

구동 캐스터 바퀴를 이용한 전방향 모바일 로봇의 오도메트리와 내비게이션

Odometry and Navigation of an Omni-directional Mobile Robot with Active Caster Wheels

정 의 정, 이 병 주*

(Eui-jung Jung and Byung-Ju Yi)

Abstract: This work deals with navigation of an omni-directional mobile robot with active caster wheels. Initially, the posture of the omni-directional mobile robot is calculated by using the odometry information. Next, the position accuracy of the mobile robot is measured through comparison of the odometry information and the external sensor measurement. Finally, for successful navigation of the mobile robot, a motion planning algorithm that employs kinematic redundancy resolution method is proposed. Through experiments for multiple obstacles and multiple moving obstacles, the feasibility of the proposed navigation algorithm was verified.

Keywords: omni-directional, mobile robot, caster wheel, navigation

I. 서론

모바일 로봇에 사용되는 바퀴들은 여러 가지 종류가 있지만, 모바일 로봇이 평면에서 전방향의 특성을 갖기 위해서는 특별한 구조의 바퀴가 필요하다. 바퀴의 종류 중에서 캐스터 바퀴나 메카넘 바퀴는 기구학적으로 3자유도를 지니는 구조로 설계 될 수 있다. Chen, et al.[1]은 물러를 사용하여 전방향 모바일 로봇을 개발하였으며, Tadakuma, et al.[2]는 옴니 디스크를 사용한 전방향 모바일 로봇을 실험하였다. Ziaie-Rad, et al.[3]과 Berkermeier와 Ma[4]는 6개의 옴니 바퀴를 사용한 전방향 모바일 로봇을 개발하였고, Salih, et al.[5]는 4개의 메카넘 바퀴를 사용한 전방향 모바일 로봇을 개발하였다. 하지만, 전방향 모바일 로봇을 위한 메카넘 바퀴나 그 외 다른 바퀴들은 일반적인 바퀴에 비해 사용시 다소 제한적이다. 반면에 구동 캐스터 바퀴는 일반적인 바퀴의 장점을 갖는 동시에 전방향적인 특성이 있기 때문에 최근 많은 연구자들의 관심을 받고 있다.

Yi와 Kim[6]은 최초로 구동 캐스터 바퀴를 이용한 전방향 모바일의 기구학적 모델을 제시하였고, Wada, et al.[7]은 두개의 캐스터 바퀴와 하나의 회전 구동을 이용한 전방향 모바일 로봇을 개발하였다. Ushimi, et al.[8]은 두개의 캐스터 바퀴를 사용한 전방향 모바일 로봇을 개발하였고, Lee, et al.[9]는 이러한 형태의 로봇을 위한 모션 생성 알고리즘을 구현하였으며, Park, et al.[10]은 이러한 형태의 로봇을 위한 최적의 설계 방법을 제시하였다.

지금까지 모바일 로봇의 내비게이션에 대한 연구는 많이 이루어져 왔지만, 전방향 모바일 로봇을 이용한 내비게이션 연구는 거의 이루어 지지 않았다. Zavlangas, et al.[11]은 메카

넘 바퀴를 이용한 전방향 모바일 로봇으로 내비게이션을 구현하였지만, 원하는 속도 명령을 단순 적분하여 신뢰할만한 오도메트리 정보를 얻을 수 없었다. 이러한 관점에서 본 논문은 구동 캐스터 바퀴를 이용한 전방향 모바일 로봇을 조종하기 위한 기구학적 모델을 언급하고, 다중 엔코더를 이용하여 신뢰할 수 있는 오도메트리 정보를 얻을 수 있는 알고리즘을 제안한다. 그리고 실험을 통해 제안된 알고리즘의 효용성을 보이고, 장애물을 피하면서 원하는 목적지까지 이동하는 기구학적 여유자유도 알고리즘을 적용한 내비게이션을 보여준다.

II. 기구학적 모델링

1. 모빌리티(mobility)

모빌리티는 한 시스템의 모든 위치를 기술하기 위해 필요한 최소의 입력 매개 변수의 수이다. 그림 1(a)와 같이 세 개의 바퀴를 지니는 전방향 모바일 로봇에 대해 살펴보고자 한다. 모든 바퀴는 지면에 점 접촉을 하며, 지면과 수평 방향으로 미끄러짐이 없고, 지면과 수직 방향으로만 회전이 가능하다고 가정하면 그림 1(b)와 같이 각 바퀴의 순간적인 모션에 대한 모델링은 두 개의 회전 관절과 하나의 선형 관절로 나타낼 수 있다.

그림 1과 같은 모델에 Grübler 공식을 이용해 모빌리티를 구하면 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다.

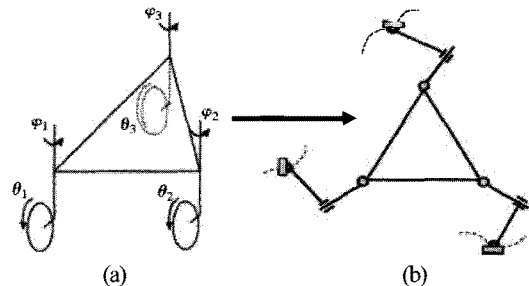


그림 1. 전방향 모바일 로봇의 모델링.

Fig. 1. Modeling of omni-directional mobile robot.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 5. 12., 수정: 2009. 7. 2., 채택확정: 2009. 7. 23.

