

형상 재 설계에 의한 공작기계 기하오차 보정

Geometric error compensation of machine tools

by geometry redesign

서성교*(영남대 기계공학부), 박상신(영남대 기계공학부), 고태조(영남대 기계공학부),
김희술(영남대 기계공학부)

S. K. Seo*(YeungNam Univ.), S. S. Park(YeungNam Univ.), T. J. Ko(YeungNam Univ.),
H. S. Kim(YeungNam Univ.)

ABSTRACT

Accuracy of a machined component is determined by the relative motion between the cutting tool and the workpiece. One of the important factors which affects the accuracy of this relative motion is the geometric error of machine tools. In this study, geometric error is modeled using form shaping motion of machine tool, where a form shaping function is derived from the homogeneous transformation matrix. Geometric errors are measured by laser interferometer. After that, the local positioning error can be estimated from the form shaping model and geometric error data base. From this information, we can remodel the part by shifting the design surface to the amount of positional error. By generating tool path to the redesigned surface, we can reduce the machining error.

1. 서론

공작기계의 가공정밀도에 영향을 미치는 오차 요인은 여러 가지가 있지만 일반적으로 기계구조에 의한 오차와 가공공정에 의해서 발생하는 오차로 나눌 수 있다. 기계 구조에 의한 오차에는 기하학적 및 기구학적 오차, 열에 의한 오차, 하중으로 인한 변형 등이 있으며, 가공공정에 의해 발생하는 오차에는 공구의 휨, 공구 파모, chatter 등이 있다. 이러한 오차들은 공작물의 가공오차에 영향을 미치므로 공작물의 품질을 저하시키는 원인이 되고있다. 따라서 이러한 오차들이 공작물에 얼

마만큼의 영향을 미치는지를 파악하고 이를 보정함으로써 공작물의 가공오차를 향상시킬 수 있다. 공작물에 발생하는 가공오차를 줄이기 위해 많은 연구자들이 공작기계에 발생하는 오차를 해석하고 모델링하는 방법을 연구하고 있다. 현재까지의 오차 모델링 방법은 공작기계의 정적오차 및 기하학적 오차에 대한 모델링^{[1][2][3]}과 가공시 절삭력으로 인한 공구의 휨에 의해 발생하는 오차에 대한 모델링^{[4][5][6]}, 열 변형에 의한 오차 모델링^{[7][8]} 등이 있다. 본 연구에서는 공작기계의 기하학적 오차에 의해 발생하는 가공오차를 형상창성함수를 사용하여 예측하고 보정 데이터를 구하여 이 보정 데이터를 공작물에 적용하여 가공형상을 재 설계하여 오차보정이 된 새로운 공구 경로를 생성함으로써 공작물의 가공정밀도를 향상시키고자 하였다.

2. 공작기계의 가공오차 예측

2.1 형상창성함수 이론

공작기계의 기하오차에 의한 가공오차예측을 위한 모델은 D.N Reshetov^[9]에 의해서 제안된 공작기계의 형상창성운동과 가공형상과의 관계를 수학적으로 해석한 형상창성 함수를 이용하였다. 형상창성 함수는 스핀들 유니트, 베드, 테이블, 칼럼 등과 같은 여러 가지 구성요소의 연쇄구조를 가진 공작기계에서 공작물에 대한 공구의 궤적이 각 구성요소간의 상대운동의 중첩으로 형성된다는 개념을 기초로 한 것이며 이를 이용하면 공작기계의 운동특성과 가공형상과의 관계를 수학적으로 해석할 수 있다.^[10] 각 구성요소의 운동을 인접한 좌표계간의 상대운동의 중첩으로 생각하고 공작기계의

구성요소를 강제로 가정하면, 강체의 운동은 6자유도이기 때문에, 상대운동 k 는 1에서 6까지의 숫자로 표시할 수 있다. 이 숫자를 공작기계의 구성요소의 연쇄순으로 나열한 것을 좌표코드 k 로 정의하며 식(1)과 같다. Table 1은 상대운동에 대한 k 값과 동차좌표변환 행렬을 나타내고 있다.

$$k = k_1 k_2 k_3 \dots k_l \quad (1)$$

이 연쇄에 있어서 각 구성요소간의 상대운동에 대응하는 동차변환 행렬을 순차적으로 곱함으로써 공구와 공작물의 상대운동 즉, 형상창성함수 r 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r = A_{0,l} r_l \quad (2)$$

여기서, $A_{0,l} = \sum_{i=1}^l A_{i-1,i}$ 이고, i 는 공작물에서 공구까지 붙여진 좌표계 번호, l 은 링크의 수, 그리고 r_l 은 공구의 형상벡터이다.

