

# 대수곡선을 사용한 장애물 회피 경로공간 구축 및 로봇 경로계획

남궁인

로봇사업단, 대전첨단사업진흥재단

## 1. 서론

로봇경로 계획에 대한 문제는 로봇관련 연구의 중심문제의 하나로서 70년대 말부터 연구가 되기 시작되었다. 로봇 경로계획은 크게 두 가지로 나뉘는데, 하나는 비전이나 초음파센서를 이용한 장애물회피 또는 충돌방지와 관련된 문제이다. 다른 하나는 로봇의 작업영역이 주어진 상태에서 두지점(출발점과 도착점) 간의 장애물회피 경로를 이론적으로 구하는 문제이다. 첫 번째는 국부적인 장애물 회피 및 충돌방지와 관련된 문제이고 두 번째는 전체적인(Global Path Planning) 작업공간에서 로봇의 이동 경로를 구하는 문제이다. 로봇 작업환경 내의 장애물이 이동하는 경우 또는 도착점이 시간에 따라 변하는 경우 동적인 경로계획의 문제로 확장된다.

여기서는 두 번째 경우에 대해 알아보기로 한다. 이것은 로봇이 처한 환경에 대한 정보가 확보되어 있다는 가정 하에 출발한다. 즉 로봇의 자기위치 인식에 관한 것, 센서를 사용한 장애물의 인식에 대한 것, 그리고 로봇이 처한 환경의 장애물의 모양과 위치 및 도착점에 대한 정보 등을 종합하여 로봇이 처한 환경에 대한 맵 구축에 대한 것은 별개의 문제로서 여기서는 논외로 한다. 로봇의 장애물회피 경로계획은 이렇게 획득한 정보를 바탕으로 주어진 두 점사이의 경로를 구하는 것이다.

장애물회피 경로계획은 로봇프로그래밍의 많은 부분을 단순화시켜서 단지 출발점과 도착점의 위치와 자세 등을 지정해주면 로봇이 지나야할 경로를 구하고, 장애물과의 충돌을 회피한 작업을 가능하게 한다. 이러한 로봇의 장애물 회피 및 경로계획은 로봇 제어를 보다 인간친화적인 체계로 운용 가능하도록 한다. 그래서 복잡한 제어 프로그램을 하부구조로 숨겨서 작업능률을 증대시킬 수 있고, 로봇과 사람 또는 물체와의 예기치 않은 충돌을 방지할 수 있다.

지금까지 발표된 로봇 경로계획 알고리즘의 대표적인 것으로는 visibility graph search, free space search, potential field method 등이 있다. Visibility graph search[1-3]는 connectivity graph search로 불려지기도 하는데 장애물의 꼭지점과 출발점, 도착점사이를 직선으로 연결하여 연결선 중에서 장애물과 교차하지 않는 최단의 연결선을 찾는 방법이다. 출발점과 장애물의 모서리 및 도착점을 연결한 연결선을 트리구조의 연결선으로 구성하여, 이 트리

구조의 연결선으로부터 최단거리 경로를 찾는다. Visibility graph search의 문제점은 연결선으로 이루어진 트리를 구축하는데 많은 시간이 걸리는 것인데, 이것을 해결하기 위해 국부적으로 트리를 구성하여 계층적으로 경로를 찾는 방법 및 형상공간 내에서 연결선 트리의 구축 및 경로 검색에 heuristic algorithm을 적용하여 경로계획을 하는 방법이 제안되었다.

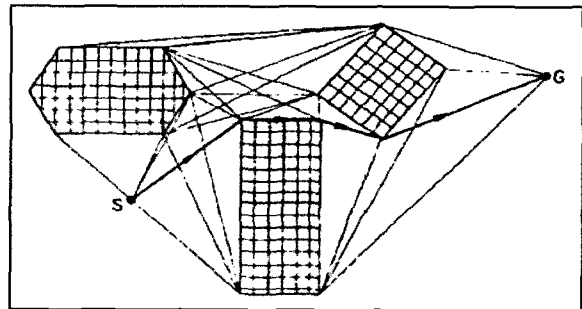


그림 1. Visibility graph search[1].

Free space search[4-6]는 작업공간을 4개의 셀로 나누어 (2차원문제의 경우), 각셀 내의 장애물 존재여부로 셀을 빈셀(empty cell), 혼합셀(mixed cell) 및 충전셀(full cell)로 구분하고, 혼합셀은 반복적으로 분할한다. 각 단계마다 빈셀을 트리구조로 구성하여 출발점과 도착점을 연결하는 경로를

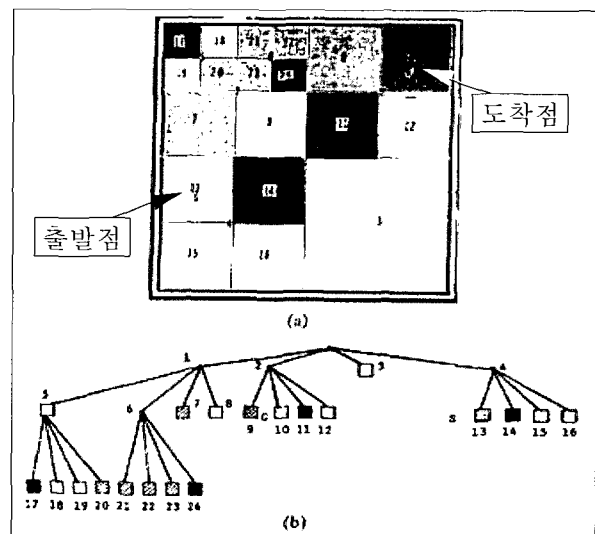


그림 2. Free space search (or Grid search)[4].