정의정, 이병주: 한양대학교 전자컴퓨터공학부

(jeuij79@naver.com/bj@hanyang.ac.kr)

※ 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. R01-2009-0059948)이고, 본 연구는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과임.

$$M = D(L-1) - \sum_{i=1}^J C_i = 3(8-1) - \sum_1^9 (2) = 3 \quad (1)$$

여기서, D는 로봇이 움직일 수 있는 차원을 나타내고, L은 링크의 수를 나타내며, J는 관절의 수를 나타내고, C는 동작구속의 수를 나타낸다. 위의 모빌리티 해석을 통해 이 로봇은 최소한 3개의 구동관절이 있어야 함을 보여주고 있다.

2. 1차 기구학

그림 2와 같이 이 시스템은 세 개의 캐스터 바퀴와 세 개의 오프셋 링크 그리고 몸체로 구성되어 있다. 모바일 로봇의 움직임은 평면상에 구속되어 있다고 가정하고 미끄러짐은 없다고 가정한다. 그림 2에서 X와 Y는 전역 기준 좌표계를 나타내며 i와 j는 전방향 로봇 플랫폼의 지역 기준 좌표계를 나타낸다. C는 그 지역 기준좌표의 중심을 나타낸다. θ 는 각 바퀴의 구동각을 나타내고, φ 는 각 링크의 사이각을 나타낸다. η 는 전역 기준 좌표계의 X축과 캐스터 바퀴의 사이각을 나타내고, r과 d는 각각 바퀴의 반지름과 링크의 길이를 뜻한다.

모바일 로봇의 기구학적인 해석을 위해서 intermediate coordinate transfer method [12] 적용하였다. i-번째 바퀴중심의 선형 속도는 다음과 같다.

$$\mathbf{v}_{oi} = \dot{\theta}_i (\sin \varphi_i \mathbf{i} + \cos \varphi_i \mathbf{j}) \times r \mathbf{k} \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

그리고 각 체인에 모바일 로봇 중심의 선형 속도 \mathbf{v}_c 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_c &= \mathbf{v}_{o1} + \dot{\eta}_1 \mathbf{k} \times \overline{O_1 A_1} + \omega \mathbf{k} \times \overline{A_1 C} \\ &= \dot{\theta}_1 (\sin \varphi_1 \mathbf{i} + \cos \varphi_1 \mathbf{j}) \times r \mathbf{k} \end{aligned} \quad (3)$$

$$+ \dot{\eta}_1 \mathbf{k} \times (-d \cos \varphi_1 \mathbf{i} + d \sin \varphi_1 \mathbf{j}) + \omega \mathbf{k} \times \left(\frac{l}{2} \mathbf{i} + a \mathbf{j} \right)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_c &= \mathbf{v}_{o2} + \dot{\eta}_2 \mathbf{k} \times \overline{O_2 A_2} + \omega \mathbf{k} \times \overline{A_2 C} \\ &= \dot{\theta}_2 (\sin \varphi_2 \mathbf{i} + \cos \varphi_2 \mathbf{j}) \times r \mathbf{k} \end{aligned} \quad (4)$$

$$+ \dot{\eta}_2 \mathbf{k} \times (-d \cos \varphi_2 \mathbf{i} + d \sin \varphi_2 \mathbf{j}) + \omega \mathbf{k} \times \left(-\frac{l}{2} \mathbf{i} + a \mathbf{j} \right)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_c &= \mathbf{v}_{o3} + \dot{\eta}_3 \mathbf{k} \times \overline{O_3 A_3} + \omega \mathbf{k} \times \overline{A_3 C} \\ &= \dot{\theta}_3 (\sin \varphi_3 \mathbf{i} + \cos \varphi_3 \mathbf{j}) \times r \mathbf{k} \end{aligned} \quad (5)$$

$$+ \dot{\eta}_3 \mathbf{k} \times (-d \cos \varphi_3 \mathbf{i} + d \sin \varphi_3 \mathbf{j}) + \omega \mathbf{k} \times (-b \mathbf{j})$$

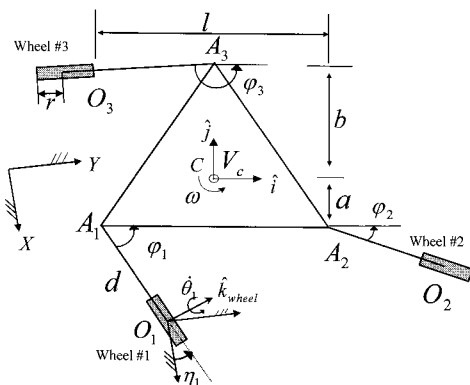


그림 2. 기구학 매개 변수. Fig. 2. Kinematic parameters.

여기서, ω 는 모바일 로봇의 회전 속도를 나타내며, 아래 식과 같은 관계식을 갖는다.

$$\omega = \dot{\eta}_i + \dot{\varphi}_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

모바일 로봇의 속도 벡터를 식 (7)과 같이 정의하고, 식 (3)-(6)의 관계식을 행렬의 형태로 표현하면 식 (8)-(10)과 같다.

