

비전 센서를 이용한 디버링 공정의 자동화에 관한 연구

신상운* 갈축석** 강근택*** 안두성****

A Study on the Automation of Deburring Process Using Vision Sensor

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

* 부산공업대학교 기계공학과 ** 부산수산대학교 기계공학과 대학원

*** 부산수산대학교 전자공학과 **** 부산수산대학교 기계공학과

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, cutting area are extracted from image processing by use of the vision system. Cutting depth, repetitive number and normal cutting 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.

Keywords : Deburring(디버링), Vision system(비전시스템), TSK fuzzy model(TSK형 퍼지 모델).

Human expert's skills(인간 숙련가 기술)

1 서론

제품생산의 최종 단계인 마무리 처리 능력은 생산품의 질에 직접적인 영향을 끼치고 있다. 따라서 마무리 작업단계로써의 디버링공정의 중요성은 매우 높지만 자동화율은 낮은 실정이다. 특히 유연성과 다양성을 가진 로봇을 이용한 디버링공정의 자동화는 현실적으로 많은 문제를 가지고 있다. 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 자동센서 사용이 어렵고, 그리고 각종 센서 신호처리시간 지연, 가공반력과 복잡한 버의 형상간의 데이터 변환이 명확하지 않고, 또한 공작물의 위치오차, 신뢰성이 낮은 신호처리 알고리즘 등과 같은 많은 문제점을 가지고 있다. 그러나 현장에서 오픈기간동안이 작업들을 수행하여 경험한 숙련가들은 이런 작업을 능률적으로 교묘하게 공구를 조정하며 작업을 실행한다. 숙련가들의 작업수행은 다양한 감각적인 정보를 통하여 작업 공정을 인지하고 공정상태에 따라 속도된 방식으로 공구를 적용시킨다. 과거에 습득한 경험으로부터 인간 숙련가들은 공정상태와 공구 움직임간의 관계를 운영하는 복잡한 제어기능들을 습득하고 있는 것이다. 로봇 매니퓰레이터(Robot Manipulator)에 이러한 숙련가의 기술들을 습득하여 숙련가와 같은 행위로 로봇이 디버링 작업을 수행할 수 있도록 하기 위한 연구들이 행해지고 있다.¹⁾ 인간 숙련기술을 찾고 제어계획을 배우는 방법으로 숙련가의 작업수행 중 각종 센서신호들로부터 특징값을 얻어면서 작업자와 인터뷰를 통해 공정상태를 파악한 후 작업자의 시연(Demonstration)으로부터 제어명령을 찾아내는 방법이 소개되었다.⁽²⁾⁽³⁾ 최근에는 레이저 변위 센서 (Laser Displacement Sensor)로 버

높이를 측정하여 숙련가 시범 중 이송속도를 뉴럴네트(Neural Net)로 학습한 방법을 제안하였다. 이런 연구들은 입의의 버형상 측정에서 버의 수직 높이 크기를 인지할 수 있는 능력만 시도할 뿐 많은 버특성을 고려하지 않고 있다.⁴⁾ 또한 디버링의 한 방법으로 Whitney는 용접 바이더의 크기를 측정하기 위해 비전장치를 사용하였고 측정된 용접 바이더를 제거하는 중에 필요한 동력을 계산하기 위해 준 정적 모델(Quasi-static model)을 사용한 연마장치를 개발하였다. 비전장치는 용접바이더의 기하학적인 특장을 잘 제공하지만 과도한 절삭력이 주어져 열균열이 발생하고 공구 마모가 크게 일어나고 있다.⁵⁾

본 연구에서는 디버링 작업에 관한 인간의 시각인식 기능과 제어 기능과의 관계를 모델링하는 새로운 방법을 개발하고자 한다. 인간의 시각인식은 공정상태를 이해하는데 필수적인 요소이며 인간은 시각정보만으로도 경험된 행위를 판단, 수행할 수 있음을 이용한다. 즉 비전센서를 통해 처리되는 정보로써 구성되는 입력공간과 그에 대응하는 숙련가의 제어 행위로써 구성되는 출력공간과의 매핑관계를 밝히는 것이 본 논문의 목적이다.

