

비전 센서와 TSK형 퍼지를 이용한 디버링 공정의 자동화

신상운*, 갈축석**, 강근택***, 안두성****

Automation of Deburring Process Using Vision Sensor and TSK Fuzzy Model

Shang-Woon Shin*, Choog-Seug Gal**, Geun-Taek Kang***, Doo-Sung Ahn****

ABSTRACT

In this paper, we present a new approach for the automation of deburring process. An algorithm for teaching skills of a human expert to a robot manipulator is developed. This approach makes use of TSK fuzzy model that can express a highly nonlinear functional relation with small number of rules. Burr features such as height, width, area, grinding area are extracted from image processing by use of the vision system. Grinding depth, repetitive number and normal grinding force are chosen as control signals representing actions of the human expert. It is verified that our proposed fuzzy model can accurately express the skills of human experts for the deburring process.

Key Words : Deburring(디버링), Automation(자동화), Vision system(비전시스템), TSK fuzzy model(TSK형 퍼지모델), Human expert's skills(인간 숙련자 기술)

1. 서론

제품생산의 최종 단계인 마무리 처리 능력은 생산품의 질에 직접적인 영향을 끼치고 있다. 따라서 마무리 작업 단계로써의 디버링공정의 중요성은 매우 높다. 또한 디버링 작업은 소음, 진동, 분진등을 동반하는 열악한 작업환경에서 이루어지기 때문에 디버링 공정 자동화의 필요성은 높지만 실제 산업현장에서의 자동화율은 매우 낮은 실정이다. 최근 제어기술의 발전으로 로봇기능이 고지능화

됨에 따라 유연성과 다양성을 가진 로봇을 이용하여 디버링 공정을 자동화시키려는 연구가 많이 발표되고 있으나, 그 적용은 매우 제한적이다.⁽¹⁾

현장에서 숙련작업자들은 자신의 경험과 능력으로 공정상 문제점에 유연하게 잘 대처할 수 있으나, 로봇은 그렇지 못하다. 그 이유는 디버링 로봇 응용 분야에서는 인간 숙련가의 오감기능을 대신할 수 있는 지능센서 사용이 어렵고, 그리고 각종 센서 신호처리시간 지연, 가공반력과 복잡한 버의 형상간의 데이터 변환이 명확하지 않고, 또

* 부산공업대학교 기계공학과
 ** 부산수산대학교 기계공학과 대학원
 *** 부산수산대학교 전자공학과
 **** 부산수산대학교 기계공학과

한 공작물의 위치오차, 신뢰성이 낮은 신호처리 알고리즘 등과 같은 많은 문제점을 가지고 있기 때문이다. 그러나 현장에서 오랜기간동안 이 작업들을 수행하여 경험한 숙련자들은 이런 작업을 능률적으로 교묘하게 공구를 조정하며 작업을 실행한다. 숙련자들의 작업수행은 다양한 감각적인 정보를 통하여 작업 공정을 인지하고 공정상태에 따라 숙달된 방식으로 공구를 적용시킨다. 과거에 습득한 경험으로부터 인간 숙련자들은 공정상태와 공구 움직임 간의 관계를 운영하는 복잡한 제어기능들을 습득하고 있는 것이다. 로봇 매니퓰레이터(Robot Manipulator)에 이러한 숙련자의 기술들을 습득케하여 숙련자와 같은 행위로 로봇이 디버링 작업을 수행할 수 있도록 하기 위한 연구들이 행해지고 있다.⁽²⁾ 인간 숙련기술을 찾고 제어계획을 배우는 방법으로 숙련자의 작업수행 중 각종 센서 신호들로부터 특징값을 얻으면서 작업자와 인터뷰를 통해 공정상태를 파악한 후 작업자의 시연(Demonstration)으로부터 제어명령을 찾아내는 방법이 소개되었다.^(3,4) 최근에는 레이저 변위 센서(Laser Displacement Sensor)로 버 높이를 측정하여 숙련자 시범 중 이송속도를 뉴럴네트(Neural Net)로 학습한 방법을 제안하였다. 이런 연구들은 임의의 버 형상 측정에서 버의 수직 높이 크기를 인지할 수 있는 능력만 시도할 뿐 많은 버특성들을 고려하지 않고 있다.⁽⁵⁾ 또한 디버링의 한 방법으로 Whitney는 용접 비이드의 크기를 측정하기 위해 비전장치를 사용하였고 측정된 용접 비이드를 제거하는 중에 필요한 동력을 계산하기 위해 준 정적 모델(Quasi-static model)을 사용한 연마장치를 개발하였지만 과도한 연삭력이 주어져 열 균열이 발생하고 공구 마모가 크게 일어나고 있다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 디버링 작업에 관한 인간의 시각인식 기능과 숙련자의 제어 행동과의 관계를 모델링하는 새로운 방법을 개발하고자 한다. 인간의 시각인식은 공정상태를 이해하는데 필수적인 요소이며 인간은 시각정보만으로도 경험된 행위를 판단, 수행할 수 있음을 이용한다. 즉 비전 센서를 통해 처리되는 정보로서 구성되는 입력공간과 그에 대응하는 숙련자의 제어 행동으로써 구성되는 출력공간과의 상관관계를 도출하는 것이 본 논문의 목적이다.

