

복소 포텐셜을 이용한 로봇 축구용 다개체 로봇의 경로 계획

Trajectory Planning of Multi Agent Robots for Robot Soccer Using Complex Potential

이 경 희, 김 동 한, 류 근 호*
(Kyunghee Lee¹, Donghan Kim¹, and Keun-Ho Rew²)
¹Kyunghee University
²Hoseo University

Abstract: This paper deals with the trajectory planning of multi agent robots using complex potential theory for robot soccer. The complex potential theory is introduced, then the circle theorem is used to avoid obstacles, and the vortex pair is used to make precise kicking direction of robot. Various situations of robot soccer are simulated and the effect of vortex strength and the speed of robots are discussed and the better way to avoid obstacles and to kick the precise direction is found. The feasibilities of complex potential theory to apply for the multi agent robots are successful.

Keywords: complex potential theory, robot soccer, multiple obstacle avoidance, trajectory planning, motion control

I. 서론

로봇 축구는 그림 1과 같이 비전, 제어, 인공지능 등이 들어가는 기술을 집약한 경기로서 한국에서 세계 최초로 국제 경기가 실시된 로봇 경기이다. 로봇 축구에서는 비전을 통한 빠르고 정확한 위치 추적과 다개체 경로 계획, 계획된 경로 추종을 위한 모터 제어 등의 기술이 중요하다. 이 중 다개체 경로 계획은 로봇 축구의 전술에 영향을 주는 부분으로서 팀의 승패를 판가름 짓는 중요한 요소가 될 수 있다. 이를 위해 Petri-net, Q-learning 과 같은 알고리즘을 이용한 항법 계획들이 연구되어 왔다[4].

로봇축구 시스템은 경기 종목에 따라 정해진 일정 크기의 경기장에서 진행되며 팀 당 3 ~ 11 대의 로봇으로 축구 경기의 기본 룰을 따른다. 경기가 진행되는 동안 같은 팀의 로봇과는 협력을 하고 다른 팀의 로봇과는 경쟁하도록 설계되어야 하기 때문에 다개체 시스템의 항법을 위한 테스트베드로 이용하기에 적합하다[1].

로봇 축구에 적용된 기존의 항법 중, H.-S. Shim. 등은 공 주위를 네 개의 구역으로 나누어 각기 다른 제어기를 적용하는 방법인 복합 제어기를 설계했다[2]. Y.-J. Kim. 등은 공을 차야 하는 방향으로 임의의 점을 설정한 뒤, 이 점과 현재 로봇의 위치에서의 포텐셜의 차를 이용한 modified uni-vector field 항법을 제안했다[3,4]. M.-S. Lee는 기하학적인 방법과 퍼지 논리를 합쳐서 항법을 만든 후, 이를 진화 연산을 통해서 최적화 하였다[5]. D.H. Kim. 등은 2차 비선형 방정식을 이용한 limit cycle 항법을 제안하여 원하는 방향으로 장애물을 회피하고 로봇이 공을 차는 방향을 결정할 수 있도록 하였다[6].

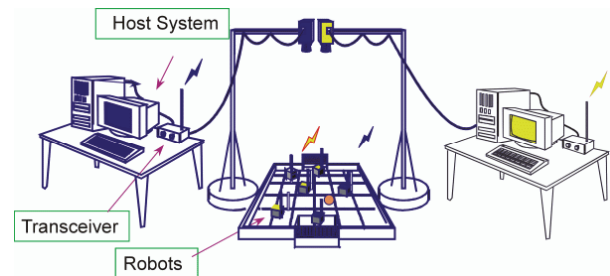


그림 1. 로봇 축구 구성[1].
Fig. 1. Configuration of robot soccer [1].

본 논문에서는 기존의 포텐셜 항법[7,8]의 목적지에서 로봇이 공을 차는 방향을 정할 수 없던 문제를 개선한 복소 포텐셜 이론(complex potential theorem) [9-13,19,20]을 도입하였고 국부최소(local minima)가 발생하는 문제점을 개선하고 장애물이나 로봇이 추가/감소되는 상황에서도 적용 가능한 개선된 복소 포텐셜 경로계획을 제안한다. 개선된 방법은 목적지에서 로봇의 방향에 대한 미세 조정이 가능하며 로봇이 정체점(stagnation point)에 진입하는 것을 미리 방지함으로써 경로의 안정성을 높일 수 있다. II 장에서는 복소 포텐셜 경로계획에 대한 이론을 소개하고 III 장에서는 수치모사를 통해 제안한 방법의 로봇축구 적용 가능성을 타진하고, 성능 분석을 통해 복소 포텐셜 경로계획의 효율성을 검토하고, IV 장에서 제안한 경로계획이 로봇 축구에 적합함을 설명한다.

