

방향성을 고려한 공작기계 입체오차의 평가

안경기*(포항공과대학교 기계공학과), 조동우(포항공과대학교 기계공학과)

Estimation of a Volumetric Error of a Machine Tool Considering the Moving Direction of a Machine Tool

K. G. Ahn(Mechanical Eng. Dept. POSTECH), D. W. Cho(Mechanical Eng. Dept., POSTECH)

ABSTRACT

In this paper, an extended volumetric error model considering backlash in a three-axis machine tool was proposed and utilized for calculating the volumetric error of the machine tool at any position in three-dimensional workspace. Backlashes are interrelated; i.e. the angular backlash affects the straightness errors which then affect the calculated squareness errors. Therefore, a new concept was introduced to define the backlash of squareness errors to incorporate the backlash of squareness error into the volumetric error, and the characteristics of the backlash of squareness error were investigated. The effects of backlash errors were assessed, by experiments, for 21 geometric errors of a machine tool. The backlash error was shown to be one of the systematic errors of a machine tool. Based on this volumetric error model, a computer-aided volumetric error analysis system was developed for a three-axis machine tool in this paper. Then the volumetric error at an arbitrary position can be obtained, and displayed in a three-dimensional graphic form.

Key Words : Machine tool (공작기계), Volumetric Error Model (입체오차 모델), Backlash error (백래시 오차), Squareness error (직각도 오차), Assessment (평가), Analysis system (해석 시스템)

1. 서론

최종적으로 가공되어지는 공작물의 가공오차는 공작기계, 공구, 그리고 공작물 이라는 각각의 구성 요소에 의한 오차와 이들간의 상호작용에서 기인되어지는 오차의 결과이다. 공작기계의 오차는 크게 준 정적오차와 동적오차로 나누어진다. 준 정적오차는 공작기계의 공구와 공작물 간의 상대적인 위치 오차로 정의되어진다. 이러한 준 정적오차는 매우 느리게 변화하며 공작기계 자체의 구조와 관련되어 발생하는 오차로서, 공작기계의 기하학적 오차, 열 변형 오차, 정적 하중오차가 이에 속한다. 그리고 전체 공작기계 오차의 70%정도가 이와 같은 준 정적오차로 인하여 발생되어진다 [1]. 공작기계의 기하학적 오차는 공작기계의 기구학적 링크 시스템들의 치수오차와 형상오차, 그리고 이들간의 각도 및 위치의 잘못된 정렬에 기인하여 발생하는 공구 끝단에서의 오차이다. 공작기계는 구조적으로 이러한 공작기계의 축들간의 올바르게 지 못한 정렬과 각 축

에서의 위치오차와 진직도 오차를 항상 지니고 있다 [2]. Ehmman 등 [3]은 임의의 형상을 가진 다축 공작기계에 대한 일반화된 오차 모델링 기법을 제시하였다. Mou 와 Liu [4]는 공작기계의 오차를 운동학적 기법을 이용하여 모델링 하였다. Dorndorf 등 [5]은 공작기계의 정적오차를 구하기 위해서 오차 예산 (error budgeting) 및 비용 최소화 (cost minimization)의 개념을 이용하였다. Chen 등 [6]은 가공영역내의 임의의 위치에서 준 정적오차를 예측하기 위해서 유한요소법에서 사용되어지는 메시 (mesh) 개념을 제안하였다.

한편, 백래시 오차는 공작기계의 운동 정밀도의 향상을 저해하는 요소로 작용하여왔다 [7,8,9,10,11]. 따라서 공작기계의 운동오차를 줄이기 위해서는 백래시 오차에 대한 연구가 반드시 필요하다. 그러나 공작기계의 백래시 오차에 대한 연구는 그 중요성에 비해서 소홀히 다루어져 온 것이 사실이다. Kao 등 [7]은 공작기계의 백래시 오차를 정적 백래시 오차와 동적 백래시 오차로 분류하였다. 그리고 최

근에 Ahn 등[11]은 공작기계의 입체오차 모델에 21 개 기하학적 오차에 대한 백래시 오차를 도입하였다.

이 논문에서는 공작기계의 기하학적 오차를 다룬다. 3축 수직형 공작기계와 레이저 측정장치를 사용하여 공작기계의 21 개의 기하학적 오차를 측정하고, 이들 각각에 대한 백래시 오차를 평가하였다. 그리고 백래시 오차를 고려한 공작기계의 입체오차 모델을 제시하고, 이를 실제 공작기계에 적용하여 공작기계의 가공공간상의 임의의 위치에서의 입체 오차를 구하고 이를 3 차원 그래프로 나타내었다.