2.2 공작기계에 대한 기하오차 모델

본 연구에서는 형상창성함수를 이용하여 공작기계의 기하학적 오차만을 고려하였을 때에 공작기계에 발생하는 오차가 어느 정도 인지를 파악하고자 한다. Fig. 1은 오차해석을 위한 공작기계의 구조와 좌표계를 설정한 것을 보여주고 있다. 이 공작기계의 상대운동을 k 로 나타내면 식(1)에 의해서 $k=123$ 이 되고 각각의 상대운동에 해당하는 동차변환행렬을 곱함으로써 형상창성함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r = A^1(x) A^2(y) A^3(z) r_l \quad (3)$$

그러나, 공작기계의 기하학적 오차를 고려한다면 공작기계의 구성요소에 따라 오차 값이 달라지기 때문에 구성요소의 크기도 고려하여야 한다. 따라서, 최종적으로 공작기계의 구성요소의 크기를 고려한 형상창성함수는 식(4)와 같다.

Table 1 Homogeneous transformation matrix

운동형태	상대운동 k	동차변환행렬 A
병진운동	X 1	$A^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	Y 2	$A^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	Z 3	$A^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
회전운동	X 4	$A^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	Y 5	$A^5 = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	Z 6	$A^6 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

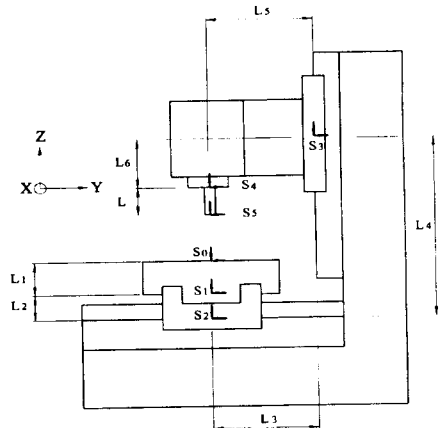
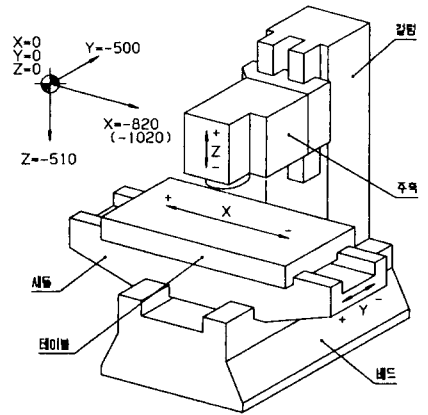


Fig. 1 Structure of Machining center

$$r = A^3(-L_1)A^1(x)A^3(-L_2)A^2(y)A^2(L_3)A^3(L_4)A_3(z)A^2(-L_5)A^3(-L_6)A^3(-L)e \quad (4)$$

여기서, $L_1 \sim L_6$ 는 공작기계 구성요소의 크기이고 L 은 공구의 길이이다. 공구는 점 접촉공구로 가정하고 가공 면과의 접촉점을 원점으로 가정하면 $e = (0, 0, 0, 1)^T$ 가 된다. 각 축의 오차 ε_i 를 고려하면 최종 절삭 점의 오차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta r &= \varepsilon_0 A_{0,1} r_l + A_{0,1} \varepsilon_1 A_{1,1} r_l + \dots \\ &\quad + A_{0,1} \varepsilon_l r_l \\ &= \varepsilon_0 (A_{0,1}^1 A_{1,2}^2 \dots A_{l-1,l}^{l-1}) r_l + \dots + \\ &\quad A_{0,1}^1 A_{1,2}^2 \dots A_{l-1,l}^{l-1} \varepsilon_l r_l \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, ε_i 는 오차행렬을 의미하고 식(6)과 같다.

$$\varepsilon_i = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_i & \beta_i & \delta_{xi} \\ \gamma_i & 1 & -\alpha_i & \delta_{yi} \\ -\beta_i & \alpha_i & 1 & \delta_{zi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$(i = x, y, z)$$

