

# 스웸시스템을 위한 자기조직화의 3D 확장

## Extension of Self-organization for Swarm Systems to Three Dimensions

김재현\* · 김동현\*\*

Jae Hyun Kim\* and Dong Hun Kim\*\*

\* 한국과학영재학교

\*\* 경남대학교 전기공학과

### 요 약

본 논문은 3D 환경에서의 스웸시스템을 위한 자기조직화 방법을 제시한다. 스웸 시스템의 자기조직화를 위하여 인력과 척력을 이용하는 인공 포텐셜 함수(Artificial Potential Function, 이하 APF)를 사용하였다. 제안된 연구에서는 2D 환경에서 자기조직화를 위해 사용되어왔던 다양한 포텐셜들을 3D 환경에 맞게 확장 설계한다. 지면이나 수면 등의 경계면을 가지는 3D 환경의 특성을 고려하여 지면 포텐셜(Ground Potential)을 제안한다. 지면 포텐셜을 고려하지 않았을 때와 고려할 때의 비교 결과를 통해 지면 포텐셜의 필요성과 효과를 보여준다. 마지막으로, 다양한 시뮬레이션 결과를 통해 3D 환경에서 확장된 인공포텐셜과 그 성질의 효율성을 보여준다.

**키워드 :** 자기조직화, 경로 계획, 삼차원 환경, 포텐셜 함수

### Abstract

In this paper, a self-organization framework for swarm systems in three dimensions is presented. The framework uses artificial potential functions(APFs) to direct the robots toward the goal as well as to keep them in a swarm system. This research extends conventional APFs used for self-organizations in two dimension environment to three dimensions. In three dimension environment, the ground potential for the boundary surfaces that commonly appear in three dimension environments is proposed. Accordingly, the comparison between the paths without and with the ground potentials shows the necessity and effect of ground potentials. Extensive simulations are given to show the effectiveness of the extended potentials and various properties in three dimension environments.

**Key Words :** Self-organization, Path planning, Three dimension space, Artificial Potential Functions

## 1. 서 론

자율적인 로봇(autonomous robot)이 원하는 위치로 이동하게 하기 위해서는 적절한 경로 계획(path planning)이 선행되어야 한다[7]. 경로 계획은 전역 경로 계획(global path planning)과 국부 경로 계획(local path planning)으로 나누어지며, 이 둘은 요구되는 정보 및 경로를 얻는 방법에서 차이를 보인다. 전역 경로 계획의 경우 목표(goal)의 위치, 장애물(obstacle)의 위치, 로봇(agent)의 위치 등 로봇의 경로에 영향을 미칠 모든 변수에 대한 정보를 미리 제공받은 상태에서 경로 계획을 완성한 후에야 비로소 로봇이 움직이기 시작한다. 반면 국부 경로 계획의 경우 로봇은 이동 과정 중에 국부적으로 제한된 정보를 받아들이며 그 정보에

따라 다음 순간 어디로 움직일지를 결정한다. 이때 전역 경로 계획은 초기에 진행되는 한 번의 계산으로 경로를 완성하기 때문에 목표나 장애물이 움직이지 않을 경우에는 더 경제적이다. 하지만 목표물, 장애물이 움직이거나 주변 환경(environment)이 변하는 경우에는 국부 경로 계획이 더 효율적이다[10].

경로 계획에는 A\* 알고리즘, D\* 알고리즘[2], 벡터장 히스토그램(vector field histogram) 등 다양한 기법이 이용되어 왔으나 이번 연구에는 인공 포텐셜장(Artificial Potential Field, APF) 방법이 이용되었다[7]. 인공 포텐셜장 기법은 주변 환경에 따라 공간상의 각 좌표에 포텐셜을 부여하고 이를 로봇의 변위를 결정짓는 요소로 사용함으로써 로봇이 원하는 경로로 이동하도록 하는 것이다. 계산량이 많으며 환경이 복잡해짐에 따라 기하급수적으로 계산량이 증가하는 타 알고리즘에 비해 인공 포텐셜장 기법은 계산이 간단하며 환경이 복잡해지더라도 큰 차이가 없다는 점에서 경제적이며 국부 경로 계획에 적합하다. 직선 경로가 아닌 곡선 경로를 얻을 수 있다는 점 또한 인공 포텐셜장 기법의 장점으로 꼽힌다[11].

인공 포텐셜장 기법의 원리는 목표가 위치한 좌표에 낮

접수일자 : 2010년 2월 12일

완료일자 : 2010년 8월 1일

+ 교신저자

감사의 글 : 본 연구는 2010학년도 경남대학교 학술연구 장려금 지원으로 이루어졌음.

