

# 페인팅로봇의 자동궤적계획시스템 개발에 관한 연구

서석환   우인기   노성기

포항공과대학 산업공학과

## Development of An Automatic Trajectory Planning System (ATPS) for Painting Robots

Suk-Hwan Suh   Inn-Kee Woo   Sung-Kee Noh

Department of Industrial Engineering  
POSTECH, Pohang, Korea 790-600

### ABSTRACT

We develop an automatic trajectory planning system (ATPS) for painting robots by proposing a new trajectory planning scheme. The new scheme considers geometric modeling, painting mechanics, and robot dynamics to output an optimal trajectory (in the sense of coating thickness and painting time) based on the CAD data describing the shape of objects. The new scheme is implemented in SUN/4 workstation to develop an ATPS for painting robots. To test the validity of the new scheme and to illustrate the developed system, numerous runs are performed and analyzed.

### 1. 서   론

산업용로봇을 이용한 도장작업은 로봇의 정밀도, 반복도 및 프로그래머빌리티 (Programmability)를 이용하여 품질의 향상, 불량품감소, 원료 및 에너지의 감소를 통한 생산성향상에 기여할 수 있는 강력한 대안책이다. 그러나 현재 많이 사용되는 소위 리드스루법 (Lead-Through Method)에 의한 온라인티칭법 (On-Line Teaching Method)은 비생산성, 위험성 및 유독한 환경하의 산업질병 문제등을 갖는다 [3-4].

또 다른 측면에서 보면, 위와 같은 방법은 로봇의 동작이 작업자의 직관에 의해 결정됨에 따라 동작의 최적화를 구현하기 어려운 점이 있다. 동작의 최적화는 페인트소모량 및 페인팅시간의 감소와 균일한 피막두께를 얻는 것과는 관련 되므로 매우 중요하다. 이러한 문제점들을 해소 내지 경감하기 위해서는 오프라인 프로그래밍 (Off-Line Programming)방식이 도입되어야 한다.

오프라인 방식은 대화형 그래픽시스템, 예를들면 Mc-Donnell Douglas의 PLACE [5]를 이용하여 로봇의 경로를 결정하는 방식과 컴퓨터알고리즘을 이용하여 로봇의 궤적을 결정하는 방식이 있다. 그러나 이러한 대부분의 방법은 pick-and-place 동작이나 용접작업을 대상으로 하며, 페인팅작업에 관한 연구는 극소수에 불과하며[6,11], 특히 물체의 형상과 페인팅 및 로봇역학을 고려한 로봇 동작계획에 관해서는 전무한 상태이다.

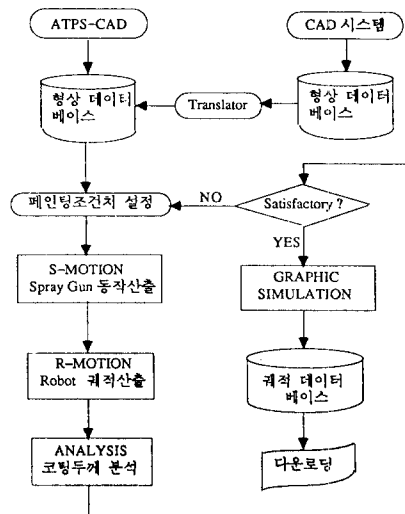


그림 1. 자동궤적계획 시스템의 구조

### 2. 자동궤적계획 시스템 (ATPS)

본 연구에서는 앞서 열거한 문제점에 대처하기 위한 새로운 접근방식으로서 페인팅될 물체의 CAD 데이터를 입력으로 받아 최적로봇궤적을 산출할 수 있는 자동궤적계획법을 제시한다. 자동궤적계획시스템 (ATPS: Automatic Trajectory Planning System)은 동작계획의 자동화 및 최적화를 구현할 수 있는 페인팅작업을 위한 오프라인 로봇프로그래밍 시스템이다.

페인팅 두께의 균질성 및 페인팅 시간의 최소화를 도모하는 문제는 근본적으로 곡면모델링, 페인팅역학 및 로봇역학이 결부되는 복잡 방대한 문제이기 때문에 반복과정 (iterative process)을 거침으로서 최적페인팅조건을 추구하는 방식이 되어야 한다.

ATPS는 이러한 반복과정에 의해 사용자가 최적의 페인팅 조건치를 설정하도록 하고, 매년 설정된 조건치에

의해 물체의 형상을 효율적으로 페인팅하기 위한 본사건의 경로 및 로봇의 최적동작을 산출하고 이에 따른 페인팅 두께의 흡착상태를 분석하여 사용자에게 제시하며, 사용자는 흡착두께의 분포와 페인팅시간에 입각하여 다른 페인팅 조건치를 시도할 것인지를 결정한다.