2. 디버링 공정의 자동화

현장에서의 디버링 작업은 주로 핸드 그라인더를 사용

하여 수작업을 하고 있다. 숙련자는 우선 시각적으로 버의 위치를 찾아 버의 크기를 파악하고, 공구를 버에 대고 일단 한번 그라인딩을 시도하는 동안 연삭력과 연삭량을 인지하여 버의 특성을 파악한 다음, 잔여버에 대한 버연삭 이송속도, 공구를 쥐는 힘을 조절하면서 연삭깊이에 따른 연삭량을 음향과 연삭 불꽃강도를 확인하면서 제거 완료시간을 결정하게 된다.

버의 높이, 두께와 크기는 상당히 다양하며, 이러한 버들은 그라인더공구를 간단히 한번 움직여서 버를 완전히 제거할 수 없으며 공구를 전,후로 반복하여 움직여서 제거시킬 수 있다. 또한 그라인딩 휠의 손상을 최소화 하기 위하여 각 버들의 높이와 두께와 같은 공정상태에 따라 좌우되는 공구 취부 컴플라이언스(Compliance)와 연삭깊이를 조정하는 것이 필수적이다. 또한 디버링 작업은 고수준의 손기능을 요구하는 작업중의 하나이므로, 숙련자가 디버링 작업시 작업 공정상태를 감시하고 공정상태에 반응되는 경험한 제어행동을 동시에 일어나게 한다. 오랜 경험으로부터 숙련자는 보고, 듣고, 접촉의 감각을 통하여 공정상태를 이해하면서 무의식적으로 제어 행동을 한다. 즉, 숙련자는 감각 정보의 패턴(Pattern)해석 기능들을 습득하였고, 그리고 습득하여 경험된 운동명령들을 그의 손으로 자유자재로 움직일 수 있는 기능을 가지고 있다. 이것은 숙련자의 감각 정보를 확실한 운동명령들과 서로 연관시키는 복잡한 제어법을 배운 것이다. 본 연구에서는 식(1)의 형태로 숙련자의 디버링 작업 기술을 나타낸다.

$$IF(\text{입력신호} = \text{공정상태}) \text{ THEN}(\text{출력신호} = \text{제어행동}) \quad (1)$$

2.1 비전처리

본 연구에서는 비전보드 FARA MVB-02를 사용하여 디버링공정의 입력변수로서 버의 특성을 인식하였다. 디버링 작업을 수행하기 위한 실험장치에서 MVB-02는 호스트 PC에 버의 특성을 조사하여 데이터를 전달하고 이러한 입력데이터를 이용하여 출력을 8096에서 PWM출력으로 모터를 구동하게 된다. PC와 8096간의 통신은 표준RS-232C를 사용하였다. 물론 MVB-02는 호스트 PC에 온 보드형태이므로 그 데이터는 Data File이나 배열로 버의 특성이 전달된다. Fig.1은 PC, X-Y Table 그리고 MVB-02의 전체 인터페이스관계를 말해준다.

