大韓機械學會論文集 第12卷 第1號, pp. 163~172, 1988.

<論 文>

기하학적 적응제어에 의한 엔드밀링머시인의 안내면오차 규명

정 성 종*·이 종 원**

(1987년 10월 15일 접수)

Identification of Guideway Errors in the End Milling Machine Using Geometric Adaptive Control Algorithm

Sung-Chong Chung and Chong-Won Lee

Key Words: Exponential Smoothing Method(지수평활법), Idle-Running State(비절삭 운전 상태), Machining State(가공 상태), Nonrepeatable Error(비반복 오차), Straightedge(곧은자)

Abstract

An off-line Geometric Adaptive Control Scheme is applied to the milling machine to identify its guideway errors. In the milling process, the workpiece fixed on the bed travels along the guideway while the tool and spindle system is fixed onto the machine. The scheme is based on the exponential smoothing of post-process measurements of relative machining errors due to the tool, workpiece and bed deflections. The guideway error identification system consists of a gap sensor, a, not necessarily accurate, straightedge, and the numerical control unit. Without a priori knowledge of the variations of the cutting parameters, the time-varying parameters are also estimated by an exponentially weighted recursive least squares method.

Experimental results show that the guideway error is well identified within the range of RMS values of geometric error changes between machining passes disregarding the machining conditions.

1. 서 론

정밀기계 가공에서는 가공공정과 공작기계 자체의 부정확한 운동에 의하여 발생되는 정밀도 오차가 문제가 된다. 이와같은 가공오차에 의하여 발생되는 엔드밀링에서의 직진도오차를 개선하기 위하여 기하학적 적응제어(geometric adaptive control; GAC) 방법이 도입되었다[1]. 그러나 이 경우 안내면의 오차가 시간에 따라서 변하게 되면 직진도 개선에는 많은 문제점이 발생하게 된다[2]. 기계가공은 일반적으로 공작물이 회전 또는 테이블에 고정되고 공구가 부착된 공구대가 회전

*정회원, 한양대학교 공과대학 기계설계학과
**정회원, 한국과학기술원 기계공학과

또는 이송 운동을 하거나, 공구대는 고정되거나 회전 운동을 하고 공작물이 고정된 테이블이 이송 운동을 하는 경우의 두가지 형태로 분류할 수 있다. 전자의 경우에는 가공중 발생하는 안내면의 오차를 STP 법[3] 등을 이용하여 쉽게 측정할 수 있지만, 후자의 경우처럼 공작물이 고정된 테이블이 이송 운동을 하는 형태의 공작기계에서 안내면의 오차를 규명하기란 쉽지 않다[4~5]. 물론 이와같은 공작기계에서는 정확한 곧은자(straightedge)를 이용하면 그의 안내면오차를 규명할 수 있지만, 실제로 정확한 곧은자를 제작하는데 어려움이 있으며, 정확한 곧은자의 선택이 이루어졌다고 하더라도 그의 창작에 어려움이 따르기 때문이다[5].

안내면오차 및 가공중 공구의 처짐이나 공작물 변형 등의 제오차 원인에 의하여 발생되는 직진도오차는 Fig. 1과 같이 가공면과 실제 가공면과의 평균적인 편차인 위치오차(location error)와 전체 직진도오차에서 위치오차를 뺀 파형오차(waviness error)로 구분된다. 조도오차는 직진도오차가 정력학적이고 결정적인(deterministic) 원인에 의하여 발생되는 것과는 달리 주로 동력학적이고 랜덤한 원인에 의하여 일어나며 파형이 높은 주파수 성분으로 이루어진다. 공작물의 크기가 커지고 채터 및 간헐적인 절삭(intermittent cutting)에 의한 조도오차를 무시할 수 있는 통상적인 절삭조건 하에서는 직진도오차가 중요하게 된다.

GAC를 이용한 가공 정밀도의 향상에 대한 연구는 많이 진행되어왔으나[6~8]. 본 논문에서는 GAC 방법을 이용하여 공작기계의 안내면오차를 수치제어 공작기계가 가지고 있는 가공조건의 조절 능력을 이용하여 가공오차를 보상제어함으로써 규명(identification)할 수 있는 방법을 제시한다. 안내면오차에 의하여 발생되는 공작물 표면의 오차중 그의 AC 성분인 가공된 공작물 표면에서 발생하는 파형오차가 중요하며 이와 같은 안내면오차를 규명하기 위하여 위치오차는 가공전 밀링베드를 수치제어 장치를 이용하여 가공면에 수직한 방향으로 움직여 수치제어 장치인 스텝모우터의 분해능 한계내에서 보정하고 또한 공구휨에 상당하는 만큼 이동속도를 더함으로써 제어하며, 파형오차는 이송속도와 공작기계 처짐 사이의 관계를 수정된 Taylor의 공구수명식으로 모형화하고 절삭공정중 이송속도를 적절히 조절하여 공구와 공작물의 휨양을 제어함으로써 구동장치로 스텝모우터를 갖는 밀링머시인에서 길이 508mm, 두께 20mm의 두꺼운 연강철판(SB41)을 평면절삭하는 경우 안내면오차를 규명할 수 있도록 하는 GAC 방법을 개발하였다.

측정은 밀링머시인 자체의 구조적 동적 변화나 절삭조건의 변화, 공구의 재질 및 마멸 상태의 변화, 공작물의 재질 변화등에 적응할 수 있도록 Fig. 2에 보인 바와 같이 등간격으로 배열된 100개의 위치에서 지수평활(exponential smoothing)법을 이용하여 절삭공정중 발생하는 공구와 공작물 사이의 상대적인 가공오차를 가공후측정(post-process measurement)과 곧은자 표면에서 가공중측정(in-process measurement)을 통하여 취하였다. 절삭계수의 추정은 위와같은 방식으로 나누어진 100개의 각 구간에서 계의 특성이 변하지 않는다는 가정하에서 계수를 지수가중 반복최소자승(exponentially weighted recursive least squares; EwRLS)법으로 추정하고, 실제 절삭작업중 처짐모형의 계수 변화에 대한 사전 지식이 없이도 매 절삭공정마다 이들 계수를 보정시키며 안내면오차를 규명할 수 있도록 하였고, 절삭조건에 따른 효과와 그 반복성을 증명하기 위하여 안내면오차의 형상을 피드백제어 할 수 있는 추종제어를 실시하여 방법의 타당성을 증명하였다.

