

평면도 기상 측정 방법 개발

장문주*, 홍성욱**, 박천홍***

Development of On-machine Flatness Measurement Method

Moon-Ju Jang*, Seong-Wook Hong**, Chun-Hong Park***

ABSTRACT

This paper presents an on-machine measurement method of flatness error for surface machining processes. There are two kinds of on-machine measurement methods available to measure flatness errors in workpieces: i.e., surface scanning method and sensor scanning method. However, motion errors are often engaged in both methods. This paper proposes an idea to realize a measurement system of flatness errors and its rigorous application for estimation of motion errors of the positioning system. The measurement system is made by modifying the straightness measurement system, which consists of a laser, a CCD camera and processing system, a sensor head, and some optical units. The sensor head is composed of a retroreflector, a ball and ball socket, a linear motion guide unit and adjustable arms. The experimental results show that the proposed method is useful to identify flatness errors of machined workpieces as well as motion errors of positioning systems.

Key Words : Flatness error (평면도 오차), Retroreflector (역반사계), Laser (레이저), Error compensation (오차 보상), Motion error (운동오차)

1. 서론

고정도 제품에 대한 수요 증가에 의해 정밀 가공의 요구가 더욱 커지고 있다. 따라서 가공 정밀도의 향상에 대한 필요성이 커져 왔으며 이를 위한 기상 계측 연구가 활발히 진행되고 있다^{1,4}. 공작물의 표면을 기상에서 측정하는 방법³도 큰 관심을 끌어 왔는데 대체로 측정을 위해 센서 또는 피측정물이 이송장치를 통해 이송됨으로 인해 이송장치 자체의 오차가 개입될 수 있을 뿐만 아니라 이송장치의 이동거리 한계로 인하여 측정영역의 제한을 받아 왔다. 공작물의 평면도를 기상에서 측정하는

관점에서도 기존의 측정방법⁵⁻¹¹은 마찬가지로의 한계를 갖는다. 즉, 센서를 공간에 고정시키고 공작물을 이송시키면서 측정하면 공작물의 평면도 오차에 이송계의 오차가 합해져서 나타나게 된다. 따라서 공작물의 평면도 오차에 대한 올바른 평가가 이루어지기 어렵다. 일반적인 센서가 공작물을 주사(scanning)하면서 이동하는 방식으로 측정하는 경우 또한 센서를 이송하는 이송계에서 공작물을 이송시키는 경우와 동일한 문제점을 갖게 된다.

최근 공작물 표면의 측정에 있어 이와 같은 이송장치 오차의 개입에 의한 한계를 극복하기 위해 새로운 방식의 진직도 측정 시스템⁴이 개발되었다.

*** 2002년 9월 27일 접수
* 금오공과대학교 대학원
** 금오공과대학교 기계공학부
*** 한국기계연구원

이 시스템은 4mm 직경의 강구와 강구소켓(ball and ball socket) 및 역반사계(retroreflector)로 구성되는 센서헤드와 He-Ne레이저, 반사경, 오목렌즈 및 CCD(640x480) 등의 광학계를 활용하는 방식으로 평면 공작물 진직도 측정에 적용되어 그 응용 가능성이 확인된 바 있다. 이 측정 시스템을 사용하는 경우에는 센서의 이송오차에 의한 효과를 최소화할 수 있으므로 기상 측정에 매우 유리하다.

본 연구에서는 기 제안된 공작물 진직도 측정 시스템⁴의 원리를 응용하여 기상에서 공작물 평면도를 측정하기 위한 시스템을 개발하였다. 개발된 측정 시스템은 측정 대상이 되는 공작물의 표면을 스캔하는 방식으로 평면도 측정과 평가를 손쉽게 수행할 수 있다.

한편, 이와 같이 공작물의 표면을 스캔하여 평면도를 직접 측정하는 방법은 공작물의 평면도를 기상에서 곧바로 평가할 수 있다는 장점이 있으나 측정된 정보를 보정 가공 등, 오차 개선에 직접 활용하기는 어려운 문제점이 있다. 즉, 보정 가공을 위해 공작물이 공구 위치로 이송되면 이송계에 의한 운동오차가 평면도 오차와 합해져서 정확한 보정 가공량을 결정하기 어렵기 때문이다. 따라서 보정 가공 등, 보다 적극적인 활용을 위해서는 공구가 위치한 공간상의 고정점에서 이송계에 의한 운동오차를 측정할 필요가 있다.

