

미지형상 표면의 연삭 작업을 위한 로봇 제어·계측 시스템 개발

박근우* · 이중훈* · 최병오** · 이민기***
(1999년 8월 4일 접수)

Development of Robot Control and Measurement for Unknown Geometric Surface Grinding

Kun Woo Park, Jung Hun Lee, Byung Oh Choi and Min Ki Lee

Key Words: Unknown Geometric Surface(미지형상 표면), Double Parallel Manipulator(2단 병렬기구 머니플레이터), Vision Sensor(비전 센서), Current Sensor(전류 센서)

Abstract

This paper introduces the control and measurement of a double parallel robot manipulator applied for unknown geometric surface grinding. A measurement system is developed to recognize a grinding path by a vision camera and to observe a grinding load by a current sensor. With the measured fusion information, an intelligent controller identifies the unknown geometric surface and moves the robot along the grinding path with a constant grinding load.

1. 서론

연삭 작업은 일반적으로 NC 공작기계에 의해 행해지는데 이들에 대한 시스템 구성과 언어 개발에 대해서는 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 로봇은 극히 일부분야에 적용되고 연구도 미비한 실정이다. Stepien et al.⁽¹⁾과 Kazerooni et al.⁽²⁾ 등이 작업 공정을 모델링하여 제어기를 구성했으며, Whitney et al.⁽³⁾는 비전을 이용하여 용접 비이드의 크기를 측정하고 크기에 따라 힘을 제공함으로써 두 철판 이음새에 생성된 비이드의 연삭 작업을 자동으로 실시했다. 그러나 이 방법은 절삭량을 제어하는 것으로 틀에 과부하가 부여될 위험이 있다. 이를 방지하기 위해 Her와 Kazerooni⁽⁴⁾는 법선 방향으로 일정한 힘을 유지하고 접선 방향으로 절삭량에 따라 이송속도를

제어하는 강성과 유연성을 모두 제어하는 방식을 택했다. 그러나 위의 경우는 다 관절 로봇을 적용한 사례로 가공 시 변형을 줄이고 안정성을 높이기 위한 제어 시스템 개발에 주안점을 두고 있다.

Lee et al.⁽⁵⁾는 병렬-직렬 복합형 로봇 머니플레이터를 프로펠러 연삭 작업에 적용했다. 프로펠러 블레이드 주물의 형상을 알 수 없으므로 Fig. 1과 같이 접촉 probe으로 블레이드 표면의 높이를 측정하고 이를 설계형상과 비교하여 연삭 깊이를 결정했다. 그러나 위치 오차에 따라 절삭부하의 변동이 크므로 틀이 끼어 회전하지 않거나 파손된다. 또한, 과중한 힘으로 지그에 변형이 일어나 연삭 정밀도를 벗어날 수 있다. 따라서 형상표면을 자동으로 인식하고, 높낮이에 따라 연삭기를 들어올리고, 밀어내려 일정한 연삭 부하를 유지하는 지능제어 개발이 절실히 필요하다.

본 연구에서는 병렬기구의 문제점을 보완한 2단 병렬기구 머니플레이터(Double Parallel Manipulator, DPM)⁽⁶⁾를 적용해 연삭 작업을 실시한다. 미지형상 표면의 연삭 경로를 추적하기 위해 3차원 형상을 X-Y 수평면과 X-Z 수직면으로 분리하

* 창원대학교 대학원 제어계측공학과
** 회원, 한국기계연구원 산업기술연구부
*** 회원, 창원대학교 제어계측공학과
E-mail : minkilee@sarim.changwon.ac.kr
TEL : (0551)279-7553 FAX : (0551)262-5064

