논 문 한국정밀공학회지 제15권 제9호 (1998년 9월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, No. 9, September 1998.

비젼을 이용한 디버링 기술을 로봇에 전달

신 상 운*, 안 두 성**

Transfer Deburring Skills to Robot Using Vision System

S. W. Shin*, D. S. Ahn**

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 corresponding 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(비젼 시스템), expert's skills(숙련기술), deburring(디버링)

1. 서 론

오늘날 산업용 로봇(robot)의 응용은 가공분야에 까지 시도되고 있다. 이런 작업에 로봇의 적용은 매우 어려우며 그것은 말단장치(end-effectors)와 주변환경(environment)간에 작용하는 힘들을 조절해야 하기 때문이다.[1] 이와 같이 힘을 감시하고 제어하는 것은 매우 중요하다. 만약 말단장치와 공작물간에 접촉 힘을 잘못 감지하고 제어하면 어느 한쪽에 중대한 손상이 일어난다. 그리고 이런 응용에 로봇을 프로그램 하여 실행하기보다는 로봇에 가르치는 교시법(teaching method)이 필요하다. 현재 로봇의 교시 수준은 비교적 간단한 작업에서 연속적인 위치 궤적들이 기준 입력으로 주어지면 로봇이 뒤따르는 교시와 재현(teach and playback)의 정도이다. 이 보다 인간의 의향과 목표를 확인하고 인간의 기술을 로봇에 교시하는 방법이 요구된다.[2] 그리고 이러한 연구는 진행되고 있다. Asada와 Asari들은 로봇에 수 작업의 컴플라이언스(compliance)를 전달하는 방법을 제안하여, 로봇이 인간의 동작을 따르게 하였다.[3] 그리고 Liu와 Asada들은 공구를 다루는 기술을 습득하고 표현하는 방법을 연구하였다. 디버링(deburring) 작업의 동력학 모델(model)을 이용하여 모델의 특징 값들로부터 작업전략(task strategy)을 연관시켰다. 이러한 교시법은 디버링 공정 중에 일어나는 몇 가지 신호를 측정하여

* 부경대학교 기계공학과 대학원
** 부경대학교 기계공학과

버의 특징인 크기와 경도 등을 추정하였다.[4] 그러나 측정 동안에 잡음(noise)과 외란(disturbance)들은 추정 값에 많은 영향을 주었고, 파라미터(parameter)의 추정 시간 때문에 실제 적용은 어렵다. 결과적으로 동적 모델의 정보를 이용한 숙련기술의 확인은 한계가 있다. 특히 디버링 작업은 불확실하고 변화가 심한 버를 제거하는 작업이므로, 작업공간(work space)의 정보는 사전에 정확하게 파악되어져 상호 작용의 목표가 정의 되야 한다. 이렇게 복잡한 디버링 기술은 숙련자로부터 쉽게 찾을 수 있다. 숙련자는 버의 특징을 시각 기능으로 사전에 인식한 후 작업전략을 예측하는 기술을 가졌다. 본 연구는 이러한 기술을 나타내는 것이다. 실험에서 사용하는 비젼 시스템(vision system)은 버의 특징 값들을 해석하여 버의 특징과 상태를 나타낸다.[5] 그리고 숙련자의 시범 작업에서 디버링 작업전략은 공구에 작용하는 힘으로 나타난다. 이러한 힘은 동력학 해석으로 제어전략(control strategy)의 상태를 나타낸다. 이와 같은 두 상태를 연상사상(associative mapping)으로 나타낸 것을 디버링 기술이라 한다. 본 연구에서 연상사상의 기구로는 신경회로망을 이용한다. 이것은 로봇 제어기에 쉽게 통합되므로 디버링 기술은 로봇에 전달된다.