II. 복소 포텐셜 경로계획 이론

1. 복소 포텐셜 항법 이론

포텐셜 경로계획(potential path planning)은 복소수 이론을 유체역학의 비압축성, 비점성 액체의 흐름을 기술하기 위해 개발된 포텐셜 흐름(potential flow)에서 유래한 방법으로서 흐르는 물과 같이 로봇의 항로를 유선형으로 기술해 준다는 특징이 있다. 이 포텐셜 경로계획을 복소수 형태로 기술하면 수

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수: 2012. 4. 19., 수정: 2012. 7. 24., 채택확정: 2012. 10. 4.
이경희, 김동한: 경희대학교 전자정보대학 (kh0422@khu.ac.kr/donghani@khu.ac.kr)
류근호: 호서대학교 로봇공학과(khrew@hoseo.edu)
※ 본 연구는 호서대학교 학술연구비 지원(2009-0167)으로 연구된 논문임.

식이 단순해지고 복소수 이론을 적용할 수 있다는 장점이 있어 복소 포텐셜 이론으로 확장되었으며 로봇 게임에 적용할 때 장애물이 여러 개인 경우에 사용하기 힘든 제한을 해결하기 위한 노력들이 있어왔다[12,14,18].

식 (1)과 같이 $z = x + iy$ 일 때, 실수부는 포텐셜(potential), ϕ 이고, 허수부는 유선(streamline), ψ 인 복소 포텐셜을 도입한다.

$$w(z) = \phi(x, y) + i\psi(x, y) \tag{1}$$

복소수 포텐셜 이론에서 포텐셜과 유선은 복소수의 실수부와 허수부처럼 항상 직각을 이룬다. 2차원 복소 포텐셜에서 속도는 식 (2)와 같이 포텐셜의 경도(gradient)로 유도된다.

$$\vec{v} \equiv \nabla\phi = \left\{ \frac{\partial\phi}{\partial x}, \frac{\partial\phi}{\partial y} \right\} \tag{2}$$

비압축성 흐름에서는 다음 (3)과 같이 속도의 발산(divergence)은 0이 된다.

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

식 (2), (3)에서 다음의 라플라스 방정식(Laplace's equation)이 유도된다.

$$\nabla^2\phi = \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} = 0 \tag{4}$$

복소 함수론의 해석 함수(analytic function)의 성질에서 다음을 얻을 수 있다.

$$u = \frac{\partial\psi}{\partial y} = \frac{\partial\phi}{\partial x}, \quad v = -\frac{\partial\psi}{\partial x} = \frac{\partial\phi}{\partial y} \tag{5a}$$

$$\vec{V} = u + iv = \overline{\left(\frac{dw}{dz} \right)} \tag{5b}$$

u 와 v 는 복소 포텐셜의 속도 성분이며 z 평면에서 x 축, y 축 방향의 속도 벡터이다.

반지름이 R 이고 중심이 원점에 위치하는 원 형태의 장애물과 복소 포텐셜 함수 $f(z)$ 가 있을 때 Milne-Thomson의 원 정리(circle theorem)를 이용하여 식(6)과 같이 유체의 흐름을 표현할 수 있다[15-17].

$$w(z) = f(z) + \bar{f}(\bar{z}) = f(z) + \bar{f}(R^2/z) \tag{6}$$

여기서 \bar{f}, \bar{z} 는 각각 f, z 의 켈레 복소수(complex conjugate)이다.

비점성, 비압축성인 2차원 이상 유체(ideal fluid)의 자유로운 흐름(free stream)은 식 (7)과 같다.

$$f(z) = U \cdot z \tag{7}$$

여기서 U 는 유속을 뜻한다.

식 (6)-(7)에서 자유로운 흐름에 반지름 R 인 장애물이 있을 때 원 정리를 적용하면 아래 (8)과 같이 유도된다.

$$w(z) = U(z + R^2/z) \tag{8}$$

공을 향해 로봇이 가기 위해서 어느 장소에서든지 유선들이 모이는 sink 의 복소 포텐셜을 유선에 도입한다.

$$w_s(z) = -K_s \ln(z - z_s) \tag{9}$$

여기서 K_s 는 sink 의 강도로서 이 값이 클수록 sink 에 빨리 도달하게 된다. Z_s 는 sink 의 위치로서 공의 위치를 복소수로 나타낸다.

공과 반지름이 R_{ob} 인 장애물이 동시에 있을 때 원 정리를 적용하면 아래와 같다.

$$w_s(z) = -K_s [\ln(z - z_s) + \ln(\bar{z} - \bar{z}_s)] \\ = -K_s [\ln(z - z_s) + \ln(R_{ob}^2 / (z - \bar{z}_s))] \tag{10}$$

장애물 중심 위치가 Z_{ob} 인 경우, $(z - z_{ob})(\bar{z} - \bar{z}_{ob}) = R^2$ 이 성립하므로 복소 포텐셜은 식 (11a)와 같다.

$$w_s(z) = -K_s [\ln(z - z_s) + \ln(R_{ob}^2 / (z - z_{ob}) + \bar{z}_{ob} - \bar{z}_s)] \tag{11a}$$

목적지에서 로봇이 공을 차는 각도를 조절하기 위해 sink 근처에 회전하는 vortex 쌍을 도입한다. 회전하는 vortex 에 의해 형성되는 유선은 vortex의 중심으로부터 일정한 위치에 형성되며 유선의 식은 복소 좌표계에서 허수축의 값으로 표현된다. vortex 의 반지름을 각각 R_{v1}, R_{v2} 라 하고 vortex 의 위치를 각각 z_{v1}, z_{v2} 라 하면, 회전하는 vortex 쌍에 대한 복소 포텐셜은 다음과 같다.