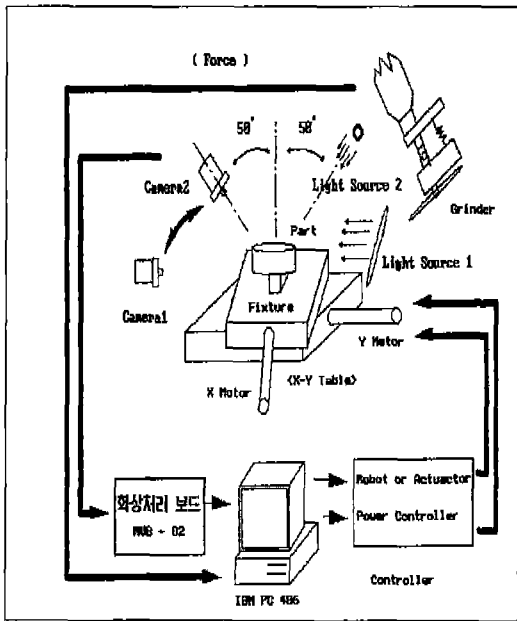


Fig.1 Flow Chart of Motor Control

2.1.1 조명장치의 설계

조명장치는 비전처리 알고리즘을 변화시킬 만큼 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서 디버링 공정의 모델링을 위한 버의 특성을 얻는 입력변수로 버의 높이, 폭, 높이면적과 버의 두께 면적을 구하기 위해 조명장치를 별도로 제작·설치 하였다. 물론 디버링 공정의 자동화를 위해서 이진화의 임계값을 일정한 값으로 셋팅하기 위한 조명장치를 설계하였다. 먼저 버의 높이, 폭, 높이 면적을 구하기 위해 카메라와 측정할 물체와 조명을 일직선상에 배열하여 화상을 포착하는 후광조명을 사용하였고, 버의 두께 면적 즉 버의 높이에서 기준을 설정한 다음 한번 연삭한 후의 연삭면은 조명장치에서의 입사각과 카메라에서의 반사각이 동일하면 빛의 경면반사가 발생한다는 성질에 의해 얻을 수 있다. 우선 후광조명을 사용하여 얻어지는 버의 특성들을 하나의 버를 기준으로 모델링하면 한개의 버에서 밀면을 기준으로 수직으로 최고 높은 버의 위치까지의 거리를 버의 높이라 하고, 좌측에서 우측까지 버의 길이를 버의 폭이라 하고, 버의 전체면적을 버의 높이면적이라 정의한다. 그리고 버의 두께면적으로는 카메라를 시편을 중심으로 수평방향에서 수직방향으로 40° 이동시키고 조명장치도 수평에서 수직방향으로 40° 이동시켜 화

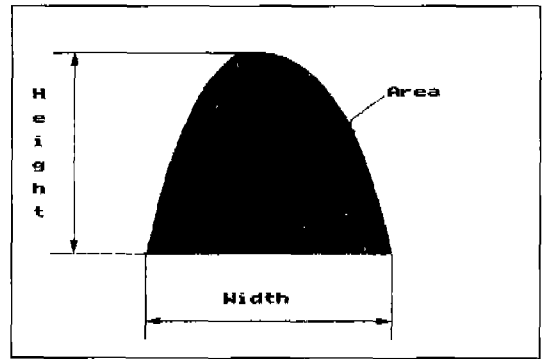


Fig.2 Profile of Burr Height, Width, Area

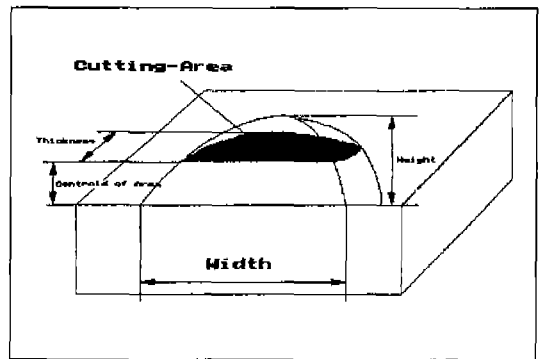


Fig.3 Profile of Burr Grinding Area

상을 포착하면 경면반사성분에 의해 화상의 두께면적을 잘 얻을 수 있다. Fig.2는 후광조명으로 부터 얻어지는 버의 특성들을 모델링한 것을 나타내고 Fig.3은 경면반사성분을 이용하여 얻어지는 버의 두께면적을 보여준다.

2.1.2 비전처리 알고리즘

디버링 공정에서의 버 특성을 얻는 비전처리의 과정을 보면 우선 화상을 포착한다. 종래의 경우 포착된 화상은 농담값을 가지고 있어 일정한 값을 기준으로 이진화를 실시하였다. 그러나 본 논문에서는 MVB-02에서 지원하는 LUT (Look Up Table)을 사용하여 실시간에 이진화처리를 행한다. 이진화처리된 화상에서 카메라와 시편은 위치셋팅되어 있으므로 일정한 관심영역 이하는 모두 무시하여 라벨링을 행한다. 한개의 시편에서는 보통 5-8개의 버가 존재하는데 가장 면적이 큰 버 순으로 정렬하여 순번을 매기고 각각 버의 위치값이 저장된다. Fig.4는 화상

처리 알고리즘의 흐름도를 나타내고 Fig.5는 후광조명을 사용한 비의 원화상을 나타낸 것이고, Fig.7은 실시간으로 화상이 이진화 처리되어 즉 LUT를 사용한 화상을 나타낸다. Fig.9는 이진화 처리된 화상에서 처리하고자 하는 영역을 설정하고 라벨링을 실행하고 비의 특성들을 파악한 즉 화상처리를 끝낸화상을 보여주고 있다. Fig.6은 카메라를 시편과 수평에서 수직으로 40° 방향으로 올려 한번 연삭후의 두께면적을 나타내는 원화상을 나타낸 것이고, Fig.8·10은 비의 높이, 폭 높이면적과 같은 방식으로 화상처리를 실행한 것을 보여준다. 물론 화상에서의 비의 특성값들은 실제 길이에 대한 스케일링(Scaling)값을 곱한 후 구해진 값이다.