이러한 스킴 (scheme)에 의해 ATPS는 그림 1과 같은 구조를 갖는다. 즉, ATPS는 ATPS\_CAD, S\_MOTION, R\_MOTION, ANALYSIS의 4개의 모듈로 구성되어 있으며, ATPS\_CAD는 페인팅될 물체의 곡면을 나타내는 형상모델러이고, S\_MOTION은 본사건의 경로를 설정하며, R\_MOTION은 본사건의 경로를 로봇의 궤적으로 변환하며, ANALYSIS는 피막두께를 분석하는 기능을 갖는다.

### 3. 이론적 배경

본 절에서는 ATPS의 이론적 배경이 되는 형상모델링, 페인팅역학, 본사건의 경로결정, 로봇궤적 결정방식과 피막두께 분석방식을 약술한다. 주지할 것은 본 절에서 다루는 이론적 배경은 앞서 이루어진 이론연구 [1-2]에서 자세히 설명되어 있으므로 여기서는 간략히 취급한다.

#### 3.1 형상 모델링

3차원 형상의 기하학적 표현 방식은 크게 경계표현 (Boundary Representation, B-Rep) 방식과 구조적 입체형상 (Constructive Solid Geometry, CSG) 방식을 들 수 있으나 본 연구에서는 B-Rep 방식을 따른다. 3차원 자유곡면은 Coons/Ferguson Patch; Bezier Surface, B-spline, Sweep surface 등의 방식으로 표현되며, ATPS\_CAD는 이러한 곡면표현모듈을 포함하거나, 다른 곡면모델링 시스템으로부터의 CAD 데이터를 입력으로 취하도록 설계된다. 본 논문에서 사용된 방식은 shape control에서 뛰어난 bicubic B-spline 곡면모델이다[7-8].

#### 3.2 페인팅역학

페인팅방식은 정전기 방식과 공기분사식으로 구분되며, 본연구에서는 공기분사식을 대상으로 한다. 페인팅역학에 관한한 인용할 만한 이론은 거의 없기 때문에 본 연구에서는 숙련작업자 및 전문가기술진과의 협의와 단편적으로 제시되고 있는 이론[3-4, 9-10] 즉, 스프레이건은 곡면의 수직방향 (Normal Direction)으로 일정한 거리 (250 mm정도)를 유지하는 것이 경험적으로 추천되고 있으며, 본사직경 내의 밀도가 균일하도록 해야 한다. 이러한 조건을 수식화 하기 위하여 그림 2의 평면을 페인팅하는 경우를 고려하자.

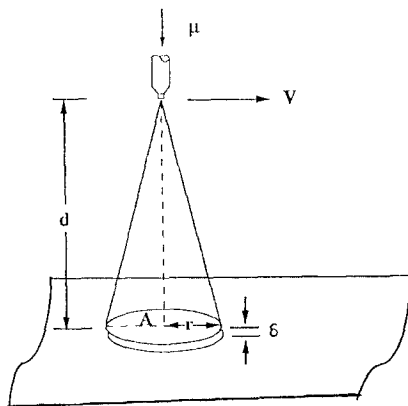


그림 2. 평면의 페인팅 상태도

노즐의 페인트 유출율 (Flow rate: liter/sec)을  $\mu$ , 본사거리를  $d$ , 본사각을  $\alpha$ , 본사반경을  $r$ , 본사면적을

$A$ , 코팅두께를  $\delta$  라 하면,

$$\begin{aligned} r &= d \tan \alpha & (1) \\ A &= \pi r^2 & (2) \end{aligned}$$

노즐을 통해 본사된 페인트의 양이 표면에 흡착되는 비율, 즉 이송효율이  $\sigma$  라 하고, 채공시간을  $t$  (sec)라 하면, 순간적으로 표면에 전달되는 페인트의 양  $Q = \mu \sigma t$  가 본사지역내에 균일하게 전달된다면, 즉

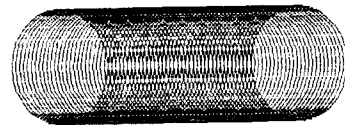
$$\mu \sigma t = A \delta \quad (3)$$

이므로, 코팅두께는 다음과 같다.

