

論文2001-38SC-11-2

이동로봇의 주행특성을 고려한 최적설계

(Optimal Design of a Mobile Robot Based upon Mobility)

陳 台 錫 * , 李 章 明 *

(Tae-Seok Jin and Jang-Myung Lee)

요 약

본 논문에서는 유동적인 두 바퀴간격을 갖는 이동로봇의 주행 효율 및 회전특성을 정의하고 그에 따라 이동로봇의 바퀴의 반경이 정해져 있는 상황 속에서 두 바퀴의 간격을 동적으로 변화시켜, 원하는 주행 효율과 회전특성을 얻을 수 있음을 제안하여 보여준다. 기존의 이동 로봇의 두 바퀴의 간격이 고정되어 있으면, 그 회전 및 주행특성이 고정되어지며 이로 인하여 순간적인 장애물을 회피할 수 없다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 통하여, 기존의 고정된 바퀴간격을 탈피하여 두 바퀴의 거리를 동적으로 변화시켜 높은 회전 특성을 순간적으로 얻을 수 있고, 또한 안정된 가운데 높은 주행특성을 가질 수 있음을 보였다. 본 연구에서 정의된 주행특성(mobility) 및 회전특성(rotatability)은 이동로봇의 설계에 적용되어 도로의 설계조건 및 로봇의 상태가 정해진 상황에서 이동로봇의 최적 설계를 위한 이론적 근거를 제공할 것이다. 실험적 데이터를 사용하여 정의된 주행 및 회전특성의 타당성을 보여 준다.

Abstract

This paper defines the mobility and rotatability, and a desired mobility and rotatability that can be achieved by adjusting the distance between two wheels of a mobile robot dynamically. The radii of wheels are assumed to be constant in this paper. If a mobile robot has a fixed axis connecting the two wheels, it may not be able to avoid a sudden obstacle because of the constraint of mobility and rotatability. The focus of this paper is on the instant rotatability with high and stable mobility. That is, by dynamically changing the distance between the two wheels, the mobile robot could get the high rotatability instantly and high mobility with high stability. Supposed that the mobility and rotatability that are defined in this paper are supplied to the design of a mobile robot, it will suggest a theoretical basis on the optimal design of the mobile robot with a given route condition and its states. The experimental data support the validity of the aforementioned mobility and rotatability.

I. 서 론

1. 연구배경 및 목적

20C 후반에 들어서면서 고임금으로 인한 원가 상승과 인력난 등의 문제를 해소하기 위해 공장 자동화(FA,

factory automation)의 개념이 도입되기 시작했다. 공장 자동화에서는 사람의 일을 대신할 수 있는 로봇 매니플레이터의 이용이 필수적이며 이에 따라 산업용 로봇 매니플레이터의 개발이 눈부시게 이루어졌다.

산업현장의 다양한 분야에서 이용되고 있는 로봇 매니플레이터는 고정된 위치에서 작업을 수행하므로 작업공간이 제한되는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하고 로봇의 기능을 확장하기 위해 점차 지능화 된 이동로봇에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도, 주어진 환경을 인식하고 로봇이

* 正會員, 釜山大學校 電子工學科

接受日字:2000年7月13日, 수정완료일:2001年8月31日

가야할 경로를 계획하며 계획된 경로를 충실하게 따라가도록 제어하는 분야가 이동 로봇의 가장 기본적이고 필수적인 분야라고 할 수 있다. 지금까지의 연구내용으로는 이동로봇이 공장 등의 작업 영역에서 임의의 장애물을 피해가면서 이동하기 위해서는 가고자 하는 목표 지점(goal point)까지의 경로를 생성해야 한다. 경로를 생성하기 위하여 필요한 정보는 목표지점과 장애물에 관한 정보로서 이동로봇은 장애물에 대한 정보를 파악하여 장애물을 회피하면서 목표 지점까지 이동해야 한다. 특히, 경로를 계획하기 위한 장애물 회피 방법에 관해서는 지금까지 많은 방법들이 소개되어 있다^[1].

그리고 최근 들어 지능화된 이동로봇을 구현하기 위해 주변 환경 인식, 경로계획, 충돌회피, 매핑(mapping) 기술과 같은 요소기술 분야에도 많은 연구가 이루어지고 있다^[5].

본 연구에서는 이러한 요소기술 중 이동로봇 자체의 구조적 설계를 고려하여 단순한 충돌회피가 아니라 이동로봇이 고속주행시 장애물을 감지하는 센서의 처리속도와 이동로봇의 속도와의 시간 지연을 보상할 수 있는 이동로봇의 기구적 설계상에 중점을 두어서 이동로봇의 두 바퀴의 크기와 두 바퀴간의 거리를 고려하여 곡선주행시 원활한 주행을 할 수 있도록 이동로봇의 구조를 최적화된 설계를 통하여 이동성을 좋은 방향으로 이동로봇이 움직일 수 있게 하였다. 그리고 그 결과에 대한 타당성을 검토하고 시뮬레이션을 통해 이동로봇의 이동성과 주행성을 검증하고자 한다.

2. 기존의 연구내용

주행제어라 함은 기준 경로와 기준 속도가 주어졌을 때 주어진 경로를 그 속도에 맞게 정확히 따라가도록 현재의 속도 및 위치 오차를 보상해 주는 제어를 말한다. 그래서 주행제어는 구동부인 모터의 제어뿐만 아니라 전체 시스템의 정확한 모델링(modeling)과 이에 근거한 제어방법의 연구가 요구된다. 최근 들어 이동로봇의 동역학을 기존의 방법에 대해서 보다 간단하고 자세히 구하기 위한 여러 가지 연구가 행하여지고 있다.

Shiller^[11] 등은 자동차에 관한 동적 특성을 연구하고 이의 제약조건에 대한 체계화했고 general terrain에 대한 연구를 수행함으로써 실내에서 사용되는 이동로봇뿐만 아니라 실외에서 사용되는 이동로봇에 대한 연구로까지 확대시켰고 '속도제한곡선(velocity limit

curve)'개념을 도입하여 주어진 경로의 주행가능성을 조사하였다. 본 논문에서는 동역학식을 운동방정식으로부터 구하고 있다. Novel^[12] 등은 바퀴형 이동로봇의 일반적인 형태에 대한 연구를 수행하여 일반적인 모델링(modeling)의 방법을 제시했다. Yuta^[13] 등은 PWS(power wheeled steering)구조를 지닌 로봇 시스템에 대한 모델링을 하고 feedforward 동적보상 및 feedforward 전류제어방법^[14]을 적용한 주행제어에 관하여 연구하였다. Yamamoto^[15]와 Novel^[16] 등은 비선형적인 이동로봇의 동역학에 대해 선형화(linearization)를 수행하여 주행제어를 연구하였다. 특히 Yamamoto^[15] 등은 최초로 이동로봇의 내부 동역학을 연구하여 이동로봇의 비선형적인 특성을 연구하였다. 그러나 본 논문에 제시한 이동로봇의 기구적 특성을 고려하여 선형 모델을 사용한다.

