

## 미지 형상의 디버링 작업을 위한 2단 병렬기구 로봇의 제어·계측 시스템 개발

이민기, 박근우\*

창원대 공대, 창원대 대학원\*

### 1. 서론

디버링 작업은 버어의 크기에 따라 절삭부하의 변동이 크므로 버어가 큰 경우 틀이 끼어 회전하지 않거나 파손된다. 또한, 과중한 힘으로 지그에 변형이 일어나 가공 정밀도를 벗어난다. 그러므로 미지의 형상에 따라 일정한 가공 부하를 유지하는 것은 일반 공작기계 보다 지능 제어에 의한 로봇이 해결해야 할 분야이다. 디버링 작업에 대한 연구는 Stepien et al.[1]과 Kazerooni et al.[2] 등이 작업 공정을 모델링하여 제어기를 구성했으며, Whitney et al.[3]는 비전을 이용하여 버어의 크기를 측정하고 크기에 따라 힘을 제공함으로써 디버링 작업을 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 방향으로는 버어 크기에 따라 이송속도를 제어하는 강성과 유연성을 모두 제어하는 방식을 택했다. 그러나 위의 경우는 다관절 로봇을 적용한 사례로 가공시 변형을 줄이고 안정성을 높이기 위한 제어 시스템 개발에 주안점을 두고 있다.

본 연구에서는 병렬기구의 문제점을 보완한 2단 병렬기구 머니플레이터(Double Parallel Manipulator, DPM)[6]를 적용해 디버링 작업을 실시한다. 미지의 형상에 나있는 버어를 추적하기 위해 3차원 형상을 X-Y 수평면과 X-Z 수직면으로 분리하고 가공 경로를 측정 및 예측한다. 비전 및 부하 센서에 의한 버어의 측정방법과 예측 알고리즘을 개발하고, 접선, 축선 및 법선 방향의 속도제어를 융합한 제어기를 설계하여 실제 시스템에 구현하며, 3차원 형상의 표면의 디버링 작업 결과를 보인다.

### 2. 시스템 구성

디버링 작업을 위해 제작된 시스템은 Fig. 1과

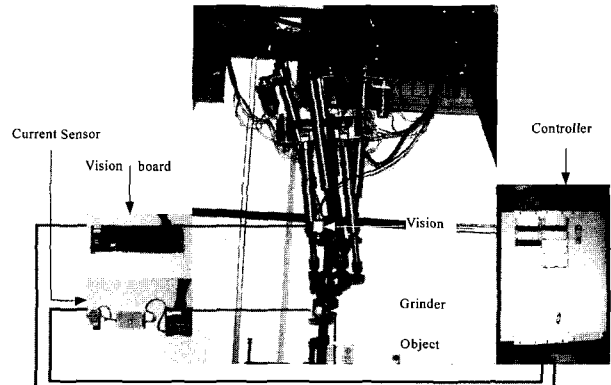


Fig. 1. Robot control and measurement system constructed for deburring work.

DPM)[6]를 적용해 디버링 작업을 실시한다. 미지 같다. DPM 로봇, 비전 카메라 및 부하 센서, 그라인더 등으로 구성되어 있다.

#### 2.1 DPM 로봇

병렬기구기는 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 DPM을 개발했다. Fig. 2는 DPM의 구조를 나타내는데 2개의 병렬기구와 중앙축으로 이루어져 있다. 첫째 단에는 리니어 액추에이터  $leg_i(i=1,2,3)$ 가 Base-1의  $B_i$ 로부터 Platform-1의  $P_i$ 까지 유니버설조인트에 의해서 각각 연결되어 있고, 둘째 단에는  $leg_i(i=4,5)$ 가 Base-2의  $B_i$ 에서부터 Platform-2의  $P_i$ 까지 연결되어 있다.  $Leg_i$ 의 링크 트레인은  $\theta_1 - \theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6$ 으로  $\theta_3$ 를 제외한 모든 조인트는 피동이며  $\theta_3$ 는 리니어 액추에이터의 길이를 조절하는 능동 조인트이다. 중앙축은 피동 조인트  $\theta_1 - \theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5$ 로 이루어져 있으며  $\theta_1 - \theta_2 - \theta_3$ 는 첫째 단을 구