여기서, δ_{xi} , δ_{yi} , δ_{zi} 는 각각 X, Y, Z축에 대한 병진오차이고, α_i , β_i , γ_i 는 회전오차이다. 또한, X-Y, Y-Z, X-Z축 사이에 발생하는 3개의 직각도 오차는 Fig. 2와 같이 Z축을 기준으로 했을 때 X-Z축과 Y-Z축 사이의 직각도 오차로 나타낼 수 있으며 오차행렬은 식(7),(8)과 같다.^[11]

$$S_{xz} = \begin{bmatrix} 1 & -c_{xz} & b_{xz} & 0 \\ c_{xz} & 1 & 0 & 0 \\ -b_{xz} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$S_{yz} = \begin{bmatrix} 1 & -c_{yz} & 0 & 0 \\ c_{yz} & 1 & -a_{yz} & 0 \\ 0 & a_{yz} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

각 구성요소의 오차를 고려하여 정리하면 X, Y, Z축의 위치오차는 식 (9)와 같다.

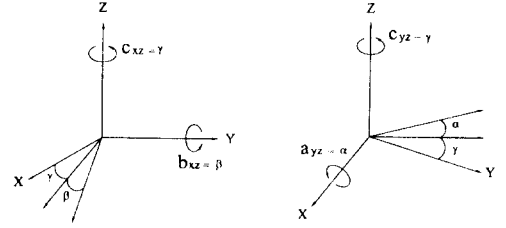


Fig. 2 Decomposition of the squareness error

$$\begin{aligned} \Delta x &= \delta_{xx} + \delta_{xy} + \delta_{xz} + (z - L_2 + L_4 - L_6 - L)(b_{xz} + \beta_x) + (z + L_4 - L_6 - L)\beta_y - (z - L_6 - L)\beta_z + (y + L_3 - L_5)(-c_{yz} - \gamma_x) + L_5 \gamma_z \\ \Delta y &= \delta_{yy} + \delta_{yx} + \delta_{yz} - (z - L_2 + L_4 - L_6 - L)\alpha_x + (z + L_4 - L_6 - L)(-a_{yz} - \alpha_y) - (z - L_6 - L)\alpha_z + x(c_{xz} + \gamma_x) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Delta z = \delta_{zz} + \delta_{zx} + \delta_{zy} - L_5 \alpha_x + (y + L_3 - L_5)\alpha_x + (y + L_3 - L_5)(a_{yz} + \alpha_y) + x(-b_{xz} - \beta_x)$$

여기서, 공작기계 구성요소의 크기 $L_1=155\text{mm}$, $L_2=280\text{mm}$, $L_3=555\text{mm}$, $L_4=935\text{mm}$, $L_5=555\text{mm}$, $L_6=350\text{mm}$ 이다. 공구길이 L 은 130mm 이고 X, Y, Z축의 오차측정범위는 각각 700mm , 400mm , 400mm 이다.

3. 공작기계 오차측정

본 연구에서는 Renishaw사의 ML10 레이저 간섭계를 이용하여 대우 ACE V45 수직형 CNC공작기계의 오차를 측정하였다. 레이저 간섭계는 롤(Roll)오차를 측정할 수 없기 때문에 3개의 롤오차는 Fig. 3에서 보는 것처럼 수직 진직도 오차로부터 유도하였다.

즉, Z축을 따라 발생하는 롤(Roll)오차 γ_{zz} 는 Z축의 두 개의 진직도 오차 δ_{y1z} , δ_{y2z} 를 이용하여 계산할 수 있다.^[12]