본 연구에서는 개발된 센서를 이용하여 임의의 공간상에 고정된 위치에서 테이블 이송 운동오차를 측정하는 방법을 제안하였다. 이를 위해 개발된 측정헤드를 이송계와 함께 동기시켜 이송시키면서 3개 이상의 서로 다른 점에서 상하 변위를 측정함으로써 공간상에 고정된 좌표에서 상하 운동오차를 추정하는 방법을 제시하였다. 공구 위치에서의 이송 운동오차를 파악하게 되면, 공구 위치에 고정된 센서에서 측정된 평면도로부터 이송계 운동오차 성분을 제거함으로써 실제 평면도를 추정할 수 있게 된다. 이와같이 이송계 운동오차를 미리 파악하게 되면, 제안된 센서뿐만 아니라 측정 정밀도가 높은 변위 측정계, 즉 용량형 변위센서, 레이저 변위센서 등을 이용하여 고정된 위치에서 테이블을 이송시키면서 측정된 겉보기 평면도로부터 실제 평면도를 얻어낼 수 있게 된다. 실험실에 제작된 XY 테이블을 통해 실험을 실시하였으며 제안된 측정 장치와 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 평면도 오차 측정 시스템의 원리 및 구성

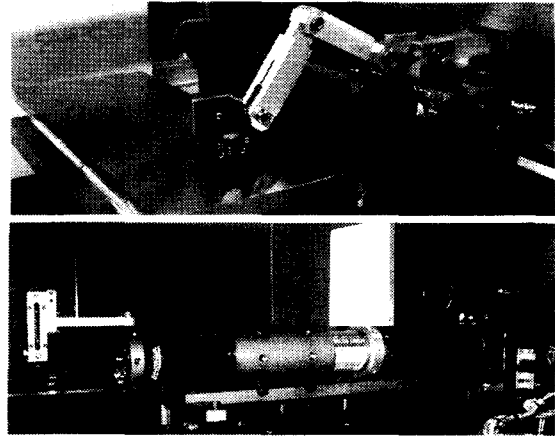


Fig. 1 Experimental setup for measuring flatness error using the developed system

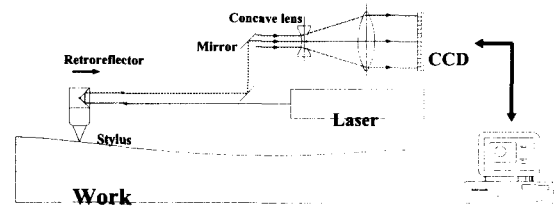


Fig. 2 Schematic of the straightness measurement system⁴

Fig. 1은 실제 제작된 평면도 측정 시스템을 보여주고 있다. 여기서는 참고문헌⁴에서 제안된 센서를 응용하였다. 측정에 사용된 센서의 개념도를 Fig. 2에서 보여주고 있다. 역반사계(Retroreflector)와 강구 및 강구소켓이 달린 측정헤드가 측정물의 단면곡선(Profile)을 따라 이동하여 수직 변위를 가지게 되면 고정된 위치에서 입사된 레이저광이 역반사계에서 2배수의 수직 변위를 갖는 상태로 반사된다. 그리고 반사된 레이저광이 광학적 증폭을 거쳐 CCD카메라로 검출됨으로서 수직 변위가 산출된다. 본 논문에서는 Fig. 1에 보인 바와 같이 표면에 대한 스캔이 유리하도록 직선운동 가이드를 이용, 이송할 수 있도록 하였다. 또, 길이조정이 가능한 2개의 관절을 설치함으로써 측정방향에 대해 수직방향으로의 위치 조정을 가능하게 하였다. 즉, 그림에서 2개의 관절을 잇는 부분의 볼트를 이용하여

관절의 각도를 조절하는 방식이다.

측정헤드의 위치를 고정시키고 XY 테이블을 이송시키면서 표면 굴곡을 측정할 시에는 측정물의 평면도와 XY 테이블의 이송 운동오차가 합쳐져 나타나는 겉보기 평면도가 측정되지만, XY 테이블을 고정하고 측정헤드를 이송할 시에는 XY 테이블에 의한 이송 운동오차가 없으므로 측정물의 실제 평면도가 측정된다.

Fig. 3은 이송 운동오차를 측정하고 보상하는 원리를 설명하기 위한 2차원적 개념도이다. 가공 조건 등의 영향을 받아 공작물에는 그림과 같이 표면 굴곡이 존재하게 된다. 공작물이 이송되면 이송계가 갖는 운동오차에 의해 수직 방향으로의 오차가 추가된다. 일반적으로 이 같은 운동오차는 이송 위치의 함수이다.

