

비전을 이용한 디버링 기술의 로봇에의 전달

Transfer of Deburring Skills to Robot Using Vision System

신 상 운(부경대 대학원), 최 규 종(부경대 대학원), 이 규 상(부경대 대학원), 김 영 원(부경대 대학원),
안 두 성(부경대 교수)

S. W. Shin(Pukyong Univ), G. J. Choi(Pukyong Univ), K. S. Lee(Pukyong Univ), Y. W. Kim(Pukyong Univ),
D. S. Ahn(Pukyong Univ)

ABSTRACT

This study presents the new method which can transfer the expert's skill to deburring robot through neural network. The expert's skill is expressed as association mapping between the characteristics of the burr and human expert's action. Under the fundamental idea that the state of the deburring process can be extracted via the visual sense of the human, we employ vision system for the perception and identification of the changing burr. From the demonstration of human experts, force data are measured. Finally the characteristics of the burr and coressponding force are associated by the neural network which is trained through many demonstrations. The proposed method is verified in the deburring process of welding burr.

Key Words : vision system(비전 시스템), expert's skills(숙련자 기술), deburring(디버링),
neural network(신경회로망)

1. 서론

오늘날 제조 분야에서는 가공 분야의 작업들을 산업용 로봇으로 이용하려는 기대와 요구가 증가하고 있다. 이 분야에 로봇 사용을 어렵게 하는 점은 로봇의 엔더 이펙터(end effector)와 작업환경간에 상호 작용력이 정확히 조절되도록 프로그램 하는 것이다. 만약 로봇과 공작물 사이에 상태들을 감지 못하고 제어되면 로봇에 또는 공작물에 작용력이 초과되어 어느 한쪽에 중대한 손상을 일으키게 된다. 이런 점을 해결하기 위한 로봇 프로그래밍 방법으로 인간의 의향과 목표를 로봇에 가르치는 티칭법(teaching method)이 필요로 한다. 현재 로봇에 대한 티칭의 수준은 비교적 간단한 작업에서 연속적인 위치 제작용이 기준 입력으로 주어지면 로봇이 뒤따르는 방법이다. 이 같은 방법을 가공 작업에도 응용하려는 시도가 지금까지 진행되고 있다⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾. Asada와 Asari⁽¹⁾는 로봇에 인간의 컴플라이언스를 전달하기 위한 방법을 고안하여, 로봇이 인간의 행동을 흉내 내는 것을 가능하게 하였다. Liu와 Asada⁽²⁾는 작업 공정 상태의 특징으로부터 작업전략을 연관시키는 숙련기술을 밝히는 티칭법은 디버링 공정모델 중에 몇몇의 신호

를 측정하여 버의 크기와 경도들을 추정하였다. 그러나 측정 동안에 노이즈(noise)와 외란들은 추정 값에 많은 영향을 주었다. 그러므로 작업 공정 상태의 정보를 이용하는 방법으로 숙련자의 기술을 확인하는데는 한계가 있음을 보여 주었다. 또한 파라미터의 추정시간 때문에 실제 적용에 제한이 된다. 특히 이러한 연구에서는 작업환경의 정보가 사전에 정확하게 파악되고 상호작용의 목표를 정의하여 적용해야 한다.

디버링은 불확실하고 변화가 심한 특성을 가진 버를 제거하는 작업이므로, 본 연구에서는 작업환경인 버의 특성들을 비전 장치로 사전에 인식한 후 이 특성과 연관된 숙련자의 작업동작을 추출하는 것이다. 이 방법은 숙련자가 버의 특성을 먼저 인식한 후 작업동작을 수행한다. 인식 단계에서는 버의 특징 값들을 비전으로 측정하여 버의 성질을 해석한다. 그리고 작업동작 단계로는 숙련자의 시범작업으로부터 힘 신호를 얻어서 공구에 작용하는 동력학을 해석한다. 두 개의 결과를 연상 매핑(mapping)에 적용하여 로봇 제어치를 얻는다. 이러한 연상 매핑은 신경회로망(neural network)을 사용하므로 로봇 제어기에 쉽게 결합할 수 있다. 따라서 숙련

자의 기술을 로봇에 효과적으로 전달시킬 수 있다.