$$\gamma_z = (\delta_{y1z} - \delta_{y2z})/d \quad (10)$$

여기서, d 는 X축의 첫 번째와 두 번째 위치사이의 거리이다. 비슷한 방법으로 X와 Y축의 롤(Roll)오

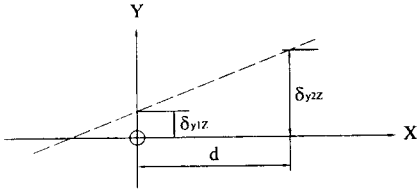
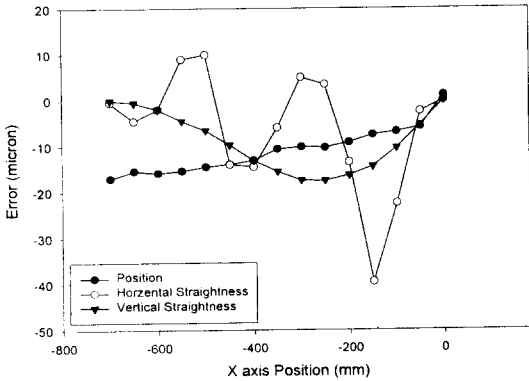
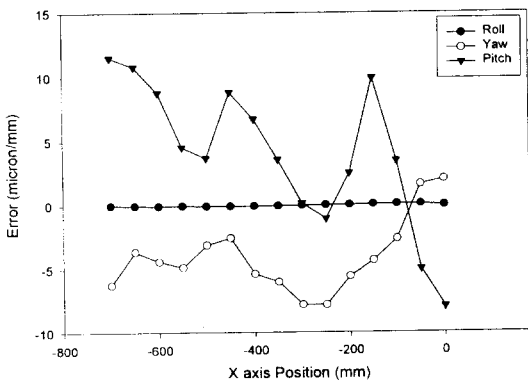


Fig. 3 Identification of the roll error of Z-axis

차를 계산할 수 있다. Fig. 4는 측정오차요소 중 X축의 병진오차와 회전오차를 나타내었고 Table 2는 직각도 오차이다. 오차측정은 Forward와 Backward 방향으로 각각 5회 반복 측정하여 그 평균 값을 오차 값으로 하였다.



(a) Translational error



(b) Rotational error

Fig. 4 Geometric error of X-axis

Table 2 Squareness error

	Error factor	Error Value
Between XZ axis	b_{xz}	-0.0166 $\mu\text{m}/\text{mm}$
	c_{xz}	0.1333 $\mu\text{m}/\text{mm}$
Between YZ axis	a_{yz}	-0.0100 $\mu\text{m}/\text{mm}$
	c_{yz}	0.0333 $\mu\text{m}/\text{mm}$

전체 측정 범위에서 최대 Position error는 X축이 $-17.05\mu\text{m}$, Y축이 $-19.04\mu\text{m}$, Z축은 $17.64\mu\text{m}$ 였고, 최대 Rotation error는 Pitch error로서 X, Y, Z축 각각 $11.52\mu\text{m}/\text{mm}$, $-205.52\mu\text{m}/\text{mm}$, $39.48\mu\text{m}/\text{mm}$ 이고 직각도 오차는 Table 2와 같다. 측정된 오차를 가지고 식(9)에 적용하여 X, Y, Z방향에 대한 오차 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 를 구할 수 있다.

4. 오차보정방법

본 연구에서 오차 보정은 공작물의 형상을 재 설계하여 이루어진다. 오차 보정값은 일반적으로 보정 알고리즘을 사용하여 최적 값을 구하지만, 2차 보정부터는 그 보정하는 오차 값이 매우 작다고 가정하고 본 연구에서는 1차 보정 만 하였다.

4.1 공작물 모델링에 의한 보정

공작물의 모델링은 상용 CAM 소프트웨어인 Duct 5에서 하였다. 모델링 하고자하는 공작물의 크기는 X, Y, Z방향으로 각각 130mm, 60mm, 15mm이다. 최종 모델링 형상은 Fig. 5와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 공작물은 총 24개의 Point를 가지고 모델링 하였다. 이 Point는 모델링Point 이자

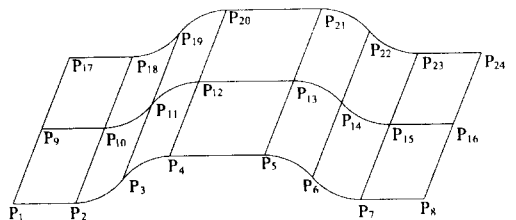
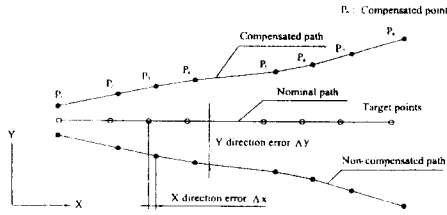
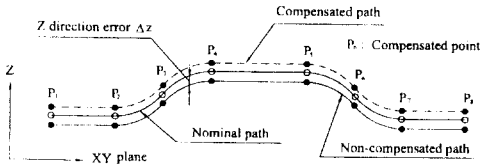


