

# 비전과 힘센서를 이용한 불균일 버의 디버링 가공

## Deburring of Irregular Burr using Vision and Force Sensors

최규종 · 김영원 · 신상운 · 안두성

G. J. Choi, Y. W. Kim, S. W. Shin and D. S. Ahn

**Key Words** : Vision Sensor(비전센서), Force Sensor(힘센서), Deburring(디버링), Impedance(임피던스)

**Abstract** : This paper presents an efficient control algorithm that removes irregular burrs using vision and force sensors. In automated robotic deburring, the reference force should be accommodated to the profile of burrs in order to prevent the tool breakage. In this paper, (1) The profile of burrs is recognized by vision sensor and followed by the calculation of reference force, (2) Deburring expert's skill is transferred to robot. Finally, the performance of robot is evaluated through simulation and experiment.

### 1. 서 론

디버링 작업은 공작물의 표면 또는 모서리에 초과한 재료를 제거, 원하는 표면을 만드는 것으로 기계가공 공정에서 제품의 가치를 결정하는 중요한 공정 가운데 하나이다. 이러한 버 제거 작업은 열악한 작업환경 상태를 낳고, 인명 및 산업 재해의 소지를 안고 있다. 또한 복잡한 작업조건을 충족 시켜야 하는 동시에 다양한 작업 목표를 요구하기 때문에, 버 제거의 자동화는 매우 어려운 문제이다.

디버링은 불확실하고 변화가 심한 특징을 가진 버를 제거하는 작업이므로 로봇을 이용하여 버를 제거하기 위해서는 버의 특성들과 그에 따른 접촉력과 관계를 알아야만 한다. 이러한 관계는 인간의 디버링 시범작업으로부터<sup>6)</sup>, 버의 형상을 측정할 수 있는 비전센서(vision sensor)와 시범작업 시 공구에 가하는 힘을 측정할 수 있는 힘센서(force sensor)를 이용하여 알아낼 수 있다<sup>3)</sup>. 본 논문에서는 인간의 시각기능과 가장 유사하며 다른 어떠한 센서 보다 불규칙한 버의 형상을 비교적 쉽게 얻어낼 수 있는 비전센서를 이용함으로써, 디버링 작업 시에 버의 위치와 형상에 대한 정보를 측정하여 기준힘(reference force)을 계산한다. 비전센서를 이용하여 계산되어지는 기준힘은 실제

작업 시에 피드포워드(feedforward)입력으로 사용한다<sup>4)</sup>. 따라서 로봇이 디버링 작업을 수행할 때 비전센서에서 측정된 버의 위치와 형상에 따라 적절하게 기준힘을 조절함으로써 로봇과 공구의 파손을 방지하여 효율적인 디버링 작업을 수행할 수 있다.

본 논문에서는 로봇과 환경사이의 관계를 로봇의 움직임과 접촉력에 대한 임피던스 관계로 모델링하고<sup>1)</sup>, 비전센서를 이용하여 버에 대한 접촉력을 계산하여 로봇의 디버링 작업 수행 시 기준힘으로 주어지고, 시범작업을 통한 디버링 작업에 대한 인간의 숙련기술을 나타내는 목표 임피던스 파라미터(target impedance parameter)를 사용하여 제어하였다<sup>3)</sup>. 먼저 시뮬레이션(simulation)을 통해 검증하고, 다음으로 본 실험실에서 직접 제작한 디버링 전용로봇을 사용하여 실험을 하였다.

### 2. 디버링 작업의 모델링

디버링 작업에서 버의 형상은 매우 불균일하므로 로봇으로 작업할 때는 상호간에 심한 접촉력의 변화가 발생한다. 따라서 버의 특성을 예측하면서 접촉력을 조절할 수 있는 능력을 로봇이 지녀야한다. 이러한 버 제거 작업 시에 인간의 시범작업을 통하여 불균일 버에 대한 접촉력을 사전에 학습함으로써 실제 디버링 작업에서 적절한 기준힘을 정의 할 수 있다. 본 논문에서는 비전센서를 이용하여 버의 특성에 대한 정보를 측정하고, 힘센서를 이용하여 접촉력을 측정함으로써 디버링 작업에

