

論文97-34S-1-7

이동 로봇의 동적 제어 구현

(Implementation of a Dynamic Control for a Mobile Robot)

李章明*, 金容태**

(Lee Jang Myung and Kim Yong Tae)

요 약

본 논문에서는 이동 로봇의 동역학 모델을 구하고 이를 기반으로 동적 제어를 한 결과를 PD제어 결과와 비교하여 동적 제어의 우수성을 보여준다. 동역학 모델은 라그랑제 방정식을 사용하여 직교좌표계상에서 구하였다. 구해진 동역학 방정식을 기반으로 계산 토크법을 사용하여 본 이동 로봇의 동적 제어를 실현하였다. 시변 비선형 마찰 항들은 이 동역학 모델에 포함하지 않고 대신에 이 항들은 외란으로 간주하였다. 이러한 외란 및 모델링 오차는 PD 알고리즘을 사용한 외부제어루프에 의해 보상되어졌다. 이 동적 모델의 타당성 및 제어 알고리즘의 타당성은 실험적으로 검증되었다. 동적 제어 알고리즘은 비선형 마찰 등의 외란이 존재함에도 우수한 속도계적 추종특성을 나타내었으며, 그 우수성은 종래의 PD 알고리즘을 사용한 실험과 비교하여 명백함을 보였다.

Abstract

In this paper, a method of dynamic modeling and a dynamic control of a mobile robot are presented to show the superiority of the dynamic control comparing to the PD control. This dynamic model is derived from the cartesian coordinates using Lagrange equations. Based upon the derived dynamic model, we implemented the dynamic control of the mobile robot using the computed torque method. Time varying non-linear friction terms are not incorporated in this dynamic model. Instead, those are considered as disturbances. This uncertainty in dynamic model of mobile robot is compensated by the outer loop controller using PD algorithm. The validity of this model and the control algorithm are confirmed through the experiments, where the dynamic control algorithm demonstrated robust velocity tracking performance against the unmodeled non-linear frictions. The superiority of this algorithm is demonstrated by comparing to classical PD control algorithm.

I. 서 론

종래의 이동 로봇의 이용은 단순히 어떤 물체를 이동시켜주는 의미만을 강조하였기에 주어진 경로를 가능한 충돌 없이 따라가는 일에 초점을 맞추어 연구

해왔다^{1,2)}. 이동 로봇을 단순히 그 이름이 뜻하는 바 대로 물체의 이동에만 사용하는 것이 아니라, 이동된 연후에 다른 작업을 위하여 활용되어질 수 있다면 이동 로봇의 활용도는 더욱 증가하게 될 것이다. 최근의 제품생산은 단일 품종의 대량생산보다는 소비자의 기호에 따른 다양한 제품의 소량 생산체제로 바뀌고 있다. 이러한, 다양한 제품의 생산에서 기존의 자동화 설비는 작업환경에 적응할 수 있는 범용성이 상실되었으며, 단순한 반복형 로봇은 환경의 변화에 적절하게 대처할 수 있는 처치능력을 갖지 못하고 그 적용범위도 매우 한정적이다. 이러한 생산시스템의 유연성

* 正會員, 釜山大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Pusan National University)

** 正會員, LG電子 生活 시스템 硏究員
(LG Elec. Inc. Living System Research Lab.)

接受日字: 1996年3月25日, 수정완료일: 1997年1月7日

과 생산성 향상을 위한 방안으로 이동 로봇과 작업 로봇의 결합에 의해, 작업공간의 제약을 받지 않고 다양한 일들을 처리할 수 있는 잉여로봇 시스템의 개발이 제안되어졌다^[3]. 이러한, 이동 로봇과 작업 로봇의 결합에 의한 지능형 잉여로봇의 효율적인 활용을 위하여서는 이동 로봇과 작업 로봇의 정밀 제어가 다양한 센서 신호들의 사용과 더불어 행해져야 할 것이다. 이동 로봇의 끝단에 작업 로봇을 결합한 구성으로 이루어진 잉여로봇에서 이동 로봇의 정밀제어가 행해지지 않으면 작업 로봇은 어떠한 정밀한 작업도 행할 수 없다^[9].

본 연구에서는 이러한 지능형 이동/작업용 로봇시스템의 구성을 위하여 필연적으로 요구되어지는 이동 로봇의 정밀제어를 이동 로봇의 동적 제어 알고리즘을 활용하여 실현하고자 한다. 최근에 이동 로봇의 동적 모델링에 대한 연구가 진행되고 있으며^[6], 동적 제어에 대한 연구도 진행되고 있으나^[4] 실험을 통한 결과는 거의 주어지지 않고 있다. 로봇의 제어에 계산 토크법과 PD 제어를 결합한 제어를 적용하면 궤적 제어에서 안정된 특성을 가질 수 있다는 것은 위치제어에서 증명한 기법을 적용하여 Paden^[10]이 증명하고 있다. 본 연구에서는 이러한 이론적 연구 결과를 이동 로봇의 동적 제어에 적용하는 것이다.

본 논문은 서론을 포함하여 일곱 개의 절로 구성되며, 2 절에서는 이동 로봇의 기구학 해석에 대해 설명하며, 3 절에서는 이동 로봇의 동적 제어를 위한 동적 모델링이 주어져 있으며, 4 절에서는 이동 로봇의 동적 제어 알고리즘의 도출과정을 설명하며, 5 절에서는 본 연구에 사용된 제어기 시스템을 소개하고, 6 절에서는 실험결과를 보여주고 7 절에서는 본 연구의 결론과 향후 연구과제를 토의한다.