2 디버링 공정의 자동화

현장에서의 디버링 작업은 주로 핸더 그라인더를 사용하여 수직업을 하고 있다. 숙련가는 우선 시각적으로 버의 위치를 찾아 버의 크기를 파악하고, 공구를 버에 대고 일단 한번 그라인딩을 시도하는 동안 절삭력과 연삭량을 인지하여 버의 특성을 파악한 다음, 잔여버에 대한 버절삭 이송속도,

공구를 쥐는 힘을 조절하면서 절삭깊이에 따른 절삭량을 음향과 연삭 불꽃강도를 확인하면서 제거완료시간을 결정하게 된다. 벼의 높이, 두께와 크기는 상당히 다양하며, 이러한 벼들은 그라인더공구를 간단히 한번 움직여서 벼를 완전히 제거할 수 없으며 공구를 전,후로 반복하여 움직여서 제거시킬 수 있다. 또한 그라인딩 휠의 손상을 최소화하기 위하여 각 벼들의 높이와 두께와 같은 공정상태에 따라 좌우되는 공구 최부 커플라이언스(Compliance)와 절삭깊이를 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 경험으로 부터 숙련기는 보고, 듣고, 접촉의 감각을 통하여 공정상태를 이해하면서 무의식적으로 제어 행동을 한다. 즉, 숙련가는 감각 정보의 패턴(pattern)해석 기능들을 습득하였고, 그리고 습득하여 경험된 운동명령들을 그의 손으로 자유자재로 움직일 수 있는 기능을 가지고 있다. 이것은 숙련가의 감각정보를 확실한 운동명령들과 서로 연관시키는 복잡한 제어법을 배운 것이다. 본 연구에서는 식(1)의 형태로 숙련가의 디버링 작업 기술을 나타낸다.

IP(입력신호 공정상태) THEN(출력신호 제어행동) (1)

2-1 비전처리

본 연구에서는 삼성 화상처리보드 MVB-02를 사용하여 비전처리를 하였다. 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 고정된 위치팅되어 있으므로 일정한 관심영역 이하는 모두 무시하여 라벨링을 행한다. 한 개의 시편에서는 보통 5-8개의 벼가 존재하는데 가장 면적이 큰 벼 순으로 정렬하여 순번을 매기고 각각 벼의 위치값이 저장된다. Fig.1은 카메라를 시편과 수평으로 놓은 상태에서 한개의 벼에 대한 특성(벼의 높이, 폭, 높이 면적)을 나타내는 것이고, Fig.2는 카메라를 시편과 수평에서 수직으로 40°방향으로 옮겨 한번 연삭후의 두께면적을 나타낸 것이다. 물론 화상에서의 벼의 특성값들은 실제 길이에 대한 스케일링(Scaling)값을 곱한 후 구해진 값이다. Fig.3은 화상처리의 흐름도를 나타내고 Fig.4는 원래의 화상을 카메라로 포착한 화상이고 Fig.5는 실시간으로 화상이 이진화 처리되어 즉 LUT를 사용한 화상을 나타낸다. Fig.6은 이진화 처리된 화상에서 처리하고자 하는 영역을 설정하고 라벨링을 실행하고 벼의 특성들을 파악한 즉 화상처리를 끝낸화상을 보여주고 있다.