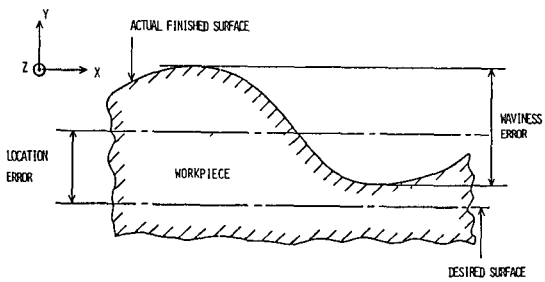

Fig. 1 Surface errors generated by end milling process

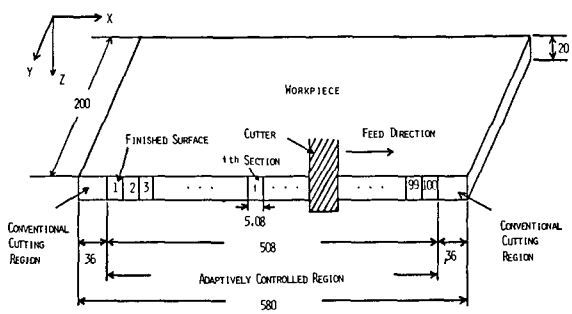

Fig. 2 Workpiece shape and adaptive controlled region

2. 가공오차 및 처짐의 수학적 모형

안내면의 부정확한 직선운동이나 공구와 밀링베드의 상대적인 강성도 차이로 발생하는 가공오차는 일종의

결정적인 오차로 파형오차의 주된 원인이 되며, 공구의 처짐과 공작기계의 변형 및 구동장치의 부정확성에 의하여 위치오차가 발생된다.

공작물의 강성이 크지 않고 공작기계의 베드와 안내면 사이의 접촉이 느슨한 경우 및 이송장치의 강성도가 전체적으로 약한 경우에는 공작물 및 안내면의 변형에 의하여 가공오차가 발생되며, 밀링가공에서 공작물은 체결장치를 이용하여 가공중 안내면 위의 베드에 고정이 되므로 공작물의 강성이 큰 경우라면 가공오차는 Fig. 3과 같은 변형모형에 의하여 기인된다. Fig.4와 같은 측정시스템을 이용하여 공칭 이송속도 f_o에서 밀링가공후 센서 0으로 안내면 위에서 비절삭 운전상태(idle-running state)에서 가공후 공작물 표면의 전체 직진도오차를 공작물의 이송방향 x에 따라서 측정하면 안내면 위의 밀링베드 안내점에서의 강성도 차이에 의하여 발생되는 베드의 처짐 $b_y(x,f_o)$, 안내면오차 $d_o(x)$와 공구처짐에 의한 오차 $d_y(x,f_o)$로부터 다음과 같이 된다.

$$y_t(x,f_o)=d_o(x)+d_y(x,f_o)+b_y(x,f_o) \quad (1)$$

다듬질절삭의 상향밀링의 경우 y방향의 절삭력은 양이 되며, 절삭력과 공구처짐 사이에 선형적인 관계가 성립한다고 하면 공구처짐은 일정한 반경방향 및 축방향의 절삭깊이를 갖는 경우, 스핀들속도의 영향을 무시하면 다음과 같이 된다.[1,2]

$$d_y=C_t f^{q_t} \quad (2)$$

여기서 C_t와 q_t는 공구의 재질 및 마멸상태, 공작물의 재질 그리고 베드의 위치에 따른 강성도에 따라 변하는 알려지지 않은 절삭과정의 계수이다. Fig. 3의 기하학적인 관계를 고려한다면 공작물과 밀링베드의 변형에 의하여 발생되는 베드처짐은 가공공정중 발생하는 절삭력에 영향을 주로 받으므로 식(2)와 같은 형태로

$$b_y=C_b f^{q_b} \quad (3)$$

와 같이 유도된다. 위의 (2)와 (3)식을 Fig. 2와 같은 등간격으로 나누어진 i번째 각 적응제어 구간에서 (C_t, q_t)와 (C_b, q_b)의 절삭계수의 변화가 없다고 가정하고 n번째 가공공정에 따라서 이산화 시키고 행렬식으로 표현하면

$$Y_{t,n}(i)=x_n^t(i)\hat{\theta}_{t,n}(i)+e_{t,n}(i) \quad (4)$$

$$Y_{b,n}(i)=x_n^t(i)\hat{\theta}_{b,n}(i)+e_{b,n}(i) \quad (5)$$

이 되고, 여기서

$Y_{t,n}(i)=\ln d_{y,n}(i)$

$Y_{b,n}(i)=\ln b_{y,n}(i)$

$x_n^t(i)=[1\ \ln f_n(i)]$

$\hat{\theta}^t_{t,n}(i)=[\ln \hat{C}_{t,n}(i)\ \ \hat{q}_{t,n}(i)]$

$\hat{\theta}^t_{b,n}(i)=[\ln \hat{C}_{b,n}(i)\ \ \hat{q}_{b,n}(i)]$

$i=1,2,\cdots M$: $M=100$: 구간번호

t : 행렬의 전위

$\hat{}$: 추정치

이고, $e_{t,n}(i)$와 $e_{b,n}(i)$는 이산화시킨 잡음항이다.

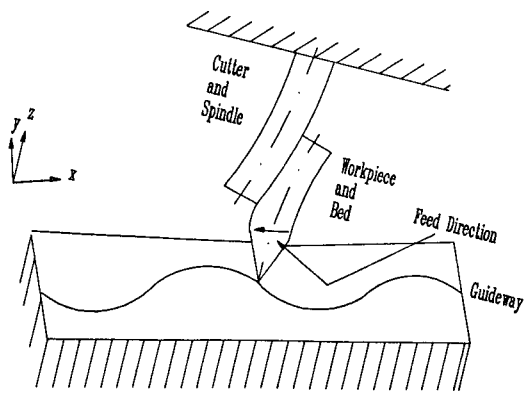

Fig. 3 Error model for an end milling machine

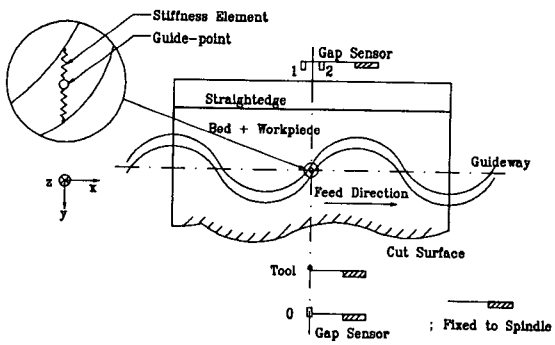

Fig. 4 Measuring system

3. 안내면오차의 추정

앞절에서 유도된 처짐모형의 절삭계수들은 공구마멸, 공작물의 재질, 공구의 형상 및 이송장치의 특성변화들에 의하여 시간에 따라서 변하게 된다. 절삭공정중 공구와 베드의 처짐량을 제어하여 안내면오차를 찾기 위한 GAC를 수행하기 위하여는 각 적응제어 구간에서 절삭공정의 변화는 물론 절삭계수의 변화를 정확하게 추정할 필요가 있다. 이와같은 시간에 따라서 변하는 특성을 추종하기 위하여 공구와 베드처짐 모형에 대하여 참고문헌 (1)에 제시된 EWRLS 법을 이용하여 절삭계수들을 추정하였다.