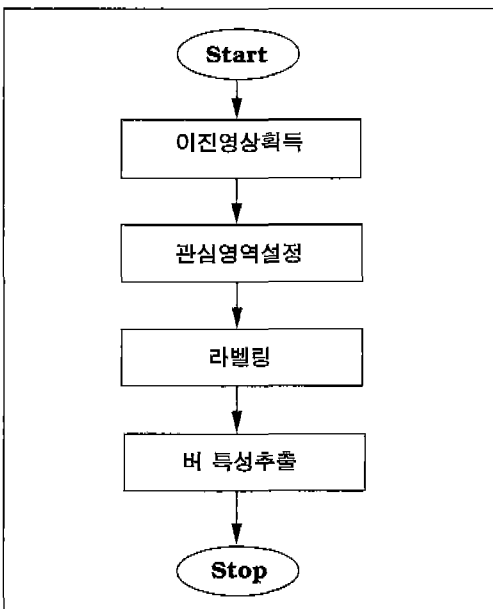


Fig. 4 Procedure of Image Processing

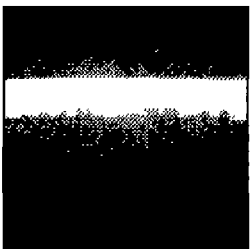


Fig. 5 Picture of Original Image1

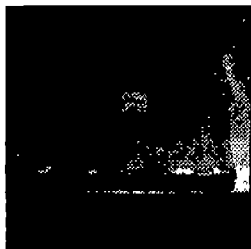


Fig. 6 Picture of Original Image2

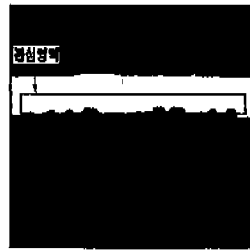


Fig. 7 Picture of Image1 with LUT

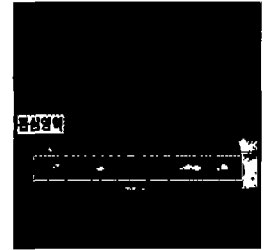


Fig. 8 Picture of Image2 With LUT

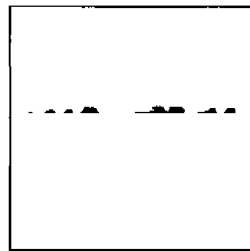


Fig. 9 Picture of Processed Image1

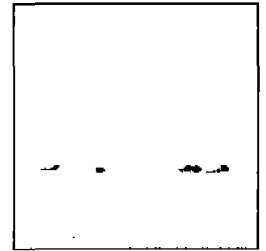


Fig.10 Picture of Processed Image2

2.2 숙련가 기술의 모델링

인간의 숙련작업을 수행하는데는 의식적인 수준의 지식과 무의식적인 수준의 기술 두가지가 있다. 디버깅 예에서 만약 비의 높이가 높고 비의 두께가 넓다면 일반적으로 연삭 깊이를 작게하면서 비제거 회수를 많이 할 것이다. 또한 비의 높이가 높고 비의 두께가 좁다면 연삭 깊이를 크게 하면서 비제거 횟수를 적게 할 것이다. 이와 같이 사전에 비 특성의 파악은 시각지식을 기준으로 하여 인간

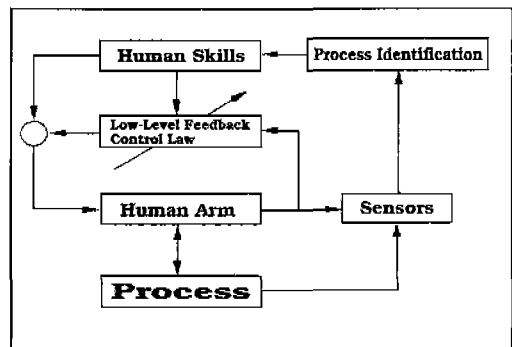


Fig. 11 A Schematic Model of Human Operator

은 연속적으로 제어행동을 이행하며, 제어의 결정과 관측의 순환을 반복한다. 인간은 경험을 축적하므로써 작업활동이 더욱 효과적이며, 빨라지게 된다. 이단계에서 인간은 구체적인 시각정보를 기호표시로 연결하므로 정성적인 지식으로 입증하고 있다. 예로서 버의 높이와 두께에 따라서 가장 효과적으로 제어될 수 있는 수많은 국소적인 전략들이 구성되면서 제어 구조를 비선형 구조형태로 만들게 한다. 디버링과 같은 작업을 수행하는데 인간의 작업행위는 Fig.11에서 보여주는 제어구조로 모델화 할 수 있다.^(2,3)