은 포텐셜을 부여하고 장애물이 위치한 좌표에 높은 포텐셜을 부여함으로써 로봇이 장애물을 피해 목표로 나아가게 하는 것이다. 이때 낮은 포텐셜을 가진 목표 주위에는 인력장(attractive field)이 형성되고 높은 포텐셜을 가진 장애물 주위에는 척력장(repulsive field)이 형성된다. 포텐셜은 다양한 방법으로 주어질 수 있으며 이에 따라 다양한 인력장 및 척력장이 형성된다. 목표와 장애물 주변의 공간을 격자점(grid)으로 나타낸 다음 목표, 장애물로부터의 거리에 따라 임의의 포텐셜을 부여하는 격자 포텐셜(grid potential)부터 거리의 제곱에 비례하는 포텐셜을 부여하는 이차함수 포텐셜(quadratic potential), 거리의 지수함수에 비례하는 지수함수 포텐셜(exponential drop-off)까지 다양한 포텐셜이 연구되어왔다[5]-[6]. 또한 목표점이 아닌 어떤 점에서 포텐셜의 국소점(local minimum)이 발생함으로써 로봇이 더 이상 진행하지 못하고 갇히는 현상인 국소 최소점 문제(local minima problem)를 풀기 위한 포텐셜도 연구되어왔다[6][9]. 저자는 [1]에서 장애물에 대한 포텐셜과 목표물에 대한 포텐셜의 곱을 이용한 포텐셜 및 장애물-로봇-목표간의 각도에 따라 포텐셜이 달라지는 각변위 포텐셜 설계방법을 제안하였다.

스웜(swarm)은 다수의 자율적인 로봇으로 구성된 시스템이다[4]. 스웜에서의 자기조직화는 스웜이 주어진 목적에 따라 스스로를 기하, 구조적으로 배열하여 형태를 최적화시키는 능력을 뜻한다[4]. 본 연구에서 스웜로봇의 자기조직화는 다수의 로봇이 제 위치를 찾아가며 조직을 이루는 것으로, 로봇과 로봇 사이의 상호작용을 필요로 한다[4]. 로봇 자체에서 나오는 포텐셜을 통해 이러한 상호작용을 구현할 수 있으며, 이는 로봇이 스웜시스템을 이루어 목표점으로 진행할 수 있게 한다[8].

포텐셜장 기법은 그 경제성에 힘입어 많은 연구가 진행되어 왔지만, 대부분의 포텐셜장을 이용한 기법들은 이차원 공간에서의 경로계획으로 그 이용이 국한되어왔다. 무인 정찰기와 무인 잠수정 등 3차원 공간(3D)에서 활동하는 자율로봇이 요구 및 개발되고 있는 현재 시점에서 3D 상에서의 경로계획 기법에 대한 개발은 필수적이다. 연구[2]에서는 3D 환경에서의 D\* 알고리즘을 이용한 경로계획법을 보여 주었고, 연구[3]에서는 신경회로망 기반의 경로계획법을 3D 환경으로 확장하여 보여 주었다. 그러나, 3D 환경에서 경로계획법이 아닌 자기조직화를 다룬 연구는 아직 많지 않은 실정이다. 자기 조직화는 다개체 에이전트 혹은 로봇간의 충돌회피와 대형유지(flocking)도 포함 하므로 경로계획 보다 더욱 복잡하다.

본 연구에서는 기존에 2D 상에서의 자기조직화를 위해 개발된 여러 포텐셜들을 3D로 확장설계하는 방법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 제안된 3D 자기조직화 설계 방법의 효율성을 보여준다. 2장에서는 2D 상에서 이차함수와 지수함수로 설계된 포텐셜 함수를 3D 환경으로 확장하는 설계 방법을 보여준다. 마지막으로 각각의 포텐셜을 이용한 경로계획의 결과를 시뮬레이션을 통해 보임으로써 2D와 3D에서의 설계 방법과 그 차이점을 다룰 것이다.

## 2. 인공 포텐셜 함수(APFs) 설계

### 2.1 인공 포텐셜장

물리적으로 포텐셜의 그레디언트(gradient)는 힘을 의미하며, 힘은 물체의 가속도에 비례한다. 하지만 인공 포텐

셜장 기법에서 포텐셜(U)의 그레디언트는 속도에 비례한다. 즉,0

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = -k\nabla U \quad (1)$$

여기서,  $\vec{P}$ 는 로봇의 위치 벡터이고  $k$ 는 가중치 상수이다. 그런데 실제로 포텐셜 U는 임의로 설정할 수 있으므로,  $k=1$ 이 되도록 설정할 수 있다. 따라서,

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = -\nabla U \quad (2)$$

이는 포텐셜이 최소가 되는 지점, 즉 목표 지점에서 속도가 0이 되어 로봇이 멈추게 됨을 의미한다.

### 2.2 이차함수 포텐셜의 2D에서 3D로의 확장

이차함수 포텐셜은 목표물, 장애물로부터의 거리의 제곱에 비례하는 포텐셜을 형성하는 방법으로, 경로 계획의 목적으로 사용되는 인공 포텐셜(APF) 중 가장 간단한 편에 속한다. 이와 관련된 내용은 이후 시뮬레이션에서 다시 설명한다.

이차함수 포텐셜에서는 로봇과 목표물, 장애물 사이의 상대적 위치가 중요하다. 목표물의 위치를  $(x_g, y_g)$ ,  $i$ 번째 장애물의 위치를  $(x_o^i, y_o^i)$ , 로봇의 위치를  $(x_r, y_r)$ 라 하였을 때 상대적 위치 벡터  $\vec{\psi}_g$ 와  $\vec{\psi}_o^i$ 는 다음과 같다.

$$\vec{\psi}_g = (x_r - x_g, y_r - y_g), \quad \vec{\psi}_o^i = (x_r - x_o^i, y_r - y_o^i) \quad (3)$$

목표물 포텐셜은 식 (4)와 같이 설계된다.

$$U_g = \frac{1}{2} k_g |\vec{\psi}_g|^2 \quad (4)$$

여기서,  $k_g$ 는 가중치 상수이다.

