
복도환경의 지역최소점 회피가 가능한 VFF 기반의 이동로봇 주행제어

진태석*

Navigation Control of Mobile Robot based on VFF to Avoid Local-Minimum
in a Corridor Environment

Tae-Seok Jin*

이 논문은 2010년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음.

요 약

본 논문에서는 이동로봇에 장착된 초음파 센서 및 CCD 카메라를 통해 입력되는 환경정보에서 장애물을 인식 및 추출하여 주행전방의 환경을 구분하는 방법을 제시하였다. 복도 내에서 주행하는 로봇에 탑재된 초음파에 입력된 거리 데이터 정보에 의해 장애물을 검출하고 이동로봇이 미지의 동적인 환경을 초음파센서로 인지하여 지능적으로 목표점을 찾아가는 운행 알고리즘을 제안하고 검증하기 위한 실험결과를 제시하였다. 이동로봇에 다양한 센서 기술들을 이용하여 실내에서 활용하기 적합한 지능적 역할을 수행할 수 있는 다목적용 자율 이동 로봇에 환경인식을 위한 pan/tilt 카메라(EVI-D30)를 장착하여 주행실험을 할 수 있도록 하였다. 제작한 로봇의 주행성능을 보이기 위해서 VFF 알고리즘을 적용하여 임의의 환경에서도 자율주행의 실험과 결과를 통해 제시한 방법에 대한 유효성을 검증하였다.

ABSTRACT

This paper deals with the method of using the amended virtual force field technique to avoidance the front environment(wall, obstacles etc.) in navigating by using the environmental informations recognized by a ultrasonic-ring and pan/tilt CCD camera equipped on a mobile robot. we will give an explanation for the robot system architecture designed and implemented in this study and a short review of existing techniques, since there exist several recent thorough books and review paper on this paper. It is proposed the result from the experimental run based on a virtual force field(VFF) method to support the validity of the aforementioned architecture of mobile service robot for local navigation and obstacle avoidance for autonomous mobile robots. We will conclude by discussing some possible future extensions of the project. The results show that the proposed algorithm is apt to identify obstacles in an indoor environments to guide the robot to the goal location safely.

키워드

이동로봇, 실내주행, 장애물 회피, 다중센서, 인식

Key word

mobile robot, indoor navigation, obstacle avoidance, multi-sensor, recognition

* 종신회원 : 동서대학교 메카트로닉스공학과
(교신저자, jints@dongseoo.ackr)

접수일자 : 2010. 12. 28
심사완료일자 : 2011. 02. 17

I. 서 론

이동로봇이 자율적인 행동을 하기 위해서는 환경인식, 경로 계획 및 주행제어, 그리고 위치추정 및 보정 등의 기본적인 능력을 갖추어야 한다[1, 2]. 특히, 초음파센서를 이용한 지도 생성에 관한 연구에 있어서 지도를 표현하는 방식은 크게 격자형(grid) 표현 방식과 특징점(feature) 표현 방식으로 나누어진다[3]. 격자형 표현 방식은 로봇이 움직일 수 있는 공간과 벽이나 장애물 등이 차지하는 공간의 비교를 이용하기 때문에 장애물 회피나 지역적인 자율 주행 기법에서 많이 사용된다. 하지만 로봇의 위치 추정 등에 이용되는 특징점들에 대한 정확한 정보를 포함시키기 어렵다. 반면, 특징점 기반의 표현 방식은 전체적인 주행을 위한 경로 계획이나 로봇의 위치 추정에 유리하지만, 장애물 회피 등에 이용하려면 이동 가능한 공간에 대한 실시간 계산을 필요로 하므로 격자형 표현 방식에 비해 성능이 떨어진다. 하지만 최근 프로세서의 성능 향상으로 이러한 제약은 많이 완화되어 주변 환경에 대한 정확한 정보를 저장할 수 있는 카메라 기반의 환경인식 데이터와 초음파 위치정보를 이용한 센서융합에 의한 주위환경인식 및 주행방법이 선호된다[4, 5].

이동로봇을 사용하여 복도 환경을 인식하는 방법에 대해서는 많은 선행 연구가 이루어져왔으며 본 논문에서는 현재의 입력 영상으로부터 복도 환경을 인식하기 위하여, 미리 복도 환경에 대한 데이터를 저장한 후, 이를 기준으로 현재의 영상과 매핑을 통해 장애물 및 복도의 코너부분 등을 인식하는 방법이 사용되고 있다. 따라서, 초음파 정보에 따른 이동 로봇의 정확한 현재 주행에 대한 파악이 중요하며, 영상정보에 따른 복도 환경의 특징점들을 미리 저장하고 있어야만 현재 입력에 대한 두 데이터의 매핑이 이루어 질 수 있다[6].