2. 디버링 숙련기술의 전달

디버링 작업을 할 때 버(burr)의 특성들은 매우 다양하게 변하므로 로봇과 공작물간에 심한 접촉력이 발생한다. 그러므로 로봇은 이러한 상황을 잘 적응하려면 버의 특징들을 예측하면서 공정상의 기준 궤적을 선택하는 능력을 가져야 한다. 따라서 이러한 능력은 디버링 작업을 충분히 습득한 숙련자들로부터 쉽게 찾을 수 있다. 이들은 디버링 작업을 실행하기 전에 공작물 위에 버를 시각 정보로부터 확인하여 그것의 특성을 충분히 파악한다. 버의 특성을 인지한 숙련자는 버의 형상에 따른 특징을 기억하면서 디버링 작업에 필요한 전략들을 연상하게 된다. 그러므로 디버링 기술은 버의 특징으로부터 숙련자가 경험적으로 습득한 작업전략 사이에 연상사상으로 모델 된다. 따라서 숙련기술은 다양하게 변하는 버의 특징에 대하여 작업전략을 나타내는 연상사상으로 정의된다. 그러나 숙련자들이 습득하고 있는 디버링 기술은 해석적으로 프로그램 하는 것은 매우 어렵다. Fig. 1은 숙련자의 시범으로 얻어진 디버링 기술이 신경회로망으로 학습되는 모형도를 보여 주고 있다. 이와 같이 버의 특징 값인 P와 작업전략인 a와의 관계를 연상사상 기구인 신경회로망으로써 구성한다. 이 기구는 로봇 제어기에 쉽게 통합시킬 수 있다. X는 공구가 활동하는 상태변수이며 F는 공구에 작용하는 힘을 나타난다. 본 연구는 버의 특징에 따라서 경험적인 작업전략을 표현하는 능력을 디버링 숙련기술이라 정의하며, 교시방법은 숙련자의 시범(expert's demonstrations)이다.

3. 디버링 작업의 전략

디버링 작업의 작업목표와 제어전략은 두 방향에서 각각 가진다. Fig. 3에서 나타낸 접선방향으로 작업목표는 일정한 재료제거율(metal removal rate)이며, 제어전략은 공구의 이송속도다. 그리고 법선방향으로 작업목표는 매끈한 표면이며, 제어전략은 공구를 잡는 컴플라이언스(compliance)이다. 특히 각 방향에 버의 불규칙한 변화는 공구와 공작물간에 예측할 수 없는 접촉력이 발생함으로써 작업목표를 벗어날 수 있다. 이와 같이 디버링 작업은 원하는 제거율에 따라서 공구의 이송속도가 결정되며, 또한 요구되는 표면에 따라서 알맞은 컴플라이언스가 허

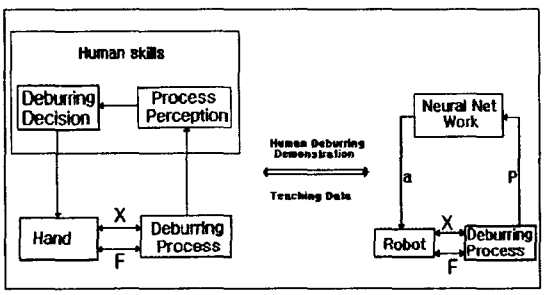

Fig. 1 Transfer of human deburring skill to Neural Net controller using teaching data

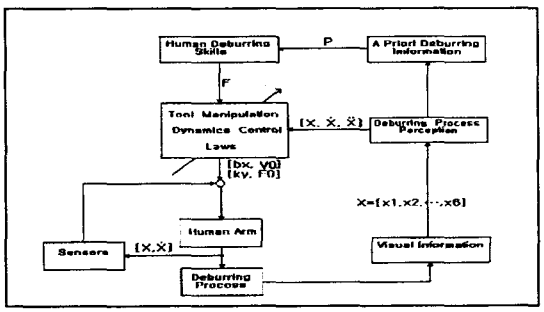

Fig. 2 A schematic model of deburring expert skills

용된다. 따라서 가공 버의 두 방향에 따른 힘과 운동의 관계를 특성화하여 나타내면 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

