

< 논문 >

머신 비전을 이용한 2축 스테이지의 마이크로 원형 궤적 실시간 측정 및 분석

김주경* · 박종진* · 이응석*
(2007년 5월 10일 접수, 2007년 8월 29일 심사완료)

Real-time Measurement and Analysis for Micro Circular Path of Two-Axes Stage Using Machine Vision

Ju-Kyung Kim, Jong-Jin Park and Eung-Suk Lee

Key Words: Ball-Bar Test(볼바 시험), Machine Vision(머신 비전), Path Tracing(궤적 추적), Real-Time(실시간), Two-Axes Stage(2축 스테이지)

Abstract

To verify the 2D or 3D positioning accuracy of a multi-axes stage is not easy, particularly, in the case the moving path of the stage is not linear. This paper is a study on a measuring method for the curved path accurately. A machine vision technique is used to trace the moving path of two-axes stage. To improve the accuracy of machine vision, a zoom lens is used for the 2D micro moving path. The accuracy of this method depends of the CCD resolution and array align accuracy with the zoom lens system. Also, a further study for software algorithm is required to increase the tracing speed. This technique will be useful to trace a small object in the 2D micro path in real-time accurately.

1. 연구배경

초정밀 CNC 및 전자 현미경과 같은 장비의 이송 장치가 정밀화 되면서 다축 정밀 위치 제어가 필요 하게 되면서 위치제어 특성을 분석하는 방법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있지만,^(1,2) 초정밀 동적 마이크로 위치제어 이송특성을 분석하는 방법은 쉽지 않다. 일반적으로 사용하는 레이저 간섭계의 경우는 장비가격이 고가이면서 1차원 이송궤적에 대하여서만 위치오차 추적이 가능하고 또한 추적속도가 일반적으로 빠르지 못하여 실시간 분석이 쉽지않다. 따라서 CNC 공작 기계의 경우는 비교적 장비 가격이 경제적인 ball bar 시험을 이용하여 이송시스템의 기하학적 오류를 측정하고 제어기 및 서보 구동 시스템의 오차를 분석

한다.^(3,4) Ball bar 시험은 2축 이송시스템의 동시 측정이 가능하여 원 또는 원호 이송궤적의 진원도 데이터로부터 2차원 이송궤적(contour)의 위치 제어 오차를 분석하는 방법으로 ISO 230-4 (Circular tests for numerically controlled machine

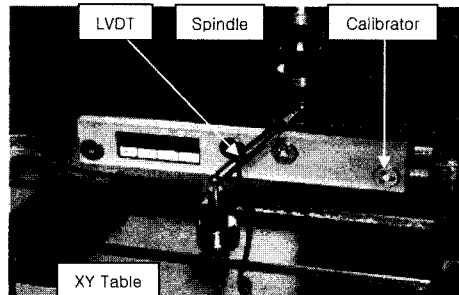


Fig. 1 Ball bar (Renishaw maker) test set up in a CNC milling machine

† 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부
E-mail :eungsuk@cbnu.ac.kr TEL : (043)261-2442
* 충북대학교 대학원 기계공학부