$$w_{v1}(z) = -iK_{v1} [\ln(z - z_{v1}) - \ln(R_{v1}^2 / (z - z_{v1}) - \bar{z}_{v1} + \bar{z}_s)] \tag{11b}$$

$$w_{v2}(z) = iK_{v2} [\ln(z - z_{v2}) - \ln(R_{v2}^2 / (z - z_{v2}) - \bar{z}_{v2} + \bar{z}_s)] \tag{11c}$$

식 (11b)와 (11c)와 같이 vortex 쌍의 복소 포텐셜의 부호는 각각 반대로 적용하여 sink 주변의 유선의 속도 벡터가 일정한 방향으로 생성될 수 있도록 한다.

복소 포텐셜은 중첩의 원리를 사용할 수 있으므로 sink 및 vortex 쌍이 있는 전체 복소 포텐셜은 다음과 같다.

$$w(z) = \sum_i w_i(z) = w_s(z) + w_{v1}(z) + w_{v2}(z) \tag{12}$$

유선의 속도 벡터를 구하기 위한 복소 포텐셜의 복소 미분값은 아래와 같다.

$$\frac{dw_s}{dz}(z) = -K_s \left[\frac{1}{z - z_s} - \frac{R_{ob}^2 / (z - z_{ob})^2}{R_{ob}^2 / (z - z_{ob}) + \bar{z}_s - \bar{z}_{ob}} \right] \tag{13a}$$

$$\frac{dw_{v1}}{dz}(z) = -iK_{v1} \left[\frac{1}{z - z_{v1}} + \frac{R_{v1}^2 / (z - z_{v1})^2}{R_{v1}^2 / (z - z_{v1}) + \bar{z}_{v1} - \bar{z}_s} \right] \tag{13b}$$

$$\frac{dw_{v2}}{dz}(z) = iK_{v2} \left[\frac{1}{z - z_{v2}} + \frac{R_{v2}^2 / (z - z_{v2})^2}{R_{v2}^2 / (z - z_{v2}) + \bar{z}_{v2} - \bar{z}_s} \right] \tag{13c}$$

전체 복소 포텐셜의 복소 미분값을 이용한 유선의 속도 벡터는 다음과 같다.

$$V(z) = \overline{\left(\frac{dw_s}{dz}(z) \right)} + \overline{\left(\frac{dw_{v1}}{dz}(z) \right)} + \overline{\left(\frac{dw_{v2}}{dz}(z) \right)} \tag{14}$$

복소 평면의 실수부와 허수부는 각각 로봇이 동작하는 좌표의 x 축과 y 축에 사상될 수 있다.

그림 2는 복소 포텐셜을 이용하여 로봇이 공을 차는 방향

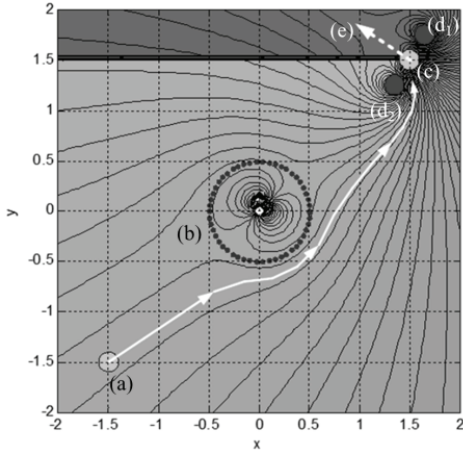


그림 2. 장애물 회피 및 정확한 kicking을 위한 경로 계획.
Fig. 2. Path planning for avoiding an obstacle and precise kicking.

을 결정하는 경로계획을 나타낸다. (a)는 로봇을 나타내며 (b)는 장애물, (c)는 sink, (d₁)과 (d₂)는 회전하는 vortex 쌍을 나타내며, (e)는 공을 차는 방향을 나타낸다. 공을 차는 방향을 일정하게 조절하기 위하여 각각의 vortex는 sink로부터 일정한 거리만큼 떨어져 있으며 vortex의 반지름은 같다고 가정한다. 공을 차는 방향은 vortex를 서로 연결한 직선과 직교하는 방향이 된다. (a) 위치에 있는 로봇은 자신의 위치에서의 복소 포텐셜의 속도 벡터의 방향으로 이동하게 되며 그림 2의 흰색 실선과 같은 경로로 이동하여 sink의 위치에 도착하게 된다.