목표물 포텐셜은 목표물에서 멀수록 커지고, 목표물 지점에서 0이 된다. 즉 로봇은 목표물을 향해 나아가게 된다.

장애물 회피를 위한 포텐셜은 다음과 같다.

$$U_o^i = \begin{cases} \frac{1}{2} k_o \left( \frac{1}{|\vec{\psi}_o^i|} - \frac{1}{\rho} \right)^2 & \text{if } |\vec{\psi}_o^i| \leq \rho \\ 0 & \text{if } |\vec{\psi}_o^i| \geq \rho \end{cases} \quad (5)$$

여기서,  $k_o$ 는 가중치 상수이다.

로봇이 장애물에  $\rho$ 보다 먼 거리에 있을 때는 장애물 포텐셜이 아무 영향을 미치지 않으나  $\rho$ 보다 가까운 거리로 들어서는 순간부터 장애물 포텐셜이 발동된다.

목표물로의 이동과 장애물 회피를 위한 전체 포텐셜은 다음과 같다.

$$U_{total} = U_g + U_o = U_g + \sum_{i \in G} U_o^i \quad (6)$$

식 (6)에서 G는 로봇 근처에서 척력장을 갖고 있는 장애물의 최대수를 의미한다. 식 (6)의 포텐셜에 대한 힘은 다음과 같다.

$$F_{total} = \frac{d\vec{P}}{dt} = -\nabla U_{total} = -\nabla U_g + \sum_{i \in G} (-\nabla U_o^i) \quad (7)$$

여기서,  $-\nabla U_g = -k_g \vec{\psi}_g$ ,

$$-\nabla U_o = \begin{cases} k_o \left( \frac{1}{|\psi_o^i|} - \frac{1}{\rho} \right) \frac{\vec{\psi}_o^i}{|\psi_o^i|^3} & \text{if } |\psi_o^i| \leq \rho \\ 0 & \text{if } |\psi_o^i| \geq \rho \end{cases} \quad (8)$$

이차함수 포텐셜의 경우 2D와 3D에서 포텐셜 함수가 완전히 동일하다. 다만 이차원이 아닌 삼차원이기에 상대적 위치 벡터가 삼변수 벡터로 바뀌게 된다. 목표물의 위치를  $(x_g, y_g, z_g)$ ,  $i$ 번째 장애물의 위치를  $(x_o^i, y_o^i, z_o^i)$ , 로봇의 위치를  $(x_r, y_r, z_r)$ 로 정하면 상대적 위치 벡터  $\vec{\psi}_g$ 와  $\vec{\psi}_o^i$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{\psi}_g &= (x_r - x_g, y_r - y_g, z_r - z_g) \\ \vec{\psi}_o^i &= (x_r - x_o^i, y_r - y_o^i, z_r - z_o^i) \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)는 2D에서의 식(3)을 확장한 것이다.

### 2.3 지수함수 포텐셜의 2D에서의 3D로의 확장

지수함수 포텐셜의 경우 포텐셜의 힘에 의해 로봇이 이동한다는 점에서 이차함수 포텐셜과 같으나 이차함수 포텐셜과 달리 포텐셜의 크기가 로봇과 목표, 장애물 간의 거리의 지수함수에 비례한다. 이차함수 포텐셜의 경우 로봇이 장애물로부터 멀어질수록 힘이 급격하게 증가한다는 단점이 있으며, 목표물 또는 장애물의 포텐셜이 미치는 힘을 정교하게 조절할 수 없다. 하지만 지수함수 포텐셜의 경우 몇 가지 상수를 조절함으로써 포텐셜의 세기, 즉 깊이와 적용 범위, 즉 면적을 동시에 조절할 수 있다.

상대적 위치 벡터  $\vec{\psi}_g$ 와  $\vec{\psi}_o^i$ 는 2D에서의 이차함수 포텐셜과 동일하게 사용한다.

식 (10)은 2D에서 로봇이 목표물로 이동하기 위한 포텐셜이다.

$$U_g = c_g \left( 1 - e^{-\frac{|\vec{\psi}_g|^2}{l_g}} \right) \quad (10)$$

목표물 포텐셜은  $\vec{\psi}_g$ 가 0이 될 때, 즉 로봇이 목표물에 도착하였을 때 최소가 된다. 지수함수 포텐셜은 두 개의 상수  $c_g, l_g$ 를 가지며, 이는 각각 포텐셜의 세기와 적용 범위를 결정한다.  $c_g$ 가 클수록 포텐셜은 강해지며,  $l_g$ 이 클수록 포텐셜은 적용 범위가 커진다.

식 (11)은 로봇의 장애물 회피를 위해 사용되는 포텐셜이다.

$$U_o = \sum_{i \in G} U_o^i = \sum_{i \in G} c_o e^{-\frac{|\vec{\psi}_o^i|^2}{l_o}} \quad (11)$$

여기서,  $G$ 는 센서범위내에 있는 장애물들이고, 식(5)에서  $|\psi_o^i| \leq \rho$ 에 해당된다.