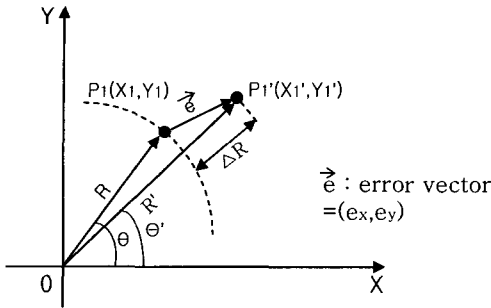


Fig. 2 Ball bar test data analyzing in circular contouring path

tools), JIS B 6194(Test code for circular movement of numerically controlled machine tools) 등에서 권고되어 CNC 공작기계 제조사 등에서 많이 사용하고 있다. 그러나 이 방법은 ball bar 중앙에 위치하는 LVDT 때문에 Fig. 1과 같이 최소 원지름이 100 mm 이내인 경우는 이송궤적 분석이 불가능한 단점이 있다.⁽⁹⁾ Ball bar 시험의 또 하나의 단점은 Fig. 2와 같이 원 운동 궤적에서 벗어난 오차만을 측정하는 방법으로, 진원도에서의 편차값 (ΔR)을 분석한다. 따라서 Fig. 2에서와 같이 목표위치 P_1 로부터 실제이송위치 P_1' 과의 위치 제어 오차벡터(e)를 정확히 분석하는 방법으로서서는 부적합하다.

본 연구에서는 마이크로 단위의 2차원 이송궤적의 위치제어 특성을 실시간으로 분석하기 위하여 머신 비전 방법을 사용하였으며, 이를 위한 실험장치로 먼저 백레시를 감소시키기 위하여 발란스하중(balancing weight)를 사용한 초정밀 2축 이송 스테이지를 제작하였다. 2축 스테이지를 수십 μm 직경의 원형 이송시 실시간으로 머신 비전을 통하여 원의 궤적을 분석하기 위한 점 추적 알고리즘을 연구하였다. 비전, 엔코더 및 command (위치 지령) 데이터를 비교하여 2축 스테이지의 직각도(squareness), 백레시, 서보 불일치(mismatch) 등 2축 이송오차를 분석하였다. 본 논문의 목적은 머신 비전을 이용하여 2축 스테이지의 원형 이송시 마이크로단위의 위치 정밀도를 실시간으로 측정하여 2축 이송 스테이지의 위치 제어 특성을 분석하고자 한다.

2. 2차원 궤적 실시간 추적 알고리즘

원형 궤적을 실시간으로 측정하기 위한 목표점(target) 추적 알고리즘을 Fig.3에서와 같이, 화면

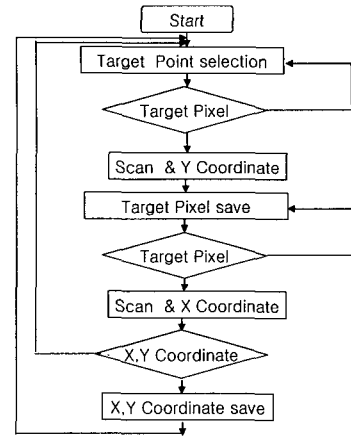
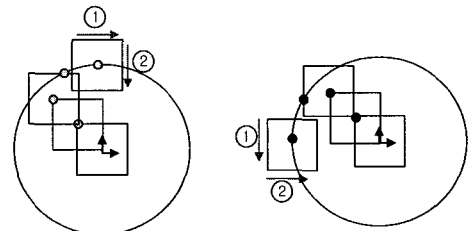
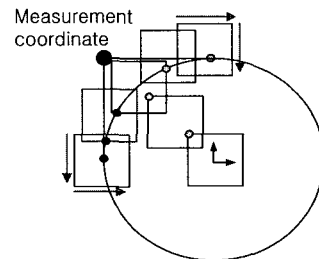


Fig. 3 Real time point tracing flow-chart



(a) Y coordinate

(b) X coordinate



(c) X,Y coordinate store

Fig. 4 Steps for point tracking algorithm in 2D circular path

상 주위 배경과는 색상값에서 차이가 있는 특징 모양으로 추적 목표점을 선정한다. Fig. 4에서는 2차원 추적 좌표를 얻기 위한 개략적인 과정을 설명한다. 추적 목표점이 선택되면 좌표 추적을 위한 측정 윈도우의 픽셀(pixel)에 대한 색상 값을 검출한다. 이때 목표점의 다양한 RGB 중 특징 있는 색상 값을 추적 색으로 선정하는 것이 좋다. 먼저 Y 좌표를 얻기 위해 좌에서 우, 위에서 아래 방향으로 scan하면 픽셀의 색상 값 변화가