2. 디버링 숙련기술의 모델

디버링 작업은 버의 특성들이 매우 다양하게 변하므로 로봇으로 작업할 때는 상호간에 심한 접촉력이 발생한다. 이러한 상황을 극복하려면 버의 특징을 예측하면서 공정상의 기준 궤적을 선택하는 능력을 로봇에 가르쳐야 한다. 이러한 능력은 디버링 작업동작을 충분히 습득한 숙련자들에게서 쉽게 찾을 수 있다. 그러나 숙련자들이 습득하고 있는 디버링 기술을 해석하여 로봇을 프로그래밍하는 작업은 어렵다. 특히 디버링 작업은 숙련자가 작업을 시행하기 전에 공작물 위에 버를 시각 정보로부터 확인하여 그들의 특성을 충분히 파악한다. 버의 특성을 인지한 숙련자는 버의 형상에 따른 특징을 기억하면서 디버링 작업의 필요한 전략들을 연상하게 된다. 이때 시시각각 변하는 버의 특성에 대해 숙련기술은 연상기억으로 해석할 수 있다. 그러므로 숙련기술은 버의 특징과 숙련자가 제어할 전략사이에 관계의 모델이 성립된다. Fig. 1은 숙련자의 시범을 통한 디버링 기술을 신경망으로 전달하는 모형도를 보여 주고 있다.

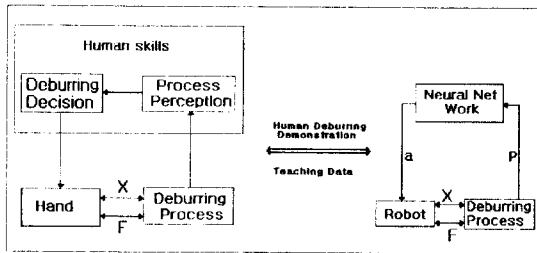


Fig.1 Transfer of human deburring skill to Neural Net controller using teaching data

이렇게 버의 특징과 제어 요소들의 관계를 연상기억 장치인 신경회로망으로 구성하면 쉽게 로봇 제어기에 통합시켜 사용할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 버의 상태에 따라서 작업전략을 표현하는 능력을 숙련기술로 정의하고, 숙련자의 작업시범을 통한 티칭법을 사용하여 숙련기술을 로봇에 전달하는 방법을 제안한다.

3. 숙련자의 제어전략

디버링의 목적은 공작물의 표면 또는 모서리에 초과한 재료를 제거하여 원하는 표면을 매끈하게 만드는 것이다. 디버링 작업에서 숙련자가 공작물 표면과 공구에 손상 없이 버를 제거할 수 있는 기술은 공구를 쥐는 강성과 함께 공구의 이송속도를 효율적으로 조정하는 것이다. 이러한 구조를 로봇 제어 장치로 구성하면 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 숙련자의 시범으로부터 버의

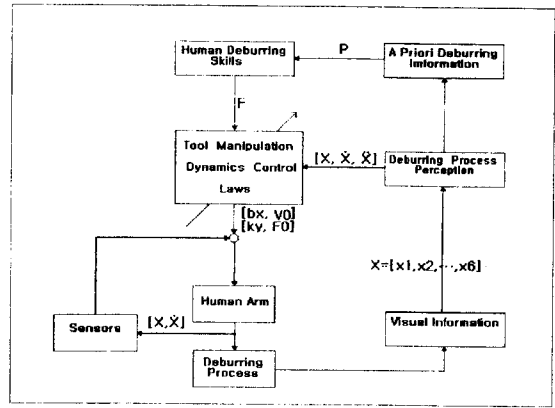


Fig.2 A schematic model of deburring expert skills

특성에 따른 동역학 식을 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$F_x = m_x \cdot \ddot{X} + b_x \cdot \dot{X} + k_x \cdot X + V_0 \quad (1)$$

$$F_y = m_y \cdot \ddot{Y} + b_y \cdot \dot{Y} + k_y \cdot Y + F_0 \quad (2)$$

여기서, F_x, F_y 는 각각 이송방향, 법선방향에 주어지는 힘을 나타내며, m, b, k 는 관성, 댐퍼, 강성계수를 각각 나타낸다. 주로 디버링에서는 버들의 특성에 따라서 숙련자의 제어 전략이 이송력과 법선력으로 표현되므로, 숙련자의 제어전략의 요소는 위 동역학식 내에 파라미터들로 정의할 수 있다. 본 연구의 목표는 버의 특징에 관련된 제어전략을 확인하는 방법을 보여 주는 것이다. 숙련자로부터 인식한 버에 대한 작업전략인 이송력과 법선력을 시범작업에서 획득한다.