장애물 포텐셜은 목표물 포텐셜과 마찬가지로 두 개의 상수  $c_o, l_o$ 에 의해 세기와 적용 범위가 결정된다.

목표물 포텐셜과 장애물 포텐셜을 합한 전체 포텐셜은 다음과 같다.

$$U_{total} = U_g + U_o = c_g \left( 1 - e^{-\frac{|\vec{\psi}_g|^2}{l_g}} \right) + \sum_{i \in G} c_o e^{-\frac{|\vec{\psi}_o^i|^2}{l_o}} \quad (12)$$

식 (12)의 포텐셜에 대한 힘은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{F}_{total} &= \frac{d\vec{P}}{dt} = -\nabla U_g - \nabla U_o \\ &= \frac{-2c_g \vec{\psi}_g}{l_g^2} e^{-\frac{|\vec{\psi}_g|^2}{l_g}} + \sum_{i \in G} \frac{2c_o \vec{\psi}_o^i}{l_o^2} e^{-\frac{|\vec{\psi}_o^i|^2}{l_o}} \end{aligned} \quad (13)$$

지수함수 포텐셜의 경우 EH한 이차함수 포텐셜과 마찬가지로 상대적 위치벡터를 삼변수 벡터로 바꾸으로써 3D에서의 포텐셜을 구현할 수 있다.

### 2.4 지수함수 포텐셜을 이용한 곱하기, 더하기 구조

장애물이 목표물과 근접해 있을 때 로봇은 장애물에서 발생하는 척력에 의해 목표물로 접근하지 못한다. 따라서, 저자는 이러한 극소 최소점 문제를 해결하기 위해 전체 포텐셜을 다음과 같은 방법으로 설계하였다.[1]

$$U_{total} = U_g \cdot U_o + U_g \quad (14)$$

이때  $U_g$ 와  $U_o$ 는 지수함수 포텐셜과 동일하다. 이러한 곱하기, 더하기 구조는 장애물로부터 먼 곳에서는  $U_o$ 가 0에 가깝기 때문에 기존의 목표물 포텐셜인  $U_g$ 와 흡사한 포텐셜을 갖게 된다. 또한, 기존의 지수함수 포텐셜과 다르게  $U_o$ 가 커지더라도 목표에 가까워지면  $U_g$ 가 작아져  $U_{total}$ 이 0에 가까워지게 된다. 따라서 장애물이 목표물과 근접해 있을 때 목표물 포텐셜이 장애물 포텐셜을 작게 만들어 극소점이 생기는 현상을 방지할 수 있다.

### 2.5 지면 포텐셜 - 비행기, 잠수정의 경우

3D 경로계획이 쓰이는 비행기나 잠수정의 경우 지면이나 수면과 같이 닿지 않아야할 경계면이 존재한다. 따라서 경계면에서 나오는 포텐셜을 설정함으로써 로봇이 경계면에서부터 일정 거리 이상 떨어진 상태에서 이동할 수 있도록 하여야 한다. 이때 경계면은 평면 장애물의 일종이라 볼 수 있으므로 장애물 포텐셜과 유사한 포텐셜을 이용하여 경계면에 대한 포텐셜을 설계해야 한다. 본 연구에서는 경계면에 대한 포텐셜을 다음과 같이 설계하였다.

$$U_{gp} = c_{gp} e^{-\frac{h^2}{l_{gp}^2}} \quad (15)$$

여기서,  $h$ 는 경계면과 로봇 간의 거리이다. 지수함수 포텐셜은 두 개의 상수  $c_{gp}, l_{gp}$ 를 가지며, 이는 각각 포텐셜의 세기와 적용 범위를 결정한다. 저자가 [1]에서 제안한 2D 기반의 자기조직화 내용을 본 연구에서는 3D 기반에서 지면충돌을 회피하기 위하여 지면 포텐셜을 추가하여 설계 가능한지를 시뮬레이션으로 결과로 검증한 확장 논문이다.

### 2.6 로봇간의 포텐셜

로봇 간의 포텐셜 함수를 이용하면 복수의 로봇들이 일정 거리를 유지하여 서로 부딪히지 않게 할 수 있다. 이때 지수함수 포텐셜은 로봇간의 거리를 쉽게 설정할 수 있다는 점에서 유용하다. 3D에서 로봇간의 자기 조직화를 위하여

다음과 같은 포텐셜 함수를 설계한다.

$$U_f^i = \sum_{k \in N_{fi}} \left\{ c_r e^{-\frac{|\psi_f^k|^2}{l_r^2}} - c_a e^{-\frac{|\psi_f^k|^2}{l_a^2}} \right\} \quad (16)$$

이때  $N_{fi}$ 는 로봇  $i$ 의 이웃 로봇들의 집합을 의미하며  $c_r$ ,  $c_a$ ,  $l_r$ ,  $l_a$ 는 척력 및 인력장의 세기와 적용 범위를 의미한다. 이러한 로봇 간의 포텐셜에 그래디언트를 취하면 다음과 같은 힘을 얻는다.

$$F_f^i = -\nabla U_f^i = \sum_{k \in N_{fi}} \left\{ \frac{2c_r \psi_f^k}{l_r^2} c_r e^{-\frac{|\psi_f^k|^2}{l_r^2}} - \frac{2c_a \psi_f^k}{l_a^2} c_a e^{-\frac{|\psi_f^k|^2}{l_a^2}} \right\} \quad (17)$$

### 2.7 자기조직화

3D에서의 자기조직화란 장애물과 지면 충돌을 회피하며, 이웃 로봇간의 일정한 간격을 유지하며 목적지까지 도달하는 것을 의미한다. 이를 실현하기 위하여 다음과 같이 포텐셜을 구성한다.