접수일 : 1998년 12월 7일

최규종, 김영원, 신상운 : 부경대학교 대학원

안두성 : 부경대학교 기계·자동차공학부

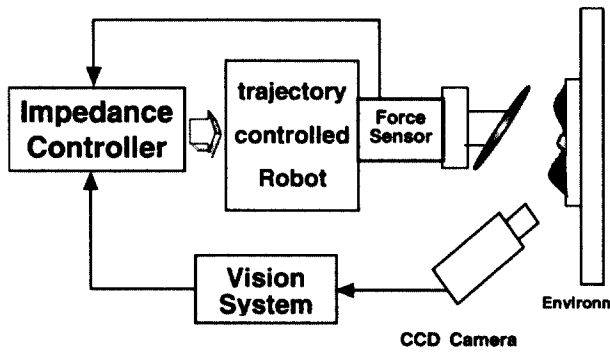


Fig. 1 Global structure of controller

필요한 기준힘을 계산한다. 그리고 궤적제어가 가능한 로봇(trajectory controlled robot)에 버의 형상에 따른 접촉력을 제어하기 위한 추가적인 임피던스 제어기를 설치하여 디버링 작업을 수행한다. Fig. 1은 제어기의 전체적인 구조를 나타낸다.

2.1 임피던스 모델링

임피던스 제어의 목적은 말단부의 운동과 말단부/환경사이의 접촉력에 대한 동적인 관계를 유지하는 것이다. 이때 접촉력은 로봇의 말단부가 목표 위치에 도달하기 위하여 환경에 대해 물리적으로 구속되어지는 양에 관계된다. 디버링 작업 시 로봇의 말단부가 공작물에 접촉하거나 버를 만나게 되면 접촉력이 발생한다. 따라서 디버링 작업을 할 경우 임피던스 제어기를 사용함으로써 이러한 접촉력을 제어한다. 본 논문에서는 로봇의 움직임, 즉 공구의 운동에 따라 버가 제거될 때 발생하는 접촉력과 관계를 제어함으로써 디버링 작업을 한다. 이것은 버를 효과적으로 제거할 수 있는 인간 숙련자의 시범작업을 통하여 버의 형상과 힘과의 관계를 알아내어 기준힘에 대한 정보를 얻는다. 그리고 시범작업을 통하여 디버링 작업에 대한 임피

던스 파라미터를 구할 수가 있다<sup>3)</sup>. 따라서 이러한 정보를 바탕으로 로봇을 사용하여 디버링 작업을 수행한다. 이때의 목표 임피던스(target impedance)는 식(1)과 같이 정의한다.

$$M(\ddot{X} - \ddot{X}_r) + B(\dot{X} - \dot{X}_r) + K(X - X_r) = E \quad (1)$$

여기서,  $M, B, K$ 는 각각 관성(inertia), 댐핑(damping), 강성(stiffness)계수를 나타낸다. 그리고  $E$ 는  $F_r - F$ 이고,  $F_r$ 은 기준힘이며  $F$ 는 접촉력이다. 그리고  $X$ 는 매니플레이터의 위치이고  $X_r$ 은 기준궤적이 된다. 식(1)은 기준 입력을 이용하여 로봇의 움직임을 제어함으로써 사용자가 정의한 기준힘을 추종하는 것이 목적이다. Fig. 2는 디버링 작업에 대한 로봇-작업환경의 임피던스 모델링을 나타낸다.

접선방향의 목표는 버의 형상 정보에 따라 재료 제거율(metal remove rate : MRR)을 적절하게 변화시키는 것이다. 즉 비전센서에서 예측된 기준힘( $F_r$ )을 유지하는 것이다. 접선방향의 최종적인 목표 임피던스를 파라미터 공현도<sup>3)</sup>에 따라 식(2)와 같이 정의한다.

$$B(\dot{X} - \dot{X}_r) = E \quad (2)$$

식(1)에서 디버링 작업 시 접선방향으로는  $M, K$ 의 영향을 거의 받지 않기 때문에 식(2)와 같이 목표 임피던스를 정의 할 수 있다. 따라서 접선방향의 임피던스를 속도와 힘의 에러관계로 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$b(v - v_r) = e \quad (3)$$

디버링 작업에서 접선방향으로의 작업환경은 버 제거량에 관계가 되고, 버제거량은 식(4)와 같이 면적과 속도의 함수로서 정의한다.

$$MRR = (\text{champ Area} + \text{Burr Area}) \times v = A \times v \quad (4)$$

$A$  : 제거되는 양의 총면적

따라서 접선방향으로의 접촉력은 식(5)와 같이 쓸 수가 있다.

