1999년도 대한전기학회 정기총회 및 추계학술대회 논문집 1999. 11. 20

축구 로봇 시스템을 위한 이동 로봇의 경로 계획 방법과 예측기의 설계

김세준, 안현식, 김도현
국민대학교 전자공학부 제어계측 실험실

Trajectory Planning Method of a Mobile Robot and Design of Prediction Controller for Soccer Robot System

Sei-Jun Kim, Hyun-Sik Ahn and Do-Hyun Kim
School of Electrical Engineering, Kookmin University

Abstract - 본 논문에서는 새로운 경로 계획 방법으로 중심 이동에 의한 경로 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘을 사용하여 곡률 반경을 이용한 경로 계획의 문제점인 각도오차가 커질수록 우회하는 현상을 보다 효율적으로 해결함을 시뮬레이션을 통하여 보인다. 또한 제안된 경로 알고리즘에 칼만 필터를 이용한 예측기를 적용시켜 로봇이 공을 추정하는데 발생할 수 있는 잡음에 강인함을 보이며 신뢰성 있는 결과를 확인한다.

1. 서 론

1996년 우리 나라에서 MIROSOT 96(Micro Robot World Cup Soccer Tournament)이라는 마이크로 로봇의 한 응용 분야로 로봇이 정해진 규격과 규칙에 따라 축구경기를 하는 대회를 개최하게 되었다[1]. 축구로봇은 자율 이동이 가능한 독립 개체로서의 3대의 마이크로 로봇과 영상 시스템 그리고 호스트 시스템으로 구성되어있고 카메라를 통하여 입력된 신호를 처리하는 영상 데이터기술과 무선으로 데이터를 전송하는 통신 프로토콜의 구현, 로봇이 움직이도록 모터를 제어하는 모터제어 등의 다양한 주변 기술들을 포함하고 있으며, 다수의 로봇이 협동뿐만 아니라 상대편의 로봇과 경쟁도 요구하고 있어 다개체 시스템을 구현하는 분야의 하나로 각광 받고 있다. 따라서, 축구 로봇 시스템은 다개체 시스템의 많은 기술을 응용하여 개발할 수 있는 적당한 시스템이므로 이것을 통하여 개발된 기술의 파급효과는 매우 클 것이다[2].

축구 로봇 시스템에 사용되는 로봇은 경로를 계획하고 추종하는 기능을 가져야 한다. 또한, 환경과 목표점이 계속적으로 바뀌고 여러 대의 로봇이 한꺼번에 움직이기 때문에 각 상황에 맞는 최적성도 요구되며 정확성과 빠른 이동도 요구된다.

본 논문에서는 다개체 시스템의 한 분야인 축구 로봇 시스템의 원활한 구동을 위해 가장 기본이 되는 경로 설계를 위해 기존에 사용되는 로봇과 목표점의 좌표와 각도를 이용한 곡률 반경방법과 두 점 사이의 최단거리인 직선을 이용하여 새로운 경로 계획 방법을 제안한다. 또한, 축구 로봇 시스템에서는 공과 로봇의 위치 및 방위 정보를 영상정보를 통해서 얻기 때문에 카메라에서 입력된 영상으로부터 우리가 추적하고자 하는 물체의 위치 정보를 획득하고 처리하는데 소모되는 시간과 영상 처리상의 측정 잡음에 의해 오차가 발생한다. 따라서 로봇 축구 시스템에서 로봇의 행동의 기준이 되는 공의 위치를 보다 정확하고 신속하게 예측하기 위해 칼만 필터[3]를 이용한 예측기를 설계한다.

2. 경로 계획 방법

2.1 곡률 반경을 이용한 경로 계획

로봇 축구 시스템에서 로봇의 가장 중요한 행동은 공을 골대에 넣는 것이지만 이러한 행동을 하기 위해서는 먼저 로봇이 임의의 목표점으로 움직이기 위한 빠르고 정확한 경로 계획이 필요하다. 이러한 경로 계획의 가장 단순한 방법은 직진과 회전으로 구성하는 것이다. 그러나, 이 방법은 각도 오차를 조정한 후 거리 오차를 줄이는 방식으로 직진과 회전이 늘어남에 따라 가속과 감속으로 인한 시간지연이 발생하며, 공의 움직임이 너무 빠를 경우에는 제자리에서 회전하거나 속도를 내지 못하고 저속에서 머뭇거리는 현상 등의 문제점이 발생한다[1]. 따라서, 주행시 등속운동이 가능하며 각도와 거리를 함께 고려할 수 있는 곡선주행이 필요하다. 이러한 곡선주행 중에서 가장 대표적인 방법으로 로봇과 목표점을 지나는 원을 구하여 일정반경을 따라서 움직이는 그림 1과 같은 경로 계획이다[4].