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

위 식에서 m, b, k 는 각각 관성, 점성, 강성계수들이다. F_x 는 버의 제거율에 필요한 접선력이며, F_y는 매끈한 표면을 얻는데 요구되는 법선력이다. V_0는 접선방향에 기준 속도며, F_0 는 법선에 작용하는 기준 힘이다. 그리고 X, $\dot{X}$, $\ddot{X}$ 와 Y, $\dot{Y}$, $\ddot{Y}$는 각 방향에 상태변수를 나타낸다. 이와 같이 두 방향에 작업목표는 공구를 잡고 운동함으로 이룬다. 이렇게 매달린 장치의 동력학 식은 임피던스 모델(impedance model) 식과 같다. 그리고 모델식의 파라미터들은 버의 특징 값에 따라 변한다. 실제 작업 공구가 공작물의 모서리를 따라 진행될 때, 버의 크기와 상태의 변화에 따라서 공구에는 반력의 변화로 나타난다. 이러한 힘은 수학적인 해석이 불가능하다. 그러므로 우리는 숙련자의 시범으로부터 접촉력을 얻고, 위 식(1), (2)에서 파라미터들을 추정할 수 있다. 이러한 파라미터는 제어전략(control strategy)이다. 제어전략은 숙련 작업자의 시범에서 일어난 힘을 가지고 간접적으로 확인하며, 파라미터 $[m_x, b_x, k_x, V_0]$와 $[m_y, b_y, k_y, F_0]$들은 제어전략의 요소라 한다. 숙련자의 제어전략 요소는 위 동력학식 내에 파라미터들로 정의할 수 있다. 본 연구의 목적은 버의 특징과 관련된 제어전략을 확인하며, 그리고 버의 특징으로부터 작업전략을 연상하는 디버링 숙련기술을 만드는 것이다. 위의 상태변수들은 디버링 공정의 특성을 분석하면 버의 특징인 X는 재료 제거율이며 재료 제거율의 비는 $\dot{X}$, $\ddot{X}$로 나타낸다. 그리고 또 다른 버의 특징인 Y는 공작물의 표면을 따르는 공구의 위치이며 위치 비율은 $\dot{Y}$, $\ddot{Y}$ 로 나타낸다. Fig. 2는 숙련자가 인식한 버에 대해 작업전략을 예측하여 접선력과 법선력을 연상하는 디버링 숙련기술의 모형도를 보여 주고 있다.

4. 디버링 공정의 모델링

Fig.3은 디버링 실험의 모형도이며, 공구 홀더(holder)와 디스크(disk)의 접촉상태 그리고 버의 특징들이 작업공간에서 2차원으로 나타냈다. 직교좌표공간(cartesian space)에서 로봇의 좌표계{R}공작물의 좌표계{W}와 기본 좌표계{B}가 표시된다. 공작물은 기본 좌표계와

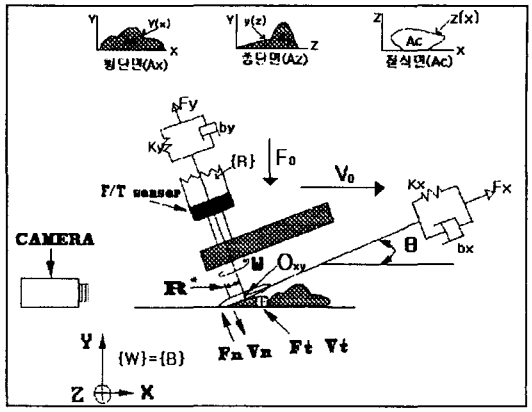

Fig. 3 A schematic diagram of a deburring process

동일하다. 또한 강성도(stiffness)와 댐퍼(damper)는 로봇 암(arm)과 공구 홀더에 합성하여 나타냈다. 일반적으로 장치의 강성도는 스프링 역할을 하며 주로 주축에 따라 위치한다. 그리고 댐퍼는 강성도들과 일치되지 않지만 여기서는 단순화하여 같이 나타냈다. 디버링 전 후에 발생되는 버의 특징들도 그림으로 나타냈다.

4-1. 재료 제거율의 동력

디버링 공정의 상태를 식으로 나타내기 위해 우선 디버링 공정의 버를 기하학적인 측면에서 고려한다. 공구의 디스크는 공작물의 버에 접촉되어 디버링 된다. 이 때 재료 제거율(MRR) Q는 아래 식으로 쓴다.

$$Q_{(t)} = A_z * V_n \quad (3)$$

A_z는 디스크가 접촉된 반점의 면적으로 버폭($z_{(x)}$)과 버폭의 높이($y_{(z)}$)로 나타낸다.

$$A_z = z_{(x)} * \frac{y_{(z)}}{\sin\theta} \quad (4)$$

그리고 V_n는 접선속도 ($\dot{x}$), 법선 속도 ($\dot{y}$) 그리고 공구 디스크의 상하 운동의 각속도 ($\dot{\theta}$)의 항으로 나타낸다.

$$V_n = \sin\theta * \dot{x} + \cos\theta * \dot{y} + R^* * \dot{\theta} \quad (5)$$

