

Nonholonomic 이동로봇을 위한 행위기반 장애물 회피 및 Homing 제어 알고리즘

공성학†, 이상훈†, 서일홍†, 오상록*, 유범재†, 정인균*
 †:한양대학교 전자공학과, †:한국과학기술연구원 지능제어연구센터, †:포항공대 기계공학과

A Behavior based Control Algorithm for Obstacle Avoidance and Homing of Nonholonomic Mobile Robot

S.H. Kong†, S.H. Lee†, I.H. Suh†, S. -R. Oh†, B.J. You†, W.K. Chung*
 †: Hanyang Univ., †: KIST, †: POSTECH

Abstract - 본 논문에서는 Nonholonomic 특성을 갖는 이동로봇이 여러 가지 장애물이 있는 환경 하에서 장애물들을 회피하면서 목표지점에 표시된 표식을 인식하고, 그 표식에 대해 일정한 자세를 유지하면서 목표 지점으로 이동하는 Homing 동작을 행위 기반 제어 알고리즘을 기반으로 한 개선된 주행알고리즘을 제안한다. 또한 장애물이 있는 환경에서의 이동로봇이 Homing하는 모의실험을 통해 제안한 알고리즘의 성능을 검증하였다.

1. 서 론

기술의 발달로 인해 로봇은 보다 정밀한 동작을 수행할 수 있게 되었고 성능이 향상됨에 따라 인간이 생활하는 실제 환경에서 인간의 생활을 돕는 로봇을 원하게 되었다. 고정된 위치에서 정해진 작업만을 수행할 수 있는 기존의 산업용 로봇과는 달리 자유롭게 움직일 수 있는 장점이 있는 이동로봇(Mobile Robot)이 널리 사용되고 있다. 일반적인 산업용 로봇과는 달리 이동로봇은 대표적인 비선형 시스템으로 시간에 대해서 적분되지 않는 속도 제약을 갖는 Nonholonomic 시스템이다. 이러한 문제점은 이동로봇의 기구학, 동역학 및 제어에 있어서 더욱 복잡하다. 또한 인간이 생활하는 환경에서 다중 작업을 수행하는 이동로봇은 동적이며, 불확실한 환경에 효과적으로 대응하면서 빠른 응답 특성을 가져야 하기 때문에 기존의 산업용 로봇에 사용하던 방법과는 다른 로봇의 제어구조 및 제어에 대한 여러 가지 연구가 행해지고 있다.

제어구조에 관한 초기연구는 미래에 실행될 계획의 생성에 중점을 두었던 계층적인 구조를 사용하였으나[1-4], 이 방법은 동적인 환경에 맞게 응답하지 못하였다. 이를 보완하기 위하여 제안된 방법이 행위기반 제어구조이다[5-7]. 이 구조는 동적인 환경에 빠른 응답특성을 보이거나 다중작업 상태에 문제가 있으며, 로봇이 교착상태(Deadlock)에 빠지면 환경이 변하지 않는 한 로봇은 교착상태에서 빠져 나올 수 없다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 Fuzzy Rule-Based 주행 알고리즘[8], Neural Network를 이용한 주행 알고리즘[9] 등이 제시되었다. 그러나 Fuzzy Rule-Based 주행 알고리즘은 일반적인 상황에 적용할 수 있는 Rule 설정에 어려움이 있고, Neural Network를 이용한 주행 알고리즘은 많은 시행착오가 필요한 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 행위기반 제어 구조가 단점을 보완하기 위하여 상태 제어 부라는 상위 제어기를 추가한 행위 기반 제어 알고리즘을 제안하고자 한다.

또한 이동로봇에서는 필요한 자세 유지하면서 정해진 위치로 이동하는 동작이 필요하며 이를 Homing 동작이라 한다. 이런 Homing 동작은 이동로봇이 작업 중에 전원 충전을 위해 충전 스테이션으로 이동, 반도체 이송라인에서 작업 스테이션의 진입 등 다양한 적용이 요구되는 동작이다. 현재는 주로 가이드 라인(Guided Line)을 이용한 Homing 동작이 적용하고 있으나 주변환경변화 또는 다른 이동로봇의 간섭 등과 같은 요인이 발생하면

대처할 수 없는 상황이 발생한다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위하여 제안한 행위기반 제어 알고리즘을 장애물이 존재하는 환경 하에서도 Homing할 수 있는 제어기로 적용하는 모의 실험을 통하여 제안한 알고리즘의 유효성을 검증하고자 한다.