찾는다. 이것은 셀을 격자형으로 나누어 경로계획을 하기 때문에 grid based 경로계획 또는 quad tree based 경로계획이라 불리기도 한다. 이러한 quad tree based 경로계획의 문제점은 작업공간을 완전한 quad tree로 변환하고 이 트리로부터 경로를 검색하는데 많은 시간이 걸리는 것이다. 이것을 보완한 것이 heuristic algorithm을 적용하여 국부적으로 셀의 분할이 이루어지도록 한 방법이 제안되었다.

Potential field 방법에서는 장애물을 척력(repulsive pole)으로 나타내고, 도착점을 인력(attractive pole)으로 나타낸다. 장애물회피 궤적은 출발점과 도착점을 연결하는 궤적으로 optimization search method[7-11]를 사용하여 구한다. Potential field 방법의 단점은 국부적인 최저점(local minima)의 존재인데, 장애물의 배치 및 출발점과 도착점의 위치에 따라 경로가 국부최저점에 빠질 경우 이를 극복하기 어렵다는데 있다.

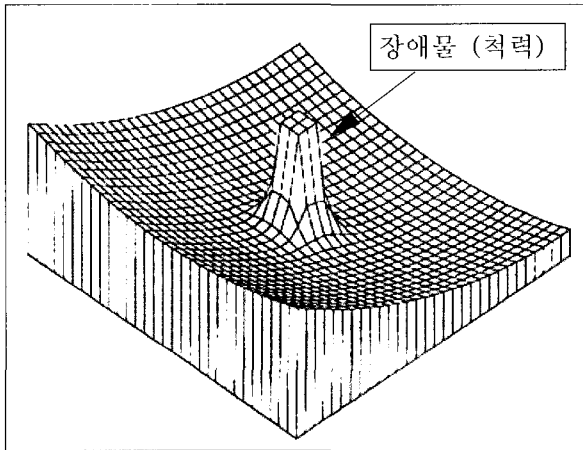


그림 3. Potential field method[7].

이상의 방법 외에 별래의 움직임을 본 따서 출발점으로부터 도착점까지를 직선과 장애물의 외면으로 연결하는 방법, 광학의 원리를 이용하여 출발점에서 원주방향으로 빛을 투사하여 장애물근처에서 회절한 빛이 도착점까지 도달하는 최단경로를 구하는 방법, 로봇의 경로계획에 spline curve를 사용하는 방법, 유전 알고리즘을 적용하는 방법 및 connectivity graph search와 유사한 방법으로서 작업공간내의 장애물의 voronoi diagram을 이용한 경로계획 방법 등 여러 가지 경로계획 방법이 제안되었다. 이와 같이 종래에 제안된 로봇 경로계획은 주어진 알고리즘에 따라 최단거리의 경로를 구하거나 가능한 하나의 경로를 구하게 된다.

저자는 이상에 언급한 방법 외에 대수곡선을 사용한 경로계획방법을 제안하였고, 위에 논의된 경로계획방법들을 하나의 통일된 체계로 귀속시킬 수 있음을 보였다. 대수곡선을 이용한 경로계획 방법에 대해 참고문헌 12와 13에서 보였고, 이를 발전 시켜 경로공간의 개념과 적용에 대해

참고문헌 14와 15에 기술하였다. 다음 장에 이에 대한 이론적 근거를 개략적으로 기술한다.

## 2. 경로공간 개념

유클리드 공간의 로봇 작업영역을  $W$ 로 정의하고, 출발점과 도착점을 각각  $S$  와  $G$  로 정의하면 ( $S, G \in W$ )이다. 그리고 출발점과 도착점을 연결하는 공간상의 대수곡선을  $L$ 로 정의하자. 그중 장애물과 교차하지 않는 대수곡선을  $L_{free}$  로 정의하고, 장애물과 교차하는 것을  $L_{int}$  로 정의한다. 출발점과 도착점을 연결하는 모든 가능한 곡선의 합은  $L = L_1 + L_2 + \dots + L_\infty$  이다. 여기서 동일한 차수 ( $n$ - dimension)의 대수곡선으로 이루어진 모든 경로를  $n$ -차 경로공간 ( $PS_n$ )이라 정의한다. 이것을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$PS_n = \sum_{i=1}^{\infty} L_i = \sum_{i=1}^{\infty} L_{free-i} + \sum_{i=1}^{\infty} L_{int-i}, \quad n=1,2,3,\dots,\infty \quad (1)$$

출발점과 도착점을 직선으로 연결하는 경우 하나의 경로가 존재하고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$PS_1 = L_{free-1} + L_{int-1} \quad (2)$$

이 경우 경로공간은 하나의 요소(member)로 구성된 특수한 경우로 귀착된다. 만일 경로가 장애물과 교차하면  $PS_1 = L_{int-1}$  이고, 경로가 장애물과 교차하지 않으면  $PS_1 = L_{free-1}$  이다.