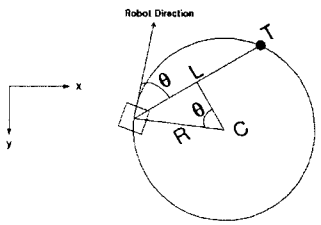


그림 1. 곡률 반경을 갖는 곡선주행 경로.

여기서,

$$R=\frac{L}{2\sin\theta} \tag{1}$$

이다. 그러나, 이러한 반경으로 로봇이 움직이게 되면 같은 위치에 있더라도 θ값이 커질수록 가까운 거리를 돌아가는 결과가 발생하게되기 때문에 이러한 문제점을 보완하기 위한 새로운 경로 계획이 요구된다.

2.2. 중심 이동에 의한 경로 계획

곡률 반경을 이용한 경로 계획에 따라 이동할 때 발생하는 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 그림 2와 같이 중점 이동에 의해 점A, E, T를 지나는 새로운 경로를 제안한다.

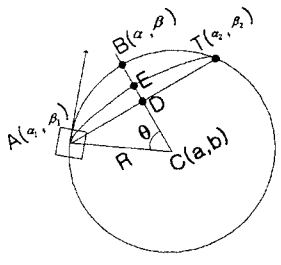


그림 2. 중심 이동에 의한 경로 계획.

제안된 경로 계획은 먼저 그림 1과 동일한 방법으로 일정반경을 갖는 경로를 구한다. 반경 R은 식 (1)에서 구할 수 있고 중점C의 좌표 (a, b)는 그림 3과 그림 4의 경우를 고려하여 구할 수 있다.

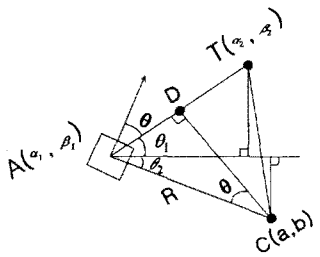


그림 3. $\theta_1 < 90 - \theta$ 인 경우.

그림 3에서

$$dx = \alpha_2 - \alpha_1$$
$$dy = \beta_2 - \beta_1 \quad (2)$$

라 하면,

$$\theta_1 = atan2(dy, dx) \quad (3)$$

이므로 그림 3과 같이 $\theta_1 < 90 - \theta$ 인 경우 $\theta_2 = 90 - \theta - \theta_1$ 이므로

$$a = \alpha_1 + R\cos\theta_2$$
$$b = \beta_1 + R\sin\theta_2 \quad (4)$$

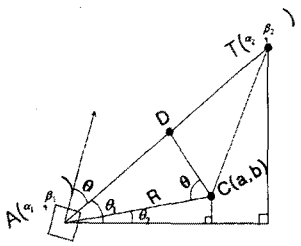


그림 4. $\theta_1 > 90 - \theta$ 인 경우.

그림 4에서 $\theta_2 = \theta + \theta_1 - 90$ 이며,

$$a = \alpha_1 + R\cos\theta_2$$
$$b = \beta_1 - R\sin\theta_2 \quad (5)$$

이다. 따라서, 반경이 R이고 중점 C(a,b)의 자취

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = R \quad (6)$$

를 구할 수 있고, 로봇의 좌표 A (α_1, β_1)와 목표점 T (α_2, β_2)를 지나는 최단거리인 직선의 방정식을 구하면

$$y = \frac{\beta_2 - \beta_1}{\alpha_2 - \alpha_1}(x - \alpha_1) + \beta_1 \quad (7)$$

이다. 그리고, C점을 지나고 식 (7)에 수직인 직선의 방정식, 즉 점C,B를 지나는 직선은

$$y = -\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\beta_2 - \beta_1}(x - a) + b \quad (8)$$

이므로 식 (6)과 (8)에서 B점을 구할 수 있고 점 E는 D와 B의 1/n이므로

$$E = \left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1 - 2\alpha}{2n}, \frac{\beta_2 - \beta_1 - 2\beta}{2n}\right) \quad (9)$$

따라서, 점 A,E,T를 지나는 새로운 경로를 구할 수 있다.

$$x^2 + y^2 + px + qy + r = 0 \quad (p, q, r은 상수) \quad (10)$$

이것은 식 (6)에 의한 경로를 새로운 반경과 중점으로 이동하여 θ가 커짐에 따라 가까운 거리를 멀리 돌아가는 문제를 해결한다. 직선 경로와 원호 사이의 새로운 점은 로봇과 목표지점과의 각도차에 따라 각도차가 커지면 더 심하게 돌아가게 되므로 보다 직선 경로에 가까운 점을 선택하며, 각도차가 심하지 않으면 우회하는 현상이 작으므로 원호에 가까운 점을 선택하여 각도차에 따라 우회하는 현상을 유동적으로 피하여 좀 더 빠르면서도 정확한 경로를 생성한다. 따라서, θ값에 따라 E점을 유동적으로 변화하여 좀 더 좋은 결과를 얻을 수 있다.