본 논문에서는 연구실에서 제작한 다목적용 이동 로봇의 실내 자율이동과 주행시 발생할 수 있는 지역최소점(Local Minimum)을 회피할 수 있는 기능을 보여주기 위해 기본적인 Potential Field 기법인 vector field force [7, 8] 기법을 이용하였다. 그리고 이를 시뮬레이션 환경 하에서 테스트하고 제시한 알고리즘에 대한 유효성을 제시한다. 그리고, 본 논문의 구성으로 2장에서는 이동 로봇의 시스템 및 기구부에 관해 설명하고, 3장에서는 이동 로봇의 주행방법인 VFF 기법에 대해서 간단히 설명

할 것이다. 4장 및 5장에서는 3장에서 제시한 알고리즘 기반의 실험과 검증을 각각 제시하였다.

II. 이동시스템의 기구부

2.1. 시스템 구조

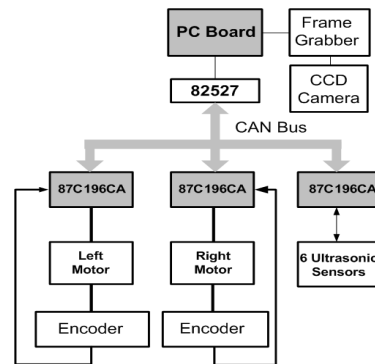


그림 1. 이동로봇(Pioneer-DX) 제어기 구성
Fig. 1. Controller structure of mobile robot

그림 1.에서 제시한 것과 같이 이동로봇은 82527을 이용한 CAN통신으로써 각 센서로부터 데이터를 받고 이것을 상위의 윈도우 프로그램 영역에서 처리하여 각각의 제어 프로세서 쪽으로 명령을 보내는 분산구조를 가지고 있다.

구동부에 2개의 DC모터를 가지고 있으며, 이동에 대한 정보를 엔코더 데이터로부터 얻는다. 센서부를 살펴보면 6개의 초음파센서(Ultrasonic Sensor)가 아래의 그림2와 같이 링 형태로 배열되어있으며 데이터간의 간섭을 최소화 하기위해서 서로 대비되는 형태로 센서를 동작시켰다.



그림 2. 이동로봇의 전체외형
Fig. 2 Overall structure of mobile robot

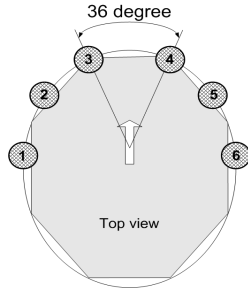


그림 3. 초음파센서 모듈의 배치 구성
Fig. 3 Ultrasonic sensor ring

2.2. 이동로봇의 기구학 및 동역학 모델

환경인식 및 영상정보 처리를 위해서 2자유도의 정밀 스텝모터로 구성된 CCD 카메라(EVI-D30)를 장착하였다.



그림 4. 로봇에 탑재된 능동카메라
Fig. 4. Active camera of mobile robot

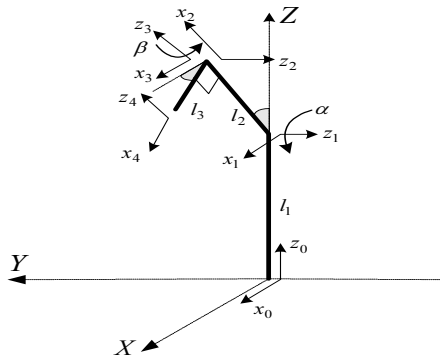


그림 5. 능동카메라 기구부의 좌표계
Fig. 5. Coordinate system of active camera

동차행렬의 변위벡터는 능동카메라 기구부의 관절 각 α, β 에 대한 기준 좌표계에서의 카메라의 위치로 x, y, z 각 축에 대하여 식 (1)~(3)로 나타난다.

$$x_{ccd} = l_2 \sin(\alpha) + l_3 \cos(\alpha) \cos(\beta) \quad (1)$$

$$y_{ccd} = l_3 \sin(\beta) \quad (2)$$

$$z_{ccd} = l_1 + l_2 \cos(\alpha) - l_3 \sin(\alpha) \cos(\beta) \quad (3)$$

동차행렬의 자세벡터는 기준좌표계에 대한 카메라의 Roll, Pitch, Yaw 각에 대한 동차행렬의 회전변환행렬이며 각 방향성분에 대하여 Roll각 θ_R , Pitch각 θ_P , Yaw 각 θ_Y 는 식(4)~(6)과 같다.

