

페인팅로봇의 충돌회피 경로계획

이 정재, 서 석환

포항공과대학 산업공학과
포항시 우체국사서함 125

산업과학기술연구소 기계분야
포항시 우체국사서함 135

Collision-Avoidance Path Planning for Spray Painting Robots

Jung-Jae Lee and Suk-Hwan Suh

Dept. of Industrial Eng.
POSTECH, P.O. Box 125
Pohang, Korea 790-600

Mechanical Division
RIST, P.O. Box 135
Pohang, Korea 790-330

Abstract

Recently, the use of robots for painting operations has received much attention, as it is a powerful means for automation and quality improvement. Collision-avoidance is a key issue in the path planning for painting operations. In this paper, we develop a computationally efficient algorithm for the generation of collision-free path for two types of motion: a) Gross motion when the robot approaches the painting area, and b) Fine motion while spraying the surface. The former is a typical collision-avoidance problem, but the latter calls for special attention as the painting mechanics has to be incorporated into path planning. The developed algorithm is applied for the internal coating of the car body whose structure is the major source of collision.

1. 서론

최근들어 페인팅 작업의 자동화 및 품질향상의 목적으로 페인팅로봇에 관한 관심이 국내외에서 고조되고 있다. 로보트의 동작계획에 관한 한 아직까지 대부분 리드스루(lead-through) 방식에 의존하고 있으며, 이의 자동화가 요구된다. 본 연구팀에서는 페인팅 대상물의 형상정보를 입력으로 받아 페인팅역학에 의거 로보트의 동작을 자동생성하는 ATPS(Automatic Trajectory Planning System)를 개발한 바 있다 [1-2]. 이 시스템은 페인팅 대상물의 CAD 데이터가 이용하여, 그 경로를 산출하고, 페인팅 결과를 분석하고, 로보트의 애니메이션(animation)등 다양한 기능을 갖추고 있다.

그러나, ATPS는 페인팅 대상물의 표현방식에 있어서 B-spline 방식에 의한 단위곡면을 대상으로 하였기 때문에, 복합곡면의 처리가 용이하지 않다. 복합곡면의 경우, 단위곡면에서 생성되는 로보트경로를 합성하는 방식이 취해져야 하며, 여기에는 연결순서 및 연결경로의 산출문제가 대두된다. 또한, 페인팅 부위가 물체의 내부에 존재하는 경우(자동차의 포트판넬) 내부까지 진입하는 과정 및 페인팅과정에서의 충돌가능성이 존재하기 때문에 이의 고려가 필수적이다.

본 논문에서는 로보트의 페인팅동작을 이송동작(GM: Gross Motion)과 분사동작(FM: Fine Motion)으로 구분하고 각각의 동작에 대해 충돌회피 문제를 해결할 수 있는 새로운 방식을 제시한다. 이송동작은 전형적인 충돌회피 경로문제라 볼 수 있으나, 분사동작에 관해서는 페인팅역학이 결부되기

때문에 새로운 형태의 문제가 된다. 본 논문에서는 슬라이스 평면(slice plane)방식에 의해 계산적으로 효율적이며 실제 적용가능한 알고리즘을 개발한다.

2. 페인팅 대상물의 표현

페인팅 대상물은 여러개의 단위곡면으로 구성되며, 각 단위 곡면은 기준좌표계를 중심으로 B-spline, Bezier, Sweep 방식[5]으로 모델링된다. 전체적인 형상은 transform된 단위 곡면의 조합으로서, 페인팅대상물 P는 단위곡면의 transform matrix T_i 와 곡면식 S_i 로 식 (1)과 같이 표현된다.

$$P = \sum_i T_i S_i \quad (1)$$

그림 1은 페인팅 대상물이 자동차인 경우의 예를 보여준다.