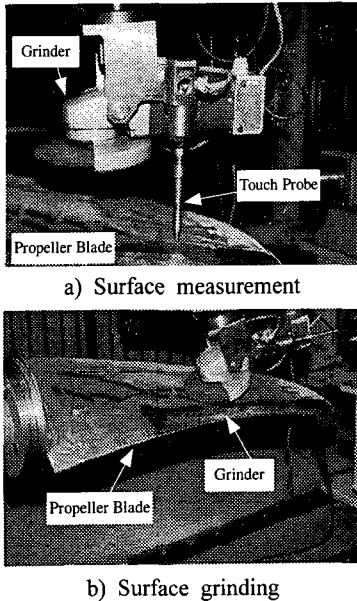


Fig. 1 Propeller blade grinding

고 각 면의 경로를 측정 및 예측한다. 수평면의 경로는 비전 센서가 인식하고, X-좌표에 대한 Y-좌표를 칼만 필터를 이용해 미리 예측한다. 동시에 수직면에 나타나는 경로의 높낮이는 가공 톨에 제공되는 전류를 이용하여 인식하고, X-좌표에 대한 Z-좌표는 Lagrange 보간법에 의해 예측한다. 예측된 점으로 가공 톨을 이동시키기 위해 접선(tangential), 측선(lateral) 및 법선(normal) 방향의 속도를 찾아낸다. 3-방향의 속도를 더한 합성 속도를 가공 톨의 속도로 하고, 이를 생성하기 위한 각 리니어 액추에이터의 속도를 자코비안⁽⁷⁾에 의한 속도 변환으로 구한다. 이때 가공 톨의 현재위치를 알아내기 위한 순방향 기구학 해석⁽⁸⁾도 실시간으로 처리한다.

본 논문에서는 비전 및 부하 센서에 연삭 경로의 측정방법과 예측 알고리즘을 개발하고, 접선, 측선 및 법선 방향의 속도제어를 융합한 제어기를 설계하여 실제 시스템에 구현하며, 미지형상 표면의 연삭 작업 결과를 보인다.

2. 시스템 구성

연삭 작업을 위한 시스템은 Fig. 2와 같이, DPM 로봇, 비전 카메라 및 부하 센서, 그라인더 등으로 구성되어 있다.

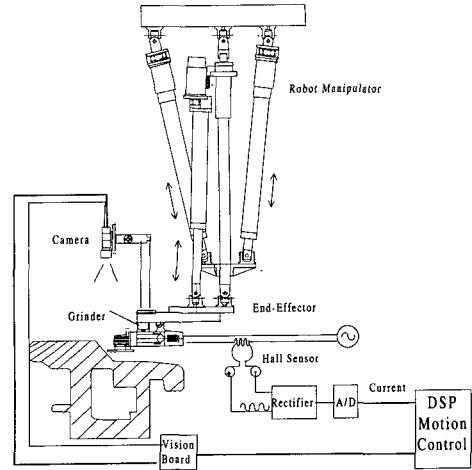


Fig. 2 Control and measurement system for unknown geometric surface grinding

2.1 DPM 로봇

병렬기구(Parallel Manipulator)는 다관절 기구에 비해 부하 수행 능력이 우수하고 정밀도가 높으나 작업공간이 좁고, 기구학 및 동특성 해석이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해 병렬기구를 2단으로 쌓고 중앙축으로 각 단의 운동을 구속하는 DPM⁽⁶⁾을 개발했다. 각 단에 설치된 링크의 수가 적고, 운동이 서로 독립적으로 행해지므로 작업공간이 크고, 기구학 해석이 간단하다.

리니어 액추에이터의 제어는 DSP Motion Controller (DMC)에 의해서 행해진다. DMC와 메모리를 공유하는 PC는 로봇 구동에 필요한 기구학, 자코비안, 제어 및 추종에 관한 모든 수학적 연산을 실시하며 연산결과를 Data Bus를 통해 DMC에 제공한다. DMC는 위치 및 속도 명령을 각 리니어 액추에이터에 보내 로봇이 연삭 작업에 합당한 운동을 생성하도록 한다.

2.2 비전 카메라

X-Y좌표 상(수평면)의 연삭경로를 인식하는데 비전 센서를 사용한다. 단안 시법으로 CCD 카메라가 그라인더의 날 끝과 경로를 촬영하면 비전 시스템이 영상 처리하여 그라인더와 가공 경로사이의 거리를 측정한다. 카메라 모델은 Fig. 3과 같은 핀홀(pin-hole) 모델을 사용한다. 렌즈의 초점위치에 카메라 좌표계 $\{X^c, Y^c, Z^c\}$ 의 원점이 위치하고 Z^c 축은 카메라의 광축과 평행하며 화상면은 카메라 좌표계의 원점과 초점거리(f)만큼 떨어져 있다. 물체점 P 에 대한 로봇 기준 좌표계 $\{X^0, Y^0, Z^0\}$ 와 화상 좌표계 $\{X^i, Y^i\}$ 사이의 좌표 변환은