식(1)로부터 직진도제어의 목적은 $y_t(x,f_o)$를 가능한

0에 가깝도록 유지시키는 것이다[1,2]. 위치오차는 절삭개시전 밀링베드를 y 방향으로 이동시킴으로써 스텝모우터의 분해능 한계내에서 보상된다. 그리고 파형오차는 이송속도와 공구 휨 및 베드 휨 사이의 관계식을 이용하여 제어할 수 있고 먼저 방법으로 보상할 수 없었던 잔류 위치오차는 오차값에 따라서 전체적인 이송속도를 조절함으로써 보정할 수 있다. 위의 두 제어방법을 n번째 공작물이나 가공공정에 도입하면 식 (1)은

$$y_{t,n}(i,f_n(i))=d_n(i)+d_{y,n}(i,f_n(i))+b_{y,n}(i,f_n(i))+d_{loc}$$
$$=[d_n(i)+d_{y,n}(i,f_n(i))+b_{y,n}(i,f_n(i))$$
$$-\bar{d}_{y,n}-\bar{b}_{y,n}]+[d_{loc}+\bar{d}_{y,n}+\bar{b}_{y,n}] \quad (6)$$

여기서

$$\bar{d}_{y,n}=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} d_{y,n}(i,f_n(i))$$

$$\bar{b}_{y,n}=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} b_{y,n}(i,f_n(i))$$

d_{loc} : n번째 절삭이전에 y 방향으로 수치제어 장치를 이용하여 보정한 위치오차

M : 전체 측정점의 갯수

이 된다. 식(6) 오른쪽의 첫항은 파형오차이고 두번째 항은 위치오차 이다. 우선 두번째항을 0으로 놓으면 이송속도의 평균치를 구할 수 있고 여기에 첫째항을 0으로 하는 이송속도의 변화량을 더하면 $y_{t,n}(i,f_n(i))=0$으로하는 최적 이송속도를 구할 수 있다. 식 (6)에서 문제가 되는 것은 안내면의 오차$d_n(i)$이며 이와같은 오차를 측정하기 위하여 Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 공작기계의 베드 위에 곧은자를 창착하였다. 그러나 곧은자 자체의 오차가 무시될 수 없는 경우나 곧은자 자체의 장착시 발생하는 오차에 의하여 곧은자 자체의 표면을 측정하여 얻어진 안내면오차에는 곧은자의 오차가 포함되어 진다. 이와같은 곧은자 자체의 오차에 무관하게 적당한 곧은자만 있으면 공구를 장착한 스핀들 축이 고정되고 공작물이 장착된 베드가 안내면 위에서 움직이는 공작기계에서 안내면오차를 측정할 수 있는 다음과 같은 방법이 필요하게 된다.

비절삭 운전 상태에서 가공된 공작물이 장착된 밀링베드를 이송방향으로 움직이면서 n번째 가공후 측정을 곧은자 표면에서 행하면 곧은자 표면에서 측정치는

$$z_n(x)=d_n(x)+m_n(x) \quad (7)$$

로 주어진다. 여기서

$d_n(x)$: n번째 비절삭 운전 상태에서 안내면오차

$m_n(x)$: n번째 비절삭 운전 상태에서 곧은자오차

이다. 초기 안내면오차에 대한 상대적인 안내면오차 변환의 추정치는 초기 안내면오차에 대한 새로운 안내면오차의 상대적인 변환과 과거의 안내면오차의 상대적인 변환의 추정치로부터 평활계수를 0.5로 하는 지수 평활법을 이용함으로써 n번째 가공공정에서

$$\hat{v}_n(x)=0.5[z_{n-1}(x)-z_{-1}(x)]+0.5\hat{v}_{n-1}(x) \quad (8)$$

로 주어지며, 여기서

$z_{n-1}(x)$: $(n-1)$번째 비절삭 운전 상태에서 곧은자 표면의 가공후 측정치

$z_{-1}(x)$: 초기 절삭이 수행되기전 비절삭 운전 상태에서 곧은자 표면의 측정치(즉, GAC 실험을 시작하기 전에 측정된 초기의 곧은자 표면오차)

$n=1,2,3,\cdots$: 가공(또는 비절삭 운전) 공정 번호

연속적인 관계를 가공공정이나 비절삭 운전 상태의 횟수들에 적용시키면 n번째 가공공정에서 발생할 것이라고 예측된 안내면오차의 변환 값은 곧은자와 안내면의 오차값을 이용하여

$$\hat{v}_n(x)=\sum_{j=0}^{n-1} 0.5^{n-j}(d_j+m_j)-\sum_{j=1}^{n} 0.5^j(d_{-1}+m_{-1}) \quad (9)$$

과 같이 표현되며, 많은 가공공정 횟수 n에 대하여

$$\hat{v}_n(x)=(\hat{d}_n-d_{-1})+(\hat{m}_n-m_{-1}) \quad (10)$$

과 같이 유도된다. 여기서

m_{-1} : GAC 실험을 수행하기 전의 초기 곧은자오차

d_{-1} : GAC 실험을 수행하기 전의 초기 안내면오차

$\hat{d}_n=\sum_{j=0}^{n-1} 0.5^{n-j}d_j$: n번째 가공공정에서 추정된 안내면오차

$\hat{m}_n=\sum_{j=0}^{n-1} 0.5^{n-j}m_j$: n번째 가공공정에서 추정된 곧은자오차

이다. 가공중 주위의 온도변화가 심하지 않은 경우 곧은자의 시간에 따른 오차변화를 무시할 수 있으며, 식 (10)으로부터 초기 안내면오차에 대한 n번째 가공공정에서 발생할 안내면오차를 측정할 수 있는 값 $\hat{v}_n(x)$에 대하여 구하면

$$\hat{d}_n(x)=\hat{v}_n(x)+d_{-1} \quad (11)$$

로 주어지게 되고 안내면오차의 규명은 초기 안내면오차 d_{-1}의 올바른 추정이 없이는 불가능하게 된다.