운동오차를 결정하기 위해, 본 연구에서는 공작물과 측정센서를 동기시켜 이송하였다. Fig. 3에 보여지는 바와 같이 공작물 위에 놓인 측정헤드가 공작물과 동기되어 이송되면 공작물의 운동오차가 반영되어 측정헤드가 상하방향으로 이동하게 된다. 따라서 선택된 몇 지점에서 이와 같은 측정을 반복하게 되면 공작물 전체에 대한 이송 운동오차를 추정할 수 있다. 즉, Fig. 3에서와 같이 2차원적인 오차의 경우에서는 공작물 위 2개의 점을 선택하여 앞서 설명한 방식으로 이송 운동오차를 측정하면 이를 이용하여 공작물의 자세를 알 수 있다. 예컨대 Fig. 3의 우측그림에서와 같이 E_1, E_2 를 측정하면 이를 이용하여 공작물 위 임의 지점에서의 오차 E 를 간단한 기하학적 비례조건으로부터 계산할 수 있다. 일반적인 평면의 경우에도 같은 원리로 세 곳 이상의 위치에 대한 운동오차를 측정하면 임의 점에서의 이송 운동오차를 환산할 수 있다.

Fig. 4는 본 연구에서 오차 측정에 실제 적용한 측정 방식을 개념적으로 구성한 것이다. 공작물 위 4개의 기준점(01, 02, 03, 04) 위에 차례로 측정헤드를 두고 동기 이송시키면서 각 위치에서 이송 운동오차를 측정한다. 측정된 이송 운동오차 중 3개를 선택하여 평면방정식 $ax + by + z = c$ 의 계수 a, b, c 를 구하면, 공작물 위의 임의의 점 (x_0, y_0) 에서의 이송 운동오차 $z_0 (= -ax_0 - by_0 + c)$ 를 계산할 수 있다. 여기서 계수 a, b, c 는 일반적으로 이송 위치의 함수가 된다.

한편, 공간에 고정된 좌표에서 예상되는 이송

운동오차는 (x_0, y_0) 값을 테이블 이송량 만큼 적절히 변화시키며 계산함으로써 얻을 수 있다. 이송 운동오차 값을 이용하게 되면 고정된 좌표에서 얻어지는 겉보기 평면도(apparent flatness) 측정데이터로부터 실제 공작물의 엄밀한 평면도(true flatness)를 환산할 수 있다.



Fig. 3 Combination of flatness error and motion error

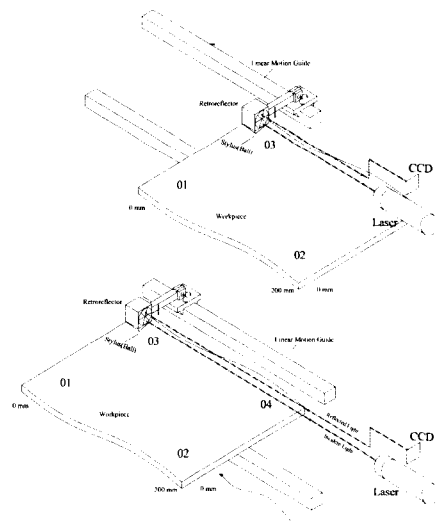
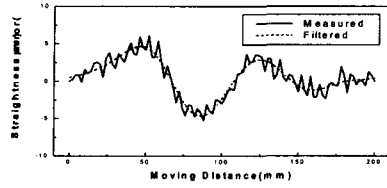


Fig. 4 Schematic for measurement of motion errors of the XY table

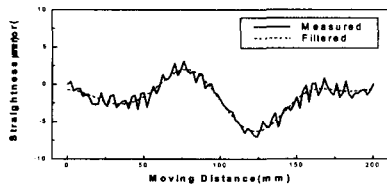
3. 평면도 오차 측정 실험

3.1 공작물 상의 기준점 이송 운동오차

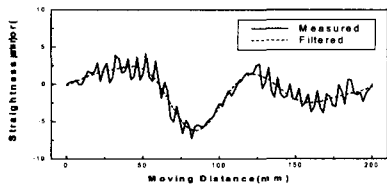
공작물 상의 기준점에서 이송 운동오차를 측정하기 위해 측정헤드와 XY테이블을 동시에 2mm씩 이송하며 측정하였다. 각 측정점마다 40번씩 데이터를 반복해서 받아 그 평균값을 구하였다. Fig. 5는 4개의 측정위치에서 측정된 결과를 보여주고 있다. 각 기준점마다 약 10 μ m 정도의 이송 운동오차를 보이고 있다.