$$f = G \cdot MRR = G \cdot A \cdot v \quad G : \text{비례상수} \quad (5)$$

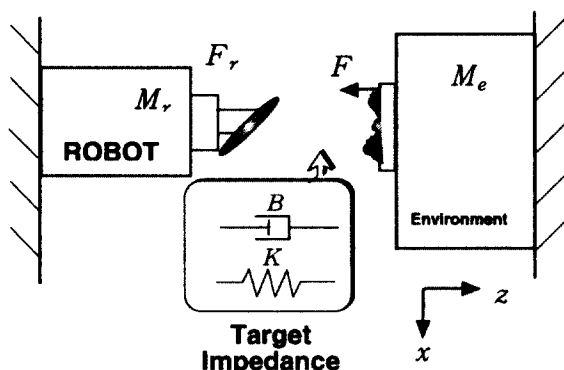


Fig. 2 Impedance of Robot & Environment

식(5)를 속도 항으로 다시 쓰면 식(6)과 같다.

$$v = \frac{f}{AG} = \frac{f_r - e}{AG} \quad (6)$$

여기서 식(6)을 식(3)에 대입하면 식(7)과 같이 된다.

$$b\left(\frac{f_r - e}{AG} - v_r\right) = e \quad (7)$$

$$\frac{f_r}{AG} - v_r = \frac{e}{b} + \frac{e}{AG} = \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{AG}\right)e \quad (8)$$

식(8)을 정리하면 식(9)와 같은 에러함수가 된다.

$$e = \left(\frac{AGb}{b + AG}\right)\left(\frac{f_r}{AG} - v_r\right) \quad (9)$$

이러한 에러 함수를 이용하여 접선방향으로 힘 에러를 0으로 하기 위해서  $v_r$ 을 식(10)과 같이 주면 된다.

$$v_r = \frac{f_r}{AG} = \frac{f_r}{f} v \quad (AG = \frac{f}{v}) \quad (10)$$

식(3)에 의해 로봇의 입력이 식(11)과 같이 됨을 알 수 있다.

$$v_c = v_r + \frac{e}{b} \quad (11)$$

최종적으로 입력 속도는 식(12)와 같이 된다.

$$v_c = \frac{f_r}{f} v + \frac{e}{b} \quad (12)$$

즉, 접선방향으로는 기준힘을 추종하기 위해서 식(12)와 같은 속도입력을 주면 된다. 이러한 제어 구조를 Fig. 3에서 보여주고 있다.

## 2.2 비전센서의 이용

버를 제거하는 작업에서 로봇이 버를 만나게 되면 접촉력이 증가하게 된다. 이렇게 갑자기 증가하는 접촉력 때문에 공구의 파손이나 공작물의 파손 등의 예측하지 못하는 상황이 발생할 수가 있다.

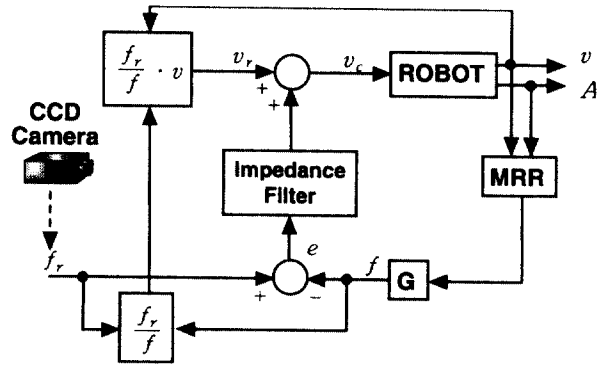


Fig. 3 Structure of Tangent Direct Controller

따라서 이러한 상황에 적절히 대응할 수 있도록 비전센서를 이용하여 사전에 버를 인식하여 로봇의 피드포워드 입력으로 사용한다. Fig. 4는 비전센서를 이용하여 환경의 정보를 얻기 위해 윤곽선 처리된 영상이다. 그림에서 보는 바와 같이 비전센서로부터의 입력 영상을 이용하여 기준 좌표계를 설정하고 이에 대한 환경의 위치와 버의 형상에 대한 정보를 얻는다. 결과적으로 사전에 비전센서를 이용하여 환경에 대한 정보, 즉 기준좌표계에 따른 버의 위치와 형상을 얻을 수가 있다. 이러한 공작물의 위치, 버의 위치 그리고 버의 형상에 대한 정보를 사용하여 디버링 작업 시에 발생하는 접촉력을 제어하기 위한 기준힘을 변화시켜준다.