식(5)에 R^*경우는 디스크의 실제 접촉반점의 중심에서부터 디스크 중심까지의 거리이며 R^*는 다음과 같다.

$$R^* = R - \frac{y_{(x)}}{2\sin\theta} \tag{6}$$

R^*는 버길이의 높이 $[y_{(x)}]$에 비례함을 알 수 있다. 이와 같이 버의 기하학적인 해석으로부터 재료 제거율은 아래 식으로 유도할 수 있다.

$$Q = \frac{z_{(x)} * y_{(z)}}{\sin\theta}[\sin\theta * \dot{x} + \cos\theta * \dot{y} + (R - \frac{y_{(x)}}{2\sin\theta})\dot{\theta}] \tag{7}$$

다음은 재료 제거율과 공구의 동력 소비율과의 관계를 고려해 보면 다음과 같이 나타낼 수 있다. 먼저 디스크가 버에 접촉되어 절삭될 때 재료 제거율은 공구의 동력 소비율에 비례한다. 즉 $Q \propto (T_d - T_{th})$으로 T_{th}는 공회전 동력이며, T_d는 디버링 동안에 발생되는 동력으로 아래의 실험식으로 가정할 수 있다.

$$Q_{(t)} = k_1 \cdot T_d - k_2 \tag{8}$$

여기서 k_1, k_2의 비례상수는 디버링 작업이 정상상태(steady state)일 때의 값들이다. 결과적으로 버의 기하학적인 특성에 따라서 재료 제거율과 공구 동력소비율의 관계를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_d = \frac{z_{(x)} \cdot y_{(z)}}{k_1 \cdot \sin\theta}[\sin\theta \cdot \dot{x} + \cos\theta \cdot \dot{y} + (R - \frac{y_{(x)}}{2\sin\theta}) \cdot \dot{\theta} + k_2] \tag{9}$$

4-2. 디버링 공구의 동력

디버링 작업을 진행하는 동안 공구의 동력 소비율 T_t는 접선력 F_t와 접선속도 v_t로 나타낸다.

$$T_t = v_t \cdot F_t \tag{10}$$

접선속도 v_t는 디스크 각속도 ω와 디스크의 접촉반점 중심까지의 거리 R^*로 나타낼 수 있다.

$$v_t = \omega \cdot R^* \tag{11}$$

접선력 F_t는 법선력 F_n과 마찰계수 μ의 곱이다.

$$F_t = \mu \cdot F_n \tag{12}$$

위 식들을 다시 쓰면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_t = (\omega \cdot R^*)(\mu \cdot F_n) \tag{13}$$

Fig. 3에서 공구에 작용은 컴플라이언스는 z축을 중심으로 하는 모멘트(M)를 나타낼 수 있다.

$$M = R^* \cdot F_n \tag{14}$$

또한 모멘트는 스프링 상수 k_s와 공구 홀더의 상 하방향으로 운동하는 각 변이와 관련된다.

$$M = k_s \cdot (\theta_0 - \theta) \tag{15}$$

위 식을 조합하면 식 (13)을 다시 나타낼 수 있다.

$$T_t = \mu \cdot \omega[k_s(\theta_0 - \theta)] \tag{16}$$

μ는 마찰계수, ω는 디스크의 각 속도(angular velocity), k_s는 디스크 각 변위의 강성계수, θ_0는 디스크의 초기각, θ는 작업 동안에 디스크가 일어선 각을 나타낸다. 결론적으로 위 식은 디버링 중에 공구의 소비동력을 나타낸다.

4-3. 흡수 동력과 소비 동력의 확인

식(9)는 버의 기하학적인 측면에서 유도된 결과로 버가 제거될 때 공구의 동력을 흡수함으로써 흡수동력으로 정의하고, 식(16)은 디버링 시 공구에서 발생하는 동력으로 소비동력으로 정의한다. 즉 버의 흡수동력과 공구의 소비동력은 같음 $(T = T_d = T_t)$을 알 수 있다. 두 식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T = \mu \cdot \omega[k_s(\theta_o - \theta)] = \frac{z_{(x)} * y_{(z)}}{k_1 \cdot \sin\theta}[\sin\theta * \dot{x} + \cos\theta * \dot{y} + (R - \frac{y_{(x)}}{2\sin\theta})\dot{\theta} + k_2] \tag{17}$$