4. 초기 안내면오차의 규명

Fig. 5는 절삭과정중 절삭위치에 관계없이 공구의 휨이 일정하게 일어나고 안내면의 오차가 없다고 가정한 경우에 공작물을 장착한 밀링베드의 가공중 및 가공후 발생하는 변형의 기하학적인 관계를 보여주고 있

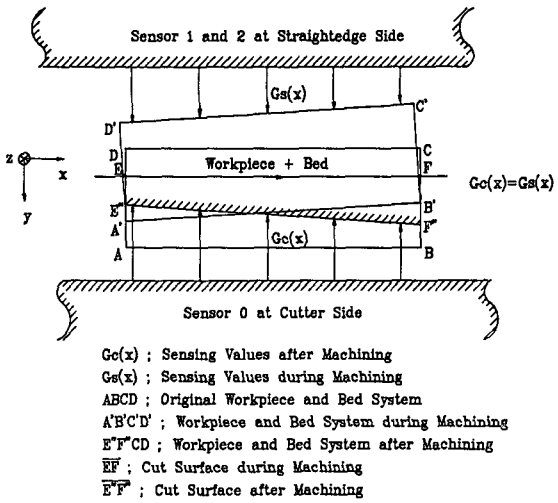

Fig. 5 Workpiece and bed motion

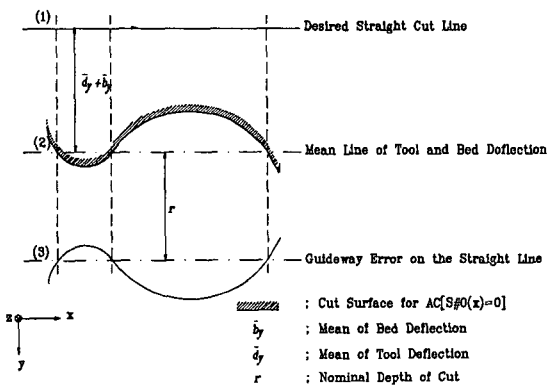

Fig. 6 Cut surface vs. geometric errors

다. 가공중에 발생하는 밀링베드의 변형량은 가공중 곧은자 표면으로부터 얻어진 오차값에서 가공후 비절삭운전 상태하에서 곧은자 표면으로부터 얻어진 오차값을 뺌으로써 $G_S(x)$의 항으로 얻어지며, 이것은 탄성복원력에 의하여 안내면 위에서 가공중 변형된 밀링베드($A'B'C'D'$)는 비절삭운전 상태에서 원래의 가공전 변형되지 않은 위치($E''F''CD$)로 되돌아 오기 때문이다. 가공후 비절삭운전 상태에서 Fig. 4의 센서 0으로 측정된 공작물 표면의 가공오차는 $G_C(x)$로 얻어지게 되며 절삭된 양을 측정값에서 제거하면 이때 측정된 가공오차는 베드의 휨에 의하여 발생된 $G_S(x)$와 같게된다. 이상의 결과를 이용하면 절삭중 밀링베드의 휨에 의하여 발생하는 오차성분인 $b_y(x,f)$의 항은 공구의 휨과 안내면의 오차가 존재하는 경우에도 센서 0으로 가공후 측정된 표면의 오차로부터 분리해낼 수 있게 된다. 그리고 n번째 비절삭운전 상태에서 Fig. 4의 센서 0으로부터 측정된 전체 직진도오차는 가공된 표면오차와 안내면오차에 의하여

$$y_{t,n}(i,f_n(i))=s_n(i)+d_n(i) \tag{12}$$

여기서,

$s_n(i)$: n번째 절삭공정하의 i번째 구간에서 가공된 공작물 표면오차

$d_n(i)$: n번째 비절삭 운전 상태의 i번째 구간에서 안내면오차

와 같은 이산화된 형태로 표현할 수 있다.

식(11)과 식(12)로부터

$$y_{t,n}(i,f_n(i))-\hat{v}_n(i)=s_n(i)+d_n(i)-\hat{d}_n(i)+d_{-1}(i)$$

이 되고, 가공공정 횟수 n이 크고 공정횟수 사이에서 안내면오차의 변환 특성이 크지 않다고 가정하면, 윗식은

$$y_{t,n}(i,f_n(i))-\hat{v}_n(i)=s_n(i)+d_{-1}(i) \tag{13}$$

과 같이 되고 여기서 $y_{t,n}(i,f_n(i))$와 $\hat{v}_n(i)$는 비절삭운전상태에서 완벽하게 측정할 수 있는 측정치이다.

Fig. 6의 (3)과 같은 안내면오차의 패턴(pattern)을 갖는 절삭기구에서 원하는 절삭면 (1)은 절삭공정에서 발생하는 공구나 베드의 휨양을 적절히 조절함으로써 얻을 수 있게된다. 만일 일정한 양의 변형이 가공중 절삭위치에 관계없이 발생하도록 가공한후 비절삭운전상태에서 센서 0으로 가공된 표면의 측정값을 구하면 Fig. 6의 (3)과 같은 안내면오차와 동일한 형태의 측정치를 얻을 수 있게되며, 이는 절삭위치에 관계없이 표면오차가 일정하게 되도록 가공된 것을 뜻한다.