동일 목표점의 최상단에서 멈추게 된다. 연속적으로 Y축 방향 픽셀의 색상값의 변화는 없고 X축 색상값만 편차가 심하게 되므로 scan을 중지하고 Y 좌표로 정한다. 같은 방법으로 X 좌표를 얻기 위해서 추적 목표점의 색상 값의 범위가 위에서 아래, 좌에서 우측 방향으로 scan하여 색상 값 검출 범위가 좌측 끝 쪽에서 X 좌표의 변화가 생기지 않는 좌표를 얻게 된다. 2차원 좌표의 경우 픽셀값이 최대 또는 최소 변화의 고정된 한 경우만으로 충분하다. 스테이지가 이송시 연속적으로 상기 방법을 적용하여 동일 목표점에 대한 이동 XY 좌표를 저장한다.

3. 머신 비전을 이용한 마이크로 궤적 추적 장치

Fig. 5는 광학용 방진 테이블위에 실험용으로 제작된 2축 스테이지의 이송 궤적을 CCD 카메라를 통해 측정하는 실험 장치이다. CCD 카메라의 사양은 Table 1과 같다. 미세한 부분의 확대를 필요

Table 1 Specification of the CCD camera (ARTRAY社 ARTCAM 130MI)

Items	Specification
Interface type	USB type
Validity pixel	1280 * 1024
Pixel size	5.2 * 5.2 μm
Image area size	6.65 * 5.32 mm
Frame output	15 fps

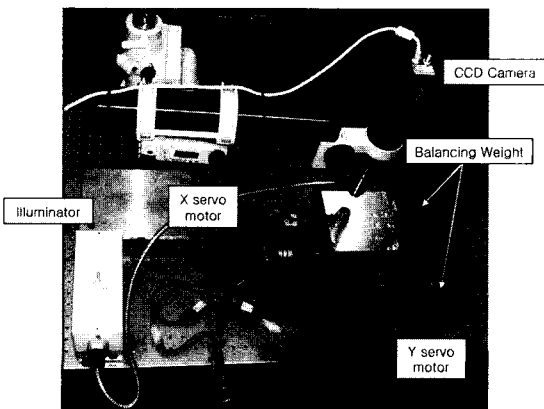


Fig. 5 2-axes stage and machine vision testing system

로하므로 줌렌즈 및 조명장치를 사용하였으며, Fig. 6은 실제 CCD 카메라를 통해 원형 궤적을 실시간으로 측정한 화면의 예를 보여준다. 본 연구의 경우 화상처리 분해능을 향상하기 위한 줌렌즈는 140배로 하였으며, 이 경우 실제 보이는 측정화면은 0.29x0.26mm 정도의 직사각형으로, 사용된 CCD의 화소수로 계산하여 (Table 1 참조) 약 0.3 μm정도의 화상처리 위치 분해능을 보인다. 화면상에서 주변 색상과 추적 목표점과의 RGB값의 차이를 확인한 후 그 차이가 많이 나는 형상을 (실제크기 수십 μm 정도의 점으로) 목표점으로 설정한다. 이송장치가 구동하게 되면 X,Y 좌표가 변할 때 마다 좌표를 저장하게 되고 그 궤적이 원형으로 나타난다. 각각의 추적 좌표는 초당 100개의 데이터로 입력된다. 추적 목표점이 이동하게 될 때 스테이지의 피칭(pitching) 오차 또는 수직 진직도 영향으로 명암차이가 발생하게 된다. 이 경우 RGB값이 변동하므로 추적 목표점을 인식하지 못하고 목표점에서 벗어나는 경우가 생긴다. 이때는 2절에서 전술한 픽셀 값의 비교 시 색상의 변화 범위를 조정하였으며 대략적인 RGB값 범위는 5 ~ 10에서 (8 bit 기준) 동일 목표점을 벗어나지 않음을 확인 할 수 있었다.

