

소형 이동 로봇의 실시간 경로계획과 영상정보에 의한 추적제어 (A Study on real-time path planning and visual tracking of the micro mobile robot)

김은희(한국 과학 기술원), 오준호(한국 과학 기술원)
Eun-hee Kim (KAIST), Jun-ho Oh(KAIST)

ABSTRACT

In this thesis, we construct the microrobot soccer system and navigate the real-time path planning and visual tracking of each robot. The system consists robots, vision system and a host computer. Because the robots are free-ranging mobile robot, it is needed to make and follow the path. The path is planned and controlled by a host computer, ie. Supervisory control system. In path planning, we suggest a cost function which consists of three terms. One is the smoothness of the path, another is the total distance or time, and the last one is to avoid obstacles. To minimize the cost function, we choose the parametric cubic spline and update the coefficients in real time. We perform the simulation for the path planing and obstacle avoidance and real experiment for visual tracking.

Key Wrods : microrobot(소형 로봇), visual tracking(영상추적), real time path planning(실시간 경로계획)

1. 서 론

자율 주행 방식의 이동 로봇은 센서등을 이용하여 주위 환경의 인식하여 경로를 계획하고, 계획된 경로의 추종 할 수 있는 기능을 갖추어야 한다. 특히 최근들어 여러 대의 이동 로봇을 이용하여 시스템을 구성하고자 하는 필요성이 대두됨에 따라 이러한 기본적인 기능의 확립은 더욱 시급하다. 본 연구는 1996년 5월과 11월에 한국에서 개최되었던 MIROSOT 96(Micro Robot world cup Soccer Tournament)에 참가하면서 이루어진 시스템 개발을 중심으로, 대회에 사용되었던 소형 이동 로봇에 적용 가능한 실시간 경로 계획과 영상 정보에 의한 추종에 관한 것이다. 이 시스템은 환경과 목표점이 계속적으로 바뀌고, 여러 대의 로봇들이 서로 협동하여 목적을 수행하므로 최적성뿐 아니라 실시간성이 요구된다.

또, 경로를 계획할 때, 로봇은 크기가 작아서 경기장 바닥과의 미끄러짐이 생기기 쉽고, 전형적인 2바퀴 시스템으로 기하학적 제한(Nonholonomic Constraint)을 가지는 것을 고려하여 가능한 한 곡률의 변화가 적은 경로를 계획하는 것이 바람직하다. 따라서, 2장에서는 Parametric Cubic Spline을 이용한 경로 계획을 제안하며, Artificial Potential Field를 이용한 장애물 회피 등의 모의실험을 하도록 하였다. 3장에서는 계획된 경로를 추종하기 위해 계획된 위치와 영상 시스템으로부터 실시간으로 얻어지는 현재 위치와의

오차를 제환하여 호스트 컴퓨터에서 각 바퀴의 속도를 독립적으로 제어하는 알고리즘을 가지고 실험 결과를 보이며 5장에서 결론 및 향후 계획에 대하여 기술한다.

2. 경로 계획

2.1 곡선 경로 계획의 필요성

초기위치와 도착위치 그리고 각 위치에서의 방향이 정해지는 경우 로봇은 직선과 회전이 반복되어지는 운동을 하거나 곡선경로를 따르는 운동을 할 수 있다. 환경의 변화가 있는 경우 즉 움직이는 장애물이 존재하는 경우는 회전과 직진수가 늘어나게 되어 관성을 고려한 감가속 패턴이 많아져서 느려진다.

감가속을 고려하지 않더라도 곡선경로를 따라 등속 운동을 하는 것이 일반적으로 빠르게 나타난다. 그림 1은 곡선 경로, 직선 경로, 공(장애물) 회피를 고려한 직선 경로 등 네 가지 경우에 대하여 각각의 경우에 걸리는 시간을 계산한 것이다. 곡선1의 경우 회전과 함께 직선 거리가 줄어들어서 직선3보다 더 빠르고, 직선 2와 같이 공을 피하기 위해 경로를 나누어 계획하면 직선 3보다 더 느리다. 그러나 이러한 곡선 경로를 이용할 경우, 곡선4처럼 지나치게 돌아갈 가능성이 존재하므로, 최적화하기 위한 기준이 필요하다. 그림의 좌표계는 영상 시스템의 pixel단위이며 기준 선속도는 80 pixel/s(약 26cm/sec), 각속도는 8rad/sec 이다.