식(13)으로부터 초기의 안내면오차를 Fig. 4에 주어진 센서들로부터 측정된 값만으로 구하기 위하여는 $s_n(i)=0$으로 할 수 있는 표면오차를 제어하는 보상제어법을 필요로 하게된다. 절삭공정의 횟수에 따라서 기하학적인 적응제어법[1,2]을 적용하면 과형오차 성분과 위치오차 성분으로

$$\begin{aligned} y_{t,n}(i,f_n(i))-\hat{v}_n(i)&=s_n(i)+d_{-1}(i)+d_{loc}\\ &=[d_n(i)+d_{y,n}(i,f_n(i))+b_{y,n}(i,f_n(i))\\ &\quad -\hat{v}_n(i)-\bar{d}_{y,n}-\bar{b}_{y,n}]+[d_{loc}+\bar{d}_{y,n}+\bar{b}_{y,n}] \end{aligned} \tag{14}$$

이 되고, 여기서

$d_{loc}=HT$: n번째 절삭공정전 y에 수직한 방향으로 보상할 위치오차

H : 상수

T : NC 장치의 최소 분해능

i : 구간번호

n : 절삭공정 횟수

이다. $(n+1)$번째 가공공정에서 표면오차 $s_{n+1}(i)$가 0

이 될 수 있도록 하는 제어입력인 이송속도는 식 (2), (3) 그리고 (14)로부터

$$\hat{C}_{t,n}(i)\int_{n+1}^{\hat{q}_{t,n}(i)}(i)+\hat{C}_{b,n}(i)\int_{n+1}^{\hat{q}_{b,n}(i)}(i) = -d_{loc} \tag{15}$$

과 같이 구해진다. 여기서 $\hat{C}_{t,n}(i)$, $\hat{C}_{t,n}(i)$, $\hat{q}_{t,n}(i)$ 그리고 $\hat{q}_{b,n}(i)$는 EWRLS 법[1,2]에 의하여 추정할 수 있고 이송속도는 bisection 방법에 의하여 식 (15)로부터 구해진다. 이와같은 방법에 의하여 $(n+1)$번째 가공공정에서 공작물의 표면오차 $s_{n+1}(i)=0$이 되면 초기 안내면오차의 추정치는 식 (13)으로부터

$$\hat{d}_{-1}(i)=y_{t,n+1}(i,f_{n+1}(i))-\hat{v}_{n+1}(i) \tag{16}$$

와 같이 센서를 이용하여 측정 가능한 값으로 구해진다. 이와같이 구해진 초기 안내면오차를 이용하면 n번째 가공공정에서 발생하는 안내면오차의 추정치는 식 (11)을 이용하여 구할 수 있다.

5. 안내면오차의 추종제어

안내면오차를 규명할 수 있도록 개발된 GAC의 정당성을 증명하기 위하여 n번째 절삭공정에서 Fig.4 의 센서 0으로 가공후 측정한 표면오차 값이 0이 되도록 하는 〔Fig. 6의 (2)의 경우〕 즉, 안내면오차의 형상대로 절삭작업이 이루어질 수 있는 추종제어 방법을 개발하였다. $(n+1)$번째 가공공정에서 추종작업이 이루어지도록 하는 제어입력인 이송속도는 식 (2), (3) 그리고 (6)으로부터

$$\hat{C}_{t,n}(i)\int_{n+1}^{\hat{q}_{b,n}(i)}(i)+\hat{C}_{b,n}(i)\int_{n+1}^{\hat{q}_{b,n}(i)}(i) = -\hat{d}_{n+1}(i)-d_{loc} \tag{17}$$

와 같이 구해지며, 여기서 $\hat{C}_{t,n}(i)$, $\hat{C}_{b,n}(i)$, $\hat{q}_{t,n}(i)$ 및 $\hat{q}_{b,n}(i)$는 EWRLS 법[1,2]을 이용하여 추정하며 bisection 방법에 의하여 이송속도를 계산한다.

6. 실 험

앞절에 소개된 GAC를 적용하기 위하여 참고문헌 (1)에 소개된 밀링머시인의 y 방향을 고정하는 레바를 풀어서 안내면과 밀링베드 사이의 강성도가 취약하게 되도록 하였다. 이 경우 베드면과 안내면 사이의 강성도의 취약성 때문에 가공중 밀링베드의 변형이 중요하게 되고 이것을 측정하기 위하여 합금공구강(SKS-3)으로 제작한 곧은자(정도 : 40μm/600mm)를 절삭면 뒷쪽의 베드위에 Fig. 7과 같이 부착하였다. 측정시 안내면위에서 베드의 회전운동에 의하여 측정치에 발생하는 오차를 방지하기 위하여 Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 갭 센서(Ono Sokki, VS-021) 2개를 갭 센서 0 양쪽에 25.4mm 간격으로 부착하였다. 측정시 발생하는 진동에 의한 영향을 방지하기 위하여 cutoff 주파수 1

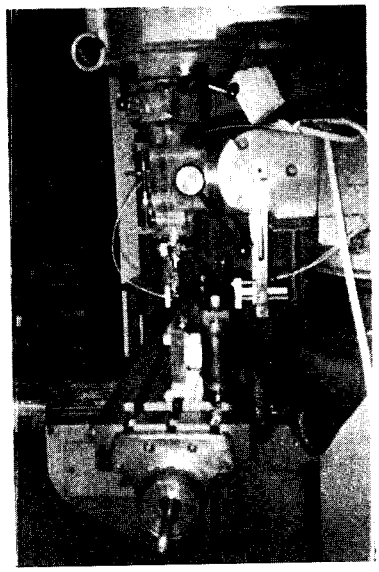

Fig. 7 Sensing system

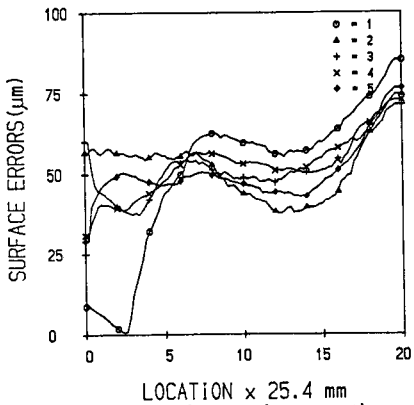

Fig. 8 Surface errors under various cutting conditions
(1:radial depth of cut dc=0.381mm, spindle speed N=300rpm, feedrate f=0.127mm/tooth
2:dc=0.762mm, N=400rpm, f=0.095mm/tooth
3:dc=0.381mm, N=300rpm, f=0.064mm/tooth
4:dc=0.381mm, N=300rpm, f=0.254mm/tooth
5:dc=0.762mm, N=400rpm, f=0.1905mm/tooth, and
axial depth of cut a=20mm, number of tooth z=4)

Hz의 Low Pass 필터를 사용하였으며 그 밖의 데이타 처리 및 제어장치는 참고문헌(1)의 경우와 동일하게 취하였다.

Fig. 8은 주어진 절삭조건에 따라서 가공후 절삭표면의 가공오차를 측정한 결과이다. 참고문헌(1)에 소개된 경우와는 달리 오차중 비반복오차(nonrepeatable error)의 항이 뚜렷하고 이것이 밀링베드 및 안내면오차의 변화에 의하여 유발됨을 알 수 있다.