### 2.2.1 버의 위치 정보

비전센서를 이용하여 환경에 대한 정보를 얻을 수가 있다. 먼저 작업공간상의 Fig. 4에서와 같이 비전센서로부터 환경에 대한 영상을 얻는다. 이렇

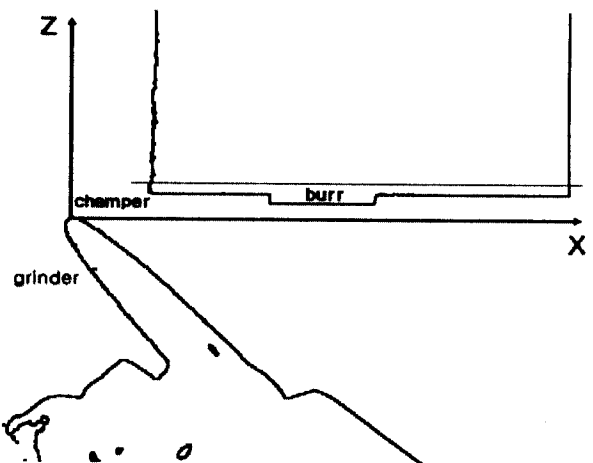


Fig. 4 Environment information using vision sensor

게 입력된 영상을 작업자가 공구의 움직임에 맞게 기준 좌표계를 설정하면 그에 대한 공구의 위치, 공작물의 위치 그리고 버의 위치에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이렇게 비전센서를 이용하면 환경에 대한 알지 못하는 정보를 바로 구할 수가 있다. 즉 비전센서를 이용하여 공작물의 좌표값과 버의 좌표값을 얻을 수가 있다. 본 논문에서는 이러한 비전센서를 이용하여 비접촉상태에서 접촉상태로 천이되는 과도기 상태에서 공구의 충격과 공구가 갑자기 버를 만나는 경우의 접촉력을 감소시킬 수 있다.

### 2.2.2 버의 형상 정보

기준 좌표계를 설정하면 그 좌표계에 대한 버의 형상인 높이·길이 등을 측정할 수가 있다. 이러한 버의 형상을 측정함으로써 디버링 작업 시에 버의 형상과 접촉력과의 관계를 알아 낼 수가 있다. 이러한 관계는 전문가의 시범작업 시에 비전센서로부터 버의 형상을 측정하고 힘센서를 이용하여 접촉력을 측정하여 신경회로망을 사용하여 버의 형상에 따른 접촉력과의 관계를 학습을 시키게 된다. 학습이 된 신경회로망은 버의 형상과 힘과의 연상 사상관계(association mapping relation)를 이룬다. 이러한 관계를 바탕으로 디버링 작업 시에 버의 형상에 따른 기준힘을 얻을 수가 있다. 따라서 기준힘은 식(13)과 같은 방법으로 정의하게 된다.

$$f_r = f_c + f_b \quad (13)$$

여기서  $f_c$ 는 챔퍼링(chamfering) 시의 힘이고,  $f_b$ 는 버를 만나게 되면 입력되는 피드포워드 입력이 된다. 즉, 처음에 작업은 챔퍼링을 하기 위해  $f_c$ 의 힘을 유지하면서 작업을 하지만 버를 만나게 되면 버의 형상정보에 따른 힘 입력  $f_b$ 가 들어가

게 된다. 이러한  $f_b$ 는 숙련가의 시범작업으로부터 버의 형상에 대한 접촉력과의 학습된 신경회로망을 사용하여 구할 수가 있다. 따라서 디버링 작업 시에 비전센서로부터 버에 대한 형상의 정보를 얻어서 기준힘을 변화시켜서 작업을 하게 된다. 이렇게 비전센서를 이용하여 사전에 환경의 정보를 얻어냄으로서 디버링 작업 시에 공구와 환경 사이에 발생할 수 있는 과도한 접촉력을 조절할 수 있다.