II. 이동로봇의 기구적 특성

2.1. 이동로봇의 구성

본 논문에서 구현하고자 하는 이동로봇의 구조는 그림 1에서 알 수 있듯이 두 바퀴사이에 프리즈마틱 축을 추가함으로써 2 자유도의 이동로봇을 3자유도를 갖는 이동로봇으로 구성하였다. 기존의 2 자유도 이동로봇에서의 바퀴의 회전 속도만으로 제어 한 것은 두 바퀴사이의 구동축 거리를 유동적으로 변화시킬 수 있도록 한 것이다. 즉, 기존의 이동로봇은 두 바퀴사이의 축 길이가 고정된 상태에서 바퀴의 속도를 변화시켜 주어진 경로를 추적하거나 최적의 비용함수를 만족하도록 로봇이 구동될 수 있도록 구성하였다.

2.2. 구조적 특징

그림 1에서 제시한 이동로봇은 두 축사이에 유동적으로 움직일 수 있는 1 자유도의 프리즈마틱축을 갖게하여 두 바퀴 사이의 거리가 변함으로 해서 이동로봇의 주행시 갑작스런 장애물 출현에 대해서 장애물 회피의 빠른 대응을 할 수 있게 하였다. 그리고 바퀴의 적은 회전량으로도 두 바퀴의 간격을 좁혀 줌으로써 곡선반경을 작게하여 곡선 주행시 장애물을 유연하게 회피할 수 있는 주행능력을 높이고자 한 것이다.

2.3. 이동로봇의 기구학 해석

이동로봇의 동적 모델을 구하기 전에 좌표계의 설정이 필요하다. 본 연구에서 사용된 이동로봇의 X-Y

평면상에서의 좌표계 설정은 그림 1에서와 같다.

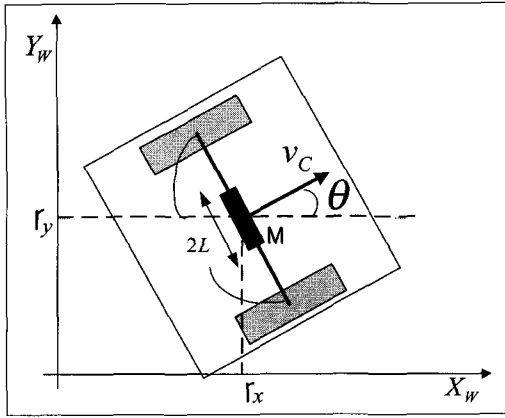


그림 1. 이동로봇의 좌표계
Fig. 1. Coordinates of a mobile robot.

그림 1에서 좌표계 (X_w, Y_w)는 이동로봇의 절대 위치를 지정하는 절대 좌표계이다. 그리고 이동로봇의 자체 좌표계 (r_x, r_y)는 점 M에 부착되어 있다.

이동로봇의 제어를 수행하는 경우에 일반적으로 다음의 두 가지 조건이 만족된다는 가정을 한다. 이 조건들은 순수구름조건(pure rolling condition)과 미끄럼 없음 조건(non slipping condition)이다. 순수구름조건은 이동로봇의 바퀴와 접촉면 사이의 순간적 이동 방향으로의 상대속도가 0이라는 조건이고 미끄럼 없음 조건은 이동로봇의 바퀴와 지면과 접촉면 사이에서 이동 방향의 수직방향 순간적 상대속도가 0이라는 조건이다. 순수구름조건을 각 바퀴에 대해 수식으로 표현하면 다음과 같다.

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

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

위 식에서 R 은 같은 크기의 왼쪽 및 오른쪽 바퀴의 반지름을 나타내고, \dot{q}_r 은 오른쪽바퀴의 운동, \dot{q}_l 은 왼쪽바퀴의 운동을 나타내고, L 은 바퀴와 몸체 좌표계의 원점 M사이의 거리를 나타낸다. 또한, 미끄럼 없음 조건을 수식으로 나타내면 식 (3)과 같이된다.

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

앞의 식 (1), (2), (3)로부터 바퀴운동과 직교 좌표계상의 운동관계는 자코비안 행렬에 의해 다음과 같은 관

계식으로 표시된다.

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

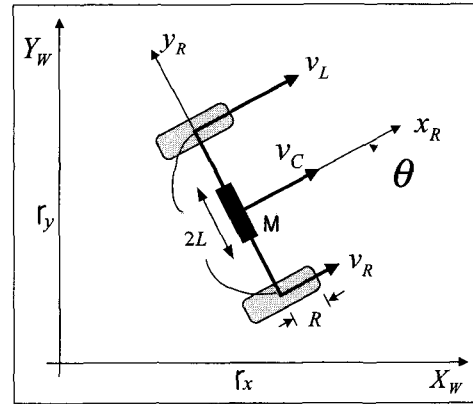


그림 2. 기구학 해석을 위한 이동로봇 모델링과 좌표계
Fig. 2. Modeling and coordinates of a mobile robot for kinematic analysis.

그림 2에서 R 은 바퀴의 반지름, L 은 바퀴와 중심, M , 사이의 거리라 하고 이동로봇의 무게중심의 평균이동 속도를 $v_c = [\dot{x} \ \dot{y}]^T$, 각속도를 w, X_w 축과 이동로봇와의 각을 θ 라 했을 때, 이동로봇의 진행 방향으로의 속도와 각속도는 다음과 같이 기술된다.

$$\dot{x} = \frac{R}{2}(\dot{q}_l + \dot{q}_r)\cos\theta \quad (5)$$

$$\dot{y} = \frac{R}{2}(\dot{q}_l + \dot{q}_r)\sin\theta \quad (6)$$

$$\dot{\theta} = \frac{R}{2L}(\dot{q}_l - \dot{q}_r) \quad (7)$$

또한 p 를 이동로봇의 현재위치, \dot{p} 를 이동로봇의 속도라고 했을 때, Jacobian을 행렬식은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{p} = J(q)\dot{q} \quad (8)$$

식 (8)에서 $\dot{p} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta}]^T, \dot{q} = [\dot{q}_l \ \dot{q}_r]^T$ 이며, Jacobian 행렬 $J_{3 \times 2}$ 는 다음 식 (9)와 같이 정의된다.

$$J_{3 \times 2} \triangleq \begin{bmatrix} \frac{R}{2}\cos\theta & \frac{R}{2}\cos\theta \\ \frac{R}{2}\sin\theta & \frac{R}{2}\sin\theta \\ -\frac{R}{2L} & \frac{R}{2L} \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.4. 곡선 주행시 곡선반경 결정

이동로봇이 임의의 곡선경로를 진행할 때 곡선 반경을 결정할 수 있다. 그림 3에서와 같이 곡선 경로 C를 따라서 진행한다고 했을 때 초기 위치 P에서 곡선 경로를 따라서 Q의 지점까지 ΔS만큼 이동한다. 여기서 곡선상의 위치 P, Q에서의 접선 기울기의 변화량은 Δα가 된다. 이때 이동로봇은 곡선 반경 R_d를 그리면서 이동하게 된다. 곡선 반경 R_d를 그리면서 이동하게 되는 이동로봇의 위치는 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$P = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \int_0^t v_c \cos \theta dt \\ \int_0^t v_c \sin \theta dt \\ \int_0^t \omega dt \end{bmatrix} \quad (10)$$

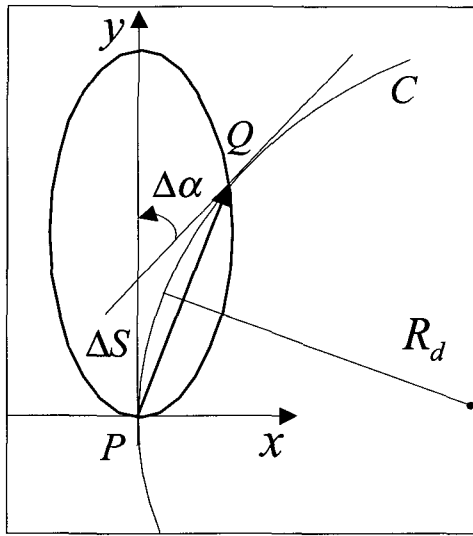


그림 3. 곡선주행시 곡선반경 결정
Fig. 3. Decision of curve radius in curve traveling.