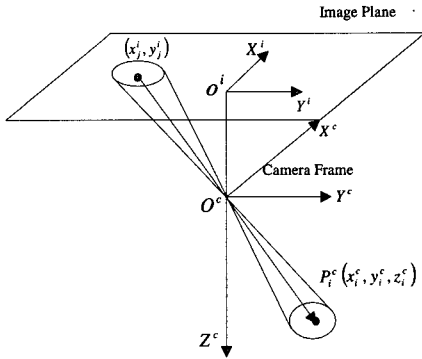


Fig. 3 Pin-hole vision camera modeling

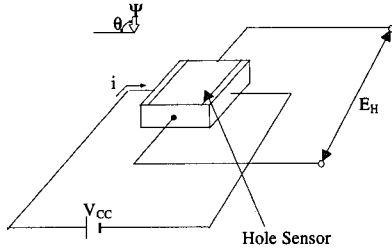


Fig. 4 Hall sensor measures the current of a grinding tool

$$\begin{bmatrix} X^0 \\ Y^0 \\ Z^0 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X^c \\ Y^c \\ Z^c \end{bmatrix} + T \quad (1)$$

로 R은 기준 좌표계에 대한 카메라 좌표계의 회전 행렬이고, T는 카메라 좌표계의 이동 벡터이다. 원근투영법(perspective projection)에 의한 화상 좌표계는

$$X^i = -f \frac{X^c}{P_x Z^c} \quad (2)$$

$$Y^i = -f \frac{Y^c}{P_y Z^c} \quad (3)$$

으로, P_x 와 P_y 는 각각 X, Y방향의 화소간의 거리이다. 카메라 초점거리와 왜곡계수 등을 보정하고, 로봇의 기준 좌표계에 대한 카메라 좌표계의 위치와 방위를 결정한다. 실제 연삭 작업은 중앙에 가까운 영역의 화상만 필요하므로 카메라 렌즈에 의한 왜곡을 무시하고, 카메라 초점 거리는 이미 알고 있는 평면상의 보정 점을 이용하여 찾아낸다.

2.3 부하전류 센서

미지형상의 높이에 따라 그라인더를 올리고 내

림으로써 연삭 작업을 실시하는 것은 지능제어에 속한다. 지금까지 널리 사용되었던 방법⁽⁴⁾은 톨의 끝단에 힘 센서를 부착하고 일정한 힘이 유지되도록 제어를 실시했다. 이 방법은 부하를 일정하게 유지하는 목적에 어긋나며, 힘 센서를 설치해야 하는 부담을 갖고 있다. 따라서 그라인더에 공급되는 전류를 직접 측정하는 것이 제어 목적에 더 합당하다. 그라인더 공급 전원에 전류센서를 설치하는데 기본적인 동작원리는 Fig. 4와 같다. 바이어스 전류 i_H 를 인가하면, 자속 ψ 에 비례해서 홀 소자의 출력 전압 E_H 가 결정된다. 따라서 그라인더의 전선을 홀 소자에 감아 그라인더에 공급되는 전류의 변화에 따라 자장이 형성되고, 이 자장의 변화에 따라 홀 소자의 출력 전압이 변한다. 그라인더에 공급되는 전류는 극성이 바뀌는 교류이므로 홀 센서의 출력 단에서 나오는 전압의 Ripple을 제거하고 Bridge 회로를 통과시켜 정류시킨 후 DMC에 보내 그라인더에 부과되는 부하로 인식한다. 전류센서의 출력은 노이즈가 심하므로 하드웨어 필터뿐 아니라 소프트웨어 디지털 필터를 설계해 적용한다. 일반적으로 디지털 필터의 입출력 관계는

$$y(nT) = \sum_{k=0}^M a_k x(nT - kT) - \sum_{k=1}^N b_k y(nT - kT) \quad (4)$$

와 같은 차분 방정식의 형태로 주어지는데 고주파 성분을 제거하는 것이 저주파수 성분의 오차를 효과적으로 보정할 수 있는 방법이므로 low pass filter로써 IIR 필터를 설계한다.

그라인더를 무 부하에서 구동시키면서 샘플링 간격 25msec로 전류 센서의 값을 획득한다. 주파수 특성을 분석하기 위해서 이산 푸리에변환을 한 뒤 진폭 스펙트럼을 분석하면 대부분의 값이 주파수 0.018Hz이하에 분포한다. 따라서 차단주파수를 이 값으로 결정할 수 있으나 그라인더는 인덕턴스 성분이 포함되어 급격한 전류의 변화를 방해하므로 스펙트럼 분석을 통한 차단 주파수보다 약간 높은 주파수 0.025Hz를 차단주파수로 한다. 이와 같은 조건을 만족하는 IIR필터를 구하여 적용한다.

$$y(n) = (0.3x(n) + 1.7y(n-1))/2 \quad (5)$$

3. 연삭 경로 추적기 설계

형상표면의 높이가 불규칙적일 때 절삭량에 큰 변화가 있으므로 안정적인 작업을 위해 표면의

높낮이와 경로를 예측할 수 있는 추적기가 필요하다. 이를 위해 형상을 X-Y 평면과 X-Z 평면으로 분리한다.

