

論文97-34S-11-8

차동 구동형 이동 로봇의 위치, 방향 및 속도 궤환 제어 알고리즘

(Position, Orientation, and Velocity Feedback Control Algorithms for Differential-Drive Mobile Robot)

鄭容旭*, 朴鍾國**

(YongOug Chung and ChongKug Park)

요 약

본 논문에서는 차동 구동형 이동 로봇의 구동 바퀴 위치, 방향 및 속도 궤환 제어 알고리즘의 구성과 적용에 대하여 연구하였다. 두개의 구동 바퀴에 의하여 구동되는 차동 구동형 이동 로봇에서 가장 중요한 오차의 원인은 방향오차이며 이를 최소화하기 위하여 구동 바퀴의 위치, 방향 및 속도궤환 제어알고리즘을 도입하였다. 구동 바퀴의 위치, 방향 및 속도 궤환제어 알고리즘의 효율성을 입증하기 위하여 기구학을 기초로한 기존의 일반적인 제어 방법과 상호 비교하였고, 모의실험 결과를 통하여 본 논문에서 제안한 제어 알고리즘이 기존의 방법에 비하여 위치와 방향의 오차가 향상 되었음을 입증하였다.

Abstract

The design and implementation of a drive wheel position, orientation, and velocity feedback control algorithm for a differential-drive mobile robot is described here. A new concept, the most significant error, is introduced as the control design objective. Drive wheel position, orientation, and velocity feedback control directly minimize the most significant error by coordinating the motion of the two drive wheels. The drive wheel position, orientation, and velocity feedback control algorithm is analyzed and experiments are conducted to evaluate its performance. The experimental results are shown that drive wheel position, orientation and velocity feedback control algorithm yields substantially smaller position and orientation errors than those of conventional methods.

I. 서론

본 논문에서는 차동 구동형 이동 로봇의 정확한 궤적 추적을 위하여 가장 큰 문제점으로 대두되는 방향오차에 대하여 다룬다. 기구학을 기초로한 일반적인

제어 알고리즘에서는 이동 로봇의 위치와 방향을 하나의 궤적으로 묶어서 다루어 왔다^[1]. Petrov^[13]는 강건한 궤적추적 알고리즘의 개발을 위한 궤환제어 시스템에서 위치와 방향을 하나의 궤적으로 묶어서 사용하는 궤환 루프를 사용하였으며, Kanayama^[14] 또한 이동로봇의 안정적인 추적제어방법을 제안하면서 이와 유사한 궤환 제어기를 구성 하였다. 그러나 본 논문에서는 이동 로봇의 정확한 위치궤적 추적을 위하여 제어 알고리즘의 궤환 루프를 위치와 방향으로 각각 분리하여 동작제어 알고리즘을 구성하고 또한 제안한 차동 구동형 이동 로봇은 두 구동 바퀴의 속도차이에 의하여 방향의 변화가 발생하는 2-자유도의 이동 로봇이기 때문에 동작의 정확도는 두 구동바퀴의 속

* 正會員, 晋州專門大學 自動車電子科
(Dept. of Automotive Electronics, Chinju Technical College)

** 正會員, 慶熙大學校 電子工學科
(Dept. of Electronic Engineering, Kyung hee Univ.)

接受日字: 1997年3月6日, 수정완료일: 1997年9月23日

도와도 직접적인 관계를 가지고 있다. 그래서 제어 알고리즘은 다음의 두 단계로 구성한다. 첫번째, 위치와 방향의 궤환 루프를 분리하여 각각 제어한다. 두번째, 정확한 속도제어를 위하여 두 구동 바퀴의 속도 궤환 루프를 갖는다.

두 구동바퀴에 의하여 구동되는 차동 구동형 이동 로봇(Differential-Drive Mobile Robot)의 기구학 모델링을 구하고, 정확한 위치궤적 추적을 위하여 구동 바퀴의 위치, 방향 및 속도 궤환 제어 알고리즘을 제안한다. 실시간에서 이동 로봇의 위치 계산을 위하여 데드-레크오닝 (Dead- Reckoning) 알고리즘을 사용하며^{[1] [2]}, 모의실험을 통하여 본 논문에서 제안한 방법이 기존의 제어 알고리즘에 비하여 위치와 방향에 대한 오차가 항상 되었음을 보인다.

II. 이동 로봇 동작 오차의 분석

이동 로봇이 움직이는 평면에서, 바다 좌표축 F 는 고정된 기준 좌표축이며, 이동 로봇은 몸체 기준 점 B에 대하여 정의하고 좌표(x,y)는 이동 로봇에 부착되어 있다고 가정한다. 평면에서 이동 로봇의 위치는 x, y, θ 의 세변수에 의하여 정의되어진다.

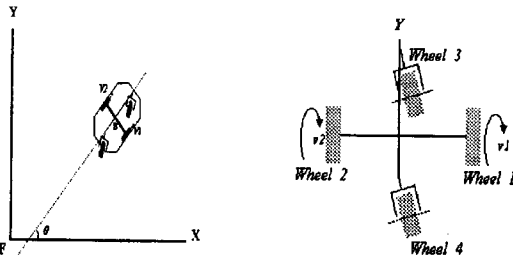


그림 1. 평면에서 이동 로봇의 위치
Fig. 1. Position of the mobile robot in the plane.

차동 구동형 이동 로봇에서 동작 오차의 주된 원인은 내부 오차와 외부 오차로 구분할 수 있다. 내부 오차는 바퀴의 동작에 대한 정보, 즉 바퀴의 속도센서에 의하여 측정할 수 있고, 외부오차는 로봇의 바퀴가 주위환경과 상호작용할때 생기며 절대적 로봇 위치 측정 장치에 의하여 측정 할 수 있다. 본 논문에서는 내부 오차의 제어를 위한 방법에 대하여 다루고자 한다.

내부 오차의 주된 원인은 일반적으로 시상수의 차이

혹은 개개의 루프 이득의 차이에 해당하는 구동루프 파라메타의 차이와 베어링 마찰력의 차이와 같은 구동 루프에 작용하는 외란의 차이로 구분된다.