초기위치를 x_0, y_0, θ_0 로 두면 이동로봇의 현재 위치는 식(10)에 의해서 결정되어짐을 알 수 있다.

그림 3에서와 같이 이동로봇의 진행경로를 곡선 $C(x, y)$ 라고 했을 때, 곡선위의 점 P에 있어서의 접선이 y 축의 양의 방향과 이루는 각 α는 0이 된다.

이 때의 기울기는 y 축과 나란한 방향이 되므로 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\tan \alpha = \frac{dx}{dy} = \frac{\dot{x}(t)}{\dot{y}(t)} \quad (11)$$

(314)

여기서 곡선 C 위에 기점 P에서 Q까지 ΔS만큼 변할 때 α가 Δα만큼 변했다고 하면 굴곡도를 나타낼 수 있고, α를 S의 함수로 보고 아래와 같은 극한치로 표현 할 수 있다.

$$k = \frac{d\alpha}{ds} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta \alpha}{\Delta s} \quad (12)$$

이때 식(12)를 점 P에 있어서의 곡선 경로 C의 곡률이라 하고, 곡률의 역수의 절대치 $\frac{1}{|k|}$ 를 P에 있어서 곡선 경로 C의 곡률반경이라 정의한다.

즉, 곡률반경 R_d는 아래 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{\frac{d\alpha}{dt}}{\frac{ds}{dt}} = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \dot{y}\ddot{x}}{\{\dot{x}^2 + \dot{y}^2\}^{\frac{3}{2}}} \quad (13)$$

$$R_d = \frac{1}{|k|} \quad (14)$$

여기서, \dot{x}, \dot{y} 는 다음과 같다.

$$\dot{x} = \frac{R}{2}(\ddot{q}_l + \ddot{q}_r)\cos \theta \quad (15)$$

$$\dot{y} = \frac{R}{2}(\ddot{q}_l + \ddot{q}_r)\sin \theta \quad (16)$$

2.5. 곡선반경에 따른 이동로봇의 두 바퀴 간격결정

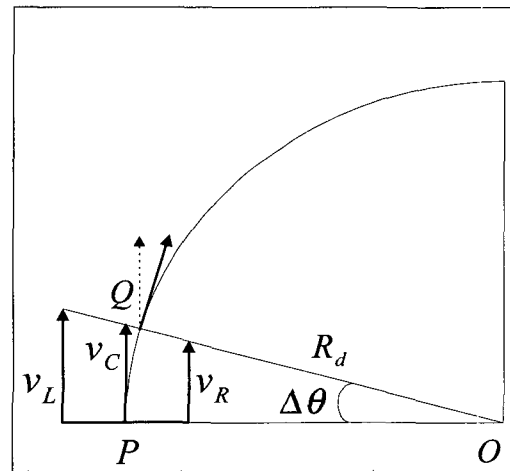


그림 4. 곡선주행시 두바퀴간의 간격 결정
Fig. 4. Decision of L in curve traveling.

이동로봇이 회전 각속도, $\omega(\Delta\theta)$ 로 곡선 경로를

주행하게 될 때 장애물과 이동로봇 간에 거리를 결정하게 되면 이동로봇가 곡선경로를 미끄럼이나 전복되지 않는 최고 속도를 결정할 수 있다. 장애물과의 거리와 속도를 결정함으로써 이동로봇의 두바퀴 간격을 결정하게 되므로 곡선 경로를 미끄럼 없는 주행이 가능하게 된다.

두 바퀴의 속도차에 따른 이동로봇의 각속도는 앞에서 정의한 식 (5), (6), (7)을 이용하여 다음과 같은 관계식으로 표시할 수 있다.

$$\omega = \frac{R}{2L}(\dot{q}_r - \dot{q}_l) \quad (17)$$

$$v_c = \frac{R}{2}(\dot{q}_r + \dot{q}_l) \quad (18)$$

위 그림의 $\triangle OPQ$ 에서 $\angle OQP = \pi/2 - \omega$ 이므로 곡선 반경 R_d 는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_d = v_c \tan\left(\frac{\pi}{2} - \Delta\theta\right) \quad (19)$$

여기서 식(17)을 식(19)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_d = v_c \tan\left\{\frac{\pi}{2} - \frac{R}{2L}(\dot{q}_l - \dot{q}_r)\right\} \quad (20)$$

이 식(20)에서 두 바퀴의 간격 L 에 대하여 풀면 다음식과 같이 이동로봇의 곡선주행시 두 바퀴간의 간격을 결정할 수 있다.

$$L = \frac{R(\dot{q}_l - \dot{q}_r)}{2\left\{\frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{R_d}{v_c}\right)\right\}} \quad (21)$$

III. Mobility Curvature

3.1. Mobility Measure의 정의

위의 식 (5), (6)을 사용하여 $v_l^2 + v_r^2 = 1$ 의 단위원을 만족하는 임의의 입력 속도벡터에 대해서 진행방향의 속도와 각속도를 직교좌표 공간에서 표현하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 그림 4는 Mobility curve를 보여주는 것으로서 모든 입력방향에 대한 속도 특성을 그래프로 나타낸 것이다.

Mobility를 정의하기 위하여 위에서 정의한 식 (5), (6), (7)의 관계를 이용하여 식(17), (18)의 관계식을 유

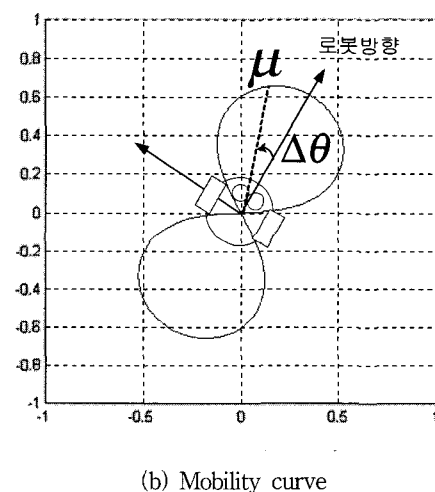
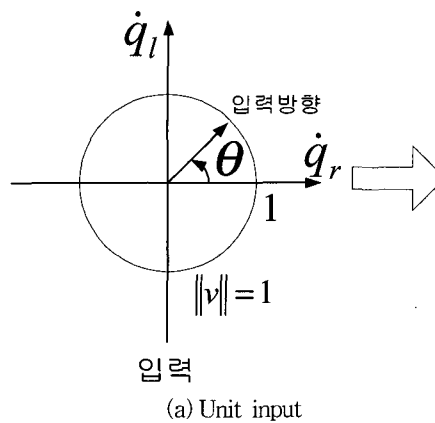


그림 5. 속도공간에서의 속도특성으로의 맵핑
Fig. 5. Mapping relationship between unit input velocity and mobility curve.

도할 수 있었다.