### 3. 시뮬레이션

2축 직교좌표축 로봇을 이용하여 2가지 종류의 버에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 5는 버와 로봇에 대한 좌표계를 나타낸다. 첫 번째 버는 20mm-20mm-20mm의 직사각형으로 챔퍼의 깊이는 1mm이고 버의 높이는 2mm인 강이며, 두 번째 버는 챔퍼의 깊이는 1mm이고 버는 크기가 일정하지 않은 불균일한 형태인 강으로 시뮬레이션을 하였다. 첫 번째 버의 경우는 챔퍼링 시에는 2N의 기준힘을 주게 되고, 버와 접촉 시에는 버의 크기에 따른 3N의 힘을 피드포워드 입력으로 주어 디버링 작업을 수행한다. 두 번째 버의 경우에는 챔퍼링 시에는 3N의 힘을 유지하면서 챔퍼링을 하고 공구가 버와 접촉하게 되면 버의 크기에 따른 2N의 힘을 피드포워드 입력으로 주어 5N의 힘을 유지하면서 버를 제거하는 작업이다. Fig. 6, 8은 접선방향으로 기준힘을 유지하기 위한 속도를 나타낸다. Fig. 7, 9는 접선방향의 작업 시의 접촉력을 나타내는데 사용자가 정의한 힘을 잘 추종한다는 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션 결과 불균일한 버 제거 작업 시에도 본 논문에서 제시한 방법이 타당하다는 것을 보여 주고 있다.

### 4. 실험

디버링 작업 시 위치와 힘 신호는 각각 SM232 서보모터(servo motor)에 부착된 엔코더(encoder)와 BL.Autotec사의 6축 힘/토크센서(Force/Torque Sensor)에서 측정하고, 제어기로는 PMAC 1.5 LITE를 사용하였다. 본 논문에서는 높이 2mm인 계단형태의 버(step burr)를 디버링하는 실험을 하였다. 비전센서를 통해 예측된 기준힘은 버의 형상에 따라 각각 2N, 5N으로 계산되었으며, 각각의 공정이 천이(transition)되는 순간에서 인간의 기술인 목표 임피던스를 나타내는 것을 볼 수 있다.

