

# 스프레이 페인팅 작업을 위한 일관화된 로봇 궤적계획법에 관한 연구<sup>+</sup>

서석환\* · 우인기\*\*

## An Integrated Robot-Trajectory-Planning Scheme for Spray Painting Operations

Suk-Hwan Suh\* and In-Kee Woo\*\*

### Abstract

The use of robots for painting operations is a powerful alternative as a means for automation and quality improvement. A typical method being used for motion planning of the painting robot is to guide the robot along the desired path : the "lead-through" method. Although this method is simple and has been widely used, it has several drawbacks : a) The robot cannot be used during the teaching period, b) A human is exposed to a hostile environment, c) The motions taught are, at best, human's skill level.

To deal with the above problems, an integrated robot-trajectory planning scheme is presented. The new scheme takes CAD data describing the shape and geometry of the objects, and outputs an optimal trajectory in the sense of coating thickness and painting time. The purpose of this paper is to investigate theoretical backgrounds for such a scheme including geometric modeling, painting mechanics and robot trajectory planning, and develop algorithms for generating spray-gun paths and minimum-time robot trajectories. Future study is to implement these algorithms on a workstation to develop an integrated software system : ATPS(Automatic Trajectory Planning System) for spray painting robots.

### 1. 서 론

산업용 로봇을 이용한 도장작업은 로봇의 정밀도, 반복도 및 프로그래머빌리티(Programma-

bility)를 이용하여 작업자를 유독환경에서 구출시킬 수 있을 뿐만 아니라 품질의 향상, 불량품 감소, 원료 및 에너지의 감소를 통한 생산성 향상에 기여할 수 있는 강력한 대안책으로서 구미, 일본 등

+ 이 논문은 1989년도 한국과학재단 기초신진연구비에 의하여 연구되었음

\* 포항공과대학 산업공학과

\*\* 포스테이터(주) 불류시스템부

선진국들에서 이에 관한 연구가 활발하다. 국내에서도 로봇을 페인팅 작업에 이용하고자 하는 시도는 수년 전부터 행해져 왔으며, 수년내에 유수의 자동차 메이커에서는 로봇을 페인팅 라인에 투입시켜 자동 페인팅 시스템을 구축할 전망이다. 본 연구는 이러한 페인팅 시스템에서 요소기술인 로봇의 동작계획법에 관한다.

현재 산업현장에서 페인팅 로봇의 동작계획은 거의다가 소위 리드스투법(Lead-through Method)에 의존한다. 이 방법은 로봇이 주어진 물체의 원하는 부위의 페인팅을 위해 따라가야할 경로(Path)를 작업자가 로봇을 실제로 움직여서 콘트롤러나 카세트 테이프에 기억시키며, 로봇의 실제 동작은 기억된 동작을 플레이백 시킴으로써 이루어진다. 이러한 교시법(On-line Teaching Method)은 작업자가 별다른 전문지식 없이 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있으나, 작업자가 실제의 작업현장에서 실제의 로봇을 이용해야 하는 고로 로봇이 교시기간 중에는 본연의 생산활동을 수행할 수 없음으로 인한 "비생산성" 문제 뿐만 아니라, 동작계획중에 발생할 수 있는 위험성을 감안할 때 "작업자 안전도" 측면에서도 바람직하지 못하다. 더군다나 페인팅 작업처럼 독특한 환경하의 동작계획은 산업질병을 유발할 수도 있으므로 개선책의 강구가 필요하다[1-2].

또 다른 측면에서 보면, 위와 같은 방법은 로봇의 동작이 작업자의 직관에 의해 결정되어짐에 따라 동작의 최적화를 구현하기 어려운 점이 있다. 동작의 최적화는 페인트 소모량 및 페인팅 시간의 감소 뿐만 아니라 균일한 피막두께를 얻는 것까지 직접적으로 관련되므로 매우 중요하다. 비록 동작의 최적도는 작업자의 숙련도에 의해 개선될 여지는 있으나, 정도의 한계성과 숙련자의 최소성을 감안할 때, 숙련자의 대체 및 최적화를 기할 수 있는 효율적인 동작계획 방식이 필요하다.

이러한 문제점들을 해소 내지 경감하기 위해서는 오프라인 프로그래밍(Off-line Programming) 방식

이 도입되어야 한다. 오프라인 방식은 대화형 그래픽 시스템, 예를들면 McDonnell Douglas사의 PLACE[3]를 이용하여 로봇의 경로를 결정하는 방법과, 컴퓨터 알고리즘을 이용하여 로봇의 궤적을 결정하는 방법이 있다. 그러나 이러한 대부분의 방법은 pick-and-place type operation처럼 로봇의 동작이 외부환경과 상호작용이 없는 경우[4-10]나, part mating operation과 같이 로봇의 동작이 외부환경과 직접적인 상호작용이 있는 경우[11-13]에 관한 것이다. 그외, 로봇 동작이 외부환경과 간접적인 상호작용을 갖는 경우에는 용접작업에 관한 연구[14-15]를 들 수 있으나, 페인팅 작업에 관한 연구는 극소수에 불과하며[16], 특히 물체의 형상과 페인팅 역학을 고려한 동작계획에 관한 연구는 전무한 상태이다.

로봇을 이용한 페인팅 작업은 예를 들어 그림 1의 자동차 보다 도장라인의 경우 스프레이건(Spray Gun, 이하 분사건이라 칭함)이 장착된 로봇팔(Robot Arm)이 차체에서 일정한 거리를 유지하면서 주어진 경로를 따라 페인트를 분사함으로써 이루어진다. 이때 중요한 것은 분사건의 자세(Orientation)가 물체의 곡면(Tangent Plane)과 수직방향을 이루어야 되고, 또한 분사건의 팁(Tip)과 곡면간의 거리(Normal Distance)를 일정하게 유지시키는 것이다. 아울러, 페인트 분사밀도가 분사직경 내에서는 균일하도록 하여 물체의 표면에 페인트 흡착두께가 균일하도록 해야 한다.

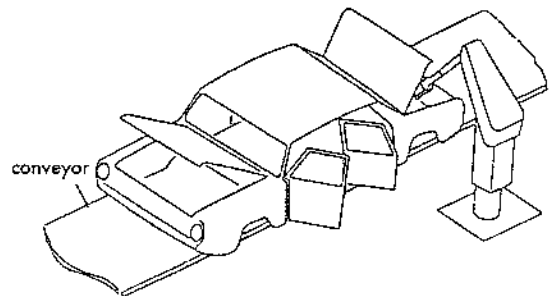


그림 1. 로봇을 이용한 페인팅 작업

이들은 페인팅될 표면의 광택이나 균질성을 유지하고, 또 페인트의 낭비를 막는 데에도 중요한 조건들이며, 조건치들의 설정시에는 흠착두께, 분사속도, 분사거리, 분사직경, 분사각도 등과 같은 변수들간의 역학관계가 고려되어야 한다[1-2]. 이러한 페인팅 역학을 고려한 동작은 숙련작업자가 수행하기에도 어려운 동작이며, 이를 로봇트에 교시하는 것은 더욱 어려운 문제점으로 나타났다. 특히, 물체의 표면이 복잡한 자유곡면 형상에 가까워짐에 따라 정확한 동작의 교시는 심각한 문제점으로 대두된다.

## 2. 일관제적계획 방식

본 연구에서는 앞서 열거한 문제점에 대처하기 위한 새로운 접근방식으로서 페인팅될 물체의 CAD 데이터를 입력으로 받아 최적 로봇트 궤적을 산출할 수 있는 일관제적 계획법(ITP: Integrated Trajectory Planning)을 제시한다. 그러나 임의의 곡면 형상에 페인팅 두께의 균질성 및 페인팅 시간의 최소화를 도모하는 문제는 근본적으로 곡면 모델링, 페인팅 역학 및 로봇트 역학이 결부되는 복잡방대한 문제이기 때문에 반복과정을 거침으로써 최적 페인팅 조건을 추구하는 형태를 취해야 한다.

따라서 일관제적 계획법은 이러한 반복과정에 의해 사용자가 최적의 페인팅 조건을 설정하도록 하고, 매번 설정된 조건치에 의해 물체의 형상을 효율적으로 페인팅하기 위한 분사건의 경로 및 로봇트의 최적 동작을 산출하고, 이에 따른 페인팅 두께의 흠착상태를 분석하여 사용자에게 제시하며 다른 페인팅 조건치를 시도할 것인지를 결정한다.

