

# 통합 로봇틱페인팅 시스템 개발에 관한 연구

서 석환, 이 성권, 이 정재, 최 용중

포항공과대학 산업공학과  
포항시 우체국사서함 125  
790-600

산업과학기술연구소 기계연구분야  
포항시 우체국사서함  
790-330

## Progress on the Development of An Integrated Robotic Painting System

S. H. Suh, S. K. Lee, J. J. Lee, Y. J. Choi

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

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

### 요약

페인팅작업에의 로봇트응용은 열악환경의 극복, 자동화, 품질의 향상수단으로서 강력한 대안책이며 이에 관한 관심이 국내외에 고조되고 있다. 본 논문에서는 이전에 제시한 바있는 자동동작계획의 개념을 확장하여 통합페인팅시스템을 위한 Extended ATPS(Automatic Trajectory Planning System)를 개발하고, 이의 구현 및 검증용 위한 하드웨어 시스템의 개발현황을 소개한다. 개발될 시스템은 하드웨어 및 소프트웨어가 일식화된 로봇틱페인팅 시스템으로서 동작계획의 자동화 뿐만아니라 측정 및 제어기능을 소프트웨어에서 일관처리 하는 새로운 방식이다.

### 1. 서론

열악한 환경의 극복을 위하여 페인팅작업에 로봇트를 응용하고자 하는 시도가 국내외에서 활발하게 추진되고 있다. 이에 즈음하여 국내의 로봇트 생산업체 뿐만아니라 자동차를 포함하여 도장라인이 요구되는 많은 산업현장의 관심이 고조되고 있다. 본 연구는 페인팅로봇트를 운용함에 있어 필수적으로 이루어져야할 로봇트의 동작계획 및 제어기법에 관한다.

현재의 동작계획방식은 소위 리드스투(lead through)방식에 의한 교시방식을 사용하고 있으나, 여기에는 많은 문제점이 존재한다. 즉, 로봇트를 동작계획시에 직접 사용해야 하기 때문에 down time이 불가피하며, 교시동작의 수준이 기껏해야 사람의 스킬(skill)에 머물기 때문에 복잡형상의 균질코팅에 난점이 있다. 이러한 문제점을 해소하기 위해서 본 연구팀에서는 컴퓨터에서 로봇트의 동작을 계획하고 검증할 수 있는 자동궤적계획 시스템(ATPS: Automatic Trajectory

Planning System)을 개발한 바 있다 [1]. 개발된 시스템의 유효성 및 효율성은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 입증되었으나, 보다 정확한 검증을 위해서는 실제의 실험을 통하여 이루어져야 한다.

실제검증은 종래의 오프라인 로봇트 프로그래밍방식이 갖는 문제점으로서 시뮬레이션 결과와 실제와의 차이점을 극복 및 보정하기 위한 방편이며, 이를 위해서는 하드웨어와 소프트웨어의 일식화가 필수적이다. 주지할 것은 오프라인 로봇트 프로그래밍 방식은 NC의 CAD/CAM 과 동일한 목적을 추구하고자 하는 것이나, NC 기계와는 달리 로봇트의 kinematics 및 dynamics가 훨씬 복잡하기 때문에 시뮬레이션 결과가 실제와 많은 차이가 존재한다. 따라서 현장에서는 오프라인 로봇트 프로그래밍의 무용론 까지 대두되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 이러한 소프트웨어와 하드웨어의 유리에서 파생되는 문제점을 해결하고, 자동궤적계획방식의 유효성을 입증하기 위해 하드웨어가 일체된 시스템을 개발하여 통합로봇틱 페인팅시스템(IRPS: Integrated Robotic Painting System)을 구축하고자 한다. 본 논문은 통합로봇틱시스템의 개념과 이를 구현하는 동작계획시스템, 동작제어시스템, 로봇트매니플레이터 및 주변시스템의 기능 및 개발현황을 소개한다. 2절에서는 통합시스템의 전체적인 개념 및 구조를 기술하고, 3절에서는 동작계획시스템의 구조 및 기능을 설명하며, 4장에서는 하드웨어 개발현황을 소개하며, 본 논문은 5절의 결론 및 향후과제로 맺는다.