2. 공작기계의 백래시 오차 해석

본 논문에서는 3축 수직형 공작기계를 대상으로 하여 레이저 측정시스템을 이용하여 공작기계의 21 개 기하학적 오차에 대한 백래시 오차를 평가하였다. 백래시 오차는 공작기계가 정해진 공칭위치로 움직일 때 후진 방향으로 접근할 때와 전진 방향으로 접근할 때의 차이로 정의되어진다. 공작기계의 각각의 백래시 오차는 서로 연관되어 영향을 미치고 있다. 즉, 각도 오차의 백래시는 진직도 오차에 영향을 주고, 진직도 오차와 진직도 오차의 백래시는 직각도 오차에 영향을 준다. 따라서 직각도 오차에 대한 백래시도 존재하게 된다. 공작기계의 직각도 오차에 대한 백래시 오차는 후진 방향과 전진방향의 직각도 오차의 차이라고 정의 되어질 수 있다. 그리고 직각도 오차는 두개의 축으로부터 정의되어 지므로 두개의 백래시 성분을 갖는다. 즉, 기준축의 전진방향으로 측정한 진직도를 나타내는 이상직선에 대한 다른 한 축의 후진 방향으로 측정한 진직도를 나타내는 이상직선으로 구해지는 직각도와 전진 방향으로 측정한 진직도를 나타내는 이상직선으로 구해지는 직각도의 차이로 정의되어질 수 있다. 이와 유사한 방법으로 다른 하나의 백래시 오차 성분은 기준 축의 후진방향으로 측정한 진직도를 나타내는 이상직선으로 구해지는 직각도와 전진방향으로 측정한 진직도를 나타내는 이상직선으로 구해지는 직각도의 차이로 정의되어질 수 있다 [11]. Fig. 1에서는 직각도 오차의 백래시에 대한 정의를 보여주고 있다.

Fig. 2의 (a), (b) (c)는 각각 x-y, x-z, y-z 축 사이의 직각도 오차를 보여주고 있다. Fig. 2(a)에서 x 축의 전진방향과 y 축의 전진방향, 그리고 x 축의 후진방향과 y 축의 전진방향으로부터 측정한 값으로부터 구한 직각도 오차가 나머지 두 경우에서 구한 직각도 오차보다 크게 나타남을 볼 수 있다. 그리고 앞의 두 경우의 오차의 크기와 나머지 두 경우에서의 오차의 크기는 각각 서로 유사하게 나타난다. 이는

y 축 방향으로의 수평 진직도의 백래시 오차에 의해서 나타나는 현상이라고 해석되어질 수 있다. 즉, 보다 큰 직각도 오차를 갖는 경우들과 보다 작은 직각도 오차를 갖는 경우들의 직각도 오차의 차이는 y 축을 따라 측정된 수평 진직도 오차의 백래시 오차에 기인한다. Fig. 2(b)와 (c)에서도 이와 유사한 현상을 보여주고 있다. 즉, Fig. 2(b)에서는 x 축 방향으로의 수직 진직도 오차의 백래시 오차에 의한 직각도 오차의 차이를 보여주고 있고, Fig. 2(c)에서는 y 축 방향으로의 수직 진직도 오차의 백래시 오차에 의한 직각도 오차의 차이를 보여주고 있다.

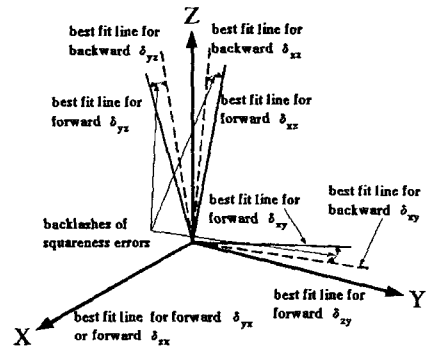


Fig. 1(a) Backlash of squareness errors with respect to the best-fit lines of the forward straightness of the reference axes

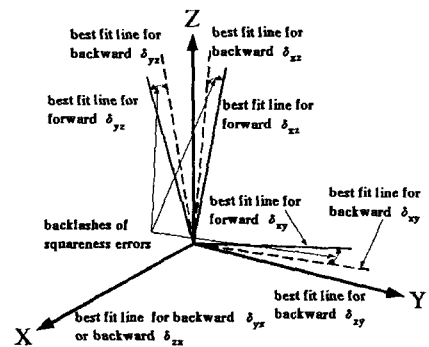


Fig. 1(b) Backlash of squareness errors with respect to the best-fit lines of the backward straightness of the reference axes