디버링 작업이 과도상태를 지나 정상상태에서 실행되는 것으로 가정하여 해석하면, 즉 $\dot{\theta} = 0$이므로 최종적인 디버링 모델 식을 다음과 같이 제안할 수 있다.

$$T = P_1 * \dot{x} + P_2 * \dot{y} + P_3 \qquad (18)$$

결과적으로 식(18)에서 보여 주듯이 숙련자는 디버링 작업을 할 때 버의 기하학적인 특징에 알맞게 공구의 소비동력을 적용함으로써 질량과 에너지 보존의 기본 원리로 나타난다. 여기에 파라미터의 항의 P는 버의 고유한 특징들과 관련되어져 있음을 알 수 있다. 먼저 P_1은 공구의 이송비에 관련된 파라미터로써 이송방향에 따르는 버의 특징들과 관계가 있음을 알 수 있다. 즉 $z(x)$(버폭)과 $y(z)$(버폭의 높이함수)의 곱으로 나타난다. 따라서 숙련자의 디버링 작업은 접선 방향으로 적용하는 이송비에 영향을 주는 특징들은 버의 폭에서 얻을 수 있는 종단면적(A_z)에 관계가 됨을 분명히 나타내고 있다. 여기서 이송방향에 제어전략 요소인 V_0는 버의 종단면적 A_z와 관련되며, 또한 b_x에 영향을 주는 요소는 버길이에 따르는 버 높이의 변화량인 $\Delta y_{(x)}$에 반비례하는 인식을 가진다. 다음 P_2는 공구를 잡고 법선 방향의 강성도에 관련된 파라미터로서 법선 방향으로 따르는 버의 특징들과 관계가 있음을 알 수 있다. 파라미터 $[(z_{(x)} \cdot y_{(z)})/\tan\theta]$항을 다시 정리하여 쓰면 $[A_z/\tan\theta]$로 나타낼 수 있다. 즉 이는 버의 절삭면적 (A_c)에 영향을 받고 있음을 나타낸다. 그리고 법선 방향으로 제어활동 계수인 F_0는 버의 절삭면적 (A_c)와 관련시켜 연상한다. 또한 강성계수 k_y에 영향을 주는 요소는 버폭 ($y_{(x)}$)또는 버폭의 길이변화량인 $\Delta y_{(x)}$을 인식함을 알 수 있다. 끝으로 P_3는 $z_{(x)}$인 버폭과 관련되고 $[y_z/\sin\theta]$를 정리하면 버높이 $y_{(x)}$로 나타낼 수 있다. 이들은 주로 버의 재질과 연관된다. 위의 공정모델 식에서 분석한 파라미터 항들은 모두 버의 특징 값들과 관련되어져 해석된다. 결과적으로 이전 장에서 언급한 바와 같이 디버링 기술은 접선방향에 이송속도의 조절과 법선 방향에 강성도의 조정을 나타내는 것으로 이것들과 관계되는 버의 특징은 다음과 같이 줄여서 나타낼 수 있다.

$$P \equiv [z_{(x)},\ y_{(z)}.A_z,\ \Delta y_{(x)},\ y_{(x)},\ A_c,\ \Delta z_{(x)}]^T \qquad (19)$$

이러한 버의 특징들은 비젼 시스템에서 충분히 얻는다. 그러므로 로봇은 버의 특징들을 해석하므로써 버의 특징을 인지하는 능력으로 정의한다.

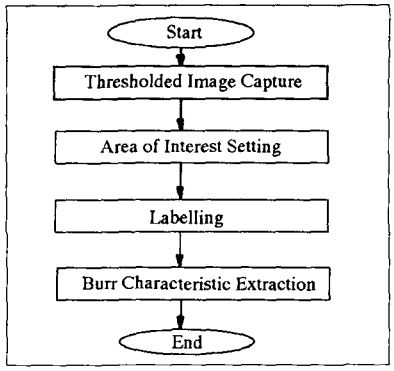

Fig. 4 Procedure of image processing

5. 디버링 작업 과정

5-1. 버 특징 인식 과정

버를 찾고 인식하는 부분은 비젼 시스템이다. Fig. 4는 버의 화상처리(image processing) 순서를 보여 주고 있다. 먼저 LUT(Look Up Table)을 사용하여 이진화 처리를 행한다. 처리된 화상에서 일정한 관심 영역을 설정하고 라벨링(labeling)을 행한다. 작업 경로 상에 존재하는 버에 대한 정보는 버의 유무, 크기, 면적, 그리고 변화량들이다. 그러므로 비젼 시스템은 버의 특징 값들 해석하여 인식하는 단계까지를 정의한다.