### 2. 통합로봇틱 페인팅 시스템의 구조

로봇트를 이용한 페인팅작업은 크게 동작계획 및 동작제어로 구분된다. 동작계획이란 로봇트가 피도물의 원하는 부위를 코팅하기 위하여 따라가야 할 스프레이건의 경로를 지

정하는 것이며, 지정된 경로는 로봇제어기에 입력되고 플레이백 (playback)의 형태로 재현된다. 동작계획의 자동화한 컴퓨터에서 동작계획을 실현하는 오프라인 프로그래밍의 형태를 취한다. 그러나 페인팅작업의 경우에는 다른 작업과는 달리 피도물의 기하학적 형상과 페인팅역학에 직접적인 영향을 받기 때문에 여타의 오프라인 프로그래밍 방식과는 많은 차이가 있다. 따라서, 페인팅작업을 위한 오프라인 프로그래밍의 핵심은 이들을 효율적으로 처리할 수 있도록 설계되어야 한다. 따라서, 다음 세가지 사항이 고려되어야 한다.

첫째, 로봇의 동작은 복잡성이 연루되기 때문에 가능한 사용자의 입력을 최소화하고 컴퓨터에서 자동처리하는 방식이 좋다. 페인팅작업을 위한 상용의 오프라인 프로그래밍 시스템은 최근에 개발된 ROBCAD [2]를 제외하고는 전무한 상태이다. ROBCAD는 기본적으로 로봇 및 피도물을 컴퓨터에 옮겨놓고 경로를 교시하는, 즉 오프라인 교시방식을 취한다. 반면에, 통합페인팅 시스템은 기본적으로 사용자의 입력은 피도물의 형상과 페인팅부위를 나타내는 CAD 데이터와 페인팅조건치를 필요로 하며, 나머지의 기능은 컴퓨터에서 자동 생성하는 자동화 방식이 추구되어야 한다.

둘째, 오프라인 프로그래밍방식의 효율성을 제고하기 위해서는 실제모델과의 차이를 가능한 줄일 수 있는 장치가 필요하다. 이는 현장에서 흔히 발생하는 문제점, 즉 컴퓨터에서는 잘되는 것이 실제의 로봇에서는 잘안되는 문제점을 해소하고자 하는 것이다. 컴퓨터모델과 실제모델과의 차이는 로봇모델링 (kinematics, dynamics) 에러와 페인팅작업에 관련된 페인팅역학 모델링 에러에 기인한다. 페인팅역학은 관련변수가 복잡하게 구성되며 실제의 조건에서 도출되는 실험식에 의존해야 하는 문제가 있다. 예컨대, 분사단면의 두께분포는 토출량, 분사각, 분사거리등의 모델링이 가능한 변수와 페인트의 점도, 온도, 분사압력과 같이 수식화가 어려운 조건들이 존재한다. 따라서 오프라인 프로그래밍 시스템은 이들의 실험식을 수용할 수 있도록 설계되어야 한다.

셋째, 모델링에러는 형상모델링 및 피도물 셋업에도 기인한다. 즉, 컴퓨터에 수식으로 표현된 피도물의 형상과 실제의 형상이 차이가 존재하는 경우, 혹은 피도물의 놓여진 위치에서 차이가 나는 경우 컴퓨터 결과는 실제에 재현될 수 없게 된다. 따라서 이들을 처리할 수 있는 측정시스템이 필요하다. 측정시스템은 물체가 놓여진 상태에서 측정장치를 통해 들어온 좌표값을 이용하여 피도물의 형상을 도출하고 이에 의해 로봇의 궤적계획이 이루어 지도록 하는 방식이 바람직하다.