2. 이동로봇의 기구학 모델링

이동로봇에서의 기구학 해석과 동적 방정식에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 이동로봇의 기구학은 이동로봇의 회전바퀴의 각속도(Angular Velocity), 선속도(linear Velocity)와 로봇 이동 속도와의 관계를 나타낸다. 본 논문에서는 ActiveMedia Robotics사의 Amigobot를 이동로봇 시스템으로 하였으며 초음파 센서 시스템을 갖추고 있다[10]. 그림 1은 Amigobot의 좌표계와 제어입력을 기구학적으로 모델링하여 나타낸 것이다.

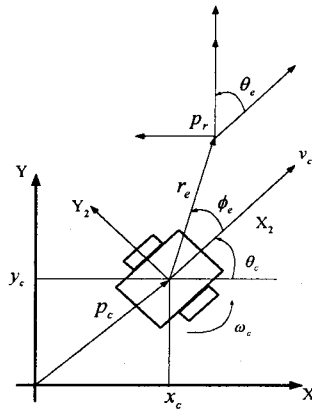


그림 1 이동로봇의 기구학적 모델

이동로봇은 이동거리와 회전각을 제어입력으로 하며, 그림 1과 같이 로봇의 중심점을 기준으로 로봇이 이동하거나 회전할 경우 로봇에 부착되어 있는 엔코더를 통해 이동로봇의 위치와 자세를 알 수 있다. 여기서 이동로봇 현재위치를 벡터(x_c, y_c, θ_c)로 하고 이동로봇의 기구학에 따른 자코비안 행렬(Jacobian Matrix)을 표현하면 다음 식 (1)과 같다.

$$\dot{p} = \begin{pmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta}_c \end{pmatrix} = J(\theta) q = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 (x_c, y_c)는 이동로봇의 현재위치이며, θ_c 는 이동로봇의 현재 자세를 의미하며, v 와 ω 는 각각 이동로봇의 전방향 선속도와 각속도를 의미한다. 그림 1에 모델링한 것과 같이 본 논문에서 사용한 이동로봇이 두 바퀴 구동형 이동로봇시스템이므로 양 바퀴에 주어지는 속도 명령

은 식 (2)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} V_r &= (2v + \omega L) / 2 \\ V_l &= (2v - \omega L) / 2 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 L 은 양 바퀴간에 거리를 의미한다.

3. 장애물 회피 및 동작계획

3.1 이동로봇의 제어 상태부

본 연구에서는 기존의 행위 기반 제어구조가 확장이 용이하고 전체 시스템을 관리하는 모듈이 존재하지 않으므로 예측하기 어려운 동작에 빠르게 동작한다는 장점이 있으나 현재의 전체적인 상황을 파악하기 어렵고 순차적으로 여러 단계를 거쳐야 하는 작업 수행함에 있어서 적절히 표현하거나 적합한 명령을 생성하지 못한다는 단점을 극복하기 위해 행위기반 제어 구조에 상태 제어부를 추가하는 제어구조를 제안하고자 한다.

본 연구에서는 이동로봇의 상태를 다음과 같이 정의하였다.

- 1) Wandering State : 이동로봇이 주어진 작업을 수행하며 작업하는 주변에 장애물이 감지되지 않은 상태
- 2) Moving Homing Zone State : 이동로봇이 주어진 작업을 수행하는 중에 전원이 위험한 단계에 도달하여 현재 작업하던 것을 중지하고 충전 스테이션으로 이동하는 상태
- 3) Avoid Obstacle State : 이동로봇이 이동하다가 장애물을 발견하면 장애물의 회피하는 상태
- 4) Homing State : 충전 스테이션으로 이동하는 Homing 동작을 수행하는 상태

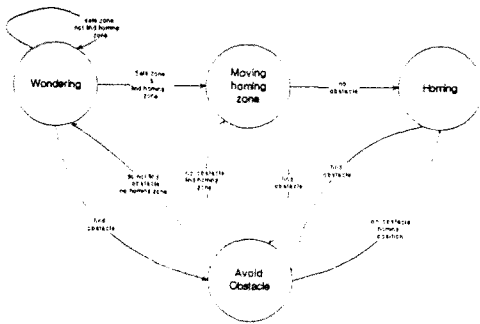


그림 2 제안된 상태 제어부의 상태 천이도

각 상태에 따른 상태 천이는 그림 2에서와 같은 조건이 되면 천이 하도록 하였다.