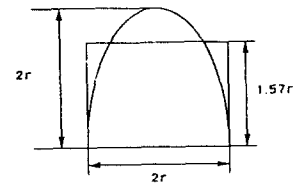
$$\delta = \frac{\mu \sigma t}{\pi d^2 \tan^2 \alpha} \quad (4)$$

이상의 관계식을 도출함에 있어서의 주요가정은 첫째, 본사단면은 원이고 둘째, 순간적인 본사단면내의 피막두께는 균일하다는 것이다. 그러나, 비록 순간적인 본사단면내의 피막두께는 일정하더라도 본사건이 이송될때 피막두께는 원의 가장자리로 갈수록 감소하게 된다. 이러한 현상은 그림 3(a)에서 분명히 나타나며, 실제로 코팅된 단면은 그림 3(b)와 같이 반타원을 이루고, 중심부의 피막두께가  $\delta$  이고 가장자리는 0이 되며 평균두께  $\delta_m$  은

$$\delta_m = \frac{\pi}{4} \delta = 0.785 \delta \quad (5)$$



(a)



(b)

그림 3. 피막두께의 분포

본사건의 이송속도가  $v$  (m/sec) 라면, 본사건이 표면에 진입하는 초기의 본사지역을 제외한 표면의 채공시간  $t = 2r / v$  이므로, 코팅두께는 다음과 같다.

$$\delta_m = \frac{1.57 \mu \sigma}{\pi v d \tan \alpha} \quad (7)$$

그러므로 주어진 페인팅조건치  $\mu, \sigma, d, \alpha$  하에 지정된 코팅두께  $\delta_m$  을 얻기위한 이송속도는  $v$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v = \frac{1.57 \mu \sigma}{\pi \delta_m d \tan \alpha} \quad (8)$$

명기할 것은 식(8)의 속도는 본사건의 이송속도로 보다 명사표면의 이송속도로 받아져야 한다는 것이다. 물체의 표면형상이 평면인 경우에는 두 속도가 같으나 곡면의 경우에는 형상의 모양에 따라 상당히 차이가 날 수

있다. 이점은 로봇트의 궤적계획 수립시에 표준속도로서 표면두께의 균질성을 유지하기 위한 중요한 요소이다. 또한, 위에서 도출한 페인팅역학식은 평면을 대상으로 하였으나, 페인팅역학 자체는 형상에 관계없이 적용되기 때문에, 곡면의 경우에도 바로 적용될 수 있다. 즉, 곡면을 평면으로 digitize 시킴으로써 가능하며, 이는 3.3 절에 설명된다.

### 3.3 본사건의 경로계획

본사건로결정 문제는 크게 다음의 4과정을 거친다: 가) 진행방향 결정 나) 구간설정, 다) 구간경로 결정, 라) 구간경로의 지그재그식의 통합으로 나뉘는데 이 과정을 통해 본사건의 스위핑(Sweeping)영역의 중심점이 지나는 경로를 얻게된다. 이를 차례로 살펴보면 다음과 같다.

진행방향의 결정은 물체의 자세와 관련지어 지그재그식은 횡방향식과 종방향식으로 구분되고, 이들의 선택은 곡면형상의 곡률의 변화가 적은쪽을 선택 하도록한다. 이렇게 함으로써 본사건의 위치 및 자세변환이 적게되고 부드러운 동작과 동작시간 및 에너지의 최소화를 할 수 있는 여지가 많기 때문이다.

구간의 설정은 곡면의 방정식이  $P(u, w)$ 이고 본사건의 이송방향이  $w$  방향이라 할때 다음의 식으로 주어지고 이는 수치해석적인 방법으로 해를 구한다 (그림 4).

$$| P(u_2, (k-1) \Delta w) - P(u_1, (k-1) \Delta w) | = r, \quad k = 1, \dots, N \quad (9)$$

여기에서  $N$ 는 단면곡선을 얼마나 촘촘하게 구성 할 것인지에 의해 결정된다. 다음구간의 경계는 모든  $k$ 에 대해  $u_2$  값을  $u_1$  으로 대체시킨 후에 위의과정을 반복하여 새로운  $u_2$  값을 구하는 것이다.

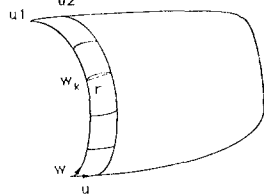


그림 4. 본사구간의 결정

구간경로의 결정 문제는 본사건의 위치가 표면의 점에 의해 유일하게 정해지기 때문에 표면특성점을 결정하는 문제로 귀착된다. 한 단면에서는 오직 한개의 특성점이 정의되기 때문에 특성점은 본사건의 위치와 자세가 단면을 균일한 두께로 코팅할 수 있도록 결정되어야 한다. 특성점 E는 그림 5에서 다음과 같이 구해진다.