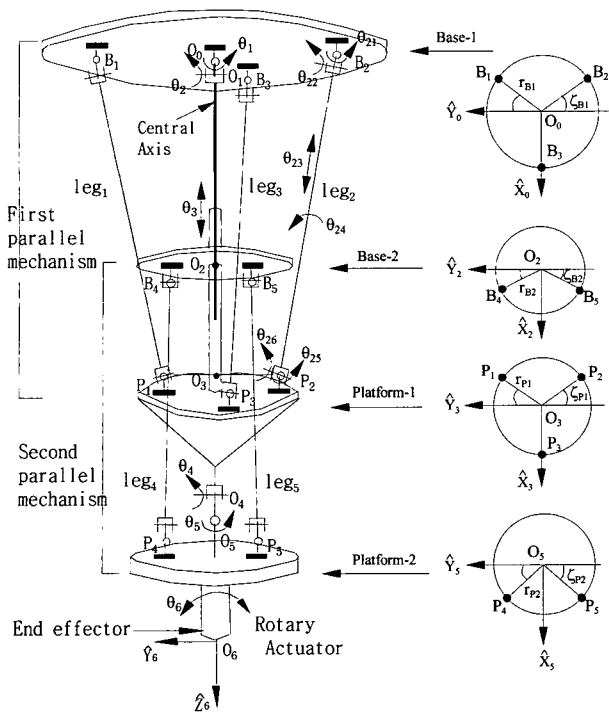


Fig. 2. Double Parallel Manipulator.

속하면서 Platform-1을 임의의 공간에 위치시키고  $\theta_4$ - $\theta_5$ 는 둘째 단을 구속시켜 Platform-2의 자세를 생성한다.  $\theta_6$ 을 위한 회전 액추에이터를 Platform-2에 첨가함으로써 6자유도의 DPM이 된다. 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 디버링 작업에 합당한 운동을 생성하도록 한다.

## 2.2 비전 카메라

X-Y좌표상(수평면)의 가공궤적을 인식하는데 비전 센서를 사용한다. 단안 시법으로 CCD 카메라가 그라인더의 날 끝과 가공궤적을 촬영하면 비전 시스템이 영상 처리하여 그라인더와 가공 궤적 사이의 거리를 측정한다. 카메라 모델은 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  $\{X^i, Y^i\}$ 사이에는 좌표변환이 이루어진다. 첫 번째 변환은 기준 좌표계로부터 카메라 좌표계의 회전 및 평행이동으로

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

이다. 여기서  $R$ 은 기준 좌표계에 대한 카메라 좌표계의 방위를 나타내는 회전 행렬이고,  $T$ 는 카메라 좌표계의 평행 이동 벡터이다. 두 번째 변환은 원근투영법(perspective projection)에 의한 카메라 좌표계에서 화상 좌표계로의 변환이다.

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

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

여기서  $f$ 는 초점거리이고,  $P_x$ 와  $P_y$ 는 각각 X, Y방향의 화소간거리이다.

## 2.3 부하 전류센서

미지 형상의 높이에 따라 그라인더를 올리고 내림으로써 디버링 작업을 실시하는 것은 고급스런 지능제어에 속한다. 지금까지 널리 사용되었던 방법[4]은 툴의 끝단에 힘 센서를 부착하고 일정한 힘이 유지되도록 제어를 실시했다. 이 방법은 부하를 일정하게 유지하는 목적과 부합되며, 힘 센서를 설치해야하는 부담을 갖고 있다. 그러므로 그라인더에 공급되는 전류를 직접 측정하는 것이 제어 목적에 더 합당하다. 그라인더의 전선을 홀 소자에 감아 그라인더에 공급되는 전류를 측정한다. 공급되는 전류는 극성이 바뀌는 교류이므로 홀 센서의 출력 단에서 나오는 전압의 Ripple을 제거하고 Bridge 회로를 통과시켜 정류시킨 후 DMC에 보내 그라인더에 부과되는 부하로 인식한다.