차동 구동형 이동 로봇에서 동작 오차는 그림 2에서와 같이 e_θ, e_c, e_t 로 분리 할 수 있다. 여기서 e_θ 는 이동 로봇의 실제 방향과 목적 방향사이의 차이로서 정의되는 방향오차이다. 방향오차는 외관상의 오차에서 나타나는 결과이기 때문에 가장 현격한 오차이며, 동작의 정확도에 있어 가장 큰 오차의 원인이 된다. e_c 는 실제 로봇의 위치와 원하는 로봇 위치사이의 거리로서 정의되며, e_t 는 추적 오차로서 이동 방향에서 실제 위치와 원하는 위치사이의 거리로서 정의 한다.

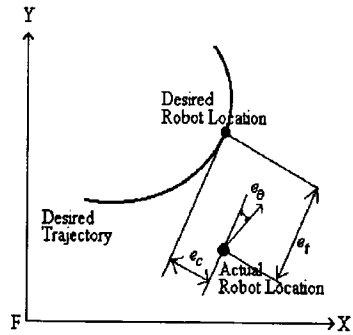


그림 2. 동작 오차의 분석
Fig. 2. Motion error decomposition.

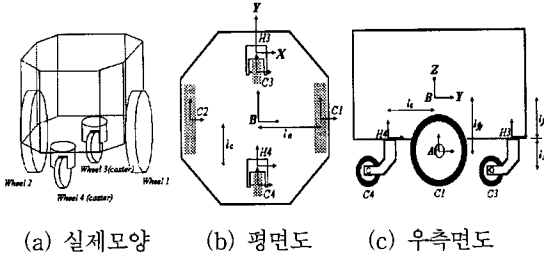
추적오차(e_t)는 이동 로봇의 동작의 정확도에 큰 영향은 미치지 않고, 원하는 이동 속도의 변화에 의하여 제어 할 수 있다. 차동 구동형 이동 로봇에서 동시에 여러개의 오차를 제어 할 수는 없다. 방향오차의 최소화는 이동 로봇이 원하는 경로와 나란히 이동할 수 있게하며 결과적으로 방향 오차는 일정한 한계 범위내에 놓이게된다.

III. 기구학 해석

차동 구동형 이동 로봇의 대표적인 예로서, 4-바퀴 2-자유도를 갖는 이동 로봇에 대한 형태는 그림 3에서 나타낸다^[2]. 바다 좌표시스템의 Z축은 로봇 이동의 표면에 직교하게 설정하며 로봇 좌표시스템 B은 바다에 대해 수직인 Z축을 갖는 로봇 몸체에 해당한다. 로봇 좌표시스템의 동작은 로봇의 동작

으로서 해석된다. 로봇 몸체의 중앙에 로봇 좌표시스템을 할당하고, 접촉점 좌표시스템 C_i ($i=1,2,3,4$)는 바퀴의 방향에 평행한 Y축을 갖는 바닥과 각각의 바퀴사이의 접촉점에 위치한다.

바퀴 1, 2는 각각의 구동모터에 의해 구동되고 바퀴 3, 4는 구동은 되지않고 단지 바퀴 1, 2의 속도차에 의하여 자유로이 방향을 바꿀 수 있는 보조 바퀴이다. 즉, 중앙의 2개의 바퀴는 방향이 고정된 반면에 앞뒤의 바퀴 3과 4는 방향을 변화할 수 있다.



(a) 실제모양 (b) 평면도 (c) 우측면도
 그림 3. 4-바퀴 2-자유도 차동 구동형 이동 로봇 형태
 Fig. 3. Configuration of 4-Wheeled 2-D.O.F Differential-Drive WMR.

실시간에서 이동 로봇의 위치계산을 위하여 데드-레크오닝(Dead-Reckoning) 알고리즘을 사용한다^[1]^[2]. 그림 3에서 이동 로봇의 좌표계 할당에 의해 4-바퀴의 2-자유도를 갖는 이동 로봇의 매개변수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sin^B \theta_{cix} &= 0, \quad \cos^B \theta_{cix} = 1, \\ d_{c1y} &= d_{c2y} = l_b = 0 \\ d_{c1x} &= l_a, \quad d_{c2x} = -l_a \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

- θ_{cix} : C_i 의 x 축에 나란하는 바퀴의 중심에 대한 i 번째 축의 회전변위
- θ_{ciz} : C_i 의 z 축에 나란하는 바퀴의 중심에 대한 i 번째 축의 회전변위
- d_{cix} : 몸체의 중심좌표에서 C_i 의 x 축에 나란하는 축의 천이위치

다음의 세 가정으로부터 기구학 모델링을 위한 제약이 이루어진다^[3]^[4]. 첫번째, 이동 로봇의 동작에 있어서의 떨림은 무시한다. 두번째, 로봇은 평면을 움직인다. 즉, 불안정한 표면에서의 요철부분은 무시한다. 세번째, 바퀴와 표면사이의 회전 마찰력은 회전 미

끄럼을 허용할 정도로 매우 작다고 가정한다.

4-바퀴 2-자유도를 갖는 이동 로봇에서의 바퀴 자코비안 행렬은 다음과 같이 구해진다^[2]

$$J_i = \begin{bmatrix} -R \sin^B \theta_{cix} & {}^B d_{c1y} \\ R \cos^B \theta_{cix} & {}^B d_{c2x} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2-개의 구동바퀴에 의해 구동되는 이동 로봇 경우 에 바퀴 i 에 대한 자코비안 행렬 J_i 는 바퀴속도 \dot{q}_i 의 선형결합으로서, 로봇의 속도와 바퀴 속도사이의 관계를 나타낸다^[5].

$$\bar{B} \dot{p}_B = J_i \dot{q}_i, \quad \text{for } i = 1, 2 \quad (3)$$

로봇 속도벡터 $\bar{B} \dot{p}_B$ 는 다음의 3 구성원, 즉, 로봇의 천이속도 $\bar{B} v_{Bx}$, $\bar{B} v_{By}$ 그리고 회전속도 $\bar{B} \omega_{Bz}$ 으로 표현할 수 있으며, 특히 2 개의 구동바퀴에 의한 이동 로봇에서 바퀴의 회전과 접촉점에 대한 회전은 바퀴의 속도벡터 \dot{q}_i 의 두 구성원 ${}^A \omega_{wx}$, ${}^c \omega_{cz}$ 에 해당한다.