이러한 스킴(Scheme)에 의해 ITP는 그림 2와 같은 구조를 갖는다. 즉, ITP는 ITP-CAD, S-MOTION, R-MOTION, ANALYSIS의 4개의 모듈로 구성되며, ITP-CAD는 페인팅될 물체의 곡면을 정의하는 형상모델러이고, S-MOTION은 분사건의

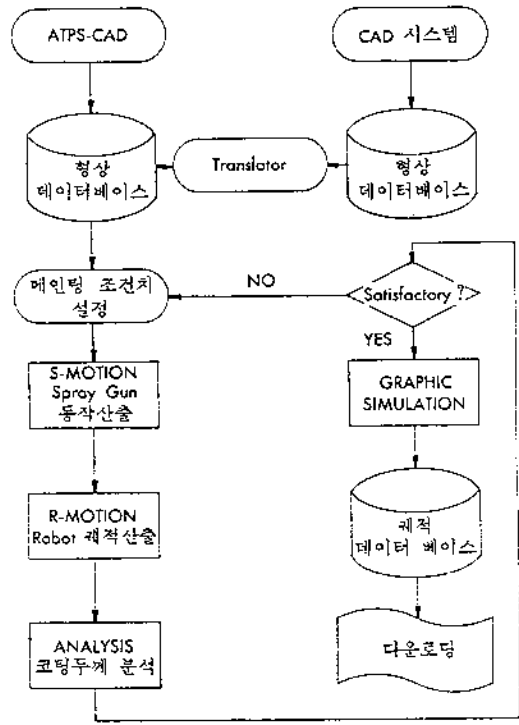


그림 2. ITP의 개념도

경로를 설정하며, R-MOTION은 분사건의 경로를 로봇트의 궤적으로 변환하며, ANALYSIS는 피막 두께를 분석하는 기능을 갖는다.

본 논문은 ITP 방식의 구현을 위해 필요한 형상모델링(Geometric Modeling), 페인팅 역학(Painting Mechanics), 분사건의 경로계획 및 로봇트 궤적계획(Robot Trajectory Planning)에 관한 이론적 기반과 알고리즘을 개발하는 것이다. 3절에서는 곡면의 형상모델링 방식을 간략히 소개하며 공기 분사 방식에 의한 페인팅 역학식을 도출하고, 4절에서는 분사건의 경로설정에 관한 알고리즘을 제시하며, 5절에서는 분사건의 경로 및 표준속도를 로봇트의 최적 궤적으로 변환하는 궤적계획 알고리즘을 개발한다. 본 논문은 6절의 결론 및 요약으로 맺는다.

### 3. 물체의 표현 및 페인팅 역학

#### 3-1. 물체의 표현

본 연구에서는 3차원 물체의 형상데이터가 주어졌다고 보고, 형상데이터에 의해 서술된 물체의 페인팅을 위한 로봇의 궤적을 산출하고자 하기 때문에 형상 모델링 기법 자체는 연구하지 않는다. 그러나, 본 연구의 결과를 기존의 CAD 시스템에 이식시키거나, 기존의 시스템에서 구현된 형상을 입력으로 취한다는 측면에서는 가장 보편적이고 효율적인 형상모델링 방법을 대상으로 할 필요성이 있다.

3차원 형상의 기하학적 표현방식은 크게 Boundary Representation(B-Rep) 방식과 Constructive Solid Geometry(CSG) 방식을 들 수 있으나 아직 CSG 방식은 많은 연구가 진행중이며 소수의 CAD 시스템에 구현된 상태이기 때문에 본 연구에서는 B-Rep 방식을 가정한다. B-Rep 방식은 3차원 물체의 표면을 나타내는 곡면방정식(Geometric Information)과 Surface간의 인접상태를 나타내는 To-

pological Data로 구성된다.

3차원 곡면은 크게 Ferguson Patch, Bezier Patch, B-Spline Patch 모델링 방식으로 나타낼 수 있다[17, 18]. Ferguson Patch는 쌍3차 매개변수로 곡면을 나타내나 이를 정의하는 기하요소(Geometric Element)중 경계곡선의 네 꼭지점에서의 꼬임 벡터(Twist Vector)의 Physical Meaning이 약하며, 또한 곡면의 형상이 전체의 기하요소의 영향을 받기 때문에 대화형 CAD 시스템에서는 많이 사용되지 않는다. 그러므로 본 연구에서는 Bezier와 B-Spline 곡면모델 방식을 가정하여 페인팅될 물체의 단위 곡면은 쌍3차 방정식으로 나타낸다.

#### 3-2. 페인팅 역학

##### 3-2-1. 분사방식

스프레이 페인팅(Spray painting)은 자동차와 같이 대량생산에 따른 요구와 새로운 합성페인트 제조기술의 개발에 힘입어 개발된 최선의 페인팅 방식이다. 근본적으로 스프레이 페인팅은 페인트 용액을 분무시킨(Automize) 미세입자를 물체표면으

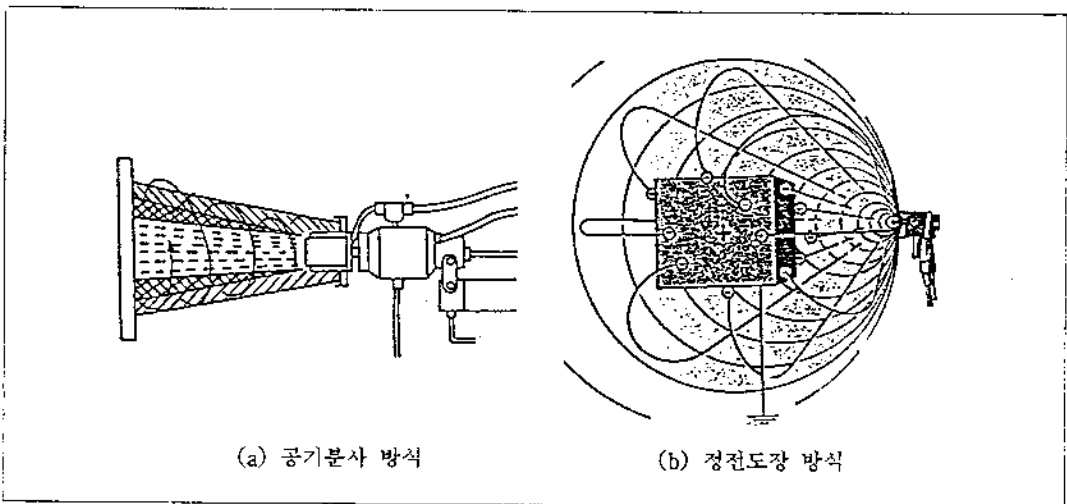


그림 3. 공기분사 및 정전도장 방식

로 이송시키는 것이다. 분무매체로는 압축공기를 많이 사용하나 최근에는 이송효율(Transfer Efficiency)을 높이기 위해 정전도장(Electrostatic painting) 방식도 개발되었다[19].

정전 도장방식(그림 3(b))은 페인트 용액에 고전압을 걸어 정전기를 발생시켜 어스(earth)된 물체에 흡착시키기 때문에 공기분사식(Air Spray)에 비해 분사 효율을 높일 수 있는 장점이 있으나 물체의 표면에 코팅되는 두께가 불균일할 가능성이 존재한다. 예컨대, 홈이진 부위에는 페인트 입자가 흡착되지 않거나, 각진 부위는 과다 흡착되는 현상(Faraday's Cage Effect)이 발생한다. 다시말하면, 표면에 흡착되는 페인트 입자의 양이 Charge Pattern과 물체의 형상에 따라 가변성이 크기 때문에 특히 물체의 형상이 복잡해짐에 따라 표면의 균질성을 유지하기가 어려운 문제가 있다[1].

반면에 공기식(그림 3(a))은 페인트 입자의 추진력이 압축공기에 의하기 때문에 Faraday's Cage Effect로 인한 문제점은 없으나, 고압으로 분사시킴에 따라 페인트 입자가 표면에 부딪힌 후에 튀어나오는 바운스백(Bounce Back) 현상이나 저압으로 분사시킴에 따른 과다흡착(Overspray) 현상이 존재한다. 이러한 현상들은 페인트의 분사효율 혹은 이송효율을 저하시키는 요인이 되기 때문에 분사압력이나 페인트 용액의 점도 등을 적절히 조정하여 유실율을 최소화 시켜야 한다.