식(17), (18)을 이용하여 두 바퀴의 단위 입력, $\dot{q}_l^2 + \dot{q}_r^2 = 1$ 에 대한 v, ω 의 관계식은 다음과 같이 정리된다.

$$\left(\frac{v_c + \omega L}{R}\right)^2 + \left(\frac{v_c - \omega L}{R}\right)^2 = 1 \quad (22)$$

$$v_c^2 + \omega^2 L^2 = \frac{R^2}{2} \quad (23)$$

이때, 식 (23)으로 부터 v_c 의 크기 즉, $\|v_c\|$ 로 정의되는 Mobility measure(μ)는 다음과 같다.

$$\mu = \sqrt{\frac{R^2}{2} - \omega^2 L^2} \quad (24)$$

따라서 Mobility measure(μ)를 두 바퀴의 속도차에 의해서 생성되는 각속도 $0 \leq \omega \leq \pi/2$ rad에 대해서 plotting하면 그림 5의 (b)와 같이 두 개의 curve형태로 나타나게 된다.

여기서, 각속도 ω 는 이동로봇 두 바퀴의 속도차에 의해서 생성되는 단위시간에 대한 각변화량이므로 $\omega = \Delta\theta$ 와 같이 표현되고 식(24)는 다음 식으로도 표현할 수 있다.

$$\mu = \sqrt{\frac{R^2}{2} - \Delta\theta^2 L^2} \quad (25)$$

3.2. Mobility Curve

식(24)에서부터 정의되는 Mobility measure(μ)를 $0 \leq \omega \leq \pi/2$ rad/sec에 대해 plotting하여 나타나게 되는 두 개의 타원형태를 Mobility curve라고 정의하였다.

그림 5 에서와 같이 두 바퀴에 속도의 크기가 1 인 속도 벡터를 입력시킴으로 두 바퀴의 속도차에 의해서 일어날 수 있는 이동 로봇의 이동성을 보여주고 있다. 이 curve가 클수록 이동로봇의 곡면 주행이 빨라지게 되고, 이로부터 이동로봇의 곡면 주행능력을 나타낼 수 있으므로 Mobility curve 라고 한다. 예를 들어서 바퀴의 반지름이 1인 이동로봇을 중심에서 바퀴까지의 거리가 각각 $L=1$, $L=2$ 일 때의 곡면 주행성을 보여주는 curve는 아래 그림과 같다.

여기서, 그림 6은 그림 7보다 중심간의 거리가 좁은 경우인데 이동로봇의 중심에서 바퀴사이의 거리 L 이 작을수록 curve의 면적은 커지게 되고 이동로봇의

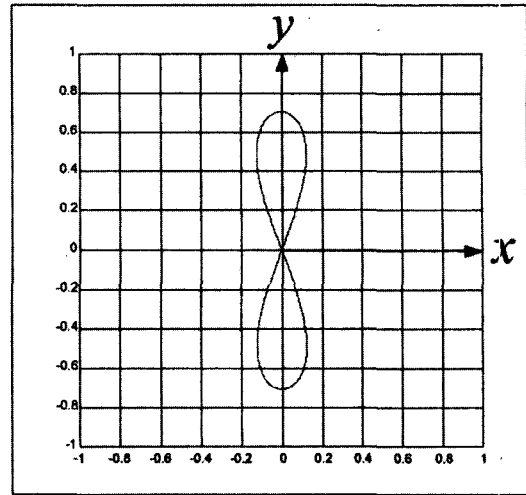


그림 7. $L=2$ 인 Mobility curve
Fig. 7. Mobility curve for $L=2$.

곡면주행성은 더욱 빨라지게 되어 이동로봇이 진행 중 장애물 출현시 곡선반경을 줄일 수 있게된다. 하지만 거리 L 이 작을 수록 안정성을 나쁘게 하므로 로봇의 설계시 바퀴의 반지름을 알 때 로봇의 중심에서 바퀴까지의 거리와의 관계를 mobility와 안정성을 함께 고려하여 결정 할 수 있다.

3.3. Mobility를 이용한 이동로봇의 이동성 결정

그림 8과 그림 9는 이동로봇의 두 바퀴의 회전속도의 크기를 일정하게 하고 수직 방향과 α 의 각도 방향으로 진행할 때, 로봇의 중심에서 바퀴까지의 거리, L 의 변화에 따라서 곡선주행의 차이를 보이고 있다.

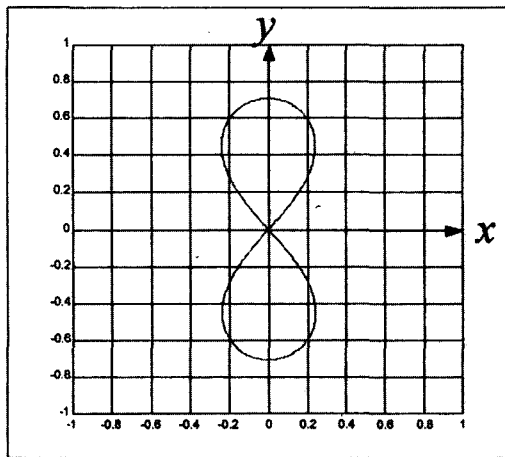


그림 6. $L=1$ 인 Mobility curve
Fig. 6. Mobility curve for $L=1$.

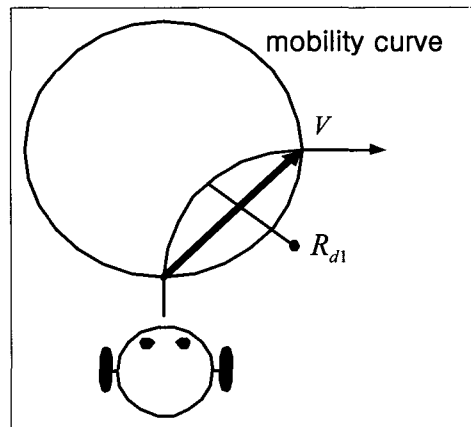


그림 8. $L < \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$ 일 때의 곡률 반경
Fig. 8. Radius of curvature in $L < \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$.

그림 7에서는 로봇의 회전 반경이 R_{d1} 을 그리게 되고 그림 9에선 회전반경이 R_{d2} 를 그리면서 진행하게 된다. 여기서 두 바퀴간의 거리가 작을 때 회전반경이 작음을 알 수 있으며, 동일한 속도에서 바퀴의 적은 회전량과 두 바퀴간의 간격을 조절하여 돌발적인 장애물에 대해 자유로운 회피가 가능할 수 있게 된다.

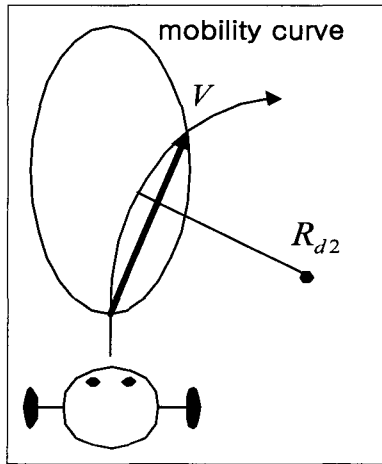


그림 9. $L > \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$ 일 때의 곡률 반경
 Fig. 9. Radius of curvature in $L > \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$.

IV. 이동로봇의 최적설계

아래 그림 10~12는 이동로봇의 두 바퀴 간격에 따

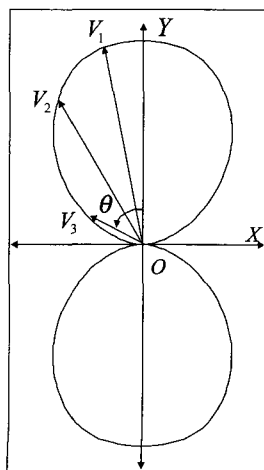


그림 10. $L > \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$ 일 때의 Mobility curve
 Fig. 10. Mobility curve for $L > \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$.