Fig.11에서 피드백 제어는 하위부 제어에서 보여주고 있다. 이것은 자동적으로 공정에서 서로 영향을 주는 인간의 팔은 힘과 위치를 피드백 하여 궤적을 따르도록 제어된다. 인간 숙련가의 기본적인 제어행위요소는 작업을 수행하는 동안에 공정상태에 따라 이들 궤적과 피드백 개인값들을 변경시키는 것이다. 이것을 밝히기 위해서 피드백 제어주위에 상위부 제어 루프가 고려되어야 한다. 이 상위부 제어에서 숙련가는 디버링 공정을 공구의 변위상태와 버(Burr)의 특성에 중요한 변화들을 검출한다. 즉 버의 형태와 크기인 버의 특성에 따라서 숙련가는 피드백 제어기인 개인값을 변화시켜 공구를 쥐는 컴플라이언스(Compliance)를 조절한다.숙련가는 경험을 기본으로 하여 연삭력의 크기에 따라 연삭 깊이와 공구를 얼마만큼 굳게 잡을 것인가를 결정한다. 그러나 숙련가들은 경험으로 얻어낸 디버링 작업 기술을 작업에서는 잘 활용하지만 그것을 설명하자면 잘 표현을 못해낼 뿐 아니라 정확히 알고 있지도 않다. 따라서 본 연구의 초점은 퍼지모델을 이용하여 숙련가의 디버링 작업 기술을 표현하는 방법 및 디버링 기술의 습득에 관하여 연구하는 것이다.

3. 디버링 공정의 퍼지모델

3.1 TSK형 퍼지 모델

퍼지모델의 형태는 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 TSK형 퍼지모델을 사용한다.⁽⁷⁾ 그 퍼지모델은 다음 식과 같은 퍼지규칙들로 구성된다.

$$L^i : \text{If } x_1 \text{ is } A_1^i, x_2 \text{ is } A_2^i \dots, x_m \text{ is } A_m^i \quad (2)$$

$$\text{then } y^i = C_o^i + C_1^i x_1 + C_2^i x_2$$

여기서, L^i 는 이 퍼지규칙이 i 번째 퍼지규칙임을 나타내고, x^i 는 입력변수, A_j^i 는 퍼지집합, y^i 는 i 번째 퍼지규칙의 출력, C_j^i 는 결론부 파라메타이다.

어느 한 입력에 대한 퍼지모델로 부터의 추론 결과 y^o 는 다음 식과 같이 구해진다.

$$y^o = \frac{\sum_{i=1}^n W^i y^i}{\sum_{i=1}^n W^i} \quad (3)$$

여기서, n 은 퍼지규칙의 수, W^i 는 i 번째 퍼지규칙의 전제부 적합도를 나타내며, 퍼지집합 A_j^i 의 x_j^o 에서 멤버십값을 $A_j^i(x_j^o)$ 로 표현 할 경우, W^i 는 다음과 같다.

$$W^i = \prod_{j=1}^m A_j^i(x_j^o) \quad (4)$$

식(2)와 같은 퍼지규칙으로 구성되는 퍼지모델은, 입력공간을 퍼지분할하여 각 퍼지 부분공간을 한개의 선형 식으로 표현한 형태이다.

입출력 데이터 만을 이용하여 off-line으로 퍼지모델을 인식하는 방법은 Sugeno, Kang에 의해 발표되어 있다.⁽⁶⁾ 입출력 데이터를 이용한 TSK 퍼지모델의 인식은 Fig. 12와 같이 나눌 수 있다.