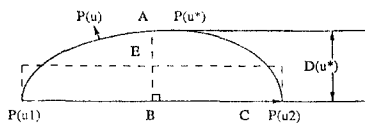


그림 5. 단면의 특성점

$$E = 0.5 [p(u_2) - p(u_1)] + 0.5 D(u^*) \overline{BA} \quad (10)$$

여기서  $\overline{BA}$  는 C와  $p(u^*)$ 에 의해 정의되는 수선벡터이며,

$$p(u^*) = \frac{d}{du} p(u) \Big|_{u=u^*} = m [p(u_2) - p(u_1)], \quad (11)$$

(여기서  $m$ 은 양의 상수임.) 즉, 특성점으로 취한다는 것은 원래의 단면곡선 (그림 5의 식선)을 전선으로 개략화하는것으로 볼 수 있다.

### 3.4 로봇트의 궤적계획

로봇트의 궤적계획은 궤적계획자 (Trajectory Planner)가 본사건의 동작계획에서 정해진 경로를 수행할 수 있는 로봇트의 궤적을 로봇트관절, 혹은 엔드이펙터의 경로 및 속도의 형태로 산출한다. 궤적은 표면추적 (CF: Contour Following)구간과 신속이송 (RT: Rapid Transfer)구간으로 구성된다.

CF 구간의 경로를  $g(h)$ 라 하면, 우리는  $g(t) = g(h(t))$ 를 결정하고자한다. 즉, 얼마나 빨리 주어진 경로를 따라 움직여야 하는지를 지정하는 함수,  $h(t)$ 를 결정하고자 한다. 로봇트의 역학 및 경계조건을 고려한 CF 구간의 궤적계획 문제는 다음의 수행도지표 (Performance Index) (12)을 최소화 하는  $h(h)$ 를 구하는 것이다.

$$J = \int_{h_0}^{h_f} \frac{\gamma}{h(h)} + | \dot{h}(h) - \dot{h}(V) | dh \quad (12)$$

식(12)에서  $\int_{h_0}^{h_f} \frac{1}{h(h)} dh = \int_{h_0}^{h_f} \frac{dt}{dh} dh = \int_{t_0}^{t_f} dt$ 는 경로  $g(h)$ 의 주행시간을 의미하고,

$\int_{h_0}^{h_f} | \dot{h}(h) - \dot{h}(V) | dh$ 는 표준 본사 속도에서의 편차 (Deviation)를 의미하므로, 수행도지표는 시간의 최소화 에 비중  $\gamma$ 를 부여하면서 스위핑속도의 편차를 최소화 하는 것이다. 여기서  $h(h)$ 는 모수  $h$ 에서의 본사건의 속도이고  $h(V)$ 는 스위핑속도  $v$ 에 상응하는 본사건의 표준 속도이다.

제약조건은 첫째, 본사건의 위치 및 자세가 로봇트의 관절각 범위내에 있을 조건, 즉

$$\theta(h) \in [\theta^-, \theta^+], \quad h \in [h_0, h_f] \quad (13)$$

둘째, 초기 및 말기의 본사속도를 표준속도로 고정하는 경계조건과

$$\dot{h}(h_0) = \dot{h}(h_f) = \dot{h}(v) \quad (14)$$

셋째, 본사건의 동작이 토크범위내에 있기 위한 조건으로 구성된다.

$$\tau[\theta(h), \dot{\theta}(h), \ddot{\theta}(h)] \in [\tau^-, \tau^+], \quad \forall h \in [h_0, h_f] \quad (15)$$

식(15)의  $\tau$ 는 로봇트의 각 관절운동 (Joint Motion)을 내기위한 토크(Torque)량이다.

식(12)로 정의되는 문제는 혼합형 수행도지표를 갖는 최적문제 (Optimal Control Problem)으로서 해석해 (Analytic Solution)는 존재하지 않으며, 문제의 복잡성에 비추어 동적계획법 (DP: Dynamic programming)을 적용한다. 주기할 것은 수행도지표의  $\gamma$ 가  $\infty$ 에 접근함에 따라 표준속도를 추적하는 궤적이 도출될 수 있기 때문에 보다 일반적인 포물라이선이다. 즉, 사용자는 페인팅조건의 균질성과 사이클타일의 최소화라는 두가지 양면성을 최적화시키는 궤적을 얻을 수 있다.

신속이송 (RT) 구간에서 본사되는 페인트는 물체의 표면에 흡착되지 않는구간이다. 그러므로 페인트의 낭비를 막기 위해서는 이 구간에서는 이송시간을 단축시키는 방식이 최선의 방법이다. RF 구간에서는 CF 구간과는 달리 속도의 균일화를 배제한 이송시간의 최소화에 있다. 이 문제는 joint space trajectory polynomial 과 time

scaling 방식에 의해 구할 수 있다. 본 절의 자세한 내용은 참고문헌 [1-2]에 수록되어 있다.