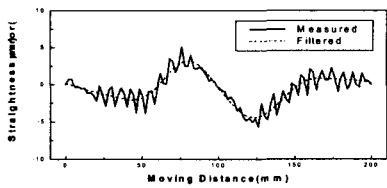
(a) point 1



(b) point 2



(c) point 3



(d) point 4

Fig. 5 Motion errors measured by the developed sensor

특이사항으로는 전체적인 변화에 고주파 신호가 실려서 나타난다는 점이다. 이와 같은 고주파 신호는 기준점 별로 그 크기는 약간의 차이를 보이지만 항상 관측되는 것으로서, 볼스크류의 피치 주기와 동기되는 주파수 성분으로 확인되었다. 따라서 비교적 저주파로 나타나는 공작물의 평면도만을 추출하기 위해 볼 스크류 피치오차로 추정되는 고

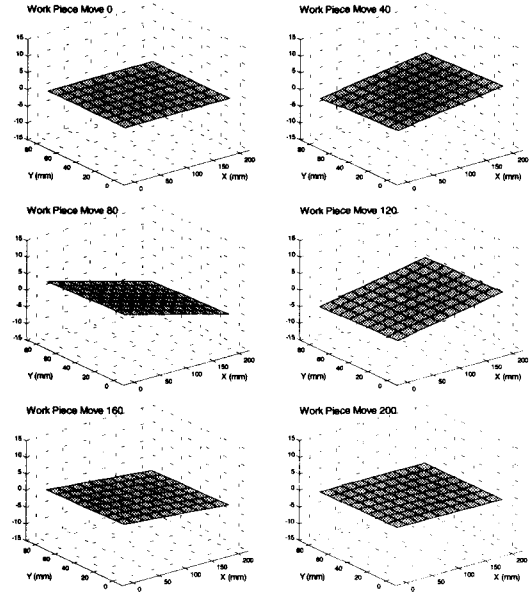


Fig. 6 Workpiece motion along the feeding direction

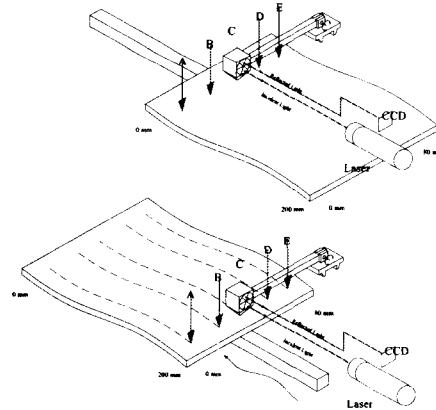


Fig. 7 Schematic for measurement of apparent flatness errors with feeding motion errors

주파 신호를 제거하였다. 그림에는 FFT 필터를 이용해 고주파신호를 제거한 상태를 같이 보여주고 있다.

본 논문에서 제안하고 있는 이송 운동오차 측정 방법은 본 논문에서 사용하고 있는 센서가 아닌 다른 형태의 평면도 측정센서를 이용하여 구현하기 매우 어렵다. 즉, 피측정물과 동기시켜 이동시키면

서도 자체의 이송 운동오차를 최소화해야 하기 때문이다. 따라서 레이저 간섭계 등 운동정도를 측정하기 위한 별도의 시스템을 활용하여야 한다.

한편 Fig. 6은 측정값으로부터 고주파성분을 제거한 후 이송 위치에 따른 공작물의 자세를 보인 것으로서, 이송하며 변화하는 수직 운동오차의 형상을 잘 보여주고 있다. 한편 이와 같은 이송 운동오차측정치를 근거로 Fig. 7에 표기된 바와 같이 공간 상에 고정된 점 A~E에서 예상되는 공작물의 이송 운동오차를 Fig. 8에 나타내었다. 이렇게 계산된 이송 운동오차는 평면도 계산에 활용된다.

3.2 평면도 평가

Fig. 7은 측정헤드 위치를 공간에 대해 고정하고 테이블을 이송시키며 표면의 가공오차와 테이블의 이송 운동오차가 포함된 결보기 평면도 오차값을 측정하는 방법의 개념도이다. 이와 같은 측정은 제안된 센서뿐만 아니라 정밀한 변위를 측정할 수 있는 대부분의 센서를 사용할 수 있을 것으로 사료된다. 예컨대, 용량형 근접센서, 레이저 변위센서 등이 유용할 것으로 생각된다.