출발점과 도착점을 연결하는 경로가 두개의 매개변수를 포함한 대수곡선으로 이루어진 경우, 2차원 경로공간 ( $PS_2$ )을 얻게 된다.

$$PS_2 = PS_{free-2} + PS_{int-2} \quad (3)$$

경로공간이 3개의 매개변수를 포함한 대수곡선으로 이루어진 경우에는 3차원 경로공간 ( $PS_3$ )을 형성한다. 이것을 일반화시키면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$gPS = \sum_{n=1}^{\infty} PS_n \quad (4)$$

이렇게 일반화한 경로공간 ( $gPS$ )는 사용된 경로곡선의 특성에 관계없이, 출발점과 도착점을 연결하는 모든 경로를 포함한다. 이렇게 구축한 경로공간은 경로공간을 구축하는 모함수 경로곡선에 대한 제한이 없는 연속공간이다. 반면 서론에 소개한 경로계획법은 유한한 경로만을 갖는

비연속공간이다. 따라서 여기서 소개하는 경로공간은 앞서 제안된 여러 경로계획법에 따른 경로를 모두 포함하는 방법이다.

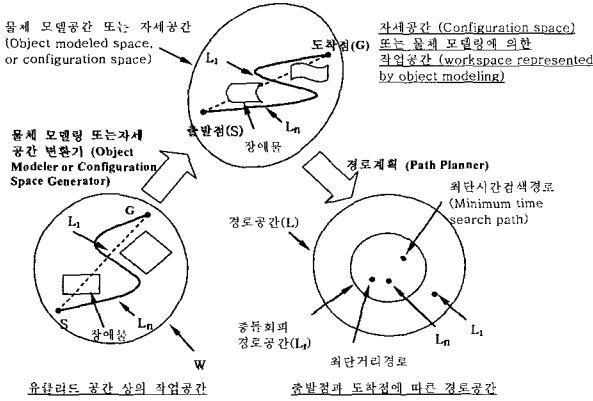


그림 4. 경로공간 개념.

그림 4에 앞에서 설명한 경로공간 구축에 대한 개념을 보인다. 로봇은 점이 아니므로 로봇이 처한 환경에 대한 물체모델링 또는 자세공간변환을 통해 로봇을 한점으로 나타낼 수 있는 공간으로 유클리드 공간을 변환한다. 이 공간상에 앞서 설명한 경로계획을 하면 원하는 경로공간을 얻을 수 있다.

다음 장에 두가지의 모함수에 기반한 경로공간구축 방법을 소개한다.

### 3. 경로공간 및 장애물회피 경로 구축

경로공간 구축에 사용되는 모함수 곡선은 매개변수를 사용한 대수곡선을 사용하는 것이 장애물과의 교차 등을 계산하기에 편리하다. 매개변수를 이용한 곡선은 다중 값을 갖는 함수 및 미분 값이 무한으로 발산하는 경우에도 수학적으로 어려움 없이 표현할 수 있고 방향성을 가지고 있는 여러 가지 이점을 가지고 있다.

#### 3.1. 직선경로와 장애물과의 교차

그림5의 출발점과 도착점을 연결하는 직선 경로 SG<sup>1)</sup>를 매개변수, s,를 이용하여 다음과 같이 표현한다.

$$r(s) = (G - S)s + S \quad (5)$$

변수 s를 0에서 1로 변화시키면 r(s)로 표현되는 경로는 출발점, S (r(s)<sub>s=0</sub>)에서 도착점, G (r(s)<sub>s=1</sub>)으로 움직여간다. 따라서 매개변수로 표현된 경로는 바로 로봇

1) 본 논문에서 좌표점 (S, G, r, P<sub>i</sub>, 등) 및 선, 선분 (SG, P<sub>i</sub>P<sub>j</sub>, 등)은 진한 글씨체로, 기타 변수 (s, t, θ, ρ, δ 등)은 보통 글씨체로 표기하였다.

의 제어에 적용될 수 있다. 또한 매개곡선의 이러한 방향성은 두 직선간의 교차 여부를 간단히 표현할 수 있게 한다. 장애물의 모서리를 나타내는 선분 P<sub>i</sub>P<sub>j</sub>와 직선경로간의 교차여부는 다음의 식을 이용하여 구한다.

$$(G - S)s + S = (P_j - P_i)t + P_i \quad (6)$$

위 식(6)에서 s는 선분 SG를 나타내는 매개변수이고, t는 장애물의 모서리를 나타내는 매개변수이다. 주어진 로봇 작업환경은 2차원이므로 식(6)로부터 s와 t의 값을 구할 수 있고, 따라서 교차점의 좌표를 얻을 수 있다. 만일 s와 t가 모두 0 ≤ s ≤ 1과 0 ≤ t ≤ 1의 범위 안에 들 경우, 선분 SG는 모서리 P<sub>i</sub>P<sub>j</sub>와 교차하게 되고, 그렇지 않은 경우 교차는 일어나지 않는다.