### 3.5 피막두께의 해석

로봇의 궤적계획자로부터 구한 로봇의 궤적으로부터 페인팅될 임의의 자유곡면 형상의 피막두께 분포를 산출하는 알고리즘은 첫째, 곡면상의 점이 본사지역내에 포함되는지의 여부와, 둘째 포함되는 경우의 피막두께를 결정하는 것이다.

#### 1) 본사범위외의 포함여부 결정

실제의 페인팅상태는 원추형 (본사건으로 부터 본사되는 페인트의 입체적형상)과 자유곡면과의 단면곡면 (Intersection Surface)을 구해야 하지만 계산량의 감소와 효율성을 위하여 자유곡면위의 특성점을 기준으로 한 평면으로 개략한다. 즉 계산량과 정확도와는 trade-off가 있으며 적절한 특성점의 밀도로서 계산량과 정확도를 유지한다.

로봇의 궤적파일은 시간 t에서의 본사건의 위치 및 자세 벡터 (즉, tip의 위치 및 approach vector)를 포함한다. p, nn 을 각각 tip의 위치 및 approach vector라 하면, 그림 6에서 s 와 n 은 다음과 같다.

$$n = -nn \quad (16)$$

$$s = p + d \cdot nn \quad (17)$$

(여기서 d는 본사거리를 나타낸다.)

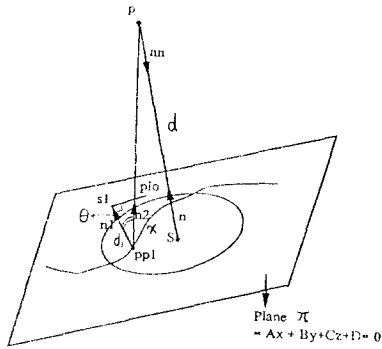


그림 6. 피막두께의 해석

점 p 에서 본사되는 페인트의 coverage는 n과 s에 의해 정의되는 평면 π 에서 중심이 s이고 반경이 r인 원으로 나타난다. 곡면상의 한점 pp1이 본사영역에 포함되는지의 여부를 검증하기 위해 pp1을 π에 수직으로 프로젝션 시켜, s1, n1, d1, 즉 수선점, 단위수선벡터 및 수선거리를 구한다. 다음으로 n2, 즉, pp1과 p로 정의되는 단위벡터에 의해, n1과 n2가 이루는 각 θ를 결정하고 pp1과 pio와의 거리 x를 구한다. 즉, x는 식(18)-(19)로 나타내고

$$x = d_1 / \sin \theta, \quad (18)$$

$$\theta = \cos^{-1} n_1 \cdot n_2, \quad (19)$$

pio는 식(20)과 같다.

$$pio = pp1 + x \cdot n2 \quad (20)$$

pio는 평면 π상에 존재하고 p의 본사범위는 중심이 s, 반경 r의 원이기 때문에 곡면상의 점 pp1이 본사지역에 포함되기 위한 조건은 식(21)이다.

$$|s - pio| \leq r \quad (21)$$

### 2) 피막두께의 결정

만약 pio가 본사범위에 포함된다면, 피막두께의 산출이 필요하다. 3.2절에서 본사지역 내에서의 피막두께는 균일하며 식(4)의 값으로 주어진다. p1에서의 피막두께 δ는 식(4)의 d를 p와 pp1의 수선거리로, t는 체공시간, 즉 이 경우에는 궤적데이터의 p가 정의된 시간간격을 대입함으로서 구할 수 있다.

p와 pp1의 수선거리 D는 다음과 같다.

$$D = |p - \pi| + |\pi - pp1| = d + d2 \quad (22)$$

d2의 절대값은 d1이며, n1과 n의 내적부호는 pp1이 π의 위 혹은 아래에 위치하는 가를 결정한다.

## 4. 시스템구현 및 시뮬레이션

연구된 이론을 바탕으로하여 ATPS는 SUN4/330의 SPARC 워크스테이션에 구현되었다. 프로그래밍환경은 UNIX 계열의 SunOS 4.0에서 객체지향적 프로그래밍을 지원하는 SunView 유틸리티 [12]와 그래픽 유틸리티인 Pixrect[13]를 이용하였으며, 이에 의해 GUI (Graphic User Interface)를 구현하는 메뉴구조와 그래픽 표현을 도모하였다. 이 시스템의 하드웨어 구성도는 그림 7와 같다.