4. 실험 및 결과

4.1 실험 장치 설치

실험장치 X-Y축 테이블 위에는 공작물 고정대와 CCD카메라가 설치되어 있다. 디버링 장치 끝에는 공구가 장치되고, 공구와 디버링 장치 사이에 힘(Force/Torque) 센서가 결합되어 있다. X-Y축 테이블에 각축은 DC모터로 구동되며, 모터 뒤에 엔코드가 부착되어져 있다. 모터 구동에는 서보 드라이브(servo drive)와, 컨트롤러(controller), 그리고 PC가 마스터(master)로서 연결되어 있다. 공작물의 시편은 두께 6-10mm, 재질 SS41연강판이며, 가스 절단 시에 생성되는 버들을 이용하였다. 힘 센스는 디버링 시범작업을 할 때 공구에 작용되는 X축과 Y축 방향에 힘과 모멘트를 측정한다. 디버링 시범 동안에 포스신호들은 약 6msec로 샘플링 된다. 이러한 연속적인 실험을 비전 시스템에서 버 특징 인식 과정과 디버링 실험 과정의 두 단계로 구분하여 실험하였다.

4.2 버 특징 인식

버를 찾고 인식하는 부분에서는 비전 시스템을 사용한다. 먼저 LUT(Look Up Table)을 사용하여 실시간에 이진화처리를 행한다. 그리고 이진화 처리된 화상에서 일정한 관심 영역 이하는 모두 무시하여 라벨링을 행한다. 작업 경로 상에 존재하는 버에 대한 정보는 화상 처리 시스템에서 얻는다. 이 정보는 버의 유무, 크기, 면적, 그리고 변화량을 얻는다. 이 장치로 버의 복잡하고 다양한 형상과 특징들을 얻고 해석을 하 어떤 하나의 버높이를 비전장치에서 얻고 해석한 버의 형상과 변화량의 예를 나타내어 보여 주고 있다.

4.3 작업 시범 과정

숙련자는 시범 작업을 수행한다. 디버링 동안에 숙련자는 버의 특성들을 관찰하면서, 디버링 되는 소리들을 듣고 연삭 불꽃을 확인하며 최적의 조건을 적용한다. 이때 공구의 디스크 끝이 원하는 표면에 위치되도록 유지시키면서 최적의 이송속도를 연삭하여 진행한다. 한 번만에 원하는 표면 또는 모서리를 얻도록 버를 제거한다. Fig.3에서 (a)는 버의 높이를 나타내고, (b)는 버를