절삭계수 추정시 수렴성을 증대시키기 위하여 단일계수 추정법[5]을 도입하였으며 실험은 GAC의 타당성을 입증하기 위하여 Table 1에 주어진 2가지 경우에 대하여 행하였다. 초기 절삭계수는 초기 절삭계수 추정법[1,2]에 의하여 Exp. #1의 경우는 $(\ln\hat{C}_{t,o})=4.862$와 $(\ln\hat{C}_{b,o})=5.836$ 그리고 Exp. #2의 경우는 $(\ln\hat{C}_{y,o})=2.397$과 $(\ln\hat{C}_{b,o})=6.099$로 취하였다.

이송속도는 공구형상에 의한 기하학적인 표면조도를 1μm 이내로 하고 공작물 표면에서 공구와의 마찰로 인한 굽힘현상을 방지하기 위하여 제한 조건을 다음과 같이 주었다.

$$0.0635\text{mm/tooth}\leq f(i)\leq 0.2794\text{mm/tooth} \quad (18)$$

Table 1 Experimental conditions

Number of exp.	Radial depth of cut (mm)	Axial depth of cut (mm)	Spindle speed (rpm)
1	0.381	20	300
2	0.762	20	400

7. 결과 및 토론

Fig. 9는 Exp. #1의 조건에서 60번째 가공공정까지 단일계수 추정법으로 GAC를 수행한 결과이다. 이송속도의 지수부분인 $\hat{q}_{t,n}$과 $\hat{q}_{b,n}$는 적응제어 과정중 계수의 수렴성을 증대시키기 위하여 EWRLS법에 의하여 추정하는 대신 각각 0.73과 0.93으로 고정하였으며[5], 단지 공구와 베드의 처짐모형의 컴플라이언스 부분만을 적응 추정토록 하였다. 4절에 소개된 GAC법에 의하여 35번째 절삭공정까지 초기 안내면오차 추정을 수행하였다. 26번째 가공공정에서 공구의 마멸에 의한 영향을 배제하기 위하여 공구교환을 하였으며 27번째 절삭가공후 나타나는 초기 안내면오차 추정치는 35번째 절삭가공시 발생한 초기 안내면오차의 추정치와 비슷한 형태로 추정되었고, 이상의 결과로부터 31번째부터 35번째 절삭공정 중에 추정할 수 있었던 오차들의 Ensemble 평균으로 초기 안내면오차를 규명하였다. 이와 같이 추정된 초기 안내면오차와 Fig. 10에서 볼 수 있는 가공공정중 발생하는 안내면오차의 변환치를 합함으로써 매 가공공정 마다 안내면오차를 구할 수 있으며, 5절에 소개된 안내면오차의 추종제어를 수행하였다. 52번째 절삭공정에서 공구교환을 한 경우를 제외하고 직진도제어 효과는 508mm의 평면절삭 과정에서 3단계 이후 10μm 이내로 할 수 있음을 볼 수 있다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이 공구교환에 의하여 몇몇 구간에서 컴플라이언스 값의 조그만 변화가 발생하지만 절삭계수의 변화특성은 각구간에서 시간에 따라서 서서히 변화하는 형태로 수렴하게 된다. 이와 같은 컴플라이언스 값의 결과로부터 본 공작기계 이송장치의 강성도는 절삭이 진행하는 방향에서 왼쪽으로 갈수록 약해지는 것을 알 수 있지만, 절삭공정의 횟

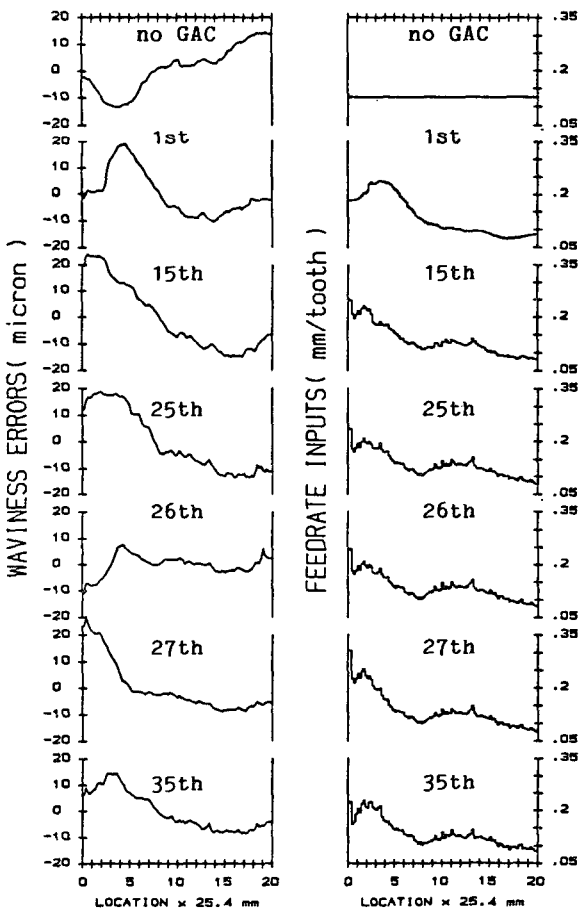

Fig. 9(a) Initial guideway error estimation processes; Exp. #1 (dc=0.381mm, N=300rpm, a=20mm, z=4)

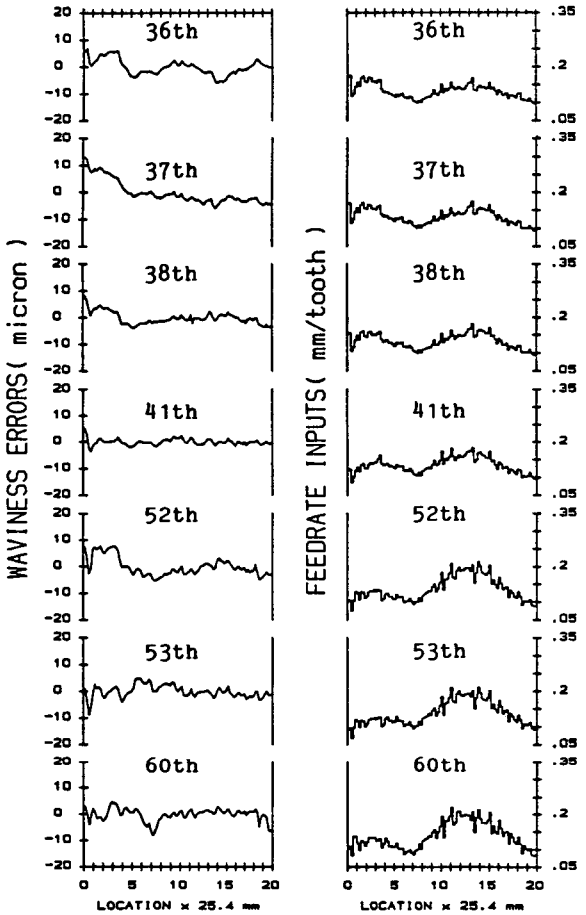

Fig. 9(b) Tracking control of guideway errors; Exp. #1 (dc=0.381mm, N=300rpm, a=20mm, z=4)