Fig. 5 Workpiece Modeling by Duct 5



(a) X and Y direction



(b) Z direction

Fig. 6 Error compensation of each axis direction

공구가 지나가는 가공경로가 된다. 그러나 가공시 공구의 위치는 설계자가 모델링한 위치가 아닌 임의의 오차 값을 가지고 새로운 위치로 이동한다. 따라서 각 Point에 대한 오차 값을 식 (9)에 적용하여 구한 후 그 오차 값만큼 1차 보정하여 가공 형상을 재 설계함으로써 새로운 가공경로를 획득하였다. 먼저 설계 경로의 각 Target point에 대한 오차 값을 계산한 후 그 오차 값만큼 Target point에 대해 반대 방향으로 1차 보상시킨 새로운 보상 Point $P_1, P_2 \dots P_8$ 를 가지고 Fig. 6에서 보는 것처럼 새로운 보상경로를 생성한다. 이러한 각각의 새로운 보상경로를 가지고 Fig. 7과 같이 새로운 보상곡면을 만들 수가 있다. Table 3은 각 보상 Point에서의 오차 값을 나타내고 있다.

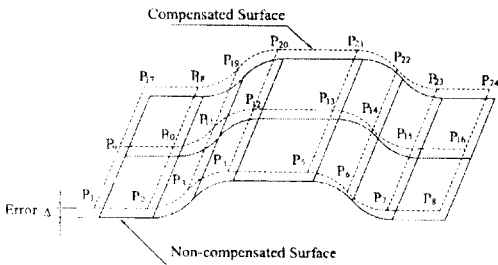


Fig. 7 Generation of the compensation surface

Table 3 Error value for Measurement points

Point	Error value		
	Δx	Δy	Δz
P ₁	-0.03666	-0.16189	-0.06809
P ₂	-0.03615	-0.16128	-0.06911
P ₃	-0.03549	-0.16727	-0.07174
P ₄	-0.03495	-0.17342	-0.07433
P ₅	-0.03407	-0.17706	-0.07654
P ₆	-0.03369	-0.17495	-0.07633
P ₇	-0.03344	-0.17298	-0.07604
P ₈	-0.03298	-0.16808	-0.07558
P ₉	-0.03889	-0.16544	-0.06743
P ₁₀	-0.03839	-0.16438	-0.06845
P ₁₁	-0.03773	-0.17101	-0.07108
P ₁₂	-0.03719	-0.17735	-0.07367
P ₁₃	-0.03631	-0.18099	-0.07588
P ₁₄	-0.03593	-0.17869	-0.07567
P ₁₅	-0.03568	-0.17653	-0.07538
P ₁₆	-0.03527	-0.17162	-0.07492
P ₁₇	-0.04006	-0.17029	-0.06691
P ₁₈	-0.03956	-0.16967	-0.06793
P ₁₉	-0.03890	-0.17611	-0.07056
P ₂₀	-0.03836	-0.18269	-0.07315
P ₂₁	-0.03748	-0.18633	-0.07536
P ₂₂	-0.03710	-0.18379	-0.07515
P ₂₃	-0.03685	-0.18137	-0.07486
P ₂₄	-0.03644	-0.17647	-0.07440