먼저, 비전정보를 이용하여 기준힘을 계산한 후 실험을 수행하였으며, 다음으로 비전 정보의 타당

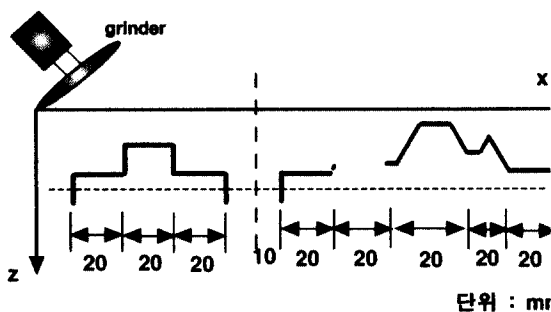


Fig. 5 Burr profile and environment coordinate

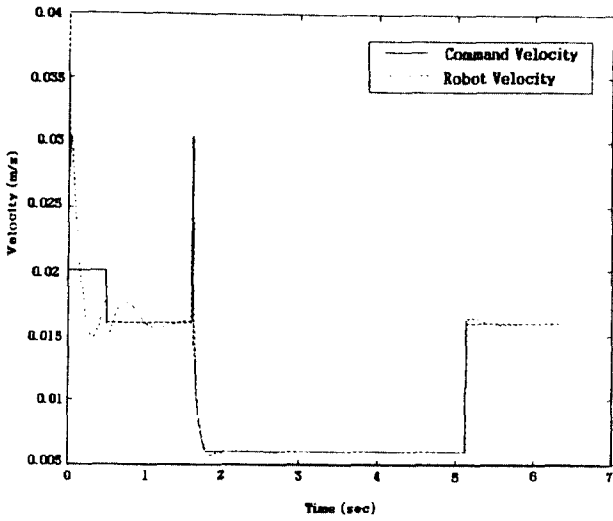


Fig. 6 The velocity of tangent direction

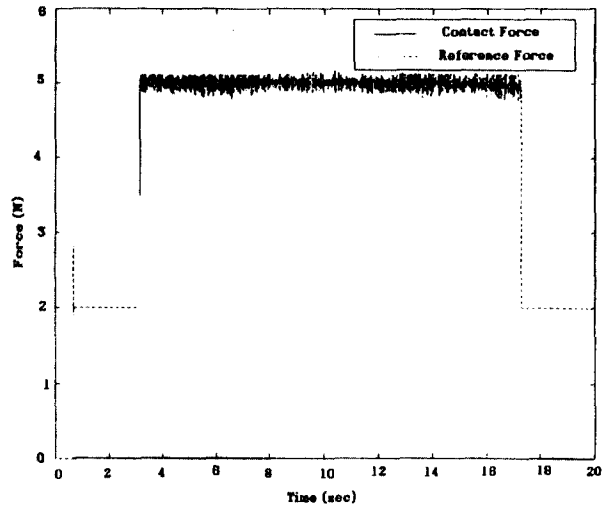


Fig. 9 The force of tangent direction

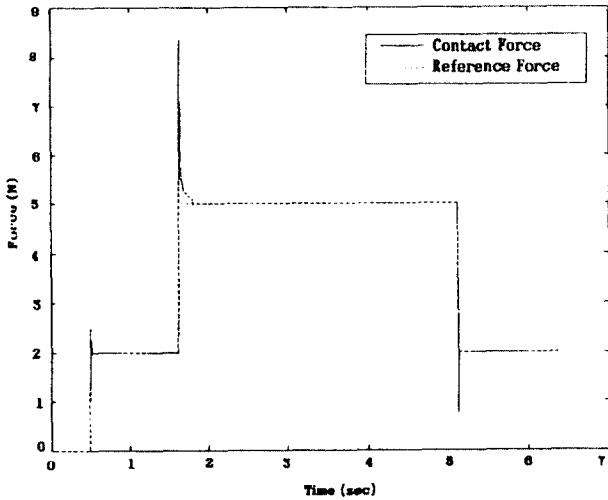


Fig. 7 The force of tangent direction

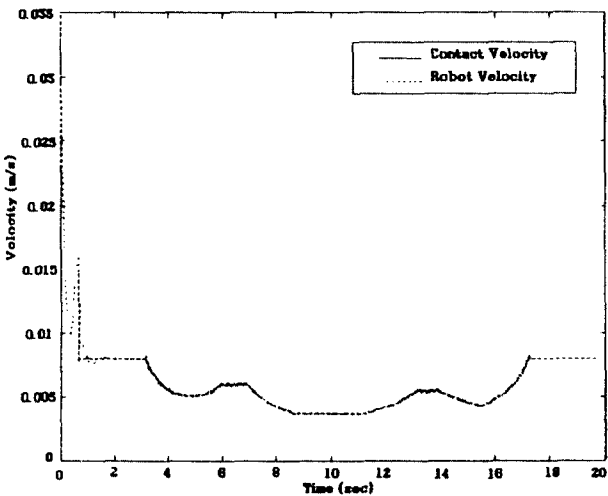


Fig. 8 The velocity tangent direction

성을 보이기 위해 비전정보를 사용하지 않고 디버링 작업을 수행하였다. 실험결과 그래프에서 알 수 있듯이, Fig. 10과 같이 비전정보를 이용하여 계산한 기준힘을 사용하였을 때에는 공구의 파손 방지 및 효과적인 디버링 작업을 수행할 수가 있었지만 그렇지 않았을 때에는 Fig. 11과 같이 긴 작업시간으로 인한 작업의 비효율성 및 버를 만났을 때 너무 낮은 기준 힘으로 인한 불안정한 특성을 나타내고, Fig. 12와 같이 과도한 기준힘은 공구의 파손 및 버닝(burning)현상이 발생하게 한다. 따라서, 본 논문에서 제시한 방법인, 비전센서에서 측정된 버의 형상 정보로써 기준힘을 계산하여 디버링 작업을 수행한다는 것은 타당하다고 볼 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 디버링 작업을 효과적으로 수행하기 위해서 비전센서와 힘센서를 이용하여 인간의 시범작업으로부터 획득할 수 있는 버의 형상에 대한 접촉력과 관계와 인간의 디버링 숙련기술을 나타내는 임피던스 파라미터를 이용하여 로봇에 전수하여 디버링 작업을 수행하였다. 그 결과, 로봇이 디버링 작업을 수행할 때 비전센서를 이용하여 기준힘을 추정했으며, 또한 비접촉상태에서 접촉상태로 천이되는 과도기상태(transition state)에서 인간의 숙련기술을 나타내는 목표 임피던스 관계를 나타내는 것을 볼 수 있다. 결론적으로, 인간이 눈으로 보고 손으로 느끼면서 디버링 작업을 수행하듯이 로봇 또한, 비전센서를 통해 보고 힘센서를 통해 느끼면서 디버링 작업을 수행하는 것이 인간의 작업의도에 가장 근접한 방법이며, 본 논문에서 그 타당성을 시뮬레이션과 실험으로 증명하였다.