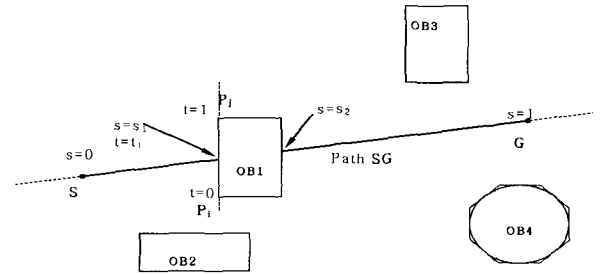


그림 5. 직선경로와 장애물과의 교차.

#### 3.2. 두개의 직선으로 이루어진 모함수 곡선을 사용한 경로공간 구축

앞 절에서는 출발점과 도착점을 연결하는 직선경로와 장애물과의 교차에 대해 다루었다. 만일 그 경로가 장애물과 간섭을 일으킬 경우 하나의 점, Q,을 중간 연결점으로 하여 그림6과 같이 경로를 구성한다. 여기서 연결점을 극좌표 (θ, ρ)로 나타내고, 매개변수의 범위를 0°(θ < 360°(θ ≠ 0°, 180°, 360°)와 0 < ρ ≤ ρ<sub>max</sub>로 정의하여 유클리드공간에서의 실제작업공간 전체를 포함하도록 원형작업공간을 정의한다. θ가 0°, 180°, 360°일 경우 경로는 선분 SG와 일치하므로 의미가 없어 제외한다.

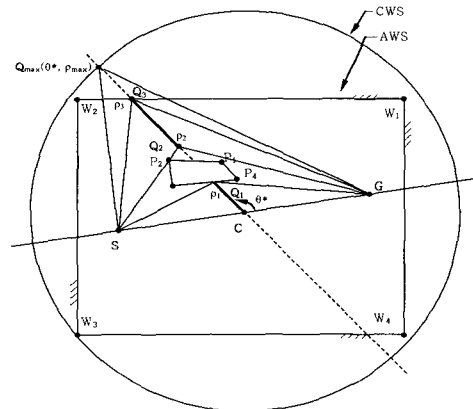


그림 6. 장애물과 경로간의 간섭.

이 원형작업공간의 중심, C,은 선분SG의 중심점으로 정의한다. 원형작업공간을 구하기 위해서는 실제작업공간을 구성하는 외곽점과 원형작업공간의 중심점으로부터 실제작업공간의 최대 내접반경, R<sub>max</sub>,을 구하여 원형작업공간의 반지름으로 한다. 이렇게 구한 R<sub>max</sub>로부터 θ값에 따른 Q<sub>max</sub>(Q<sub>max,x</sub>, Q<sub>max,y</sub>)을 다음과 같이 정의한다.

$$Q_{max,x} = \frac{R_{max}}{D} \{ (G_x - S_x) \cos \theta - (G_y - S_y) \sin \theta \} + C_x$$

$$Q_{max,y} = \frac{R_{max}}{D} \{ (G_x - S_x) \sin \theta + (G_y - S_y) \cos \theta \} + C_y$$

(7)

여기서 D는 선분 SG의 길이, D=|G-S|, 이다. 이것을 사용하여 최외곽을 지나는 연결점의 위치를 구할 수 있다. 주어진 각도에 따라 최외곽 연결점의 위치를 식(7)를 이용하여 구하고, 장애물과 간섭을 일으키는 변수 ρ의 값을 구한다. 장애물과의 간섭은 선분 SQ, QG와 장애물의 모서리 사이의 교차여부를 판별하여 결정한다. 그림 6에 나타난 바와 같이 장애물과의 간섭은, i) 궤적이 장애물의 모서리를 지나는 경우와, ii) 연결점이 장애물의 모서리와 접촉하는 경우로 구분된다.

첫 번째 경우는 아래의 식(8), (9)의 관계식으로 나타낸다.

$$\{ (Q_{max} - C) \rho_a + C - S \} r + S = P$$

(8)

$$\{ (Q_{max} - C) \rho_b + C - G \} s + G = P$$

(9)

위 식에서, 변수 r과 s는 각각 선분 SQ와 QG를 나타내고, 변수 ρ<sub>a</sub>와 ρ<sub>b</sub>는 연결점 Q의 위치를 나타내고, 점 P는 장애물의 모서리점을 나타낸다. 위 식에는 변수 ρ<sub>a</sub>와 ρ<sub>b</sub>는 변수 r과 s를 소거함으로써 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\rho_a = \frac{(P_x - S_x)(C_y - S_y) - (P_y - S_y)(C_x - S_x)}{(Q_{max,x} - C_x)(P_y - S_y) - (Q_{max,y} - C_y)(P_x - S_x)}$$

(10)

$$\rho_b = \frac{(P_x - G_x)(C_y - G_y) - (P_y - G_y)(C_x - G_x)}{(Q_{max,x} - C_x)(P_y - G_y) - (Q_{max,y} - C_y)(P_x - G_x)}$$

(11)