$$\dot{\mathbf{u}} = (\mathbf{v}_c \quad \mathbf{v}_c \quad \omega)^T \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} -d_{12} \sin \alpha_1 - d_{11} \sin \varphi_{11} - a & r \cos \alpha_1 & -a & -d_{11} \sin \varphi_{11} - a \\ -d_{12} \cos \alpha_1 - d_{11} \cos \varphi_{11} + \frac{l}{2} & -r \sin \alpha_1 & \frac{l}{2} & -d_{11} \cos \varphi_{11} + \frac{l}{2} \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\varphi}_{11} \\ \dot{\varphi}_{12} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\dot{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} -d_{22} \sin \alpha_2 - d_{21} \sin \varphi_{21} - a & r \cos \alpha_2 & -a & -d_{21} \sin \varphi_{21} - a \\ -d_{22} \cos \alpha_2 - d_{21} \cos \varphi_{21} - \frac{l}{2} & -r \sin \alpha_2 & -\frac{l}{2} & -d_{21} \cos \varphi_{21} - \frac{l}{2} \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\eta}_2 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\varphi}_{21} \\ \dot{\varphi}_{22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\dot{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} -d_{32} \sin \alpha_3 - d_{31} \sin \varphi_{31} + b & r \cos \alpha_3 & b & -d_{31} \sin \varphi_{31} + b \\ -d_{32} \cos \alpha_3 - d_{31} \cos \varphi_{31} & -r \sin \alpha_3 & 0 & -d_{31} \cos \varphi_{31} \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\eta}_3 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\varphi}_{31} \\ \dot{\varphi}_{32} \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (7)-(10)을 살펴보면 주어진 모바일 로봇은 병렬형 구조의 기구학식을 갖고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 전방향 모바일 로봇의 기구학은 매 순간 고정된 지면에 연결된 전형적인 병렬형 구조와 동일하다. 식(7)-(10)의 역을 구하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\varphi}_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{dr} \begin{bmatrix} -r \sin \varphi_1 & -r \cos \varphi_1 & \frac{l}{2} r \cos \varphi_1 - ar \sin \varphi_1 \\ d \cos \varphi_1 & -d \sin \varphi_1 & \frac{l}{2} d \sin \varphi_1 + ad \cos \varphi_1 \\ r \sin \varphi_1 & r \cos \varphi_1 & dr + ar \sin \varphi_1 - \frac{l}{2} r \cos \varphi_1 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_2 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\varphi}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{dr} \begin{bmatrix} -r \sin \varphi_2 & -r \cos \varphi_2 & \frac{l}{2} r \cos \varphi_2 - ar \sin \varphi_2 \\ d \cos \varphi_2 & -d \sin \varphi_2 & -\frac{l}{2} d \sin \varphi_2 + ad \cos \varphi_2 \\ r \sin \varphi_2 & r \cos \varphi_2 & dr + ar \sin \varphi_2 + \frac{l}{2} r \cos \varphi_2 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_3 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\varphi}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{dr} \begin{bmatrix} -r \sin \varphi_3 & -r \cos \varphi_3 & br \sin \varphi_3 \\ d \cos \varphi_3 & -d \sin \varphi_3 & -bd \cos \varphi_3 \\ r \sin \varphi_3 & r \cos \varphi_3 & dr - br \sin \varphi_3 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \quad (14)$$

이 모바일 로봇의 모빌리티는 3이기 때문에 세 개의 최소 입력 매개변수를 사용할 수 있지만, 세 개의 입력으로는 특이점을 피할 수 없음이 알려져 있다. 예를 들어 A₁ 부분(캐스터 회전축)에만 모터를 세 개 사용하면 로봇이 이동 할 수

없게 된다. Campion, et al.[13]과 Yi와 Kim[6]은 특이점을 피하기 위해서 최소한 네 개의 입력 매개변수를 사용해야 하며 또한 여유 구동을 지남으로 인해 구동력을 배가할 수 있는 장점이 있음을 밝혔다. 본 논문에서는 세 개의 체인을 지니며 각 체인이 두 개의 구동기로 구동되는 전방향 모바일 로봇에 대하여 살펴본다.

III. 오도메트리(odometry)

1. 기하학적 해석

모바일 로봇이 내비게이션을 하기 위해서는 자신의 위치와 자세를 알아야 한다. 이 문제에 대해 가장 널리 사용되는 방법 중 하나는 로봇의 기하학적인 관계를 통해 자신의 위치를 계산하는 것이다.

그림 3은 구동캐스터를 이용한 전방향 모바일 로봇을 보여주고 있다. 각 체인은 기구학적 모델에서 3자유도를 지니고 있다. 하지만 그림 4와 같이 각 체인은 ϕ_i 와 θ_i 를 측정하는 엔코더가 두 개뿐이다. 이 모바일 로봇은 모터로 구동되는 조인트 ϕ_i 와 θ_i 가 있고 구동이 없는 조인트 η_i 가 있기 때문이다. 따라서 η_i 는 각 체인의 기하학적인 관계를 통해 계산하여야 한다.

모바일 로봇의 위치와 자세는 그림 5와 같이 전역 좌표계를 기준으로 몸체의 중심 좌표 x 와 y 그리고 회전각 ϕ 로 표현할 수 있다. 따라서 로봇의 위치와 자세는 다음과 같이 (3×1) 벡터로 표현할 수 있다.

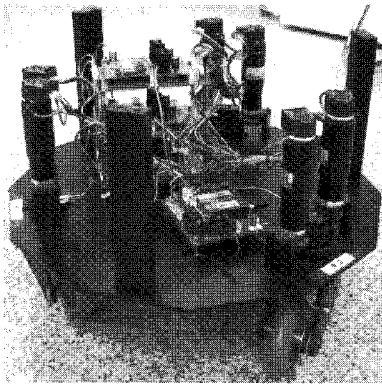


그림 3. 구동캐스터를 이용한 전방향 모바일 로봇.
Fig. 3. The omni-directional mobile robot with active caster wheels.