II. 이동 로봇의 기구학 해석

본 연구에 사용된 이동 로봇은 두 개의 독립적으로 구동되는 바퀴와 하나의 무동력 바퀴가 달려있는 구조이다 (그림 1). 또한, 작업 로봇의 기저 (Base)가 3 자유도의 위치이동 능력을 갖도록 하기 위하여 Z축 방향으로 선형 이동이 가능하도록 되어있다. 본 논문에서는 이동 로봇의 X-Y평면상에서의 운동에 초점을 맞추어 설명하기에 Z축방향의 볼 스크루우 (Ball Screw)를 사용한 운동에 대하여서는 기구학 해석 및

동적 제어에서 고려하지 않는다. 실제로 Z축 방향의 선형운동은 X-Y평면상의 운동과 독립적으로 제어될 수 있고 동적인 영향이 서로 미치지 않기 때문에 작업 로봇과 결합시키지 않은 상태에서는 Z축 운동을 0으로 가정하고 해석할 수 있다. 그림 1에서 좌표계 (X0, Y0, Z0)는 이동 로봇의 절대 위치를 지정하는 기준 좌표계이다. 그리고 두개의 구동바퀴의 중앙의 점 M에 이동 로봇의 몸체 좌표계 (X, Y, Z)를 설정한다. 이동 로봇은 X-Y평면상에서 이동하므로 이동 로봇의 위치와 방향을 표시하려면 두개의 위치변수 X,Y와 방향변수 θ 가 필요하다. 두 구동 바퀴에 각각 인크리멘탈 엔코더만을 사용하므로 이동 로봇은 직접 기준좌표계의 절대위치를 추종할 수는 없고 기준 좌표계로부터 몸체 좌표계까지의 상대좌표로 제어된다. 따라서, 이 기준좌표계로 표시된 좌표값으로부터 현 몸체 좌표계의 값에 따라 오른쪽과 왼쪽 바퀴의 대응하는 회전량 q_r 과 q_l 로 각각 변환한다. 이 과정은 이동 로봇이 Non-Holonomic시스템이기때 역기구학에 의해 직접적으로 q_r, q_l 을 구할 수 없다.

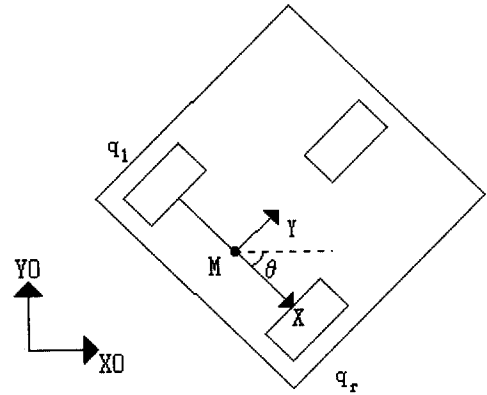


그림 1. 이동 로봇의 좌표계
Fig. 1. Coordinates of a mobile robot.

외부에 시각 센서를 부착하지 않고 이동 로봇의 제어를 하는 경우에 일반적으로 다음의 두 가지 조건이 만족된다는 가정을 한다. 이 조건들은 순수구름조건 (Pure Rolling Condition)과 미끌림 없음 조건 (Non Slipping Condition)이다^[4]. 순수구름조건은 이동 로봇의 바퀴와 접촉면 사이의 순간적 이동방향으로의 상대속도가 0이라는 조건이고 미끌림 없음 조건은 이동 로봇의 바퀴와 지면과 접촉면 사이에서 이동 방향의 수직방향 순간적 상대속도가 0이라는 조건이다.

순수구름조건을 각 바퀴에 대해 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$-\cos \theta \dot{x} - \sin \theta \dot{y} - L \dot{\theta} + R \dot{q}_r = 0 \quad (1)$$

$$-\cos \theta \dot{x} - \sin \theta \dot{y} + L \dot{\theta} + R \dot{q}_l = 0 \quad (2)$$

위의 식에서 R은 같은 크기의 왼쪽 및 오른쪽 바퀴의 반지름을, \dot{q}_r 은 오른쪽바퀴의 운동을, \dot{q}_l 은 왼쪽바퀴의 운동을 나타내고, L은 바퀴와 몸체좌표계의 원점 M사이의 거리를 나타낸다.

또한, 미끌림 없음 조건은 수식으로 다음과 같이 표시된다.

$$-\sin \theta \dot{x} + \cos \theta \dot{y} = 0 \quad (3)$$

위의 식(1), (2), (3)으로부터 바퀴운동과 직교좌표계의 운동관계는 자코비안 행렬에 의해 다음과 같은 관계식으로 표시된다.

$$\dot{X} = J \dot{q} \quad (4)$$

식(4)에서 $\dot{X} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta}]^T$, $\dot{q} = [\dot{q}_l \ \dot{q}_r]^T$ 이며 자코비안 행렬 $J_{3 \times 2}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$J_{3 \times 2} \triangleq \begin{bmatrix} \frac{R}{2} \cos \theta & \frac{R}{2} \cos \theta \\ \frac{R}{2} \sin \theta & \frac{R}{2} \sin \theta \\ -\frac{R}{2L} & \frac{R}{2L} \end{bmatrix} \quad (5)$$

식(5)에서 자코비안의 역 행렬에 의해 원하는 직교좌표계상의 값으로 추종하기 위한 바퀴운동의 값들을 직접 구할 수 없다. 이는 이동 로봇의 직교 좌표계상의 운동이 \dot{q}_r 및 \dot{q}_l 에 의해서만 기술되는 것이 아니고 θ 의 값에 따라 제약을 받고있기 때문이다. 이로 인하여 이동 로봇의 궤적 계획은 일반적으로 국부적인 편차를 이용하여 최소화방법^[5]을 사용하여 실현한다. 최소화방법을 사용하는 경우, 자코비안 행렬에 변수로 들어있는 θ 의 값을 먼저 구해야 하므로 식(4)를 적분하여 θ 를 q_r 및 q_l 의 함수로 표시하면 다음의 관계식을 구할 수 있다.

$$\theta = \theta_0 + \frac{R}{2L} (q_r - q_l) \quad (6)$$

식(6)에서 주어진 θ_0 에서 출발하여 Δq_r 및 Δq_l 을 지속적으로 대입하여 특정 순간의 θ 의 값을 구할 수 있다. 본 연구에서는 궤적계획은 이미 수행된 상황에서

제어에 초점을 두고 있으므로 궤적계획에 대한 고찰은 피하고 일반적으로 사용되는 최소화방법에 의한 결과를 사용한다.

III. 동적 모델링

이동 로봇의 정밀제어를 위하여 이동 로봇의 동적 모델링이 필요하나, 현재까지 이동 로봇의 동적 제어 기법에 대한 논의가 미약하였던 것은 이동 로봇의 동적 모델링이 용이하지 않고 또한 동특성이 바퀴와 접촉면의 상태에 의존하는 특성이 크기 때문이었다. 최근 강인한 제어 기법의 연구진행과 더불어 정밀 제어의 필요성이 부각되어짐에 따라 이동 로봇의 동적 모델링이 연구되어지고 있다^[6]. 본 연구에서 사용된 이동 로봇은 자체 설계/제작된 것으로 동적 모델링이 간단하게 될 수 있다. 그림 2에서는 Z축으로 이동하는 판 부분 (작업 로봇이 놓이는 부분)을 제외한 이동 로봇 형상을 보여준다. 여기서 제외된 판 부분은 그 운동 방향이 X-Y평면상의 운동과 직교(Orthogonal)하므로 X-Y평면 운동에 대해서는 이동 로봇의 중심에 고정적으로 첨가된 질량으로 가정할 수 있으므로 무시한다.