목표물 포텐셜과 장애물 포텐셜을 일반적 구조인 식(12)와 지면 포텐셜 식(15), 로봇간의 포텐셜 식(16)을 기반으로 하는 자기조직화 식은 다음과 같다.

$$U_1 = c_g \left( 1 - e^{-\frac{|\psi_g|^2}{l_g^2}} \right) + \sum_{i \in G} c_o e^{-\frac{|\psi_o^i|^2}{l_o^2}} + c_{gp} e^{-\frac{h^2}{l_{gp}^2}} + \sum_{k \in N_{fi}} \left\{ c_r e^{-\frac{|\psi_f^k|^2}{l_r^2}} - c_a e^{-\frac{|\psi_f^k|^2}{l_a^2}} \right\} \quad (18)$$

목표물 포텐셜과 장애물 포텐셜을 곱하기, 더하기 포텐셜을 나타내는 식(14)와 지면 포텐셜 식(15), 로봇간의 포텐셜 식(16)을 기반으로 하는 자기조직화 식은 다음과 같다.

$$U_2 = U_g \cdot U_o + U_g + c_{gp} e^{-\frac{h^2}{l_{gp}^2}} + \sum_{k \in N_{fi}} \left\{ c_r e^{-\frac{|\psi_f^k|^2}{l_r^2}} - c_a e^{-\frac{|\psi_f^k|^2}{l_a^2}} \right\} \quad (19)$$

위의 식(18)과 식(19)는 로봇의 자기조직화를 위하여 식(2)와 같이 포텐셜의 (-)그래디언트 값을 로봇이 다음 스텝에서 움직여야 하는 변화값으로 사용하며, k 값을 변화값의 가중치로 사용한다.

식(18)과 식(19)에 대한 시뮬레이션 결과 비교는 3장에서 다룬다.

## 3. 시뮬레이션

### 3.1 이차함수 포텐셜

그림 1은 3차원에서 이차함수 포텐셜을 이용한 경로계획의 시뮬레이션이다. 목표물은 (20,20,4)에 위치해있으며 로봇은 (4,4,2)에서 출발한다. 또한  $[8,10] \times [8,10] \times [0,5]$ 의 총 54개의 격자점에는 장애물이 위치해있다. 시뮬레이션에서  $k_g = 1$ ,  $k_o = 100$ ,  $\rho = 10$ 이 사용되었다. 그림 1.(a), (b), (c), (d)는 각각 정면, yz 평면, xz 평면, xy 평면에서 로봇이 목표물을 향해 움직인 경로의 궤적을 보여준다.

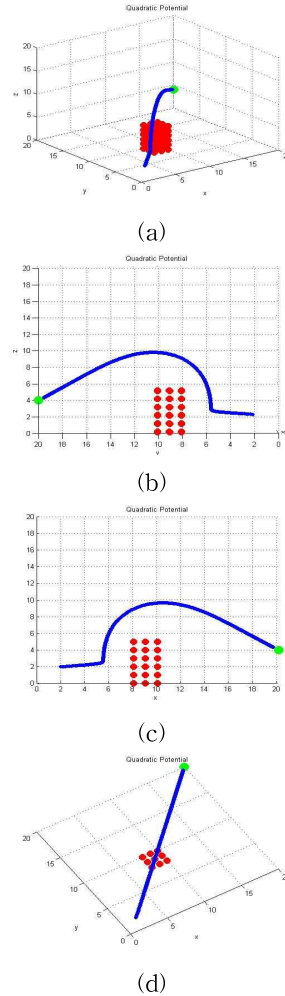
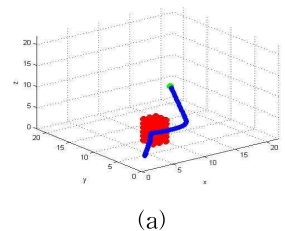


그림 1. 이차함수 포텐셜을 이용한 경로계획  
Fig. 1. Path planning using quadratic potential functions

### 3.2 지수함수 포텐셜

그림 2는 3차원에서의 지수함수 포텐셜을 이용한 경로계획의 시뮬레이션이다. 이차함수 포텐셜의 경우와 마찬가지로 목표물은 (20,20,4)에 위치해있으며 로봇은 (4,4,2)에서 출발한다. 또한  $[8,10] \times [8,10] \times [0,5]$ 의 총 54개의 격자점에는 장애물이 위치해있다.  $c_g = 10$ ,  $l_g = 10$ ,  $c_o = 5$ ,  $l_o = 1$ 이 사용되었다. 그림 2.(a), (b), (c), (d)는 각각 정면, yz 평면, xz 평면, xy 평면에서 로봇이 목표물을 향해 움직인 경로의 궤적을 보여준다.