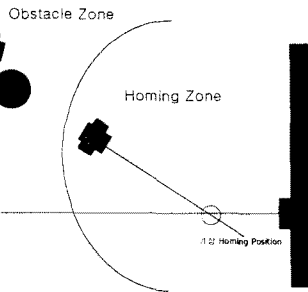


그림 3 이동로봇의 작업 영역 분할

3.2 이동로봇의 목표 추종

본 연구에서는 M. Aicardi가 제안한 알고리즘을 행위기반 제어 알고리즘에 용이하도록 현재의 주변 상황만을 입력변수로 받고 경로를 추적하도록 알고리즘을 개선하여 적용하였다. 적용된 알고리즘은 Lyapunov 함수를 바탕으로 로봇의 선속도 및 각속도를 결정하고, 경로를 추적하는 알고리즘임으로 속도제어가 가능한 이동로봇이면 적용 가능하므로 상대적으로 간단한 제어기의 구조를 가지고도 임의의 위치 및 자세 있는 이동로봇을 원하는 목표 위치 및 자세로 경로를 추종할 수 있다.

3.3 이동로봇의 장애물 회피

본 연구에서는 장애물을 회피하기 위하여 Arkin이 제안한 Schema-Based 행위제어구조를 사용하였다. 본 논문에서는 Move-To-Goal Schema, Avoid-Obstacle Schema, Noise Schema, Avoid-past Schema 등 모두 4가지의 Schema를 사용하여 이동로봇이 움직여야 할 가상적인 목표 위치 및 자세를 계산하여 이를 추종하도록 하는 제어 구조를 사용하였다.

3.3.1 Move-To-Goal Schema

이동로봇이 항상 목표지점으로 향하도록 하는 힘 벡터를 생성하는 Schema로 목표지점에 가까워지면 보다 적은 힘 벡터를 생성한다.

$$\begin{aligned} |V_{MTG}| &= G_{MTG} \\ \theta_{MTG} &= \tan^{-1} \left(\frac{y_g - y}{x_g - x} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 (x, y) : 현재의 이동로봇 위치
 (x_g, y_g) : 이동로봇 목표 위치
 G_{MTG} : Move-To-Goal Gain

3.3.2 Avoid-Obstacle Schema

이동로봇이 장애물을 감지하였을 경우에 장애물에서 멀어지도록 하는 Schema로 장애물에서 멀어지게 하는 방향으로 힘 벡터를 생성한다.

$$\begin{aligned} |V_{AO}| &= \begin{cases} 0 & \text{for } d > S \\ \frac{S-d}{S-R} \times G_{AO} & \text{for } R < d \leq S \\ INF & \text{for } d \leq R \end{cases} \\ \theta_{AO} &= \tan^{-1} \left(\frac{y - y_o}{x - x_o} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 (x, y) : 현재의 이동로봇 위치
 (x_o, y_o) : 장애물 목표 위치
 S : 장애물이 영향을 미치는 최대 거리
 R : 장애물의 반지름
 d : 이동로봇과 장애물 중심과의 거리

3.3.3 Noise Schema

위의 두 이 Schema가 생성하는 힘 벡터의 크기는 같고 방향이 정반대인 곳에 이동로봇이 위치한다면 로봇이 계속 같은 위치에서 머물게 되는 현상이 발생하게 되며, 이 현상을 막기 위한 Schema가 Noise Schema이다. 그래서 Noise Schema는 불규칙한 방향으로 일정한 크기의 힘 벡터를 생성한다.

3.3.4 Avoid-Past Schema

위의 세 가지 Schema는 현재 위치와 주변 상황만을 가지고 힘 벡터를 생성한다. 그러므로 Local Minimum에

빠질 수 있게 된다. 여기서 Local Minimum이라는 것은 주변 상황이 변하지 않기 때문에 이동로봇이 그 위치를 벗어나지 못하는 현상을 의미한다. 이것을 막기 위한 Schema가 Avoid-Past Schema이다. 이 Schema에서는 이동로봇이 과거에 어느 곳에서 오래 머물러 있었는지를 알기 위해 작업 공간을 일정한 간격으로 셀을 나누고, 이동로봇이 각 셀들을 통과한 회수를 기억하고, 셀(Cell)에 기억되어 있는 값이 일정값을 초과하면 그곳에 가상 장애물이 있다고 보고 셀이 대응하는 위치에서 벗어나도록 하여는 힘 벡터를 생성하도록 하였다.