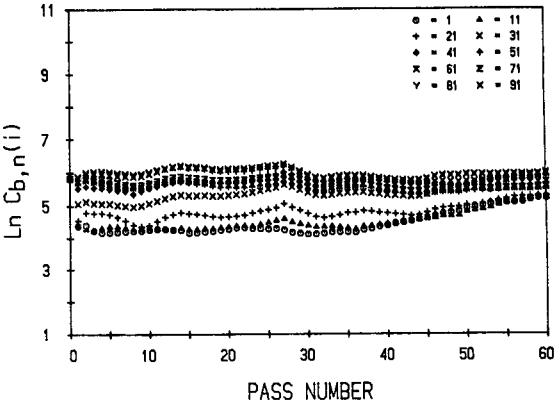

Fig. 11(a) Cutting parameters of bed deflections; Exp. #1 (dc=0.381mm, N=300rpm, a=20mm, z=4)

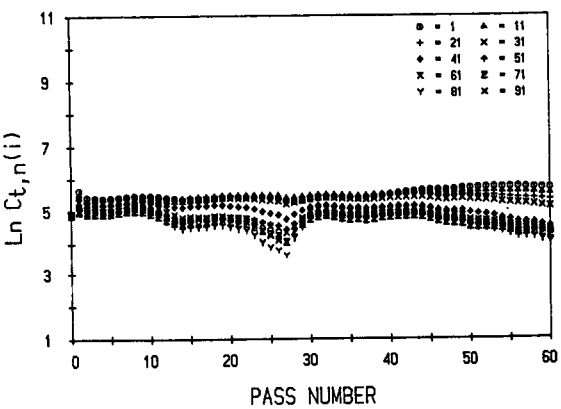

Fig. 11(b) Cutting parameters of tool deflections; Exp. #1 (dc=0.381mm, N=300rpm, a=20mm, z=4)

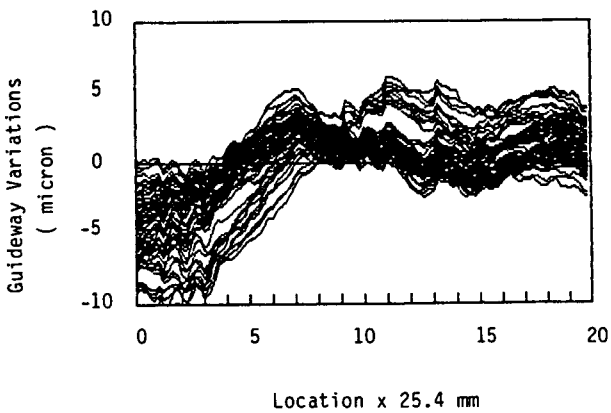

Fig. 10 Guideway error variations relative to the initial guideway error; Exp. #1 (dc=0.381mm, N=300rpm, a=20mm, z=4)

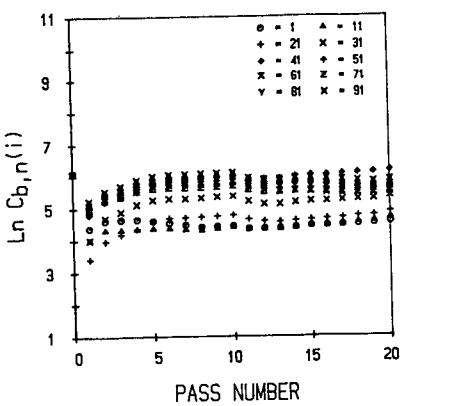

Fig. 12(a) Cutting parameters of bed deflections Exp. #2 (dc=0.762mm, N=400rpm, a=20mm, z=4)

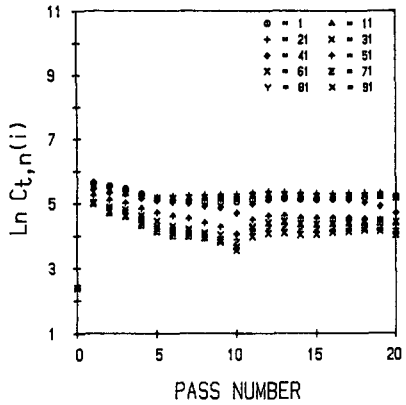

Fig. 12(b) Cutting parameters of tool deflections; Exp. #2 (dc=0.762mm, N=400rpm, a=20mm, z=4)

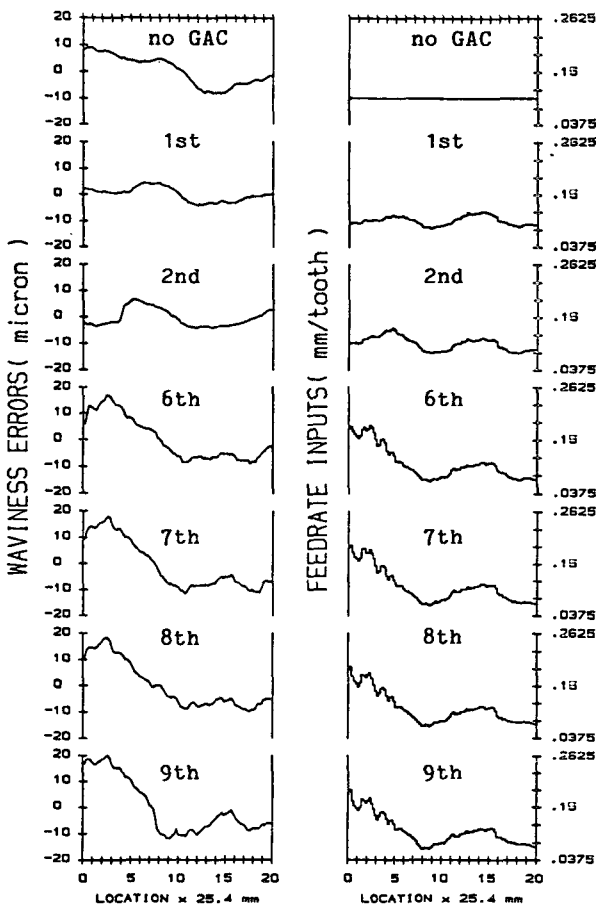

Fig. 13(a) Initial guideway error estimation processes; Exp. #2(dc=0.762mm, N=400rpm, a=20mm, z=4)