식(10)은 선 SQ 상에서 Q의 위치를 나타내는 ρ<sub>a</sub>를 계산하고, 식(11)은 선 QG 상에서 점 Q의 위치를 나타내는 ρ<sub>b</sub>를 계산한다. 이 ρ<sub>a</sub>와 ρ<sub>b</sub>값은 점 P가 CQ<sub>max</sub> 선상에 있지 않는 한 서로 다르다. 만일 선 SP와 CQ<sub>max</sub> 또는 GP와 CQ<sub>max</sub>가 서로 평행하면 식(10) 또는 식(11)의 분모는 0이 된다. 이러한 조건은 ρ<sub>a</sub>와 ρ<sub>b</sub>가 0 < ρ ≤ ρ<sub>max</sub>이므로, 분자와 분모를 바로 비교함으로써 해결할 수 있다. 만일 ρ<sub>a</sub>와 ρ<sub>b</sub>가 모두 0 < ρ ≤ ρ<sub>max</sub>일 경우, 점 P는 삼각형 SQ<sub>max</sub>G의 내부에 존재하고, ρ<sub>a</sub>와 ρ<sub>b</sub> 중 큰값에 해당하는 선분이 점 P와 교차하고 이것이 실제 접촉이 일어나는 ρ값이다. 이것의 예는 그림6의 점 P<sub>2</sub>와 선분 SQ 및 선분 QG 사이의 접촉점

계산에 해당하고, 계산결과 ρ<sub>2</sub>를 구한다.

두 번째의 경우, 연결점이 장애물의 모서리와 접촉하는 경우, 선분 CQ<sub>max</sub>는 모서리와 교차하게 된다. 이 경우 ρ는 식(6)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(Q_{max} - C) \rho + C = (P_2 - P_1) t + P_1$$

(12)

식(12)에서 변수 ρ와 t는 각각 선분 CQ<sub>max</sub>와 모서리 P<sub>1</sub>P<sub>2</sub>를 나타낸다. 식(12)로부터 변수 ρ와 t는 다음과 같이 식(13)과 (14)로 정리 할 수 있다.

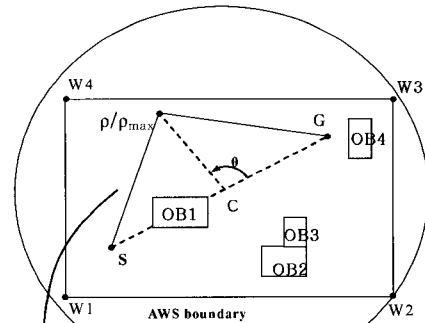
$$\rho = \frac{(P_{1,x} - C_x)(P_{2,y} - P_{1,y}) - (P_{1,y} - S_y)(P_{2,x} - P_{1,x})}{(Q_{max,x} - C_x)(P_{2,y} - P_{1,y}) - (Q_{max,y} - C_y)(P_{2,x} - P_{1,x})}$$

(13)

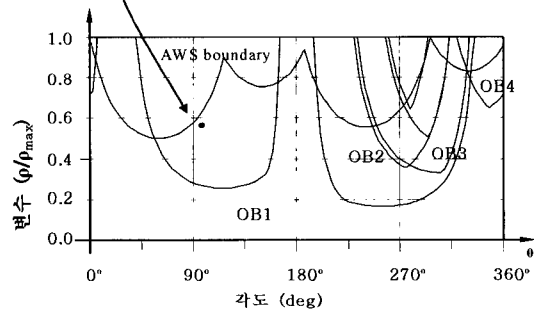
$$t = \frac{(Q_{max,x} - C_x)(C_y - P_{1,y}) - (Q_{max,y} - C_y)(C_x - P_{1,x})}{(Q_{max,x} - C_x)(P_{2,y} - P_{1,y}) - (Q_{max,y} - C_y)(P_{2,x} - P_{1,x})}$$

(14)

이식에서 선분 CQ<sub>max</sub>와 모서리 P<sub>1</sub>P<sub>2</sub>가 서로 평행할 때 분모는 0이 된다. 만일 ρ와 t가 둘다 0 < ρ < ρ<sub>max</sub>, 0 < t < 1이면 두 선분간의 교차가 일어난 것이다. 이것의 예는 그림6의 선분 P<sub>3</sub>P<sub>4</sub>와 선분 C<sub>max</sub>Q사이의 교차점 계산 및 작업영역 경계를 나타내는 선분 W<sub>1</sub>W<sub>2</sub>와 선분 C<sub>max</sub>Q사이의 교차점 계산에 해당하고, 계산결과 ρ<sub>1</sub>과 ρ<sub>3</sub>을 각각 구한다. 이상과 같이 두 가지 경우의 계산을 적용하여, 경로 SQ, QG와 장애물과의 간섭을 판별할 수 있다.



(a) 로봇 작업환경



(b) 경로공간

그림 7. 로봇 작업공간과 경로공간[14].

다음의 그림 7은 경로공간 구축작업 결과를 제시한다. 그림 7의 (a)는 로봇작업공간이고 장애물을 OB1, OB2, OB3 및 OB4로 표시하였다. 그림에서 실제 로봇작업공간(AWS, Actual WorkSpace)은 직사각형으로 표시된 영역이고, 원형공간은 실제작업공간을 포함하는 가상의 영역으로서 경로공간의 단순한 계산을 위해 도입되었다.

그림 7의 (a)에서 각도 ( $\theta$ )와 반경 ( $\rho$ )를 증가시키며 경로와 장애물과의 간섭을 계산하여 투영하면 그림(b)를 얻는다. 장애물의 투영에 대한 자세한 내용은 참고문헌 11번을 참고 바란다. 그림(b)의 회색부분은 장애물과 간섭이 일어나는 경로를 나타낸다. 장애물과의 간섭이 일어나지 않은 부분은 빈 공간으로 남게 되고, 그 공간은 장애물 회피경로를 나타낸다. 그림 7에 유클리드공간상의 충돌회피 경로와 이에 대응되는 경로공간상의 점을 제시하였다.