1. 도심

본 연구에 사용한 이동 로봇은 그림 2에서 보는 바와 같이 원통과 평판으로 구성된 복합 구조물의 형태를 가진다. 그림 2에서 원통으로 표시된 것들은 모터를 나타낸다. 이동 로봇의 바퀴는 그 크기가 작고 질량 또한 몸체에 비해 작아 그 동적 특성이 이동 로봇의 제어에 미미한 영향을 미치므로 무시할 수 있다고 가정한다. 그리고 모터는 밀도가 균일한 원통으로 가정한다.

그림 2와 같이 여러 물체가 결합된 형상의 이니셔 행렬 (Inertia Matrix)를 구하기 위한 도심(Centroid)은 다음과 같이 정의된다^[6].

$$\bar{X}W = \sum_i \bar{x} m_i \quad (7-a)$$

$$\bar{Y}W = \sum_i \bar{y} m_i \quad (7-b)$$

$$\bar{Z}W = \sum_i \bar{z} m_i \quad (7-c)$$

앞의 식(7)에서 $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ 는 복합구조물의 도심을, $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 는 각 구성 구조물의 도심을, W는 복합구조물 전체질량을, m_i 는 각 구성 구조물의 질량을 나타낸다.

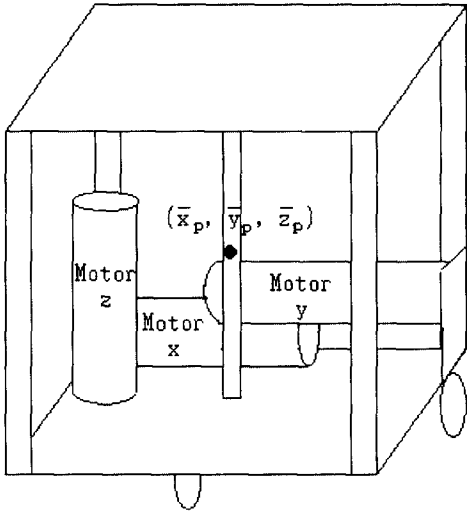


그림 2. 이동 로봇의 구조
Fig. 2. Structure of a mobile robot.

이동 로봇의 도심을 정의하기 위한 좌표점들은 그림 1의 몸체 좌표계를 기준으로 그 원점인 점 M을 (0, 0, 0)으로 하여 이에 대한 오프셋(Offset)값으로 나타낸 것이다. 그림 2에서 보듯이 모터부분을 제외하면 이동 로봇의 구조는 대칭으로 만들어져 있으므로, 이 모터를 제외한 부분의 도심은 구조적 중심점인 $(\bar{x}_p, \bar{y}_p, \bar{z}_p)$ 에 위치하게 된다. 3개의 모터(모터 x, y 및 z)는 동일한 것이므로, 모터를 포함한 이동 로봇의 도심은 다음 식으로 구해진다.

$$\bar{X} = \frac{\bar{x}_x m + \bar{x}_y m + \bar{x}_z m + \bar{x}_p (W - 3m)}{W} \quad (8-a)$$

$$\bar{Y} = \frac{\bar{y}_x m + \bar{y}_y m + \bar{y}_z m + \bar{y}_p (W - 3m)}{W} \quad (8-b)$$

$$\bar{Z} = \frac{\bar{z}_x m + \bar{z}_y m + \bar{z}_z m + \bar{z}_p (W - 3m)}{W} \quad (8-c)$$

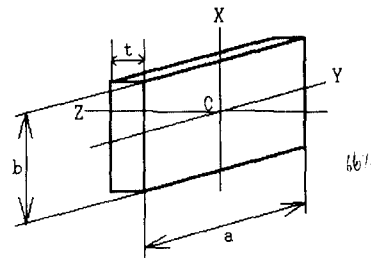
위의 식(8)에서 $(\bar{x}_x, \bar{y}_x, \bar{z}_x)$, $(\bar{x}_y, \bar{y}_y, \bar{z}_y)$, $(\bar{x}_z, \bar{y}_z, \bar{z}_z)$ 는 각각 왼쪽, 오른쪽, Z축 구동을 위한 모터의 도심의 좌표값을 나타내고, $(\bar{x}_p, \bar{y}_p, \bar{z}_p)$ 는 모터를 제외한 판형의 구조물의 도심을 나타내고, m은 이 3개의 모터의 질량을 각각 나타낸 것이고, W는 구조물 전체의 질량을 나타낸다.

2. 이너시어 모멘트

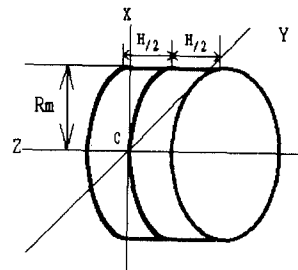
회전 운동시 운동에너지를 구하기 위해 이동 로봇의 이너시어 모멘트를 구한다. 복합 구조물의 경우 각

구성체의 도심에서의 이너시어(Inertia)를 복합 구조물의 회전축에 대한 값으로 Parallel Axis Theorem^[7]을 사용하여 보정해주고 그 보정된 값들을 더함으로써 복합 구조물의 이너시어를 구할 수 있다.

이동 로봇은 Z축을 중심으로 회전하기 때문에 (X, Y 축 방향의 회전 운동은 평면운동으로 0으로 간주한다.) 각 구성물의 Z축 이너시어성분만을 이동 로봇의 구성요소인 평판과 원통형(모터)물체에 대해 구하면 다음과 같다.



(a) 평판
(a) Plate



(b) 원통(모터)
(b) Cylinder

그림 3. 평판 및 원통구조도
Fig. 3. Structures of a plate and a cylinder.

그림 3-a와 같은 평판의 z 축 방향 이너시어 모멘트 $\bar{I}_{p,z}$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \bar{I}_{p,z} &= \rho \int (x^2 + y^2) dm \\ &= \rho \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} (x^2 + y^2) dx dy dz \\ &= \frac{1}{12} W_p (a^2 + b^2) \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)에서 평판 질량은 $W_p = \rho tab$ 로 구해지고 ρ 는 재질의 밀도를 t는 두께를 나타낸다.

