [16] N. M. Dung, V. H. Duy, N. T. Phuong, S. B. Kim, and M. S. O, "Two-wheeled welding mobile robot for tracking a smooth curved welding path using adaptive sliding-mode control technique" *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 283-294, June 2007.



정 용 욱

1988년 경희대학교 전자공학과 졸업.  
1992년 경희대학교 전자공학과 석사.  
1999년 경희대학교 전자공학과 박사.  
1996년~현재 진주국제대학교 자동차공학과 교수. 관심분야는 자동제어, 제어 시스템, 로봇틱스 및 응용분야.



박 종 국

1971년 서울대학교 물리학과 졸업.  
1975년 연세대학교 전자공학과 석사.  
1979년 연세대학교 전자공학과 박사.  
1980년~현재 경희대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 자동제어, 퍼지, 신경망, 유전알고리즘.