3. 칼만 필터를 이용한 이동 물체의 경로 예측

칼만 필터는 로봇 축구 시스템에서 로봇의 행동의 기준이 되는 공의 위치를 보다 정확하고 신속하게 추정 및 예측하기 위해 사용되며 추정값과 측정값의 오차에 필터 이득을 곱하여 상태 천이 모델에 수정함으로써 추정 오차를 최소화하는 처리과정이다.

본 논문에서 움직이는 공을 모델링하기위해 다음과 같은 상황을 가정한다. 외부로부터 힘이 가해져 공의 상태가 바뀐 순간을 초기상태로 정하여 이 상태를 유지하며 공이 움직이며, 로봇이나 벽의 충돌로 인해 상태가 변하게 되면 다시 그 순간부터 초기상태를 정한다. 상태벡터는 $x_k = [x\ y\ v\ \theta]^T$로 공의 x좌표, y좌표, 공의 속도, 공의 방향각을 나타내며 시스템 모델식과 측정 방정식은 다음과 같다.

$$\boldsymbol{x}_k = \boldsymbol{\Phi}_{k-1}\boldsymbol{x}_{k-1} + \boldsymbol{w}_{k-1} \quad \boldsymbol{w}_k \sim (0, \boldsymbol{Q}_k)$$
$$\boldsymbol{z}_k = \boldsymbol{H}_k\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{v}_k \quad \boldsymbol{v}_k \sim (0, \boldsymbol{R}_k) \quad (11)$$

여기서, $\boldsymbol{x}_{k-1}$은 시간 t_{k-1}에서의 상태벡터이고, $\boldsymbol{\Phi}_{k-1}$는 시간 t_{k-1}에서 t_k로의 상태천이행렬을 나타내며, $\boldsymbol{w}_{k-1}$는 시스템 잡음으로 평균이 0이고 공분산 행렬이 $\boldsymbol{Q}_k$인 가우시안 확률 분포를 의미한다. $\boldsymbol{H}_k$는 측정값과 상태벡터와의 관계를 나타내는 관측행렬이고, $\boldsymbol{v}_k$는 평균이 0이고 공분산 행렬이 $\boldsymbol{R}_k$인 가우시안 확률분포를 갖는 측정잡음을 나타내며 상태천이행렬 $\boldsymbol{\Phi}_{k-1}$는 다음과 같다[5,6].

$$\boldsymbol{\Phi}_{k-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t\cos\theta & 0 \\ 0 & 1 & \Delta t\sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

상태오차 공분산 행렬의 전파방정식은

$$P_k(-) = \Phi_{k-1}\, P_{k-1}(+)\, \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (13)$$

이며, 칼만 이득행렬은

$$\overline{K}_k = P_k(-)\, H_k{}^T [\, H_k\, P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1} \quad (14)$$

이다. 측정값이 주어졌을 때 상태와 상태오차 공분산 행렬의 갱신 방정식은 다음과 같다.

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + \overline{K}_k [\, z_k - H_k\, \hat{x}_k(-)] \quad (15)$$

$$P_k(+) = [\, I - \overline{K}_k\, H_k]\, P_k(-) \quad (16)$$

4. 모의 실험 및 결과

본 절에서는 일정 곡률 반경에 의한 경로와 중심 이동에 의한 경로를 시뮬레이션을 통하여 확인한다. 정지해 있는 공을 향해 같은 로봇의 위치에서 일정 곡률 반경에 의한 경로와 중심 이동에 의한 경로를 비교한다. 외부의 큰 경로를 따라 이동하는 것이 곡률 반경에 의한 경로이고 안쪽의 짧은 경로가 중심 이동에 의한 경로이다.

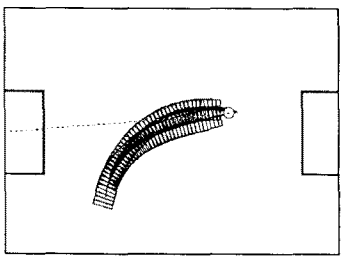


그림 5. θ 〈 30인 경우의 경로 비교.