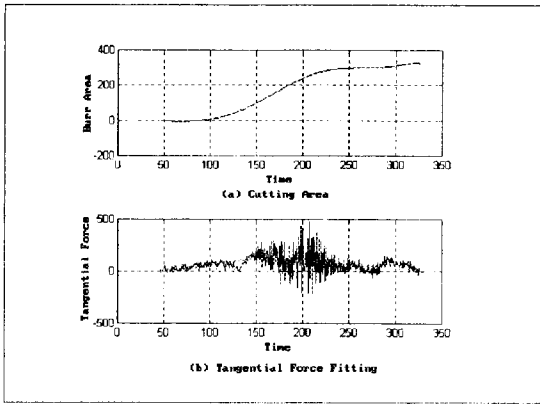


Fig. 4 Metal Remove Rate(MRR) and tangential force signals

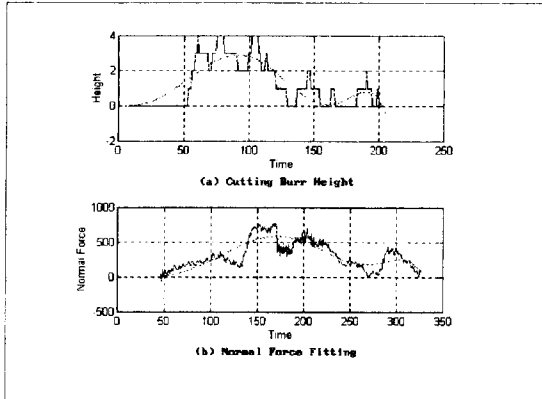


Fig. 3 Burr height and normal force signals

디버링할 때 법선방향으로 작용되는 힘을 힘 센서로부터 습득된 신호를 보여 주고 있다. 이 그림은 버높이의 변화량에 따른 힘의 변화량을 보여 주고 있다. Fig. 4의 (a)는 비전장치에서 확인된 버높이 형상을 해석한 재료 제거율(MRR)을 나타내고, (b)는 숙련자가 동일한 버를 디버링할 때 접선방향으로 작용하는 힘을 힘 센서로부터 습득된 신호를 보여 주고 있다. Fig.4(a)에서의 기울기의 크기 변화는 MRR의 변화임을 알 수 있다.

4.4 신경회로망의 학습

디버링의 숙련기술은 신경회로망의 학습을 통하여 나

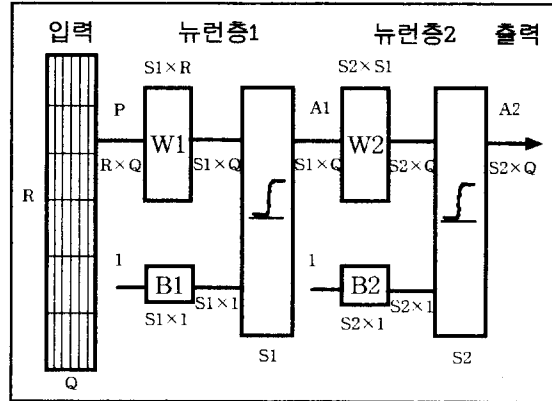


Fig. 5 The structure of neural network

타낼 수 있다. Fig. 5는 본 논문에서 사용한 신경회로망의 전체 구조를 나타낸다. 역전파(backpropagation)네트워크로서 2층(three layers)으로 구성되고 로그-시그모이드(log-sigmoid) 전이함수를 사용하였다. 입력으로는 버의 특징 값들이 주어지고 출력으로는 연삭매핑 값으로 숙련자의 시범작업 중에 각 방향으로의 작용력 주어진다. 뉴런의 갯 수는 30개를 사용한 결과 충분한 수렴을 하였다.

4.5 실험 결과

Fig. 6와 Fig. 7은 학습이 완료된 함수를 이용하여 다른 종류의 버를 입력한 결과를 보여주고 있다. Fig. 6은 법선방향으로 숙련자가 인식하는 버(아래쪽 그림)에 대한 디버링 예측 작용력(윗쪽그림)을 보여 주고 있다. 입력으로는 버의 특징인 버높이($y_1 = y$), 버높이변화율($y_2 = \dot{y}$), 그리고 2차변화율($y_3 = \ddot{y}$)이 주어졌다. 버 특징의 입력에 대한 출력의 연상된 예측 힘은 버의 상태에 따라서 각각의 법선력을 나타내고 있다. 결과적으로 숙련 작업자가 버의 특성을 인지하여 적합한 힘을