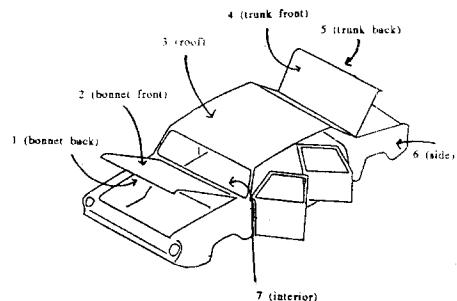


그림 1. 페인팅 대상물(자동차)

3. 페인팅 동작의 분류

페인팅 작업을 위한 로보트의 동작은 이송동작(GM: Gross Motion)과 분사동작(FM: Fine Motion)으로 구분된다. 예컨대, 그림 2에서 로보트의 초기위치에서 분사시작점까지의 동작은 이송동작이며, 코팅(coating) 작업은 분사동작에 의해 이루어진다.

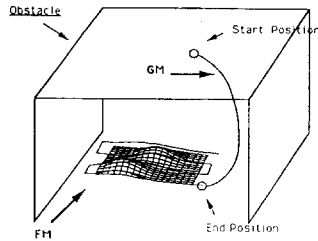


그림 2. 이송동작과 분사동작

이송동작은 일반적으로 물체의 외부에서 이루어 지거나, 혹은 물체의 외부에서 내부로 진입, 혹은 내부에서 외부로 빠져나오는 동작에 해당된다. 이 동작은 실제 분사작업이 이루어 지지 않기 때문에 페인팅역학에 의한 제약은 없으나 충돌 가능성은 많다. 따라서 이 동작의 경로설정은 충돌회피에 대한 고려가 주제이다.

반면에, 분사동작은 코팅이 이루어 지기 때문에 페인팅역학에 제약조건이 따르며, 내부코팅의 경우에는 분사중에 로봇의 몸체와 페인팅물체와의 충돌가능성이 존재한다. 외부코팅의 경우는 이전의 ATPS 연구에서 다루어 졌기 때문에, 본 연구에서는 분사동작의 계획시 두가지 제약조건이 존재하는 것으로 가정하였다.

4. 기존 충돌회피 이론

대표적인 방법으로 Lozano-Perez [3]의 CS (Configuration Space)을 들 수 있다. CS는 로봇의 작업공간 및 장애물들을 joint space에서 표현한 것이며, 충돌회피 경로는 CS상에서 A* 방법에 의해 구한다. 이 방식은 가능한 경로가 존재한다면, 충돌회피를 고려한 최적경로를 구할수있는 장점이 있는 반면, 로봇의 작업영역을 CS로 전환하는 과정에서 많은 시간이 소요되며, CS의 정보를 저장하기 위한 많은 메모리(memory)가 필요하다.

Khatib [4]의 APF(Artificial Potential Field)방식은 장애물과 가고자하는 도착점의 주위에 가상의 힘의 영역을 설정하여, 장애물 주위의 영역에서는 움직이는 물체를 밀어내는 방향으로 힘이 작용하도록하고, 도착점의 주위에서는 끌어들이는 방향으로 힘이 작용하도록하여, 힘의 벡터의 방향을 따라서 충돌회피 경로를 산출하는 방법이다. 이 방식은 대체로 모빌 로봇에 적용가능하나, local hill의 존재시 수렴(convergency) 문제가 대두된다.

이를 포함한 대부분의 기존방식들은 주로 이송동작을 대상으로 하였으며, 계산량의 과대로 인하여 실제 적용하기 어려운 점이 있다. 특히 연구된 충돌회피 알고리즘은 자동동작 계획시스템에 implement 되어야 하기 때문에 계산량의 최소화가 중요한 관건이다. 또한, 페인팅역학이 결부되는 충돌회피 경로계획은 새로이 대두된 문제이다. 따라서, 계산량을 줄일 수 있으며 페인팅역학을 고려할 수 있는 새로운 알고리즘의 개발이 필요하다.