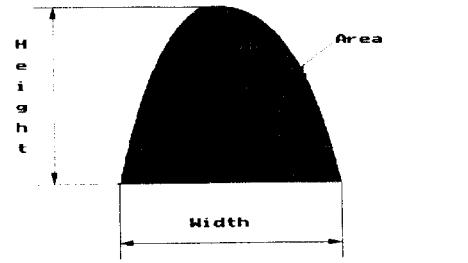


Fig.1 Profile of Burr Height, Width, Area

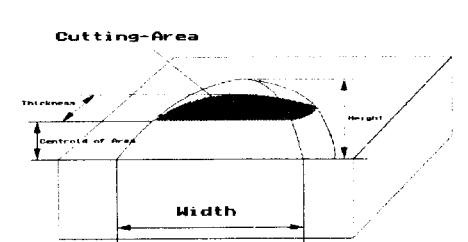


Fig.2 Profile of Burr Cutting Area

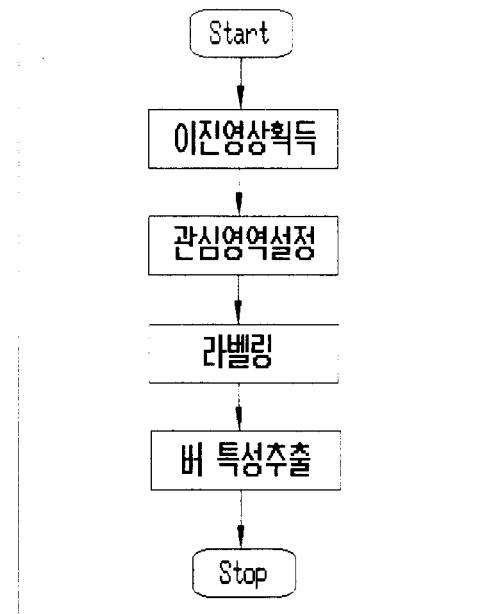


Fig.3 Procedure of Image Processing

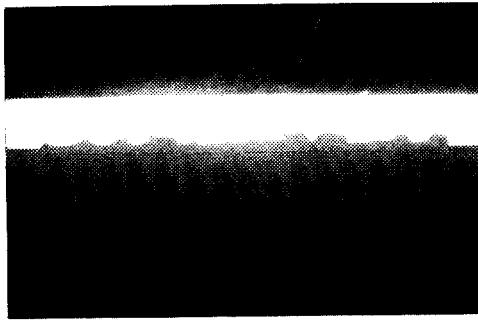


Fig.4 Picture of Original Image

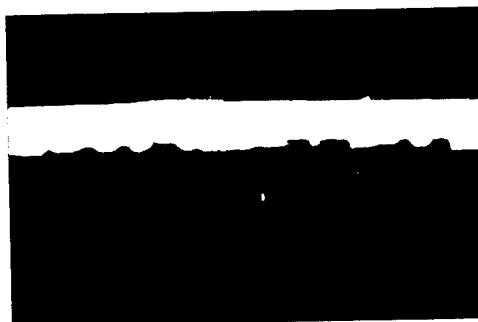


Fig.5 Picture of Image with LUT



Fig.6 Picture of Processed Image

2-2 숙련가 기술의 모델링

인간의 숙련작업을 수행하는데는 의식적인 수준의 지식과 무의식적인 수준의 기술 두 가지가 있다. 디버링 예에서 만약 벼의 높이가 높고 벼의 두께가 넓다면 일반적으로 절삭 깊이를 작게 하면서 베제거 횟수를 많이 할 것이다. 또한 벼의 높이가 높고 벼의 두께가 좁다면 절삭 깊이를 크게 하면서 베제거 횟수를 적게 할 것이다. 이와 같이 사전에 벼 특성의 파악은 시각지식을 기준으로 하여 인간은 연속적으로 제어행동을 이행하며, 제어의 결정과 관측의 순환을 반복한다. 인간은 경험을 축적하므로서 작업활동이 더욱 효과적이며, 빨라지게 된다. 이단계에서 인간은 구체적인 시각정보를 기호표시로 연결하므로 정성적인 지식으로 입증하고 있다.

예로서 벼의 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.7에서 보여주는 제어구조로 모델화 할 수 있다.^{[1][2]}