공기식은 이송효율의 상대적 열세에도 불구하고, 응용범위나 신속처리성에서 뛰어나기 때문에 Surfer, Sealer, Topcoat 등의 분사에 많이 사용되고 있는 점과, 표면의 흡착두께를 규명할 수 있는 모델 설정의 용이성을 감안하여 본 연구에서는 공기분사 방식을 대상으로 하여 페인팅 역학모델링을 한다.

### 3-2-2. 페인팅 역학

스프레이 페인팅은 분사건을 통해 페인트 혼합액을 공기압력으로 분사시킴으로써 이루어진다.

분사건을 통한 페인트 입자가 표면에 흡착되는 상태는 페인팅 변수에 의하기 때문에 분사건의 동작을 도출하기 위해서는 페인팅 변수의 규명과 이들 상호간의 역학식의 설정이 필요하다. 그러나, 본 연구에 적용할만한 페인팅 역학에 관한 이론은 아직 문헌에 보고된 바가 없으며, 숙련작업자 및 전문가 기술진과의 협의와 [20]의 단편적인 이론[1,2]을 요약하면 다음과 같다.

곡면의 페인팅은 분사건을 곡면의 수직방향(Normal Direction)으로 일정한 거리(250mm 정도)를 유지하는 것이 중요하며, 분사직경내의 밀도를 균일하도록 한다. 그러나, 상기의 조건을 인간이 구현하는 데에는 비단 숙련자라도 많은 어려움이 있는 것으로 나타났으며, 컴퓨터에서 계산된 분사건의 경로를 취하는 방식을 추천하고 있다[1,2,20].

상기한 조건을 수식화 하기 위하여 물체의 표면이 평면인 경우 그림 4를 고려하자. 노즐의 페인트 유출율(Flow rate)을  $\mu$ , 분사거리를  $d$ , 분사각을  $\alpha$ , 분사반경을  $r$ , 분사면적을  $A$ , 코팅두께를  $\delta$  라 하면,

$$r = d \tan \alpha,$$

$$A = \pi r^2$$

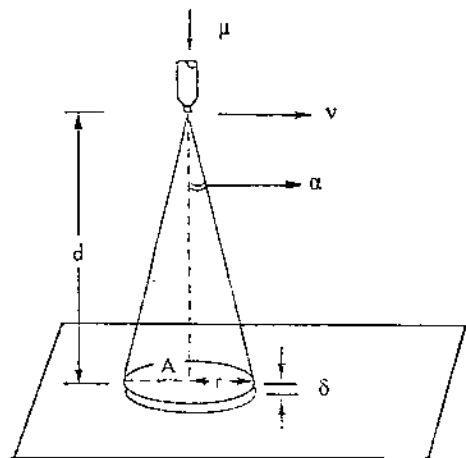


그림 4. 평면 페인팅 모델

이고, 노즐을 통해 분사된 페인트의 양이 표면에 흡착되는 비율, 즉 이송효율  $\sigma \in [0, 1]$ 라 하고, 분사시간을  $t(\text{sec})$ 라 하면, 순간적으로 표면에 전달되는 페인트의 양  $Q = \mu \sigma t$ 가 분사지역내에 균일하게 전달된다면, 즉

$$\mu \sigma t = A \delta$$

이므로, 코팅두께는 다음과 같다.

$$\delta = \frac{\mu \sigma t}{\pi d^2 \tan^2 \alpha} \dots\dots\dots (1)$$

식(1)은 페인팅 변수들간의 기본적인 역학을 규명하는 식으로서, 코팅두께는 분사시간, 이송효율, 유출율에 비례하고 분사거리 및 분사각의 탄젠트 값에 반비례한다. 이상의 관계식을 도출함에 있어서의 주요 가정은 첫째, 분사단면은 원이고 둘째, 순간적인 분사단면내의 피막두께는 균일하다는 것이다. 전문기술진[20]에 의하면 정상적인 형상은 원형인 것으로 나타났다(주: 타원모델인 경우에도 상기의 관계식을 약간 변형시키면 되기 때문에 모델링상의 문제는 없음).

반면에 분사단면내의 균질성은 페인트 및 첨가제의 물성(예: 입자크기, 점도)과 분사압력 등에 따라 가변의 여지(Bounceback 및 Overspray)가 많이 있기 때문에 균질성을 위한 페인트 합성 및 분사방식에 대한 연구가 따라야 한다. 그러나 이것은 본 연구의 범위를 벗어나므로 여기서는 단순히 "분사단면의 균질성"을 가정하기로 한다.

그러나, 주기할 것은 비록 순간적인 분사단면내의 피막두께는 일정하더라도 분사건이 이송함에 따른 피막두께는 원의 가장자리로 갈수록 감소하게 된다. 이러한 현상은 그림 5(a)에서 분명히 나타나며, 실제로 코팅된 단면은 그림 5(b)와 같이 반타원을 이룬다. 즉, 중심부의 피막두께가  $\delta$ 이고 가장자리는 0, 평균두께  $\delta_m$ 은 다음과 같다.

$$\delta_m = \frac{\pi}{4} \delta \dots\dots\dots (12)$$

분사건의 이송속도가  $v(\text{m/sec})$ 라하면 분사건이 표면에 진입하는 초기의 분사지역을 제외한 표면의 체공시간  $t = 2r/v$ 이므로, 식 (1)-(2)에서 코팅 두께는 다음과 같다.

$$\delta_m = \frac{\mu \sigma}{2 v d \tan \alpha} \dots\dots\dots (3)$$

따라서, 주어진 페인팅 조건치  $\mu, \sigma, d, \alpha$ 에 지정된 코팅두께  $\delta_m$ 을 얻기 위한 이송속도  $v$ 는 다음에 의한다.

$$v = \frac{\mu \sigma}{2 \delta_m d \tan \alpha} \dots\dots\dots (4)$$

다음으로 두 경로사이의 스텝증분(Step increment)을 고려하자. 만약 스텝증분( $\eta$ )이 분사직경과 같다면, 즉  $\eta = 2r$ , 두 경로사이에는 그림 6(a)와 같이 바람직하지 않는 골이 존재한다. 그러므로 이를 피하기 위해서는 스텝증분  $\eta$ 는 0과  $2r$  사이의 값을 가져야 하며, 현장기술진은  $\eta = r$ 을 추천하고 있다. 이 경우, 분사경로는  $r$ 만큼 겹쳐도록 설정되며, 경제부위를 제외한 지역에서의 평균 코팅두께는 그림 6(b)와 같이 2배가 되기 때문에 같은 코팅두께를 얻기 위해서는 속도를 2배로 증가시켜 주어야 한다: 즉, 식(4)는 식(5)가 된다(주: 임의의  $\eta$ 값에 대해서도 속도식은 유사하게 구할 수 있음).

$$v = \frac{\mu \sigma}{\delta_m d \tan \alpha} \dots\dots\dots (5)$$

명기할 것은 식(5)의 속도는 분사건의 이송속도로 보다는 분사표면의 이송속도로 받아져야 한다는 것이다. 물체의 표면형상이 평면인 경우에는 두 속도가 같으나 곡면의 경우에는 형상의 모양에 따라 상당히 차이가 날 수 있다. 이 점은 로봇의 궤적계획 수립시에 표준속도로서 표면두께의 균질성을 유지하기 중요한 요소이다. 또한, 이상에서 도출한 페인팅 역학식은 평면 코팅을 대상으로 하여 개발되었으나 기본적으로 곡면은 이산평면(Discri-