5. 알고리즘 개발

5.1 가정

로봇의 표현

설명의 편의상 페인팅 로봇은 반경 r인 실린더로 구성된 다관절형을 가정하며, 일반적인 형태에 대해서는 이후에 언급된다. 또한, 로봇의 자세(configuration)는 elbow_up 자세로 하며, 충돌회피방법을 적용시 end-effector을 제외한 몸체 부분의 3축만을 대상으로 한다. 그림 3은 실험 대상이 되는 로봇을 보여주고 있다.

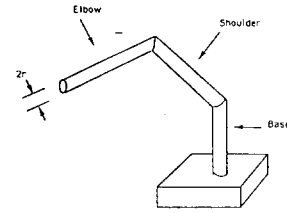


그림 3. 로봇의 표현

장애물의 표현

장애물은 볼록한 다각형(convex polygon)으로 구성된 다면체(polyhedron)의 집합체로 표현된다. 장애물은 작업장영역 안에 있는 일반적인 장애물과 페인팅 대상물의 단위곡면집합으로 구성된다. 후자의 예는 자동차바디(그림 1)의 내부(곡면 7) 코팅에서 발견되며, 여기서는 constrained surface가 되는 천정(곡면 3)이 됨을 알 수 있다. 따라서 내부코팅시에는 천정을 장애물로 처리하여 충돌회피 알고리즘이 적용되어야 한다. 장애물은 그림 4의 데이터구조를 갖는다.

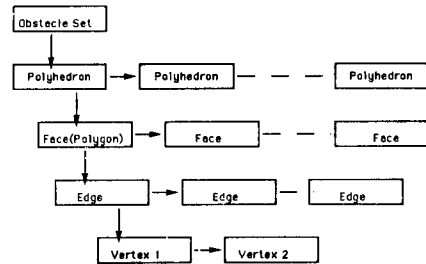


그림 4. 장애물의 데이터 구조

또한, 장애물을 로봇링크의 반경만큼 확대시킴으로써, 로봇트를 선분의 연결로 처리할 수 있으며 계산효율을 높일 수 있다.

5.2 슬라이스 평면(Slice Plane) 에 의한 충돌감지

5.2.1 슬라이스 평면의 정의 및 구축 방법

그림 3의 로봇에서 슬라이스 평면이란 로봇의 shoulder와 elbow 축의 두 중심선을 포함하는 평면을 말한다. 그림 5에서 Denavit-Hartenberg 방식에 의해 로봇의 각 축에대한 좌표계를 설정하였을때, 두번째 좌표계(이제부터는 슬라이스 좌표계라 한다.)의 X-Y평면을 뜻한다.

슬라이스 평면을 구축하는 것은 슬라이스 좌표계를 구하는 것과 같다. 따라서, 위의 그림에서 슬라이스 좌표계에 대한 전환행렬(Transformation Matrix)은 다음과 같다.

$$S = {}^1T_0 {}^0T_B \quad (2)$$

```

if (0 ≤ s ≤ 1) and (0 ≤ t ≤ 1)
    Collision = ON
else
    Collision = OFF
(10)

```

위의 식을 로봇트와 장애물의 각각의 선분에 적용함으로써, 충돌을 감지할 수 있다.

5.3 충돌회피 경로계획

로봇트의 초기위치에서 주어진 목적지로 가기위한 경로계획은 A* 알고리즘에 의해 구할 수 있다. 일반적으로 A* 방식을 이용한 충돌회피 경로산출 방식은 작업공간의 cell decomposition, cell 정보 (충돌회피여부)의 저장, 시작점과 끝점을 잇는 최적충돌회피셀의 발견과정을 거친다.

