

불확실한 환경에서의 차륜 구동 이동 로봇의 자율 주행 제어기

윤도영[†], 오상록[†], 박귀태^{*}, 김광배[†]

^{*}고려대학교 전기공학과, [†]한국과학기술연구원 지능제어연구센터

Autonomous Navigation Controller of Differential Drive Mobile Robots in Unknown Environments

Do-Young Yoon[†], Sang-Rok Oh[†], Gwi-Tae Park^{*} and Kwang-Bae Kim[†]

^{*}Dept. Electrical Eng., Korea Univ., [†]Intelligent System Control Research Center, KIST

Abstract - 이동성에 nonholonomic 제약을 받는 차륜 구동 이동 로봇의 불확실한 환경에서의 자율 주행 제어를 제안하였다. 전체 시스템은 on-line으로 지역 경로 계획을 하는 planner 부분과 차륜 구동 이동 로봇의 nonholonomic 제약을 극복하면서 계획된 지역 경로를 충실히 추종하기 위한 제어기 부분의 두 부분으로 구성하였다. Planner는 빠른 응답을 생성하고, 전역적인 정보를 사용하지 않기 위하여 반사적인 제어 방식에 의한 경로 생성 방식을 채택하였고, 제어기 부분은 비선형 posture feedback stabilizer로 설계하였다. 제안된 시스템은 단순한 형태의 제어 방식으로 완전한 자율적인 판단에 의한 장애물 회피와 목표 지점으로의 수렴 능력을 보여 준다. 본 시스템의 단순하면서도 효과적인 자율 주행 능력은 반사제어 방식의 장점과 feedback 제어기의 증명된 안정성에서 기인한다. 시뮬레이션과 자체 구현한 차륜 구동 이동 로봇인 "MAR"로 실제 환경에서의 실험을 실시하여 제안된 제어기의 유효성을 검증하였다.

1. 서 론

로봇이 완전히 자율적으로 행동하기 위해서는 판단(decision-making)과 그 판단을 실행(execution)할 수 있는 능력이 요구된다. 전자는 상위 수준의 planner를 설계하는 문제이며 후자는 제어기(controller)를 설계하는 문제이다. 이 둘 두 부분을 적당한 방식에 의해 결합하는 작업이 완전한 자율 제어기에 필요하다. 일반적인 자율 로봇 제어기에서 planner는 주위 환경의 정보에 집중하여 구성되며, 반면에 제어기 부분은 로봇 자체의 구동을 위한 정보에 집중하게 된다. 로봇은 구동상의 제약을 항상 가지기 때문에 임의의 상황에 대한 어떤 형태의 명령도 이상적으로 충실하게 실행이 될 것이라는 가정하에서의 planner는 비 현실적이다. 반대로, 이상적인 자유로운 주위 환경을 가정한 제어기도 비현실적이다. 주위 환경에 따라 제어기에 의한 로봇 구동도 역시 제한을 받기 때문이다. 본 연구에서는 차륜 구동 이동 로봇에 대한 완전한 자율 주행 제어기를 구성함에 있어 위와 같은 planner와 제어기를 적절히 결합하는 한 구조를 제안한다.

알려지지 않은 불확실한 환경에서의 차륜 구동 로봇의 자율 주행을 위해서는 주위 환경에서의 장애물에 의한 제약과 로봇 자체의 nonholonomic 구동[1]에 의한 제약을 극복해야 한다. 행위 기반 (behavior-based) [2] planner는 사전 지식이나 전역적인 정보에 의존하지 않고, 실시간의 빠른 판단을 on-line상에서 하기 때문에 불확실한 환경에 적합하다. 본 논문에서 제안한 행위 기반 planner는 동물의 자기항상성(homeostasis)의 원리를 응용한 것으로 [3], 충돌 방지와 주변 환경의 복잡함에 따른 속도 조절을 안정적으로 보장해 주는 방식이다. 또한 제어기 부분으로 제안된 비선형 posture stabilizer는 planner로부터 받은 posture명령을 충실히 추종함을 보장한다. Planner는 제어기의 파라미터 값들을 주변 장애물 정보를 이용하여 조절하는 역할을 동시에 수행한다.

2. 전체 로봇 제어기의 구조

제안된 자율 주행 제어기의 전체적인 구조는 그림 1과 같다.