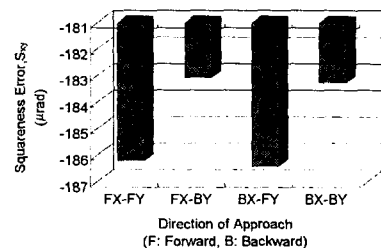


Fig. 2(a) Squareness errors between x- and y- axes

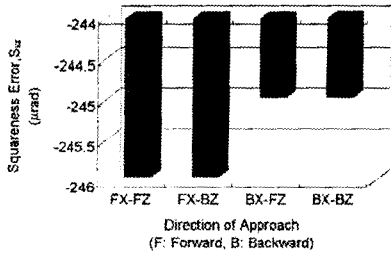


Fig. 2(b) Squaresness errors between x- and z- axes

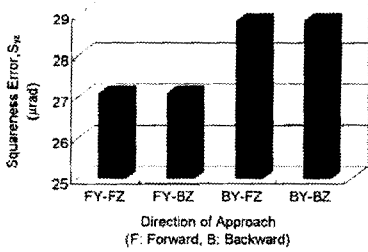


Fig. 2(c) Squaresness errors between y- and z- axes

Fig. 3의 (a), (b), (c)는 각각 x 축의 공칭좌표가 250mm 일 때 x 축을 따라 얻어지는 y-z 평면에서의 백래시 오차와 y 축의 공칭좌표가 150mm 일 때 y 축을 따라 얻어지는 x-z 평면에서의 백래시 오차, 그리고 z 축의 공칭좌표가 -150mm 일 때 z 축을 따라 얻어지는 x-y 평면에서의 백래시 오차를 보여주고 있다. 그리고 백래시 오차는 공작기계의 공구가 x, y, z 축의 전진방향으로 움직일 때와 후진 방향으로 움직일 때의 차이 값으로부터 구하여 진다

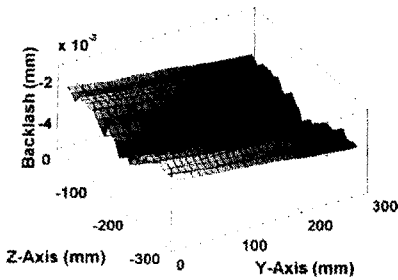


Fig. 3(a) Backlash errors on the yz-plane at x = 250mm

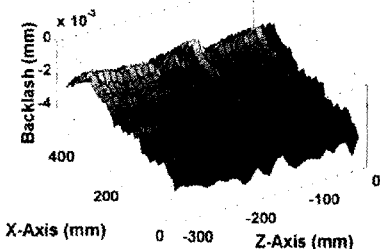


Fig. 3(b) Backlash errors on the xz-plane at y = 150mm

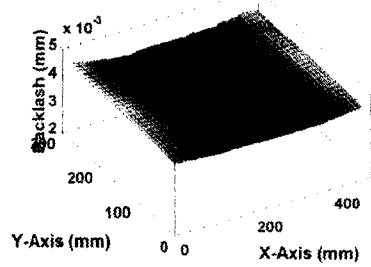


Fig. 3(c) Backlash errors on the xy-plane at z = -150mm

Fig. 3에서 보여지는 바와 같이 백래시 오차는 측정되어지는 위치에 따라서 그 크기가 변하고, 측정되어지는 축에 따라서도 그 크기와 형태가 변한다. 따라서 공작기계의 입체오차를 모델링 할 때 각 축에 대하여 공구가 움직이는 방향에 따라 변화하는 오차 값을 반드시 고려해야 함을 알 수 있다.