로봇의 몸체 속도로부터 바퀴의 구동 속도를 구한다. 구동력이 인가된 바퀴의 변수와 구동력이 인가되지 않은 바퀴의 변수로 구분하기 위하여 바퀴의 방정식 (3)를 다음 2 개의 구성원으로 분리한다^[1].

$$\bar{B} \dot{p}_B = J_{ia} \dot{q}_{ia} + J_{iu} \dot{q}_{iu} \quad \text{for } i=1, 2 \quad (4)$$

여기서 첨자 a 는 구동력에 의해 구동된 구성원을 나타내고, 첨자 u 는 구동되지 않은 구성원을 나타낸다. 분리된 바퀴의 방정식을 다시 결합하여 식(2)의 바퀴 자코비안 행렬을 사용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \bar{B} \dot{p}_B &= \begin{bmatrix} J_{1a} & 0 & J_{1u} & 0 \\ 0 & J_{2a} & 0 & J_{2u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_{1a} \\ \dot{q}_{2a} \\ \dot{q}_{1u} \\ \dot{q}_{2u} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ R & 0 & -l_a & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 & l_a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{wx} \\ \omega_{wx} \\ \omega_{cz} \\ \omega_{cz} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)로부터 구동된 역기구학 해는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \omega_{wx} \\ \omega_{wx} \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} 0 & 1 & l_a \\ 0 & 1 & -l_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{B} v_{Bx} \\ \bar{B} v_{By} \\ \bar{B} \omega_{Bz} \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)에서 바퀴 동작행렬 M 의 역행렬^[1]을 사용하여 고정기준 좌표인 F 에 대한 이동 로봇 몸체의 속도가 주어졌을 경우에 각 구동바퀴의 각속도를 구하는 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \omega_{w1x} \\ \omega_{w2x} \end{bmatrix} &= \frac{1}{R} \begin{bmatrix} 0 & 1 & l_a \\ 0 & 1 & -l_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{B} v_{Bx} \\ \bar{B} v_{By} \\ \bar{B} \omega_{Bz} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{R} \begin{bmatrix} -S\theta & C\theta & l_a \\ -S\theta & C\theta & -l_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^F v_{Bx} \\ {}^F v_{By} \\ {}^F \omega_{Bz} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $C\theta = \cos {}^F \theta_{Bz}(nT)$, $S\theta = \sin {}^F \theta_{Bz}(nT)$ 이며, ${}^F \theta_{Bz}$ 은 고정 기준좌표 F 와 이동 로봇 몸체 좌표 사이의 방향각, R 은 구동바퀴의 지름을 나타낸다. 바퀴 동작행렬 M 은 고정 기준좌표 F 에서 로봇 몸체좌표 B 에 대한 좌표변환 행렬로부터 구해진다.

측정된 전향기구학 해는 바퀴의 위치 q_s 와 속도 \dot{q}_s 로부터 로봇의 속도벡터 $\bar{B} \dot{p}_B$ 를 구한다. 전향기구학 해를 구하기 위한 첫번째 단계는 바퀴의 속도를 측정되는 부분은 첨자 s , 측정되지 않는 부분은 첨자 n 을 사용하여 다음과 같이 분리한다.

$$\begin{aligned} \bar{B} \dot{p}_B &= J_{is} \dot{q}_s + J_{in} \dot{q}_n \quad \text{for } i=1,2 \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ R & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & R \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{w1x} \\ \omega_{w2x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -l_a & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & l_a \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{c1z} \\ \omega_{c2z} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)으로부터 측정된 전향기구학 해는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} \bar{B} v_{Bx} \\ \bar{B} v_{By} \\ \bar{B} \omega_{Bz} \end{bmatrix} = \frac{R}{2l_a} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ l_a & l_a \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{w1x} \\ \omega_{w2x} \end{bmatrix} \quad (9)$$

식(9)을 고정된 기준 좌표인 F 에 대한 이동 로봇 몸체의 속도로 표현하기 위하여 바퀴 동작행렬 M 을 사용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} {}^F v_{Bx} \\ {}^F v_{By} \\ {}^F \omega_{Bz} \end{bmatrix} &= M \begin{bmatrix} \bar{B} v_{Bx} \\ \bar{B} v_{By} \\ \bar{B} \omega_{Bz} \end{bmatrix} = \frac{R}{2l_a} \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ l_a & l_a \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{w1x} \\ \omega_{w2x} \end{bmatrix} \\ &= \frac{R}{2l_a} \begin{bmatrix} -l_a S\theta & -l_a S\theta \\ l_a C\theta & l_a C\theta \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{w1x} \\ \omega_{w2x} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

IV. 기구학 모델링의 궤환제어

기구학을 기초로한 이동 로봇 제어알고리즘은 각각의 구동 루프에서 동작의 좌표를 설정하는데 주된 목적을 두고있다. 차동 구동형 이동 로봇에서 일반적인 제어 알고리즘은 위치와 방향의 루프를 하나로 묶어서 궤환하는 방법을 사용한다^{[1] [13] [14]}. 이동 로봇의 제어에서 Samson은 두개의 구동 바퀴를 갖는 비-홀로노믹(non-holonomic) cart에 대한 안정화와 궤환 제어 알고리즘에 대하여 연구하였고^[6], De Wit는 2-자유도 이동 로봇의 일정한 경로하에서 입력 구동 토크의 제한에 대하여 연구하였다^[7]. 하지만 지금까지 이동로봇의 궤환제어에서 위치와 방향에 대한 궤적을 각각 구분 궤환하여 서로 다른 궤환제어 이득을 적용하거나 혹은, 여기에 각각의 구동바퀴의 속도궤환 등의 방법을 사용한 이동 로봇의 제어는 거의 이루어지고 있는 않는 상황이다. 그래서 본 논문에서는 기구학을 기초로한 궤환제어 알고리즘에서 이동 로봇의 위치와 방향에 대한 각각의 궤환 제어와 구동바퀴의 속도궤환을 첨부한 새로운 궤환 제어 알고리즘을 제안한다.