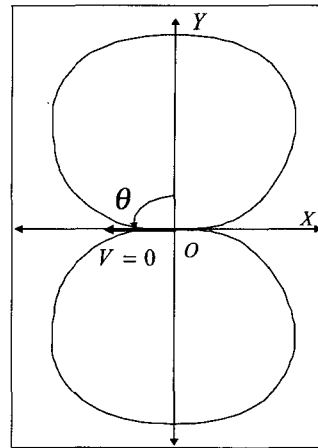


그림 11. $L = \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$ 일 때의 Mobility curve
 Fig. 11. Mobility curve for $L = \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$.

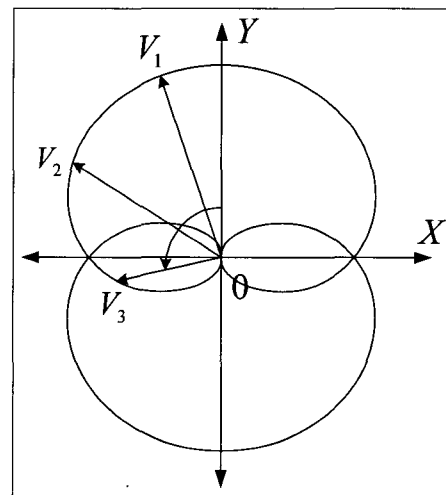


그림 12. $L < \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$ 일 때의 Mobility curve
 Fig. 12. Mobility curve for $L < \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$.

른 Mobility curve를 나타낸 것으로 Mobility measure 값의 크기에 따라서 속도 특성을 보여주고 있다.

4.1. 이동로봇의 두 바퀴의 크기와 거리와의 관계
 이동로봇의 Mobility curve의 기하학적인 특성을 이용하여 바퀴의 반지름과 두 바퀴간의 거리와의 관계를 구할 수 있다. 그림 9는 두 바퀴의 간격 L 이 최적 값 보다 큰 경우로서 두 바퀴의 속도변화에 따른 각속도에 따라서 이동로봇의 이동성이 현저히 작아짐을 알 수 있으며, 그림 11에선 그림 10과 비교하여 두 바퀴의 간격 L 이 큰 경우로서 mobility curve는 원에 가

가워지게 되고 이동로봇의 동일한 속도변화와 가속도에 따라서 이동성이 좋음을 알 수 있다. 하지만, 그림 12에서와 같이 $L < \frac{\sqrt{2}}{\pi} R$ 일 때는 이동로봇의 회전각 속도가 $\Delta\theta \cong \pi/2$ rad보다 큰 경우가 된다. 이 때 mobility curve는 X축과 겹쳐져서 나타나게 되며 이동로봇은 일정방향으로 진행을 위하여 이동로봇의 두 바퀴가 각각 반대방향으로 돌게되는 경우가 발생한다.

그림 13에서는 그림 12에서 나타낸 L 을 실제 $L < \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$ 의 경우로 $L=0.25$ 인 mobility curve를 나타낸 것이다. 여기서 임의의 방향 α 로 이동로봇이 진행한다고 했을 때 두 가지의 속도 벡터 성분 V_{C1} , V_{C2} 가 나오게 된다. 이 두 개의 속도벡터 성분은 진행방향은 동일하나 크기는 각각 다르게 나타나므로 이동로봇의 이동성도 다르게 나타나게 된다. 따라서 $L < \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$ 인 경우에 이동로봇이 진행하기 위한 속도 벡터 V_{C1} 이 생기지 않게되는 두 바퀴간격의 최적값이 $L = \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$ 임을 알 수 있다.

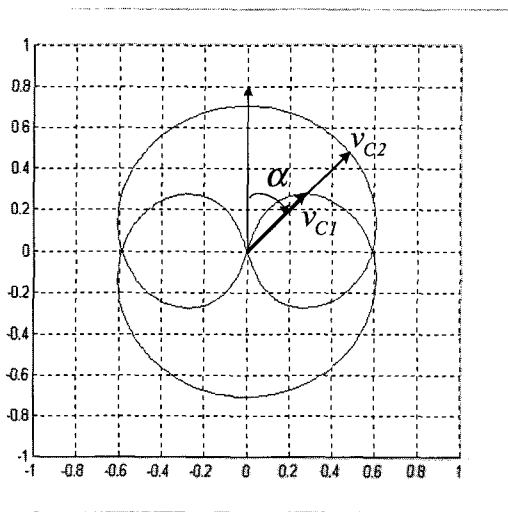
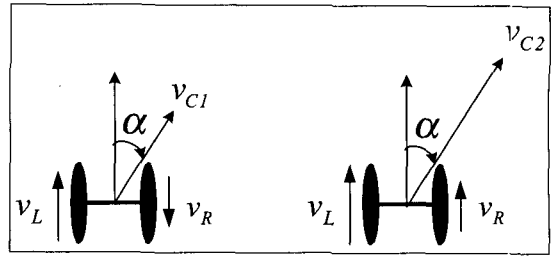


그림 13. $L=0.25$ 인 경우의 Mobility curve
Fig. 13. Mobility curve for $L=0.25$.

그림 13을 이동로봇의 두 바퀴 회전특성으로 나타내면 그림 14와 같이 나타낼 수 있다.

첫 번째 경우로써 그림 14의 (a)는 동일한 진행방향에 대하여 두 바퀴가 각각 역방향으로 회전하는 경우를 나타낸다. 두 번째 경우인 그림 14의 (b)는 진행방



(a) V_{C1} 에 대한 각 바퀴속 (b) V_{C2} 에 대한 각 바퀴속도

그림 14. 속도 V_{C1} , V_{C2} 에 대한 바퀴 회전특성

Fig. 14. Characteristic of wheel rotation for the velocity V_{C1} and V_{C2}

향에 대하여 두 바퀴가 정방향으로 회전하여 진행되는 경우가 된다. (b)의 경우가 일반적인 경우이며, (a)의 경우는 그 제어에 있어서 큰 가속도의 변화를 요구할 가능성이 있으므로 사용하지 않는 것이 바람직하다.

그리고 그림 14의 (a)와 같이 속도 벡터가 작게 나타나는 부분을 이동로봇의 두 바퀴의 입력속도로 나타내면 그림 15와 같이 나타낼 수 있다.

결과적으로 그림 15에서와 같이 $L < \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$ 일 때 이동로봇의 회전바퀴에 대한 입력벡터를 나타낸 호 AB와 호 CD에서 나타내고 있으며 이때 이동로봇의 이동성이 그림 13의 바깥원의 내부에 위치한 두 개의 작

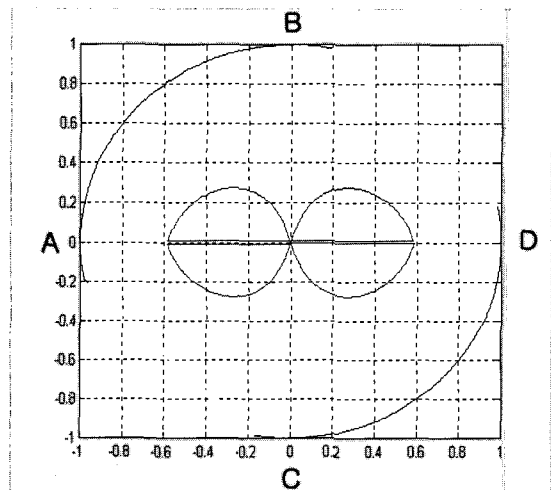


그림 15. $L < \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$ 인 경우의 두 바퀴의 회전입력과 이동성

Fig. 15. Unit input scope and mobility curve of wheels for $L < \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$

은원으로 나타나게 된다. 즉, 이동로봇의 두 바퀴가 각각 반대방향으로 움직이게 되며 두 바퀴가 정방향으로 움직이는 경우보다 이동성이 작게 나타남을 알 수 있다.