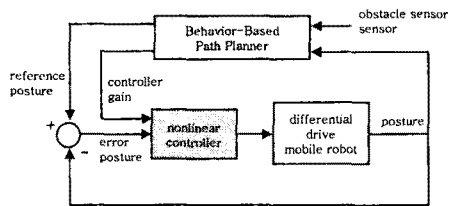


그림 1 전체 제어기의 구조

Planner에는 최종 목표 posture인 $q_g = [x_g, y_g, \theta_g]^T$ 가 주어지고, 매 샘플링 시간마다 센서에 의해 장애물 정보가 주어진다. 이 두 가지 정보를 가지고 planner는 한시적인 goal posture를 생성하고 이를 제어기 부분에 추종 명령인 reference posture $q_r = [x_r, y_r, \theta_r]^T$ 로 준다. 제어기 부분은 이렇게 주어진 reference posture에 도달하도록 로봇을 구동하는 역할을 하게 된다. 한편 제어기가 주어진 reference posture를 추종하는 과정에서 장애물과 충돌할 가능성이 있다. 이는 제어기 설계될 때 장애물이 없는 이상적인 자유 공간을 가정하기 때문이다. Planner는 장애물 정보를 가지고 있기 때문에 이를 이용하여 제어기의 gain 파라미터를 조절하도록 하므로써 로봇이 공간적으로나, 속도면에서 안전한 범위 내에서 움직이도록 하였다.

3. Planner 부분

Planner부분은 각 planning step 마다 다음 step의 motion제어를 위한 사항을 결정한다. 불확실한 환경에서의 planner는 goal의 방향을 제외한 주행할 환경의 지도, 장애물 위치, 크기 등의 일체의 사전 정보를 사용하지 않기 때문에 on-line에서 오로지 다음 step을 위한 사항만을 결정하게 된다. 이 때의 결정은 센서의 최대 감지 범위 안에서 이루어진다. 다음 step의 motion을 위한 사항은 진행방향과 속도의 크기이다. 결과적으로 이러한 순간의 판단에 의하여 만들어진 reference posture들의 전체적인 연결이 전역적인 목표 posture로의 경로를 생성하므로써 로봇은 결국 목표 지점으로 수렴하여 진행하게 되는 것이다.

한편 planner는 행위 기반 방식으로 설계되었으며, 본 연구에서는 이미 제안된 바 있는 자기항상성 [4]을 이용한 행위 기반 로봇 제어 구조 [3]을 이용하였다. 이

방식에서는 로봇의 전체적인 행위를 자기 항상성과 제어 대상이라는 두 가지의 기준에 의하여 그룹화하고, 이렇게 그룹화된 구조를 이용하여 행위를 조절 (behavior coordination) 하게 된다. 행위는 로봇의 정상적인 동작 자체를 위한 것이 목적인 항상성을 위한 행위 (homeostatic behavior)와 외적인 임무 수행을 위한 행위 (mission behavior)의 두 가지 track으로 나뉘고, 제어 대상이 동일한 행위들은 같은 행위 그룹 (behavior-sector)로 다시 그룹화 한다. 불확실한 환경에서의 motion planning에 필요한 행위를 다음과 같이 설계하였다.

$B = \{InSafety, InBound, InResolution, ToGoal\}$
 이를 위의 행위 조절을 위한 구조에 따라 그림 2와 같이 그룹화하였다.

homeostatic subsets	mission subsets	behavior sectors	objectives
B_{1H} = {hSafety}	B_{1M} = {ToGoal}	B_1	direction
B_{2H} = {InBound}	B_{2M} = 0	B_2	sweeping boundary
B_{3H} = {InResolution}	B_{3M} = 0	B_3	maximum velocity