$$\theta_R = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\alpha) \sin(\beta)}{\sqrt{\cos^2(\alpha) \sin^2(\beta) + \cos^2(\beta)}} \right) \quad (4)$$

$$\theta_P = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\alpha) \cos(\beta)}{\sqrt{\cos^2(\alpha) \cos^2(\beta) + \sin^2(\beta)}} \right) \quad (5)$$

$$\theta_Y = \beta \quad (6)$$

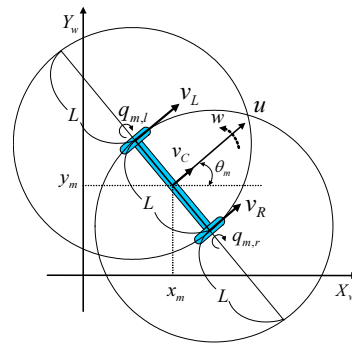


그림 6. 이동로봇 모델링 및 좌표계
Fig. 6. Coordinate system of mobile robot

이동로봇의 기구학을 살펴보면

X_w, Y_w : Cartesian좌표계에서의 world frame

x_m, y_m : Cartesian 좌표계에서의 이동로봇 중심점의 좌표

v_R, v_L : 이동로봇의 오른쪽/왼쪽 바퀴의 선형 속도

u : 이동로봇 중심에서의 선형속도

w : 이동로봇의 중심에서의 각속도

이동로봇의 운동을 해석하기 위해서 그림 6과 같이 좌표계를 설정하고, 2차원 평면으로 구성된 전역 좌표계에서 속도기구학을 통해 이동로봇의 상태를 위치와 방향을 갖는 벡터 $p = [x_m \ y_m \ \theta_m]^T$ 로 표현한다. 이동로봇은 non-holonomic 시스템이므로 구속조건은 순수 구름

조건(pure rolling condition)과 미끄럼 없는 조건(Non slipping condition)이 필요하다. 이동로봇의 운동은 두 제어입력인 선형속도 u 와 각속도 w 에 의해 제어되는 시스템으로 식(7), (8)과 같이 모델링된다.

식(7) ~ 식(8)에 의해 Cartesian space의 이동로봇의 속도와 각속도는 식(9)와 같다.

$$\dot{u} = \frac{1}{2}(v_R + v_L) \quad (7)$$

$$w = \frac{1}{L}(v_R - v_L) \quad (8)$$

입력변수 q 에 대한 전역좌표계에서의 속도 \dot{p} 는 자코비안 행렬 $J(p)$ 에 의해 식(9)가 같이 표현된다.

$$\dot{p} = J(p)\dot{q} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \end{bmatrix}$$

전역좌표계에서의 위치벡터 p 는 식(10)과 같이 적분 형태가 된다.

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \int u(\tau)\cos(\theta(\tau))d\tau \\ \int u(\tau)\sin(\theta(\tau))d\tau \\ \int w(\tau)d\tau \end{bmatrix} \quad (10)$$

이러한 기구학적 관계로부터 로봇은 매 제어주기마다 위치벡터를 계산하며, u 및 w 는 각 바퀴의 엔코더 신호로부터 계산된다.

III. Virtual Force Field 방법

본 논문에서 제시한 Potential Field 기법은 국부적 주행 알고리즘의 대표적인 예로, 목표지점에 대한 가상인력(Virtual Attraction Force)과 장애물에 대한 가상 반발력(Virtual Repulsive Force)을 합성하여 로봇의 제어 신호를 만들어 낸다[9][10]. 하지만 이 기법은 주행환경에

대한 지역최소점에 빠지는 경우가 많다. 이러한 지역최소점을 빠져 나오기 위해 Wall-Following [6]이나 Emotion Mechanism[7]등을 이용한 알고리즘이 제시되고 있다.

제안한 방법을 검증하고자 이동로봇의 주행성능을 테스트로 VFF를 이용한 주행특성을 보였다. 보통의 Potential-Field 기법은 장애물과 목표지점에 대해 두개의 가상적인 힘을 정의하고 이의 벡터 합성을 통하여 출력을 나타낼 수 있다. 먼저 장애물에 대한 가상 반발력은 다음과 같다.