그림 3-b와 같은 원통구조의 이너시어 모멘트는 다

음과 같이 구해진다. 그림 2에서 모터 x,y는 그림 3-b에서 보듯이 옆으로 누운 원통이고 모터 z는 바로 서 있는 원통이다. 따라서, 모터 x,y의 z축 방향 이너시어 $\bar{I}_{x,z}$ 및 $\bar{I}_{y,z}$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}\bar{I}_{x,z} &= \bar{I}_{y,z} \\ &= \rho \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^{R_m} (y^2 + z^2) r dr d\phi dz \\ &= \frac{1}{4} m R_m^2 + \frac{m}{12} H^2\end{aligned}\quad (10)$$

식(10)에서 모터의 질량, $m = \rho \pi R_m^2 H$ 이고 ρ 는 재료의 밀도를 나타낸다. 또한, 모터 z의 z축 방향 이너시어 $\bar{I}_{z,z}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\bar{I}_{z,z} &= \rho \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^{R_m} (x^2 + y^2) r dr d\phi dz \\ &= \frac{1}{2} m R_m^2\end{aligned}\quad (11)$$

이상에서 각 구성성분들의 z축의 이너시어 값을 그 구성성분들의 도심에서 구하였다. 이제, 각 구성요소들의 이너시어를 이동 로봇의 도심에서의 이너시어로 Parallel Axis Theorem을 적용하여 변환하면, 이동 로봇의 z방향의 전체 이너시어 I_z 는 다음과 같이 구해진다.

$$I_z = \bar{I}_x + \bar{I}_y + \bar{I}_z + \bar{I}_p \quad (12)$$

여기서, $\bar{I}_x = \bar{I}_{x,z} + (x_x^2 + y_x^2)m$ 이고 모터 x의 z축 방향 이너시어를 나타내고, $\bar{I}_y = \bar{I}_{y,z} + (x_y^2 + y_y^2)m$ 이고 모터 y의 z축 방향 이너시어를 나타내며, $\bar{I}_z = \bar{I}_{z,z} + (x_z^2 + y_z^2)m$ 이고 모터 z의 z축 방향 이너시어를 나타내며, $\bar{I}_p = 2\{\bar{I}_{p,z} + (x_p^2 + y_p^2)W_p\}$ 는 두 개의 동일한 평판의 z축 방향 이너시어의 합을 나타내며 (x_x, y_x) , (x_y, y_y) , (x_z, y_z) 및 (x_p, y_p) 는 앞절에서 구한 이동 로봇 전체의 도심 $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ 를 원점으로 하여 모터 x, 모터 y, 모터 z 및 평판구조물 각각의 도심의 좌표값을 나타낸다.

다음절에서 사용될 이동 로봇의 이너시어 행렬, I 는 $I = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}$ 로 표시되며, 본 연구에서는 I_x, I_y 의 값은 사용되지 않으므로 $I_x = I_y = 0$ 으로 가정한다.

3. 운동에너지

다음절에서 라그랑제 운동방정식을 사용하여 이동

로봇의 동역학 방정식을 구하기 위하여 본절에서 운동에너지를 우선 구한다. 이동 로봇의 운동에너지는 직교좌표계상에서의 선형운동과 회전운동의 두 가지 요소의 결합으로 구해지므로 다음과 같이 표시된다.

$$E_k = \frac{1}{2} W v^2 + \frac{1}{2} \omega^T I \omega \quad (13)$$

위에서, $\omega^T = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]$ 이고 $I = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}$ 이며 v 는 이동 로봇의 도심의 선형운동속도를 W 는 이동 로봇의 전체의 질량을 나타낸다.

$v^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2$ 의 관계를 사용하고, 식(6)의 양변을 미분하여 $\omega (= \dot{\theta})$ 에 대해 표시하여 식(13)에 대입하면 E_k 는 다음과 같이 표시된다.

$$E_k = \frac{1}{2} W (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} I_z \left\{ \frac{R_m}{2L} (\dot{q}_r - \dot{q}_l) \right\}^2 \quad (14)$$

식(14)에서 식(4)를 사용하여 \dot{x}^2 와 \dot{y}^2 를 소거하면 운동에너지는 다음과 같이 다시 표시된다.

$$E_k = \frac{R_m^2}{8} \left(W + \frac{I_z}{L^2} \right) (\dot{q}_r^2 + \dot{q}_l^2) + \frac{R_m^2}{4} \left(W - \frac{I_z}{L^2} \right) \dot{q}_r \dot{q}_l \quad (15)$$

식(15)에서 L 은 두바퀴의 가운데 설정된 몸체 좌표계의 원점과 바퀴사이의 거리를 나타낸다.

4. 동적 방정식

시스템 동적 특성을 나타내기 위한 동적 방정식을 라그랑제 방정식을 사용하여 구하기 위해 라그랑지안, \mathcal{L} 은 다음과 같이 정의 한다.

$$\mathcal{L} = E_k - U \quad (16)$$

여기서 U 는 위치 에너지를 나타낸다.

라그랑제 운동방정식에 위의 라그랑지안, \mathcal{L} 을 대입하여 양 바퀴에 필요로 하는 토크 τ 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} \\ &= \frac{d}{dt} \frac{\partial (E_k - U)}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial (E_k - U)}{\partial q}\end{aligned}\quad (17)$$

식(17)에서 $\tau = [\tau_r \ \tau_l]^T$, $q = [q_r \ q_l]^T$ 이다.

이동 로봇이 평면상에서 운동하는 것으로 가정하면, 위치 에너지 U 는 시간이나 q, \dot{q} 에 따른 변화량이

없으므로 식(17)은 다음과 같이 간단히 표시된다.

$$\tau = \frac{d}{dt} \frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial E_k}{\partial q} \quad (18)$$

식(15)를 식(18)에 대입하여 정리하면 이동 로봇의 운동방정식은

$$\tau = M \ddot{q} \quad (19)$$

으로 표시된다.

$$\text{식 (19)에서 } \tau \triangleq \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix},$$

$$M = \begin{bmatrix} \frac{R_m^2}{4} (W + \frac{I_z}{L^2}) & \frac{R_m^2}{4} (W - \frac{I_z}{L^2}) \\ \frac{R_m^2}{4} (W - \frac{I_z}{L^2}) & \frac{R_m^2}{4} (W + \frac{I_z}{L^2}) \end{bmatrix} \ddot{q} = \begin{bmatrix} \ddot{q}_r \\ \ddot{q}_l \end{bmatrix} \text{이다.}$$

IV. 동적 제어 알고리즘

이동 로봇트는 상당히 큰 질량을 갖고 있으므로 (이 는 작업 로봇트가 연결되는 경우 더욱 증가한다.), 기존의 고정 베이스 로봇트와는 달리 천천히 이동하더라도 그 동특성이 제어에 상당한 영향을 미치게 된다. 따라서, 앞에서 유도된 동적 모델링과 D.C 모터의 동적 모델을 사용하여 주어진 운동을 위하여 요구되는 토크를 계산에 의해 피드 포워드 (Feedforward)시켜주어 이동적 모델이 완벽하다는 가정하에서 비선형 항들이 소거된 선형시스템에 대해 PID 제어를 실현한다.