4.2. Mobility를 이용한 이동로봇의 최적설계
앞에서 보인 그림 12는 이동로봇의 진행 방향과 그에 따른 mobility measure 값을 나타낸 것으로서 진행 방향이 좌우로 $\pi/2$ rad에 가까워 질 수록 mobility measure 값은 작게 나타나게 되는데 이것은 이동로봇의 이동성이 작게 나타나지만 회전 각속도는 $\pi/2$ rad에서 가장 크게 나타나는 것임을 알 수 있다.

따라서 속도벡터 V 가 $-X$ 방향 또는 X 방향 즉, $\omega = \frac{\pi}{2}$ 로 되고 이 때 이동로봇의 속도, $V=0$ 됨을 이용하여 이동로봇의 바퀴 반지름과 두 바퀴사이의 거리와의 관계식을 식(26)과 같이 유도해 낼 수 있다.

이와 같은 특성을 이용하여 회전각속도가 즉, $v^2 + \omega^2 L^2 = \frac{R^2}{2}$ 에 $v=0$ 및 $\omega = \frac{\pi}{2}$ 인 최적조건을 대입하면 다음과 같이 구해진다.

$$L = \frac{\sqrt{2}R}{\pi} \tag{26}$$

앞에서 설명한 그림 10은 $L > \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$ 일 때의 curve를 나타내고 동일한 속도 크기에 대하여 이동로봇의 곡면 운동성이 작아지게 된다. 그림 11은 이동로봇의 설계시 최적의 비로써 구현된 것으로서 $L = \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$ 일 때의 curve를 보여주고 있다. 이 때의 시뮬레이션한 결과를 아래 그림 16 에서와 같이 가운데가 오목한 두 개의 원이 결합된 형태로 보여주고 있다.

하지만 그림 12에서와 같이 $L < \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$ 일 때에는 curve가 x 축 상에서 겹쳐지는 현상이 생기게 되는데 이것은 로봇이 진행을 하지 못하고 맴돌게되거나 두 바퀴의 회전방향이 역 방향이 되어 속도벡터가 작게 되는 현상이 발생할 수 있는 가능성이 있다. 따라서 로봇이 맴돌게되는 현상으로부터 안전한 회전계획을 설정하기 위해서는 식(28)과 같은 조건식을 만족해야 한다.

$$v^2 + \theta^2 L^2 = \frac{R^2}{2} \tag{319}$$

$$v = \sqrt{\frac{R^2}{2} - \theta^2 L^2} > 0 \tag{27}$$

$$0 < \theta < \frac{R}{\sqrt{2}L} \tag{28}$$

따라서 curve의 면적이 넓을수록 이동로봇의 곡선주행과 장애물 회피가 빨라질 수 있는 속도특성이 나타나게 된다.

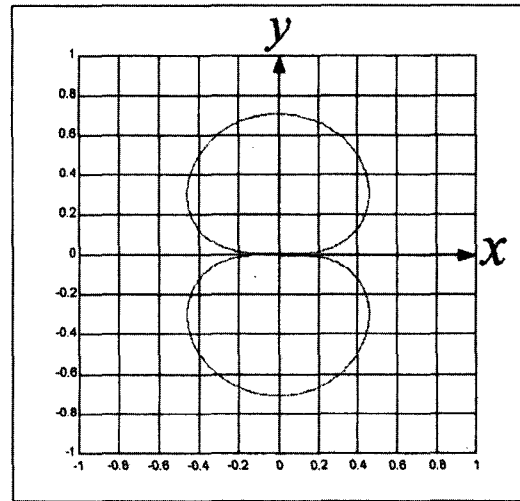


그림 16. $L = \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$ 일 때의 mobility curve

Fig. 16. Mobility curve for $L = \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$.

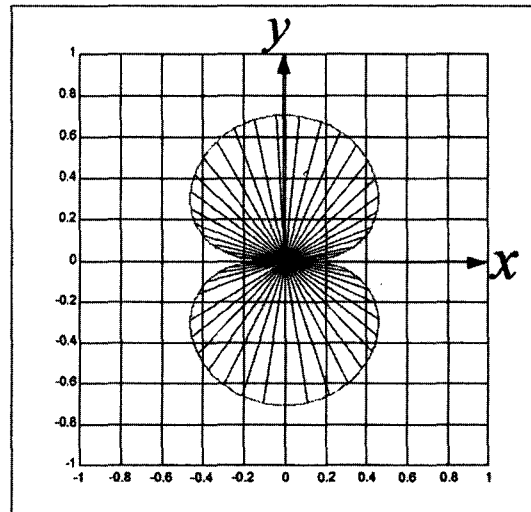


그림 17. $L = \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$ 일 때의 속도벡터의 크기와 이동성

Fig. 17. Magnitude and mobility of velocity for $L = \frac{\sqrt{2}R}{\pi}$.

결국 앞에서 설명한 이동로봇의 회전특성과 L 의 최적값을 구한 결과를 이용하여 이동로봇이 주행을 할 때 나타나는 곡선주행특성은 그림 18에서 나타내고 있다. 그림 18은 이동로봇이 원점 O 를 출발해서 임의의 장애물을 발견했을 때 두 바퀴의 간격을 좁혀줌으로써 회전반경이 줄어들게 되어 장애물 회피와 이동성이 좋게 나타나는 것을 A의 경로와 B경로 비교해서 보여주고 있다. 여기서 동일한 속도에 대해서 A, B 곡선경로 대해 곡선 반경이 R_A 가 R_B 보다 작게 나타남을 알 수 있다.

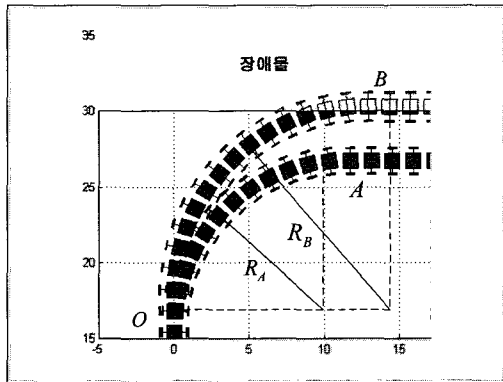


그림 18. 이동로봇의 곡선주행 특성과 회전반경
Fig. 18. Characteristics of navigation and radius of the mobile robot.