## 3. 버어 궤적 추적기 설계

버어의 궤적과 가공물의 높이가 불규칙적일 때 절삭량에 큰 변화가 있으므로 안정적인 작업을 위해 가공 형상의 높낮이와 버어 궤적을 예측할 수 있는 추적기가 필요하다. 이를 위해 형상을 X-Y 평면과 X-Z 평면으로 분리해서 X-좌표에 대한 가공 궤적의 Y-점과 Z-점을 미리 예측하고, 그라인더를

이동시킨다.

### 3.1 X-Y 평면상의 궤적 추적

버어 궤적과 그라인더 날 사이의 거리를 비전 카메라의 화상을 통해 촬영한다. 카메라를 통하여 획득한 화상정보는 잡음이 많이 포함되므로 외부의 잡음에 강건하며 실시간 처리가 가능한 칼만 필터를 사용해 가공궤적을 추적한다. 추적 목표점에 대한 간단한 운동모델을 위해 다음과 같이 가정한다.

1) 가공 툴이 각 샘플링 시간동안 등속도로 운동한다.

2) 추적 목표점의 궤적은 완만하다.

운동 모델의 상태변수는 카메라 좌표에 대한 추적 목표점의 위치와 속도로 시간  $t$ 에서의 상태 벡터는

$$X(t) = [y^c(t) \quad \dot{y}^c(t)]^T \quad (4)$$

이다. 위 가정에 의해 툴은 등속도 운동을 하므로

$$y^c(t+T_s) = y^c(t) + T_s \dot{y}^c(t) \quad (5)$$

$$\dot{y}^c(t+T_s) = \dot{y}^c(t)$$

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

$$X_{k+1} = AX_k + v(k) \quad (6)$$

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 좌표계에서 추적 목표점의  $y$ 좌표는

$$y^i = -f \frac{y^c}{P_y z^c} \quad (7)$$

으로  $z^c$ 는 비전 카메라에서 그라인더 날까지의 Z-방향의 거리이고,  $y^c$ 는 비전 카메라에서 추적점까지 Y-방향의 거리이다. 그라인더 날이 가공 물체 표면에 접촉해있는 상태이고  $z^c$ 의 오차에 대한  $y^i$ 의 민감도가 매우 작기 때문에  $z^c$ 를 카메라와 그라인더 날 사이의 거리로 설정할 수 있다. 따라서 카메라 모델을 이용한 출력방정식은

$$Y_k = CX_k + w(k) \quad (8)$$

으로

$$C = -f \left[ \frac{1}{P_y z^c} \quad 0 \right] \quad (9)$$

이다. 여기서  $w(k)$ 는 측정잡음으로 공분산이  $R(k)$

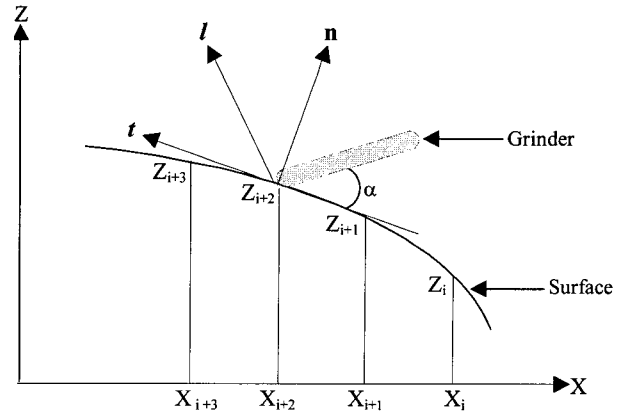


Fig. 3. The Section of workpiece in X-Z plane.