앞에서 구한 이동 로봇트의 동역학 방정식에 모터의 동특성을 포함하여 전체 동역학 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$(J_m \gamma^{-1} + M) \ddot{q} + B_m \gamma^{-1} \dot{q} = \tau_m \quad (20)$$

여기서 J_m 은 모터의 이너시어 행렬로 $J_m \triangleq \begin{bmatrix} J_{mr} & 0 \\ 0 & J_{ml} \end{bmatrix}$ 이고 B_m 은 모터의 비스코우스 마찰계수로 $B_m \triangleq \begin{bmatrix} B_{mr} & 0 \\ 0 & B_{ml} \end{bmatrix}$ 이고 $\gamma \triangleq \begin{bmatrix} \gamma_r & 0 \\ 0 & \gamma_l \end{bmatrix}$ 로 기어비를 나타내며 $\tau_m \triangleq \begin{bmatrix} \tau_{mr} \\ \tau_{ml} \end{bmatrix}$ 로 실제 모터에 가해지는 토크를 나타내고, 아래첨자 r 및 l 은 각각 오른쪽 및 왼쪽 바퀴 구동용 모터의 의미한다.

바퀴구동을 위해 식(20)을 바퀴구동용 모터의 각도 θ_m 의 변수로 표시하면 $q = \gamma \theta_m$ 의 관계식에 의해

$$(J_m + M\gamma) \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m = \tau_m \quad (21)$$

의 관계식이 유도된다.

식(20)과 (21)을 사용하여 계산토크 (Computed Torque)방법⁽⁷⁾과 PID 제어를 결합한 본 제어방법의 실현을 그림 4의 블록선도로 보여준다.

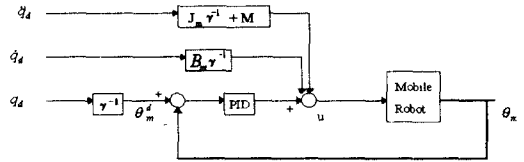


그림 4. 동적 제어 알고리즘의 블록선도

Fig. 4. Block diagram of a dynamic control algorithm.

그림 4에서 $\ddot{q}_d, \dot{q}_d, q_d$ 는 계획 계획의 결과로 주어진 각 바퀴의 회전가속도, 속도 및 위치를 각각 나타내고, θ_m 은 모터의 실제각도를 나타내고 θ_m^d 은 원하는 지령 값을 의미한다. 그림 4의 블록선도로 표시된 제어 알고리즘의 제어입력 u 를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$u = (J_m \gamma^{-1} + M) \ddot{q}_d + B_m \gamma^{-1} \dot{q}_d + K_P (\theta_m^d - \theta_m) + K_D \frac{d}{dt} (\theta_m^d - \theta_m) + K_I \int_0^t (\theta_m^d - \theta_m) dt \quad (22)$$

식(22)에서 K_P, K_D 및 K_I 는 PID 제어의 제어상수들이다.

식(20)와 (22)에서 $u = \tau_m$ 이고 \ddot{q} 와 \ddot{q}_d , \dot{q} 와 \dot{q}_d 가 같다는 가정 하에서 시스템의 특성 방정식은 $K_D S^2 + K_P S + K_I = 0$ 의 2차식의 모양으로 변환되어서 이동 로봇트의 출력특성의 설계를 PID 이득 값들의 조정에 의해 안정되게 하고 원하는 응답특성이 가능하게 하였다. 동적 모델링의 오차 및 실제 가속도, 속도 오차가 발생 시에도 우수한 제어특성을 갖도록 하는 강인한 제어에 대한 연구는 진행 중이며 PID 제어가 시변 비선형 특성을 갖는 이동 로봇트의 점근적 안정을 보장한다는 이론^[10]에 기반을 두고 제어 알고리즘을 실현하였다.

V. 제어 시스템

이동 로봇트의 제어기는 3축을 독립적으로 제어하기 위한 관절제어기 #1~#3과 궤적계획을 수행하고 두 제어기 간의 제어변수를 교환하기 위한 주 제어기 (Host PC) 및 인터페이스 카드로 구성되며 그 구조는 그림 5에 보인다.

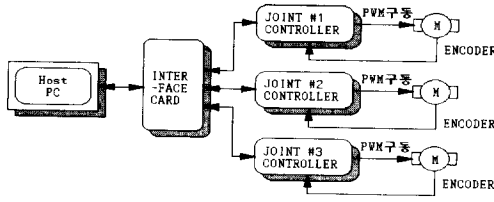


그림 5. 이동 로봇 제어기의 블록도
Fig. 5. Block diagram of a mobile robot controller.

주 제어기는 주어진 이동경로에 대한 궤적계획을 최소 자승법에 따라 수행하고 그 결과의 값들 ($a_d, \dot{a}_d, \ddot{a}_d$)을 관절 제어기 #1~#3으로 일정시간 단위로 전송하여 주고 실제의 값들 (θ_m)을 전송 받고 제어기들 사이의 필요한 파라미터 값들을 전송한다. 관절제어기는 인텔사의 16비트 마이크로 콘트롤러인 8097BH를 사용하여 설계하였으며 주 제어기로 IBM PC 486을 사용하였다. 모터 드라이버는 마이크로 콘트롤러 (8097BH)의 PWM 출력을 사용하여 그림 6과 같이 설계하였다.