2. 복수의 장애물이 있는 경우의 복소 포텐셜 경로계획

sink가 있는 유체 흐름에서 원형 장애물의 반지름보다 먼 거리의 유체의 속도 성분은 항상 0 이 아니기 때문에 복수 장애물의 경우에도 같은 해석을 적용할 수 있다[11,12,18]. 로봇과 가까운 위치에 있는 장애물에 높은 가중치를 부여하여 유선의 속도 성분을 갱신할 수 있으며, 로봇과 개별 장애물과의 거리에 따라 계산된 각각의 가중치 α_i 를 로봇의 속도와 연산함으로써 로봇의 속도에 대한 보간 함수를 구할 수 있다. 로봇에서 복수 장애물의 가장자리까지의 거리는 식 (15)와 같이 정의할 수 있으며,

$$d_i = \|z - z_{ob,i}\| - R_i \tag{15}$$

보간 함수는 식(16a)의 조건을 가지며, 로봇에 적용되는 보간 함수는 식(16b)와 같다.

$$\forall j \neq i \text{ 에서 } d_j = 0 \text{ 일 때, } \alpha_i = 0$$

$$d_i = 0 \text{ 일 때, } \alpha_i = 0 \tag{16a}$$

$$\forall k \text{ 에서 } d_k > 0 \text{ 일 때, } \alpha_i \in (0,1)$$

$$\alpha_i = \prod_{j \neq i} \frac{d_j}{d_i + d_j} \tag{16b}$$

$$u = \sum_i \alpha_i u_i, \quad v = \sum_i \alpha_i v_i \tag{16c}$$

여기서 $i, j, k \in [1, 2, \dots, m]$ 이다.

식 (16c)의 u 와 v 는 보간 함수를 적용한 x 축, y 축 방향의 로봇의 속도 성분을 나타낸다.

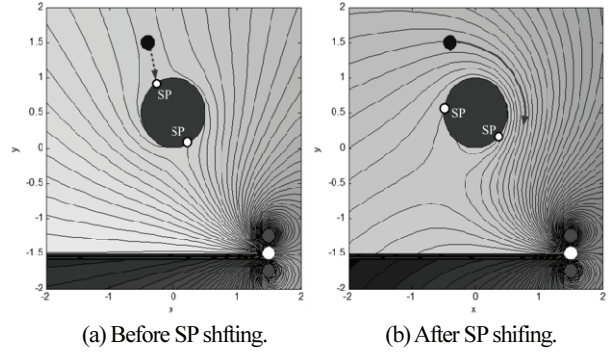


그림 3. 정체점 이동을 적용한 경로 계획.
Fig. 3. Path planning with shifting of stagnation point.

3. 정체점에서의 복소 포텐셜 경로계획

복소 포텐셜 경로계획의 경우 국부최소 현상이 발생하지 않지만, 그림 3(a)와 같이 정체점(SP: Stagnation Point)에서 유선의 속도 벡터가 0이 되는 점이 발생하여 만일 로봇이 정체점에 위치하면 움직이지 못하는 현상이 발생한다. 이를 해결하기 위해 식 (17)과 같이 장애물 내부에 회전하는 vortex를 삽입하는 개선된 복소 포텐셜 경로계획을 제안한다.

개선된 복소 포텐셜 경로계획에서는 정체점에서의 유선을 변화시켜 로봇이 정체점을 피해 이동할 수 있도록 한다. 그림 3(b)는 변화된 유선의 흐름을 따라서 이동하는 로봇의 경로를 나타낸다.

$$w_{ob}(z) = iK_c \left[\ln(z - z_s) - \ln(R_{ob}^2 / (z - z_{ob}) - \bar{z}_{ob} + \bar{z}_s) \right] \tag{17}$$

4. 다개체 로봇의 복소 포텐셜 경로계획 적용

다개체 로봇에 대해 복소 포텐셜을 적용할 경우, 각각의 로봇은 장애물 뿐만 아니라 같은 팀의 다른 로봇까지도 장애물로 간주하고 복소 포텐셜을 계산하여야 한다. 만일, 3 대의 로봇이 3개의 장애물을 회피하여야 하는 경우, 각각의 로봇은 3개의 장애물이 아닌 5개의 장애물을 회피하여야 한다.

그림 4는 로봇 R_i 이 계산한 현재 위치에서 공의 위치까지의 유선의 방향을 나타낸다. 로봇 R_1 은 로봇 R_2 와 R_3 , 장애물 O_1, O_2, O_3 를 모두 장애물로 판단하여 복소 포텐셜을 계산하고, 계산된 복소 포텐셜의 방향을 따라서 공의 위치까지 이동하게 된다. R_2 와 R_3 또한 상대를 장애물로 인식하고 각

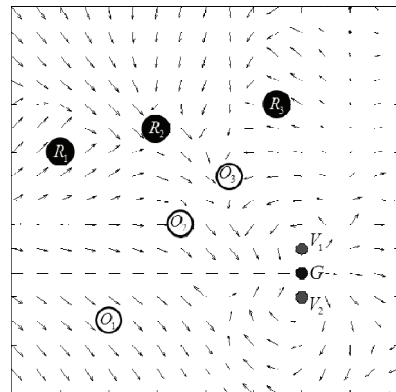


그림 4. 다개체 경로 계획.
Fig. 4. Path planning for multi-agent robots.

각의 경로를 계산한다. 각각의 로봇은 장애물에 식 (17)과 같이 vortex 를 적용하여 정체점을 피하고 있으며, 그림 4에서 R_2, R_3, O_3 에는 반시계 방향의 회전 vortex 가 적용되었으며, O_1 과 O_2 에는 시계 방향으로 적용된 것으로 가정하였다.