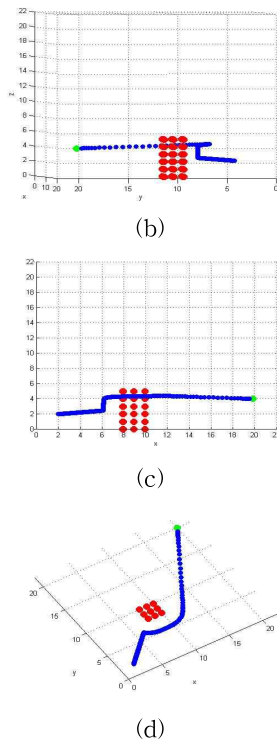
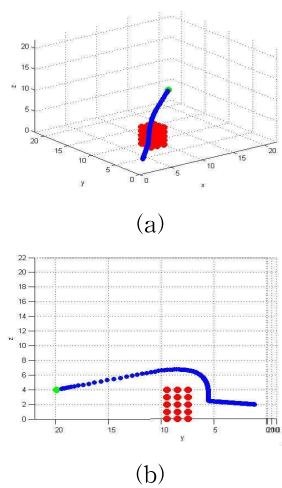


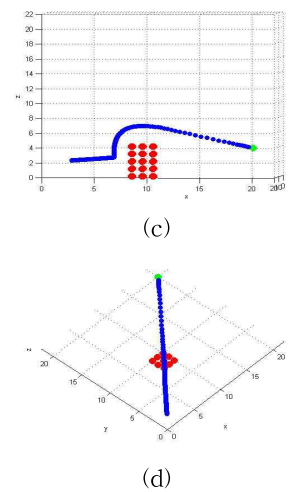
그림 2. 지수함수 포텐셜을 이용한 경로계획  
Fig. 2. Path planning using exponential potential functions

3D에서의 경로계획의 커다란 특징은 로봇이 여러 방향으로 이동할 수 있으며, 이에 따라 장애물을 다양한 경로로 회피할 수 있다는 것이다. 장애물이 6층 높이인 그림 2에서는 로봇이 장애물의 측면을 통과하였지만, 그림 3과 같이 장애물이 5층일 경우 로봇은 측면이 아닌 윗면을 지나 목표점으로 나아가게 된다.



(a)

(b)



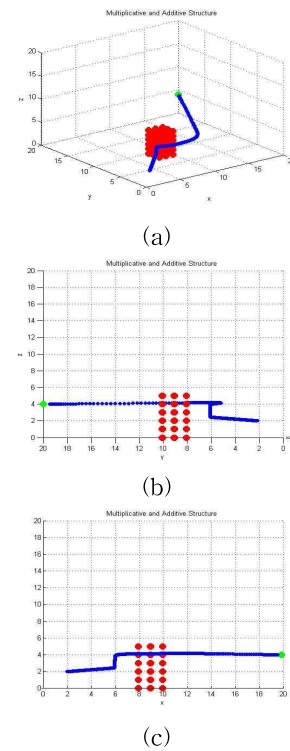
(c)

(d)

그림 3. 다른 각도에서 보여진 장애물 회피의 예  
Fig. 3. An example of obstacle avoidance viewed in different angles

### 3.3 지수함수 포텐셜의 곱하기, 더하기 구조

지수함수 포텐셜과 마찬가지로 목표물은 (20,20,4)에 위치해있으며 로봇은 (4,4,2)에서 출발한다. 또한  $[8,10] \times [8,10] \times [0,5]$ 의 총 54개의 격자점에는 장애물이 위치해있다.  $c_g = 5$ ,  $l_g = 10$ ,  $c_o = 2$ ,  $l_o = 1$ 이 사용되었다. 그림 4.(a), (b), (c), (d)는 각각 정면, yz 평면, xz 평면, xy 평면에서 로봇이 목표물을 향해 움직인 경로의 궤적을 보여준다. 장애물이 목표물 근처에 있는 경우는 아니지만, 경로 궤적 자체가 일반적인 더하기 구조와 다르게 장애물 측면으로 돌아 목표물로 향하였다.



(a)

(b)

(c)

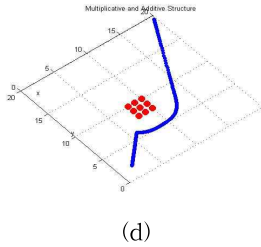
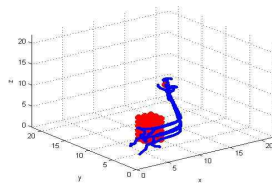


그림 4. 지수함수 포텐셜의 더하기, 곱하기 구조를 이용한 경로계획

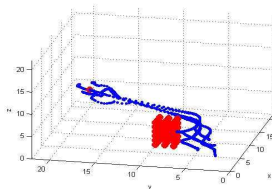
Fig. 4. Path planning using exponential potential functions with an additive and multiplicative structure

### 3.4 지수함수 포텐셜을 이용한 스웸시스템의 자기조직화

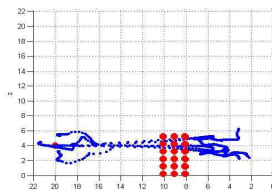
그림 5는 3D 환경에서의 지수함수 포텐셜을 이용한 경로 계획이다.  $c_g = 10$ ,  $l_g = 10$ ,  $c_o = 5$ ,  $l_o = 1$ ,  $c_a = 0.2$ ,  $l_a = 3$ ,  $c_r = 2$ ,  $l_r = 1$  이 사용되었다. 목표물은 (20,20,4)에 위치해있으며, 다섯 개의 로봇은 각각 (2,2,2), (5,4,3), (2,4,3), (3,3,6), (6,3,2)에 위치해있다.  $[8,10] \times [8,10] \times [0,5]$ 의 총 54개의 격자점에는 장애물이 위치해있다. 로봇 5대가 서로 충돌하지 않고, 모여서 목표물에 도달하였다.