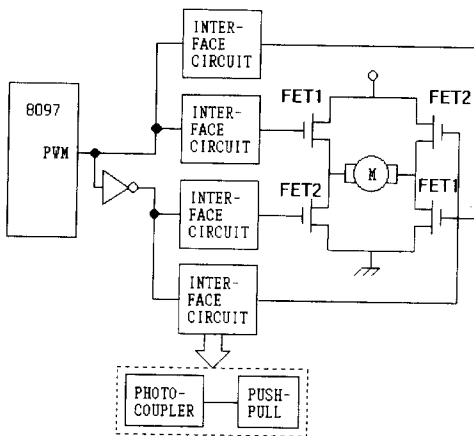


그림 6. PWM 모터 드라이브의 블록도
Fig. 6. Block diagram of a PWM motor drive.

그림 6의 모터 드라이버는 4개의 FET를 사용하여 H-브리지형으로 구성하였으며, FET1과 FET2에 반대가 되는 신호를 넣어줌으로써 모터를 정/역회전시키게 된다. 모터의 인덕턴스 성분 때문에 FET가 ON되었을 때 흐르던 전류가 FET OFF후 흐를 곳이 없으

면 FET를 파괴하는 경우가 있는데 이를 방지하기 위해 Free-Wheeling 다이오드가 FET들 양단에 사용된다. 이 회로에서 사용한 FET인 IRF 530은 내부에 Free-Wheeling 다이오드가 부착되어 있으나 외부에 역회복 시간이 짧은 Shottky Diode (Free-Wheeling 다이오드)를 부가적으로 사용하였다. 인터페이스 회로에는 포토 커플러 (Photo-Coupler)를 사용하여 모터 구동 전원의 잡음이 제어기에 미치는 영향을 차단하도록 설계하였다.

VI. 실험

본 실험에서 사용한 이동 로봇이 사진 1에 주어져 있다.

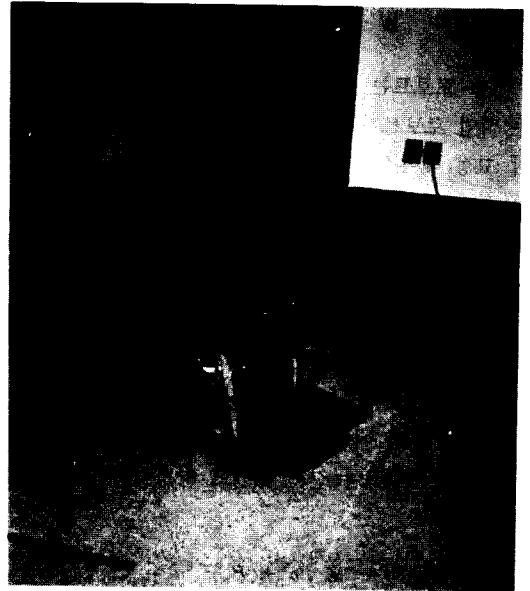


사진 1. 본 실험용 이동 로봇
Pic. 1. Mobile robot for this experiment.

본 연구에서는 3자유도를 가진 이동 로봇의 제어에서 Z축 운동은 그 동적 특성이 X-Y축의 운동과 독립적이므로 X-Y축의 제어만을 실현하여 본 연구에서 얻어진 동역학 모델과 그에 따른 동적 제어 알고리즘의 타당성을 검증하고자 한다. 본 연구에 사용된 모터 및 이동 로봇의 동적 파라미터는 다음과 같다.

$$J_{mr}, J_{ml} = 0.2 \times 10^{-3} [\text{Kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}^2]$$

$$B_{mr}, B_{ml} = 0.2 [\text{Kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}]$$

$$\gamma_r, \gamma_t = \frac{1}{0.0322}$$

$$\begin{aligned}
 m &= 2.1[Kg] \\
 W_p &= 7.2[Kg] \\
 W &= 3*m+2*W_p = 20.7[Kg]
 \end{aligned}$$

앞에서 J_m 은 모터의 이너시어와 기어의 이너시어를 합한 값이며, B_m 은 마찰계수, γ 는 기어비, W 는 이동로봇의 전체 무게, m 은 모터의 질량, W_p 는 평판의 무게를 의미한다.

실험에서 사용된 궤적은 미끌림등의 비선형요소를 최소화하기 위하여 직선운동으로 한정하였으며 궤적계획은 LSPB (Linear Segment with Parabolic Blends)^[8]를 사용하여 입력 경로를 구하였다. 즉, kT 로 표시되는 시간 구간을, 0에서 t_b 까지는 등가속 운동구간 t_b 에서 t_f-t_b 까지는 등속운동구간, t_f-t_b 에서 t_f 까지는 등감속운동으로 분할한다. 이에 따라 순간적으로 주어지는 원하는 바퀴의 위치 값들은 다음과 같이 정리된다.

- $0 \leq kT \leq t_b$ 구간 : $q_d(kT) = \frac{acc}{2} * (kT)^2$
- $t_b < kT \leq t_f - t_b$ 구간 :

$$q_d(kT) = vel * (kT) - \frac{vel * t_b}{2}$$
- $t_f - t_b < kT \leq t_f$ 구간 :

$$q_d(kT) = vel * (t_f - t_b) - \frac{acc}{2} * (t_f - kT)^2$$

위에서 acc 는 지정 가속도 및 감속도의 크기이고, $q_d(t_f)$ 는 최종 위치, vel 은 등속 운동시의 속도, T 는 샘플링 주기, t_f 는 최종 위치에서의 시간을 나타낸다.

실험에서의 주 제어기의 제어 흐름도는 그림 7에 주어지고 관절 제어기의 제어흐름도는 그림 8에 나타내었다. 그림 7에서 v 는 사용되는 모터의 허용최대속도의 사용율을 나타낸다. 즉, $v=100$ 이면 허용최대속도로 이동 가능하게 하는 것이다. 제어흐름은 먼저 8255의 3개의 포트를 입, 출력으로 초기화하고 X,Y축의 이동거리(mm)와 속도 v 를 입력하면 역기구학에 의해 오른쪽 및 왼쪽바퀴의 대응하는 변위량 (q_r, q_l)을 계산하고, 궤적계획의 결과에 따라 가속도 값 (acc)과 이동거리를 엔코더 펄스수로 변환하여 샘플링 시간 (20 msec)마다 관절제어기로 보내 줄 엔코더 펄스수로 나누어 그 개수 (num)만큼 관절제어기로 보내준다. 관절제어기에서는 엔코더 펄스 수만큼 궤적을 추종하고 실제의 엔코더 펄스 카운트 값을 주 제어기 (Host-PC)로 보

내면 주 제어기에서 받아서 파일로 만든다. 그림 8의 제어흐름을 설명하면 먼저 마이크로 콘트롤러를 초기화하고 제어에 관련된 여러 변수 값들을 계산한다. 그리고 주 제어기로부터 가속도 값 (acc)을 받고 샘플링 시간 (20 msec, 외부 인터럽트)마다 위치값 (엔코더 펄스수)을 받아서 동적알고리즘에 의해서 위치 값을 추종한다.