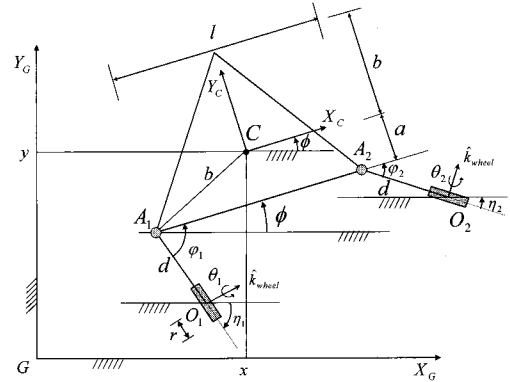


그림 5. 전방향 모바일 로봇의 기하학 매개 변수.
Fig. 5. Geometric parameters of the omni-directional mobile robot.

$$\xi = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \phi \end{bmatrix} \tag{15}$$

이 모바일 로봇의 위치와 자세는 그림 5와 같이 두 개의 체인에 있는 엔코더 정보(ϕ_i 와 θ_i)를 이용해 얻을 수 있다. 글로벌 좌표에 대한 캐스터 바퀴의 회전각 η_i 는 아래와 같은 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\eta_i = \phi_i - \phi \tag{16}$$

일단 ϕ 가 주어진다면 아래와 같은 과정을 통해 모바일 로봇의 위치와 자세를 결정할 수 있다.

Step 1: 바퀴의 위치와 회전각의 초기값을 정한다.

$$\begin{aligned} O_1 : (x_{01}, y_{01}) \quad O_2 : (x_{02}, y_{02}) \\ \eta_i[0] = \phi_i[0] = \theta_i[0] = 0 \\ x_{01}[0] = d - l/2, \quad y_{01}[0] = -a \\ x_{02}[0] = d + l/2, \quad y_{02}[0] = -a \end{aligned} \tag{17}$$

Step 2: 바퀴의 위치를 갱신한다.

$$\begin{aligned} x_{01}[n+1] &= x_{01}[n] + r\Delta\theta \cos(\eta_1[n]) \\ y_{01}[n+1] &= y_{01}[n] - r\Delta\theta \sin(\eta_1[n]) \\ x_{02}[n+1] &= x_{02}[n] + r\Delta\theta \cos(\eta_2[n]) \\ y_{02}[n+1] &= y_{02}[n] - r\Delta\theta \sin(\eta_2[n]) \end{aligned} \tag{18}$$

Step 3: 캐스터 바퀴 회전축의 위치를 계산한다.

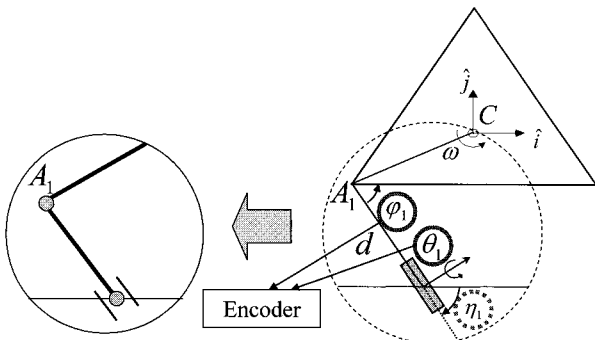
$$\begin{aligned} A_1 : (x_1, y_1) \quad A_2 : (x_2, y_2) \\ x_1 = x_{01} - d \cos(\eta_1), \quad y_1 = y_{01} + d \sin(\eta_1) \\ x_2 = x_{02} - d \cos(\eta_2), \quad y_2 = y_{02} + d \sin(\eta_2) \end{aligned} \tag{19}$$

Step 4: 모바일 로봇의 위치를 계산한다.

$$\begin{aligned} C : (x_c, y_c) \\ x_c = x_1 + b \cos\left(\frac{\pi}{6} + \phi\right) \\ y_c = y_1 + b \sin\left(\frac{\pi}{6} + \phi\right) \\ \phi = \text{atan2}((y_2 - y_1), (x_2 - x_1)) \end{aligned} \tag{20}$$

그림 4. 엔코더를 통해 알 수 있는 매개 변수들.

Fig. 4. Parameters determined by encoders.



이러한 과정을 샘플링 타임마다 반복적으로 실행하면 구

동 캐스터를 이용한 전방향 모바일 로봇의 위치를 구할 수 있게 된다.

2. 실험

구동 캐스터를 이용한 전방향 모바일 로봇의 오도메트리 정보를 얻기 위해 본 논문에서 제안된 방법을 평가하기 위해서 직사각형의 경로를 따라 움직이는 실험을 하였다. 이 실험에서 모바일 로봇의 실제 위치를 측정하기 위해서 그림 6 과 같이 글로벌 좌표 한 곳에 고정되어 있는 레이저 거리 센서를 사용하였다. 그림 6은 레이저 거리 센서를 이용한 모바일 로봇 위치 측정 시스템을 보여주며, 표 1은 레이저 거리 센서의 세부사항을 보여주고 있다. 그림 6에서 보이는 것처럼 모바일 로봇의 중심에 수직으로 판을 세워두고, 로봇이 경로를 따라 움직일 때 레이저 거리 센서로 측정하여 얻은 데이터는 그림 7과 같다. 이 데이터를 식 (21)을 통해 변환하면 그림 8과 같이 글로벌 기준좌표에서 주어진 경로를 따라

움직인 거리를 얻을 수 있다. 그림 8에서 수평선들은 모바일 로봇의 중심에 수직으로 세워진 판을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (21)$$

여기서 θ 는 글로벌 좌표와 레이저 센서 좌표간의 회전각을 나타내고, Δx 와 Δy 는 글로벌 좌표와 레이저 센서 좌표간의 거리를 나타낸다.