$$\begin{aligned} |V_{AP}| &= G_{AP} \\ \theta_{AP} &= 45^\circ \times n \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $n : 0 \sim 7$ 사이 중 장애물이 없고 이동로봇이 지나간 횟수가 적은 곳

4. 모의 실험 결과

4.1 모의 실험 환경

본 논문에서 ActiveMedia Robotics사의 Amigobo의 라미터를 모의실험에 사용하였다. 사용된 파라미터는 표와 같다.

표 1 모의 실험 파라미터

파라미터 명	값	단위
Robot Width	280	mm
Robot Length	340	mm
Max Angular Veloc	300	deg/sec
Max Linear Veloc	1000	mm/sec
Sampling Time	10	msec
Work Space	10000	mm

4.2 모의 실험 결과 및 분석

본 논문에서는 먼저 Matlab을 이용하여 개선한 경로 추적 알고리즘을 모의 실험하였다. 모의 실험은 초기 위치와 자세를 (-260, -270, 135)로 놓고 경로를 생성하려는 목표 위치 및 자세를 (100, 100, 70)로 하는 경로 생성 알고리즘을 실험하였다.

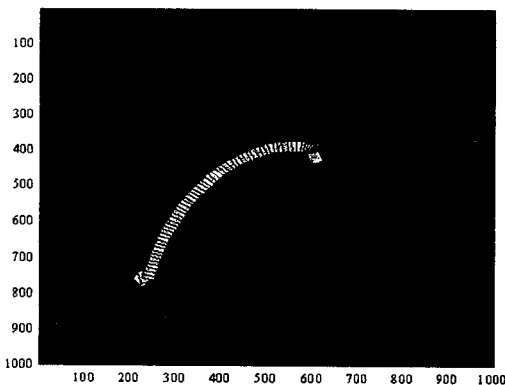


그림 4 개선한 경로 생성 알고리즘 모의 실험

모의 실험 결과 개선한 알고리즘이 그림 4와 같은 궤적을 생성하였으며 이동로봇 제어기에 전달된 제어입력은 그림 5와 같은 모의 실험 결과를 확인할 수 있었다.

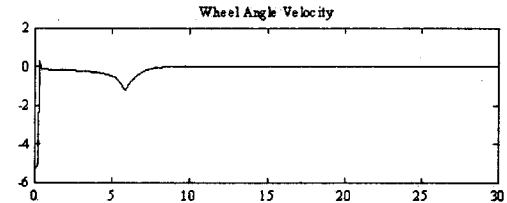
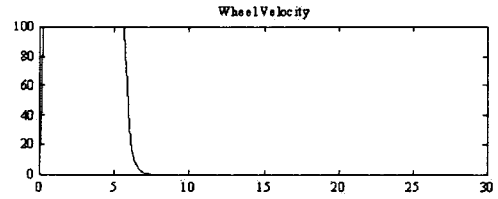


그림 5 생성된 궤적에 따른 제어 입력

또한 본 연구에서는 제안한 행위 기반 제어기를 Visual C++를 이용하여 IBM PC상에서 구현하여 장애물 회피 및 Homing 동작 모의 실험을 수행하였다. 그림 6, 7, 8, 9에서는 제안한 행위 기반 제어기를 적용한 이동로봇이 장애물이 있는 환경 하에서도 Homing 동작을 하고 있는 것을 보여 주고 있다.