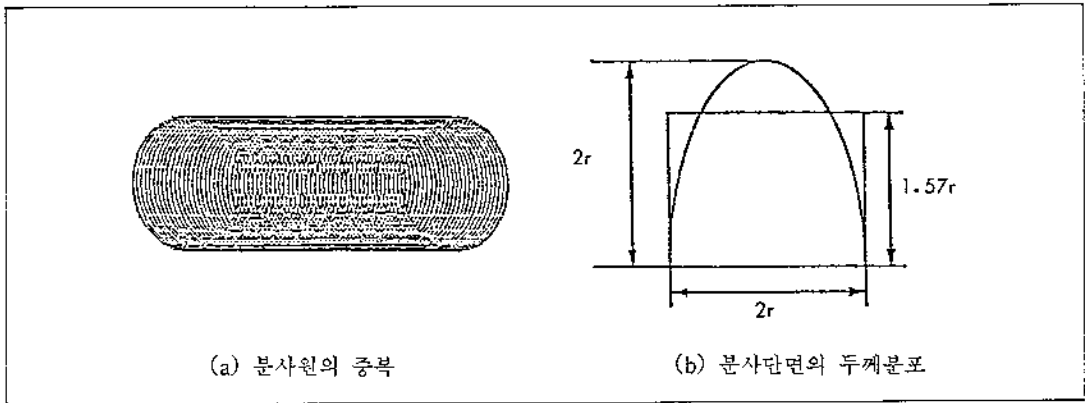


그림 5. 분사단면의 두께분포

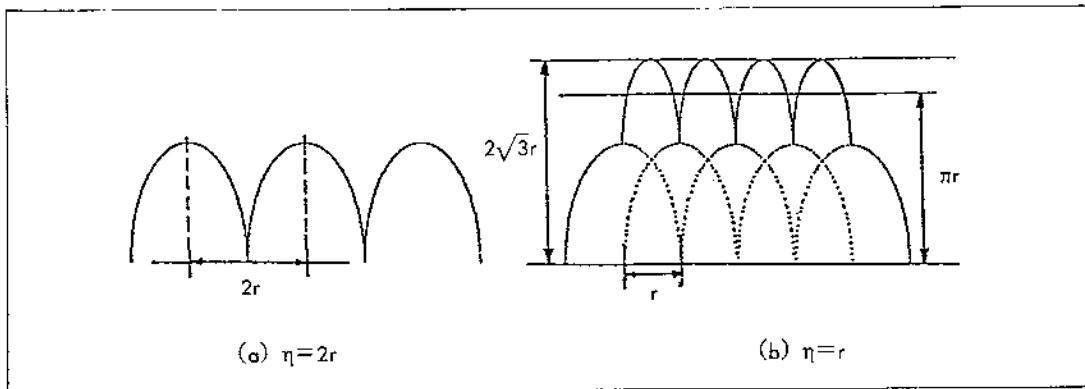


그림 6. 스텝증분 (η)에 따른 두께분포

tized plane)의 집합으로 볼 수 있기 때문에 곡면을 이산화 시킴으로써 평면모델식을 바로 적용할 수 있다. 단지 곡면의 경우에는 균일한 피막두께를 위한 분사건의 경로설정이 문제점으로 대두되며 이는 4절에서 다룬다.

#### 4. 분사건의 경로계획

##### 4-1. 경로의 표현 방식

그림 7과 같은 단면을 가진 물체의 표면을 페인팅하는 경우에 분사건의 팁(tip)은 표면의 법선방향(Normal Direction)으로 d만큼 오프셋(Offset)된 곡

선경로를 따르며, 분사건의 자세는 법선벡터의 반대방향이 된다. 곡선상의 점  $p(u, w)$ 에 상응되는 분사건의 위치 및 자세는 다음과 같은 행렬로 나타낼 수 있다.

$$H = \begin{bmatrix} \underline{n} & \underline{o} & \underline{a} & \underline{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

윗식에서  $\underline{n}=[n_x, n_y, n_z]^T$ ,  $\underline{o}=[o_x, o_y, o_z]^T$ ,  $\underline{a}=[a_x, a_y, a_z]^T$ 로서 이들은 분사건의 자세(Orientation)를 나타내며,  $\underline{p}=[p_x, p_y, p_z]$ 는 분사건 팁의 위치를 나타낸다(주: H는 4×4 Homogeneous Matrix로서 3차원 물체의 위치와 자세를 Cartesian Space에서 정의한다[4]. 이하에서는 각각의 벡터를

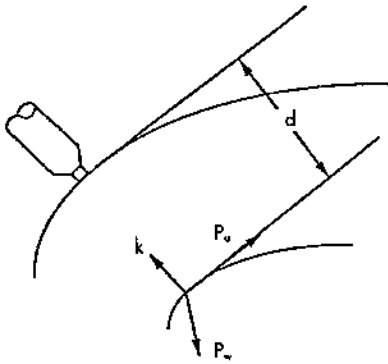


그림 7. 단면곡선과 분사건의 경로

구하는 방법을 설명한다.

$p(u, w)$ 의 단위 법선벡터(Unit-Normal Vector)를  $k$ 라 하면,

$$k = \frac{p^* \times p^{**}}{|p^* \times p^{**}|}$$

여기서  $p^* = \partial p(u, w) / \partial u$ ,  $p^{**} = \partial p(u, w) / \partial w$ 이고, 위치벡터  $p$ 는 다음과 같다.

$$p = p(u, w) + d \underline{k} \dots\dots\dots (6)$$

$a$  벡터를 분사건 Coordinate Frame의 Z축으로 정의하면,  $a$ 는 단순히 법선벡터의 역벡터이다. 즉,

$$a = -\underline{k} \dots\dots\dots (7)$$

$n, a$  벡터의 결정은 여러 방식이 있을 수 있으나, 분사건을 이송하는 로봇의 기구학(Kinematics)을 이용하는 것이 물체의 곡면방정식에 의한 방식보다 효율적이다. 페인팅 작업의 경우 분사건와 롤(Roll) 동작은 의미가 없기 때문에, 페인팅 로봇트는 6축 다관절형 로봇트 보다는 기본적으로 엔드이펙터(endeffector)의 롤 동작이 결여된 5축 로봇트 형태가 많이 사용된다(주: 그러나 GMF 페인팅 로봇트처럼 엔드이펙터가 기억자로 휘어진 형태의 6축도 있다). 롤 동작이 결여된 5축 로봇트의 경우 자세행렬상에서 다음과 같은 제약조건이 따른다(주: 다음의 제약조건은 역기구학(Inverse Kine-

matics) 해를 구하는 과정에서 쉽게 도출될 수 있으며 도출과정은 생략한다).

$$\frac{o_x}{o_y} = \frac{p_y}{p_x} = c \dots\dots\dots (8)$$

식(8)과 자세행렬  $[n \ o \ a]^T$ 의 Orthonormality 조건에서 다음이 성립한다.

$$c \ o_y^2 + o_x^2 + o_z^2 = 1 \dots\dots\dots (9)$$

$$c \ o_y \ a_x + o_x \ a_y + o_z \ a_z = 0 \dots\dots\dots (10)$$

식(9)-(10)의  $c, a_x, a_y, a_z$ 는 식(7)-(8)로 주어지기 때문에  $o_y, o_x$ 가 유일(unique)하게 결정되며,  $o_x = c \ o_y$ 를 이용하면  $o$  벡터가 완전히 정해진다.  $o, a$  벡터가 정해지면,  $o \times a = n$  관계식을 이용하여  $n$  벡터를 구할 수 있다.

이상과 같이 물체의 한점에 상응하는 분사건의 위치 및 자세(이하 "위치"로 약칭함)를 구할 수 있다. 바꾸어 이야기하면, 분사건 위치는 표면점에 의해 정의되기 때문에 함수관계가 성립한다고 볼 수 있다. 즉,

$$H = F [p(u, w)] \dots\dots\dots (11)$$

여기서  $H$ 는  $4 \times 4$  위치행렬이고,  $p(u, w)$ 는  $3 \times 1$  벡터이며,  $F$ 는 변환함수를 나타낸다.

4-2. 경로의 결정

4-1에서는 물체의 형상에 따르는 분사건의 위치를 정의하는 변환함수를 도출하였으며, 본 절에서는 이를 이용하여 분사건의 경로를 결정하는 문제를 고찰한다. 분사건의 동작계획(Motion planning)은 분사건이 따라가야할 위치와 자세를 지정하는 경로계획(Path planning)과 이송속도를 지정하는 속도계획(Velocity planning)으로 구성된다.

동작계획시의 가장 중요한 고려사항은 피막두께의 균질성이다. 피막두께는 분사건의 경로 뿐만 아니라 이송속도(식(5))에 의해 결정되기 때문에 분사건의 동작계획시에 경로와 속도를 동시에 설



정합이 타당하다. 그러나 분사건을 이송하는 매체가 로봇트이며, 계획된 분사건의 동작(특히, 이송 속도)을 로봇트가 낼 수 없거나, 로봇트의 동작계획시에는 사이클 타임의 최소화라는 또 다른 명제가 있기 때문에 분사건의 동작계획시에는 경로계획만을 하고, 로봇트의 동작계획시에는 속도계획만을 전담하도록 한다.

분사건의 경로결정은 크게 다음의 3과정을 거친다: 가) 진행방향(Sweeping direction)의 설정, 나) 구간 및 구간경로의 결정, 다) 구간경로의 통합. 이 과정을 통해 분사건의 스위핑(Sweeping) 영역의 중심점이 지나는 표면중심 경로를 얻게되며, 이를 오프셋 시킴으로써 분사건의 경로를 최종적으로 구한다. 이를 차례로 살펴보면 다음과 같다.