그림 9는 주어진 경로와 모바일 로봇이 실제 이동한 위치를 보여준다. 실선은 주어진 경로를 나타내고, 점선은 본 논문에서 제안된 방법을 적용한 모바일 로봇의 내부 오도메트리 정보를 나타내며, 파선은 로봇이 경로를 따라가는 동안 외부의 레이저 센서로 측정한 로봇의 위치이다. 센서에서 측정된 로봇의 위치는 모바일 로봇 위에 있는 수직판의 중심으로 계산하였다.

비록 모바일 로봇의 위치를 측정함에 있어서 레이저 센서의 분해능에 의한 잡음이 있지만, 주어진 사각형의 경로를 잘 따라 가고 있음을 알 수 있다. 그림 10은 직사각형의 주어진 경로를 따라 내부 오도메트리 정보만으로 이동하여 원

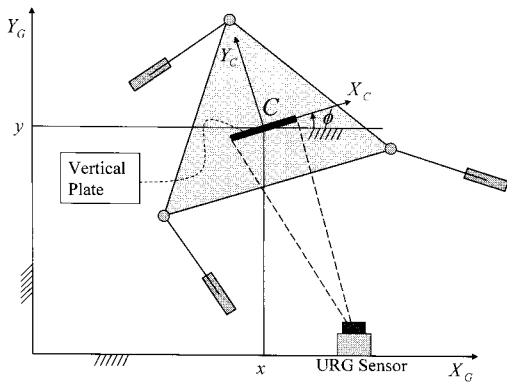


그림 6. 레이저 센서를 이용한 로봇 위치 측정 시스템.
Fig. 6. External measurement system using a laser range finder.

표 1. 레이저 거리 센서의 세부사항.
Table 1. Specification of the laser range finder.

Model	URG-04LX(HOKUYO Co.)
Measurement Range	20~4000 mm
Measurement resolution	1 mm
Angular Range	240 deg
Angular Resolution	0.3515625 deg

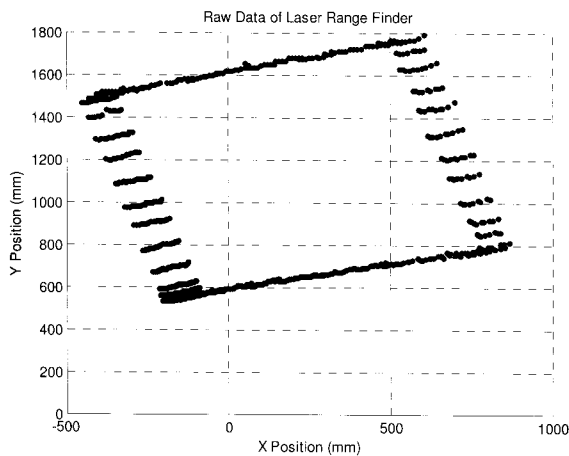


그림 7. 레이저 센서 좌표에서 본 수직판의 위치.
Fig. 7. Positions of the vertical plate in the laser range finder frame.

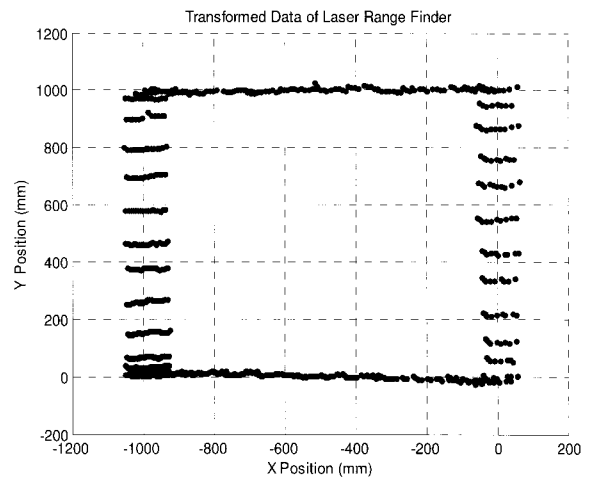


그림 8. 글로벌 좌표에서 본 수직판의 위치.
Fig. 8. Positions of the vertical plate in the global frame.

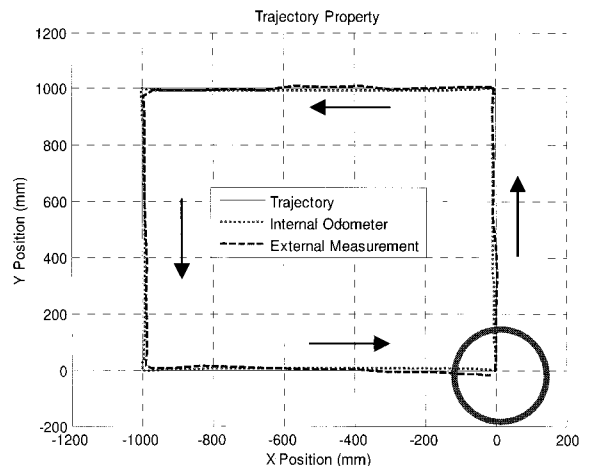


그림 9. 주어진 경로에 따른 로봇의 위치.
Fig. 9. Positions of the mobile robot following the given trajectory.

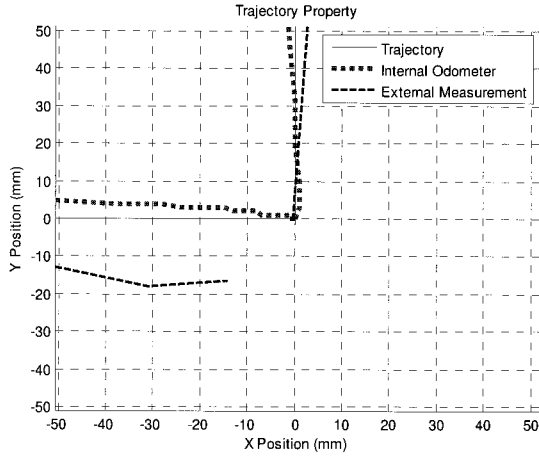


그림 10. 전방향 모바일 로봇의 오도메트리 오차.