5-2. 실험 장치

Fig. 5에서 실험장치를 보여준다. 이 장치는 본 실험실에서 제작한 디버링 로봇으로 PAL Ⅱ (production automatic laboratory Ⅱ)라 명한다. 그리고 로봇의 형식은

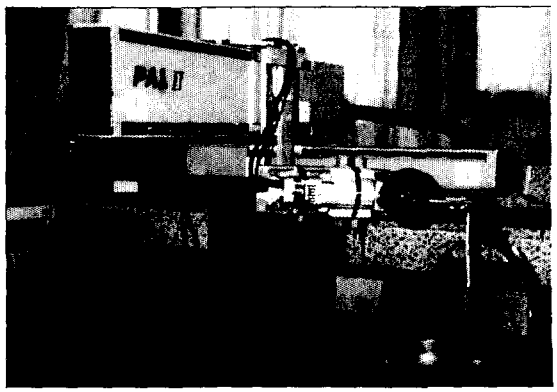

Fig. 5 Deburring robot (PAL Ⅱ)

직교 매니퓰레이터(cartesian manipulator)이다. 작업 테이블(table) 위에는 공작물 고정 대와 CCD카메라(camera)가 설치되 있다. 로봇 암 끝에는 공구를 고정하고, 로봇 말단장치와 디버링 공구 사이에 힘 센서(*force/torque sensors*)가 있으며 포스 콘트롤러(force controller)와 연결된다. PAL Ⅱ의 각 축은 브러쉬리스 모터(blushless motor)가 구동되며 모터에는 엔코드(encoder)가 있다. 모터 제어용 서보 드라이브(servo drive)와 화상처리 장치들이 컴퓨터와 구성되어 있다. 공작물의 시편은 두께 6-10mm, 재질 SS41 연강판에 가스(gas) 절단으로 생성된 버들을 이용하였다. 힘 센서는 디버링 시범작업에서 공구에 작용되는 X축과 Y축 방향에 힘을 측정한다. 디버링 시범 동안에 포스(force) 신호들은 약 6msec로 샘플링(sampling) 하였다. 실험 순서는 비젼 시스템에서 버 특징을 해석하고, 디버링 시범작업으로부터 힘이 측정되므로 두 단계로 구분하여 실행하였다.

5-3. 디버링 작업자의 시범작업

숙련자의 시범 순서를 나타내면, 우선 숙련자는 버의 특성들을 충분히 관찰한 후, 디버링 소리를 들으며 연삭 불꽃을 확인하면서 최적의 작업조건을 적용한다. 이때 공구 디스크 끝은 바라는 표면에 위치하도록 공구를 유지시킨다. 그리고 원하는 재료 제거율이 되도록 최적의 이송속도를 연상하면서 진행한다. 이런 결과 Fig. 6의 (a)는 버의 높이를 나타내고, (b)는 버를 디버링 할 때 법선 방향으로 작용력을 힘 센스로부터 습득된 신호를 보여 주고 있다. 이 그림은 버높이의 변화량에 따른 힘의 변화량을 보여 주고 있다. Fig. 7의 (a)는 비젼장치에서 확인된 버 높이 형상을 해석한 재료 제거율을 나타내고, (b)는 숙련자가 동일한 버를 디버링 할 때 접선방향으로 작용력을 힘 센서로부터 습득된 신호를 보여 주고 있다. Fig. 6(a)에서의 기울기의 크기 변화는 재료 제거율의 변화를 나타낸다.