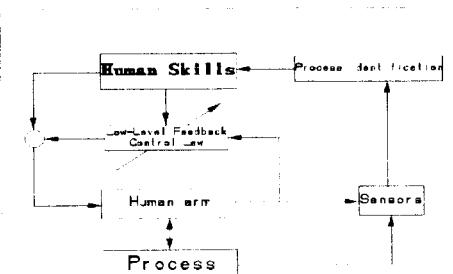


Fig.7 A Schematic Model of Human Operator

Fig.7에서 피드백 제어는 하위부 제어에서 보여주고 있다. 이것은 자동적으로 공정에 서로 영향을 주는 인간의 팔을 힘과 위치를 피드백 하여 쾌적을 따르도록 제어된다. 인간 숙련가의 기본적인 제어행위요소는 작업을 수행하는 동안에 공정상태에 따라 이를 쾌적과 피드백 개인값들을 변경시키는 것이다. 이것을 밝히기 위해서 피드백 제어주위에 상위부 제어 루프가 고려되어야 한다. 이 상위부 제어에서 숙련가는 디버링 공정을 공구의 변위상태와 벼(Burr)의 특성에 중요한 변화들을 검출한다. 즉 벼의 형태와 크기인 벼의 특성에 따라서 숙련가는 피드백 제어기인 개인값을 변화시켜 공구를 쥐는 컴플라이언스(Compliance)를 조절한다. 숙련가는 경험을 기본으로 하여 절삭력의 크기에 따라 절삭 깊이와 공구를 얼마나 크게 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.^[3] 그 퍼지모델은 다음 식과 같은 퍼지규칙들로 구성된다.

$$L^i : \text{If } x_1 \text{ is } A_1^i, x_2 \text{ is } A_2^i, \dots, x_m \text{ is } A_m^i, \text{ then } y^i = c_0^i + c_1^i x_1 + c_2^i x_2 + \dots + c_m^i x_m. \quad (2)$$

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^0 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 는 i 번째 퍼지규칙의 전제부 적합도를 나타내며, 퍼지집합 A_i^j 의 x_i^j 에서 멤버십값을 $A_i^j(x_i^j)$ 로 표현 할 경우, W 는 다음과 같다.

$$W = \prod_{j=1}^m A_i^j(x_i^j) \quad (4)$$

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

입출력 데이터만을 이용하여 off-line으로 퍼지모델을 인식하는 방법은 Sugeno, Kang에 의해 발표되어 있다.¹¹⁾

입출력 데이터를 이용한 TSK 퍼지모델의 인식은 다음과 같이 나눌 수 있다.

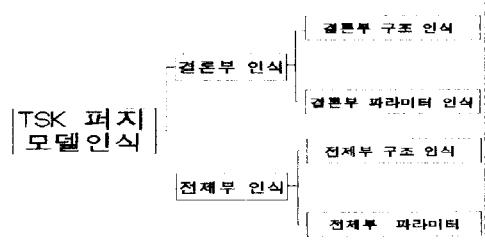


Fig.8 Recognition of the TSK Fuzzy Model

퍼지모델 인식 과정의 흐름도는 다음과 같다.

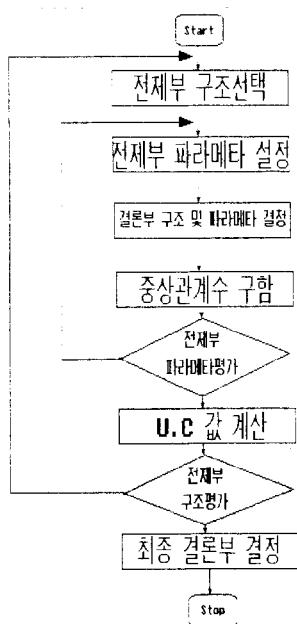


Fig.9 Algorithm for Rule Identification

전제부 구조 인식이란 입력공간의 퍼지분할을 찾는 것이다. 전제부 파라메타란 퍼지집합의 멤버십함수를 특징짓는 파라메타를 가리키는 것으로 출력 오차의 평방합을 최소로 하거나 중상관계수를 최대로 하는 것을 목적함수로 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 데이터로 부터 인식된 규칙들이 인식에 사용된 유한 데이터에만 적합한 것이 아니고 실제 시스템을 정확히 표현하는 보편성 있는 규칙인가를 평가하는 규범으로 다음식과 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^{BA} 는 모델 B에 의한 그룹 B의 출력의 추정치, y_i^{BB} 는 모델 A에 의한 B의 출력의 추정치, i 는 데이터 번호이다.

3-2 TSK형으로 표현한 디버링 모델

3-2-1 입출력 Data의 수집

디버링 실험을 위한 장치는 Fig.10와 같다. Table.1은 사용된 실험장치를 나타낸다.