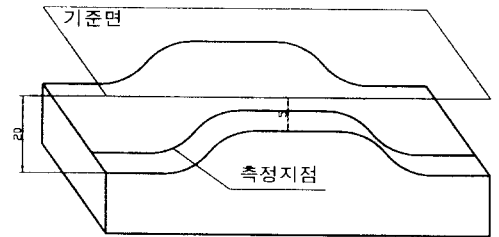


Fig. 8 Measurement position

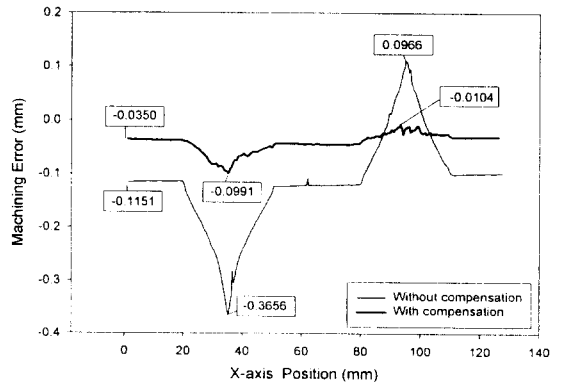


Fig. 9 Machining error comparison of without compensation and with compensation

4.2 오차보정 전후의 가공오차비교

가공한 공작물의 오차 검증은 3차원 측정기(CMM)를 사용하였다. Fig. 8은 오차검증을 위하여 3차원 측정기를 사용하여 측정된 구간을 나타내었으며, Fig. 9는 오차보상전과 후의 가공오차를 비교한 것이다. 그림에서 보는바와 같이 보상전 가공오차가 약 $-0.36\text{mm} \sim 0.1\text{mm}$ 이던 것이 보상후 $-0.1 \sim -0.03\text{mm}$ 로 감소하였다.

5. 결론

본 연구에서는 형상창성함수를 이용하여 공작기계의 기하오차만을 고려하였을 때 발생하는 공작기계의 각 축 방향의 오차를 계산하였다. 이를 바탕으로, 가공할 공작물의 표면에 대한 위치오차를 계산하고 이 오차값을 보정함으로써 새로운 보상곡면을 모델링 하였다. 보상전후의 가공오차를 3차원 측정기로 측정하였고 이 측정 데이터를 근거로 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 기하학적 오차만을 고려하여 오차보정을 하여 가공오차측면에서 가공정밀도가 많이 향상됨을 알 수 있었다.

둘째, 형상창성함수에 의하여 예측된 오차는 실제 가공물의 오차보다 적었다. 이것은 가공오차에 영향을 미치는 다른요소 즉, 공구의 휨이나 열변형으로 인한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. P. M. Ferreira, C. R. Liu, "An Analytical Quadratic Model for the Geometric Error of a Machining Center", J. of Manufacturing System, Vol. 5, No. 1, 1986.
2. V. S. B. Kiridena, P. M. Ferreira, "Kinematic Modeling of Quasistatic errors of Three-axis Machining Centers", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 34, NO. 1, pp. 85-100, 1994.
3. J. Mou, C. R. Liu, "A methodology for Machine Tools Error Correction using Reference parts," Int. J. Computer Integrated Manufacturing, Vol. 8, No. 1, pp. 64-77, 1995.
4. E. M. Lim, C. H. Menq, "Error Compensation

- for Sculptured Surface Productions by the Application of Control-Surface Strategy Using Predicted Machining Errors", ASME, Vol. 119, pp. 402-409, 1997.
5. T. I. Seo, M. W. Cho, "Tool Trajectory Generation Based on Tool Deflection Effects in Flat-End Milling Process(I)", KSME International Journal, Vol. 13, NO. 10, pp. 738-751, 1999.
6. M. Y. Yang, J. G. Choi, "A Tool Deflection Compensation System for End Milling Accuracy Improvement", ASME, Manufacturing Science and Engineering, Vol. 20, pp. 222-229, 1998.
7. Y. Wang, G. Zhang, K. S. Moon, J. W. Sutherland, "Compensation for the Thermal Error of a Multi-axis Machining Center", J. of Materials Processing Technology, Vol. 75, pp. 45-53, 1998.
8. S. Fraser, M. H. Attia, M. O. M. Osman, "Modelling, Identification and Control of Thermal Deformation of Machine Tool Structures, Part 3: Real-Time Estimation of Heat Sources", J. of Manufacturing Science and Engineering", Vol. 121, pp. 501-508, 1999.
9. D. N. Reshetov, V. T. Portman, Accuracy of Machine Tools, NewYork, ASME Press, 1988.
10. R. Harumoto, I. Inasaki, "Error Analysis of Machine Tools Using Form Shaping Function", JSPE Vol. 59, No. 6, pp. 915-920, 1993.
11. J. H. Cho, M. W. Cho, K. Kim, "Volumetric Error Analysis of a Multi-axis Machine Tool Machining a Sculptured Surface Workpiece", Int. J. Prod. Res, Vol. 32, No. 2, pp. 345-363, 1994.
12. X. B. Chen, A. Geddam, "Prediction of Quasistatic errors in Three-axis CNC Machining Centers", ASME Manufacturing Science and Technology, Vol. 1, pp. 55-62, 1997.