그러므로 본 연구에서는 경로 생성의 용이함과 로봇 동작의 유연성, 도달 시간 등을 고려하여, 최적의 실시간 곡선 경로 계획을 실현하고자 한다.

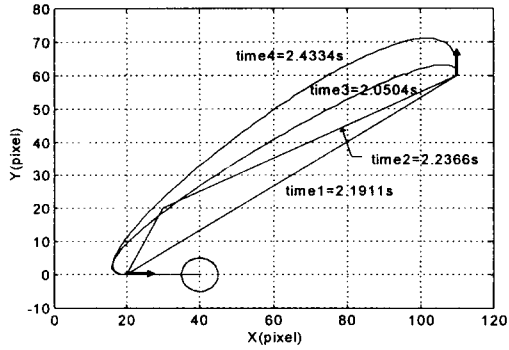


그림 1 곡선구간과 곡선구간의 시간 비교

2.2 경로 계획

경로는 가능한한 짧은 거리로 정지 또는 이동하는 장애물 회피하여 실시간으로 구현 가능하여야 한다. 본 연구에서는 식 (2.1)과 같은 Parametric Cubic Spline을 택하고, 적절한 Cost Function을 정하여 최소화하는 각 Parameter들을 찾아 실시간으로 변경하는 방법으로 경로를 생성하였다.

$$\begin{aligned} r(u) &= (x(u), y(u)) \\ &= a + bu + cu^2 + du^3 \\ &= \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = UA \quad (0 \leq u \leq 1) \end{aligned} \quad (2.1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} r &\in \mathbb{R}^{1 \times 2} : \text{Position vector} \\ U &\in \mathbb{R}^{1 \times 4} : \text{Power basis vector}, A \in \mathbb{R}^{4 \times 2} : \text{Coefficient vector} \end{aligned}$$

여기에서 주어진 두 점 P_0 과 P_1 에서의 위치와 각 점에서의 기울기 벡터 t_0 과 t_1 을 만족시키는 Coefficient vector는 다음 식 (2.2)와 같이 구할 수 있다.

$$A \equiv \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 2 & -2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ t_0 \\ t_1 \end{bmatrix} = CS \quad (2.2)$$

$$r(u) = UCS$$

시작점과 끝점의 위치와 각 점에서의 미분계수가 정해지면 원하는 경로를 쉽게 생성할 수 있다. 그러나, 양 끝점에 관하여 주어진 정보는 로봇의 Heading Angle 즉 dy/dx 이므로 다음식으로 부터 t_0 와 t_1 의 크기, 즉

$dx/du|_{u=0 \text{ or } 1}$ 를 자유도로 가지게 된다.

그러나 시작점에서는 이미 정해진 속도를 가지고

$$\begin{aligned} t_0 &= \left(\frac{dx}{du}, \frac{dy}{du} \right) \Big|_{u=0} = \frac{dx}{du} \left(1, \frac{dy}{dx} \right) \Big|_{u=0} \\ t_1 &= \left(\frac{dx}{du}, \frac{dy}{du} \right) \Big|_{u=1} = \frac{dx}{du} \left(1, \frac{dy}{dx} \right) \Big|_{u=1} \end{aligned} \quad (2.3)$$

있으므로, t_1 에서의 자유도만이 최적화 할 수 있는 Parameter 이다 그러나, 이것은 제한되어 있는 자유도이므로, 장애물이 있는 경우에는 피할 수 없는 경우가 발생하거나, 지나치게 돌아가는 경우가 발생한다. 따라서, 장애물이 있는 경우에는 경로를 두개의 곡선으로 나누고 두 곡선의 연결점의 위치와 그 위치에서의 방향을 조절하여, 장애물을 회피하면서 동시에 연속된 부드러운 경로를 생성할 수 있는 방법을 선정하였다.