3. 공작기계의 입체오차 해석

이상에서와 같이 공작기계의 기하학적 오차 성분은 접근 방향에 따라서 다르고, 위치에 따라서 백래시 오차가 변화한다는 것을 확인하였다. 따라서 위치의 함수인 백래시 오차를 고려하여 공작기계의 입체오차를 구할 때 전진방향과 후진방향으로 나누어 구하여야 한다. 본 논문에서는 강제 운동 모델과 동차 변환 기법을 사용하여 입체오차를 구하였다. 그리고 수정형 3 축 공작기계를 대상으로 하여 21 개의 기하학적 오차 성분들을 측정하고 이 값들을 입체오차 모델에 대입하여 모델을 완성하였다. 공작기계 입체오차의 x, y, z 방향으로의 오차 성분은 각각 다음과 같다.

$$P_x = \delta_{xx} + \delta_{xy} + \delta_{xz} - y\epsilon_{xx} - yS_{xy} + z\epsilon_{yx} + z\epsilon_{yy} - zS_{yz} + Z_1\epsilon_{yx} + Z_1\epsilon_{yy} + Z_1\epsilon_{yz} + \delta_{zy}\epsilon_{yx} + \delta_{zy}\epsilon_{yy} - \delta_{zy}\epsilon_{zx} - \delta_{zy}\epsilon_{zy} + z\epsilon_{xy}\epsilon_{zx} + z\epsilon_{xy}S_{yz} + z\epsilon_{xy}S_{yz} + Z_1\epsilon_{xy}\epsilon_{zx} + Z_1\epsilon_{xz}\epsilon_{yx} + Z_1\epsilon_{xz}\epsilon_{zy} \quad (1)$$

$$P_y = \delta_{yy} + \delta_{xy} + \delta_{yz} - z\epsilon_{xx} - z\epsilon_{xy} - zS_{yz} - Z_1\epsilon_{xx} - Z_1\epsilon_{xy} - Z_1\epsilon_{yz} - \delta_{zy}\epsilon_{xx} - \delta_{zy}\epsilon_{xy} - \delta_{zy}\epsilon_{yz} + \delta_{zy}\epsilon_{yx} + \delta_{zy}\epsilon_{yy} + \delta_{zy}\epsilon_{zy} + z\epsilon_{xy}\epsilon_{zx} - y\epsilon_{xy}S_{yz} - z\epsilon_{xy}S_{yz} - z\epsilon_{xy}S_{yz} + Z_1\epsilon_{xy}\epsilon_{zx} + Z_1\epsilon_{yz}\epsilon_{xy} + Z_1\epsilon_{yz}\epsilon_{zy} \quad (2)$$

$$P_z = \delta_{zz} + \delta_{xy} + \delta_{yz} + y\epsilon_{xx} + \delta_{yx}\epsilon_{xx} + \delta_{yz}\epsilon_{xx} + \delta_{yz}\epsilon_{xy} - \delta_{yx}\epsilon_{xx} - \delta_{yz}\epsilon_{xy} - \delta_{yz}\epsilon_{yy} + y\epsilon_{yx}S_{xy} - z\epsilon_{xx}\epsilon_{xy} - z\epsilon_{xy}\epsilon_{yx} + z\epsilon_{xy}S_{yz} + z\epsilon_{xy}S_{yz} - z\epsilon_{xy}S_{yz} - z\epsilon_{xy}S_{yz} - Z_1\epsilon_{xx}\epsilon_{xy} - Z_1\epsilon_{xx}\epsilon_{yz} - Z_1\epsilon_{xy}\epsilon_{yz} - Z_1\epsilon_{yx}\epsilon_{xy} - Z_1\epsilon_{yz}\epsilon_{xy} - Z_1\epsilon_{yz}\epsilon_{yz} \quad (3)$$

여기서, x, y, z: 각 축 방향으로의 공칭좌표

$\delta_{xx}, \delta_{yy}, \delta_{zz}$: 각각 x, y, z 방향으로의 위치오차
 $\delta_{yx}, \delta_{zx}, \delta_{xy}, \delta_{zy}, \delta_{xz}, \delta_{yz}$: 진직도 오차. 여기서 첫번째
아래 첨자는 오차의 방향을 표시하고, 두 번째 아래
첨자는 공작기계의 구조물이 움직이는 방향을 나타
낸다.

$\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}, \epsilon_{yx}, \epsilon_{zy}, \epsilon_{xz}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{zx}, \epsilon_{xy}$: 각도 오차. 여기서 첫
번째 아래 첨자는 회전축의 방향을 표시하고, 두 번
째 아래 첨자는 공작기계의 구조물이 움직이는 방
향을 나타낸다.