차동 구동형 이동 로봇은 비-홀로노믹 제약을 갖기 때문에 실시간에서 이동 로봇의 위치 계산을 위하여 데드-레코닝(Dead-reckoning) 알고리즘을 사용한다.

1. 기존의 궤환 제어 알고리즘

대부분의 차동 구동형 이동 로봇의 경우에 제어시스템을 위치와 방향의 궤적을 하나로 묶어서 궤환하는 방법을 사용하여오고 있다^[1]. 일반적으로 사용되고있는 기구학을 기초로한 궤환제어 알고리즘은 그림 4에서 보인다. 각 바퀴의 속도센서로부터 구해지는 바퀴의 속도 $\dot{q}_s(nT)$ 와 위치 $q_s(nT)$ 를 데드-레코닝(Dead-Reckoning) 알고리즘에 적용하여 이동 로봇의 위치와 방향을 하나의 구성원으로 함께 궤환하는 방법으로서 이득 행렬 K 를 사용한다.

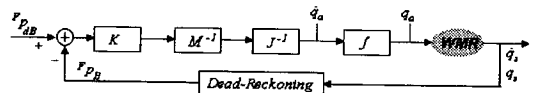


그림 4. 기존의 궤환 제어 알고리즘
Fig. 4. Conventional Feedback Control Algorithm.

데드-레크오닝(Dead-reckoning) 알고리즘에 의하여 계산된 로보트의 궤적과 주어진 기준궤적에 대한 오차를 구하기 위해서 구동된 로보트 궤적과 원하는 로보트 궤적을 상호 비교하면 다음과 같이 구해진다.

$${}^F e_B(nT) = {}^F \dot{p}_{dB}(nT) - {}^F \dot{p}_B(nT) \quad (11)$$

궤적오차는 (3x3)의 대각 전향이득행렬 K에 의해서 곱해지고, 바퀴 동작행렬의 역행렬 $M^{-1}(nT) = M^T(nT)$ 의 적용에 의해서 로보트 좌표축으로 변환되어진다. 즉, 이동 로보트의 속도에서 바다 좌표시스템으로의 변환은 다음의 바퀴 동작행렬(M)에 의하여 이루어진다.

$${}^F \dot{p}_B = \begin{bmatrix} {}^F v_{Bx} \\ {}^F v_{By} \\ {}^F \omega_{Bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos {}^F \theta_B & -\sin {}^F \theta_B & 0 \\ \sin {}^F \theta_B & \cos {}^F \theta_B & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_{Bx} \\ \bar{v}_{By} \\ \bar{\omega}_{Bz} \end{bmatrix} = M \bar{v}_B \quad (12)$$

4-바퀴 2-자유도를 이동 로보트에서 구동 바퀴의 속도는 다음과 같은 기구학 궤환제어 알고리즘에 의한 행렬벡터의 곱에 의해서 계산되어진다.

$$\dot{q}_a(nT) = J_a^{-1} M^T(nT) K_p {}^F e_B(nT) \quad (13)$$

$$= \frac{1}{R} \begin{bmatrix} 0 & 1 & l_a \\ 0 & 1 & -l_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\theta & S\theta & 0 \\ -S\theta & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} K {}^F e_B(nT)$$

즉,

$$\begin{bmatrix} \omega_{w1x}(nT) \\ \omega_{w2x}(nT) \end{bmatrix} = \frac{K}{R} \begin{bmatrix} -S\theta & C\theta & l_a \\ -S\theta & C\theta & -l_a \end{bmatrix} {}^F e_B(nT) \quad (14)$$

여기서 $C\theta = \cos {}^F \theta_{Bz}(nT)$, $S\theta = \sin {}^F \theta_{Bz}(nT)$ 이다.

2. 구동 바퀴 위치, 방향 및 속도 궤환 제어 알고리즘
본 논문에서 차동 구동형 이동 로보트는 두 구동 바퀴의 속도차에 의하여 방향의 변화가 생기기 때문에 이동 로보트 동작의 정확도는 두 구동바퀴의 속도와 직접적인 관계를 가지고 있다. 그래서 각각의 구동 바퀴의 정확한 속도 제어를 위하여 두 구동 바퀴의 속도 궤환 루프를 갖는 궤환제어 알고리즘을 방향오차의 최소화를 위한 위치-방향 궤환 제어 알고리즘에 부가하여 새로운 궤환 제어 알고리즘을 구성한다.

기준궤적 추적에 대한 정확도의 개선은 구동바퀴 위치, 방향 및 속도 궤환 제어에 의하여 이루어지며 이것

에 의하여 가장 현저한 오차는 직접적으로 제어할 수 있다.

구동바퀴의 위치,방향 및 속도궤환 제어는 두 구동 제어루프의 동등한 속도에 의해서 방향오차를 직접 줄이거나 혹은 소거시킨다. 제안한 궤환제어 알고리즘에서 가장 중요한 장점은 가장 현격한 오차 즉, 방향오차를 직접제어 한다는 것이다.

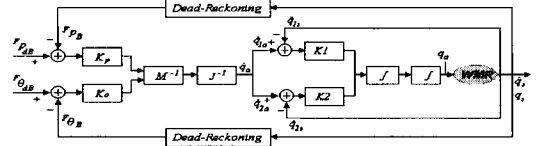


그림 5. 위치, 방향 및 속도 궤환 제어 알고리즘
Fig. 5. Position, Orientation, and Velocity Feedback Control Algorithm.