Fig. 10. Odometry error of the omni-directional mobile robot.

점으로 돌아 왔을 때 원점 주변을 확대하여 보여주고 있다. 내부 오도메트리는 원점으로 돌아온 것으로 알려 주지만 실제 외부에서 측정된 결과를 보면 4m를 이동한 후 약 1cm의 오도메트리 오차가 발생하였음을 알 수 있다. 그림 10에서 내부 오도메트리를 표시한 선과 외부에서 측정된 선의 차이는 바퀴의 미끄러짐 등에 의한 오도메트리 오차를 보여준다.

모든 종류의 모바일 로봇은 오도메트리 오차가 생길 수 밖에 없지만, 본 논문에서 제안된 모바일 로봇의 구조는 몸체의 회전 없이 좌우 이동이 가능하기 때문에 차동 방식의 모바일 로봇보다 좀더 정확한 오도메트리를 얻을 수 있다. 이 전방향 모바일 로봇은 차동 방식의 모바일 로봇보다 좀더 복잡한 구조를 갖고 있기 때문에 시스템적인 오도메트리 오차에 대한 해석이 다소 복잡하다. 따라서 추후에 오도메트리 오차에 대한 보정연구가 진행될 것이다.

IV. 내비게이션

1. 내비게이션 알고리즘

모바일 로봇이 내비게이션을 하기 위해서는 글로벌좌표에서 자신의 위치를 알아야 하고, 또한 장애물을 인식하여 피할 수 있어야 한다. 특히 전방향 모바일 로봇은 3자유도를 지니고 있기 때문에 장애물을 피하면서 이동할 때 차동 방식의 모바일 로봇 보다 좀더 정밀한 움직임이 가능하다. 또한 로봇에 장착된 센서의 회전 없이 이동이 가능해서 보다 정확한 측정이 가능하다. 따라서 본 논문에서는 전방향 모바일 로봇의 특성을 살릴 수 있는 내비게이션 알고리즘을 제안한다.

내비게이션의 첫 번째 목표는 현재 위치에서 목표지점까지 이동하는 것이다. 두 번째 목표는 장애물을 피하는 것이 될 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 로봇이 자신의 위치뿐만 아니라 장애물의 위치와 목표지점의 위치까지 모두 추정해야 한다. 다음으로 내비게이션 알고리즘은 모바일 로봇의 위치와 목표지점까지의 거리를 최소화 해야 하며, 모바일 로봇과 장애물의 간의 거리는 최대화 해야 한다. 따라서 성능지수는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \min \{P_G = (x - x_G)^2 + (y - y_G)^2\} \\ \max \{P_i = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2\}, \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 x 와 y 는 모바일 로봇의 위치를 나타내고 x_G 와 y_G 는 목표지점의 위치를 나타낸다. 그리고 x_i 와 y_i 는 i 번 장애물의 위치를 나타낸다.

전방향 모바일 로봇을 이용한 내비게이션을 구현하기 위해서 로봇의 움직임을 기구학적 여유자유도를 지니는 로봇으로 간주하여 모델링을 하였다. 우선 모바일 로봇 몸체의 회전속도(ω)를 아래와 같이 입력으로 간주하면 아래와 같은 식으로 표현 할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{u}} = \omega = J \begin{bmatrix} v_{cx} \\ v_{cy} \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{cx} \\ v_{cy} \\ \omega \end{bmatrix} \quad (23)$$

여기서 $\begin{bmatrix} v_{cx} & v_{cy} & \omega \end{bmatrix}^T$ 는 글로벌 좌표를 기준으로 한 모바일 로봇의 속도이다. 따라서 이 식의 일반해는 아래 식과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{cx} \\ v_{cy} \\ \omega \end{bmatrix} = J^+ \dot{\mathbf{u}} + \left([I] - J^+ J \right) \nabla H \quad (24)$$

여기서 H 는 최적화가 필요한 제차해이다. 따라서 전방향 모바일 로봇의 내비게이션을 위해 ∇H 를 아래와 같이 정의하였다.

$$\nabla H = \left(-K_G \frac{\partial P_G}{\partial \theta} + \sum K_i \frac{\partial P_i}{\partial \theta} \right) \quad (25)$$

여기서 $\theta = [x \ y \ \phi]^T$ 이고 P_G 와 P_i 는 최적화가 이루어질 성능 지수이다. 계수 K_G 와 K_i 의 부호에 따라 주어진 성능 지수는 최소화 되거나 최대화 되면서 모바일 로봇은 조정 된다. 이 내비게이션의 경우에는 로봇의 위치와 목표지점의 위치 사이의 거리를 최소화하기 위해서 K_G 는 양수가 되어야 하고, 로봇과 장애물의 거리는 최대화하기 위해서 K_i 는 음수가 되어야 한다.