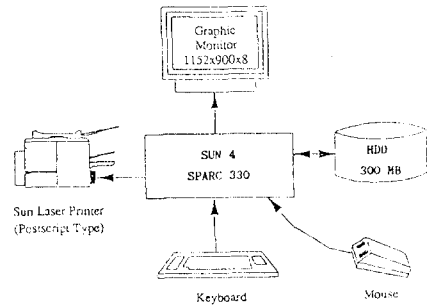


그림 7. 시스템의 하드웨어 구성도

그림 1의 구조를 갖는 ATPS는 사용자 인터페이스 측면, 즉, 최적의 페인팅조건치를 설정함에 있어서 반복수정 과정의 용이성을 도모하였으며, 프로그래밍 개발환경 측면에서는 모듈화 구조를 택함으로써 이후의 수정 및 확장과의 용이성을 고려하여 설계되었다.

ATPS의 모듈별 기능을 보다 구체적으로 보기 위해 그림 8의 control point로 정의되는 B-spline 곡면을 고려하자. 그림 9에서 초기의 페인팅조건치가 설정되었으며, S\_MOTION에서 산출된 그림 10은 본사지역의 중심경로를 도시하고 있으며, 그림 11 및 12에서는 R\_MOTION에서 실행된 결과, 즉, 로봇의 궤적과, ANALYSIS에서 수행된 피막두께의 분포를 각각 도시하고 있다. 페인팅 조건치를 변경한 후에 똑 같은 과정을 반복한 후의 개선된 피막두께의 분포가 그림 13에 도시된다.

알고리즘의 검증용 위해 다수의 실험을 수행한 결과가 표 1에서 3에 요약되어 있다. 표 1과 2는 평면 및 곡면을 대상으로 본사각을 변화시킴에 따른 ANALYSIS 결과를 비교하며, 표 3은 자유곡면을 대상으로 유출물의 변화에 따른 실험 결과를 나타내고 있다.

표 1-2에서 나타난 결과로 보아 본사각도는 피막두께의 분포에 있어서 폭넓은 변화를 가지며 평면의 경우에는 큰변동이 나타나지 않았지만 자유곡면일 경우에는 곡면의 곡률의 변화가 클수록 본사각도를 줄여나가는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 본사각의 감소는 로봇 속도의 증가를 의미하며, 경우에 따라 과대한 속도를 방