S_{xy}, S_{xz}, S_{yz} : 각각 x-y, x-z, y-z 축 사이의 직각도 오
차

앞에서 구한 모델을 이용하여 공작기계의 가공
공간상의 임의의 위치에서의 입체오차를 구할 수
있게 되었다. 그리고 Fig.4 에서 Fig. 6 은 이러한 입
체오차를 3 차원 그래프로 보여주고 있다. Fig. 4 는 x
축의 공칭좌표가 250mm 일 때, y 축과 z 축 방향을
따라 x 축 방향으로의 입체오차를 보여주고 있다.
이 그림은 x 축 방향으로의 입체오차가 y 축과 z 축
을 따라 증가함을 보여주고 있다. Fig. 5 는 y 축 방
향의 공칭좌표가 150mm 일 때, x 축과 z 축 방향을 따
라 y 축 방향으로의 입체오차를 보여주고 있다. 이
그림은 y 축 방향으로의 공작기계의 입체오차가 z
축 방향을 따라서 감소하고, x 축 방향으로는 증가함
을 보여주고 있다. 이러한 결과는 x 축 방향으로의
수평 진직도 오차와 요(yaw) 오차의 결과와 경향이
일치한다.

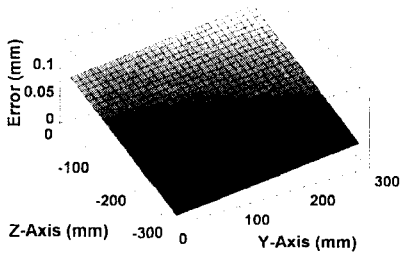


Fig. 4(a) Volumetric error map on the yz-plane in forward direction at x = 250mm

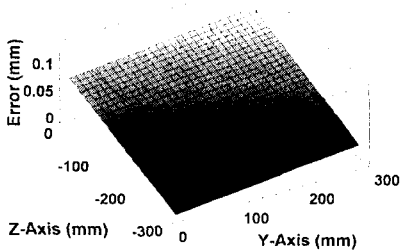


Fig. 4(b) Volumetric error map on the yz-plane in backward direction at x = 250mm

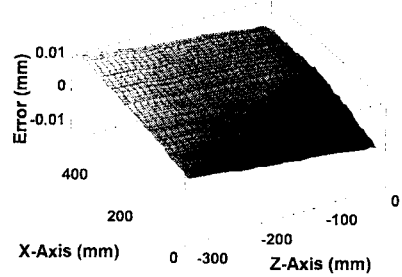


Fig. 5(a) Volumetric error map on the xy-plane in forward direction at y = 150mm

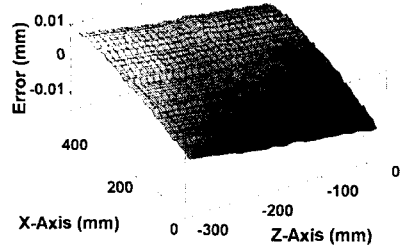


Fig. 5(b) Volumetric error map on the xy-plane in backward direction at y = 150mm

Fig. 6 은 z 축의 공칭좌표가 -150mm 일 때, x 축
과 y 축 방향을 따라 z 축 방향으로의 입체오차를
보여주고 있다. 이 그림에서 보여주고 있는 x 축과
y 축을 따라 변화하는 입체오차의 결과는 각각 x 축
과 y 축을 따라 변화하는 수직 진직도 오차와 피치
(pitch) 오차의 결과와 그 경향이 일치한다. 그리고
이 그림에서 z 축 방향으로의 백래시 오차가 뚜렷
이 나타남을 볼 수 있다. 이와 같이 공작기계의 입
체오차를 3 차원 그래프들로 나타내고, 이를 토대로
하여 공작기계의 기하학적 오차에 의해서 발생되어
지는 입체오차를 최소화 할 수 있는 가공영역을 쉽
게 선정할 수 있다.

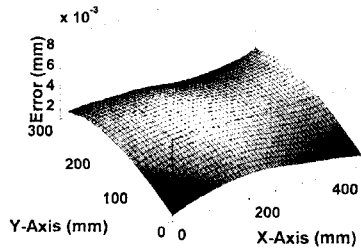


Fig. 6(a) Volumetric error map on the xy-plane in forward direction at z = -150mm

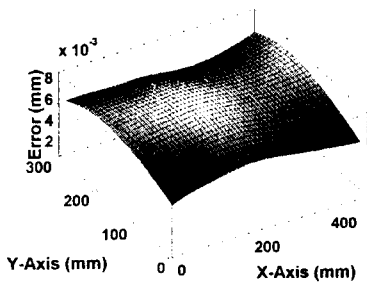


Fig. 6(b) Volumetric error map on the xy-plane in backward direction at $z = -150\text{mm}$