먼저, 앞에서 언급한 것처럼 곡선 경로를 계획하기 위해서는 곡선의 유연성과 최소 시간 그리고 장애물이 고려 되어야 하므로 식(2.4)와 같은 Cost Function 을 선정하였다.

$$J = \lambda_1 J_{smooth} + \lambda_2 J_{time} + \lambda_3 J_{obstacle} \quad (2.4)$$

J_{smooth} 은 곡선상의 곡률의 변화율을 최소화 하여 유연성을 높이기 위한 함수로 곡선상의 2차 미분계수의 합으로 식 (2.5)와 같이 정의하고, (2.2)식을 대입하여 정리하면 (2.5)'식을 얻을 수 있다.

$$J_{smooth} = \int_0^1 |r''|^2 du \quad (2.5)$$

$$J_{smooth} = 12 |P_0 - P_1|^2 + 4 (|t_0|^2 + |t_1|^2) + 12 (P_0 - P_1)(t_0 + t_1) + 4 t_0 t_1 \quad (2.5)'$$

또, J_{time} 은 곡선상에서 일정한 속도 v_{ave} 로 움직인다고 가정하고, 이때 걸리는 시간으로 정의하였으며, 계산의 편의를 위하여 제곱하여 정의하도록 한다.

$$J_{time} = \frac{1}{v_{ave}^2} \int_0^1 |r'|^2 du \quad (2.6)$$

$$J_{time} = \frac{1}{v_{ave}^2} \left\{ \frac{6}{5} |P_0 - P_1|^2 + \frac{2}{15} (|t_0|^2 + |t_1|^2) + \frac{1}{5} (P_0 - P_1)(t_0 + t_1) - \frac{1}{15} t_0 t_1 \right\} \quad (2.6)'$$

장애물에 관한 함수 $J_{obstacle}$ 는 Potential Function으로 정의 한다. 일반적으로 Potential Function을 이용하는 방법은 목표점으로 부터의 Attractive Potential과 장애물로부터의 Repulsive Potential의 합으로 이루어진 Potential Field를 가상하고, 이를 최소화하는 경로로

로봇이 따라가도록 하는 방법이다. 본 연구에서는 목적점에 의한 경로 계획은 이미 이루어진 상태에서 부터 시작하므로 Potential Function은 Repulsive Potential만으로 구성되고, 식 (2.7)과 같이 Gaussian Function을 이용하도록 하였다.

$$J_{obstacle} = \int_0^1 \exp(-|r - r_{obs}|^2/c) du \quad (2.7)$$

여기서 c 는 상수이고 r_{obs} 는 장애물의 중심위치이다.

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 는 각 Cost Function에 대한 가중치들이며, λ_1, λ_2 는 곡률을 정하는 것들로 서로 상반된 행동을 하므로, $\alpha\lambda_2 + \lambda_1 = 1$ (α : constant)로 그 값을 정하도록 하며 공의 속도나 로봇의 위치에 따라 조절하도록 한다. 또 λ_3 는 Potential Function의 크기를 정하게 되므로, 장애물의 위치 등을 고려하여 정하도록 한다.

2.3 장애물을 고려하지 않은 경우의 경로 계획

장애물을 고려하지 않은 상태에서는 $u=1$ 에서의 dx/du 를 결정한다. $dx/du|_{u=1} = \alpha$ 라 두면, 다음과 같은 식(3.3.1)을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dJ}{d\alpha} &= \frac{dJ_{smooth}}{d\alpha} + \frac{dJ_{free}}{d\alpha} \\ &= \lambda_1 [12(P_1 - P_0) + \alpha(1, \tan \theta)] \cdot (1, \tan \theta) \\ &\quad + \lambda_2 [1/5(P_1 - P_0) + 2\alpha/15(1, \tan \theta) - 1/15t_1] \cdot (1, \tan \theta) \end{aligned} \quad (2.8)$$

따라서 $dJ/d\alpha=0$ 로부터 Cost Function J 를 최소화 하는 α 를 구할 수 있고, 이는 다음 식(2.9)와 같이 나타난다.

$$\alpha = \frac{\lambda_1 [12(P_1 - P_0) + 4t_1] \cdot (1, \tan \theta) + \lambda_2 [1/5(P_1 - P_0) - 1/15t_1] \cdot (1, \tan \theta)}{\lambda_1 (1, \tan \theta) \cdot (1, \tan \theta) + \lambda_2 [2/15(1, \tan \theta) \cdot (1, \tan \theta)]} \quad (2.9)$$

λ_1 의 증가에 따라 생성된 경로의 변화를 살펴 보면 (그림 2) λ_1 이 증가할수록, 즉 유연도에 대한 가중치가 커질수록 곡선에 가까운 경로가 나오고 감소할수록 직선에 가까운 경로, 즉 회전과 직선으로만 구성된 경로가 나오게 된다. 온라인으로 로봇의 경로를 계획할