모바일 로봇의 회전 속도를 0으로 설정하면 모바일 로봇은 회전 없이 이동하고 제차해 부분이 로봇을 내비게이션 하도록 한다. K_G 는 목표점의 거리에 따라 실험적으로 정하고 K_i 는 아래의 식으로 주어진다.

$$K_i = ke \frac{\ln(0.01) S_i}{h} \quad (26)$$

여기서 k 는 상수의 가중치이며, h 는 로봇이 장애물에 접근 가능한 거리는 나타낸다. S_i 는 로봇과 장애물 사이의 실제 거리이다. K_i 는 식 (26)에 따라 $S_i = h$ 일 때 $0.01 \times k$ 와 같은 값을 갖게 된다. 장애물들이 접근 가능한 거리 밖에 있을 경우 그 장애물은 고려할 필요가 없으므로 K_i 는 장애물과 로봇 사이의 거리에 따라 변화해야 한다. 그리고 식 (26)을 사용하면 장애물이 더 가까이 있을수록 더 큰 입력을 주게 된다. 그림 11은 장애물과 로봇 사이의 거리에 따른 K_i 의 변화를 보여주는 그래프이다. 이 그래프에서 k 는 10으로 h 는 700으로 주어졌다.

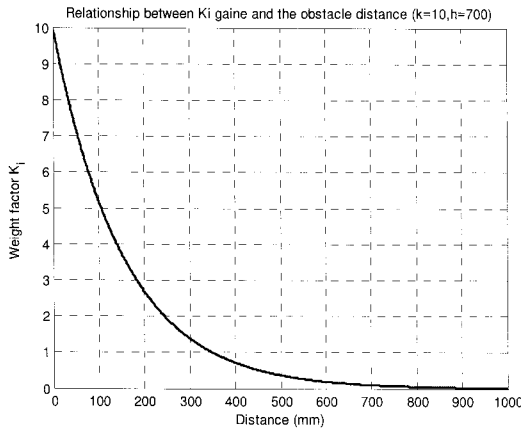


그림 11. 거리에 따른 가중치 K_i 의 그래프.

Fig. 11. Weight factor K_i property with respect to the distance.

2. 실험

본 논문에서 제안된 전방향 모바일 로봇을 위한 내비게이션 알고리즘의 효용성을 증명하기 위해 실험을 진행 하였다. 이 실험에서 로봇의 위치를 구하기 위해 III 장에서 제안된 오도메트리 정보를 이용하였으며, 레이저 센서를 이용해 로봇과 장애물의 거리를 검출하고 주변 지도를 작성하였다.

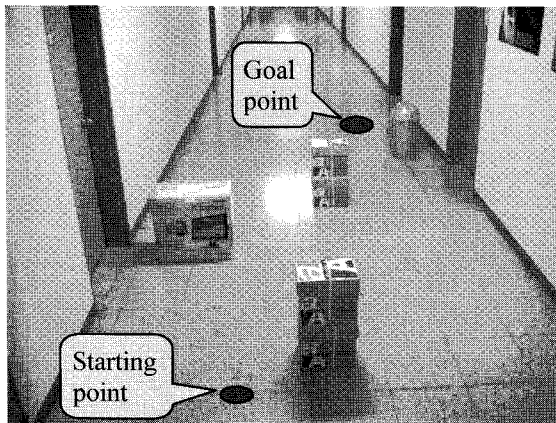


그림 12. 실험 환경 사진.

Fig. 12. The picture of real environment.

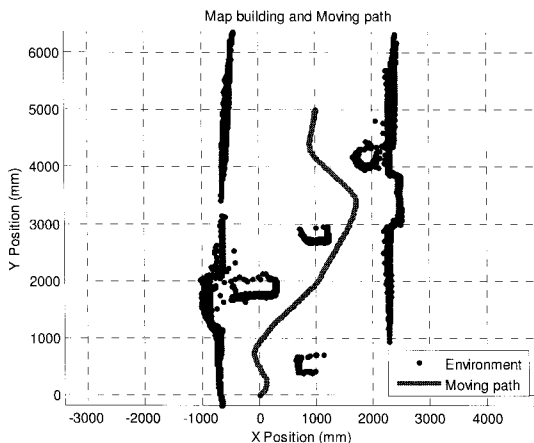


그림 13. 지도 작성과 내비게이션 결과.

Fig. 13. The result of map building and navigation.

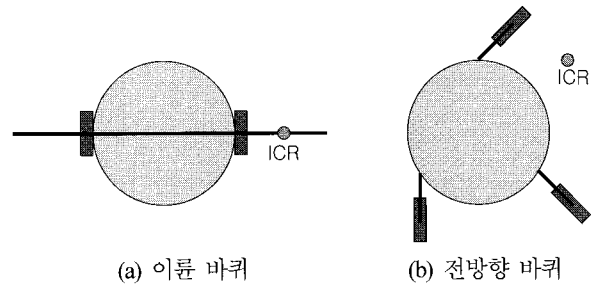


그림 14. 바퀴 구조가 다른 모바일 로봇의 ICR 비교.
Fig. 14. ICR comparison of two different wheel structure.

그림 12는 실험 환경을 보여준다. 첫 번째 목표는 모바일 로봇이 출발점 (0,0)을 출발하여 목표지점(1000,5000)으로 이동하는 것이다. 모바일 로봇이 목표지점으로 이동하는 동안 로봇은 레이저 센서를 이용하여 장애물을 피하고 주변환경과 장애물에 대한 정보를 수집하여 지도를 작성하였다. 그림 13은 모바일 로봇이 내비게이션 하는 동안 수집한 주변 정보와 로봇이 이동해온 경로를 보여주고 있다. 중간에 꺾여있는 실선은 로봇이 이동해온 경로를 보여주며, 점들은 주변 환경을 보여준다.