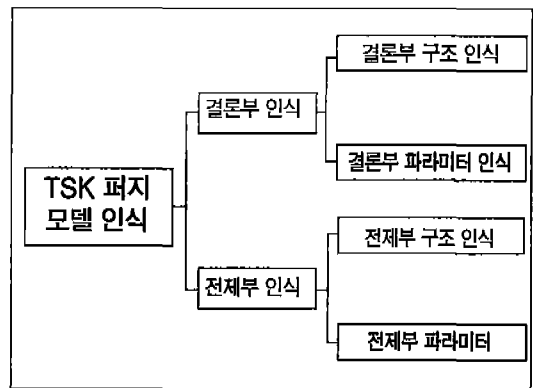


Fig.12 Recognition of the TSK Fuzzy Model

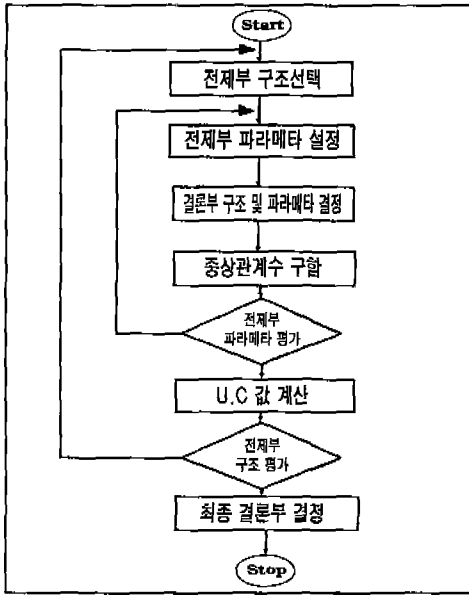


Fig.13 Algorithm for Rule Identification

퍼지모델 인식 과정의 흐름도는 Fig.13과 같다.

전제부 구조 인식이란 입력공간의 퍼지분할을 찾는 것이며, 전제부 파라메타란 퍼지집합의 멤버쉽함수를 특징 짓는 파라메타를 가리키는 것으로 출력 오차의 평방합을 최소로 하거나 중상관계수를 최대로 하는 것을 목적으로 하여 비선형 계획법으로 인식한다. 또한, 결론부 구조 인식이란 어느 변수가 결론부에 관계하고 있는가를 찾는 것으로 변수감소법을 이용하여 구하며, 결론부 파라메타 인식이란 결론부 선형식의 계수를 구하는 것으로 최소자승법을 이용한다. 그리고 UC(Unbiasedness criterion)는 유한 개의 인식용 데이터로부터 인식된 규칙들이 인식에 사용된 유한 데이터에만 적합한 것이 아니고 실제 시스템을 정확히 표현하는 보편성 있는 규칙인가를 평가 하는 규범으로 다음 식과 같다.

$$UC = \left[\sum_{i=1}^{n_A} (y_i^{AB} - y_i^{AA})^2 + \sum_{i=1}^{n_B} (y_i^{BA} - y_i^{BB})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

위 식(5)의 UC는 입출력 데이터를 A, B, 두 그룹으로 나누고 이로부터 규칙 인식 과정을 거쳐 만들어진 퍼지모델을 각각 모델 A, 모델 B라고 가정하여 정의된 것이다.

여기서, n_A 는 그룹 A의 데이터 수, n_B 는 그룹 B의 데이터 수, y_i^{AA} 는 모델 A에 의한 그룹 A의 출력의 추정치, y_i^{AB} 는 모델 B에 의한 그룹 A의 출력의 추정치, y_i^{BB} 는 모델 B에 의한 그룹 B의 출력의 추정치, y_i^{BA} 는 모델 A에 의한 B의 출력의 추정치, i 는 데이터 번호이다.

3.2 TSK형으로 표현한 디버링 모델

3.2.1 입출력 Data의 수집

본 실험에서는 공정 상태를 나타내는 입력변수로는 화상처리결과로 얻어지는 버높이(x_1), 버폭(x_2), 높이면적(x_3), 두께면적(x_4)이다. 그리고 숙련가의 제어활동을 나타내는 출력변수로는 일정한 제거량을 가지고 연삭할때의 연삭 깊이, 완전제거까지의 연삭반복횟수, 연삭시 법선방향의 최대연삭력으로 선택하였다. 이러한 디버링 실험을 위한 장치는 Fig.14와 같다. Table 1은 사용된 실험장비들을 나타낸다.

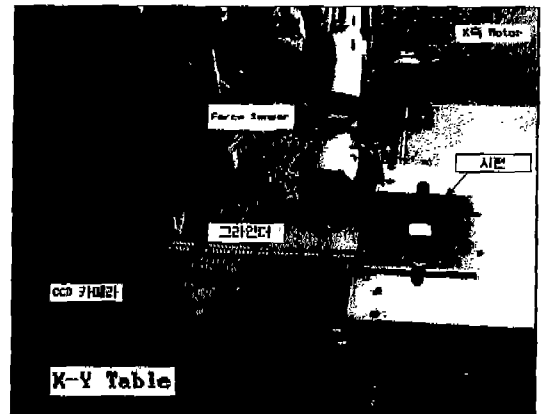


Fig.14 Diagram of Deburring System

Table 1 Specification of Experimental Setup

Instrument	Specification
X-Y Table	1000 * 500mm
DC Servo Motor	FMD-E20EB
DC Servo Driver	FDD-106TD
Vision Board	MVB-02
CCD Camera	IK-532
Laser Variable System	300mm±100mm
Digital Strain Meter	MS-1120
Electric Disk Grinder	11000 RPM

X-Y Table끝에는 전기 그라인딩 공구가 부착되고 그라인더 디스크는 강성 디스크를 사용하였으며 그라인더 지지대 위에 Strain gage가 부착되어 있어 최대변형량을 측정하여 Force를 얻었고, 연삭도중 레이저 변위계를 사용하여 연삭깊이를 정밀하게 측정하였다. 시편으로 사용된 공작물은 6-10(mm)크기의 재질이 SS41연강판으로 가스절단 및 플라즈마 절단을 한 후 생성된 버들 중에서 한번에 쉽게 제거되는 산화 버들은 실험대상에서 제외하고, 나머지 상이한 버 100개를 가지고 실험하였다.