3.1 X-Y 평면상의 경로 추적

연삭 경로와 그라인더 날 사이의 거리를 비전 카메라의 화상을 통해 촬영한다. 카메라를 통하여 획득한 화상정보는 잡음이 많이 포함되므로 외부의 잡음에 강건하며 실시간 처리가 가능한 칼만 필터⁹⁾를 사용해 경로를 추적한다. 추적 목표점에 대한 간단한 운동모델을 위해 다음과 같이 가정한다.

- 1) 연삭 툴이 각 샘플링 시간동안 등속도로 운동한다.
- 2) 추적 목표점의 궤적은 완만하다.

운동 모델의 상태변수는 카메라 좌표에 대한 추적 목표점의 위치와 속도로 시간 t에서의 상태 벡터는

$$X(t) = [y^c(t) \quad \dot{y}^c(t)]^T \tag{6}$$

이다. 위 가정에 의해 툴은 등속도 운동을 하므로

$$\begin{aligned} y^c(t+T_s) &= y^c(t) + T_s \dot{y}^c(t) \\ \dot{y}^c(t+T_s) &= \dot{y}^c(t) \end{aligned} \tag{7}$$

로 T_s 는 샘플링 시간이다. 따라서 이산치 시간에 대한 시스템 상태 방정식은 아래와 같다.

$$X_{k+1} = AX_k + v(k) \tag{8}$$

여기서 $A = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 이고, $v(k)$ 는 프로세스 잡음으로 공분산 행렬이 Q 이고, 가우시안분포를 가지며 평균이 "0"이다. 화상 좌표 계에서 추적목표점의 y좌표는

$$y^i = -f \frac{y^c}{P_y z^c} \tag{9}$$

로 z^c 는 비전 카메라에선 그라인더 날까지의 Z-방향의 거리이고, y^c 는 비전 카메라에서 추적점까지 Y-방향의 거리이다. 그라인더 날이 가공물체 표면에 접촉해 있는 상태이고 z^c 의 오차에 대한 y^i 의 민감도가 매우 작기 때문에 z^c 를 카메라와 그라인더 날 사이의 거리로 설정할 수 있

다. 따라서 카메라 모델을 이용한 출력방정식은

$$Y_k = CX_k + w(k) \tag{10}$$

로

$$C = -f \begin{bmatrix} \frac{1}{P_y z^c} & 0 \end{bmatrix} \tag{11}$$

이다. 여기서 $w(k)$ 는 측정잡음으로 공분산이 $R(k)$ 이고, 가우시안 분포를 가지며 평균이 "0"이다. 칼만 필터는 아래와 같은 과정으로 목표점을 추적한다.

- time update formulation

$$\hat{X}_{k+1|k} = A \hat{X}_{k|k} \tag{12}$$

$$P_{k+1|k} = AP_{k|k}A^T + Q_k \tag{13}$$

- measurement update formulation

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} C^T [R_{k+1} + C P_{k+1|k} C^T]^{-1} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k+1|k+1} &= \hat{X}_{k+1|k} + K_{k+1} [Y_{k+1} \\ &\quad - C \hat{X}_{k+1|k}] \end{aligned} \tag{15}$$

$$P_{k+1|k+1} = P_{k+1|k} - K_{k+1} C P_{k+1|k} \tag{16}$$

여기서 K_{k+1} 는 칼만 게인이고, $\hat{X}_{k+1|k}$ 는 한 스텝 미리 예측한 점이 된다.

3.3 X-Z 평면상의 경로 추적

미지 형상을 X-Z 평면으로 자르고 Z-높이에 따라 그라인더의 높낮이를 조절할 때 방향을 고려해야 갑작스런 높이 변화에 대응할 수 있다. 단 순히 그라인더의 전류가 설정 값보다 크면 그라인더를 +Z-방향으로 들어올리고, 작으면 -Z-방향으로 내리면, (+)의 기울기 표면에서는 빨리 들어올리지 못해 절삭 량이 많고, (-) 기울기에서는 빨리 내려가지 못해 절삭 량이 적다. 따라서 접선 방향으로 그라인더를 이동시키고, 법선 방향으로 누르고, 들어올려야 한다. 그러나 미지 형상의 연삭 작업에서는 법선 방향을 알 수 없으므로 이를 추적하는 알고리즘이 필요하다. 3차원 곡면을 Fig. 5와 같이 X-Z단면으로 모델링한다. 그라인더는 곡면에 접선방향으로 이동하고 수직방향으로 눌러 가공부하를 생성하며 α 의 각도를 유지한다. Lagrange 외삽법으로 연삭기가 지나온 Z-좌표의 데이터를 보간하여 다음 위치를 예측하도록 한다.