기존의 이륜바퀴 이동로봇은 전진만 가능하며, 측면으로 이동하기 위해서는 반드시 회전을 하여야 한다. 로봇이 회전할 때는 ICR (Instantaneous center of rotation)를 중심으로 회전하게 되는데, 이륜바퀴 로봇은 그림 14(a)와 같이 두 바퀴의 중심을 지나는 직선 위에 ICR이 존재하기 때문에 움직임에 제약이 따르게 된다. 하지만 전방향 이동 로봇은 전후좌우로 언제든지 이동할 수 있으며, ICR 또한 로봇이 이동하는 평면 위에 어디든지 원하는 위치로 설정하여 회전할 수 있기 때문에 보다 자유로운 이동이 가능하다

보통의 이륜 바퀴를 사용하는 모바일 로봇은 장애물을 피하거나 이동할 때 로봇이 회전을 해야 하기 때문에 오도메트리 오차가 더 커지게 되고 또한 레이저 센서 정보도 오차가 더 커지게 된다. 하지만, 전방향 모바일 로봇을 이용하여 내비게이션을 하게 되면 로봇과 센서가 회전하지 않고 이동이 가능하기 때문에 이러한 문제가 줄어들게 된다. 따라서 장애물 등의 외부 환경 정보를 얻을 때 오차를 좀 더 줄일 수 있다. 이륜 방식의 모바일 로봇과 비교하였을 때 이러한 부분이 전방향 모바일 로봇의 장점 중 하나이다.

V. 결론

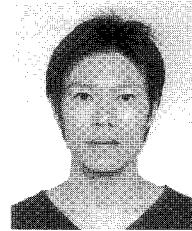
본 논문에서는 세 개의 구동 캐스터를 이용한 전방향 모바일 로봇의 내비게이션에 대한 연구를 수행하였다. 모바일 로봇의 기하학적인 바퀴 구조를 통해 오도메트리 정보를 구하는 방법을 제안하였으며, 외부에서 로봇의 위치를 측정하는 시스템을 통하여 주어진 경로를 따라가는 동안 로봇의 오도메트리 정보에 대한 정확성을 확인하였다. 또한 목표 지점까지 이동하면서 장애물을 피해가는 새로운 내비게이션 알고리즘을 제안하였다. 그리고 제안된 알고리즘은 실험을 통해 그 효용성을 입증하였다.

참고문헌

[1] P. Chen, S. Mitsutake, T. Isoda, and T. Shi, "Omni-directional

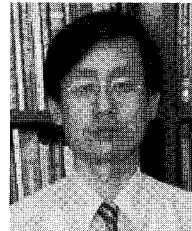
- robot and adaptive control method for off-road running," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 2, pp. 251-256, 2002.
- [2] K. Tadakuma, S. Hirose, and R. Tadakuma, "Development of VmaxCarrier2: omni-directional mobile robot with function of step-climbing," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3111-3118, 2004.
- [3] S. Ziaie-Rad, et al., "A practical approach to control and self-localization of Persia omni directional mobile robot," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3473-3479, 2005.
- [4] K. L. Moore and N. S. Flann, "A six-wheeled omnidirectional autonomous mobile robot," *IEEE Control System Magazine*, vol. 20, no. 6, pp. 53-66, 2000.
- [5] J. E. M. Salih, et al., "Designing omni-directional mobile robot with mecanum wheel," *American Journal of Applied Sciences*, vol. 3, no. 5, pp. 1831-1835, 2006.
- [6] B.-J. Yi and W. K. Kim, "The Kinematics for redundantly actuated omni-directional mobile robots," *Journal of Robotic Systems*, vol. 19, no. 6, pp. 255-267, 2002.
- [7] M. Wada, A. Takagi, and S. Mori, "Caster drive mechanism for holonomic and omnidirectional mobile platforms with no over constraint," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2000.
- [8] N. Ushimi, M. Yamamoto, and A. Mohri, "Two wheels caster type odometer for omni-directional vehicles," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 497-502, 2003.
- [9] J. H. Lee, S. Yuta, E. Koyanagi, and B.-J. Yi, "Command system and motion control for caster-type omni-directional mobile robot," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2714-2720, 2005.
- [10] T. B. Park, J. H. Lee, B.-J. Yi, W. K. Kim, B. J. You, and S. R. Oh, "Optimal design and actuator sizing of redundantly actuated omni-directional mobile robots," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 732-737, 2002.
- [11] P. Zavlangas, et al., "Fuzzy Obstacle Avoidance and Navigation for Omnidirectional Mobile Robots," *ESIT 2000*, pp. 375-382, 2000.
- [12] R. A. Freeman and D. Tesar, "Dynamic modeling of serial and parallel mechanisms/robotic systems," Part I-Methodology, Part II-Applications, *20th ASME Biennial Mechanism Conf.*, Orlando, FL, pp. 7-27, 1988.
- [13] C. Champion, G. Batin, and B. D'Andrea-Novel, "Structural properties and classification of kinematics and dynamics models of wheeled mobile robot," *IEEE Trans. on Robot and Automation*, vol. 4, no. 2, pp. 281-340, 1987.

정의정



2006년 한양대학교 전자컴퓨터공학부 학사. 2008년 한양대학교 전자전기제어계측과 석사. 2008년~현재 한양대학교 전자전기제어계측과 박사과정. 관심분야는 이동로봇, 기구학.

이병주



1984년 한양대학교 기계공학과 학사. 1986년 미 텍사스 주립대 기계공학과 석사. 1991년 미 텍사스 주립대 기계공학과 박사. 1991년~1995년 한국기술교육대학교 제어기계과 교수. 1995년~현재 한양대학교 전자컴퓨터 공학부 교수. 관심분야는 생체모방 로봇 시스템 설계 및 제어 의료로봇.