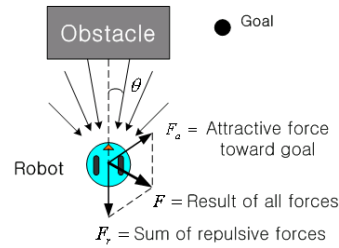


그림 7. Virtual Force Field 개념
Fig. 7. concept of VFF

θ_i : 각 센서가 장애물과 이루는 각도

d_i : 각 센서로부터 로봇과 장애물과의 거리

F_{vr} : 장애물과의 거리에 반비례하는 힘

e_x, e_y : x, y 방향의 단위벡터

각 센서로부터 장애물과의 거리에 반비례하는 F_{vi} 가 발생되고 이를 합하여 최종 반발력(Repulsive Force) F_r 이 만들어진다.

$$F_{ri} = F_{vr}[(\cos \theta_i)e_x + (\sin \theta_i)e_y] \quad (11)$$

$$F_{vr} = 16 \tanh(0.667(1 - d_i)) \quad (12)$$

$$F_r = \sum_i F_{ri} \quad (13)$$

또한, 목표지점에 대한 인력(Attractive Force)은 다음과 같다.

$$F_a = F_{\alpha}[(\cos \theta_g)e_x + (\sin \theta_g)e_y] \quad (14)$$

$$\theta_g = \tan^{-1}\left(\frac{y_g - y}{x_g - x}\right)$$

- (x_g, y_g) : 목표지점의 좌표
- (x, y) : 현재 로봇의 위치좌표
- F_{ca} : 가상 인력의 상수
- θ_g : 목표지점과 로봇이 이루는 각도

기존의 VFF에서는 로봇을 움직이기 위한 벡터힘 (Vector Force)은 다음과 같이 결정된다.

$$F' = F_a + F_r \tag{15}$$

따라서 식(15)와 같은 벡터 합성은 몇몇 환경에서는 지역최소점을 생성하지 않는 특징을 갖게 된다. 또한, 주행실험을 지역최소점이 있는 환경에서 실험을 하였다.

IV. 실험결과

본 연구에서 구현한 로봇을 임의의 환경에서 모의실험을 하였으며 실험에 앞서 다음과 같은 환경의 조건들과 그림 8과 같은 형태의 환경에서 주행실험을 수행하였다.

- 첫째, 이동로봇은 초속 23[cm/sec]의 속도로 전방으로만 움직인다.
- 둘째, 작업환경내의 원형 및 벽면 장애물은 정지 장애물이다.
- 셋째, 목표지점의 위치정보는 알려져 있으며 로봇은 환경에 대한 정보를 갖고 있지 않는다.

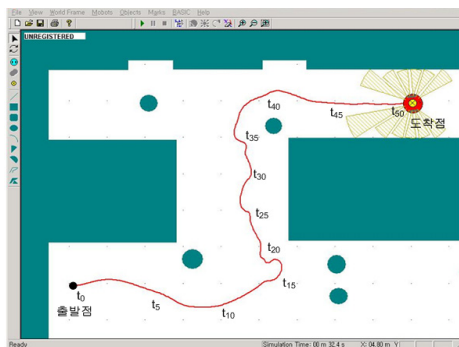


그림 8. H-형태의 복도환경에서의 주행결과
Fig. 8. Navigation performance in H-type corridor environment.

이러한 가정하에서 로봇은 8Mx5M의 작업환경내를 주행한다. 실험은 Borenstein[9]이 제안한 VFF방법과 자유공간으로의 가상 인력을 추가한 방법의 실험 결과를 보이며, 그 다음으로 동일한 환경에서 여러 출발점에서 구현한 로봇이 목표지점에 도착하는 실험 결과를 보인다. 환경내에서 장애물을 인식하는 방법은 센서가 인식하는 범위내에 임의의 셀로 나누어서 각각 셀을 점유하는 장애물의 확률값이 1이 되고 그 값이 증가할 때 장애물이 있는 걸로 인식하도록 했다.

본 논문에서는 구현한 로봇의 주행성능을 보이기 위해서 기존의 주행 알고리즘을 이용하여 실험을 하였다. 그림 8은 H형 복도공간에서 일반적인 VFF방법을 썼을 때 시뮬레이션 환경내에서 로봇이 주행하는 모습을 보여주는 것이다. 목표지점까지 주행하는 경우도 있으나, 출발점과 목표지점의 위치에 따라 지역최소점을 줄이기 위한 목적으로 자유공간으로의 가상인력을 추가하고 이에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 또한 t_{15} 시간 동안에는 장애물의 영향을 받지 않는 환경이기 때문에 빠른 시간내에 이동할 수 있었고 $t_{15} \sim t_{40}$ 시간동안은 좁은 복도와 장애물을 회피하는데 많은 시간이 소요되었음을 알 수 있다.