즉, 곡면 형상을 나타내는 다항식을 2차 Lagrange 보간식으로 나타낸다.

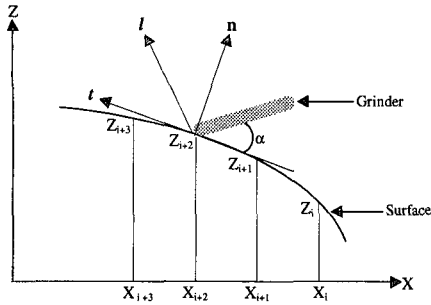


Fig. 5 The section of workpiece in X-Z plane

$$P_2(X) = L_0(X) a_0 + L_1(X) a_1 + L_2(X) a_2 \quad (17)$$

여기서, $L_i(X)$ 는 Lagrange 계수 다항식으로 i -를 연속적으로 증가시키면서 계수를 구하고 $X = X_{i+3}$ 에서의 Z -위치를 아래와 같이 예측한다.

$$\hat{Z}_{i+3} = L_0(X_{i+3}) Z_i + L_1(X_{i+3}) Z_{i+1} + L_2(X_{i+3}) Z_{i+2} \quad (i=1,2, \dots, n) \quad (18)$$

4. 제어기 설계

공작기계에서 사용하고 있는 제어방식은 위치 제어로 사전에 정확한 가공물체의 형상 데이터를 필요로 한다. 그러나 본 작업에서는 툴의 설치 및 마모에 의한 오차가 존재하고 연삭 표면에 대한 사전 정보없이 형상표면에 따라 툴의 위치를 변경시킬 수 있는 제어가 필요하다. 따라서 접선, 축선 및 법선 방향의 속도를 융합한 속도 제어를 설계한다.

Lagrange 외삽법에서 위치 $\{X_{i+3}, \hat{Z}_{i+3}\}$ 가 예측되면 현재 그라인더의 위치 $\{X_{i+2}, Z_{i+2}\}$ 에서 이동할 접선방향은 아래와 같다.

$$t = \left(\frac{\hat{Z}_{i+3} - Z_{i+2}}{X_{i+3} - X_{i+2}} \right) // \left\| \frac{\hat{Z}_{i+3} - Z_{i+2}}{X_{i+3} - X_{i+2}} \right\| \quad (19)$$

또한, Y축 방향과 일치한 축선 방향 l 과 t 의 관계로 법선 방향을 구한다.

$$n = l \times t \quad (20)$$

따라서, 추적기에 의해서 세 방향의 단위 벡터가 모두 구해진다. 다음으로 각 방향의 속도 크기를 구한다. 속도의 크기는 작업 목적에 따라 결정되

는데 여기서는 일정한 가공부하와 이송속도를 유지하는 것이 목적이므로 아래와 같은 전략을 적용한다.

- 1) 접선 방향의 이송속도 (V_t)는 일정하게 유지한다.
- 2) 법선 방향의 속도(V_n)는 그라인더에 흐르는 전류가 설정 값보다 크면 그라인더를 들어올리고, 작을 경우 그라인더를 눌러 가공 부하를 일정하게 유지한다.
- 3) 축선 방향의 속도 (V_l)는 그라인더가 궤적의 목표점까지 빨리 도달하도록 한다.

전략 2)로부터 법선 방향의 속도는 그라인더에 제공되는 전류 량에 비례해야 한다. 그러므로 정상상태 오차를 줄이고, 빠른 응답을 위해 PID 알고리즘을 적용한다.

$$V_n = K_p(I_d - I_a) + K_i \int (I_d - I_a) dt + K_d \frac{d(I_d - I_a)}{dt} \quad (21)$$

여기서 K_p, K_i, K_d 는 비례, 적분 및 미분 게인이고, I_d 는 절삭량에 따라 설정하는 그라인더의 전류 값이며, I_a 는 실제 그라인더에 흐르는 전류 값이다. 안정적으로 경로를 따라가기 위해서는 overshoot가 일어나지 않도록 게인을 조절한다. 환경에 따라 자동으로 게인을 조절하는 문제는 향후 연구과제다.