그림 2 행위 기반 자율 주행을 위한 행위 분해

그림 2에서 다른 sector에 있는 행위들 사이에서는 제어하고자 하는 대상이 다르므로 행위의 조절을 할 필요가 없으며, 각 sector안에서도 homeostatic behavior와 mission behavior를 사이에서도 행위 조절이 필요가 없다. 실질적인 행위의 조절은 같은 sector안의 같은 track안에서만 이루어 진다. 이 때의 행위 조절은 "만족도 (satisfaction level)"라는 파라미터를 도입하여 가장 만족도가 낮은 행위를 먼저 실행되게 하는 방식을 취한다. 각 sector는 하나의 독립된 제어 대상을 제어하는 결정을 하게 된다. 그림 2에서 sector 1은 다음 step에 진행할 장애물이 없는 방향을 결정하며, sector 2는 목표 지점으로 움직이면서 사용할 경로의 폭을 결정한다. sector 3은 주변환경의 복잡성에 맞추어 속도의 크기를 조절하는 역할을 한다. 결과적으로 sector 1과 3에 의하여 다음 step에 가야할 reference posture, 즉 waypoint가 결정되며, sector 2는 posture stabilization 도중에 발생할 수 있는 충돌을 회피하는 역할을 한다. 이는 뒤에서 소개되는 제어기의 gain 파라미터를 조절함으로써 이루어진다. 다음과 같은 행위의 조절 과정을 통하여 각 step의 결정이 이루어 진다. Sector 1에서 InSafety에 의하여 360° 전체의 방향 중에 장애물이 감지된 방향으로 움직일 수 없도록 로봇 자체의 물리적인 상태가 가상적으로 변한다. 이 상태에서 mission behavior인 ToGoal이 goal 방향으로 가고자 하며, 이 때 goal 방향이 InSafety에 의하여 잠겨 있으면 그 와 가장 가까운 잠기지 않은 방향을 선택하게 된다. Sector 3에서는 복잡한 환경에서는 속도를 줄이고 (fine control), 장애물이 적은 환경에서는 속도를 크게 (coarse control)하므로써 로봇의 관성에 의한 충돌을 방지하게하여 dynamic 효과까지를 동시에 고려하였다.

4. Controller 부분

4.1 Posture Stabilizer

본 연구의 제어기는 planner에서 waypoint로 내려주는 reference posture를 추종하는 것이 그 역할이므로

일종의 posture stabilizer이다. 그림 3에서 보이는 것과 같이 posture stabilizer는 현재의 로봇의 posture $q_c = [x_c, y_c, \theta_c]^T$ 를 reference 로봇의 posture $q_r = [x_r, y_r, \theta_r]^T$ 로 일치시키는 것이다 [5]. 그림 3에서 본 연구에서 제안한 제어기의 각종 변수들의 물리적인 의미를 볼 수 있다.

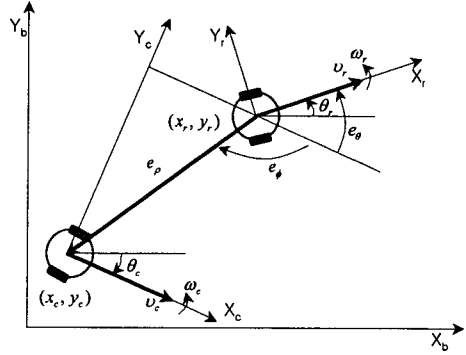


그림 3 Posture stabilization problem

위 그림을 참조하여 다음의 제어기에 사용되는 로봇 frame을 기준으로 한 error들은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{e_x^2 + e_y^2} \\ \tan^{-1}(e_y/e_x) \\ e_\theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c & 0 \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c - x_r \\ y_c - y_r \\ \theta_c - \theta_r \end{pmatrix}$$

이를 이용하여 두 가지 종류의 posture stabilizer를 설계하였다. 하나는 로봇의 heading은 추종하지 않고 위치만을 추종하는 제어기로 주행중의 waypoint 추종에 필요한 free-heading posture stabilizer이고, 또 다른 하나는 waypoint중 battery charger point등에 필요한 heading까지 추종할 필요가 있을 때를 위한 full posture stabilizer이다. 이 둘을 다음 (2)와 (3)에 각각 나타내었다.

$$\begin{aligned} v_c &= \zeta k_1 e_\rho \cos(e_\phi + \xi - e_\theta), \\ w_c &= k_1 \frac{1}{2} \sin 2(e_\phi + \xi - e_\theta) \\ &\quad + k_2 \frac{(e_\phi + \xi - e_\theta)^2}{\sin(e_\phi + \xi - e_\theta)} + k_3 \sin(e_\phi + \xi - e_\theta), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} v_c &= \zeta k_1 e_\rho \cos(e_\phi + \xi - e_\theta), \\ w_c &= k_1 \left\{ \frac{1}{2} \sin 2(e_\phi + \xi - e_\theta) \right. \\ &\quad \left. + \cos(e_\phi + \xi - e_\theta)(e_\phi + \xi) \right\} \\ &\quad + k_2 \frac{(e_\phi + \xi - e_\theta)^2}{\sin(e_\phi + \xi - e_\theta)} + k_3 \sin(e_\phi + \xi - e_\theta). \end{aligned} \quad (3)$$

(2)와 (3)에서 $\xi = \text{sgn}(e_\phi - e_\theta)(\zeta\pi/2 - \pi/2)$, 이고 $\zeta = \text{sgn}(\pi/2 - |e_\phi - e_\theta|)$ 이다. (2)와 (3)의 제어기는 각각 bounded 되어 있으며 위치 에러와 posture 에러의 원점은 각각 전역적으로 (globally) 또, 점근적으로 (asymptotically) 안정함을 Lyapunov이론을 사용하여 증명할 수 있다 [6]. 이는 어떤 형태의 reference posture를 planner가 내려주어도 이를 언제나 추종할 수 있음을 의미한다.