가. 진행방향 설정

주어진 곡면형상의 분사건에 대해 진행방향은 횡방향(u 방향)과 종방향(w 방향)의 둘로 나뉘어진다. 진행방향은 임의로 결정될 수 있으나, 곡률의 변화가 적은 쪽을 택한다. 그 이유는 이렇게 함으로써 분사건의 위치 및 자세변환이 적게 되고 부드러운 동작과 동작시간 및 에너지의 최소화를 기할 수 있는 여지가 많기 때문이다.

나. 구간 및 구간경로의 결정

이 과정은 분사건의 진행방향이 지그재그식으로 이루어지기 때문에 인접한 진행방향간에 중복계수  $n$ (분사반경  $r$ 로 가정함) 만큼 중복되도록 경계선을 설정함과 동시에 분사건의 표면 중심경로를 결정하는 것으로서, 균질의 피막두께를 위한 가장 중요한 과정이다. 평면의 경우에는 쉽게 경계선과 중심경로를 구할 수 있으나, 자유곡면의 경우에는 곡면을 여러장의 평면으로 근사시키는 방식을 취한다.

곡면의 방정식이  $P(u, w)$ 이고 분사건의 이송방향이  $w$  방향이라 하자(그림 8). 먼저, 초기의 중심경로는  $u=0$ 인 곡선상에 존재하는  $N$ 개의 특성점으로 개략화 시킨다. 각 특성점의 직교좌표 및

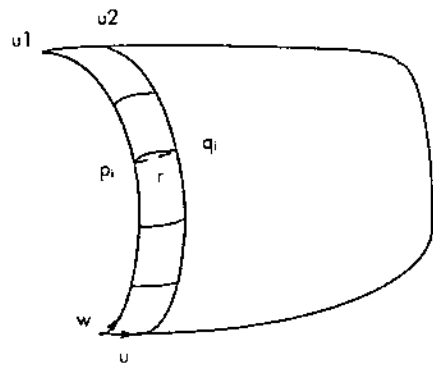


그림 8. 분사구간 및 경로설정

단위법선 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$p_i = P(0, w_i), \quad n_i = n(0, w_i), \quad i \in [1 : N] \quad \dots (12)$$

여기서  $w_i = (i-1) \Delta w$ ,  $\Delta w = w^{max} / (N-1)$ 이다.

두번째 구간부터는 이전의 중심경로와 분사영역을 고려하여 설정한다. 두번째 분사영역의 좌측경계는  $u = u_1 = 0$ 인 곡선상에 존재하는  $N$ 개의 점이며, 우측경계는  $u^+$  방향으로 직선거리가  $r$ 인  $N$ 개의 점들로 구성된다. 즉,  $i$ 번째 우측경계점의  $u$ 값( $u_2$ )은 다음과 같다.

$$|P(u_2, (i-1)\Delta w) - P(u_1, (i-1)\Delta w)| = r, \quad i \in [1 : N] \quad \dots (13)$$

주기할 것은, 좌측 경계점과 우측 경계점은  $P(w_i)$  곡선상에 존재하며, 식(13)에 의해 두번째 구간의 분사영역은  $N$ 개의 단면곡선으로 분할된다. 또한, 각 단면에서는 오직 한개의 특성점이 정의되므로 특성점은 각 단면을 대표하는 점이 되어야 한다. 바꾸어 말하면, 특성점은 이에 의해 정의되는 분사건의 위치와 자세가 단면을 균일한 두께로 코팅될 수 있도록 설정되어야 한다. 그러나 단면 윤곽이  $P(u_1, w)$ 와  $P(u_2, w)$ 를 잇는 선분과 일치하지 않는한, 이 조건을 만족시키는 특성점은 존재하지 않기 때문에 분사건의 자세는 양끝점을 잇는 선분의 중심 수선벡터로 정의하고 분사건의 위치는 분사 단면내에서 분사거리의 편차를 최소화시키는 다음

과 같은 방식을 취한다.

그림 9에서 단면곡선의 양끝점  $p(u_1)$ 과  $p(u_2)$ 을 잇는 선분을 C라 하고, 단면 곡선  $p(u)$ 와 C의 수선거리를  $D(u)$ 라 하면, 최대 수선거리를 갖는 점  $p(u^*)$ 는 다음 관계식을 만족한다(아래에서  $m$ 은 양의 상수임).

$$p'(u^*) = \frac{d}{du} p(u) \Big|_{u=u^*} = m[p(u_2) - p(u_1)] \quad (14)$$

즉,  $p(u^*)$ 에서의 기울기는 C와 평행하며, 이를 이용하여  $p(u^*)$ 를 구할 수 있다. C와 평행하며  $p(u^*)$ 를 지나는 직선과 C의 수선이 교차하는 점 A를 특성점으로 잡으면(그림 9), 분사거리가 지정된 값보다 커짐에 따라 과소 코팅현상이 초래되고, 반면에 C의 중간점 B로 잡으면 과대 코팅현상이 발생한다. 그러므로 이들의 평균점 E를 취하므로써 분사거리의 편차로 인한 코팅두께의 불균질성을 최소화 할 수 있다. 즉, 최적 특성점 E는 다음과 같다( $k$ 와 C와  $p(u^*)$ 에 의해 정의되는 단위 수선 벡터임).

$$E = 0.5 [p(u_2) - p(u_1)] + 0.5 D(u^*)k \quad \dots\dots (15)$$

다음 구간의 좌측 경계점은 이전 구간에서 정해진  $N$ 개의  $p(u_i^*)$ 이며, 우측 경계점은 식(13)을 이용하여 구하며, 특성점을 구하는 절차는 앞서와 동일하다. 다만, 만약 식(13)을 만족시키는  $u$ 값이  $u^{max}$  보다 큰 경우에는 이 구간은 마지막 구간이 되며, 이 구간의 우측경계점은 실제 곡면상의 점이 아니고  $u^*$  방향으로 확장된 곡면상의 점이다. 주기할 것은 이상의 방식으로 특성점을 구하는 것은 전술한 바와 같이 완전 균일한 조건을 만족시키는 특성점이 존재하지 않기 때문에 취한 차선책으로서, 원래의 단면곡선(그림 9의 실선)을 평면(그림 9의 점선)으로 개략화하는 것으로 볼 수 있다.

다. 구간경로의 통합

구간경로의 통합은 앞서 구한 구간별 표면 중심 경로를 지그재그식으로 연결시키는 것과 이를 오프셋팅시켜 분사건의 위치와 자세를 결정하는 마

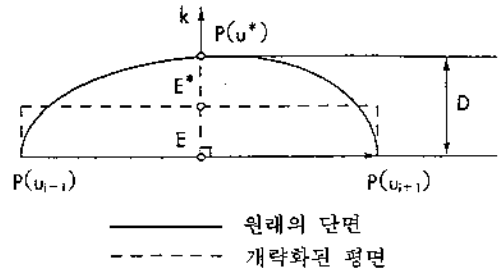


그림 9. 단면곡선의 특성점

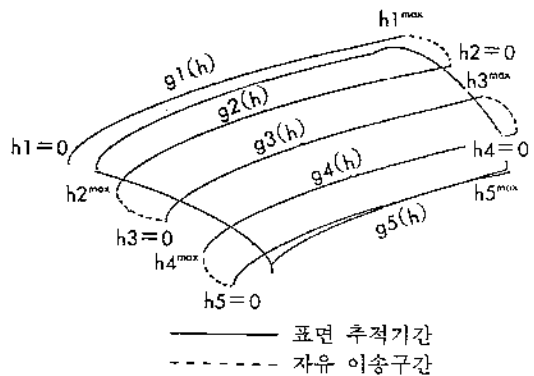


그림 10. 분사건의 통합경로

무리 절차로서 이에 의해 그림 10과 같은 통합경로를 얻게 된다. 지그재그식으로 표면 중심경로를 연결하는 경로는 분사건이 표면을 빠져나와 다음 구간으로 진입하기 전까지의 경로(그림 10의 점선)를 지정하는 것이며, 이는 표면 중심경로에서 최소한  $r$ 만큼 빠져나오도록 한후 연결되어야 한다. 주기할 것은 연결구간의 점선경로는 분사건의 경로를 완결한다는 측면에서 설정되는 것이며, 로봇트가 반드시 따라가야 할 경로는 아니며, 그 이유는 5절에서 설명된다.