A* 알고리즘 [6]은 참고문헌에 잘 수록되어 있기 때문에 이하에서는 A* 알고리즘을 적용하기 위한 3가지 고려사항을 기술한다. 첫째는 셀의 크기를 결정하는 문제이다. 셀의 크기가 작을수록 장애물의 표현정도 (accuracy)가 높으며 정밀한 경로를 얻을 수 있는 반면, 요구되는 메모리가 커지면서 탐색(searching)시간이 길어진다는 단점이 있다. 또한 로봇트의 볼륨(volume)도 cell의 크기에 영향을 준다. 즉, 로봇트 볼륨에 비해 너무 작은 경우 계산의 효율성이 떨어지고, 너무 큰 경우에는 비효율적인 경로가 산출된다. 그림 9은 셀의 크기에 따른 경로의 변화를 보여준다.

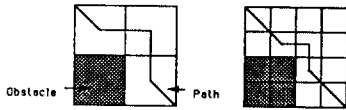


그림 9. 셀 크기의 영향

두번째 고려사항은 셀정보의 관리방식에 관한다. 3D의 경우, 모든 셀의 정보를 저장할려면 계산량의 문제는 차치하더라도 엄청난 메모리가 필요하다. 따라서 모든 셀의 정보를 초기에 저장하는 것은 비현실적이며, search 해나가는 과정에서 새롭게 expansion된 충돌회피 셀에 대해서만 보관하는 방식을 취하였다. 이 방식으로 기억량의 문제는 효과적으로 해결될 수 있다.

셋째, 셀의 분할에 의한 search 방식은 그림 10에서 보이는 바와 같이 주위의 셀에 따라 경로의 충돌회피성이 영향을 받는다는 것이다. 따라서 이를 탐지하여 합리적인 경로가 발견될 수 있도록 함이 중요하다.

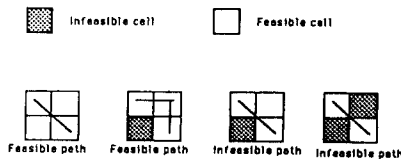


그림 10. 경로와 주위 셀과의 관계

5.4 CS 방식과의 비교

이 방식은 앞에서 언급한 CS방식과 유사한데, 이 방식은 CS방식과는 달리 직교좌표계상에서 문제를 설정하고, CS의

경우, 초기에 작업영역을 CS상에 충돌이 발생하는 곳과 발생하지 않는 곳을 모두 표현하여주는 반면,, 이 방식은 전혀 초기화 작업이 필요없어 적은 메모리를 가지고도 실용이 가능하다. 또한, CS상에서 초기화 작업을 하는데 있어서, CS상의 거리가 직교좌표계상의 거리와는 다르기 때문에, CS의 경우, 충돌회피공간(free space)를 표현하여 주는데 있어서, 관절각의 resolution에 민감하며(특히 로봇트의 축이 길때), 이 방식의 경우 직접 직교좌표계상에 셀을 구성하므로, 셀간의 거리가 바로 로봇트의 단위 이동거리가 되므로, 충돌회피공간의 표현에 있어서 덜 민감하다고 할 수 있다. 그리고, 슬라이스 평면에 의한 간단한 충돌감지방법으로 인하여, 빠른 시간내에 쉽게 충돌을 알아낼수 있다.

5.5 로봇트형태에 대한 일반성

일반적으로 로봇트의 형태를 작업영역의 형태에 따라서, 위에서 제시된 관절형 로봇트외에 직교형(Cartesian) 로봇트, 실린더형(Cylindrical) 로봇트 그리고 구형(Spherical) 로봇트외로, 크게 4가지로 나눈다

이 방식의 로봇트형태에 따른 적용범위는 단순히 위의 예가 되었던 관절형 로봇트에게만 국한되는것이 아니라, 각기 로봇트의 형태에 따라서, 알맞은 슬라이스 좌표계 및 슬라이스 평면을 설정함으로써, 위에서 제시된 방법을 똑같이 적용이 가능하다.

그림 11은 실린더형 로봇트의 경우, 슬라이스 좌표계와 슬라이스 평면을 설정하는 것을 보여준다.