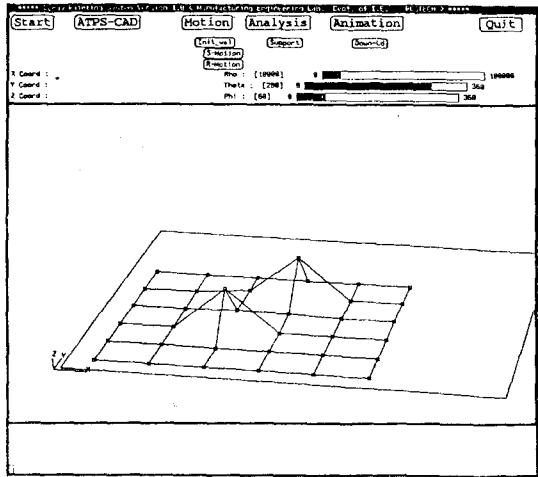


그림 8. Control Point의 집합

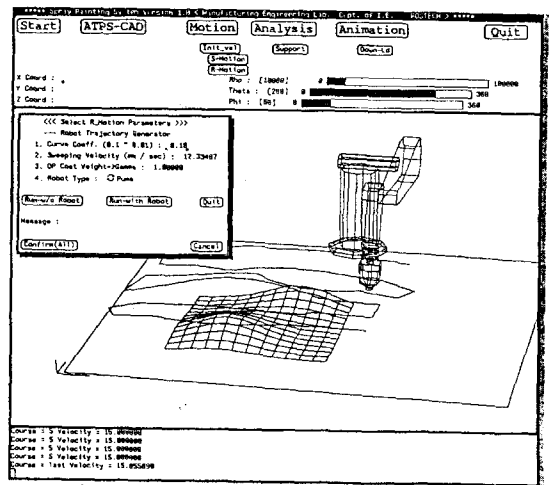


그림 11. R\_MOTION의 실행 결과

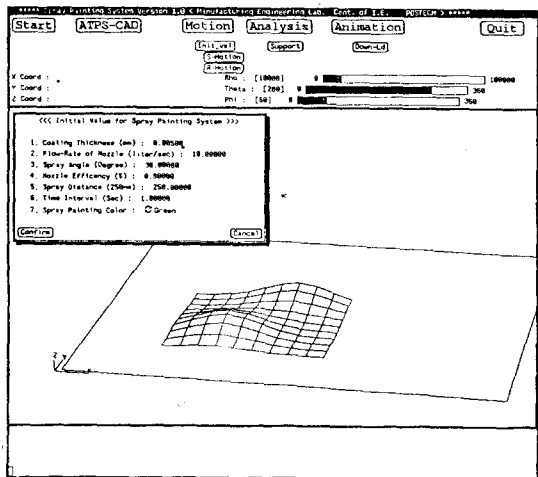


그림 9. 자유곡면의 페인팅 조건치의 초기화

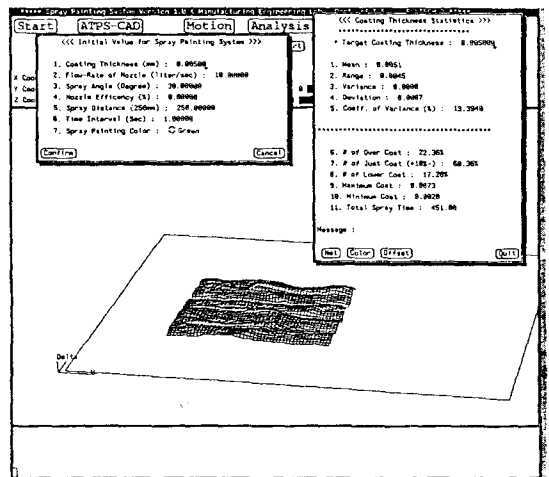


그림 12. ANALYSIS의 실행 결과

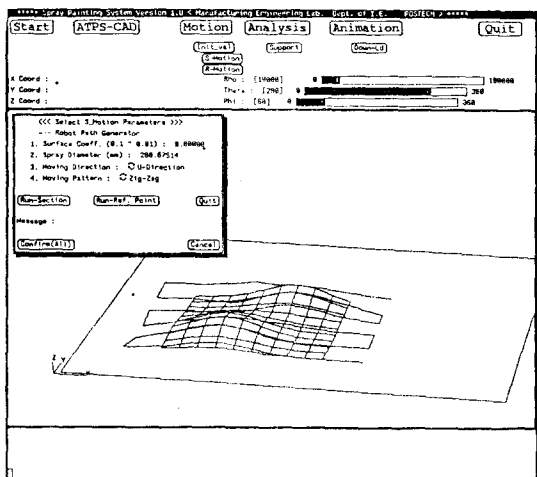


그림 10. S\_MOTION의 실행 결과

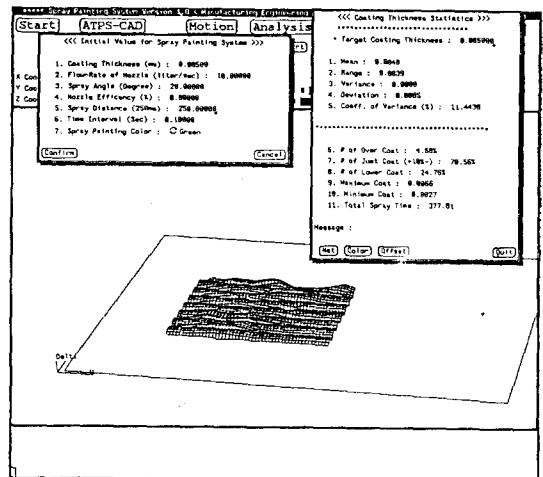


그림 13. 새로운 ANALYSIS 실행결과

지하기 위해서 사용자는 유출율을 줄여나가는 방식으로 접근해야 할 것이다.

다음으로 자유곡면에서 페인트 유출율을 조절하여 실행한 결과 (표 3)에 의하면, 페인트 유출량이 증가할수록 페인팅 시간은 감소되는 것을 알 수 있다. 그러나, 실질적으로 본사건이 토출시킬수 있는 양은 한계가 있으며, 또한 유출량이 많아지면 본사건을 쥐고 있는 로봇의 엔드이펙터가 진동할 우려도 있으므로 무리한 유출량의 부여는 금지되어야 할 것이다. 반면에 유출량을 줄이면 속도의 감소로 인한 변동계수의 감소현상이 나타나지만, (즉, ±10% 층이 두터워 지지만) 그 변화는 미미한 것으로 나타났으며, 오히려 전체 페인팅시간의 급격한 증가를 보인다.