V. Mobility curve를 이용한 이동로봇의 시뮬레이션

5.1. 동일 속도크기에 따른 이동 특성

그림 19과 그림 20은 mobility curve를 이용한 이동로봇의 곡선주행을 보여주기 위해 나타낸 것으로서 이동로봇이 직진방향과 임의의 α 의 각도를 이루면서 곡선주행을 하게 될 때 이동로봇의 운동성을 $L/R > \frac{\sqrt{2}}{\pi}$ 인 경우와 $L/R = \frac{\sqrt{2}}{\pi}$ 인 경우를 비교하여 설명한다. 그림 19에서 이동방향으로의 속도 curve의 크기 μ_1 을 X, Y 축에 대하여 분해한 값을 각각 μ_{x1}, μ_{y1} 으로 하였고, 이동로봇이 이동하고자 하는 방향으로 진행할 수 있도록 두 바퀴의 회전량에 가중치로 적용하여 시뮬레이션한 결과를 보여주고자 한 것이다. 여기서 그림 20에서의 mobility의 크기, μ_2 가 그림 19에서의 mobility의 크기, μ_1 보다 크게 나타나므로 두

바퀴의 회전량에 대한 가중치 값이 크게 주어지게 됨으로 그림 20에서의 이동로봇의 이동성과 곡선주행성이 그림 19에서 보다 양호하게 나타남을 알 수 있게 된다.

- μ_1, μ_2 = 목적지 방향에 대한 이동로봇의 mobility의 크기
- μ_x = mobility μ 의 x 방향의 성분
- μ_y = mobility μ 의 y 방향의 성분
- α = 목적지의 방향과 이동로봇 방향사이의 편각

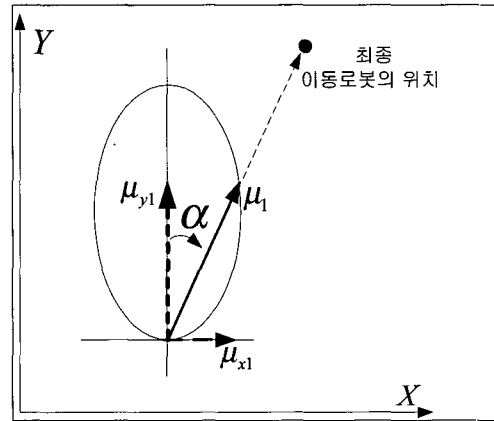


그림 19. $L/R > \frac{\sqrt{2}}{\pi}$ 일 때의 이동로봇의 주행특성
Fig. 19. Characteristics of navigation of the mobile robot for $L/R > \frac{\sqrt{2}}{\pi}$.

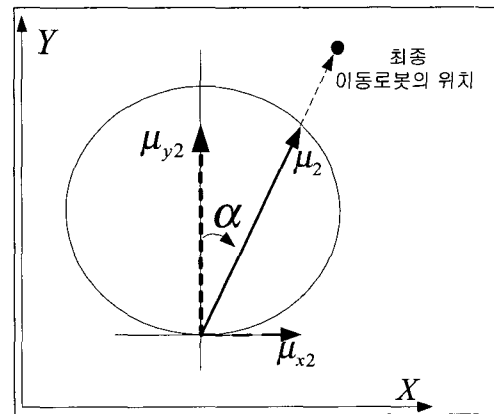


그림 20. $L/R = \frac{\sqrt{2}}{\pi}$ 일 때의 이동로봇의 주행특성
Fig. 20. Characteristics of navigation of the mobile robot for $L/R = \frac{\sqrt{2}}{\pi}$.

5.2. 동일 속도크기에 따른 이동성 시뮬레이션
 앞에서 설명한 그림 19와 그림 20의 특성을 이용하여 이동로봇의 속도 v_c 의 크기를 1로 만족시키고 진행속도를 일정하게 한 시뮬레이션결과이다. 그림 21은 $L/R > \sqrt{2}/\pi$ 일 때의 결과로서 위에서 설명한 그림 19를 근거로 한 예를 시뮬레이션 결과를 보여주고 있고, 그림 22는 $L/R = \sqrt{2}/\pi$ 일 때의 결과로서 그림 20을 근거로 한 예를 시뮬레이션을 통하여 곡선주행능력을

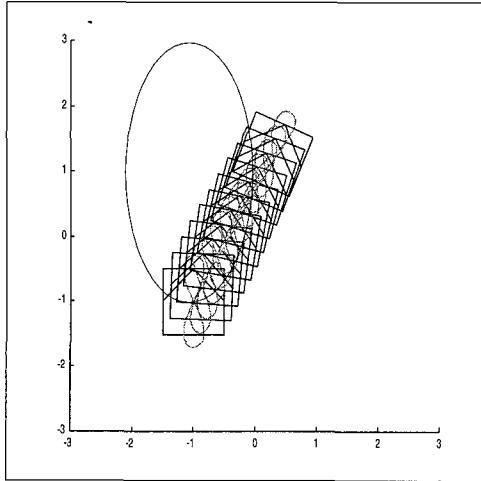


그림 21. $L/R > \frac{\sqrt{2}}{\pi}$

Fig. 21. Simulation of mobility curve in $L/R > \frac{\sqrt{2}}{\pi}$.

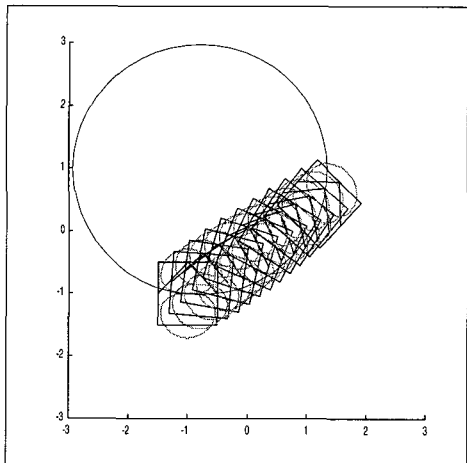


그림 22. $L/R = \frac{\sqrt{2}}{\pi}$

Fig. 22. Simulation of mobility curve in $L/R = \frac{\sqrt{2}}{\pi}$.

보여주고 있다. 결과적으로 그림 22는 동일한 속도에 대하여 $L/R = \sqrt{2}/\pi$ 일 때의 곡선 반경이 그림 21에 나타낸 곡선반경보다 작게 나타나고 이동로봇의 곡선주행능력이 좋아짐을 알 수 있다.

아래 그림 23은 이동로봇의 장애물 회피 특성을 보여주고 있다. 이동로봇이 진행중에 장애물 O_1 에 대한 거리 d 를 센서를 통해서 알게 되었을 때 두 바퀴의 간격은 식(17)를 이용해서 결정된다. 그런데 경로 B는 두 바퀴의 간격을 고려하지 경우로서 동일한 이동 속도에 대한 왼쪽 바퀴와 오른쪽 바퀴의 두 바퀴 속도 변화에 대해 장애물 충돌이 일어나게 진행되는 경로를 보여주고 있다. 그러나 경로 A는 경로 B에서와 같이 동일한 두 바퀴의 속도변화에 대해서 곡선 주행시 두

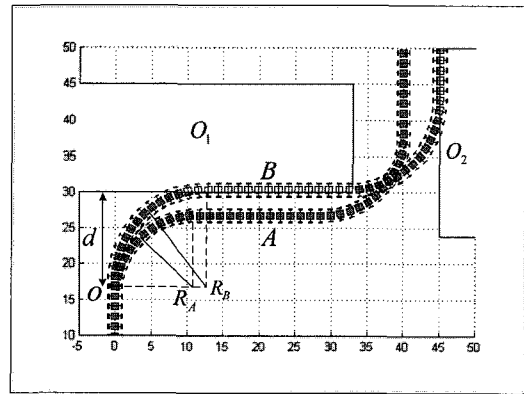


그림 23. L 에 기반을 둔 이동로봇의 경로특성

Fig. 23. Path characteristics of mobile robot based upon L .