4.2 제어기 파라미터 조절을 통한 충돌 회피

한편 (2)와 (3)의 gain 파라미터인 k_1, k_2, k_3 를 조절함으로써 posture stabilization 동안의 로봇의 궤적이 차지하는 폭을 조절할 수가 있다. 그림 4에서와 같이 nonholonomic 제약을 가지는 차륜 구동 로봇의 궤적은 일정한 폭 w_s 를 가지는 곡선 경로이다. 이 폭안에 장애물이 들어 있지 못하도록 gain 파라미터를 조절하는 것이 필요하다.

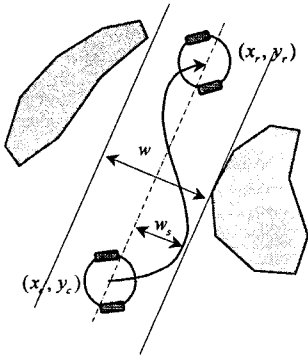


그림 4 Gain 파라미터 조절을 통한 충돌 회피

w_s 를 결정하는 요소들은 여러가지가 있으나 여기서는 다른 요소들을 최악의 상태로 하고 오로지 장애물이 없는 자유 영역의 폭 w 만을 변수로 하여 시뮬레이션을 통하여 다음과 같이 각각 (2)와 (3)에 대한 law를 얻어 사용하였다.

$$k_2 = k_3 = -35.811w^3 + 42.758w^2 - 17.621w + 2.6911,$$

$$k_1 = 0.3$$

5. 실험 결과

실험은 자체 구현한 차륜 구동 로봇인 "MARI"를 자



그림 5 The mobile robot, "MARI"

고 실시하였다. Posture feedback을 위한 위치 정보는 odometry를 사용하였고, 장애물 감지를 위해 16개의 sonar ring을 사용하였다.

그림 6은 성공적인 reference posture들의 생성과 이들을 waypoint로 삼아 결과로 만들어지는 목표점으로의 성공적인 수렴을 보여주고 있다. 그림 7은 한 planning step에서의 제안한 제어기의 성공적인

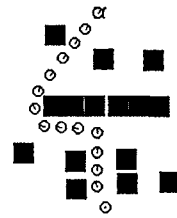


그림 6 Path Planning

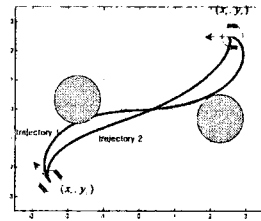


그림 7 Posture Stabilization

reference posture로의 수렴과 gain 파라미터의 조절을 통한 장애물 회피를 동시에 보여주고 있다.

6. 결론

본 논문은 nonholonomic 제약을 갖는 차륜 구동 이동 로봇의 불확실한 환경에서의 완전한 자율주행 제어를 제한하였다. 간단한 형태의 행위 기반 경로 계획과 posture stabilizer를 사용한 충실한 경로 추정 능력은 안정된 자율주행 능력을 보여 준다. 현재 gain 파라미터들의 조절을 좀더 세밀하게 하기 위하여 fuzzy 추론을 이용하여 여러 가지 결정 요소들을 모두 고려하는 연구가 진행 중이다.

[참 고 문 헌]

- [1] I. Kolmanovsky, N.H. McClamroch, "Developments in Nonholonomic Control Problems," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 15, Issue: 6, Dec. 1995, pp. 20-36.
- [2] R.C. Arkin, *Behavior based robotics*, The MIT Press, Cambridge: 1998, pp. 175-204.
- [3] D.Y. Yoon, S.R. Oh, G.T. Park, B.J. You, "A Behaviour Based approach to Reactive Navigation for autonomous robot," in *Proceedings of the 15th IFAC (International Federation of Automatic Control) World Congress, 21st-26th July, 2002, Barcelona, SPAIN*.
- [4] R.E. Ricklefs, *Ecology*, Chiron Press, Portland, Oregon: 1973; pp. 137-156.
- [5] C.C. de Wit, B. Siciliano, G. Bastin, Eds., *Theory of Robot Control*, Springer Verlag, London: 1996, pp. 331-361.
- [6] J. J. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall International, Inc, Englewood Cliffs, NJ: 1991, pp. 40-126.