처음 두가지 고려사항은 자동동작계획 시스템에서 처리되어야 할 요건이고 셋째의 요건을 구현하기 위해서는 측정시스템과 자동동작계획 시스템과의 인터페이스가 필요하다. 이외에도 로봇적 페인팅 시스템이 갖추어야 할 기본적인 구성요소로서 로봇컨트롤러, 매니플레이터, 파워유닛, 페인트조달장치가 있으며, 이들과 더불어 통합페인팅시스템이 구현된다. 이상의 개념에 입각하여 본 연구팀에서 프로토타입으로 개발되고 있는 통합 페인팅시스템은 동작계획시스템, 로봇제어 시스템, 페인트조달장치 및 곡면측정장치로 구성된다 (그림 1).

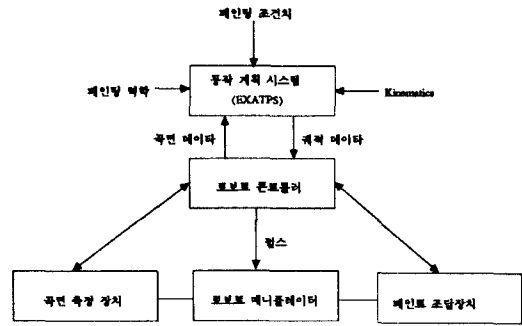


그림 1. 통합 페인팅 시스템의 구조

### 3. 동작계획시스템 (Extended-ATPS)

동작계획시스템은 PC에 C언어로 구현된 소프트웨어 시스템으로서 피도물의 형상과 페인팅역학에 의해 로봇의 최적 궤적을 산출하는 일관패키지 시스템으로서 형상의 입력모듈, 분사건의 경로산출모듈, 로봇의 궤적산출모듈, 피막두께의 분석모듈 및 시뮬레이션 모듈로 구성된다 (그림 2). 사용자는 이 시스템을 이용하여 컴퓨터상에서 로봇의 최적동작을 계획 및 검증중을 하며, 계획된 로봇동작은 궤적데이터의 형태로 로봇제어기에 전달된다. 이하에서는 각모듈별 기능을 간략히 기술하며 페인팅역학에 관한 내용은 참고문헌 [1]에 수록되어 있다.

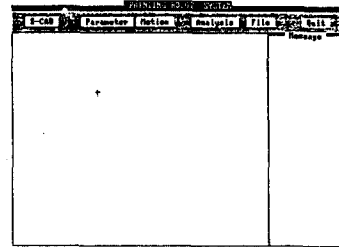


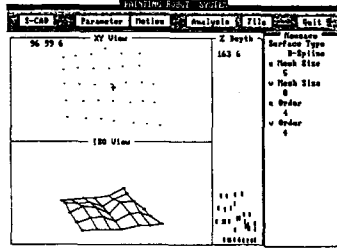
그림 2. 동작계획 시스템의 초기화면

#### 3.1 형상정의

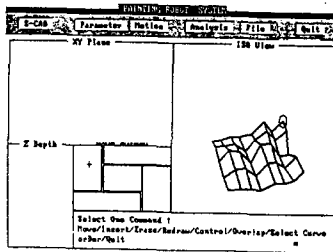
피도물의 형상을 정의하는 모듈로서, 여기에는 크게 세가지 방식이 있다: 가) 다른 CAD 시스템에서 정의된 CAD 데이터를 취하는 형태와, 나) Extended-ATPS 자체의 CAD 모듈을 이용하는 방식, 다) 곡면측정장치로써 읽어들이는 좌표값을 보간하는 방식이다. 첫째방식은 전문 CAD 시스템과 Extended-ATPS의 인터페이스에 관련되며 IGES 포맷(format) 변환자를 필요로 한다. 자체의 CAD 모듈을 이용하는 경우는 사용자가 형상을 대화형으로 설계하는 방식과 곡면데이터를 측정장치에서 받아 보간하는 자동설계방식이다.