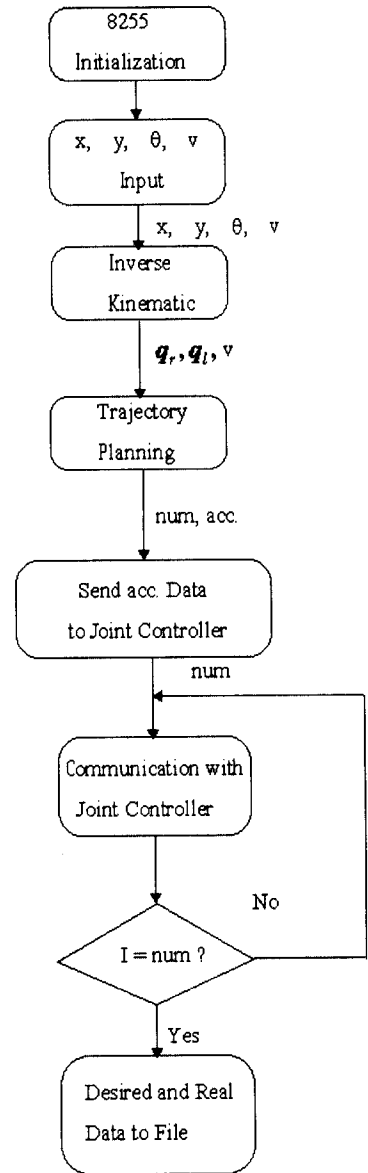


그림 7. 주 제어기에서의 알고리즘
Fig. 7. Algorithm of Host-PC.

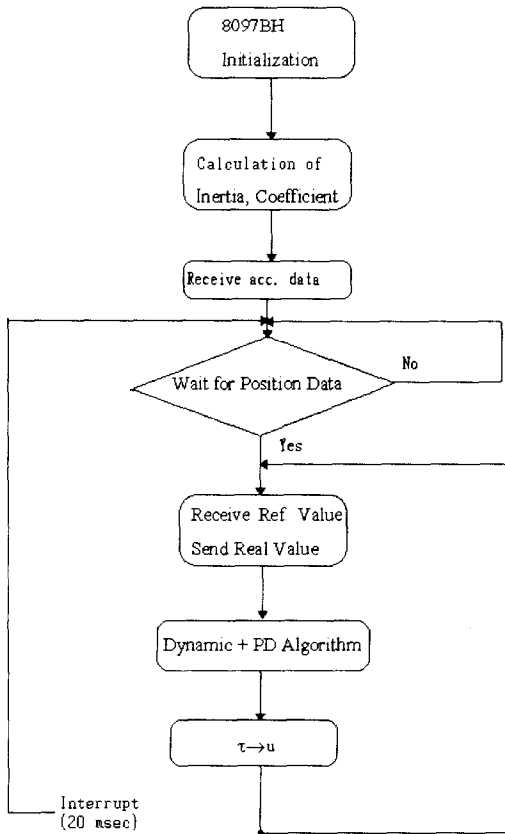


그림 8. 관절 제어기의 알고리즘
Fig. 8. Algorithm of Joint Controller.

본 실험에서는, 동특성부분을 강조하여 파악하기 위하여 $K_I = 0$ 로 설정하여 PD 제어를 실현 하였으며, 동역학 모델링에 의한 동적 제어 알고리즘의 타당성을 순수한 PD 제어와 성능비교를 통하여 검증한다.

표 1에 각 알고리즘의 제어 사이클을 보여주며, 표 2에는 각 알고리즘에 사용된 K_p 및 K_d 값을 보여준다.

표 1. 알고리즘 루틴의 주기
Table 1. Period of Algorithm Routine.

	PD 제어	동적 제어
속도 지령값	20ms	20ms
관절 제어기 알고리즘	2.1ms	4.6ms

표 2. 각 알고리즘에서의 K_p , K_d
Table 2. K_p , K_d of Each Algorithm.

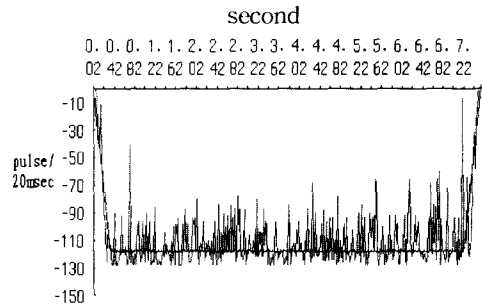
	X축		Y축	
	K_p	K_d	K_p	K_d
동적 제어	0.006	0.000011	0.006	0.000011
PD 제어	0.019	0.000011	0.025	0.000002

표 1에서 속도 지령값은 주 제어기에서 궤적 계획된 결과를 관절제어기로 보내주는 주기이고 관절제어기 알고리즘의 주기는 이 주어진 위치 명령을 수행하는 제어기의 제어사이클이다.

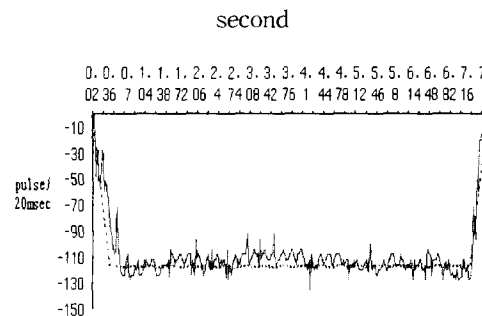
표 2에서 K_p 및 K_d 값은 최적의 성능을 갖는 값을 실험적으로 구한 것이다.

실험 결과

그림 9에서는 궤적계획에 의해 만들어진 속도 궤적을 각각의 제어 알고리즘에 따라 수행된 결과의 그래프를 보인다. 그림 10에서는 각각의 제어 알고리즘에 따라 수행된 결과의 속도오차를 보인다. PD 제어에서는 오차가 급격히 변화하고 있으며, 동적 제어의 경우와 오차 값의 크기를 비교하면 훨씬 큰 것을 볼 수 있다.



(a) PD 제어
(a) PD control



(b) 동적 제어
(b) Dynamic control

그림 9. 속도 궤적 추종
Fig. 9. Tracking of velocity trajectory.