로보트 궤적오차를 구하기 위하여 구동된 로보트 위치와 방향, 그리고 원하는 로보트 위치와 방향에 대한 궤적을 각각 비교하면 위치와 방향에 대한 오차 궤적은 다음과 같이 구해진다.

$${}^F \dot{p}_{eB}(nT) = {}^F \dot{p}_{dB}(nT) - {}^F \dot{p}_B(nT) \quad (15)$$

$${}^F \theta_{eB}(nT) = {}^F \theta_{dB}(nT) - {}^F \theta_B(nT) \quad (16)$$

식(15)와 (16)의 위치와 방향의 오차로부터 대각 전향 이득벡터의 곱에 의하여 다음과 같은 이동 로보트의 선속도와 각속도가 구해진다.

$${}^F \dot{p}_B(nT) = K_p ({}^F \dot{p}_d(nT) - {}^F \dot{p}_B(nT)) \quad (17)$$

$${}^F \dot{\theta}_B(nT) = K_o ({}^F \theta_d(nT) - {}^F \theta_B(nT)) \quad (18)$$

여기서 이득값 Kp와 Ko는 각각 이동로보트 몸체의 위치와 방향에 대한 오차로부터 이동로보트의 선속도와 각속도를 구하기 위하여 사용되어지는 이득 값이다. 한계속도 범위내에서 목적 위치궤적이 주어진다면 시스템은 지수적으로 감쇄하는 위치 추적오차를 갖으며 위치오차는 적절한 Kp의 선택에 의해서 식(17)의 위치 오차가 0으로 근접하게 된다. 즉, 실제 궤적이 위치목적 궤적을 근접하여 안정하게 추적 실행함을 의미한다. 그리고 초기 방향 추적오차 ${}^F \theta_{dB}(t_0)$ 가 작고, 적절한 Ko의 선택에 의해 추적오차가 매우 작게 구해진다면 식(18)에서 ${}^F \theta_B$ 가 ${}^F \theta_{dB}$ 에 근접하여 추적 실행함을 의미한다. 즉 이동 로보트의 실제방향 벡터 ${}^F \theta_B$ 는

안정하다.

바퀴 동작행렬의 역행렬 $M^{-1}(nT) = M^T(nT)$ 의 적용에 의해서 로봇 좌표축으로 변환되어진다. 즉, 이동 로봇의 속도에서 바다 좌표시스템으로의 변환은 다음의 바퀴 동작행렬에 의하여 이루어지며 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_B \\ \bar{\omega}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_{Bx} \\ \bar{v}_{By} \\ \bar{\omega}_{Bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^F \theta_B & \sin^F \theta_B & 0 \\ -\sin^F \theta_B & \cos^F \theta_B & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Bx} \\ v_{By} \\ \omega_{Bz} \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} v_B \\ \omega_B \end{bmatrix} \quad (19)$$

이동 로봇 구동 바퀴의 속도는 다음과 같은 기구학 궤환제어 알고리즘에 의한 행렬벡터의 곱에 의해서 계산되어진다.

$$\dot{q}_a(nT) = J_a^{-1} M^T(nT) \begin{bmatrix} K_p \dot{p}_{eB}(nT) \\ K_o \theta_{eB}(nT) \end{bmatrix} \quad (20)$$

4-바퀴 2-자유도에서 이는 다음식으로 변환되어진다.

$$\begin{bmatrix} \omega_{wx}(nT) \\ \omega_{wz}(nT) \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} -S\theta & C\theta & l_a \\ -S\theta & C\theta & -l_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_p \dot{P}_{eB}(nT) \\ K_o \theta_{eB}(nT) \end{bmatrix} \quad (21)$$

측정된 구동 바퀴의 속도와 식(21)로 부터 구해진 바퀴의 속도와의 차는 다음과 같이 구해진다.

$$v_{a1}(nT) = \dot{q}_{a1}(nT) - \dot{q}_{s1}(nT) \quad (22)$$

$$v_{a2}(nT) = \dot{q}_{a2}(nT) - \dot{q}_{s2}(nT) \quad (23)$$

식(15)와 (16)의 위치와 방향의 오차로부터 대각 전향이득벡터의 곱에 의하여 다음과 같은 이동 로봇의 선속도와 각속도가 구해진다. 제어에서 속도센서로부터 구해지는 바퀴의 속도와 위치를 이동 로봇의 위치와 방향에 대하여 각각 궤환하여 위치 이득 행렬 K_p 와 방향 이득행렬 K_o 를 적용한다.

$${}^F \dot{p}_B(nT) = K_p ({}^F \dot{p}_d(nT) - {}^F \dot{p}_B(nT)) \quad (24)$$

$${}^F \dot{\theta}_B(nT) = K_o ({}^F \theta_d(nT) - {}^F \theta_B(nT)) \quad (25)$$

그림 5에서 이동 로봇 구동 바퀴의 각기속도는 다음과 같은 기구학 궤환제어 알고리즘에 의한 행렬벡터의 곱에 의해서 계산되어진다.

$$\dot{q}(nT) = \begin{bmatrix} K_1 v_{a1}(nT) \\ K_2 v_{a2}(nT) \end{bmatrix} \quad (26)$$

여기서 이득값 K_1 와 K_2 는 이동로봇 바퀴 1과 바퀴 2의 속도 궤환 오차로부터 이동로봇 바퀴 1과 2의 각기속도를 구하기 위하여 사용되어지는 이득 값이다.

4-바퀴 2-자유도를 갖는 차동 구동형 이동 로봇에서 각각의 구동 바퀴에 대한 각기속도는 식(15)에서 (26)까지의 식으로부터 다음식으로 변환되어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_{wx}(nT) \\ \dot{\omega}_{wz}(nT) \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} -S\theta & C\theta & l_a \\ -S\theta & C\theta & -l_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 (K_p ({}^F \dot{P}_{eB}(nT) - \dot{q}_{s1}(nT))) \\ K_2 (K_o ({}^F \theta_{eB}(nT) - \dot{q}_{s2}(nT))) \end{bmatrix} \quad (27)$$

여기서 $C\theta = \cos^F \theta_{Bz}(nT)$, $S\theta = \sin^F \theta_{Bz}(nT)$ 이며, 이득 K_1 , K_2 , K_p , K_o 의 원소는 기준궤적에 대한 과도응답이나 떨림을 없애고 빠른 로봇의 추적 응답을 갖기 위해 선택하게 되는 값으로 일반적으로 $K_1 = 2\sqrt{K_p}$ 에 준하는 범위내에서 구해지게 된다.