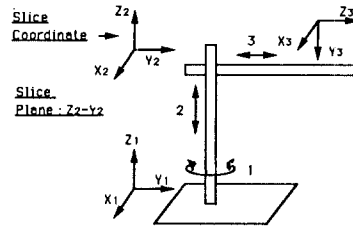


그림 11. 실린더형 로봇트의 슬라이스 평면 설정

6. 페인팅 로봇트의 경로계획

6.1 이동동작

페인팅 대상물 작업간의 이동경로를 구하는 것이므로, 두 작업간의 이동 위치가 주어지면, 위에서 제시된 방식을 이용 쉽게 충돌회피 경로를 산출할수 있다. 이를 순서도로 표현하면 그림 12와 같다.

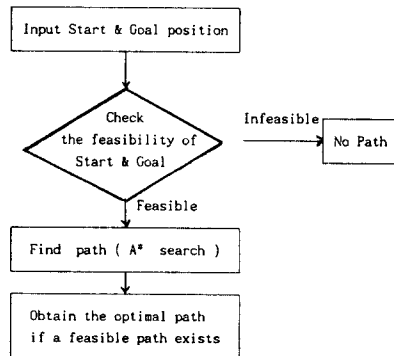


그림 12. 이동동작의 경로계획

S : 베이스(base) 좌표계에서 슬라이스 좌표계로의 전환행렬

iT_j : j 좌표계에서 i 좌표계로의 전환행렬

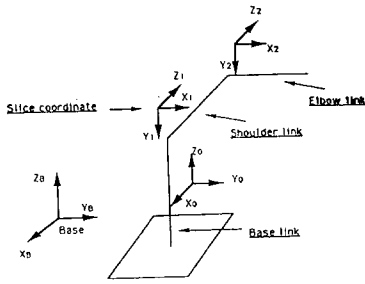


그림 5. 슬라이스 평면의 설정

5.2.2 슬라이스 평면상에서의 장애물의 표현

슬라이스 평면상에서의 장애물은 슬라이스 평면으로 장애물을 절단하면, 그때, 슬라이스 평면상에 나타나는 절단면으로 표현된다. 이 절단면을 구하는 방법은 다음과 같다.

단계 1

다면체의 각 꼭지점을 슬라이스 좌표계의 값으로 전환한다.

$$V_S = S V_B \quad (3)$$

V_S : 슬라이스 좌표계에서의 꼭지점의 값

V_B : 베이스 좌표계에서의 꼭지점의 값

단계 2

전환된 값을 가지고, 다면체를 이루는 각 다각형을 중심으로 슬라이스 평면과의 교차선분을 구한다. 그림 6에서 다각형의 선분들중 슬라이스 평면을 관통하는 선분 L_1 과 L_2 를 구하고, 이 선분들과 슬라이스 평면과의 교차점 P_1 과 P_2 를 구하면 교차선분 L_3 를 구할수 있다.

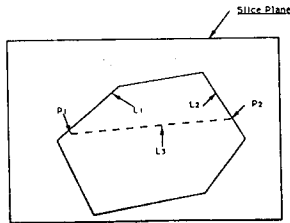


그림 6. 슬라이스 평면과 다면체와 교차관계

슬라이스 평면을 선분 L_i 이 관통하는가는, 슬라이스 평면이 슬라이스 좌표계에서 X-Y평면이므로, 다음 식으로 알수 있다.

$$\begin{aligned} \text{if } V_{1,z} * V_{2,z} &\leq 0 & \text{INTERSECTION} &= \text{ON} \\ \text{Otherwise} & & \text{INTERSECTION} &= \text{OFF} \end{aligned} \quad (4)$$

V_1 : Vertex 1 of L

V_2 : Vertex 2 of L

또한, 관통하는 선분 L과 슬라이스 평면과의 교차점은 다음 식으로 알수 있다. 선분 L을 포함하는 직선의 방정식 D를 다음과 같이 구할수 있다.