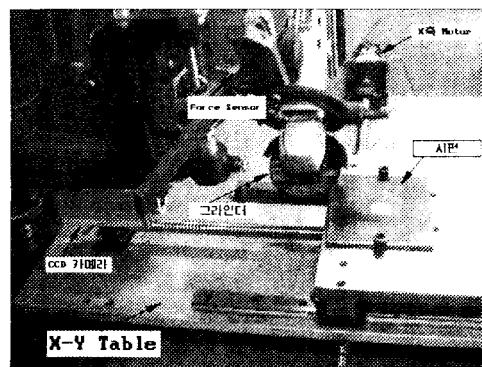


Fig.10 Diagram of Deburring System

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
Ampere Meter	0~300A
Digital Strain Meter	MS-1120
Electric Disk Grinder	11000 RPM

Table.1 Specification of Experimental Setup

로봇 끝에는 전기 그라인딩 공구가 부착되고 그라인더 디스크는 강성 디스크를 사용하였으며 그라인더 지지대 위에 1축 Force Sensor가 부착되어 있다. 또한 작업을 시연할 때 작업자가 공구를 잡고 암링크와 함께 움직여 주며 암은 작업자의 운동을 방해하지 않도록 만들어 졌다. 그라인더 부하동력을 측정하는 전류센서를 가졌다. 공작물 위 버를 조사하기 위한 (CCD)카메라를 부착하여 화상신호를 MVB-02 보드로 보내어진다. 그라인딩 중에 절삭 깊이를 측정하기 위해 공작물 옆에 레이저면위계를 설치하여 절삭깊이를 측정한다. 시편으로 사용된 공작물은 6~10(mm)강판을 가스절단 및 플라즈마 절단을 한 후 생성된 버들을 사용하였으며, 주로 산화 버들을 제거하고 한번에 제거되지 않는 버들을 실험하였다. 이 버들은 크고 또한 예측할 수 없는 크기 변화를 가졌다. 본 실험에서는 공정 상태를 나타내는 입력변수로는 화상처리결과로 얻어지는 버높이(X_1), 버폭(X_2), 높이면적(X_3), 두께면적(X_4)이다. 그리고 속련가의 제어활동으로는 일정한 제거량을 가지고 절삭할때의 절삭 깊이, 완전 제거까지의 그라인딩 반복횟수, 법선방향의 절삭력으로 선택하였다. 데이터 습득은 상이한 버 100개를 가지고 반복실험하였다. 4가지의 버 특성들은 비전시스템으로 부터 추출되어 족적 출력변수는 레이저 면위계와 Force sensor신호들로 부터 측정되었으며, 잔여버가 완전히 제거될 때 까지의 그라인딩 전,후반복횟수를 확인하였다.

3-2-2 디버링 공정의 퍼지모델

실험 데이터 100개를 사용하여 얻어진 디버링 공정의 퍼지 모델의 결과는 Fig.11-13과 같으며 총 12개의 디버링 작업 기술이 도출되었다.