그림 10에서 명백히 보이듯이 동적 제어알고리즘이 훨씬 우수한 속도 궤적 추종특성을 갖는 것을 알 수 있다. 관절 제어기에서는 주 제어기에서 일정 주기로 주는 위치 입력 값을 추종하게 되므로 실제 제어 루틴이

실행되는 부분은 속도 궤적에서 확인할 수 있다. 즉 PD 제어기와 동적 제어기가 위치 궤적을 추종하는 특성이 비슷하다라도 제어 알고리즘의 성능은 속도 궤적의 오차 값으로 평가된다. 그림 10에서 보듯이 비록 오차 보상 횟수가 적지만 (이는, 관절제어기 알고리즘의 제어 사이클이 더 길기 때문이다.) PD 제어기보다는 동적 제어기가 그 성능이 우수함을 알 수 있다. 이는 동적 제어 알고리즘의 연산시간으로 인해 제어사이클이 길어지더라도 PD제어보다 우수한 속도궤적 추종특성을 가지는 것으로 판단되며, DSP등과 같이 빠른 프로세서를 사용할 경우 동적 제어가 더욱 우수한 특성을 나타낼 수 있는 것이다.

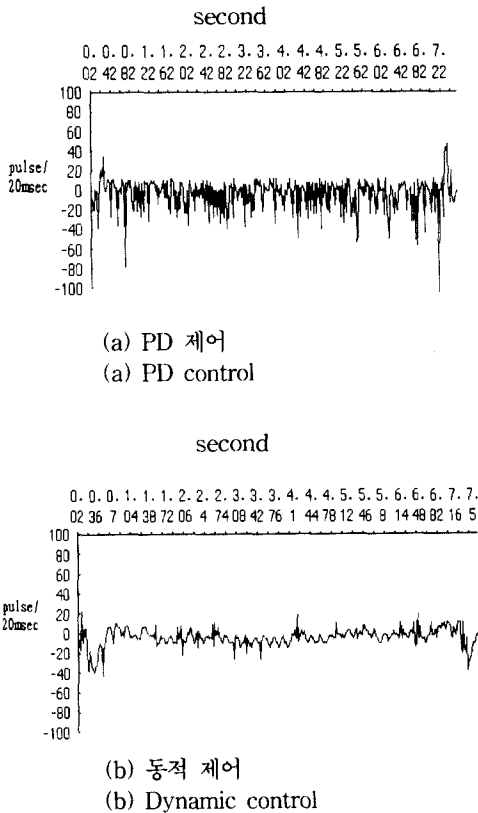


그림 10. 속도 궤적 추종 오차
Fig. 10. Tracking error of velocity trajectory.

VII. 결 론

본 논문에서는 라그랑제 방정식을 이용하여 기구학적 제한에 기초한 이동 로봇트의 동역학 모델을 잡고 이것을 바탕으로 계산토크 및 피드 포워드 제어와 전 통적인 PD 제어 기법을 사용하여 그 성능을 비교·검

토하였다. 그 결과 동역학 모델의 정보를 사용한 계산 토크 및 피드 포워드 제어가 우수한 성능을 보인다는 것을 알 수 있었고, 또 이동 로봇트에 부하가 걸렸을 경우에도 단순한 PD 제어보다 그 성능이 우수하리라는 것을 예상할 수 있었다. 그리고 실험을 통해 동적 제어 알고리즘이 증가된 계산량으로 인하여 제어 사이클이 길어짐에도 불구하고 PD 제어에 비해 우수한 성능을 보이는 것을 볼 수 있었다. 이는 제어기의 주처리기로 DSP 등을 사용하여 현재의 알고리즘보다 빠르게 실행시킨다면 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 절대 좌표계에서 측정된 오차는, 미끌림 현상 등으로 인해 엔코더의 데이터로 판단한 오차보다 더욱 큼을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 따라서 이러한 미끌림 등으로 인한 센서 데이터와 실제 데이터간의 차이를 보상하기 위해 이동 로봇트의 외부에 센서를 부착하여 절대 좌표계상에서 정밀 제어를 실현하는 연구가 미래의 연구과제로 남는다.

참 고 문 헌

- [1] Yun-Hui Liu and Suguru Arimoto, "Proposal of Tangent Graph and Extended Tangent Graph for Path Planning of Mobile Robots," *IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp. 312~317, April, 1991.
- [2] Th. Fraichard and A. Scheuer, "Car-Like Robots and Moving Obstacles," *IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp. 64~69, 1994.
- [3] 이 장명, 김 용태, "이동 로봇트의 다이내믹 제어" 한국 자동제어 학술회의 논문집 제1권, pp. 342~345, 1995. 10.
- [4] Y. Yamamoto and X. Yun, "Modelling and Compensation of the Dynamic Interaction of a Mobile Manipulator," *The 33th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 2187~2191, 1994.
- [5] De Luca and Giuseppe Oriolo, "Local Incremental Planning for Nonholonomic Mobile Robot," *IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp. 104~110, 1994.
- [6] M. Tounsi, G Lebert and M. Gautier, "Dynamic Identification and Control of

- Nonholonomic mobile Robots," *The 34th IEEE Conference on Decision and Control*, Pre-Print, 1995.
- [7] Donald T. Greenwood, *Principles of Dynamics*, New Jersey, pp. 281~317, 1965.
- [8] M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, New York, pp. 201~204, 1989.
- [9] 주진화, 명지태, 박의열, 이장명, "마크로-마이크로 로봇의 제어에 관한 연구" 전자공학회 논문집-B, Vol 31-B, No 9, pp. 47~55, 1994. 9
- [10] Brad Paden and Ravi Panja, "Globally asymptotically stable 'PD+' controller for robot manipulators," *Int. Jour. of Control*. Vol. 47, No. 6, pp. 1696~1712, 1988.

 저자 소개



李章明(正會員)

1957年 11月 22日生. 1980年 2月 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1982年 2月 서울대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사). 1990年 12月 USC(남가주대학) 박사학위 취득(Computer -Engineering 전공).

현재 부산대학교 공과대학 전자공학과 부교수. 주관심 분야는 다관절 로봇 시스템의 설계 및 제어. μ -processor 응용 시스템 설계. Motor 구동방식 및 제어 등임



金容태(正會員)

1972년 2월 4일생. 1994년 2월 부산대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1996년 2월 부산대학교 전자공학과 졸업(공학석사). 1996년 2월 LG전자 생활시스템 연구원.