### 5. 결론 및 추후과제

본 연구에서는 페인팅될 물체의 형상데이터로부터 페인팅로봇의 궤적을 산출할 수 있는 자동궤적계획 방식의 구현을 위한 이론과 프로토타입 자동궤적계획시스템을 개발하였다. 개발된 ATPS를 이용하여 피막두께의 균질성과 페인팅시간의 최적화를 도모할 수 있는 페인팅 조건치를 설정할 수 있기 때문에, 페인팅로봇의 오프라인 프로그래밍시스템으로 활용될 수 있을 것이다.

실험의 결과를 통하여 알고리즘의 유효성이 입증되었으나, 곡면의 형상이 임의적으로 복잡해짐에 따라 피막두께의 균질성을 도모하기 어려운 문제점이 관측되었다. 이를 해결할 수 있는 대안책의 강구와 실제의 페인팅로봇를 이용한 검증작업이 추후의 연구과제로 남아 있다.

### (참고 문헌)

- [1] 서 석환, "페인팅로봇의 자동궤적계획법에 관한 연구," 산업과학기술연구소 보고서, (1989).
- [2] 서 석환, 우 인기, "페인팅로봇의 자동궤적계획시스템의 구축에 관한 연구," IE-TR-90-09, POSTECH, (1990).
- [3] T. Bublick, "Robot Applications in Finishing and Painting," Handbook of Industrial Robotics, John Wiley and Sons (1985).
- [4] J. Engelberger, "Spray Painting Applications," Robotics in Practice" Management and Application of Industrial Robots, American Management Association (1984).
- [5] P. Howie, "Graphic Simulation for Off-line Robot Programming," Robotics Today, 63-66 (1984).
- [6] S. Ando et. al, "Computer Controlled Industrial Robot for Painting," CIRP Mfg. Tech., 35, 689 - 700, (1987).
- [7] I. Faux and M. Pratt, Computational Geometry for Design and Manufacture, Ellis Horwood (1985).
- [8] M. Mortenson, Geometric Modeling, John Wiley & Sons (1985).
- [9] R. Lambourn, Paint and Surface Coatings: Theory and Practice, John Wiley and Sons (1987).
- [10] Private Communications with Technical Staff of Mando Machinery Ltd. Anyang, Korea (1989).
- [11] G. Duelen, et. al, "An Off-Line Planning-and Simulation System for the Programming of Coating Robots", Annals of the CRIP vol. 38, no. 1 (1989).
- [12] "SunView Programmer's Guide", Sun Microsystems, (1988).

[13] "Pixrect Reference Manual", Sun Microsystems, (1988).

본사각 (도)	유출율 (l/sec)	평균 (mm)	변동계수 (%)	±10% (%)	초과 (%)	미달 (%)	페인팅시간 (초)
31.3	10.0	45	10.68	57.7	0.0	42.3	390.0
25.0	10.0	45	9.94	59.6	0.0	40.4	385.0
20.0	10.0	45	11.01	63.8	0.0	36.2	320.0
15.0	10.0	44	12.83	41.2	0.0	58.8	280.0
12.5	10.0	44	12.19	61.4	0.0	38.6	270.0
10.0	10.0	42	13.99	50.0	0.0	50.0	257.3

(주 : 평균의 단위는 ( \* 1.0E-4 ), 목표치는 0.005mm )

표 1. 본사각의 변화에 따른 평면의 실험결과

본사각 (도)	유출율 (l/sec)	평균 (mm)	변동계수 (%)	±10% (%)	초과 (%)	미달 (%)	페인팅시간 (초)
25.0	10.0	49	12.53	64.0	12.6	23.4	402.0
22.5	10.0	48	12.88	65.4	9.7	24.9	395.0
20.0	10.0	47	12.23	67.2	5.8	26.9	379.0
18.0	10.0	47	12.84	66.1	3.9	30.0	369.0
15.0	10.0	45	14.82	57.4	2.4	40.2	324.0
12.5	10.0	45	15.46	58.2	1.7	40.1	330.0
10.0	10.0	43	20.42	50.7	2.7	46.6	310.0

(주 : 평균의 단위는 ( \* 1.0E-4 ), 목표치는 0.005mm )

표 2. 본사각의 변화에 따른 자유곡면의 실험결과

본사각 (도)	유출율 (l/sec)	평균 (mm)	변동계수 (%)	±10% (%)	초과 (%)	미달 (%)	페인팅시간 (초)
20.0	7.5	47	12.00	67.8	5.5	26.7	507.0
20.0	5.0	47	11.60	69.3	5.0	25.7	758.0
20.0	2.5	47	11.47	70.1	4.7	25.2	1512.0

(주 : 평균의 단위는 ( \* 1.0E-4 ), 목표치는 0.005mm )

표 3. 유출율의 변화에 따른 자유곡면의 실험결과