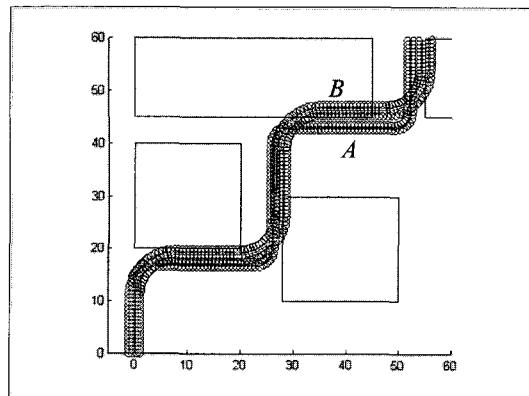


그림 24. L 에 기반을 둔 이동로봇의 충돌회피와 경로특성

Fig. 24. Obstacle avoidance and path characteristics of Mobile robot based upon L .

바퀴의 간격을 $L/R = \frac{\sqrt{2}}{\pi}$ 로 해 줌으로써 장애물 회피가 자연스럽게 이루어짐을 알 수가 있다.

그림 24에서는 경로 A와 B에 대해서 전체적인 진행경로를 나타낸 것으로서 곡선 주행시 두 바퀴의 간격을 변화시켜 줌으로써 회전반경을 줄일 수 있고 충돌회피도 가능해 짐을 보여주고 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 두 바퀴의 회전축이 프리즈마틱 축으로 연결된 이동로봇의 두 바퀴의 반지름과 거리관계를 고려한 최적설계 기법을 제안하였다. 두 바퀴의 속도벡터의 크기가 1인 높을 이동로봇의 Jacobian에 매핑하여 나타나는 이동로봇의 속도벡터 궤적을 mobility curve라 정의하였다. 이 mobility curve의 기하학적인 모형만으로도 이동로봇의 곡선 주행 능력과 이동성의 해석이 가능함을 보여주고 있다. 그리고 이동로봇의 주행시 갑작스런 장애물이 발생할시 실시간 데이터처리를 기구적으로 보상해줄 수 있는 방법으로서 두 바퀴간의 거리를 변화시켜 곡선주행시 곡선 반지름을 작게하여 충돌회피를 원활히 할 수 있었다. 또한, 결과의 mobility curve를 이용하여 이동로봇의 이동성을 결정할 수 있으며 curve의 크기가 큰 방향으로 이동로봇의 운동성이 좋다는 것을 확인하였다. 두 바퀴의 간격을 이용한 곡선 주행시 특성을 시뮬레이션을 통하여 mobility curve의 특성을 검증할 수 있었다. 향후연구로서 동역학적인 측면에서 이동로봇의 성능을 평가함에 있어서 두 바퀴의 크기와 거리관계를 고려하는 것이다. 아울러 곡선주행시 두 바퀴의 간격이 좁혀 짐으로써 발생하는 안정도 문제에 관한 연구도 병행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] S. Sundar and Z. Shiller, "Optimal Obstacle Avoidance Based on the Hamilton-Jacobi-Bellman Equation," *IEEE Trans. on Robotics & Automat.*, vol. 13, no. 2, pp. 305~310, 1997.
- [2] Tsuneo Yoshikawa, "Manipulability of Robotic Mechanisms," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 4, No.2, pp. 3~9, 1985.
- [3] Stephen L. Chiu, "Task Compatibility of Manipulator Postures," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 7, No. 5, pp. 13~21, 1988.
- [4] Mark W. Spong, *Robot Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, 1989.
- [5] J. C. Alexander and J. H. Maddocks, "On the kinematics of wheeled mobile robots," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 8, no. 5, pp. 15~27, 1989; reprinted in *Autonomous Robot Vehicles*, I. J. Cox & G. T. Wilfong, Eds. New York: Springer-Verlag, 1990, pp. 5~24.
- [6] J. C. Alexander, J. H. Maddocks and B. A. Michalowski, "Shortest Distance Paths for Wheeled Mobile Robots," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 14, NO. 5, October 1998.
- [7] W. F. Carriker, P. K. Khosla and B. H. Krogh "An Approach for Coordinating Mobility and Manipulation," *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems Engineering*, Dayton, Ohio, August 1989, pp. 40~44.
- [8] L. Dubins, "On curves of minimal length with a constraint on average curvature and with prescribed initial and terminal positions and tangents," *Amer. J. Mathemat.*, Vol. 79, pp. 497~516, 1957.
- [9] J. P. Laumond and T. Simeon, "Motion planning for a two degrees of freedom mobile robot with towing," in *Proc. IEEE Int. Conf. Control Applicat.*, 1989.
- [10] B. d'Andrea-Novet, G. Campion, G. Bastin "Control of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots by State Feedback Linearization," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 14, No.6, pp. 543~559, 1995.
- [11] Z. Shiller and Y.R. Gwo, "Dynamic Motion Planning of Autonomous Vehicles," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 1991.
- [12] B.d. Novel, G. Bastin and G. Campion, "Modelling and Control of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots," *IEEE Int. Conf. on*

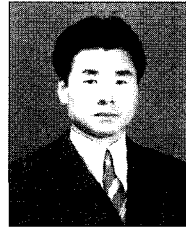
- Robotics and Automation, 1991.
- [13] S. Iida and S. Yuta, "Control of Vehicle with Power Wheeled Steerings using Feedforward Dynamics Compensation," IECON, 1991.
 - [14] S. Iida and S. Yuta, "Feedforward Current Control Method using 2-Dimensional Table for DC Motor Software Servo System," IECON, 1988.
 - [15] X. Yun and Y. Yamamoto, "Internal Dynamics of a Wheeled Mobile Robot," IROS, 1993.
 - [16] B.d. Novel, G. Bastin and G. Campion, "Dynamic Feedback Linearization of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1992.
 - [17] 주진화, 이장명, "이동용 로봇의 메카니즘 설계 및 해석", 대한전자공학회 추계 종합학술대회 논문집, Vol. 15, 1992
 - [18] 주진화, 명지태, 박의열, 이장명, "마크로-마이크로 로봇의 제어에 관한 연구", 대한전자공학회 논문집, Vol. 31-B, No. 9, 1994
 - [19] J. J. Craig, Introduction to Robotics-Mechatronics and Control, 2nd edition. Addison-Wesley Publishing Co., 1986.
 - [20] M. Tounsi, G. Lebert and M. Gautier, "Dynamic identification and control of nonholonomic mobile robots," The 34th IEEE Conf. on Decision and Control, Pre-Print, 1995.
 - [21] S. Iida and S. Yuta, "Control of Vehicle with Power Wheeled Steerings using Feedforward Dynamics Compensation", IECON, 1991.

저자 소개



陳台錫(正會員)

1998년 2월 : 진주산업대학교 전자공학과 졸업(학사). 2000년 2월 : 부산대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2000년 3월~현재 : 부산대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학 중. <주관심분야> 이동로봇설계 및 제어(Mobile Robot). 잉여로봇의 최적제어(Redundant Manipulator). 다중센서융합(Multi-sensor Fusion) 등



李章明(正會員)

第34卷 S編 第1號 參照
현재 : 부산대학교 공과대학 전자공학과 교수. 부산대학교 컴퓨터 및 정보통신 연구소 소장