III. 복소 포텐셜 경로계획의 수치모사 결과

복소 포텐셜 경로계획은 sink 주변의 vortex 쌍의 간격 (Vortex distance : D_v)에 의해 목적지에서 각도의 정확도가 달라지며, Vortex 의 크기에 의해 목적지로 접근할 때의 궤적이 달라진다. 또한 장애물에 적용되는 회전 vortex 의 크기(K_c)에 따라 이동거리가 달라지는 특성을 나타낸다.

그림 5는 식 (17)의 K_c 의 크기와 식 (13b), 식 (13c)의 K_v 의 크기, D_v 에 따른 로봇의 총 이동거리(Total distance: D)에 대한 그래프이다. 이동거리는 K_c 가 클수록 증가하는 것을 확인할 수 있다. 로봇이 정체점을 피하기 위해서 새로운 우회경로를 생성하여 이동하기 때문이다. Vortex 쌍의 간격이 좁을수록 복소 포텐셜은 sink 의 영향을 많이 받아서 로봇이 sink 쪽으로 직진하려는 현상이 두드러진다. 따라서 D_v 가 작으면 상대적으로 K_v 의 영향을 적게 받아 공 근처에서의 각도 변화가 작아지게 되고 로봇의 이동거리의 편차가 줄어들게 된다. 반면 D_v 의 크기가 크면 로봇은 K_v 의 영향을 많이 받게 된다. 그림 5에서 $D_v = 103(\text{cm})$ 인 경우, $K_c > 1.5$ 이상일 때 K_v 가 클수록 이동거리가 감소하는 현상이 나타난다. 이는 K_c 값에 따라 장애물을 회피한 로봇이 K_v 가 클수록 더욱 직선에 가까운 움직임을 보인 것을 의미한다. 즉, 장애물은 안전하게 회피하고 공은 직선에 가깝게 찰 수 있는 움직임을 보이는 것이다.

그림 6은 K_c, K_v, D_v 의 크기에 따른 목적지의 각도 오차에 대한 그래프이다. 오차는 D_v 의 크기가 작을수록, K_v 의 크기가 클수록 작아지는 것을 볼 수 있다. 반면 K_c 와 각도오차는 관련이 없음을 알 수 있다. 따라서 K_v 의 값을 크게 하고 D_v 의 값을 작게 하면 로봇이 빠르고 정확하게 공을 찰 수

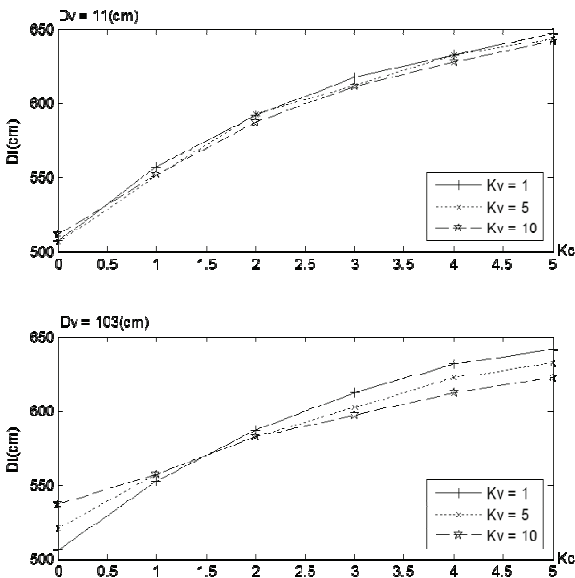


그림 5. K_c, K_v, D_v 에 따른 총 이동거리.
Fig. 5. Total distance regarding K_c, K_v , and D_v .

있게 된다.

그림 7은 $D_v = 11(\text{cm})$ 로 고정하고 K_c 와 K_v 에 따른 로봇의 이동궤적에 대한 그림이다. 로봇은 R 의 위치에서 출발하여 O 의 위치에 있는 장애물을 회피하여 G 의 위치에 있는 공을 찰는 과정을 수행한다. $K_c = 0 \sim 2$ 일 경우의 각각에 대하여 $K_v = 1 \sim 10$ 에서의 로봇의 이동궤적이다. K_c 가 클수록 로봇은 장애물 O 를 멀리 우회하여 회피하는 모습을 보여주고 있으며, K_v 의 크기가 클수록 공 근처에서 로봇의 진행방향의 각도 변화가 작아져 슈팅 정확도를 높일 수 있게 된다.

이처럼 K_c, K_v, D_v 값을 조절하여 로봇의 상황에 맞는 명령을 내릴 수 있다. 만일 로봇 축구에서 로봇이 수비를 목적으로 하고 있고 공이 자신의 진영에 있다면, 로봇은 공을 정확히 맞추는 것보다 자신의 진영에서 걷어내는 것이 우선일 것이다. 이 때 $K_c = 0$ 으로 설정하고 K_v 와 D_v 를 작게 설정하면 로봇이 빨리 공에 접근할 수 있게 된다. 반대로 로봇이 공격을 하고 있고 슛을 해야 하는 상황이라면, 빠른 이동도 중요하지만 슛을 하는 각도를 정확히 조절해야 골인에 성공할 수