V. 모의실험 및 고찰

실시간에서 이동 로봇의 위치제어를 위하여 데드-레크오닝(Dead-Reckoning) 알고리즘을 사용하는데 데드-레크오닝(Dead-Reckoning)을 사용한 2-가지의 궤환제어 알고리즘은 그림 4, 5에서 구성하였다.

이 알고리즘에서의 기준궤적은 바다 좌표에 대한 이동 로봇 몸체의 위치 기준궤적으로 주어진다.

본 논문에서 제안한 위치, 방향 및 속도 궤환제어 알고리즘은 외란의 영향을 최소화하고 좀더 짧은 세팅 시간을 갖는데 주목적이 있다. 기존의 궤환제어 알고리즘과 본 논문에서 제안한 궤환 제어 알고리즘에 대한 모의실험 결과는 그림 6-18에서 보이며 모의실험을 위하여 사용된 샘플링 시간은 0.1초로 하였다.

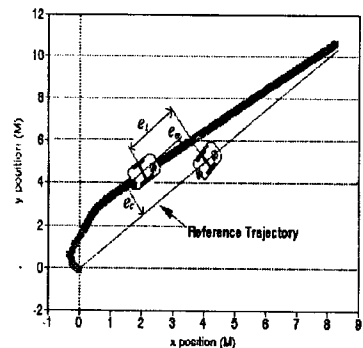


그림 6. 동작 오차의 분석
Fig. 6. Motion error Decomposition.

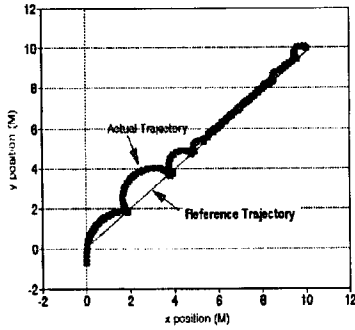


그림 7. 기존의 궤환 제어시스템에서 기준 궤적이 일직선일 경우에 K=50에 대한 위치궤적

Fig. 7. Conventional System :K=50

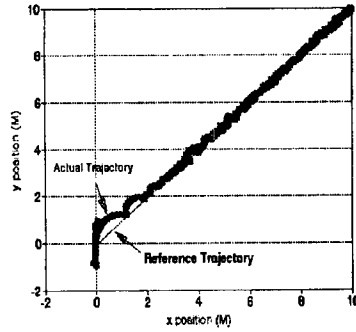


그림 8. 기존의 궤환 제어시스템에서 기준궤적이 일직선일 경우에 K=100에 대한 위치궤적

Fig. 8. Conventional System :K=100

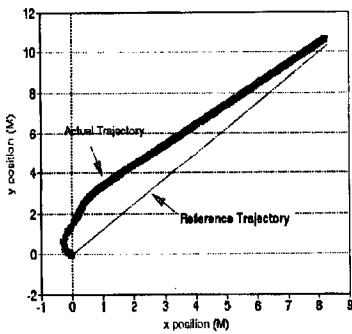


그림 9. 제안한 궤환제어시스템에서 기준궤적이 일직선일때 K₁=30, K₂=35, K_p=50, K_o=55에 대한 실제궤적

Fig. 9. Proposed System: (K₁=30, K₂=35, K_p=50, K_o=55).

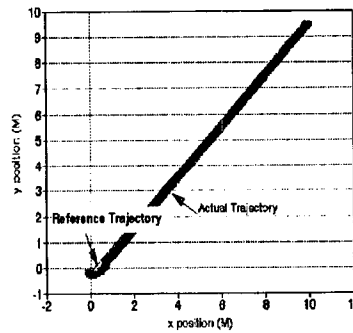


그림 10. 제안한 궤환제어시스템에서 기준궤적이 일직선일때 K₁=33, K₂=38, K_p=55, K_o=58에 대한 실제궤적

Fig. 10. Proposed System: (K₁=33, K₂=38, K_p=55, K_o=58).

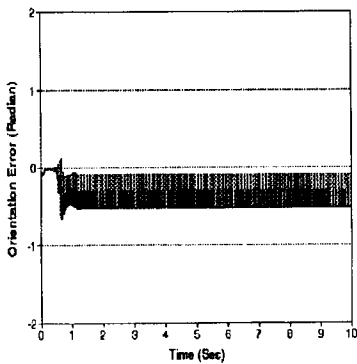


그림 11. 제안한 궤환제어시스템에서 기준궤적이 일직선일때 K₁=33, K₂=38, K_p=55, K_o=58에 대한 방향오차

Fig. 11. Proposed System Orientation Error : (K₁=33, K₂=38, K_p=55, K_o=58).

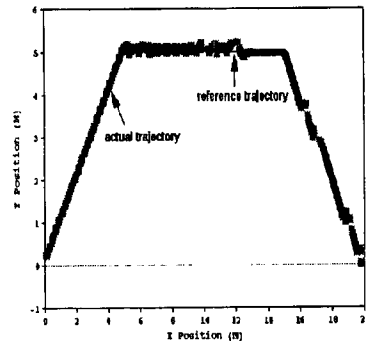


그림 12. 제안한 궤환제어시스템에서 기준궤적이 사다리꼴일때 K₁=33, K₂=38, K_p=55, K_o=58에 대한 실제궤적

Fig. 12. Proposed System: (K₁=33, K₂=38, K_p=55, K_o=58).

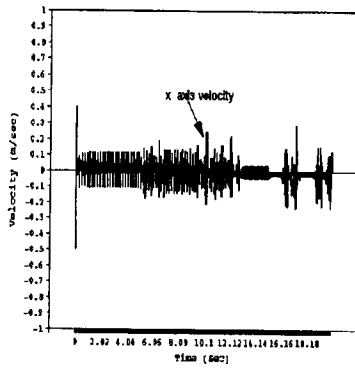


그림 13. 제안한 궤환제어시스템에서 기준궤적이 사다리꼴일 경우에 X축에 대한 속도궤적: ($K_1=33, K_2=38, K_p=55, K_o=58$)
 Fig. 13. Proposed System Actual velocity trajectory for X axis.