3.2.2 디버링 공정의 퍼지모델

퍼지모델을 만들기 위한 실험 데이터는 입력변수인 버 높이 (x_1)는 0.707mm~8.727mm, 버 폭 (x_2)은 2.909mm~48.687mm, 높이면적(x_3)은 2.281mm²~89.256mm², 두께면적(x_4) 0.832 mm²~50.619mm²에서 출력변수인 버의 연삭깊이는 0.058 mm~0.623mm, 반복횟수는 2회~10회, 법선방향연삭력은 1kgf~10kgf의 범위를 가지는 많은 데이터 중에서 임의로 100개를 사용하였다. 퍼지모델의 보편성을 검증하는 UC를 계산하기 위한 데이터 n_A, n_B 는 인식용 데이터를 임의로 50개씩 두 그룹으로 나누어 사용하였다.

Table 2 The Values of UC

퍼지규칙수	1	2	3	4	5
UC 값	0.42	0.32	0.25	0.23	0.28

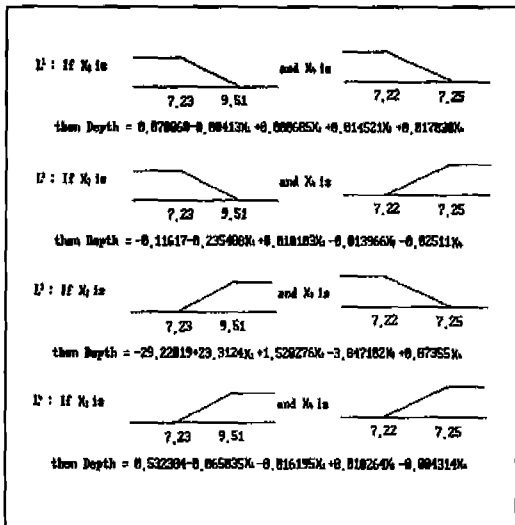


Fig. 15 Fuzzy Model of Grinding Depth

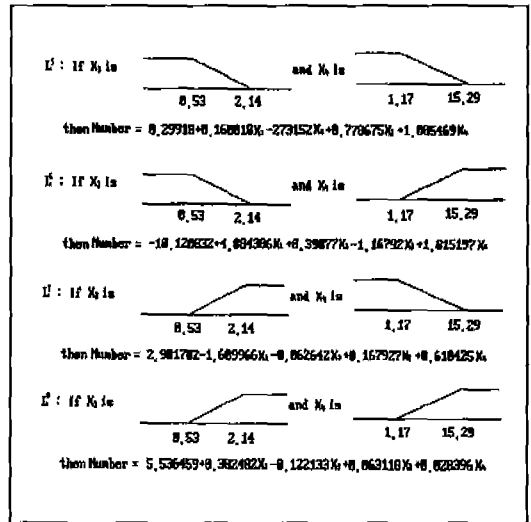


Fig. 16 Fuzzy Model of Repetitive Number

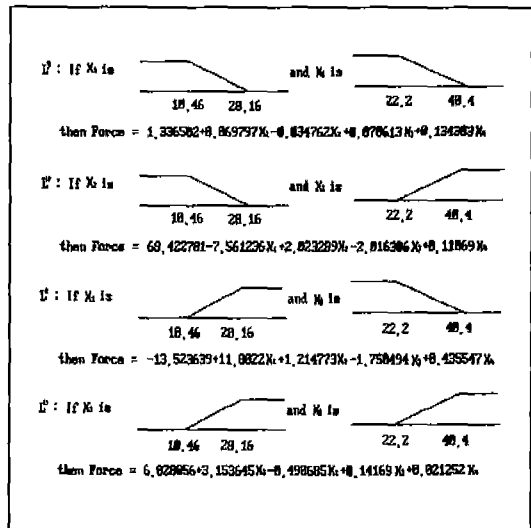


Fig. 17 Fuzzy Model of Normal Grinding Force

인식용 데이터와 위에서 설명한 방법으로 인식된 퍼지 모델은 Fig. 15~17과 같이 총 12개의 디버링 작업기슬 퍼지규칙(L¹~L¹²)들로 구성되었다.