후 기

본 연구는 97년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME-97-E-08)에 의하여 연구되었으며 이에 감사 드립니다.

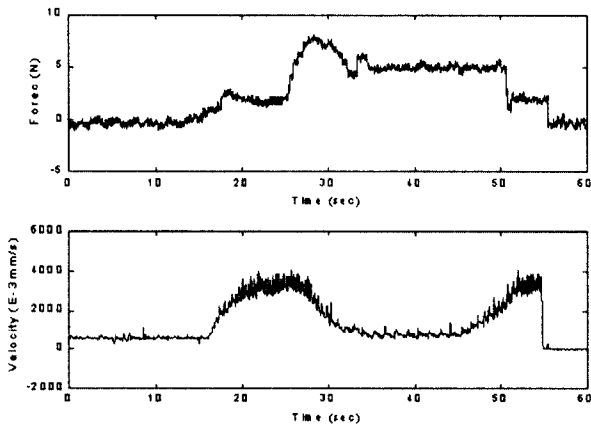


Fig. 10 The control of tangent direction with vision information

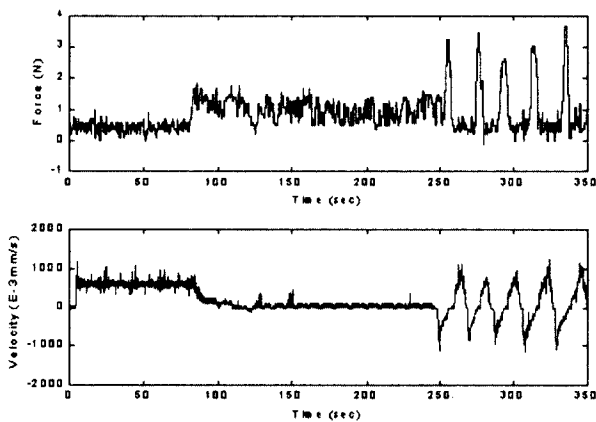


Fig. 11 Experiment 1 : Without vision information

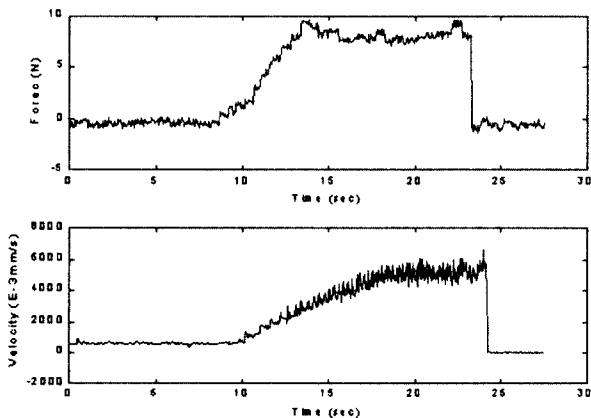


Fig. 12 Experiment 2 : Without vision information

참고문헌

1. Neville Hogan, "Impedance Control : An Approach to Manipulation: part I -III", ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 107, pp. 1~23, 1985
2. H. Seraji and R. Colbaugh, "Force Tracking in Impedance Control", Journal of Robotics Research, Vol. 16, No. 1, pp. 97~117, 1997
3. 신상운, 최규중, 이규상, 김영원, 안두성, "비전과 힘 센서를 이용한 디버링 숙련기술의 임피던스 모델링", 대한기계학회 '97년도 추계학술대회 논문집, pp. 639~644, 1997
4. Y. tsumaki, H. Naruse, D.N.Nenchev, "On force Control in Human Physical Skill", Proc. IROS, pp. 458~463, 1997
5. Ken-ichiro Shimokura, Sheng Liu "Programming Deburring Robots Based on Human Demonstration with Direct Burr Size Measurement", Proceedings of the 1992 IEEE International Conference Robotics and Automation, pp. 572~577, 1994
6. Haruhiko Asada, 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, pp. 1269~1274, 1988
7. S. Liu, 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