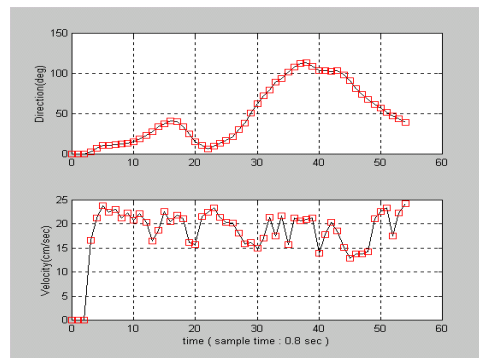


그림 9. 주행궤적에 대한 방향과 속도
Fig. 9. Direction and velocity for navigation trajectory

그림 9는 로봇의 주행궤적에 대한 방향과 속도를 결과로써 나타내었다. 이동로봇의 궤적에서 장애물이 가까이 접근하면 장애물 회피의 가중치를 높여 장애물을 회피하면서 목적지로 지능적으로 안정하게 주행함이 확인된다. 로봇의 진행방향 속도는 전체적으로 23[cm/sec]

로 운동하며 로봇의 방향의 변화가 심한 경우에 감소한다. 기구학 계산에 의해 구한 로봇의 위치와 실제 위치 사이의 오차는 방향계산의 오차누적에 의해 심각하게 발생되었는데, 이는 자이로센서에 의해 현저히 감소되었음을 확인 할 수 있었다.

V. 결 론

본 연구에서는 이동로봇에 다양한 센서기술들을 이용하여 실내에서 활용하기 적합한 지능적 역할을 수행할 수 있는 다목적용 자율 이동 로봇을 설계 및 제작하였다. 사무실에서 간단한 배달의 기능뿐 아니라 사무실 안 내등 기본적인 서비스를 구현할 수 있는 지능형 자율주행 이동로봇으로 개발이 되었다. 주행기능으로써, Goal-Oriented 방식의 주행기법을 이용했으며, 주행시 충돌방지 및 장애물 회피를 가능하게 하였다. 또한 무선LAN카드를 이용해서 인터넷을 통한 로봇의 간단한 제어가 가능하며 주위의 상황을 카메라 영상정보로써 전송할 수 있다. 그리고 제작한 로봇의 주행성능을 보이기 위해서 VFF 알고리즘을 적용하여 임의의 환경에서도 자율주행이 잘 이뤄짐을 보여 주었다. 향후 연구과제로서 현재 구해진 기구학 해석과 제어 기법을 바탕으로 주행의 안정성에 대한 연구가 필요하며, 여러 가지 센서를 보다 효율적으로 처리하여 최적의 데이터를 얻는 알고리즘을 개발하고 이를 적용하는 것이 필요하겠다.

감사의 글

본 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No. 2010-0021054)

참고문헌

[1] Johann Borenstein, "Real-Time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 19, No. 5, September/October, 1989.

[2] Jun Tani and Naohiro Fukumura, "Learning Goal-

Directed Sensory-Based Navigation of a Mobile Robot", Neural Networks, vol.7, No.3, 1994, pp. 553~563.

[3] J. C. Alexander and J. H. Maddocks, " On the kinematics of wheeled mobile robots", Int. J. of Robotics Research, vol. 8, no. 5,pp. 15-27, 1989.

[4] Brooks, R. A. "A Robust Layered Control System for a Mobile Robot", IEEE Journal of Robotics and Automation RA-2, 1986, pp.14~23

[5] A. Yilmaz, O. Javed, and M. Shah, "Object tracking: a survey," ACM Computing Surveys, vol. 38, no. 4, 2006.

[6] K.S. Tseng and C.W. Tang, "Self-localization and stream field based partially observable moving object tracking," EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, vol. 2009, Article ID 416395, 12 pages, 2009.

[7] Y. Koren and J. Borenstein, "Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation," in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 2, 1991.

[8] J. Borenstein and Y. Koren, "The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobilerobots," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 7, no. 3, pp. 278-278, 1991.

[9] I. Ulrich and J Borenstein, "VFH*: Local obstacle avoidance with look-ahead verification," in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2505-2511, April 2000.

[10] K.-Y. Im and S.-Y. Oh, "An extended virtual force field based behavioral fusion with neural networks and evolutionary programming for mobile robot navigation," in Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation, vol. 2, pp. 1238-1244, 2000.

저자소개

진태석(Tae-Seok Jin)

한국해양정보통신학회논문지
11권 11호 참조