5. 로봇트의 궤적계획

로봇트의 궤적계획은 분사건의 동작계획은 로봇트의 컨트롤러가 수행할 수 있는 지령으로 변환시

키는 것이다. 다시 말하면, 궤적계획자(Trajectory planner)는 분사건의 동작계획에서 정해진 경로를 수행할 수 있는 로봇의 궤적을 로봇 관절, 혹은 엔드이펙터의 경로 및 속도의 형태로서 산출한다.

전절에서 구한 분사건의 경로(그림 10)를 로봇의 궤적형태와 관련지으면 실선구간은 윤곽 추적궤적(Contour following trajectory), 점선구간은 자유 이송궤적(Free transfer trajectory)으로 분류된다. 여기서 윤곽은 M개의 분사건의 구간경로  $\{g(h), h \in [0, h_i^{max}]\}$ 를 의미한다. 그러므로, 페인팅 로봇의 궤적은 M개의 윤곽추적 궤적과 (M-1)개의 자유 이송궤적으로 분할된다.

윤곽추적(CF: Contour Following) 구간은 페인트가 물체 표면에 분사되는 구간으로서 로봇의 경로가 분사건의 경로로서 지정되어 있을 뿐만 아니라, 피막두께  $\delta_m$ 을 얻기 위한 표면 스위핑 속도가 식(5)로 정의되어 있다. 바꾸어 말하면, 균일한 피막두께를 얻기 위해서는 표준속도 (5)를 따라야 하기 때문에 분사건의 이송속도, 즉 로봇의 이송속도도 간접적으로 지정된 것으로 볼 수 있다. 반면에 자유 이송(FT: Free Transfer) 구간은 경로에 대한 제약은 없으며, 단지 시작점과 끝점에 경계조건(Boundary Condition)이 존재한다. 이하에서 두 궤적결정 문제의 수식화(Formulation)와 해법을 제시한다.

5-1. 윤곽추적 구간

5-1-1. 문제의 정의

CF 구간의 경로를  $g(h)$ 라 하면, 우리는  $g(t) = g(h(t))$ 를 결정하고자 한다. 즉, 얼마나 빨리 주어진 경로를 따라 움직여야 하는지를 지정하는 함수,  $h(t)$ 를 결정하고자 한다. 이 문제는 1차원 문제로서 Shin[8], Borow[21] 등에 의한 상면법(Phase plane approach)을 사용하여 최소 시간궤적(Minimum-

Time trajectory)을 구할 수 있다. 그러나, 페인팅 작업의 경우에는 최소시간 외에 코팅두께의 균질성을 위해서 식(5)로 주어진 "표면 스위핑 속도"를 따라야 할 뿐만 아니라 분사건의 경로와 표면경로 간에 기하학적 관계를 만족시켜야 하기 때문에 이의 적용이 곤란하다.

분사건의 표면 중심경로를  $\{f(s), s \in [s_0, s_1]\}$ 라 하면,  $f$ 는 특성점  $E_i, i \in [1 : N]$ 의 보간(Interpolation)으로 정해진다. 마찬가지로 분사건의 경로를  $\{g(h), h \in [h_0, h_1]\}$ 라 하면,  $g(h)$ 는 다음과 같이 정의되는  $G_i$ 의 보간으로 정해진다(주:  $E_i, k_i$ 는 식(15)에서 정의됨).

$$G_i = E_i + d \cdot k_i, \quad i \in [1 : N] \dots\dots\dots (16)$$

로봇이 따라가야할 경로는  $g(h)$ 로 지정되는 반면, 표면 스위핑 속도  $v$  (5)는  $f(s)$  영역(Domain)에서  $\dot{s}(s) = v, \forall s$ 의 형태로 지정되기 때문에(주: 이하에서  $\dot{x} = dx/dt$ ), 이 조건을  $g(h)$  영역으로 변환시킨다. 즉,  $\{\dot{s}(s) = v, \forall s\}$ 에 상응하는  $\dot{h}(h)$ 를 구하고자 한다.

곡선  $f(s)$ 와  $g(h)$ 와의 관계식  $g(h) = f(s) + d \cdot k(s)$ 에서 (그림 11) 다음이 성립하고

$$\dot{g}(h) = \dot{f}(s) + d \cdot \dot{k}(s) \dots\dots\dots (17)$$

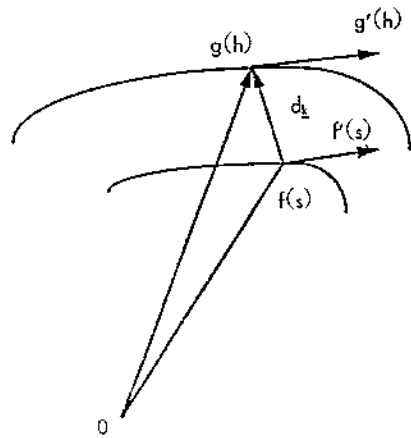


그림 11. f(s)와 g(h)의 관계

Chain Rule을 적용하면  $\dot{g}$ 는 다음과 같으며

$$\dot{g} = \frac{dg}{dt} = \frac{dg}{dh} \frac{dh}{dt} = g' \dot{h}$$

마찬가지로  $\dot{f} = f' \dot{s}$ ,  $\dot{k} = k' \dot{s}$ 이다. 이를 식(17)에 대입하면

$$g'(h)\dot{h} = [f'(s) + d k'(s)]\dot{s}$$

따라서

$$\dot{h} = \frac{[f'(s) + d k'(s)]}{g'(h)} v \dots\dots\dots (18)$$

로봇의 역학 및 경계조건을 고려한 CF 구간의 궤적계획 문제는 다음의 수행도 지표(Performance Index)를 최소화하는  $\dot{h}(h)$ 를 구하는 것이다.

$$J = \int_{h_0}^{h_f} \left[ \frac{\gamma}{\dot{h}(h)} + | \dot{h}(h) - \dot{h}(v) | \right] dh \dots\dots\dots (19)$$

식(19)에서  $\int_{h_0}^{h_f} \frac{1}{\dot{h}(h)} dh = \int_{v_0}^{v_f} \frac{dt}{dh} dh = \int_{v_0}^{v_f} dt$ 는

경로  $g(h)$ 의 주행시간을 의미하고,  $\int_{h_0}^{h_f} | \dot{h}(h) - \dot{h}(v) | dh$ 는 표준 분사속도에서의 편차(Deviation)를 의미하므로, 수행도 지표(19)는 시간의 최소화에 비중  $\gamma$ 를 부여하면서 스위핑 속도의 편차를 최소화하는 것이다(주:  $\dot{h}(h)$ 는 모수  $h$ 에서의 분사건의 속도이고  $\dot{h}(v)$ 는 스위핑 속도  $v$ 에 상응하는 분사건의 표준속도이다).

제약조건은 첫째, 분사건의 위치 및 자세가 로봇의 관절각 범위내에 있을 조건,

$$\theta(h) \in [\theta^-, \theta^+], \quad \forall h \in [h_0, h_f] \dots\dots\dots (20)$$

둘째, 관절각 속도 범위조건,

$$\dot{\theta}(h) \in [\dot{\theta}^-, \dot{\theta}^+], \quad \forall h \in [h_0, h_f] \dots\dots\dots (21)$$

셋째, 초기 및 말기의 분사속도를 표준속도로 고정하는 경계조건과,

$$\dot{h}(h_0) = \dot{h}(h_f) = \dot{h}(v) \dots\dots\dots (22)$$

넷째, 분사건의 동작이 토크범위내에 있기 위한 조건으로 구성된다.

$$\tau[\theta(h), \dot{\theta}(h), \ddot{\theta}(h)] \in [\tau^-, \tau^+], \quad \forall h \in [h_0, h_f] \dots\dots\dots (23)$$

식(23)의  $\tau$ 는 관절동작을 내기 위한 토크(Torque)량을 계산하는 역동역학식(Inverse dynamics)으로서, 보다 구체적인 표현은 다음과 같다.

$$\tau = I(\theta)\ddot{\theta} + \dot{\theta}^T C(\theta)\dot{\theta} + G(\theta) \dots\dots\dots (24)$$

Chain Rule을 사용한 결과,  $\dot{\theta} = \theta' \dot{h}$ ,  $\ddot{\theta} = \theta'' \dot{h}^2 + \theta' \ddot{h}$ 를 식(24)에 대입하여 관절  $j$ 에 걸리는 토크  $\tau_j$ 를 Einstein summation으로 나타내면

$$\tau_j = I_{jj} \theta'_j \dot{h} + [I_{jj} \theta''_j + C_{jk} \theta'_j \theta'_k] \dot{h}^2 + G_j \dots (25)$$

(여기서  $I_{jj}$ ,  $C_{jk}$ ,  $G_j$ 는 각각 관성행렬, Centrifugal / Coriolis 계수행렬, 중력벡터이다.) 이를 이용하여 토크범위 조건인  $\tau^- < \tau(h) < \tau^+$ 를  $\dot{h}(h, \dot{h})$ 의 범위로 변환시킬 수 있다. 즉, 조건(23)은 다음과 같이 된다.

$$L(h, \dot{h}) \leq \dot{h} \leq U(h, \dot{h}) \dots\dots\dots (26)$$

(여기서  $L, U$ 는 각각  $(h, \dot{h})$ 에서의 최소 및 최대 가속범위를 나타낸다.)