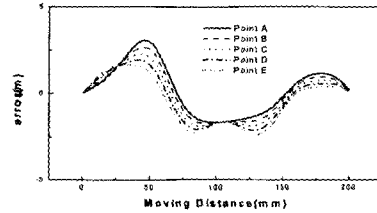
Fig. 9는 측정헤드 위치를 고정시키고 측정한 결보기 평면도 오차를 보여주고 있다. 또한 Fig. 10은 측정된 결보기 평면도 오차에서 Fig. 8에 보여진 고정점에서의 이송 운동오차를 빼는 과정을 통해 추정한 엄밀한 평면도 오차를 보여주고 있다. 시편의 중앙 부위가 크게 변형된 상태임을 알 수 있다.

이송 운동오차는 이송계의 특성에 기인하게 되므로 앞서 측정된 이송 운동오차는 대상 공작물에 무관하게 된다. 따라서 작업 조건에 맞게 미리 측정하게 되면 공작물의 변화에 무관하게 활용할 수 있다.

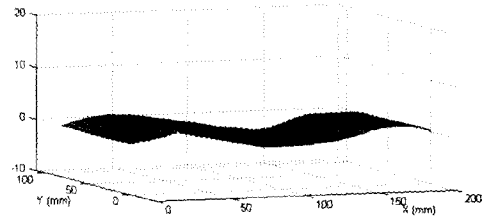
3.3 실험결과의 검증

제안된 방법의 검증을 위해 간섭계를 이용한 평면도 오차 측정 시스템을 구성하였다. Fig. 11은 간섭계를 이용하여 평면도를 측정하기 위한 장치구성이다. 여기서는 각변위를 측정하기 위한 광학계와 간섭계를 사용하게 된다. Fig. 12에 보이는 바와 같이 일정 거리를 이동하면서 각변화를 측정하고 이를 적분함으로써 물체의 굴곡면을 측정하는 방식이다. 이 방식을 이용하면 공작물을 고정시키고, 측정헤드를 이동시키면서 평면도를 측정할 수 있다. 그러나 이 방식으로는 본 논문에서 제시하고 있는

이송 운동오차 측정은 불가능하다.



(a) 2-dim



(b) 3-dim

Fig. 8 Estimated motion errors at the spatially fixed points (A~E)

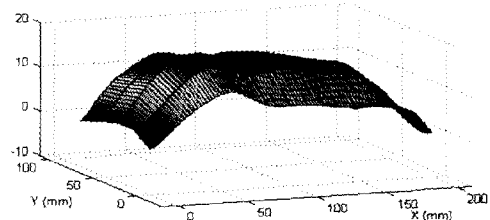


Fig. 9 Apparent flatness error measured by the developed sensor

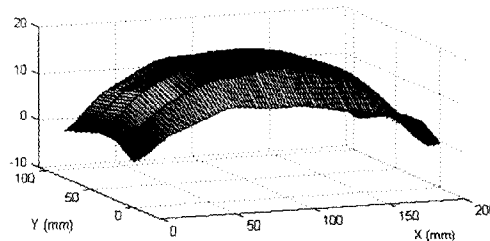


Fig. 10 Estimated flatness error by using Figs. 9 and 8(b)



Fig. 11 Experimental setup for measuring flatness error using Interferometer

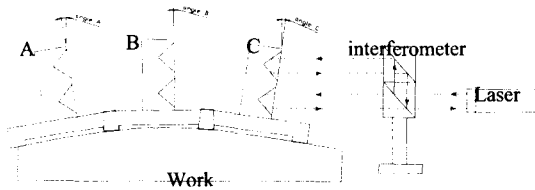


Fig. 12 Schematic of the flatness measurement system by using interferometer

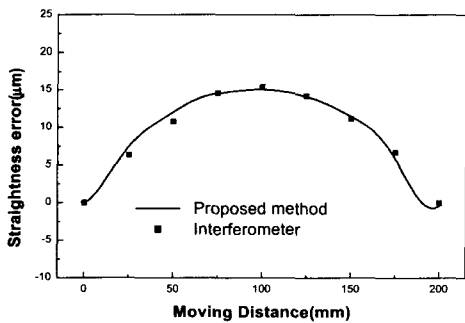


Fig. 13 Comparison of straightness errors measured by the proposed sensor and the interferometer

Fig. 13은 제안된 방식으로 측정된 평면도 오차와 간섭계를 이용하여 측정된 평면도 오차의 일부를 비교해서 보여주고 있다. 공작물의 중앙 부위에서 최대 오차가 발생하며 약 15μ m 정도로 파악된다.