4. 원형 궤적 데이터 분석

실험은 먼저 Table 2와 같은 사양으로 제작된 2축 서보 스테이지의 발란스하중에 대한 이송정밀도를 확인하였다. Fig. 7은 일정 이송속도(feed)에서 원형궤적에 대한 비전 데이터를 발란스하중

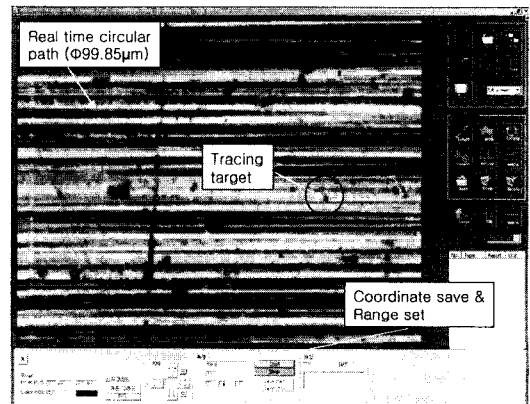
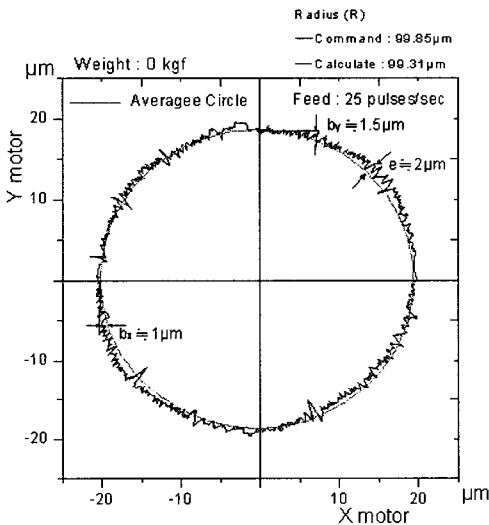


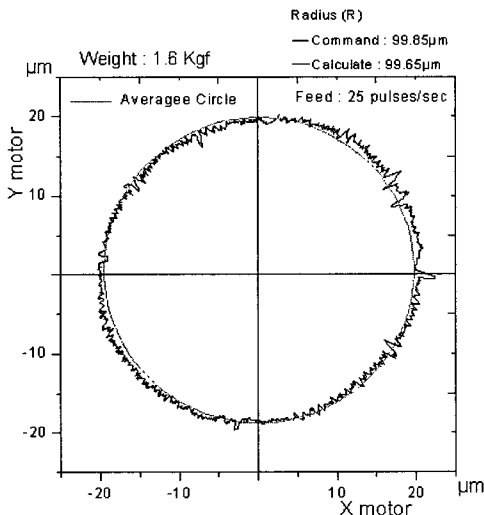
Fig. 6 Real-time measuring window for circular path tracing with 140 magnification zoom lens

Table 2 2-axes stage specification

Item	Specification
Service motor	JS MF 40A(Mitsubishi社), Resolution : 8192 pulses/rev
Controller	SMC-2V546 (AjindexTEK社) 2-axes linear & circular interpolation
Ball screw	THK社, ∅10mm, pitch 2, Class5
LM guide	THK社
Blancing Weights	0.8 ~ 4.0 kgf
Stroke XY	50 mm