$$\begin{aligned} D : \quad X &= V_{1,x} + (V_{2,x} - V_{1,x}) * t \\ Y &= V_{1,y} + (V_{2,y} - V_{1,y}) * t \\ Z &= V_{1,z} + (V_{2,z} - V_{1,z}) * t \end{aligned} \quad (5)$$

이 직선 방정식 D와 슬라이스 평면의 교차점은, 슬라이스 평면이 X-Y 평면이므로, Z값을 0으로 함으로써 그 교차점 P의 값을 알수 있다.

$$t = -V_{1,z} / (V_{2,z} - V_{1,z}) \quad (6)$$

$$P.x = V_{1,x} + (V_{2,x} - V_{1,x}) * t$$

$$P.y = V_{1,y} + (V_{2,y} - V_{1,y}) * t$$

$$P.z = 0 \quad (7)$$

단계 3

단계 2의 방법으로, 장애물의 다면체를 이루는 모든 다각형과 슬라이스 평면과의 교차선분이 주어지면, 이 선분들의 양 꼭지점을 서로 비교해, 각 선분의 이웃관계를 정하여 절단면을 구한다.

5.2.3 충돌 감지 방식

임의의 주어진 위치에서, 슬라이스 평면을 구축하고, 장애물을 슬라이스 평면상에 표현하였을 경우, 그림 7과 같이 2D상에서 모두 표현된다.

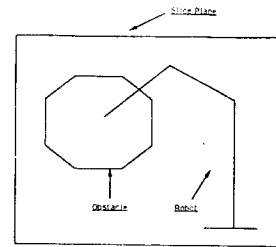


그림 7. 슬라이스 평면상에서의 장애물의 표현

따라서, 로봇과 장애물과의 충돌은 로봇의 각 선분과 장애물의 각 선분들간의 교차관계를 알아봄으로써 감지할 수 있다. 즉, 그림 8처럼 두 교차선분 MN과 LK가 주어졌을 경우 다음 식을 이용, 두 선분의 교차관계를 알수있다.



그림 8. 두 교차선분

$$s = \frac{(nx-mx)(my-ky) - (ny-my)(mx-kx)}{(nx-mx)(ly-ky) - (ny-my)(lx-kx)} \quad (8)$$

$$t = \frac{(lx-kx)(my-ky) - (ly-ky)(mx-kx)}{(nx-mx)(ly-ky) - (ny-my)(lx-kx)} \quad (9)$$

6.2 분사동작

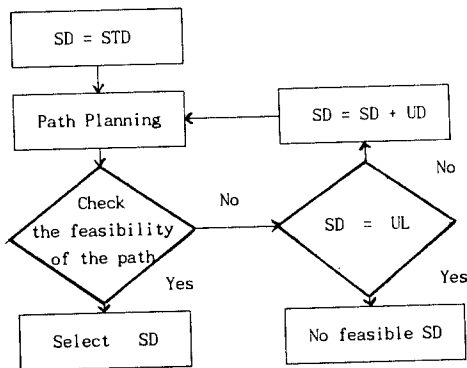
분사동작의 경로계획은 대상물의 형상정보를 바탕으로 주위의 장애물과의 충돌을 피하면서 페인팅 작업을 할 수 있는 페인팅 경로를 구하는 것이다. 여기서는 먼저 주어진 형상정보를 바탕으로 주위의 장애물에 관계없이 주어진 페인팅 조건치에 따라서 경로산출을 한다. 다음으로 슬라이스 평면을 이용한 충돌감지 방식에 의해 현 경로점들의 유효성을 판정한다. 현 경로가 유효하다면 수정없이 채택하고, 그렇지 않으면 페인팅 조건치를 바꾸어 좁으므로 새로운 경로를 산출하는 것이다.