전략 3)는 그라인더와 연삭 경로 사이의 거리를 좁히는 것이다. 화상 정보를 처리하는 샘플링 시간 (320msec) 동안 경로를 따라가기 위한 Y-방향의 거리를 계산해야 함으로 획득한 현재의 경로를 칼만 필터로 입력시킨 후 다음 거리 $\hat{y}_{k+1|k}$ 를 예측한다. $\hat{y}_{k+1|k}$ 를 빨리 줄이기 위해 축선 방향의 속도를 거리에 비례해서 아래와 같이 구한다.

$$V_l = -K_p \hat{y}_{k+1|k} \quad (22)$$

전략 1)과 식 (21), (22)에 의해서 세 방향의 속도 크기를 모두 구했으나 추가로 고려해야 할 사항은 가공 면과 그라인더의 경사각도이다. 연삭 각도가 원하는 각도에서 많이 벗어날 경우 조이스틱으로 이를 조절한다. 조이스틱의 속도제어까지 고려한 그라인더의 속도는 접선, 법선, 축선 방향의 속도를 모두 더한 것으로 아래와 같다.

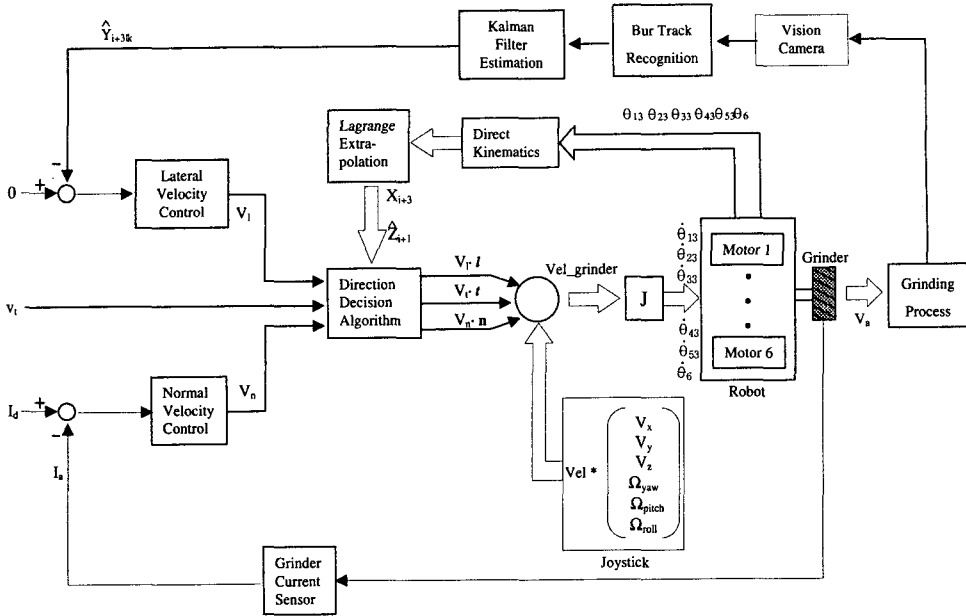


Fig. 6 Control scheme for unknown geometric surface grinding

$$vel_grinder = \begin{pmatrix} (V_t t)_x + (V_n n)_x \\ (V_t t)_y + (V_n n)_y + V_l \\ (V_t t)_z + (V_n n)_z \\ \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{pmatrix} \quad (23)$$

여기서 $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ 는 조이스틱을 조작했을 때 생성되는 회전속도이다.

마지막으로 $vel_grinder$ 를 DPM의 자코비안을 이용하여 아래와 같이 리니어 액추에이터의 속도로 변환한다.

$$[\theta_{13}, \theta_{23}, \theta_{33}, \theta_{43}, \theta_{53}, \theta_6]^T = J vel_grinder \quad (24)$$

여기서 θ_{i3} ($i=1,2,\dots,5$)는 리니어 액추에이터의 속도이고, θ_6 는 회전 액추에이터의 속도이며, J 는 6×6 자코비안 행렬이다. 자코비안을 구하기 위해서는 액추에이터의 위치에 따른 툴의 위치와 자세를 구하는 순방향 기구해석이 수행된다. 위의 알고리즘을 구현하는 Control Scheme은 Fig. 6과 같다.