(a) 0 kgf



(b) 1.6 kgf

Fig. 7 Vision data for circular path feed in different balancing weights

에 따라 마이크로 원형 궤적 (R 0.1mm)을 측정할 것이며, 제작된 2축 스테이지의 경우, 1.6 kgf 정도의 발란스하중에서 원형 궤적 정밀도가 비교적 좋은 것으로 나타났다. 그림에서와 같이 X축과 Y축의 백레시 값(bx, by)이 수 μm 정도로, 본 연구에서 사용한 스테이지는 서보모터의 반대쪽에 발란스하중을 사용하여 볼 스크류 유격을 최소화 하여 백레시를 극소화 시킨 장치이며, μm급 LVDT로 확인하여 유사한 결과를 보였다. 2축 스테이지의 경우 조립 직각도는 Fig. 8과 같이 원형 궤적에 대하여 타원궤적으로 나타난다. 제작된 스테이지의 직각도 계산에 사용된 식은 Fig. 8과 같이 직각도 S에 의한 타원궤적으로 X방향 길이 오차 $A = e/(\cos 45^\circ)$ 로 되어 결국 식 (1)과 같이 되고, Fig. 7의 본 실험 결과는 $S = -2.31^\circ$ 정도로 다소 크게 보인다.

$$S = \tan^{-1} \left(\frac{e}{R \cdot \cos 45^\circ \cdot \sin 45^\circ} \right) \quad (1)$$

Fig. 9는 비전 추적에 의한 2축 스테이지의 마이크로 원형 궤적을 이송속도에 따라 목표점을 추적하여 좌표로 그린 것이다. 그림에서는 서보모터의 지령(command) 좌표와 서보 추종 엔코더 값 및 실제 이송된 궤적에 대한 비전 좌표를 비교하였다. 서보 지령값은 엔코더 펄스에 의한 값과 거의 일치하며, 진원으로 표시된다. 서보모터의 엔코더 펄스 신호로부터 볼스크류 피치(pitch)에 의한 위치를 계산하여 원형궤적으로 도시하였다. 제작된 2축 스테이지의 서보 제어 입력값

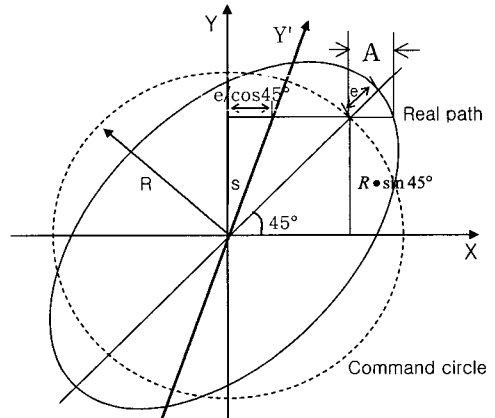
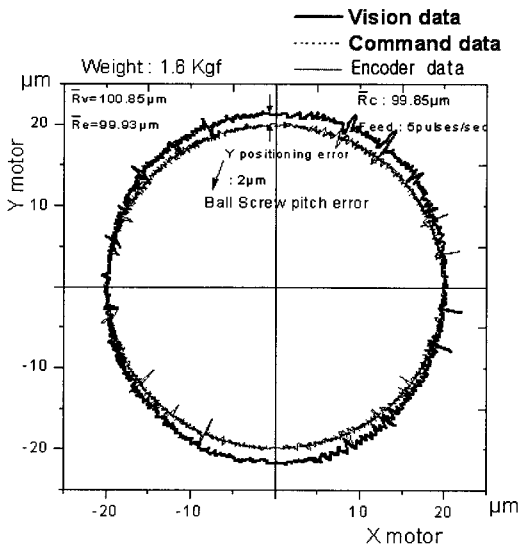
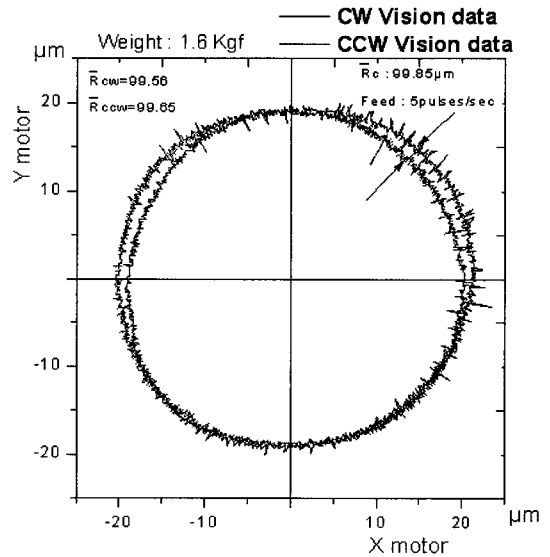