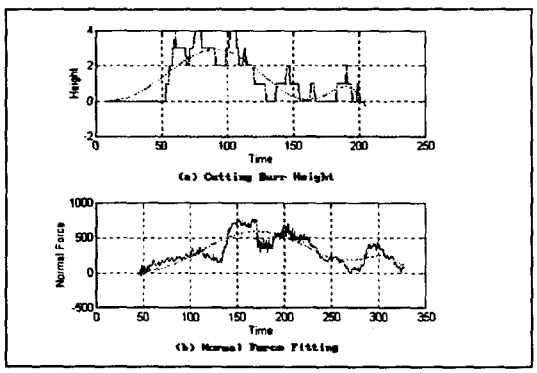

Fig. 6 Burr height and normal force signals

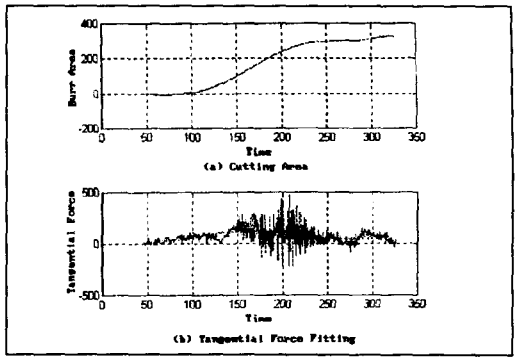

Fig. 7 Metal Remove Rate and tangential force signals

6. 신경회로망의 학습

숙련자의 연상사상은 디버링의 숙련기술이므로 이 기구로 신경회로망을 이용한다. 즉 신경망의 학습을 통하여 숙련기술을 나타낼 수 있다. Fig. 8은 신경회로망의 전체 구조를 나타낸다. 역전파(backpropagation) 네트워크로서 2층(two layers)으로 구성되고 로그-시그모이드(log- sigmoid) 전이함수를 사용하였다. 입력으로는 버의 특징 값들이 주어지고 출력 값으로는 숙련자의 시범작업 중에 각 방향으로의 작용된 힘들이 주어진다. 30개의 뉴런을 사용한 결과 충분히 수렴하였다.

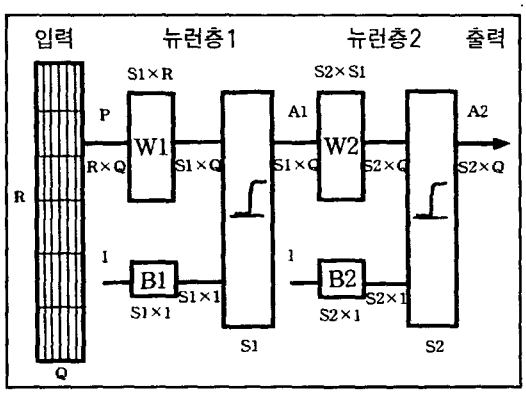

Fig. 8 The structures of neural network

6-1. 학습 결과

Fig. 9와 Fig. 10은 학습이 완료된 함수를 이용하여 다른 버의 특징을 입력한 결과를 보여주고 있다. Fig. 9는 법선 방향으로 숙련자가 인식하는 버의 특징[아래쪽 그림]에 대한 디버링 작업전략(task strategy)[위쪽 그림]을 보여 주고 있다. 입력으로는 버의 특징인 버높이 $(y_1 = y)$.버높의 1차 변화율 $(y_2 = \dot{y})$,그리고 2차 변화율 $(y_3 = \ddot{y})$ 이 주어졌다. 버 특징의 입력에 대한 출력 값은 연상된 힘으로써 각각의 버에 따라서 법선력을 나타내고 있다. 이러한 결과는 숙련 작업자의 시각기능으로 버의 특성을 인지하므로 그것에 따른 적합한 작업전략의 힘을 연상한다. 이것과 똑 같은 방법으로 신경회로망을 이용하여 연상사상(associative mapping)할 수 있다. 이것을 디버링 숙련기술이라 한다. 그리고 예측된 힘에