5. 실험결과

우리는 Fig. 7과 같이 프로펠러 블레이드 보다 높낮이 변화가 심한 3차원 곡면에 연삭 경로를 표시하고, 그라인더가 그 경로를 따라 일정한 부하를 유지하면서 연삭 작업을 수행했다. 로봇 콘

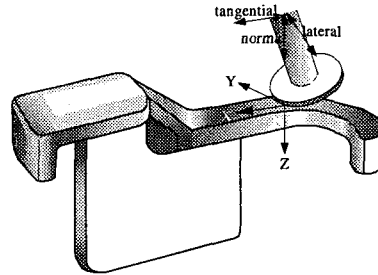


Fig. 7 3-D Workpiece

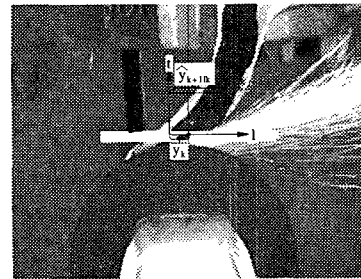


Fig. 8 Vision image of grinder and grinding path

트롤러에는 경로추적 및 제어를 위한 수학적 연산이 C-언어로 프로그램 되었으며, 이는 실시간으로 처리되었다.

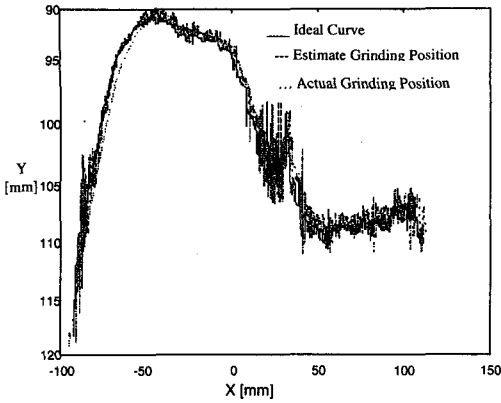


Fig. 9 Tracking in X-Y plane by vision system and Kalman filter

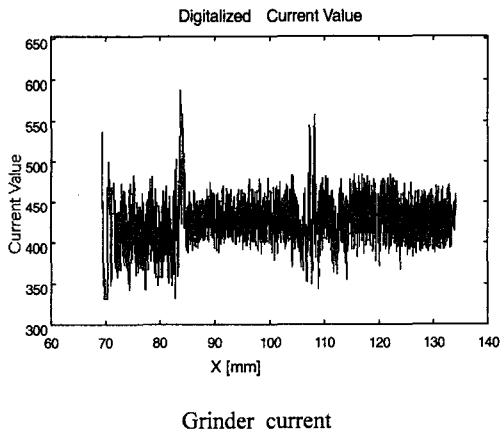


Fig. 10 Grinding process with slope estimation

칼만 필터의 상태벡터 초기 값을 $\hat{X}(0)=[80, 10]^T$ 로 하고 프로세서 잡음 $Q=[200, 200]^T$, 관측잡음 $R=100$, 오차 공분산 $P=\begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 120 \end{bmatrix}$ 으로 설정했다. 이들은 실험 환경에 따라 적절히 조정했는데 실제 곡선과 그라인더 날의 초기위치가 멀리 떨어진 경우 초기 값을 크게 하고, X방향의 진행 속도가 크고 곡률 반경이 작을 경우 Q 를 증가시킨다. R 은 주위 환경과 실제 곡선과의 명암차이가 적고, 같은 위치를 여러 번 인식했을 때 그 값의 변화량이 크면 관측잡음을 큰 값으로 설정했다. 오차 공분산 P 는 초기 위치와 X방향의 진행속도에 따라서 결정한다. 화상의 중심에 그라인더 날의 앞부분이 일치하도록 카메라를 고정시킨 후 경로를 인식한다. 화상전체를 필터링하면 궤적을 추출하는 데에는 많은 시간이 소요

되므로 Fig. 8과 같이 화상의 중심점을 기준으로 일정한 크기의 윈도우 창(240×20)을 설정하고 그 부분의 궤적만 인식한다.

X-Y방향으로 궤적을 따라간 결과는 Fig. 9와 같다. 약간의 오차를 가지고 실제 곡선을 추적함을 알 수 있다. 0에서 50mm 사이는 연삭 경로가 뚜렷하지 않아 곡선의 중심선을 정확히 인식할 수 없다. 비전과 로봇의 부정확한 보정도 오차를 유발한다.