3.3. 이차 매개곡선을 사용한 경로공간

앞 절에서 직선을 이용한 경로공간구축에 대해 알아보았다. 여기서는 경로공간의 모함수 곡선으로 이차 매개곡선을 사용하여 경로공간을 구축하는 것을 보인다. 이차 매개곡선의 방정식은 여러 형태가 있는데, 여기서는 Bézier 곡선을 사용한 방법을 보인다. 이 곡선( $R(s)$ )은 다음과 같이 정의된다.

$$R(s) = \sum_{k=0}^n \frac{n!}{k!(n-k)!} s^k (1-s)^{n-k} R_k \quad (15)$$

여기서  $R_k$ 는  $k$ 번째 꼭지점이다. 이 식에서  $n=2$ 이면, 2차 매개변수 곡선을 나타낸다.

$$R(s) = (1-s)^2 R_0 + 2s(1-s)R_1 + s^2 R_2 = (R_0 - 2R_1 + R_2)s^2 + 2(R_1 - R_0)s + R_0 \quad (16)$$

$n=3$ 이면, 3차 매개변수 곡선을 나타낸다.

$$R(s) = (1-s)^3 R_0 + 3s(1-s)^2 R_1 + 3s^2(1-s)R_2 + s^3 R_3 \quad (17)$$

매개변수  $s$ 를 0에서 1로 변화함에 따라 곡선은  $R_0$ 에서  $R_2$  또는  $R_3$ 로 이동 한다.

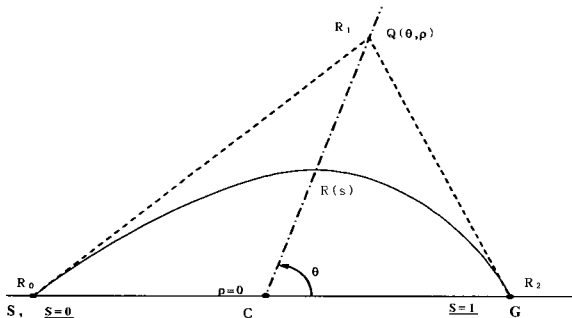


그림 8. 2차 매개변수 곡선.

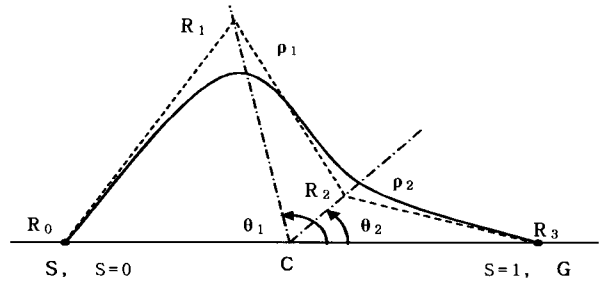


그림 9. 3차 매개변수 곡선.

2차 매개변수 곡선의 경우 곡선의 모양은  $R_1$ 의 위치에 따라 변하고, 3차 매개변수 곡선의 경우 곡선의 모양은  $R_1$ 과  $R_2$ 의 위치에 따라 변한다. 따라서 이러한 모서리 점의 위치를 조절함으로써 경로의 모양을 바꿀 수 있고, 장애물과의 간섭을 회피한 경로를 구할 수 있다. 그림 8의 경우 경로의 형태를 결정하는 모서리 점은  $R_1$  하나이고,  $R_1$ 의 위치를 나타내는 좌표를 극좌표로 표현한 경우 경로의 형태를 결정하는 변수는  $\theta$ 와  $\rho$ 의 두 개다. 따라서 2차원 경로공간이 만들어진다. 그림 9와 같이 두 개의 모서리 점을 가진 경로의 경우, 각각의 모서리 점의 위치를 결정하는 변수는 4개이고 4차원의 경로공간을 형성한다. 그리고 4개의 변수중 하나를 고정시키면, 3차원 경로공간이 된다. 예를 들어  $\theta_2=0^\circ$ 로 고정시키면, 3차원 경로공간을 얻게 된다.

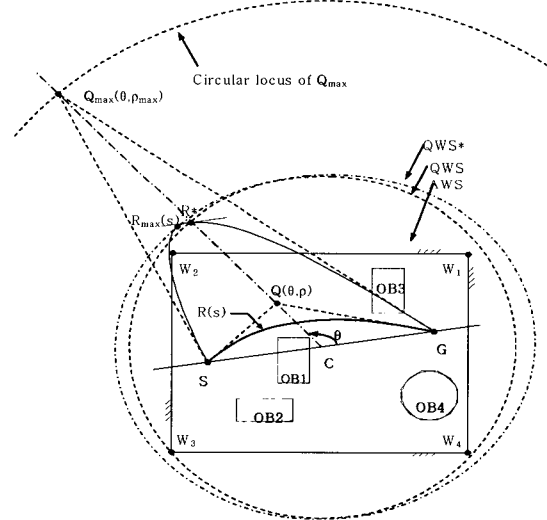


그림 10. 2차 매개변수 곡선을 이용한 경로 형성.