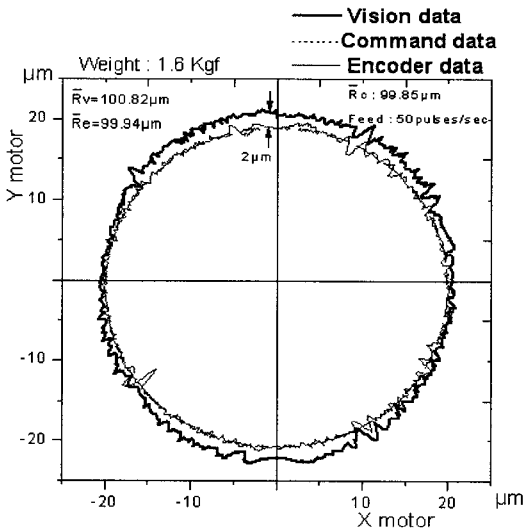
Fig. 8 Squareness (-) effect on a circular path of 2-axis stage



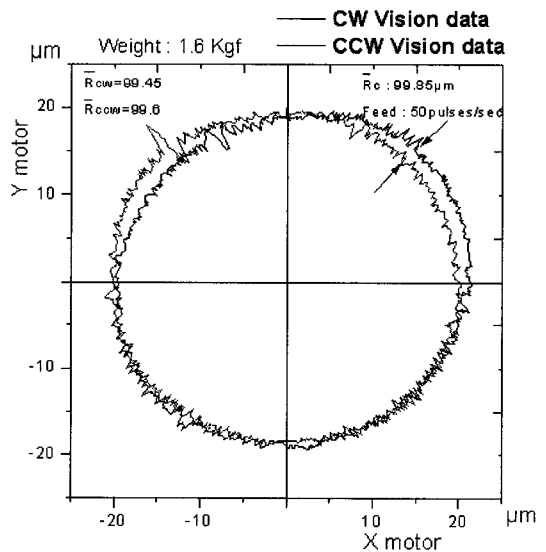
(a) 5 pulses/sec



(a) 5 pulses/sec



(b) 50 pulses/sec



(b) 50 pulses/sec

Fig. 9 Circular path compared with command, servo encoder and vision data for different feeds

Fig. 10 Different circular direction path for verifying servo mismatch error

(encoder)은 지령값과 비교적 잘 일치하지만, 비전 측정에 의한 실제 이송궤적은 주로 y축에서 오차를 보인다. 이송 실험은 백래시를 최소화하기 위한 발란스하중을 1.6 kgf로 하여, 이송속도 변화에 의한 위치 제어 오차를 분석하였다. 그림에서 보면 이송에 따른 위치제어 오차는 모두 y축 방향으로 동일하게 2µm 정도로 나타났으며, 따라서 이것은 y축 방향의 볼스크류 피치의 누적오

차로 판단된다. Fig. 10은 2축 스테이지의 서보불일치 오차를 보기 위하여, 원형 궤적을 각각 시계방향과 반시계방향으로 회전시켜 비전 추적에 의하여 실제 이송 궤적을 도시하였다. 2축 스테이지의 서보 불일치는 축들의 서보 게인(gain)이 일치하지 않을 때 발생하여 한 축이 나머지 한 축을 주도하여 타원 형태를 보인다.