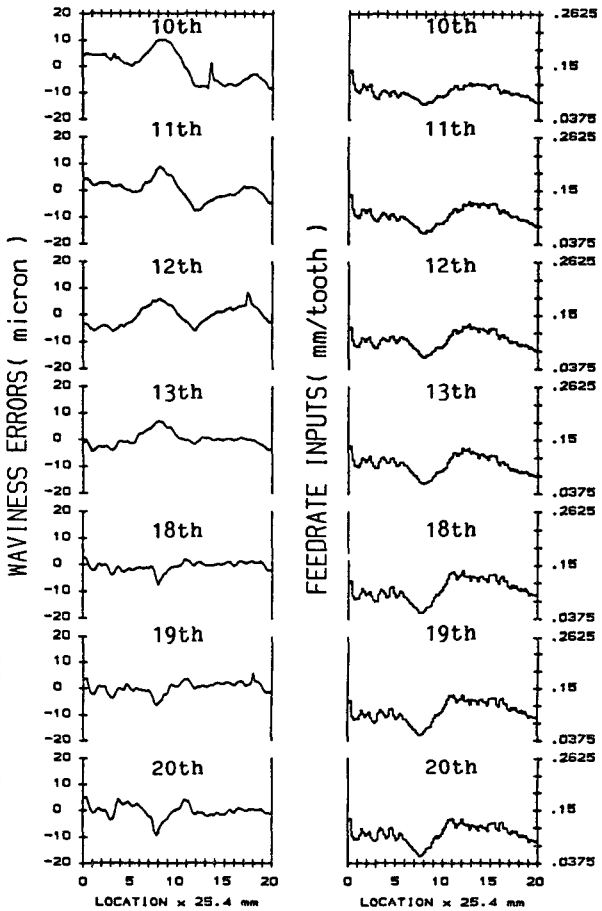

Fig. 13(b) Tracking control of guideway errors; Exp. #2(dc=0.762mm, N=400rpm, a=20mm, z=4)

수가 늘어나게 되면 밀링베드 앞쪽 부분의 강성도가 취약하게 되는데 이것은 측정된 절삭력이 Fig. 4에서 볼 수 있는 안내면과 밀링베드 사이의 강성요소의 변화를 주기 때문이다. 절삭깊이 및 스핀들 속도의 변화에 따른 GAC의 결과는 Exp.#2의 실험조건을 이용하여 Fig. 12와 같이 초기 절삭계수의 추정이 좋지 않다고 하더라도 Fig. 13에서 볼 수 있듯이 좋은 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 9에서 볼 수 있듯이 추종제어시 제어효과는 공구교환시를 제외하면 10μm 이내의 범위에서 더 이상 좋아지지 않는데 이는 주로 지수평활법을 사용함으로써 매 가공공정 사이에 발생하는 안내면오차의 변환치의 RMS값의 영향과 공구의 마멸 및 공작물의 불균성 등에 의한 영향으로 보여지며 이상의 결과를 종합하면

초기 안내면오차의 추정치도 가공횟수가 어느정도 진행되면 안내면오차의 변환치의 RMS 값 이내에서 추정될 수 있음을 알 수 있다.

안내면오차의 추정중 위치오차는 20μm 이내에서 제어됨을 볼 수 있었고[5] 밀링머시인의 수치제어 장치의 분해능 25.4μm을 감안한다면 만족스러운 GAC가 이루어짐을 알 수 있다.

8. 결 론

Taylor의 공구수명식을 이용하여 이송속도에 따른 공구 및 베드의 처짐을 모형화하는 방법을 제시하였다. GAC 방법을 이용하여 공구와 스핀들 축이 고정되고 공작물을 장착한 공작기계의 베드가 안내면 위에서 움직이는 형태의 공작기계에서 안내면오차를 규명하는 방법을 지수평활법과 적당한 곧은자를 이용한 상대오차 측정법과 지수가중 최소자승법을 이용한 절삭계수 추정법으로 개발하였다. 또한 개발된 GAC 방법을 이용하면 각주형 공작물 가공 공작기계에서 발생하는 가공오차의 보정(calibration)에 효과적으로 사용될 수 있을 것이다.

단일계수 추정법을 도입함으로써 절삭계수의 수렴성을 증대시켰고 안내면오차를 추종제어함으로써 GAC의 반복성과 제어성을 증명하였다. 만일 안내면의 비반복오차의 변화가 크게 일어나는 경우 지수평활법을 사용함으로써 절삭계수의 수렴성이 떨어지게 되는데 이와같은 것을 방지하기 위해서는 공작기계의 랜덤한 오차발생기구의 통계학적 모형화가 수반된 GAC 방법이 개발되어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

(1) 김종선, 정성종, 이종원, 1985, "직진도 개선을 위한 엔드밀링머시인의 적응제어", 대한기계학회논문집, 제 9권, 제 5호, pp. 590~597.

(2) C.W. Lee, S.C. Chung and J.S. Kim, 1987, "Geometric Adaptive Straightness Control System for the Peripheral End Milling Process", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 27, No.4, pp. 417~430.

(3) H. Tanaka and H. Sato, 1986, "Extensive Analysis and Development of Straightness Measurement by Sequential-Two-Points Method", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 108, pp. 176~182.

(4) K.F. Eman, 1986, "A New Approach to Form Accuracy Control in Machining", International Journal of Production Research, Vol.24, No. 4, pp. 825~838.

(5) S.C. Chung, 1987, "Geometric Adaptive Straightness Control in the CNC End Milling Machine", Ph. D. Thesis, Mechanical Engineering Department, KAIST.

(6) T. Watanabe and S, Iwai, 1983, "A Control System to Improve the Accuracy of Finished Surfaces in Milling", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 105, pp. 192~199.

(7) M. Shiraishi, 1984, "Geometrical Adaptive Control in NC Turning Operation", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 106, pp. 75~80.

(8) P.M. Ferreira and C.R. Liu, 1986, "A Contribution to the Analysis and Compensation of the Geometric Error of a Machining Center", Annals of the CIRP, Vol. 35, No.1, pp. 259~262.