$\theta(s)$ 는 분사건경로  $g(h)$ 의 역기구학해(Inverse kinematics solution)로서, 관절각을  $h$ 의 함수로 나타낸 것이다. 식(20)은 엄밀히 말해서 속도계획에 직접 관련된 제약조건은 아니며, 단지 역기구학해를 푸는 과정에서 관절각의 범위내에 드는 해를 취하도록 명시하는 조건이다. 만약, 식(20)을 만족시키는 역기구학해가 존재하지 않는다면 속도계획을 수립할 의의가 없으며, 이 경우에는  $f(s)$  즉, 분사건의 표면경로를 재결정해야 한다. 그러므로, 여기서는 제약식(20)은 만족된다는 가정하에 무시하기로 한다.

식(19), (21)~(23)으로 정의되는 문제는 혼합형 수행도 지표를 갖는 최적 제어문제(Optimal Control Problem)로서 해석적인 해는 존재하지 않으며, 문제의 복잡성에 비추어 동적계획법(DP: Dynamic Programming)을 적용한다. 주기할 것은 수행도 지표(19)의  $\gamma$ 가  $\infty$ 에 접근함에 따라 최소 시간

궤적을 도출할 수 있고, 0에 접근함에 따라 표준 속도를 추적하는 궤적이 도출될 수 있기 때문에 보다 일반적인 포물레이션이다. 즉, 사용자는 페인팅 조건의 균질성과 사이클타임의 최소화라는 두가지 양면성을 최적화시키는 궤적을 얻을 수 있다.

5-1-2. DP 해법

5-1-1에서 우리는 궤적 결정문제를 경로  $g(h)$  상의 각 위치에서 속도, 즉  $\dot{h}(h)$ 를 결정하는 문제로 수식화 하였다. DP 방식을 이용하기 위해  $h-\dot{h}$  상면 (Phase plane)에  $A \times B$  그리드(Grid)를 썩워 이산화시키면(그림 12), 격자점  $q_{ij}$ ,  $i \in [1 : A]$ ,  $j \in [1 : B]$ 의  $h$ ,  $\dot{h}$ 의 값은 다음과 같다.

$$h_{ij} = (i-1)(h_f - h_0) / (A-1)$$

$$\dot{h}_{ij} = (j-1)\dot{h}^{max} / (B-1)$$

경계조건에 의해 시작점 S와 끝점 E의 모수값은 각각  $h_s=0$ ,  $\dot{h}_s=\dot{h}(v)$ ,  $h_E=h_f$ ,  $\dot{h}_E=\dot{h}(v)$ 이다.

$h$ 를 Stage 변수,  $\dot{h}$ 를 State 변수라 하면 DP 알고리즘은 S와 E를 잇는 최소 비용격자점을 찾는 것이다. DP 알고리즘은 Bellman[22] 외에도 많은 문헌에 수록되어 있기 때문에 여기서는 단지 격자점  $q_{ij}$ 와  $q_{i+1,k}$ 간의 연결비용  $C(q_{ij}, q_{i+1,k})$ 을 산정하는 방법만을 설명한다.

편의상  $q_{ij}$ ,  $q_{i+1,k}$ 의 모수값을  $[h_1, \dot{h}_1]$ ,  $[h_2, \dot{h}_2]$ 라 하면, 두 격자점을 잇는  $\dot{h}(h)$ 는 다음과 같으며

$$\dot{h}(h) = \frac{\dot{h}_2 - \dot{h}_1}{h_2 - h_1} (h - h_1) + \dot{h}_1, h \in [h_1, h_2] \dots\dots(27)$$

이를 다음식에 대입하면 이송시간 T를 구할 수 있다.

$$T = \int_{h_1}^{h_2} dt = \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{\dot{h}(h)} = \int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{\dot{h}(h)} dh \dots\dots(28)$$

여기서 관절각속도 범위조건과 토크조건만 만족 여부를 검사할 필요가 있다. 속도범위 조건은  $\dot{\theta}(h)$

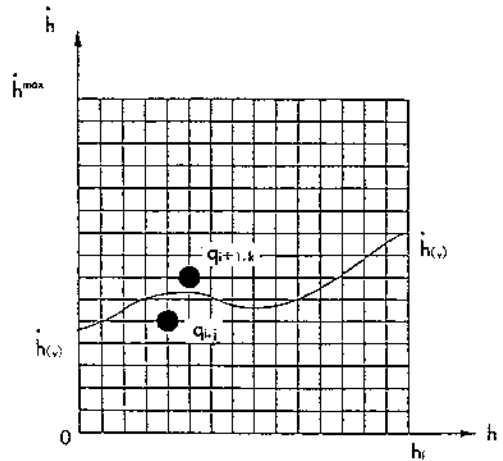


그림 12. h-h 상면의 이산화

$=\dot{\theta}(h)$   $\dot{h}$ 의 관계를 이용하여 식(21)에 대입하여 쉽게 체크되며, 토크범위 조건은 식(26)을 적용할 수 있으나 (L과 U의 계산량이 많으므로, 그리드 간격을 충분히 줄인다면 다음의 단순화된 방식을 적용할 수 있다. 즉, 두 격자점에서의 모수값  $\dot{h}$ ,  $\ddot{h}$ , 여기서  $\ddot{h} [h/T]$ 을 식(24)에 대입하여 토크범위에 포함되는가를 체크한다. 관절각속도 혹은 토크범위내에 들지 않는다는 것은 주어진 경로를 따를 수 없음을 의미하므로, 이 경우에는 두점간의 비용에 큰 값을 부여하여 두점의 연결을 방지한다.

범위내에 들면 스위핑 속도의 차이 D는 다음과 같으므로

$$D = \int_{h_1}^{h_2} |\dot{h}(h) - \dot{h}(v)| dh$$

두점간의 연결비용  $C = \gamma T + D$ 가 구해진다.

5-2. 자유이송 구간

5-2-1. 문제의 정의

자유이송 (FT) 구간에서 분사되는 페인트는 물체의 표면에 흡착되지 않는 구간으로서 페인트의 낭비를 막기 위해서는 이 구간에서는 페인트를

Shut-off 시키는 것이 바람직하다. 그러나 짧은시간 동안의 On-Off가 됨에 따라 페인트의 입자가 균일하지 않을 가능성이 존재하므로, 계속 On 상태를 유지시키면서 이송시간을 단축시키는 방식이 바람직하다.

FT 구간은 두 CF 구간의 사이에 존재하며 전 구간(CF<sub>i-1</sub>)의 끝점의 위치 및 속도가 초기조건이 되고, 다음 구간(CF<sub>i</sub>)의 초기점의 위치 및 속도가 종료조건이 되며 경로에 대한 제약은 없다. 이 구간의 궤적을 정의하는 궤적함수(Trajectory Function)를 관절 j의 시간 t에서의 각도를 시간의 3차 Polynomial이라 하면, 즉

$$\theta_j(t) = a_{3,j} t^3 + a_{2,j} t^2 + a_{1,j} t + a_{0,j}, \quad t \in [t_0, t_f] \quad (29)$$

FT 구간의 궤적문제는 윗식의 계수와 이송시간 T를 결정하는 문제로 귀착된다. FT의 수행도 지표는 CF 경우에서의 속도의 균일화는 의미가 없으며, 단지 이송시간의 최소화만을 추구한다. 즉,

$$J = \int_{t_0}^{t_f} dt \quad (30)$$

제약조건은 CF 문제와 비슷하나 여기서의  $\theta, \dot{\theta}$ 는 시간 t의 함수인 점과, 관절각 범위조건이 무시될 수 없다는 점이다. 네가지 제약조건은:

첫째, 관절각 범위조건;

$$\theta(t) \in [\theta^-, \theta^+], \quad \forall t \quad (31)$$

둘째, 관절각 속도범위 조건;

$$\dot{\theta}(t) \in [\dot{\theta}^-, \dot{\theta}^+], \quad \forall t \quad (32)$$

셋째, 토크 범위조건;

$$\tau(t) \in [\tau^-, \tau^+], \quad \forall t \quad (33)$$

넷째, 경계조건:

$$\theta(t_0) = \theta_0, \quad \theta(t_f) = \theta_f, \quad \dot{\theta}(t_0) = J^{-1}(\theta_0) \dot{h}(v), \quad \dot{\theta}(t_f) = J^{-1}(\theta_f) \dot{h}(v) \quad (34)$$

여기서 J<sup>-1</sup>은 역자코비안(Inverse Jacobian)을 의미한다.