형상정의는 그림 2의 S-CAD 모듈에서 수행된다. 3차원 곡면은 단위곡면의 합성으로 이루어지며, 각 단위곡면은 Coons/Ferguson, Bezier, B-Spline, Multi-curve, Sweep 방식으로 표현된다. 사용자는 각단위곡면의 제어점 (control

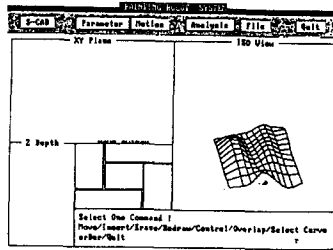
point)을 마우스를 이용하여 입력 및 수정하며, 사용자로 하여금 shape control의 용의성을 부여하기 위하여, 설계 및 수정곡면을 즉각적으로 도시하도록 설계되어 있다. 그림 3은 B-spline 곡면의 설계 (그림 3(a)) 및 수정 (3(b)) 과정과, 형성된 곡면 (3(c))을 각각 도시하고 있다.



(a). 설계 화면



(b). 수정 화면



(c). 형성된 곡면

그림 3. 형상정의 모듈의 예

자동설계방식은 곡면측정장치에서 얻어진 점데이터를 보 간하여 형상이 정의된다. 곡면측정장치에는 touch probe가 이용되며 (4절 참조), 측정 모드에 들어가면 로봇의 엔드이펙터에 프로브가 장착되어, x,y 방향으로 로봇이 움직임에 따라 z값을 검출하여 형상 정의의 모듈로 들어오게 되고, 이 좌표점들을 보간함으로써 곡면방정식이 도출되도록 한다. 이 방식은 전술한 오프라인프로그래밍의 문제점을 해소하기 위한 시도로서 피도물이 놓여진 상태에서 곡면식이 도출되며, 이에 의해 로봇의 동작이 산출되도록 함으로써, 피도물의 셋업위치 및 곡면표현의 차이를 제거하기 위함이다.

### 3.2 페인팅조건치 설정

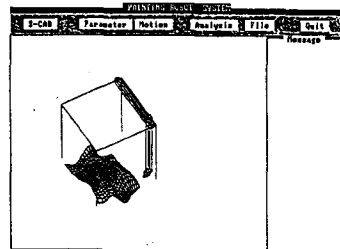
이 모듈은 그림 2의 PARAMETER에서 수행되며, 사용자는 여기에서 페인팅조건을 입력한다. 페인팅조건은 페인팅물체 및 페인팅부위의 선정, 원하는 코팅두께 및 허용오차, 분사거리, 분사각도, 페인트출출, 중복계수, 반복회수, 진행패턴이며, 이들은 이후의 분사건의 경로 및 로봇트래젝트의 산출과정에서 피막두께의 균질화 및 페인팅시간의 최소화를 기하기 위한 조건치이다.

### 3.3 분사건경로 및 로봇트래젝 산출

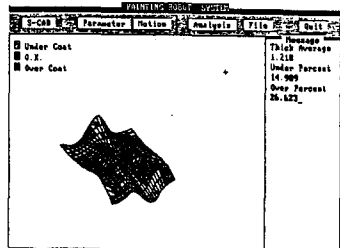
분사건의 경로는 곡면을 유한개의 단위셀 (unit cell)로 분할하여 중복계수, 진행패턴을 감안하여 분사건의 중심경로를 구하고 이를 법선방향으로 분사거리 만큼 옮겼시킴으로서 분사건의 경로가 산출된다. 분사건의 자세는 분사영역내의 셀의 법선벡터를 평균한 합성벡터와 일치시킴으로서 얻어진다. 로봇트의 궤적은 분사건의 경로를 표면스위핑속도로 (페인팅역학과 페인팅조건치에 의해 계산됨) 따라 가도록 시간 정보를 부여함으로써 결정된다.

### 3.4 두께분석 및 시뮬레이션

산출된 로봇트의 동작은 그림 2의 MOTION 모듈에서 수행되며, 이를 통하여 로봇트작을 컴퓨터상에서 검증한다. 또한 산출된 동작은 페인팅조건치와 결부하여 실제곡면에 도착된 코팅두께로서 분석된다. 여기에서는 코팅두께가 허용치에 들어오는 비율, under/over coating 되는 부위를 컬러로서 도시하며 사용자는 이에 의해 조건치를 재설정하여 동작산출과정을 반복할 지의 여부를 결정하게 된다. 그림 4(a)-(b)는 동작의 시뮬레이션 및 분석화면을 각각 보인다.