기울기의 예측이 없이 연삭 작업을 실시하면 적절히 대응치 못해 오르막에서는 큰 부하 전류를 갖고, 내리막에서는 무 부하의 전류 값을 가졌다. 따라서 X_i 와 X_{i+1} 의 간격을 1mm로 설정하고 Lagrange 보간법으로 기울기를 추종하면서 작업을 실시하면 Fig. 10과 같다. 그라인더를 접선 방향으로 진행시키고, 법선 방향으로 밀어주므로 수평면, 오르막에서 실제 궤적을 정확히 따라가고 기울기가 급격히 변하는 곳을 제외하고는 일정한 부하를 갖는다. 그라인더의 진행 방향을 역으로 실시하여도 내리막에서 일정한 부하를 얻었다.

6. 결론

2단 병렬기구 로봇을 미지형상 표면의 연삭 작업에 적용했다. 3차원의 형상을 수평면 (X-Y)과 수직면(X-Z)으로 분리하고, X-Y 평면에 존재하는 연삭 경로를 비전 센서로 인식하고, X-Z 평면에 나타나는 표면의 높이는 톨에 제공되는 전류를 측정해 인식했다. 형상을 인식할 수 있는 센서만으로는 갑자기 변하는 경로에 대응할 수 없으므로 칼만 필터를 이용하여 X-Y 평면상의 궤적을 추종하고, 표면의 기울기를 Lagrange 외삽법을 이용해 추적했다. X-Y 평면 운동에서는 비전의 곡선 중심의 인식 오차, 긴 샘플링 시간, 로봇의 미비한 보정으로 연삭 경로에서 벗어날 때도 있으나 표면 연삭 작업에 지장을 줄 정도는 아니었다. X-Z 평면에서 기울기가 급격히 양(+)의 방향으로 변하는 경우 절삭 두께가 커지고, 음(-)의 방향으로 변하는 경우 거의 절삭이 이루어지지 않았으나 기울기를 추종하면 급격한 변화에도 항상 일정한 절삭 부하를 유지하면서 안정적으로 작업이 이루어졌다. 그러나 법선 방향의 속도

기를 결정하는 PID 계인은 위 작업에 중요한 요소가 됐다. 계인이 클 경우 overshoot에 의해 연삭기가 표면에 닿았다 떨어지는 동작을 반복하며, 작을 경우 급격한 기울기 변화에 대응하지 못했다. 따라서 계인 조절에 대한 고급스런 제어 기법이 적용되어야 한다. 그 외에 보완해야 할 과제는 Y-Z 평면상의 궤적 인식과 추종으로 이는 더욱 복잡한 3차원 형상의 작업에서 꼭 필요한 것이다. 또한, 정밀한 X-Y 평면의 제어를 위해서는 화상처리의 능력과 로봇의 보정이 필요하며, X-Z 평면의 향상된 제어를 위해 전류센서와 힘센서의 융합이 필요하다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계 기술 연구센터의 지원에 의한 것입니다. 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Stepien, T. M., Sweet, L., Good M., and Tomizuka, M., 1987, "Control of Tool Workpiece Contact Force with Application to Robotic Deburring," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 1, pp. 7~18.
- (2) Kazerooni, H., Bausch, J. J., Kramer, B. M., 1986, "An Approach to Automated Deburring by Robot Manipulators," *ASME J. of Dynamic Systems Measurement, and Control*, Vol. 108, No. 4, pp. 354~365.
- (3) Whitney, D. E. Edsall, A. C., Todtenkopf, A. B., Kurfess, T. R., Tate, A. R., 1990, "Development and Control of an Automated Robotic Weld Bead Grinding System," *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 112, pp. 166~176.
- (4) Her, M. G. and Kazerooni, 1991, "Automated Robotic Deburring of Parts Using Compliance Control," *ASME J. of Dynamic System, Measurement, and Control*, Vol. 113, pp. 60~66.
- (5) Lee, M. K., Park, K. W., and Choi, B. O., 1999, "Kinematic and Dynamic-Models of Hybrid Robot Manipulator for Propeller Grinding," *Journal of Robotic System*, Vol. 16, No. 3, pp. 137~150.
- (6) Lee M. K., 1995, "Design of a High Stiffness Machining Robot Arm using Double Parallel Mechanism," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Nagoya, Vol. 1, pp. 234~240.
- (7) 이민기, 이성학, 박근우, 1998, "2단 병렬 머니플레이터의 특이점 해석," *대한기계학회논문집A권*, 제22권, 제10호, pp. 1922~1929.
- (8) 이민기, 박근우, 1997, "2단 평행구조 로봇트램의 실시간 순방향 구조학 해석," *대한기계학회 논문집A권*, 제21권 제1호, pp. 144~153.
- (9) Frank L. Lewis, 1992, *Applied Optimal Control and Estimation*, Prentice Hall international, Inc.