Fig. 15퍼지모델의 인식에서, 전체부 구조인식에 사용된 UC값들을 Table 2에 보인다. Table 2에서 퍼지규칙수가 4개 까지는 규칙수가 증가함에 따라 UC값이 감소하지만 5개가 되면 UC값이 오히려 증가하여 최적의 퍼지규칙수는 4개임을 알수 있다.

이중에서 한가지 예를 들어 퍼지모델(L¹~L¹²)의 L¹의

경우 식(2)의 형식으로 표현하여 설명하면, 입력변수공간인 버 두께면적(x_1)이 9.51mm^2 보다 작고, 버 높이 면적 또한 7.25mm^2 보다 작을 때는 연삭깊이를 $0.070868 - 0.00413x_1 + 0.000685x_2 + 0.014521x_3 + 0.01783x_4$ 와 같이 출력하면 숙련가의 제어행동을 수행하게 된다. 그리고 Fig.15~17에서 입력변수와 출력변수의 매핑관계를 나타내는 퍼지모델에서 몇가지 중요한 특징을 알 수 있다. 출력변수인 연삭 깊이와 반복횟수는 버 높이면적과 버 두께 면적에 의해 더 크게 영향을 받고, 법선력에 대한 모델은 버의 폭과 버 높이면적에 따라 더 크게 영향을 받음을 보여준다. 따라서 버의 높이는 공정상태를 결정하는데 중요한 인자임을 파악할 수 있다. 위의 디버링 퍼지 모델의 인식용 데이터에 대한 오차는 Table 3에서 나타낸다.

Table 3 The Error of Deburring Fuzzy Model

	1차 선형함수 모델		퍼지모델	
	평균오차	중상관계수	평균오차	중상관계수
연삭깊이(mm)	0.156	0.067	0.11	0.906
반복횟수(번)	0.969	0.751	0.593	0.91
힘(kgf)	0.903	0.814	0.578	0.933

Table 3에서는 퍼지 모델의 경우가 최소오차승법에 의한 1차 선형 함수 모델에 비해서 평균오차가 작고 상관계수가 높음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 디버링 공정의 자동화를 위하여 비전센서에서 얻어지는 시각정보와 숙련가의 제어활동에 대하여 TSK형 퍼지를 이용하여 디버링 공정을 모델링 하였다. 입력으로는 버 높이, 버폭, 높이면적, 두께면적을 출력으로는 연삭깊이, 반복횟수, 법선방향연삭력을 사용하였다. 실제의 디버링 실험데이터에서 얻어진 TSK형 퍼지 모델이 숙련가의 디버링 기술을 정확하게 표현할 수 있음을 보여주었다. 또한 이 방법은 다른 기존의 방법에 비하여 계산시간이 작게 소요되어 실시간 응용이 가능하리라 생각된다. 그러나 향후에는 버의 형상 Profile, 컴플라이언스와 이송속도등을 고려하여 숙련자업자의 기술이 좀더 구체적으로 표현될 수 있도록 하는 것이 필요하겠다.

후 기

본 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 박경택, 최재찬, 한장남, 이정규, 김무용, 정병균, "디버링용 지능 로봇 시스템에 관한 연구" 한국 자동제어학회 회의 논문집, pp256-263, 1993.
2. Haruhiko Asada and Yukio Asari "The Direct Teaching of Tool Manipulator Skills Via the Impedance Identification of Human Motions" Proceedings IEEE International Conference Robotics and Automation, pp 1269- 1274, 1988.
3. Boo-Ho Yang and Haruhiko Asada, "Hybrid Linguistic/Numeric Control of Deburring Robots Based on Human Skills", Proceedings IEEE International Conference Robotics and Automation Nice, France-May, pp 1467-1474, 1992.
4. D.S.Ahn, H.S.Cho,K.Ide,F.Miyazaki and S.Arimoto "Learning Task Strategies in Robotic Assembly System" Robotica Vol 10, pp409-418, 1992.
5. Ken ichiro Shimokura and Sheng Liu, "Programming Deburring Robots Based on Human Demonstration with Direct Burr Size Measurement", Proceedings IEEE International Conference Robotics and Automation, pp 572-577, 1994.
6. D.E.Whitney and E.D Tung, "Robot Grinding and Finishing of Cast Iron Stamping Dies" Journal of Dynamic Sysyem, Measurement, and Control ,Vol 114, pp132-140, 1992.
7. 오갑석, 이원창, 안두성, 강근택 "퍼지추론법을 이용한 로봇트 역기구학 및 역자코비안의 해" 대한전 자공학회지, 제 31권 B편 8호, pp1084-1090, 1994.
8. M. Sugeno and G.T.Kang, "Structure Identification of Fuzzy Model". Fuzzy Sets and Systems, Vol, 18, pp.326-346, 1986.