그림 5는 각도 오차가 30도 이내의 상황에 대하여 일정 곡률 반경을 갖는 경로와 중심 이동에 의한 경로를 나타낸 것으로 θ값이 작은 경우에는 우회하는 현상이 크지 않아 두 경로상의 차이가 크지 않았지만 그림 6과 같이 θ가 30도 이상의 큰 값일 경우에는 일정 곡률 반경을 갖는 경로에서는 우회하는 현상이 크게 나타나 중심 이동에 의한 경로 방법과의 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

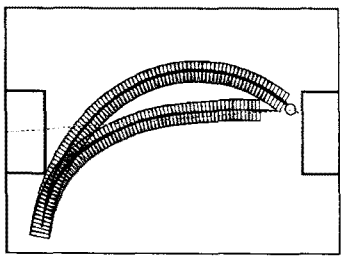
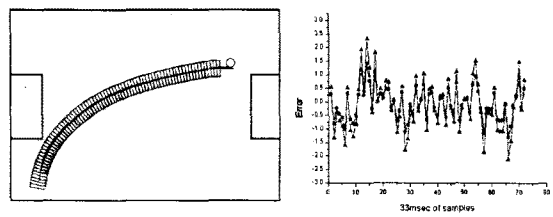
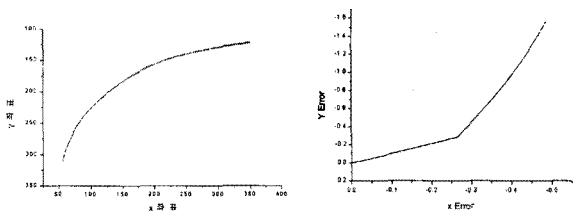


그림 6. θ 〉 30인 경우의 경로 비교.

그림 7은 정지된 공에 잡음을 인가하여 로봇이 잡음에 무관하게 공을 추정하는 결과를 보이고 있다. 그림 7(a)는 잡음이 인가된 공을 로봇이 추정하는 것을 보이고 있고 잡음은 평균이 0이고 분산이 1이다. 그림 7(b)는 공에 인가된 잡음에 대해 나타낸 것이다. 실제 공의 좌표에서 필터를 거쳐 나온 좌표의 차(dot)와 측정된 좌표와의 차(triangle)를 보이고 있다. 실제 공의 좌표에서 필터를 거쳐 나온 좌표의 차(dot)가 더 작음을 알 수 있다. 그림 7(c)는 공의 실제 좌표를 따라가는 로봇의 경로와 필터된 공의 좌표를 따라가는 로봇의 경로를 보이고 있다. 필터된 공의 좌표를 따라가는 경로가 잡음이 존재하여도 실제 경로를 잘 추종함을 알 수 있다. 그림 7(d)는 두 경로의 에러 값으로 처음에는 큰 차이가 없지만 마지막 부분에서 약간의 차이를 볼 수 있었다.



(a) (b)



(c) (d)

그림 7. 칼만 필터를 이용한 시뮬레이션 결과

5. 결 론

본 논문에서는 축구 로봇 시스템에서 새로운 경로 계획방법과 칼만 필터를 이용하여 잡음에도 강인한 예측결과를 나타내었다. 중심 이동에 의한 경로 계획은 기존의 일정 곡률 반경에 의한 경로에서 문제가 되었던 각도 오차가 커짐에 따라 우회하는 현상을 해결하며 좀 더 빠른 경로를 제시하였다. 그리고, 칼만 필터를 사용하여 공의 위치를 추정 및 예측함에 있어 시스템 잡음과 측정 잡음이 존재하더라도 보다 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있었다. 앞으로 실제 실험을 통하여 이동하는 공에 대해 칼만 필터를 이용한 예측기의 적용과 검증이 필요할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] 김은희, 소형 이동 로봇의 실시간 경로계획과 영상추종제어에 관한 연구, 한국 과학 기술원 석사학위 논문, 1996.

[2] 심현식, 지능형 객체 시스템을 이용한 다수 로봇 협동 시스템의 설계 및 구현 : 로봇 축구에의 적용, 한국 과학 기술원 박사학위 논문, 1998.

[3] Mohinder S. Grewal & Angus P. Andrews, *KALMAN FLITERING Theory and Practice*, PRENTICE HALL, 1993.

[4] 이병주, *"로봇 축구 시스템과 게임 전략,"* 제1회 로봇 축구 공학 워크샵 논문집, pp77-100, 1999.

[5] 주세철, *"칼만 필터를 이용한 DGPS의 위치측정 향상에 관한 연구,"* 전자공학회논문지, 33권 B편 5호, pp109-117, 1996.

[6] Robert Grover Brown and Patrick Y. C. Hwang, *Introduction to Random Signals and Applied KALMAN Filtering*, JOHN WILEY & SONS INC, 1997.