(a). 동작의 시뮬레이션



(b). 코팅두께의 분석

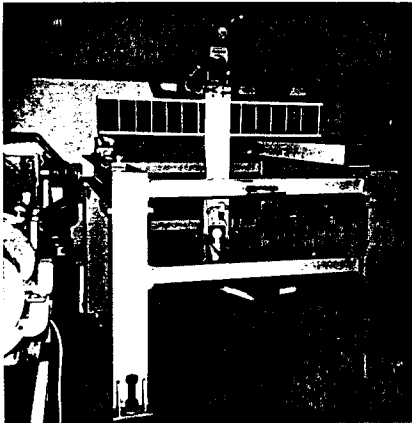
그림 4. 시뮬레이션 및 분석

#### 4. 하드웨어 시스템

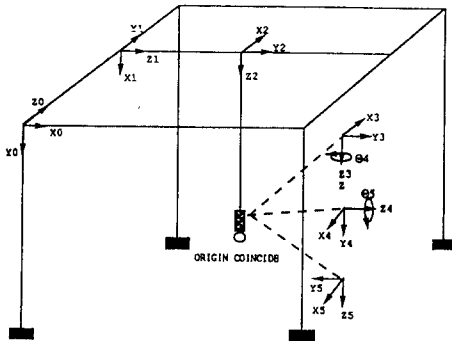
하드웨어시스템은 동작계획시스템에서 산출된 로봇트래젝을 수행하여 피도물에 분사 시키는 메카니즘으로서, 여기에는 시스템컨트롤러, 매니플레이터, 구동장치로 구성되는 로봇시스템과, 페인트조달장치 및 곡면측정장치의 주변시스템으로 구성된다.

##### 4.1 매니플레이터 및 구동장치

매니플레이터는 분사건을 이송하는 장치로서, 페인팅으로는 다관절형태의 길고가는 멤버를 갖도록 설계된다. 그러나 페인트전용로봇이 고가인점과 본 연구에서 제시하는 통합기능을 갖도록 하기 위해서는 기존시스템을 사용할 수 없는점으로 자체제작을 시도하였다. 제작된 매니플레이터는 비교적 기구학적으로 설계가 용이한 5축 gantry 타입을 택하였으며, 따라서 곡면측정장치를 장착하여 좌표측정기로도 활용 가능하다. 그림 5(a)-(b)는 각각 매니플레이터의 외관 및 관절좌표계를 도시하고 표 1은 link parameter를 나타낸다. (스프레이건은 엔드이펙트에 장착되며 이는 그림에 빠져있다.)



(a). 매니플레이터



(b). 관절좌표계

그림 5. 매니플레이터 및 좌표계

JOINT 1	$\theta_i$	$d_i$	$\alpha_i$	$a_i$	RANGE
1	90	$d_1^*$	90	0	[0, 800mm]
2	90	$d_2^*$	90	0	[0, 800mm]
3	0	$d_3^*$	0	0	[0, 500mm]
4	$\theta_4^*$	0	90	0	[0, 180°]
5	$\theta_5^*$	0	-90	0	[-90°, 90°]

주 : \*는 변수임

표 1. 링크 파라미터(Link Parameter)

사용된 모터는 스텝각이 0.72도인 5상 스텝모터이고, 직교3축의 sliding joint는 ball screw로서 각 축의 위치정도 및 반복도는 각각 0.05 mm/300mm, 0.05 mm이고, ball screw의 backlash는 0.1 mm 이다.