이고, 가우시안 분포를 가지며 평균이 "0"이다. 칼만 필터는 아래와 같은 과정으로 목표점을 추적한다.

- time update formulation

$$\hat{X}_{k+1|k} = A \hat{X}_{k|k} \quad (10)$$

$$P_{k+1|k} = AP_{k|k}A^T + Q_k \quad (11)$$

- measurement update formulation

$$K_{k+1} = P_{k+1|k}C^T[R_{k+1} + CP_{k+1|k}C^T]^{-1} \quad (12)$$

$$\hat{X}_{k+1|k+1} = \hat{X}_{k+1|k} + K_{k+1}[Y_{k+1} - C\hat{X}_{k+1|k}] \quad (13)$$

$$P_{k+1|k+1} = P_{k+1|k} - K_{k+1}C P_{k+1|k} \quad (14)$$

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

### 3.2 X-Z 평면상의 궤적추적

미지 형상을 X-Z 평면으로 자르고 Z-높이에 따라 그라인더의 높낮이를 조절할 때 방향을 고려해야 갑작스런 높이 변화에 대응할 수 있다. 그러나 미지 형상의 디버링 작업에서는 법선 방향을 알 수 없으므로 이를 추적하는 알고리즘이 필요하다. 3차원 곡면을 Fig. 3과 같이 X-Z단면으로 모델링한다. 그라인더는 곡면에 접선방향으로 이동하고 수직방향으로 눌러 가공부하를 생성하며  $\alpha$ 의 각도를 유지한다. Lagrange 외삽법으로 연삭기가 지나온 Z-좌표의 데이터를 보간하여 다음 위치를 예측하도록 한다.

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

$$P_2(X) = L_0(X) a_0 + L_1(X) a_1 + L_2(X) a_2 \quad (15)$$

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

$$\hat{Z}_{i+3} = L_0(X_{i+3})Z_i + L_1(X_{i+3})Z_{i+1} + L_2(X_{i+3})Z_{i+2} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

따라서 현재 위치  $Z_{i+2}$ 에서 예측한 위치  $\hat{Z}_{i+3}$ 를 향해 툴을 이동시킨다.

#### 4. 제어기 설계

디버링 작업에서는 버어의 크기를 알아내기 어렵고, 툴의 설치 및 마모에 의한 오차가 존재한다. 따라서 가공 대상물에 대한 사전 정보없이 가공물의 형태에 따라 툴의 위치를 변경할 수 있는 제어기가 필요하다. 3차원 물체를 가공하기 위해 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.

$$t = \left( \frac{\hat{Z}_{i+3} - Z_{i+2}}{X_{i+3} - X_{i+2}} \right) / \left\| \frac{\hat{Z}_{i+3} - Z_{i+2}}{X_{i+3} - X_{i+2}} \right\| \quad (17)$$

또한, Y축 방향과 일치한 축선방향  $l$ 과  $t$ 의 관계로 법선 방향을 구한다.

$$n = l \times t \quad (18)$$

따라서, 추적기에 의해서 세 방향의 단위 벡터가 모두 구해진다. 다음으로 각 방향의 속도 크기를 구한다. 속도의 크기는 작업목적에 따라 결정되는데 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 전류량에 비례해야한다. 따라서 정상상태 오차를 줄이고, 빠른 응답을 위해 PID 알고리즘을 적용한다.

$$V_n = K_p(I_d - I_a) + K_i \int (I_d - I_a) dt + K_d \frac{d(I_d - I_a)}{dt} \quad (19)$$

여기서  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ 는 비례, 적분 및 미분 계인이고,  $I_d$ 는 가공량에 따라 설정하는 그라인더의 전류 값이며,  $I_a$ 는 실제 그라인더에 흐르는 전류 값이다.