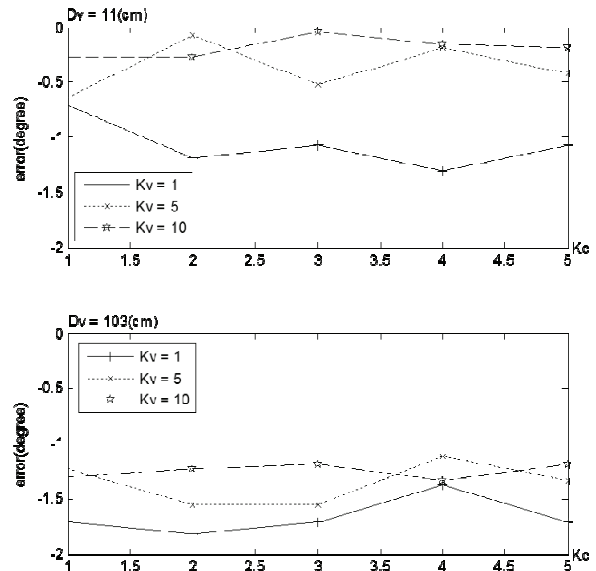


그림 6. K_c, K_v, D_v 에 따른 슈팅 각도 오차.
Fig. 6. Shooting error regarding K_c, K_v , and D_v .

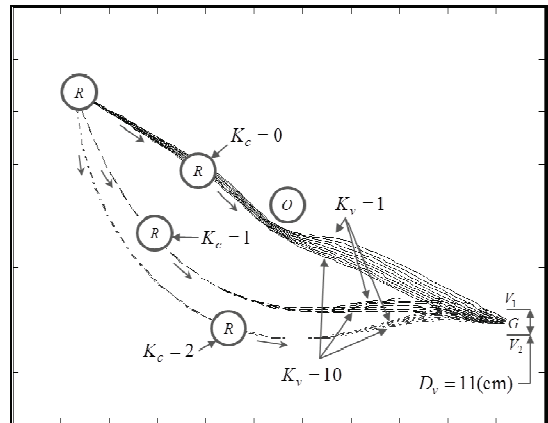
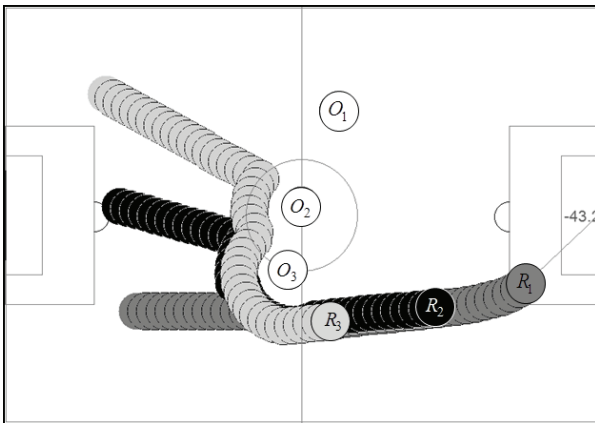


그림 7. K_c 와 K_v 에 따른 로봇의 이동궤적 비교.
Fig. 7. Trajectory comparison regarding K_c and K_v .

있을 것이다. 이러한 경우에는 앞에서 언급한 것과 같이 K_v 의 값을 크게 하고 D_v 의 값을 작게 하면 공을 정확히 찰 수 있게 된다. 또한 공 근처에서 로봇의 진행방향이 직선운동에 가까운 움직임을 보여야 더욱 효과적인 슈팅을 할 수 있을 것이다. 로봇이 진행 각도를 자주 변경하면 이동 속도의 감소를 가져오게 될 것이고 강한 슈팅을 할 수 없게 될 것이다.

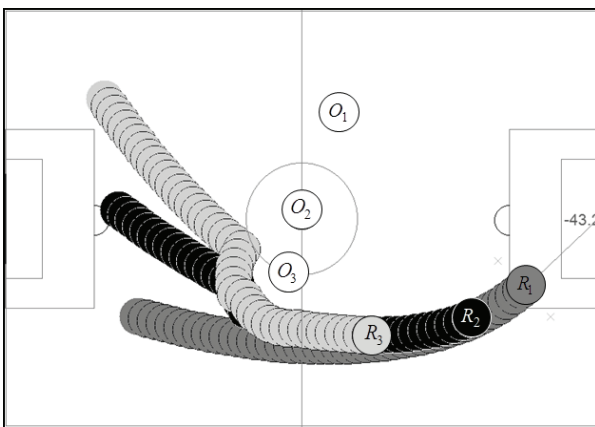
그림 8은 복소 포텐셜 경로계획을 3 대 3 로봇 축구를 가정하고 $K_c = 0, K_v = 10$ 으로 고정하고 $D_v = 11(\text{cm})$ 인 경우와 $D_v = 103(\text{cm})$ 인 경우를 비교한 결과이다.

그림 8(a)에서처럼 공을 정확히 차기 위해 D_v 를 작게 하면 로봇은 공이 있는 쪽으로 빠르게 접근하게 되고 만일 장애물이 로봇의 경로상에 있다면 장애물을 회피하기 위해서 더 많은 시간을 지체하게 될 것이다. 또한 공을 차는 각도를 맞추기 위해서 공에 근접했을 때 방향을 급격히 전환하게 되어 공을 약하게 차게 된다. 그림 8(b)는 D_v 를 크게 설정하였기 때문에 sink의 영향을 상대적으로 적게 받는 모습을 보여주고 있으며 그림 8(a)보다 부드러운 경로를 생성하고 있다. 또한 공을 차기 전의 각도 변화가 적어 공을 강하게 찰 수 있다. 이는 그림 5, 6의 결과와 다르게 로봇 축구에 적용하기 위해서는 약간의 슈팅 오차를 감수하고 D_v 를 일정 수준 이상으로 크게 설정할 필요가 있음을 보여주는 결과이다.