4. 결론

공작기계 오차를 분석하는 가장 주된 목적은 공작기계를 재설계하거나 가공과정을 제어함으로써 원하는 정밀도를 얻는 것이다. 이제까지 기하학적 오차에 대하여는 상당히 많은 연구가 진행되어져 왔지만 백래시 오차는 계통 오차임에도 불구하고 충분한 연구가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 백래시 오차를 고려한 새로운 입체오차 모델을 제시하고, 이 모델을 실제 공작기계에 적용하기 위하여 3축 수직형 공작기계의 21개 기하학적 오차를 측정하고 21개 오차 각각에 대한 백래시 오차를 평가하였다. 이러한 실험을 통하여 공작기계의 백래시 오차는 계통 오차임을 확인하였고, 이 외에도 백래시 오차의 몇 가지 중요한 특성을 알아 내었다. 한편, 공작기계의 백래시 오차는 서로 밀접하게 연관되어있다. 따라서 각각의 오차 성분에 대한 백래시가 정의되어야 하며, 직각도 오차에 대한 백래시도 존재하게 된다. 이에 따라 공작기계의 직각도 오차의 백래시를 정의하고 이를 실제 공작기계에 적용하여 그 특성을 알아보았다. 본 연구에서 제시한 입체오차 모델은 공작기계의 기하학적 오차에 대한 보다 정확한 해석에 도움을 줄 것이다. 이 모델을 기초로 하여, 3축 공작기계에 대한 컴퓨터 원용 입체오차 해석 시스템을 구현하여 공작기계의 가공공간상의 임의의 위치에서의 입체오차를 구할 수 있도록 하였으며, 이를 3차원 그래프로 나타내었다.

참고문헌

1. V. B. Krenk, C. R. Liu and C. N. Chu, "A Kinematic Model for Machine Tool Accuracy Characterisation," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.9, pp.79-86, 1994.
2. P. M. Ferreira, C. R. Liu, "An Analytical Quadratic Model for the Geometric Error of a Machine Tool,"

Journal of Manufacturing Systems, Vol.5, No.1, pp.51-63, 1986.

3. K. F. Ehmann, B. T. Wu, "A Generalized Geometric Error Model for Multi-Axis Machines," *Annals of the CIRP*, Vol.36, No.1, pp.253-256, 1987.
4. J.Mou and C.R.Liu, "A Method for Enhancing the Accuracy of CNC Machine Tool for On-Machine Inspection," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.11, No.4, pp.229-237, 1992.
5. U. Dorndorf, V.S.B. Kiridena, and P.M.Ferreira, "Optimal budgeting of Quasistatic Machine Tool Errors," *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol.116, pp.42-53, February, 1994.
6. X.B.Chen, A.Geddard and Z.J.Yuan, "Accuracy Improvement of Three-axis CNC Machining Centers by Quasi-Static Error Compensation," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.16, No.5, pp.323-336, 1997.
7. Y. Kakino, Y. Ihara and Y. Nakatsu, "The Measurement of Motion Error NC Machine Tools and Diagnosis of Their Origins by Using Telescoping Magnetic Ball Bar Method," *Annals of the CIRP*, Vol.36, No.1, pp.377-380, 1987.
8. W. Knapp, "Accuracy of Length Measurement and Positioning: Statistical Measurement and Contouring Mode," *Annals of the CIRP*, Vol.37, No.1, pp.511-514, 1988.
9. J. Y. Kao, Z. M. Yeh, Y. S. Tarng and Y. S. Lin, "A Study of Backlash on the Motion Accuracy of CNC Lathes," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.36, No.5, pp.539-550, 1996.
10. H. J. Pakh, Y. S. Kim and J. H. Moon, "A New Technique for Volumetric Error Assessment of CNC Machine Tools Incorporating Ball Bar Measurement and 3D Volumetric Error Model," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.37, No.11, pp.1583-1596, 1997.
11. K. G. Ahn, D. W. Cho, "Proposition for a Volumetric Error Model Considering Backlash in Machine Tools," *The International Journal of Advanced manufacturing Technology*, Vol.15, pp.554-561, 1999.
12. Layton C. Hale and Alexander H. Slocum, "Design of anti-backlash transmissions for precision position control systems," *Precision Engineering*, Vol.16, No.4, pp.244-258, 1994.
13. Manfred Weck, *Handbook of Machine Tools, Volume 3: Automation and Controls*, translated into English by H.Bibring, John Wiley & Sons, 1984.