전략 3)는 그라인더와 가공 궤적 사이의 거리를 좁히는 것이다. 화상 정보를 처리하는 샘플링 시간 (320msec) 동안 궤적을 따라가기 위한 Y-방향의 거리를 계산해야하므로 획득된 현재의 궤적을 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.

$$V_l = -K_p \hat{y}_{k+1|k} \quad (20)$$

전략 1)과 (19), (20)에 의해서 세 방향의 속도 크기를 모두 구했다. 그러나 추가로 고려해야할 사항은 가공 면과 그라인더의 경사각도이다. 가공각도가 원하는 각도에서 많이 벗어날 경우 조이스틱으로 이를 조절한다. 조이스틱의 속도제어까지 고려한 그라인더의 속도는 접선, 법선, 축선 방향의 속도를 모두 더한 것으로 아래와 같다.

$$vel\_grinder = \begin{pmatrix} (V_t t)_x + (V_n n)_x \\ (V_t t)_y + (V_n n)_y + V_l \\ (V_t t)_z + (V_n n)_z \\ \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{pmatrix} \quad (21)$$

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

마지막으로  $vel\_grinder$ 를 DPM의 자코비안[7]을 이용하여 아래와 같이 리니어 액추에이터의 속도로 변환한다.

$$[\theta_{13}, \theta_{23}, \theta_{33}, \theta_{43}, \theta_{53}, \theta_6] T = J vel\_grinder \quad (22)$$

여기서  $\theta_{ij}(i=1, 2, \dots, 5)$ 는 리니어 액추에이터의 속도이고,  $\theta_6$ 는 회전 액추에이터의 속도이며,  $J$ 는  $6 \times 6$  자코비안 행렬이다. 자코비안을 구하기 위해서는 액추에이터의 위치에 따른 툴의 위치와 자세를 구하는 순방향 기구[8] 해석이 수행되어야한다. 일반적으로 병렬기구의 순방향 해석은 많은 연산량을 요하므로 실시간 처리에 큰 장애가 되나 DPM 중앙축의 구속조건을 이용하여 실시간 처리가 가능하다. 위의 알고리즘을 구현하는 Control Scheme은 Fig. 4와 같다.