위의 그림 10에 하나의 모서리 점을 갖는 2차매개 변수를 이용한 장애물회피 경로 형성 방법을 보인다. 변수  $\theta$ 와  $\rho$ 는 극좌표로 나타낸 중간 모서리 점  $Q$ 의 위치를 결정하고, 여기서  $\theta$ 는 각도,  $\rho$ 는 반경방향 위치를 나타낸다. 사각형으로 표현된 것이 실제 로봇 작업영역(AWS, Actual WorkSpace)을 나타내고, 원으로 나타낸 것은 실제 작업영역을 포함하는 이차작업영역(QWS, Quadratic WorkSpace)를 나타낸다. 앞의 직선 경로를 사용한 것과 마찬가지로,

이 경우에도 경로와 장애물과의 간섭을 계산해야한다. 경로와 장애물과의 간섭은 두 가지가 존재하는데, 하나는 장애물의 모서리와 경로의 접촉이고, 다른 하나는 장애물의 꼭지점과 경로의 접촉이다. 우선 꼭지점과의 접촉은 식 (16)에  $R(s) = P_i$ (꼭지점),  $R_0 = S$ (출발점),  $R_1 = Q$ ,  $R_2 = G$ (도착점)을 삽입하여 구할 수 있다. 그리고 장애물의 모서리와와의 접촉은 다음의 관계를 사용하여 구한다.

$$(P_j - P_i)t - P_i = 2(C - Q_{max})\rho^2 + 2(Q_{max} - C)\rho + (G - S)s + S \quad (18)$$

이 식에서  $Q_{max}$ 의 좌표는 주어진 각도  $\theta$ 와  $\rho_{max}$ 에 대한 값으로 결정된다. 경로와 장애물 모서리와와의 접촉 조건은 식 (18)에서  $t$ 를 소거한 후,  $s$ 의 판별식=0 인 조건을 만족시켜야 한다. 이 조건으로부터 장애물 모서리와 경로의 접촉이 일어나는 범위의  $\rho$ 에 대해 계산할 수 있다. 이와 같은 방식으로 경로공간을 구한 것을 그림 11에 보인다.

그림 11에 보이는 경로공간의 모양이 앞의 그림 7의 경우와 상이함을 알 수 있다. 그러나 두 가지 모두 같은 2차 경로공간이므로 같은 차원의 경로공간에 속하는 서로 다른 경로공간이다. 그림 7과 그림 11에 보인 경로공간은 중간연결점의 위치를 극좌표로 구성한 것이다. 중간 연결점의 위치를 직교좌표나 다른 형태의 좌표를 사용하여 얻을 수 있고, 그런 경우 곡선의 형태에 따라 같은 경로를 나타낼 수도 있다. 그러나 모함수 경로의 모양이 다른 경우 서로 다른 경로공간을 만든다. 특히 중간 연결점을 구성하는 방법에 따라 다양한 경로공간 구축이 가능하다.

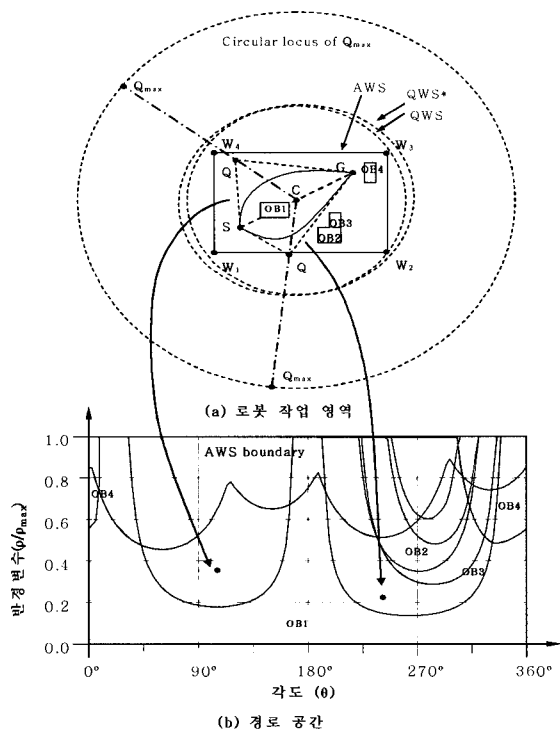


그림 11. 로봇 작업영역과 경로공간 구축[15].

앞장에서 경로공간 구축에 대한 개념에 대해 기술하였다. 이 방법은 경로의 복잡성이 높지 않아서 장애물과 경로와의 간섭을 결정론적인 방법으로 구하였다. 경로의 모함수 곡선이 3차 이상이 되면 장애물과의 간섭계산이 복잡해진다. 이것을 피하기 위해 앞에 보인 방법을 반복적으로 적용 하는 것이 복잡한 로봇 작업환경에 대한 경로계획의 한 가지 방법이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 기존의 경로계획과 달리 대수곡선을 사용하여 경로공간을 형성하는 방법을 제시하였다. 경로의 모함수로 대수곡선을 사용하고, 이 대수곡선의 형태를 제어하는 중간연결점의 위치를 매개변수 좌표로 표현하여 경로와 장애물과의 간섭을 매개변수로 이루어진 경로공간에 투영시켰다. 이렇게 주어진 로봇 작업환경 내의 장애물을 경로공간으로 투영하면, 경로공간 내에 장애물이 투영되지 않은 빈공간이 형성되고 이것은 장애물 회피 경로에 대응된다. 따라서 유클리드공간 상의 장애물 회피 경로계획 문제는 경로공간의 빈 공간에서 점 선정의 문제로 단순화된다.