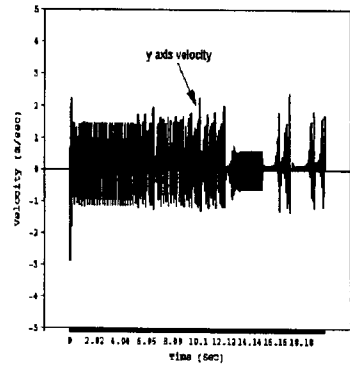


그림 14. 제안한 궤환제어시스템에서 기준궤적이 사다리꼴일 경우에 Y축에 대한 속도궤적: ($K_1=33, K_2=38, K_p=55, K_o=58$)
 Fig. 14. Proposed System Actual velocity trajectory for Y axis.

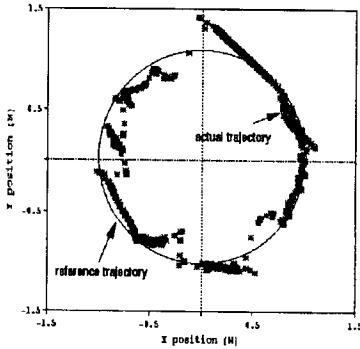


그림 15. 기존의 제어시스템에서 기준 궤적이 타원형일 경우에 $K=100$ 에 대한 실제 궤적
 Fig. 15. Conventional System : ($K=100$).

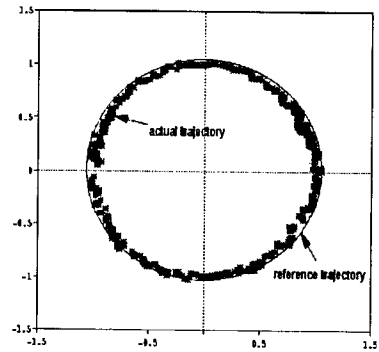


그림 16. 제안한 제어시스템에서 기준궤적이 타원형일 경우에 $K_1=33, K_2=37, K_p=56, K_o=58$ 에 대한 실제 궤적
 Fig. 16. Proposed System: ($K_1=33, K_2=37, K_p=56, K_o=58$).

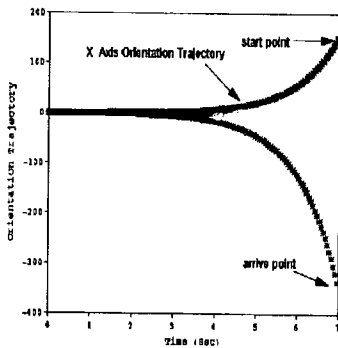


그림 17. 제안한 궤환제어시스템에서 기준궤적이 타원형일 경우에 X축에 대한 방향궤적
 Fig. 17. Proposed System Actual Orientation Trajectory: ($K_1=33, K_2=37, K_p=56, K_o=58$).

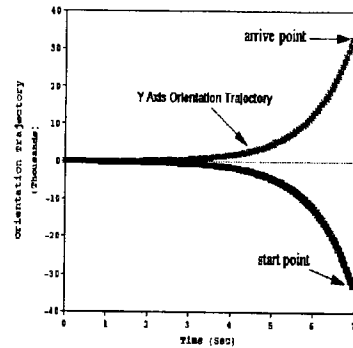


그림 18. 제안한 궤환제어시스템에서 기준궤적이 타원형일 경우에 Y축에 대한 방향 궤적
 Fig. 18. Proposed System Actual Orientation Trajectory: ($K_1=33, K_2=37, K_p=56, K_o=58$).

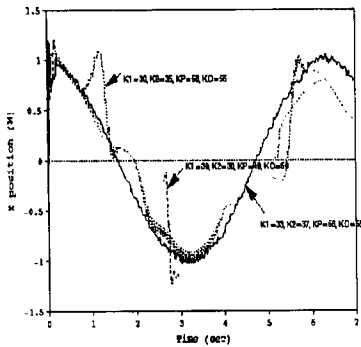


그림 19. 제안한 제어시스템에서 기준궤적이 타원형일경우에 각각의 이득값의 변화에 대한 X축의 위치궤적
Fig. 19. X-Axis position trajectory for Proposed System.

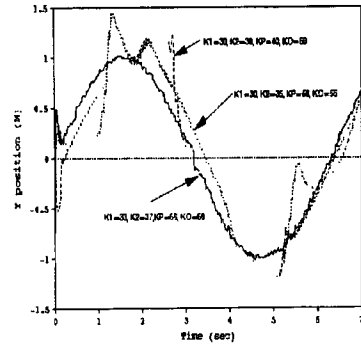


그림 20. 제안한 제어시스템에서 기준궤적이 타원형일경우에 각각의 이득값의 변화에 대한 Y축의 위치궤적
Fig. 20. Y-Axis position trajectory for Proposed System.

그림 6은 제안한 궤환제어 시스템에서 각각의 이득값이 $K_1=30, K_2=35, K_p=50, K_o=55$ 일때 그림 2에서의 동작 오차의 분석에 의하여 실제 궤적을 분석한 것이다. 그림에서 추적오차 e_c 와 실제와 기준 위치 사이의 거리 e_θ 는 이동 로봇의 동작의 정확도에는 크게 영향을 미치지 않고 e_θ 는 방향 오차로서 이동 로봇의 정확한 위치궤적의 추적에 큰 영향을 미친다.

그림 7-10은 기준궤적을 시간에 비례하는 일직선으로 설정하였을 경우에 두 궤환 제어 알고리즘의 각각의 궤환 이득행렬의 변화에 따른 기준 위치궤적과 실제 위치궤적을 보인것이고, 그림 11은 기준 궤적이 일직선 일경우에 제안한 제어 알고리즘에서 방향오차 궤적에 대한 실행결과를 나타내고있다. 이는 특정한 이득값에서 이동로봇은 일정한 범위내에서 지속적으로 방향오차를 갖으며 기준 위치궤적을 추적함을 할 수 있다. 그림 12-14은 제안한 궤환 제어 알고리즘에서 이득값 K_1, K_2, K_p, K_o 가 각각 33,38,55,58 일경우에 사다리꼴의 기준 궤적에 대한 실제 궤적과 x, y 축에 대한 각각의 속도궤적을 나타내고 있다. 그림 15-18은 기준 궤적이 타원형으로 설정된 경우 기존의 제어 알고리즘과 제안한 알고리즘에서의 실제궤적과 방향궤적을 나타내고 있다. 또한 그림 19-20은 기준궤적이 타원형일 경우 각각의 이득값의 변화에 따른 X,Y 축에서의 위치궤적을 서로 비교한 것이다.