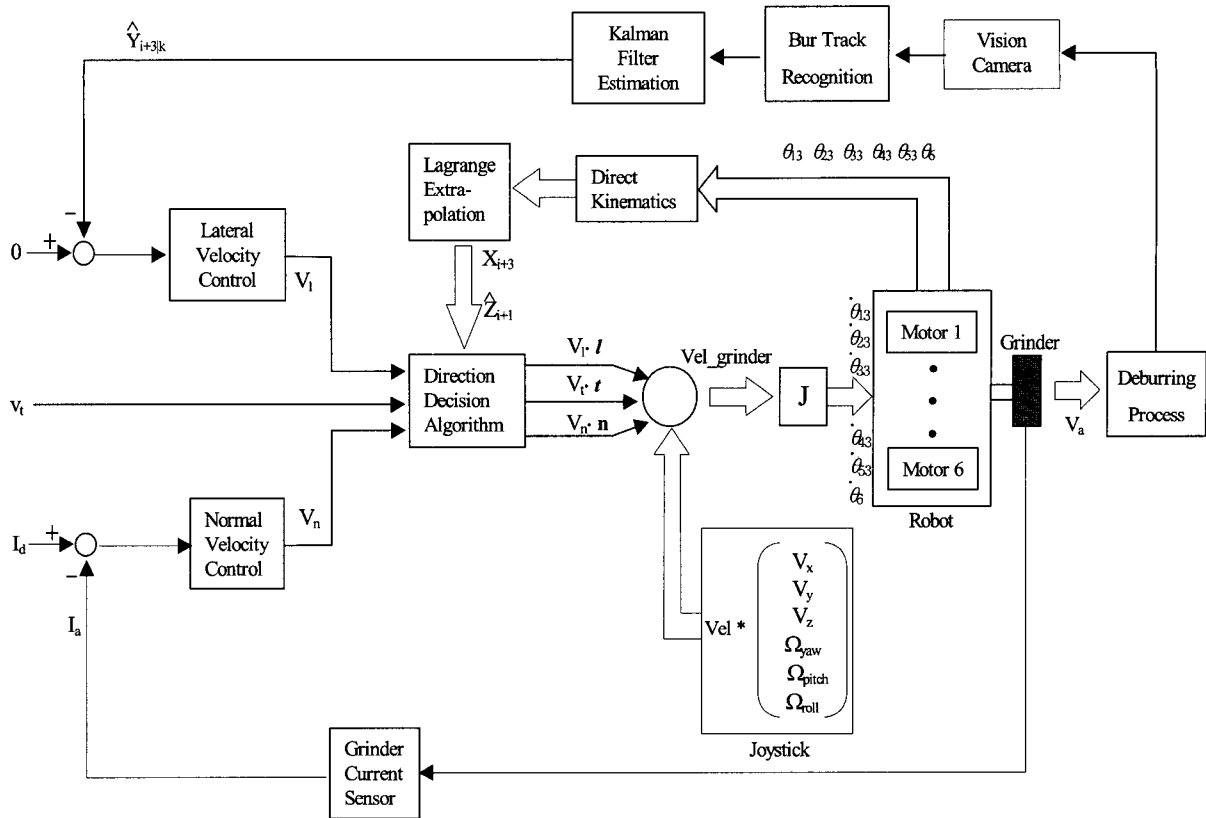


Fig. 4. Control scheme for unknown geometric surface grinding.

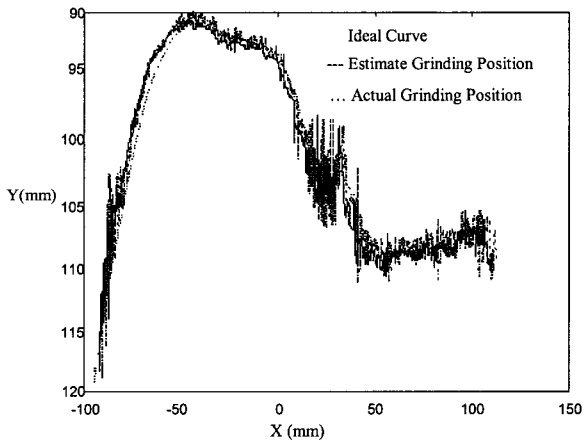
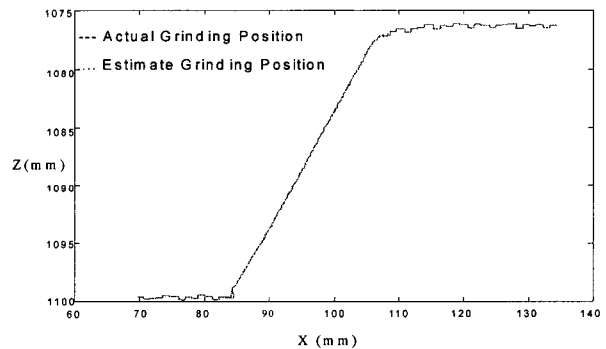


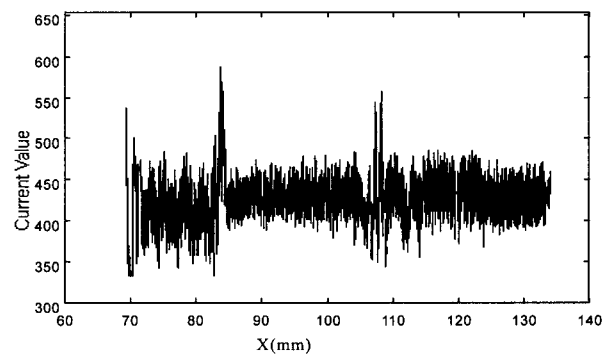
Fig. 5. Tracking in X-Y plane by vision system and Kalman filter.