경로의 조정은 두가지 형태로 구분된다. 첫째, 페인팅 분사거리를 조정하는 방식과, 둘째 페인팅 분사각을 조정하는 것이다. 여기서는 페인팅 분사거리를 조정함으로써, 충돌을 피할 수 있는 접근 방식을 소개하고자 한다.

6.2.1 페인팅 분사거리의 결정

우선 페인팅 분사거리의 상한치(upper limit)와 하한치(lower limit)를 결정한다. 즉, 페인팅의 효율성을 위하여 허용할 수 있는 페인팅 분사거리의 구간을 정하는 것이다. 일반적으로, 페인팅 건(gun)의 크기에 따라서 영향을 받지만, 15 - 35cm 정도[7]를 기준으로 잡고 있으며, 이 값들은 각 작업환경에 따라서 조정될 수 있다. 페인팅역학에 의하면 25 cm를 유지할 때 최적의 결과를 얻을 수 있기 때문에, 가능하면 이를 유지하는 것이 바람직하다. 따라서 25 cm를 표준거리(standard distance)로 설정한다.

상한치, 하한치가 주어지면, 표준거리를 중심으로 상한치와 하한치의 양방향으로 단위거리 만큼 이동하면서, 주어진 분사거리에서의 경로의 유효성을 검증하여, 표준거리에서 가까운 분사거리를 가진 유효한 경로를 페인팅 경로로 채택한다. 그림 13은 상한치 방향으로 분사거리를 결정하는 순서도이다.



SD : Spray Distance
 STD : Standard Distance
 UD : Unit Distance
 UL : Upper Limit

그림 13. 페인팅 분사거리의 결정

위의 순서도와 마찬가지로 하한치 방향으로도 분사거리를 구하여 상한치 방향에서 구한 값과 서로 비교하여,

표준거리에 가까운 값을 새로운 분사거리로 선택하고, 이 분사거리에 의한 경로를 충돌회피를 고려한 페인팅 경로로 채택한다.

7. 시뮬레이션 결과

개발된 충돌회피 알고리즘의 유효성을 검증하고자 두개의 시뮬레이션을 행하였다. 그림 14-15은 각각 로봇트가 외부에서 내부의 코팅을 위해 들어가는 두가지 동작 (Gross Motion)을 top view와 isometric view로 보이고 있으며, 산출된 경로에서 로봇트는 장애물의 외곽과 충돌이 회피됨을 알 수 있다.

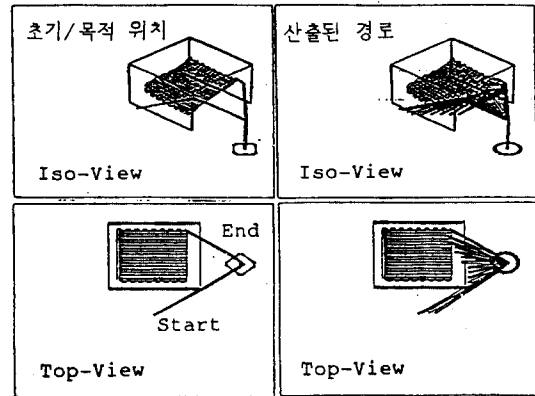


그림 14. Gross Motion(1)

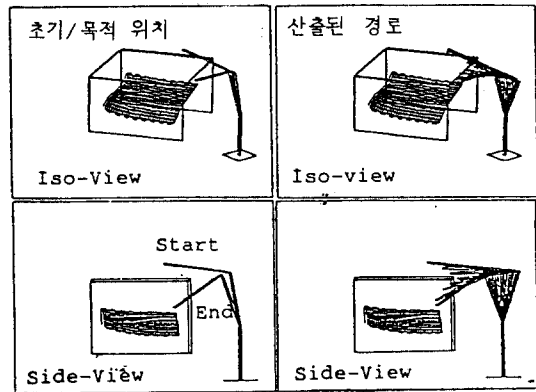


그림 15. Gross Motion(2)