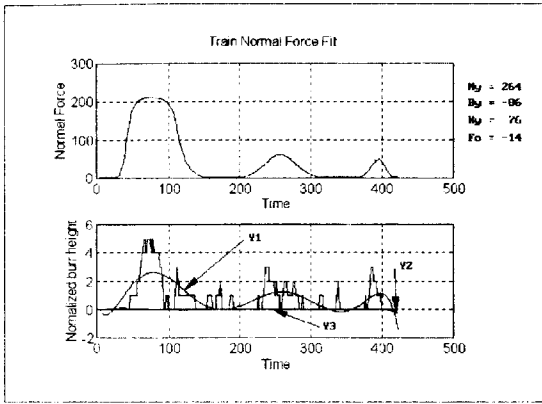


Fig. 6 The result of normal force from input burr property vector

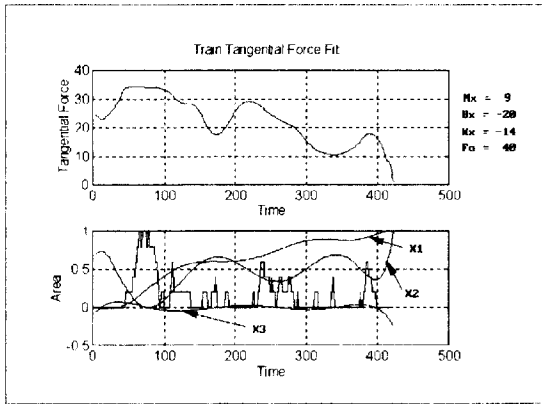


Fig.7 The result of tangential force from input burr property vector

연상하는 숙련기술을 신경회로망으로 연상매핑 할 수 있다. 이렇게 예측된 힘에 대한 동역학식의 파라미터들은 최소 자승법으로 추정하여 확인하여 나타냈다. 이 파라미터의 값은 제어전략으로 쓸 수 있다. Fig. 7은 접선방향으로 숙련자가 인식하는 버(아래쪽그림)에 대한 디버링의 예측 작용력(윗쪽그림)을 보여 주고 있다. 입력으로는 버의 특징인 버면적의 변화율 즉 절삭면적의 변화율($x_1 = \Delta A$), 절삭이송비($x_2 = \dot{x}$), 그리고 이송변화율($x_3 = \ddot{x}$)이 주어진다. 입력에 대한 출력의 예측 힘은 버의 상태에 따라서 일정한 크기의 예측 접선력을 나타내고 있다. 결과적으로 숙련 작업자가 버의 특성을 인지하여 적합한 힘을 연상하는 숙련기술을 신경회로망으로 연상매핑 시킬 수 있다. 마찬가지로 동역학식에 파라미터들은 최소 자승법으로 추정하여 확인하여 나타냈다. 이 파라미터의 값을 제어전략으로 쓸 수 있다. 이러한 결과는 다른 종류의 버에도 실행한 결과 버의 특징에 따라 충분한 결과를 나타내었다. 연상 매핑 기능을 가진 숙련자의 기술을 신경회로망으로 사용하므로써

법선과 접선방향에 예상되는 힘을 충분히 나타내었다. 이러한 신경회로망은 로봇에 쉽게 통합시킬 수 있다. 이상에서 보여 주듯이 신경회로망을 이용하므로 디버링 숙련기술을 로봇에 전달시킨다.

5. 결론

본 연구는 디버링 작업에서 숙련자가 인지하는 버의 특성을 비전 시스템으로부터 인식하는 방법을 확인 하였다. 그리고 숙련자가 버의 특성에 따라 제어전략을 나타내는 능력과 유사하게, 신경회로망을 사용하여 숙련기술을 낼 수 있는 방법을 개발하였다. 이는 인식된 버의 특징들을 가지고 법선과 접선방향에 예측 힘을 나타냈으며, 그 결과로 제어전략 파라미터 값을 추정했다. 결론적으로 비전 시스템에서 인식한 버의 특징을 가지고 디버링 작업에 알맞은 제어 전략을 연상시킬 수 있는 신경회로망을 구성하였다. 이 신경회로망을 이용하면 숙련자의 기술을 로봇에 충분히 전달할 수 있다.

참고문헌

1. 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 ,1992, pp132-140
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 1992 pp1467 - 1474
3. 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 1994, pp572 - 577
4. M.G. Her and H. Kazerooni "Automated Robotic Deburring of Parts Using Compliance Control" Journal of Dynamic System,Measurement,and Control ,Vol 113 ,1991, pp60-66
5. D.S.Ahn, H.S.Cho,K.Ide,F.Miyazaki and S.Arimoto "Learning Task Strategies In Robotic Assembly System" Robotica Vol 10,1992 pp409-pp418
6. 신상운, 갈축석, 강근택, 안두성, "비전 센서와 TSK형 퍼지를 이용한 디버링 공정의 자동화", Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 13. No. 3. 1996, pp. 102 - 109
7. Pavan Sikka and Brean J. McCarragher, "Stiffness-based Understanding and Modeling of Contact Tasks by Human Demonstration" Proceeding on the 1997 IEEE/RSJ International conference on Intelligent Robot and System, pp464-470