기준궤적이 일직선으로 설정하였을 경우, 두 제어알고리즘에 대한 모의실험의 비교 결과, 위치와 방향을 하나의 구성원으로 취급하여 궤환하는 기존의 제어 알고리즘은 전반적으로 기준궤적에 대한 수렴은 $K=100$

에서 양호하나 실제궤적이 지속적으로 많은 떨림을 갖음을 알 수 있으며, 위치, 방향 및 구동 바퀴의 속도궤환을 갖는 제어알고리즘은 적절한 이득값 K_1, K_2, K_p, K_o 의 선택에 의하여 기존의 제어 알고리즘에 비하여 빠른 시간내에 수렴하며, 수렴후 거의 완벽하게 기준궤적을 추적함을 알 수 있다.

모의실험 결과를 통하여 이득행렬의 선택이 실제궤적에 민감한 반응을 보임을 알 수 있으며, 수행초기에 있어서의 이동 로봇의 실제궤적에 대한 떨림은 기구학적 모델링에서 시스템 매개변수의 부정확한 대입에 의한 미비와 초기치 오차에 의한 것으로 여겨진다.

VII. 결론

대부분의 산업 현장에서 자동화 산업의 활성화에 힘입어 연구대상으로 각광받고 있는 이동 로봇의 여러 종류중에서 특히, 4-바퀴 2-자유도를 갖는 차동 구동형 이동 로봇의 정확한 위치궤적의 추적을 위해, 동작 오차의 가장 큰 원인으로 대두되고 있는 방향오차를 최소화 하기 위하여 기구학을 기초로하는 궤환제어 알고리즘에 대하여 다루었다.

방향오차를 최소화를 위하여 2 가지의 궤환 제어알고리즘을 구성하였으며, 모의실험을 통하여 기구학 모델링과 본 논문에서 제안한 구동바퀴 위치, 방향 및 속도 궤환제어 알고리즘의 유효성을 입증하였다. 특히, 제안한 궤환 제어 알고리즘이 기존의 제어 알고리즘에 비하여 현저한 방향오차의 감소에 의한 빠르고 정확한 위치 궤적의 추적이 이루어짐을 알 수 있었다.

지금까지의 기구학을 기초로한 궤환 제어 알고리즘은 여러 오차의 원인 중에서 내부오차의 최소화에 중점을 두었으나 구동 바퀴의 감속, 가속 혹은 경로상의 문제등으로 인해 발생할 수 있는 바퀴의 미끄러움과 같은 외부오차에 대한 신중한 연구가 필요하며, 이를 위한 제어 알고리즘의 개발에 많은 연구를 하고자한다.

참 고 문 헌

- [1] P. Muir and C. Newman, "Kinematic Modelling of Wheeled Mobile Robots, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 4, No. 2, pp. 281-333, 1987.
- [2] YongOug Chung, ChongKug Park, "Kinematic Modeling for position feedback control of 4-wheeled 2-D.O.F mobile robot", *Proceeding of the international symposium on MIMR 95*. pp. 588-591. 1995.
- [3] S. K. Shha and J. Angeles, "Kinematics and Dynamics of Three-Wheeled 2-DOF AGV", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1572-1577, May. 1989.
- [4] Y. Zhao, "Theoretical and Experimental Studies of Mobile Robot Navigation", *Ph.D. Thesis, the University of Michigan*, 1991.
- [5] John J. Craig, "Introduction Robotics Mechanics & Control"
- [6] C. Samson and K. Ait-Abderrahim, "Feedback control of a nonholonomic wheeled cart in cartesian space" *Proc. 1991 Int. Conf. Robot Auto.*, Sacramento, CA, pp1136-1141, Apr. 1991.
- [7] C. Canudas De Wit and R. Roskam, "Path following of a 2-D.O.F wheeled mobile robot under path and input torque constraints", *Proc. Int. Conf. Robot Auto.*, Sacramento, CA, pp 1142-1147, Apr. 1991.
- [8] Yilin. Zhao and Spencer L. Bement, "Kinematic, Dynamics and Control of Wheeled Mobile Robots", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.91-96, May. 1992.
- [9] Thomas and Hugh F.Durrant, "Kinematics for Modular Wheeled Mobile Robots.", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1130-1135, Apr. 1991.
- [10] Barry Steer, "Trajectory Planning for a Mobile Robot", *Int.J. Robotics Research*, Vol.8, no.5, pp. 3-14, October. 1989.
- [11] A. Meystel, "Autonomous Mobile Robots ", World Scientific Publishing.
- [12] P. N. Sheth and J. J. Uicker, "A generalized symbolic notation for mechatronics", *Journal of Engineering for Industrial*, Vol.93, No. 7019, pp. 102-112, 1971.
- [13] Plamen P. Petrov, "Robust trajectory tracking algorithms for a wheeled mobile robot", *IECON '91*, pp. 1071-1074, 1991.
- [14] Yutaka Kanayama, Yoshihiko Kimura, "A Stable tracking control method for an autonomous mobile robot", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 384-389, 1990.

저 자 소 개



鄭容旭(正會員)

1965년 12월 18일생. 1988년 2월 경희대학교 공과대 전자공학과 졸업(공학사). 1992년 2월 경희대학교 대학원 전자공학과 공학석사 학위취득. 1995년 8월 경희대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료

1996년 3월 ~ 현재 진주 전문대학 자동차전자과 전임강사. 관심분야는 이동 로봇 제어, 적응제어, 퍼지 제어 시스템 등임

朴鍾國(正會員)

第 34卷 C編 第 8號 參照

현재 경희대학교 전자공학과 교수.
관심분야는 로보틱스, 퍼지제어, 공장자동화 등임