### 5. 실험결과

3차원 곡면에 버어의 궤적을 표시하고, 그라인더가 그 궤적을 따라 일정한 부하를 유지하면서 디버링 작업을 수행했다. X-Y방향으로 궤적을 따라간 결과는 Fig. 5와 같다. 약간의 오차를 가지고 실제 곡선을 추적함을 알 수 있다. 0에서 50mm 사이는 버어 궤적이 뚜렷하지 않아 비전이 곡선의 중심선을 정확히 인식을 하지 못함으로써 좌우로 심하게 움직인 것을 알 수 있다. 비전과 로봇의 부정확한 보정도 오차를 유발한다.  $X_i$ 와  $X_{i+1}$ 의 간격을



Tracking in X-Z plane



Grinder current

Fig. 6. Deburring process with slope estimation.

1mm로 설정하고 Lagrange 보간법으로 기울기를 추종하면서 작업을 실시하면 Fig. 6과 같다. 그라인

더를 접선방향으로 진행시키고, 법선 방향으로 밀어주므로 수평면, 오르막에서 실제 궤적을 정확히 따라가고 기울기가 급격히 변하는 곳을 제외하고는 일정한 부하를 갖는다. 그라인더의 진행 방향을 역으로 실시해도 내리막에서 일정한 부하를 얻었다.

## 6. 결론

2단 병렬기구 로봇을 미지 형상의 디버링 작업에 적용했다. 3차원의 형상을 수평면(X-Y)과 수직면(X-Z)으로 분리하고, X-Y 평면에 존재하는 버어 궤적을 비전 센서를 이용하여 인식하고,

X-Z 평면에 나타나는 표면의 높이는 톨에 제공되는 전류를 측정하여 인식했다. 형상을 인식할 수 있는 센서만으로는 갑자기 변하는 버어 궤적에 대응할 수 없으므로 칼만 필터를 이용하여 X-Y 평면상의 궤적을 추종하고, 표면의 기울기를 Lagrange 외삽법을 이용하여 추적했다.

시스템 성능 실험을 위해 3차원 형상 표면에 궤적을 표시하고 디버링 작업을 실시했다. X-Y 평면 운동에서 비전의 곡선 중심의 인식 오차, 긴 샘플링 시간과 로봇의 보정 문제에도 불구하고 제어가 잘 이루어졌다. X-Z 평면에서 수평부분은 작업이 안정적으로 이루어졌지만 기울기가 급격히 양(+)의 방향으로 변하는 경우 절삭 두께가 커지고, 음(-)의 방향으로 변하는 경우 거의 절삭이 이루어지지 않았다. 그러나 기울기를 추종하면 급격한 변화에도 항상 일정한 절삭 부하를 유지하면서 안정적으로 작업이 이루어졌다.

향후 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 보

정이 필요하며, X-Z 평면의 향상된 제어를 위해 전류센서와 힘 센서의 융합(fusion)이 필요하다.

## 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 J. of Robotics and Automation*, vol. 3, no. 1, pp.7-18.
- [2] Kazerooni, H., Bausch, J. J., Kramer, B. M., "An Approach to Automated Deburring by Robot Manipulators," *ASME J. Dynamic Systems Measurement, and Control*, vol. 108, no. 4, pp. 354-365. 1986.
- [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] D. Stewart, "A Platform with Six Degrees of Freedom," *Proc. Inst. Mech. Eng. London*, vol. 180, part 1, no. 5, pp. 371-386, 1965.
- [6] M. K. Lee, 1995 "Design of a High Stiffness Machining Robot Arm using Double Parallel Mechanism," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Nagoya, pp. 234-240, 1995.
- [7] 이민기, 이성학, 박근우, "2단 병렬 머니플레이터의 특이점 해석", 대한 기계학회 논문집 A권, 제 22권, 제 10호, pp. 1922-1929, 1998년 10월.
- [8] 이민기, 박근우 "2단 평행구조 로봇트 암의 실시간 순방향 구조학 해석," 대한 기계학회 논문집(A), 제 21권 제1호, pp.144-153, 1997년 1월