### 5-2-2. 해 법

이 문제는 타임스케일링(Time Scaling) 방식[10, 23]을 이용하여 쉽게 구할 수 있다. 먼저  $t_0=0, t_f=1$ 로 놓고 경계조건 (34)를 이용하면 3차함수의 계수가 결정되며, 수치해석법으로 관절각 조건과 토크범위 조건을 만족하는 타임스케일(Time scale) 값을 취한다.

관절 j가 시간 t에서 각속도 범위로 인한 타임스케일값  $b_j^*(t)$ 는

$$b_j^*(t) = \Phi_j^{\sigma} / \dot{\theta}_j(t) \quad (35)$$

(여기서  $\sigma$ 는  $\dot{\theta}_j(t)$ 의 부호를 의미한다.)

토크범위로 인한 타임스케일값  $b_j^*(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$b_j^*(t) = [|\tau_j^{\sigma} - g_j(t)| / |\tau_j(t) - g_j(t)|]^{1/2} \quad (36)$$

여기서  $\sigma$ 는  $[\tau_j(t) - g_j(t)]$ 의 부호를 의미하며,  $\tau_j(t)$ 와  $g_j(t)$ 는 각각 시간 t에서의 j 관절에 걸리는 총 토크량과 중력으로 인한 토크량이다.

따라서, 시간 t에서의 타임스케일값  $b_j(t)$ 는 다음과 같고,

$$b_j(t) = \text{Min} \{b_j^*(t), b_j^*(t)\} \quad (37)$$

전체 시간 및 관절에 대한 타임스케일값은 다음과 같다.

$$b = \text{Min}_j b_j(t) \quad (38)$$

이와 같이 결정된 b를 이용하여 타임스케일링하면 최소시간 궤적함수의 계수 및 이송시간은 다음과 같다.

$$a_{i,j}^* = a_{i,j} b^i, \quad i \in [0 : 3] \quad (39)$$

$$t_f^* = 1/b \quad (40)$$

## 6. 결론 및 요약

본 연구에서는 페인팅 물체의 형상데이터로부터

페인팅 로봇의 궤적산출을 할 수 있는 일관 궤적계획법(ITP: Integrated Trajectory Planning)에 관한 이론연구 및 알고리즘을 개발하였다. ITP 방식은 새롭게 시도된 방식으로서 종래의 교시방식이나 유사한 방식에 비해 많은 장점을 가지며 동작계획의 자동화 및 최적화에 적합하다.

본 연구는 크게 형상의 표현에 관한 형상모델링, 분사조건을 설정하는 페인팅 역학, 분사건의 경로를 설정하는 경로계획 및 이물 로봇의 동작으로 변환시키는 로봇 궤적계획에 관한 연구로 요약된다. 일관 궤적계획 방식은 표면 형상데이터를 입력으로 받아 분사건의 진행방향, 구간분할, 구간경로를 결정하며, 이를 로봇의 궤적으로 변환하는 방식을 취한다. 분사건의 경로와 로봇의 궤적을 산출하는 과정에서는 코팅두께의 균질성과 페인팅 시간의 최소화가 추구된다.

본 연구에서 제시된 페인팅 로봇의 최적 궤적 계획 기법은 아직 미개척 분야인 이 분야의 연구에 이론적 기초를 제공할 것으로 판단되고, 또한 개발된 알고리즘은 컴퓨터에 심어 페인팅 로봇의 궤적계획을 위한 일관 패키지 시스템(ATPS: Automatic Trajectory Planning System)으로 개발될 수 있다. 공기분사 방식의 ATPS 시스템은 현재 개발중이며, 이는 향후에 연구될 정전도장 방식의 일관궤적계획 방식에 관한 연구와 더불어 페인팅 로봇의 오프라인 프로그래밍 시스템이 구현될 수 있을 것이다.

### 참고문헌

[1] Bublick, T., "Robot Applications in Finishing and Painting," *Handbook of Industrial Robotics*, John Wiley and Sons Inc., New York, 1985.  
 [2] Engelberger, J., "Spray Painting Applications: Robotics in Practice," *Management and Application of Industrial Robots*, American Management Association, 1984.

[3] Howie, P., "Graphic Simulation for Off-line Robot Programming," *Robotics Today*, pp.63-66, 1984.  
 [4] Paul, R.P., "Modeling Trajectory Calculation, and Servoing of a Computer Controlled Arm," *Stranford Univ. AI Lab Report*, AIM 177, 1972.  
 [5] Taylor, R.H., "Planning and Execution of Straight Line Manipulator Trajectories," *IBM J. Research and Development*, Vol. 23, No. 4, pp.424-436, 1979.  
 [6] Luh, J.Y.S., and Lin, C.S., "Optimum Path Planning for Mechanical Manipulators," *ASME J. Dynam. Syst., Measur., Contr.*; Vol. 102, pp.142-151, 1981.  
 [7] Brady, M. et al., *Robot Motion Planning and Control*, MIT Press, Cambridge, MA., pp. 221-243, 1983.  
 [8] Shin, K.G., and Mckay, N.D., "Minimum-Time Control of a Robotic Manipulator with Geometric Path Constraints," *IEEE Trans. on Automat. Contr.*, Vol. AC-20, pp.531-541, 1985.  
 [9] Suh, S.H., and Shin, K.G., "A Variational Dynamic Programming Approach to Robot-Path Planning With a Distance-Safety Criterion," *IEEE Trans, on Robot. and Automat.*, Vol. RA-4, No. 3, pp.334-349, 1988.  
 [10] Suh, S.H., and Bishop, A.B., "Collision-Avoidance Trajectory Planning Using Tube Concept: Analysis and Simulation," *J. of Robot. System.*, Volo. 5, No. 6, pp.497-525, 1988.  
 [11] Mason, M.T., "Automatic Planning of Fine Motions: Correctness and Comletness," *IEEE Proc. Robot. Automat.*, pp. 492-503, 1984.  
 [12] Erdmann, M., "Using Backprojections for Fine Motion Planning With Uncertainty," *Int'l J. Robot. Res.*, Vol. 5, No. 1, 1986.

- [13] Kazerooni, H. et al., "Robust Compliant Motion for Manipulators: Part I and II." *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. RA-2, No. 2, pp. 83-105, 1986.
- [14] Cook, G.E., "Robotic Arc Welding: Research in Sensory Feedback Control." *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. IE-30, No. 3, pp.252-268, 1983.
- [15] Clockson, W. et al., "An Implementation of Model-Based Visual Feedback for Robot Arc Welding of Thin Sheet Steel." *Int'l J. Robot. Res.*, Vol. 4, No. 1, pp.13-26, 1985.
- [16] Ando, S. et al., "Computer Controlled Industrial Robot for Painting," *CIRP Mfg. Tech.*, Vol. 35, pp.689-700, 1987.
- [17] Faux, I., and Pratt, M., *Computational Geometry for Design and Manufacture*, Ellis Horwood, 1985.
- [18] Mortenson, M., *Geometric Modeling*, John Wiley & Sons, 1985.
- [19] Lambourn, R., *Paint and Surface Coatings: Theory and Practice*, John Wiley & Sons, 1987.
- [20] Private Communications with Technical Staff of Mando Machinery Ltd., Anyang, Korea (1989).
- [21] Bobrow, J.E., *Optimal Control of Robotic Manipulators*, Ph. D. Diss., UCLA, 1982.
- [22] Bellman, R., *Dynamic Programming*, Princeton Univ. Press, Princeton, NJ, 1957.
- [23] Hollerback, J.M., "Dynamic Scalling of Manipulator Trajectories," *ASME J. Dynam. Syst. Measur. Contr.*, Vol. 106, pp.102-106, 1984.