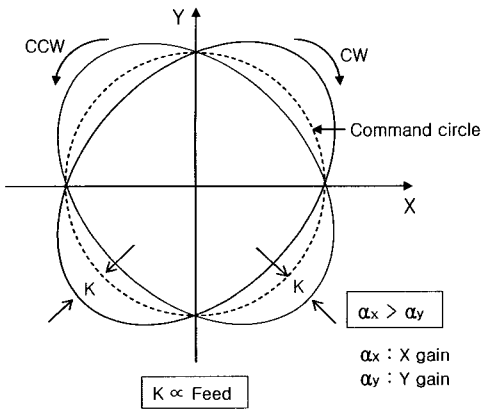


Fig. 11 Servo mismatch effect on a circular path (X leading and Y following)

서보 불일치(K) 직각도와 마찬가지로 Fig. 11에서 보는 바와 같이 대각선으로(45° 또는 135°) 비틀린 타원 또는 땅콩 모양으로 보이며, 시계 방향에서 반시계 방향으로 변경하면 그림의 뒤틀림 축이 바뀌며, 실험에서는 이 두 현상이 모두 보여진다. 서보 불일치 오차는 일반적으로 이송 속도가 빠르면 뒤틀림량도 증가하게 된다.⁽³⁾ 서보 불일치 현상이 나타나게 되면 축들의 서보게인이 균형을 유지하도록 제어기를 조정한다. 실험에서는 서보 불일치 오차가 각각 이송속도 5와 50 pulses/sec 일 때 각각 1.5, 1.8 μm 정도로 나타났다. 이송 속도의 변화가 크에도 값의 차이가 얼마 나지 않는 것으로 보아 제어기의 서보 게인 값이 균형을 이루고 있는 것으로 보인다.

5. 결론 및 향후 연구

2축 스테이지의 마이크로 이송시 이동 위치 오차 특성 분석을 위하여 머신 비전 점 추적 방법에 의한 원형 궤적 측정 방법이 직각도, 백래시 오차, 서보 불일치 오차 등에 의한 영향을 분석하는데 효과적인 것으로 보인다. 본 장치의 경

우 CCD카메라의 좌우방향 진동이 궤적 추적값에 영향을 미칠 수 있으므로 카메라 설치에 주의를 요한다. 본 연구에서는 스테이지의 상하 기울기 및 진직도가 있을 경우 비전 측정값의 RGB값이 변하기 때문에 추적 범위 설정으로 해결하였지만, 궁극적으로는 RGB값에 대한 자동초점 (auto focusing) 등의 방법이 필요할 것으로 보인다. 특히 이 문제는 2축 스테이지의 넓은 측정범위를 시도할 때 필수적일 것이다. 또한 일정 정밀도에 대한 측정 범위가 현재 시판중인 CCD의 분해능의 한계로 제한된다. 본 방법에 사용된 CCD array의 직각도 및 array 위치 정밀도를 교정 (calibration)하기 위한 방법이 필요할 것으로 보이며, 현재 당 실험실에서 보완 연구 중이다.

후 기

이 논문은 2006년도 충북대학교 학술연구지원 사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Lee, E.S., Joung, S.Y. and Suh, S.H., 1998, "Error Modeling and Measurement for the Rotary Table of Five-Axis Machine Tools," *Int. J Adv Manuf Technol(U.K)*, Springer-Verlag, Vol. 4 No. 6, pp. 956-63.
- (2) Han, S.I., 2002, "Positioning Control Performance for the XY Ball Screw Stage with Non-Linear Dynamic Friction," *KSPE* Vol. 19, No. 6, pp. 51-61.
- (3) Lee, E.S. and Suh, S.H., 1997, "Performance Evaluation of NC Controller Using a Ball Bar," *KSPE Fall Conference*, pp. 1033-038.
- (4) Park, H.J., Kim, Y.S. and Moon, J.H., 1997, "A New Technique for Volumetric Error Assessment of CNC Machine Tools Incorporating Ball Bar Measurement and 3D Volumetric Error Model," *Int. J. Tools Manufact.* Vol.11, pp. 1853-1866.