$K_c = 0, K_v = 10, D_v = 11(\text{cm})$

(a) Simulation result of 3 on 3 robot soccer game.

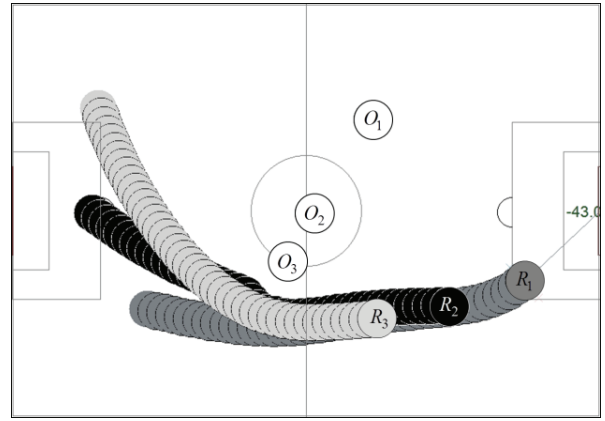


$K_c = 0, K_v = 10, D_v = 103(\text{cm})$

(b) Simulation result of 3 on 3 robot soccer game.

그림 8. 3대 3 로봇 축구 시뮬레이션 결과.

Fig. 8. Simulation result of 3 on 3 robot soccer game.



$K_c = 1, K_v = 10, D_v = 57(\text{cm})$

그림 9. 3 대 3 로봇 축구 시뮬레이션 결과.

Fig. 9. Simulation result of 3 on 3 robot soccer game.

그림 9는 $K_c = 1, K_v = 10, D_v = 57(\text{cm})$ 인 경우의 로봇의 이동 경로를 나타내고 있다.

로봇은 공격을 수행하는 것을 가정하였으며 K_c, D_v, K_v 는 각각의 특성에 맞게 적용한다. 즉, $K_c = 1$ 의 값을 설정하여 장애물을 부드럽게 회피할 수 있도록 하고, D_v 의 값은 그림 5를 참고로 오차의 범위가 $\pm 1^\circ$ 내외가 나올 수 있는 값으로 설정하되 로봇의 지름(50cm)보다 큰 값 중 최소값으로 설정한다. 시뮬레이션에 사용된 D_v 의 값은 11, 34, 57, 80, 103(cm)이므로 57(cm)를 사용한다. 마지막으로 각도 정확도를 높이기 위해서 K_v 의 값을 10으로 설정한다. $K_v = 10$ 의 값은 시뮬레이션에서 적용한 K_v 의 최대값이다. 그림 9에서 모든 로봇이 장애물을 부드럽게 회피하면서 R_1 이 그림 8(b)와 유사한 경로로 공을 차는 모습을 확인할 수 있다. R_1 의 각도 오차는 0.8° 이다.

그림 8과 9는 3대의 로봇이 동일한 목적지를 가지고 이동하는 경로를 가정하였다. 로봇 축구에서 이러한 전략은 공을 향해 접근하는 상대팀 로봇의 접근을 차단하고, 로봇간 충돌로 경로에서 이탈하는 로봇이 발생하더라도 우리 팀의 공격을 지속할 수 있으며, 리바운드되는 공을 차지할 수 있는 효과를 기대할 수 있기 때문에 사용된다. 만일 상대팀의 수비 행동으로 인해 경로가 막혀 공에 접근하지 못하는 상황을 피하려는 전략을 구사하려면 식(17)의 K_c 의 부호를 바꾸어 장애물에 적용되는 vortex의 회전방향을 다르게 하면 우리 팀의 로봇들은 흩어져서 이동하게 되며 공을 찰 수 있는 확률을 높일 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 복소 포텐셜 이론과 vortex 쌍을 이용하여 동시에 두 개 이상의 장애물을 회피하면서 로봇이 공을 찰 방향을 조절할 수 있도록 개선된 복소 포텐셜 경로계획을 제안하였고 로봇축구에 적용 가능한 다개체 로봇 경로계획법을 개발하고 수치모사를 통해 그 가능성을 확인하였다. 개발된 경로계획법은 로봇들이 하나의 목표점을 가지고 이동하는 상황을 가정하였고, 로봇이 등속운동을 한다는 가정하에 D_v 의 값이 작을수록 각도의 정확도가 높아지며 K_v 와 K_c 의 값이 클수록 이동거리가 증가하는 결과를 확인하였다.

향후 연구에서는 로봇의 속도를 고려한 K_o , K_v 와 D_v 의 최적화 및 로봇 축구에서 발생할 수 있는 다양한 상황에 대해 실험을 통해 제안한 경로계획법의 성능을 보일 계획이다.