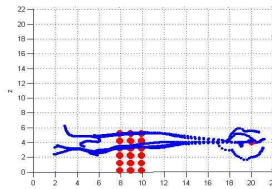
(a)



(b)



(c)

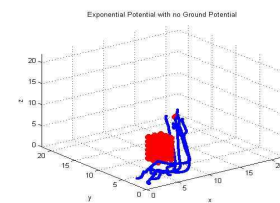


(d)

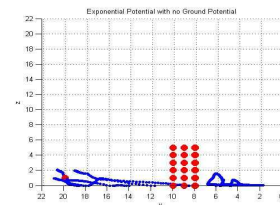
그림 5. 지수함수 포텐셜을 이용한 자기조직화  
Fig. 5. Self-organization using exponential potential functions

### 3.5 지면 포텐셜 - 비행기, 잠수정의 경우

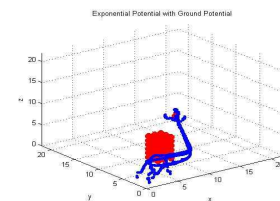
그림 6(a), (b)는 지면 포텐셜이 적용되기 이전의 경로를 보여주며 그림 6(c), (d)는 지면 포텐셜이 적용된 이후의 경로를 보여준다. 둘다 지수함수 포텐셜이 이용되었으며  $c_g = 10$ ,  $l_g = 10$ ,  $c_o = 5$ ,  $l_o = 1$ ,  $c_a = 0.2$ ,  $l_a = 3$ ,  $c_r = 2$ ,  $l_r = 1$ 이다. 로봇의 초기 위치는 (2,2,0), (5,4,0), (2,4,0), (3,3,0), (6,3,0)이며 목표물은 (20,20,1)에 위치해있다.  $[8,10] \times [8,10] \times [0,5]$ 의 총 54개의 격자점에는 장애물이 위치해있다.  $c_{gp} = 0.5$ 이며  $l_{gp} = 0.1$ 이다. 지면 포텐셜은 로봇의 z좌표값이 0 이상 0.5 이하일 때만 적용되도록 하였다.



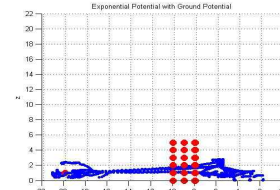
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 6. 지면 포텐셜을 이용하지 않은 경우와 이용한 경우의 비교 (지수함수 포텐셜)

Fig. 6. Comparison of the cases with and without ground potential (exponential potential)

그림 6의 (a), (b)는 각각 지면 포텐셜을 이용하지 않은 지수함수 포텐셜 기반 스웸시스템의 정면과 yz 평면을 나타낸다. 그림 6의 (c), (d)는 각각 지면 포텐셜을 포함한 식

(18)의 포텐셜을 이용한 스웜시스템의 정면과 yz 평면을 나타낸다. 지면 포텐셜을 이용하지 않은 경우 로봇의 경우  $z=0$  밑으로 내려가는 반면 지면 포텐셜을 이용한 경우는 그렇지 않다.

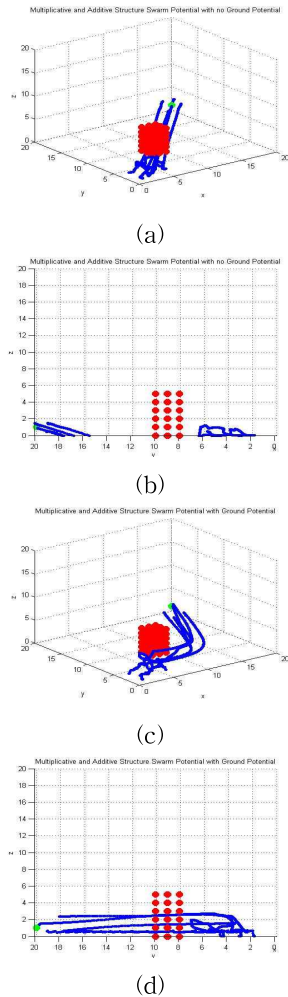


그림 7. 지면 포텐셜을 이용하지 않은 경우와 이용한 경우의 비교 (곱하기, 더하기 구조)

Fig. 7. Comparison of the cases with and without ground potential (an additive and multiplicative structure)