장애물 회피 경로계획 시간을 단축하기 위해 경로공간의 전체적인 투영 없이 바로 장애물 회피 경로를 구할 수도 있다. 즉 장애물의 투영과정에서 장애물회피 경로를 구하는 순간 경로공간 형성 작업을 멈추어 경로계획 시간을 단축할 수 있다. 또는 경로공간을 얻은 후 경로의 형태에 대한 추가적인 조건을 부여하여 이러한 조건에 부합하는 경로를 구할 수도 있다. 즉 장애물로부터 가장 멀리 떨어진 경로 또는 출발점부터 도착점까지의 최단거리 경로 등을 경로공간의 빈 공간으로부터 얻을 수 있다.

경로공간은 모함수에 포함된 변수가 증가함에 따라 그 복잡성이 증가하게 된다. 본 논문에서는 두 개의 직선을 연결한 대수곡선과 이차 대수곡선을 모함수로 한 경로공간을 구축하는 것을 예시하여 다양한 방법으로 경로공간을 구축할 수 있음을 보였다.

#### 참고문헌

1. T. Lozano-Pérez and M. A. Wesley, "An Algorithm for Planning Collision-Free Paths Among Polyhedral Obstacles," *Communications of ACM*, vol. 22, no. 10, pp. 560-570, 1979.
2. S. Jun and K. G. Shin, "Shortest Path Planning in Discretized Workspaces Using Dominance Relation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 342-350, 1991.
3. K. C. Jiang, L. D. Seneviratne, and S. W. E.

- Earles, "A shortest path based path planning algorithm for nonholonomic mobile robots," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 347-366, 1999.
4. Y. F. Wu, P. Widmayer, M. D. F. Schlag, and C. K. Wong, "Rectilinear Shortest Path and Minimum Spanning Trees in the Presence of Rectilinear Obstacles," *IEEE Trans. On Computer*, vol. C-36, no. 3, pp. 321-331, 1987.
  5. S. Kambhampati and L. S. Davis, "Multiresolution Path Planning for Mobile Robot," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-2, no. 3, pp. 135-145, 1986.
  6. D. Jung and K. K. Gupta, "Octree-Based Hierarchical Distance Maps For Collision Detection," *Journal of Robotic Systems*, vol. 14, no. 11, pp. 789-806, 1997.
  7. O. Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," *International Journal of Robotic Research*, vol. 5, no. 1, pp. 90-98, 1986.
  8. P. Khosla and R. Volpe, "Superquadric Artificial Potential for Obstacle Avoidance and Approach," *IEEE Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation*, Philadelphia, pp. 1778-1784, 1988.
  9. J. Barraquand and J. C. Latombe, "Robot Motion Planning: A Distributed Representation Approach," *International Journal of Robotics Research*, vol. 10, no. 6, pp. 628-649, 1991.
  10. S. S. Ge, and Y. J. Cui, "New potential functions for mobile robot path planning," *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, vol. 16, no. 5, pp. 615-620, 2000.
  11. S. S. Ge and Y. J. Cui, "Dynamic Motion Planning for Mobile Robots Using Potential Field Method," *Autonomous Robots*, vol. 3, no. 13, pp. 207-222, 2002.
  12. I. Nangung, "Planning Collision-Free Paths with Applications to Robot Manipulators," (Ph. D. Dissertation), University of Florida, 1989.
  13. I. Nangung and J. Duffy, "Two Dimensional Collision-Free Path Planning Using Linear Parametric Curve," *Journal of Robotic Systems*, vol. 14, no. 9, pp. 659-673, 1997.
  14. I. Nangung, "Path Space Approach for Planning 2D Shortest Path Based on Elliptic Workspace Geometry Mapping," *KSME journal*, vol. 18, no. 1, pp. 92~105, 2004.
  15. I. Nangung, "Application of Quadratic Algebraic Curve for 2D Collision-free Path Planning and Path Space Construction," *International Journal of CAS*, vol. 2, no. 1, pp. 107~117, 2004.

..... 저자약력 .....



《남궁인》

- 1981년 2월 아주대학교, 기계공학과 졸업.
- 1983년 2월 공학석사, 기계공학과 (생산공학전공), 아주대학교.
- 1989년 12월 공학박사, 기계공학과(로봇공학전공), 플로리다대학교 (미국).
- 1990년 6월~1996년 12월 한국원자력연구소, 선임연구원, 중수로 원격제어 핵연료교체로봇 시스템담당.
- 1997년 1월~2003년 12월 한국전력기술, 부장, 중수로 원격제어 핵연료교체로봇 시스템 설계/해석, 기기해석 담당.
- 2003년 12월~현재 대전첨단산업진흥재단, 로봇사업단, 단장.
- 관심분야 : 로봇경로계획, 태스크플래닝, 병렬로봇기구학, 원격제어 로봇의 원자력분야응용, 로봇산업 활성화를 위한 지역기업의 육성전략과 발전방안.