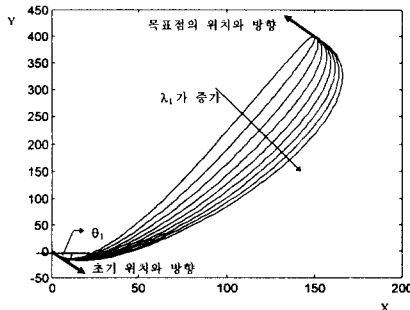


그림 2 λ_1 의 변화에 따른 경로의 변화

때 로봇, 공 그리고 골대의 위치, 또는 공의 속도에 따라 λ_1 을 변화시켜 곡선 경로와 직선 경로 중 효율적인 것을 선택할 수 있다. 다음은 공의 위치가 변하는 경우 실시간으로 바뀌는 경로계획을 나타내었다.

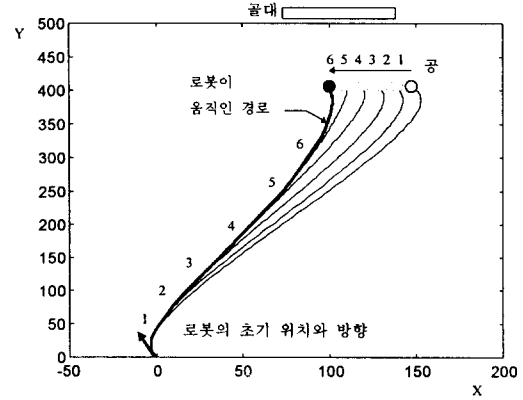


그림 3 공의 위치변화에 따른 경로변경

2.4 장애물을 고려한 경우의 경로 계획

3.2절에서 설명한 바와 같이 장애물이 존재하는 경우에는 자유도가 더 필요하므로, Position과 C¹ continuity를 유지하는 중간점을 첨가하여 두개의 Spline곡선을 이용하여 경로를 계획하도록 한다.

두 점 P_0 와 P_2 에 대하여, 중간점을 P_1 라 두면 Cost Function는 다음 식과 같이 주어진다.

$$J = J_{01} + J_{12} \quad (2.10)$$

여기서, J_{01} 와 J_{12} 는 P_0P_1, P_1P_2 각 부분에 대한 Cost Function이다. 그러므로 이 Cost Function을 최소화 하는 P_1 과 t_1 은 각각 $dJ/dP_1, dJ/dt_1$ 로부터 구할 수 있으며 최대 급강하법을 이용하여 구하도록 한다.

$$\begin{aligned} \frac{dJ}{dP_1} &= \lambda_1 \frac{dJ_{smooth}}{dP_1} + \lambda_2 \frac{dJ_{free}}{dP_1} + \lambda_3 \frac{dJ_{obstacle}}{dP_1} \\ &= \lambda_1 [48P_1 - 24P_0 - 24P_2 - 12t_0 + 12t_2] \\ &\quad + \lambda_2 [24/5P_1 - 12/5P_0 - 12/5P_2 - 1/5t_0 + 1/5t_2] \\ &\quad + \lambda_3 \frac{dJ_{obstacle}}{dP_1} \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{dJ}{dt_1} &= \lambda_1 \frac{dJ_{smoothness}}{dt_1} + \lambda_2 \frac{dJ_{free}}{dt_1} + \lambda_3 \frac{dJ_{obstacle}}{dt_1} \\ &= \lambda_1 [16t_1 + 4t_0 + 4t_2 + 12(P_0 - P_2)] \\ &\quad + \lambda_2 [8/15t_1 - 1/15t_0 - 1/15t_2 + 1/5(P_0 - P_2)] \\ &\quad + \lambda_3 \frac{dJ_{obstacle}}{dt_1} \end{aligned} \quad (2.12)$$

초기값 P_1 과 t_1 은 식(2.13)와 (2.14)에서와 같이 다른 Cost Function을 최소화하는 점에서 시작하였고, 식(2.15)처럼 Iteration하도록 하고 Iteration을 중지하는 것은 경로상의 점에서 장애물에 이르는 최소 거리가 장애물의 크기보다 클 때까지로 정하였다.