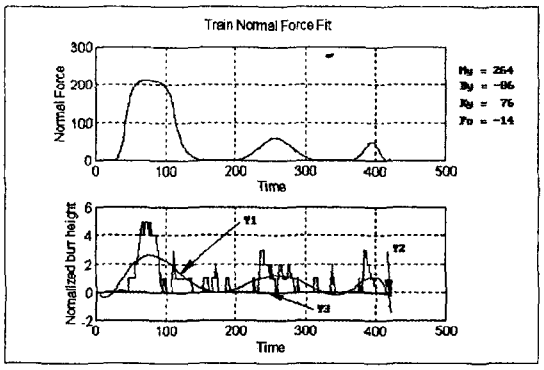

Fig. 9 The result of normal force from input burr property vector

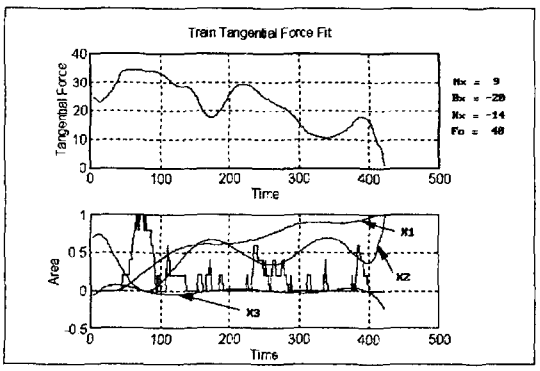

Fig. 10 The result of tangential force from input burr property vector

대한 동역학식의 파라미터들은 최소 자승법(least square method)으로 추정하여 나타냈다. 이 파라미터의 값은 제어전략(control strategy)으로 쓸 수 있다.

Fig. 10은 접선방향으로 숙련자가 인식하는 버[아래쪽 그림]에 대한 디버링 작업전략[위쪽 그림]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. 버 특징의 입력에 대한 출력 값은 연상된 접선력으로써 버의 특징에 따라서 연상된 힘을 나타내고 있다. 또한 법선의 상태와 마찬가지로 숙련 작업자가 버의 특성을 인지하여 적합한 힘을 연상하는 숙련기술은 신경회로망으로 연상사상 시킬 수 있다. 마찬가지로 동역학식에 파라미터들은 최소자승법으로 추정하며, 이 파라미터의 값을 제어전략으로 쓸 수 있다. 이러한 두 방향에 대한 학습결과를 가지고 특징 값이 다른 버들에 적용한 결과 버의 특징에 따라서 법선 및 접선의 작업전략을 나타내었다. 그결과는 Fig. 9와 Fig. 10에서 특징이 다른 3종류의 버에 대하여 법선과 접선으로 디버링 작업전략을 추정하여 보여준다. 결론적으로 디버링 숙련자의 숙련기술은 신경회로망을 사용하여 법선과 접선방향에 예상되는 힘을 충분히 나타내었다. 이러한 신경회로망은 로봇 제어기에 통합함으로써 디버링 숙련기술은 로봇에 전달된다.

7. 결 론

본 연구는 디버링 작업에서 숙련자가 인지하는 버의 특성을 비젼 시스템으로부터 인식하는 방법을 확인하였다. 그리고 숙련자가 버의 특성에 따라서 작업전략을 나타내는 능력과 유사하게 신경회로망을 사용하여 숙련기술을 나타낼 수 있는 방법을 개발하였다. 즉 버의 특징들을 인식하며 법선과 접선방향에 예측되는 힘을 나타냈다. 또한 작업전략인 예측된 힘으로부터 제어전략의 요소 값을 추정했다. 결론적으로 디버링 공정의 해석으로부터 얻어진 버의 특징들은 비젼 시스템에서 인식하며, 디버링 작업에 알맞은 작업전략을 연상사상시켰다. 이러한 연상사상의 기구는 신경회로망으로 구성하였으며, 신경회로망에서 학습의 결과를 이용하면 모든 버의 작업전략을 나타낼 수 있었다. 그러므로 디버링 숙련자의 기술은 신경회로망을 사용하여 법선과 접선방향에 예상되는 힘을 충분히 나타냈다. 이러한 신경회로망은 로봇 제어기에 통합됨으로 써 디버링 숙련 기술은 로봇에 충분히 전달되었다.

참 고 문 헌

1. 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, pp. 132-140, 1992.
2. D. S. Ahn, H. S. Cho, K. Ide, F. Miyazaki and S.Arimoto "Learning Task Strategies In Robotic Assembly System," Robotics Vol.10 pp. 409-418, 1992.
3. H. Asada and Y. 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, pp. 1269-1274, 1988.
4. S. Liu and H. Asada, "Transferring Manipulative Skills to Robots: Representation and Aquisition of Tool Manipulative Skills Using a Process Dynamics Model," ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 114, No. 2, pp. 220-228, 1992.
5. M. G. Her and H. Kazerooni "Automated Robotic Deburring of Parts Using Compliance Control," Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol. 113, pp. 60-66, 1991.
6. 신상운, 갈축석, 강근택, 안두성, "비전 센서와 TSK형 퍼 지를 이용한 디버링 공정의 자동화," 한국정밀공학회 제13권, 제3호, pp. 102 - 109, 1996.