그림 6이 지수함수 포텐셜을 이용하였다면 그림 7은 지수함수 포텐셜의 곱하기, 더하기 구조를 이용한 자기조직화이다. 그림 7의 (a), (b)는 각각 곱하기, 더하기 구조 포텐셜 기반 스웜시스템의 정면과 yz를 보여준다. 그림 7의 (c), (d)는 각각 식(19)의 포텐셜을 이용한 스웜시스템의 정면과 yz 평면을 나타낸다. 마찬가지로 지면 포텐셜을 이용하지 않은 경우 로봇의 경우  $z=0$  밑으로 내려가는 반면 지면 포텐셜을 이용한 경우는 그렇지 않다. 이는 지면 포텐셜을 추가함으로써 기존의 포텐셜을 경계면을 가진 3D 공간에 적용할 수 있음을 보여준다. 즉, 하늘에서는 땅으로, 물속에서는 물위로 로봇과 같은 에이전트(무인항공기, 무인 잠수함)가 범위 밖을 벗어나지 않는 다른 것을 의미한다.

본 논문은 저자가 [1]에서 제안한 2D 기반의 자기조직화

내용을 본 연구에서는 3D 기반에서 지면충돌을 회피하기 위하여 지면 포텐셜을 추가하여 자기조직화를 재설계 하였으며, 실제 가능한지를 시뮬레이션으로 결과로 검증한 확장 논문이다.

#### 4. 결론

3D 환경의 경우 지면이나 해상에서의 수면과 같은 경계면이 존재하며, 로봇이 경계면에 충돌하지 않게 하기 위해서는 추가적인 지면 포텐셜이 필요하다. 또한 3D 환경에서 각각의 로봇이 지면과 수면에서의 충돌을 회피하며 로봇들과의 간격을 유지하기 위해서는 새로운 자기조직화 설계가 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 기존의 포텐셜과 로봇 간의 포텐셜, 그리고 지면 포텐셜을 모두 고려한 3D 환경에서의 자기조직화를 구현하였다. 본 논문에서는 이차함수 포텐셜, 지수함수 포텐셜, 포텐셜 기반의 곱하기, 더하기 구조 등 2D 환경에서 사용되었던 다양한 포텐셜들을 3D 환경으로 확장설계하였으며, 각각에 대하여 결과 및 분석을 시뮬레이션을 통하여 보여 주었다. 장애물의 높이를 다르게 하여 시뮬레이션을 통해 2D에 비해 3D 환경에서는 로봇이 장애물을 회피할 수 있는 방향이 다양하다는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 3D에서의 경로 계획도 인공포텐셜 기반의 2D 경로계획에서 가지는 국소 최소점 문제들을 마찬가지로 그대로 가진다. 따라서 추후에는 3D환경에서 국소 최소점 문제 등 인공포텐셜 기법의 근본적인 문제를 해결하는 연구가 필요하다.

#### 참고 문헌

- [1] D. H. Kim, H. O. Wang, and S. Shin, "Decentralized control of autonomous swarm systems using artificial potential functions : Analytical Design Guidelines," *Int. Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 45, no. 4, pp. 369-394, 2006.
- [2] J. Carsten, D. Ferguson, A. Stentz, "3D Field D\*: Improved Path Planning and Replanning in Three Dimensions," *In the Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, 2006.
- [3] V. Kroumov, J. Yu, "3D Path Planning for Mobile Robots Using Annealing Neural Network," *In the Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, Okayama, Japan, 2009
- [4] D.H. Kim, "Self-organization of Decentralized System Agents Based on Modified Particle Swarm Algorithm," *Journal of Intelligent Robot Systems*, 46:129-149, 2006
- [5] D.H. Kim, "Self-organization of Swarm Systems by Association," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 6, No. 2, pp.1-10, 2008

- [6] D.H. Kim, S. Shin, "New repulsive potential functions with angle distributions for local path planning," *Advanced Robotics*, Vol. 20, No. 1, 25-47, 2006.
  - [7] R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, "Introduction to Autonomous Mobile Robots," The MIT Press, 2004.
  - [8] G. Ye, H.O. Wang, K. Tanaka, Z. Guan, "Managing group behaviors in swarm systems by associations," *In Proceedings of the 25th American Control Conference*, Minneapolis, Minnesota, pp. 3537-3544, 2006.
  - [9] S.S. Ge, Y.J. Cui, "New Potential Functions for Mobile Robot Path Planning," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 5, pp. 615-620, 2000
  - [10] Y. Koren, and J. Borenstein, "Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation," *Proc. of the IEEE int. Conf on Robotics & Automation*, pp. 1398-1404, 1991.
  - [11] S. S. Ge, and Y. J. Cui, "Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method," *Autonomous Robots*, vol. 13, no. 3, pp. 207-222, 2002.
- 

**저 자 소 개**



**김재현 (Jae Hyun KIM)**

2010년 : 한국과학영재학교 재학중

관심분야 : 스웸 시스템, 이동로봇 경로계획



**김동헌 (Dong Hun KIM)**

2001년 : 한양대학교 전기공학과(공학박사)

2001년~2003년 : 미국 듀크 대학교 연구원

2003년~2004년 : 미국 보스턴 대학교 연구원

2004년~2005년 : 일본 동경대학교 박사 후과정

2005년~현재 : 경남대학교 전기공학과 부교수

관심분야 : 스웸 시스템, 이동로봇 경로계획, 스웸 인텔리전스, 비선형 적응제어, 지능제어, 수중로봇