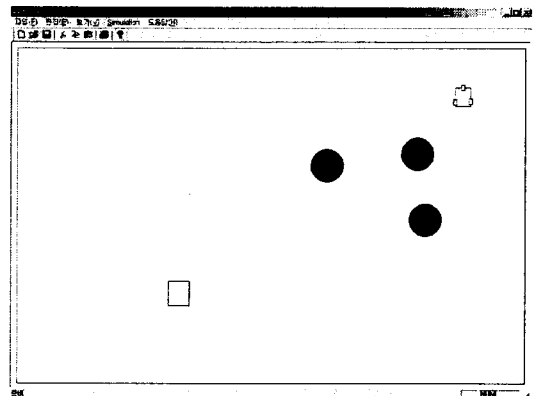


그림 6 장애물이 있는 환경 하에서 이동로봇의 초기 자세 및 위치

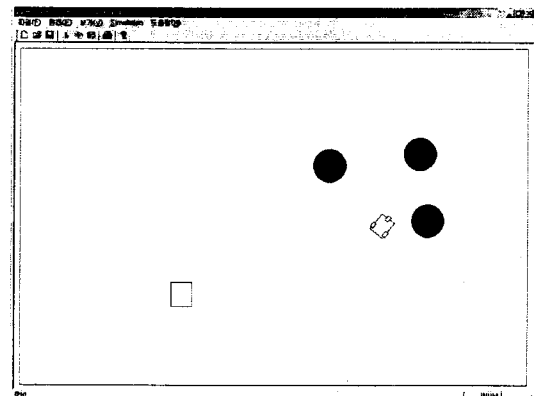


그림 7 장애물을 회피하여 Homing하는 이동로봇

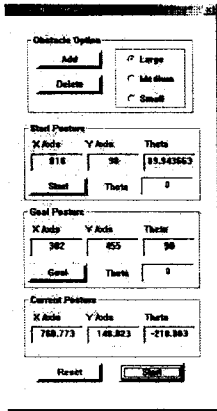


그림 8 이동로봇 모의 실험의 제어기 다이얼로그

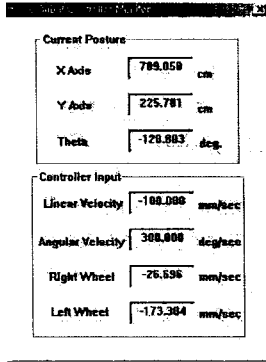


그림 9 이동로봇 모의 실험기의 제어 입력 다이얼로그

5. 결 론

본 논문에서 제안한 알고리즘은 현재의 전체적인 상황을 파악하기 어렵고 순차적으로 여러 단계를 거쳐야 하는 작업 수행함에 있어서 적절히 표현하거나 적합한 명령을 생성하지 못하는 기존의 행위 기반 제어 구조를 보완하기 위해 행위 기반 제어 알고리즘에 상태 제어부를 추가하는 제어구조 및 경로 생성 알고리즘을 제안하였다. 또한 제안한 제어 알고리즘이 장애물 또는 다른 이동로봇의 간섭 등과 같은 요인에 대응하면서 Homing 동작을 하는 모의 실험을 통하여 유효성을 검증하였다. 앞으로의 연구과제는 보다 복잡한 환경에서의 장애물 회피와 주행을 위한 알고리즘의 확대 보완이 필요하며, 보다 정확한 위치 보정을 위한 영상과 같은 센서를 이용한 위치 및 자세 보정에 관한 연구가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. Borenstein and Y. Koren, "The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance of Mobile Robots", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 7 No. 3, pp.278-288, June 1991.
- [2] H.S Sim and Y.G. Sung, "A Posture Control for Two Wheeled Mobile Robots", *Trans. on Control, Automation and Systems Engineering*, Vol. 2 No. 3, pp.201-206, September 2000.
- [3] M. Aicardi, G. Gasalino, A. Balestrino and A. Bicchi, "Closed loop smooth steering of unicycle-like vehicles", *Proc. IEEE Int. Conf. on Decision and Control*, pp.2455-2458, 1994.
- [4] Y. Kanayama, Y. kimura, F. Miyazaki, and T. Noguchi, "A Stable Tracking Control Method for Autonomous Mobile Robot", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.1315-1317, 1989.
- [5] Brooks R. A., "A Robust Layered Control System for a Mibole Robot", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-2, pp.14-23, 1986.
- [6] Roland C. Arkin, "Motor Schema-Based Mobile Robot Navigation", *International Journal of Robotics Research*, Vol. 8, No. 4, pp.92-112, August 1989.
- [7] Roland C. Arkin, "Behavior-Based Robot Navigation for Extended Domains", *International conference on Robotics and Automation*, pp.936-941, May 1990.
- [8] W. L. Xu and S. K. Tso, "Sensor-Based Fuzzy Reactive Navigation of a Mobile Robot Through Local Target Switching", *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, Vol. 29,

pp.451-459, August 1999.

[9] R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of a Nonholonomic Mobile Robot Using Neural Networks", *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol. 9, No. 4, pp.589-600, July 1998.

[10] AmigoBot Technical Manual, Version 2.0, September 1990.