참고문헌

- [1] FIRA home page: <http://www.fira.net/>
- [2] H.-S. Sim, M.-J. Jung, H.-S. Kim, J.-H. Kim, and P. Vadakkepat, "A hybrid control structure for vision based soccer robot system," *Intelligent Automation and Soft Computing*, vol. 6, no. 1, pp. 89-101, 2000.
- [3] Y.-J. Kim, J.-H. Kim, and D.-S. Kwon, "Evolutionary programming-based univector field navigation method for fast mobile robots," *IEEE Trans. on Systems Man, and Cybernetics*, vol. 31, no. 3, pp. 450-458, 2001.
- [4] D.-H. Kim, Y.-J. Kim, K.-C. Kim, J.-H. Kim, and P. Vadakkepat, "Vector field based path planning and petri-net based role selection mechanism with Q-learning for the soccer robot," *Intelligent Automation and Soft Computing*, vol. 6, no. 1, pp. 75-88, 2000.
- [5] M.-S. Lee, M.-J. Jung, and J.-H. Kim, "Evolutionary programming-based fuzzy logic path planner and follower for mobile robots," *Congress on Evolutionary Computation*, vol. 1, pp. 139-144, San Diego, USA, July 2000.
- [6] D. H. Kim and K.-H. Rew, "Limit-cycle navigation method for fast mobile robots," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 14, no. 11, pp. 1130-1138, 2008.
- [7] J. O. Kim and P. K. Khosla, "Real-time obstacle avoidance using harmonic potential functions," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 3, pp. 338-349, 1992.
- [8] Y. Koren and J. Borenstein, "Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation," *Proc. of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1398-1404, 1991.
- [9] K.-H. Rew and D. H. Kim, "Navigation method for wheeled mobile robot using streamline of complex potential flow," *International Conference on Control, Automation and Systems*, Seoul, Korea, pp. 2841-2844, 2008.
- [10] Paul Nylander's web site on potential flow. <http://www.bugman123.com/GANNAA/>
- [11] S. Waydo and R. M. Murray, "Vehicle motion planning using stream functions," *IEEE Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 2484-2491, 2003.
- [12] S. Waydo, "Vehicle motion planning using stream functions," *CDS Technical Report 2003-001*, May 2003.
- [13] M. Campbell, R. D'Andrea, D. Schneider, A. Chaudhry, S. Waydo, J. Sullivan, and J. Veverka, A. Klochko, "RoboFlag games using systems based hierarchical control," *Proc. of the American Control Conference*, vol. 1, pp. 661-666, 2003.
- [14] P. Vadakkepat, K. C. Tan, and M.-L. Wang, "Evolutionary artificial potential fields and their application in real time robot path planning," *Congress on Evolutionary Computation*, vol. 1, pp. 256-263, 2000.
- [15] J. P. Keener, *Principles of Applied Mathematics*, Addison-Wesley Pub., Ch. 6, 1988.
- [16] D. Zwillinger, *Standard Mathematical Tables and Formulae*, 31st ed., Chapman & Hall CRC Pub., Ch. 1, 2003.
- [17] M. R. Spiegel, *Theory and Problems of Complex Variables, Schaum's Outline Series*, McGrawHill Pub., Ch. 8-9, 1988.
- [18] D. G. Crowdy, "Analytical solutions for uniform potential flow past multiple cylinders," *European Journal of Mechanics B/Fluids*, vol. 25, pp. 459-479, 2006.
- [19] D. H. Kim and K.-H. Rew, "Enhancement of complex potential navigation for obstacle avoidance of mobile robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 4, pp. 385-389, 2009.
- [20] M. H. Kim and J. Sur, "A stream function approach to design obstacle avoidance path planning algorithm for autonomous underwater vehicles," *Proc. of the 21st Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, Hawaii, pp. 285, 2011.
- [21] K. M. Jung, J. M. Sung, B. S. Kim, J.-H. Je, and S.-G. Lee, "Design and flight test of path following system for an unmanned airship," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 5, May 2010.
- [22] J.-H. Im, S.-H. You, G.-I. Jee, and D.-H. Lee, "A path generation algorithm for obstacle avoidance in waypoint navigation of unmanned ground vehicle," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 17, no. 8, pp. 843-850, 2011.



이 경 희

2004년 경희대 전자공학과(공학사). 2008년 동 대학원(공학석사). 2008년~현재 동 대학원 박사과정. 2004년~2006년 ATMI-Korea. 관심 분야는 로봇 항법 및 지능제어.



김 동 한

2003년 KAIST 전기 및 전자공학과 박사학위. 2003년~2004년 일리노이 주립대학 Post Doc. 2004년~2007년 삼성전자 무선사업부 책임연구원. 2007년~현재 경희대학교 전자정보대학 교수. 관심분야는 로봇제어, 다개체 지능제어.



류 근 호

1994년 KAIST 기계공학과(공학사). 1996년 동 대학원(공학석사). 2001년 동 대학원(공학박사). 1998년~2003년 미래산업. 2003년~2005년 파인디앤씨. 2005년~현재 호서대학교 로봇공학과 교수. 관심분야는 모터 제어, 재활 로봇, 반도체/디스플레이 장비 개발, 영상 및 신호 처리.