$$\begin{aligned} dJ_{smooth}/dt_1 + dJ_{sm}/dt_1 &= 0 \\ t_1 &= [3(P_1 - P_0) - t_2 - t_0] / 4 \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} dJ_{smooth}/dP_1 + dJ_{sm}/dP_1 &= 0 \\ P_1 &= (P_2 + P_0) / 2 + (t_0 - t_2) / 4 \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} P_i^{n+1} &= P_i^n + \eta_p \frac{dJ}{dP_i} \\ t_i^{n+1} &= t_i^n + \eta_t \frac{dJ}{dt_i} \\ \eta_p, \eta_t &: \text{learning rate} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Stop Condition

$$: \min |r - r_{obs}| < \text{Allowable Distance} \quad (2.16)$$

모의 실험은 정지한 장애물과 움직이는 장애물에 대하여 두 가지로 이루어 졌다. 먼저 정지한 장애물에 대해서는 장애물 근처에서의 Potential Field를 모든 방향에 대하여 동일하게 구성하고 움직이는 장애물에 대하여는 Potential Function을 진행 방향 가중시킨 형태를 사용하여 진행 속도에 따르는 장애물 위치를 확률적으로 고려 할 수 있도록 하고 실험하도록 하였다

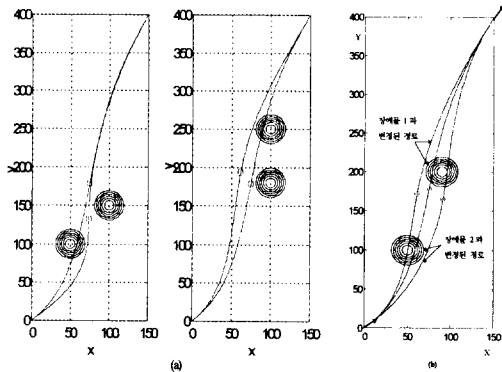


그림 4 한 개(a) 또는 두 개(b)의 장애물에 대한 경로

그림 4에서는 움직이는 장애물에 대한 경로 계획으로 포텐셜 함수들이 로봇의 진행 방향으로 가중되어 있어서 접근 할 수 있는 반경이 더 넓어졌음을 볼 수 있다. 이러한 분포는 장애물의 속도에 의해 결정된다. 그림에서 짙은선은 변경되지 않은 경로이다. 1과 4의 위치는 경로의 변경이 필요 없으며, 2와 3은 각 장애물의 위치에 따라 경로가 바뀌었음을

볼 수 있다.

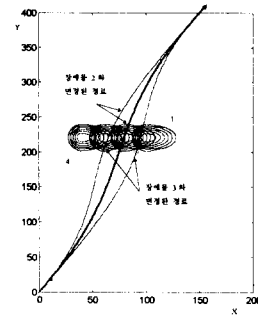


그림 5 움직이는 장애물에 대한 실시간 경로

3. 영상정보에 의한 추종제어

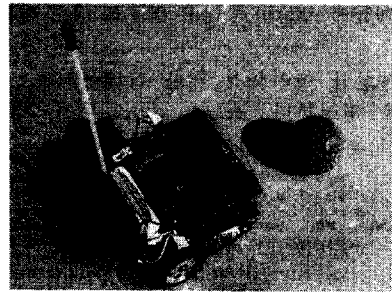


그림 6 실험에 사용된 로봇

3.1 제어 구조

본 연구에서 사용한 시스템은 그림 7에서 보이는 것처럼 크게 두 가지의 제어 구조를 가진다. 하나는 지역 루프로 로봇이 가지고 있는 좌,우 바퀴의 독립적인 엔코더를 통해서 이루어 지는 정속 제어이고, 다른 하나는 전역 루프로써 영상 시스템으로부터 얻어지는 위치 정보와 호스트에서 계획된 기준 경로에 의해 이루어지는 위치 제어 루프이다.

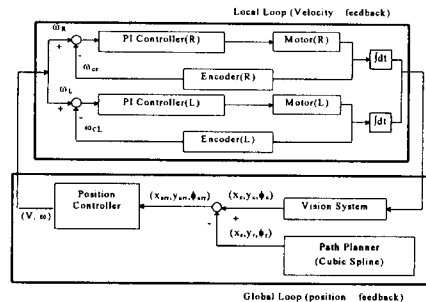


그림7 제어 구조의 기능 선도

효과적인 피드백 루프를 구성하기 위해 먼저 그림 8에서와 같은 좌표계를 택하면 각 위치는 다음과 같이 구해진다.