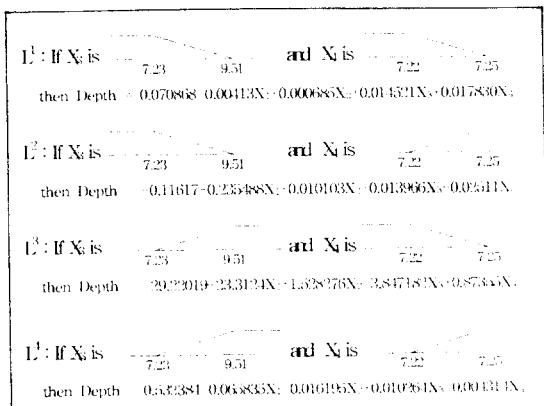


Fig.11 Fuzzy model of Cutting Depth

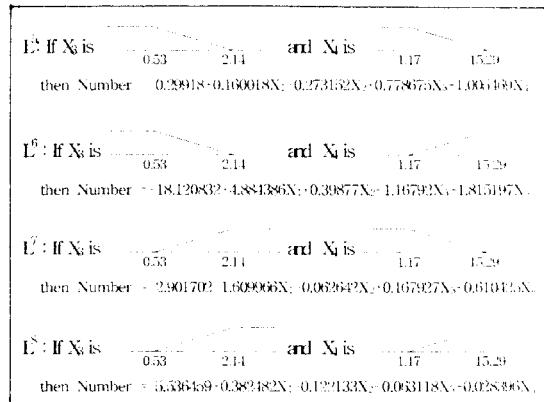


Fig.12 Fuzzy Model of Repetitive Number

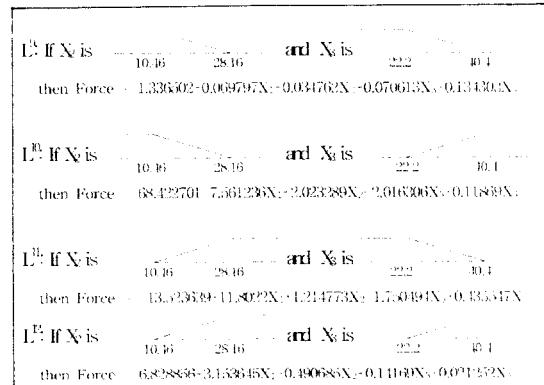


Fig.13 Fuzzy Model of Normal Cutting Force

출력측의 절삭 깊이와 반복횟수는 벼 면적과 벼 두께면적에 따라 분류되어졌고 4가지의 공정상태에 따라서 절삭깊이가 판별되었음을 보여준다. 그리고 법선력에 대한 모델 판별은 벼의 폭과 벼 면적에 따라 공정상태가 분류되었다. 따라서 벼의 면적은 공정상태를 결정하는데 중요한 인자임을 파악할 수 있다. 그러나 벼의 높이는 공정상태 결정에는 중요치 않음을 알 수 있다.

위의 디버링 퍼지 모델의 인식용 데이터에 대한 오차는 Table.2에서 나타낸다.

1차 선형함수		퍼지 모델	
평균오차	중상관계수	평균오차	중상관계수
절삭깊이(mm)	0.156	0.067	0.11
반복횟수(번)	0.969	0.751	0.593
힘(Kgf)	0.903	0.814	0.578
			0.933

Table.2 The Error of Deburring Fuzzy Model

Table.2에서는 퍼지 모델의 경우가 최소오차자승법에 의한 1차 선형 함수 모델에 비해서 평균오차가 작고 상관 계수가 높음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 비전센서에서 얻어지는 시각정보와 속련가의 제어활동에 대하여 TSK형 퍼지를 이용하여 디버링 공정을 모델링하였다. 입력으로는 벼 높이, 벼폭, 높이면적, 두께면적을 출력으로는 절삭깊이, 연삭반복횟수, 법선방향절삭력을 사용하였다. 실제의 디버링 실험데이터에서 얻어진 퍼지 모델이 속련가의 디버링 기술을 정확하게 표현할 수 있음을 보여주었다. 또한 이 방법은 다른 기존의 방법에 비하여 계산시간이 크게 소요되어 실시간 응용이 가능하리라 생각된다.

참고 문헌

- 1 Haruhiko Asada and Yukio Asari " The Direct Teaching of Tool Manipulator Skills Via the Impedance Identification of Human Motions" Proceedings of the 1988 IEEE International Conference Robotics and Automation, pp1269-1274, 1988
- 2 Boo-Ho Yang and Haruhiko Asada, " Hybrid Linguistic/Numeric Control of Deburring Robots Based on Human Skills", Proceedings of the 1992 IEEE International Conference Robotics and Automation Nice, France-May, pp1467-1474, 1990
- 3 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

- 4 Ken ichiro Shimokura and Sheng Liu, " Programming Deburring Robots Based on Human Demonstration with Direct Burr Size Measurement", Proceedings of the 1992 IEEE International Conference Robotics and Automation, pp572-577, 1992
- 5 D.E.Whitney and E.D.Tung, "Robot Grinding and Finishing of Cast Iron Stamping Dies" Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol 114, pp132-140, 1992
- 6 오갑석, 이원창, 안두성, 강근택 "퍼지추론법을 이용한 로보트 역기구학 및 역자코비안의 해" 대한전자공학회지, 제 31권 B편 8호, pp1084-1090, 1994
- 7 M. Sugeno and G.T.Kang, "Structure Identification of Fuzzy Model", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 18, pp.326-346, 1986