마지막으로, 그림 16은 내부로 진입한 후에 분사작업을 하는 동작의 snap shot을 보이며, 로봇트가 장애물의 벽과 충돌을 회피하면서 분사작업이 이루어 짐을 알 수 있다. 여기서는 장애물의 벽때문에 표준거리 (25 cm)를 유지하지 못하였으며 20 cm가 가장 근사한 것으로 나타났다. 지정된 코팅 두께를 얻기 위해서는 페인팅거리의 변화에 따라 페인팅조건치의 변화 (분사속도의 증가 혹은 토출량의 감소)가 요구된다.

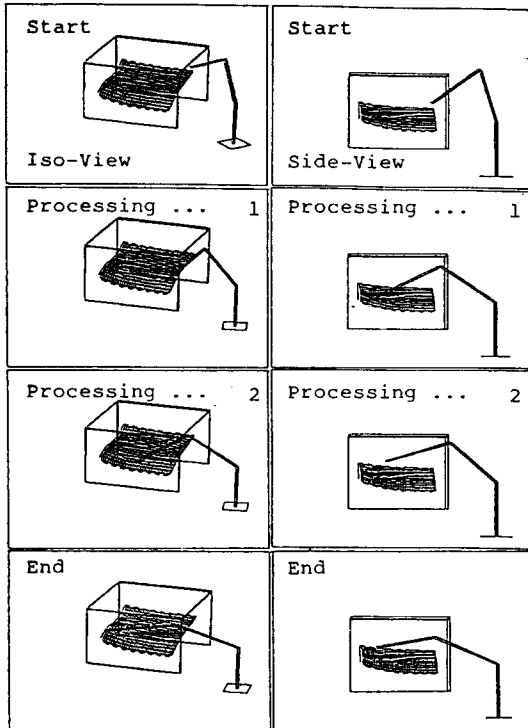


그림 16. Fine Motion

8. 결론

본 논문에서는 페인팅 로봇의 동작을 GM(Gross Motion) 과 FM(Fine Motion)으로 나누어서, 각 동작시 로봇의 충돌 회피를 위한 새로운 방식을 소개하였다. 이 방식은 슬라이스 평면을 이용한 충돌감지 방법의 간략성으로 계산의 효율성을 도모할수 있었다. 또한, 여기서 페인팅 로봇과 장애물에 대한 가정이 실제 응용에 큰 제약이 되지 않음을 알 수 있으며, 실제 페인팅 로봇의 경로계획에 있어서 쉽게 적용이 될수 있을 것이다. 분사동작에서 분사거리 뿐만 아니라 분사 각의 조정 (로봇의 자세변환) 문제가 연구중에 있으며, 개발된 알고리즘을 자동동작계획시스템에 implementation을 시키는 작업이 향후에 수행될 예정이다.

참고 문헌

- [1] S. H. Suh, " A Study on the Automatic Trajectory Planning for Painting Robots," Technical Report RIST-89-9167F, Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang, Korea, 1989.
- [2] S.H. Suh, I.K. Woo, S.K. Noh, "Automatic Trajectory Planning System (ATPS) for Spray Painting Robots," J. Manufacturing Systems, vol. 10, no. 5, 1991.
- [3] T. Lozano-Perez, " A Simple Motion Planning Algorithm for General Robot Manipulators," IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. RA-3, NO. 3, JUNE 1987, pp 224-238.

- [4] O. Khatib, " Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," Int. J. of Robotics Research, Vol. 5, No. 1, Spring 1986, pp. 90-98
- [5] M. Mortenson, " Geometric Modeling," John Wiley & Sons, 1985.
- [6] G. F. Luger et al., " Artificial Intelligence and the Design of Expert Systems," Benjamin/Cummings, California, 1989.
- [7] 松谷守康, " 도장 실무 핸드북 ," 도서출판 세화, 1985.