##### 4.2 시스템컨트롤러

시스템컨트롤러는 매니플레이터의 동작을 제어하는 기능과 곡면측정장치 및 페인트조달장치의 coordination을 담당한다. 매니플레이터의 동작은 동작계획시스템에서 생성된 로봇트의 궤적을 펄스(pulse) 시그널로 변환하여 위치 및 속도를 제어함으로써 이루어진다. 시스템컨트롤러는 동작계획시스템이 implement 되어 있는 동일한 PC에서 이루어지며, 시스템제어를 위해 별도의 컨트롤 보드(control board)를 제작하였다. 컨트롤보드(그림 6의 schematic block diagram 참조)는 pulse generator, interrupt handler, 프로브인터페이스, 페인트노즐인터페이스로 구성된다. 컨트롤 및 인터페이스 알고리즘은 소프트웨어(C 언어)로 프로그래밍되기 때문에 다양성을 추구할 수 있다.

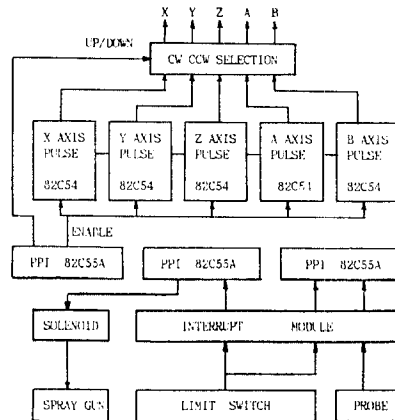


그림 6. 시스템 컨트롤러 구성도

#### 4.3 곡면측정장치

곡면측정은 초기에 피도물이 안착된 상태에서 일련의 점좌표를 추출하여 곡면모델링이 주 목적이나, 필요에 따라 페인팅작업후에 (건조된 상태) 두께측정기를 장착하여 페인팅 균질성을 검증하는 데에도 사용할 수 있다. 곡면의 점좌표측정은 매니플레이터가 XY 평면을 이동하면서 각점에서 프로브가 곡면에 접촉할 때의 Z 값을 읽는 방식으로 이루어진다.

#### 4.4 페인트조달장치

페인트조달장치는 (공기분사식) 페인트탱크, 컴프레서 (compressor), 압축공기라인 및 자동건으로 구성되며 (그림 7) PC의 콘트롤보드에 인터페이스되는 솔레노이드 (solenoid)에 의해 압축공기라인의 개폐를 조절함으로써 페인트의 흐름을 제어한다. 곡면측정장치와 페인트조달장치는 아직 implement 안된 상태이다.

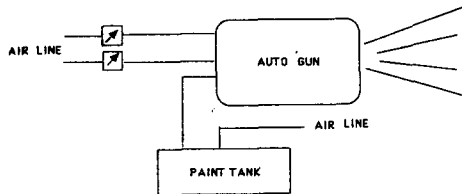


그림 7. 페인트 조달장치

#### 5. 결론 및 요약

본 논문에서는 페인팅로봇의 동작계획의 자동화 및 측정기능을 갖는 통합 로봇틱페인팅 시스템의 개념을 제시하였으며, 이의 구현을 위한 소프트웨어 및 하드웨어의 개발현황을 기술하였다. 개발될 시스템은 소프트웨어 및 하드웨어가 일식화된 시스템으로서 PC에서 동작계획에서 제어 및 측정에 이르는 전 기능을 소프트웨어로 처리할 수 있기 때문에 필요에 따라 다양한 동작의 구현 및 추가가 가능하다. 특히, 측정시스템을 자동동작계획 시스템에 인터페이스 시킴으로써, 오프라인 프로그래밍 시스템이 갖는 문제점을 해소할 수 있다. 비록 프로토타입이지만, 이의 개발로 동작계획의 자동화 및 효율성 검증과 나아가서는 CAD/CAM/Control/Measurement가 integrate된 통합로봇틱 페인팅시스템의 설계기술로 활용될 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- [1] S.H. Suh, I.K. Woo, and S.K. Noh, "Automatic Trajectory Planning System (ATPS) for Spray Painting Robots," J. Manufacturing Systems, vol. 10, no. 5, 1991.
- [2] W. D. Long, "Off-line Programming Reaches the Paint Spray Booth," in ROBCAD-PAINTMASTER System Brochure, Technomatix, 1991.