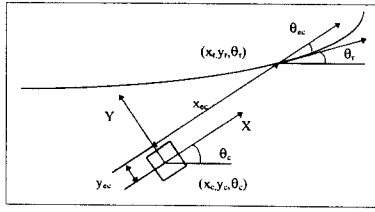


그림 8 제어 좌표계의 설정

$$P_{ec} = \begin{bmatrix} x_{ec} \\ y_{ec} \\ \theta_{ec} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_c & \sin\theta_c & 0 \\ -\sin\theta_c & \cos\theta_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_c \\ y_r - y_c \\ \theta_r - \theta_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

여기서 각 항들은 그림 8에서 정의한 값들이며 각 항을 미분하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$\dot{P}_{ec} = \begin{bmatrix} \omega y_{ec} - v + v_r \cos\theta_{ec} \\ -\omega y_{ec} + v_r \sin\theta_{ec} \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

이러한 시스템이 (0,0,0)에서 안정된 평형점이 되기 위한 피드백 입력 v 와 ω 를 다음과 같이 구성하면 주어진 Liapunov Function에 의해 Stability가 증명된다.

$$U = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos\theta_{ec} + k_v x_{ec} \\ \omega_r + k_\theta v_r \cos\theta_{ec} + k_v y_{ec} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\text{Liapunov Function: } V = \frac{1}{2} (x_{ec}^2 + y_{ec}^2) + \frac{v_r}{k_v} (1 - \cos\theta_{ec})$$

3.2 실험

앞 절에서 제안된 알고리즘을 적용하여 영상 시스템에서 얻어진 로봇의 위치 제어에 관한 실험 결과는 다음과 같다. 각 데이터들은 영상 시스템으로부터 얻어진 것으로, 각 좌표는 pixel 단위로 1 pixel \approx 3.5mm이다.

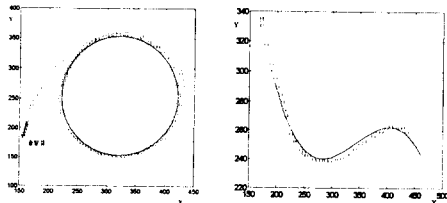
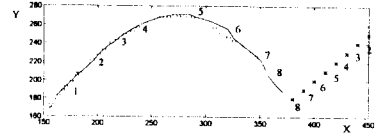


그림 9 인 레도 추종 실험결과



(a) $K=[0.06, 0.349, 0.002]$, $E_{max}=3$ pixels

4 결 론

본 연구에서는 소형 이동 로봇의 효율적인 실시간 경로 계획과 영상정보에 의한 추종 방법에 관하여 연구하였다. 곡선 경로의 유연도, 경로의 길이 그리고 장애물 회피를 위한 Potential Function등을 고려하여 Cost Function 구성하여 이를 최소화 하도록 최적 경로를 생성하고 주어진 경로를 따라 영상 정보로부터 추종한 실험에서 최대 약 1.8cm이하의 오차 정도로 좋은 결과를 얻었다.

향후에는 각 Cost Function의 가중치를 정하는 방법등이 퍼지등을 이용해서 좀더 체계적으로 구현되어야 할 것이다. 또, 개체 수가 많아지고 장애물도 존재하는 환경에서는 영상정보의 처리 속도가 느려지므로, 영상 정보를 활용하는 알고리즘에 관한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- (1) Y.Kanayama, et. Al., "A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robots", Proc.IEEE Conf. On R&A, 1990
- (2) S. Singh and D.H. Shin, "Position Based Path Tracking for Wheeled Mobile Robots", Proc.IEEE IROS,'89
- (3) M.Okutomi and M.Mori, "Decision of Robot Movement by Means of a Potential Field," Advanced Robotics, Vol.1, No.2, pp.131-141, 1986
- (4) C. Samson and K. Ait-Abderrahim, "Feedback Control of a Nonholonomic Wheeled Cart in Cartesian Space.," Proc. Of the IEEE Int. Conf. On R&A, pp. 1136-1141, Apr. 1991
- (5) J.Y.S. Luh, "Conventional Controller Design for Industrial Robots:A Tutorial", IEEE Trans. On System, Man and Cybernetics. Vol. SMC-13.No.3, pp298-316, 1983.
- (6) Kyung Chul Koh, "A Study on the Path Tracking Control Algorithm for Free-ranging Mobile Robots", Thesis of Ph D.,Dept. of PE, KAIST, Feb. 1993