한편, 제안된 방법과 간섭계를 이용해서 측정된 결과를 비교해 보면 대단히 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 14는 두 가지 방식으로 측정된 전체 평면도 오차를 3차원 그림형태로 비교해서 보여주고 있다. 제안된 방법으로 측정된 결과의 샘플링

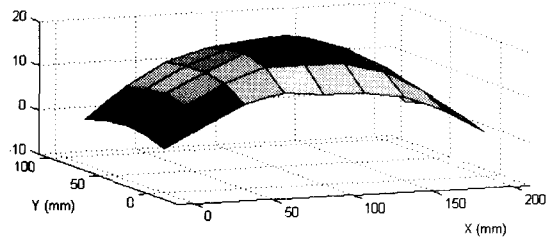
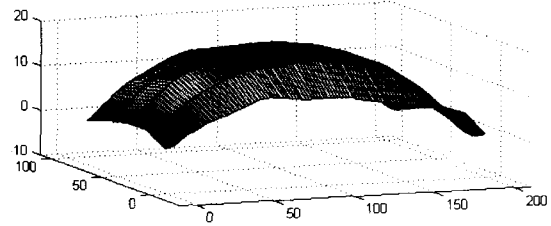


Fig. 14 Comparison of flatness errors by the proposed method and the interferometer

간격이 좁아 좀더 부드러운 곡선이 얻어진 점만을 제외하면 두 결과가 매우 훌륭하게 일치하고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 제안된 방법을 통해 임의의 점에서의 이송 운동오차를 얻어낼 수 있음은 물론 고정점에서 측정된 길보기 평면도로부터 실제 평면도를 얻어낼 수 있음을 확인하였으며 이는, 실제 평면가공시 기상에서 평면가공 상태를 확인하거나 가공 정도 개선 작업을 위해 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 기상에서 공작물의 평면도를 측정하는 시스템을 구성하였다. 또한 이송계에 의한 운동오차가 포함된 상태에서 측정되는 길보기 평면도로부터 실제 평면도를 측정하는 방법을 제안하였다. 이를 위해 공작물과 개발된 측정센서를 동기시켜 이송시키면서 공간상의 고정점에서 관측되는 운동오차를 추정하는 방법을 제안하였다. 또한 제안된 방법에 근거한 측정시스템을 구현하고 이를 실험적 확인함으로써 그 타당성을 확인하였다. 제안된 측정시스템을 이용하면 공작물의 표면을 스캔하면서 직접적인 평면도 측정이 가능하며, 이송계에

의한 운동오차를 측정할 수 있다. 따라서 제안된 측정방법을 활용하여 공구가 위치한 지점에서의 이송계에 의한 운동오차를 추정하면, 공구 위치에서 측정된 결보기 평면도로부터 실제 평면도를 측정하게 된다. 따라서 평면도를 보다 간편하게 측정할 수 있도록 할 뿐만 아니라 평면도 보정 가공에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 “첨단기체류 부품”사업 중 “연삭메카니즘의 핵심부품 설계 기술 개발”과제로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. 이재중, 양민양, “기상계측 시스템을 이용한 머시닝센터의 열변형오차 모델링 및 오차측정,” 한국정밀공학회지, 제17권, 제1호, pp. 120-138, 2000.
2. 김현수, 홍성욱, “연삭기에서의 기상 측정,” 한국정밀공학회지, 제18권, 제6호, pp. 27-36, 2001.
3. 김선호, 김동훈, “기상계측을 이용한 가공형상 측정 시스템,” 한국정밀공학회지, 제18권, 제6호, pp. 9-18, 2001.
4. 김현수, 장문주, 홍성욱, 박천홍, “평면 공작물 진직도 측정 시스템 개발에 관한 연구,” 한국정밀공학회지, 제19권, 제3호, pp. 107-113, 2002.
5. Fung, E. H. K. and Yang, S. M., “An approach to on-machine motion error measurement of a linear slide,” *Measurement*, Vol. 29 pp. 51-62, 2001.
6. Fan, K. C. and Zhao, Y., “A laser straightness measurement system using optical fiber and modulation techniques,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol. 40 pp. 2073-2081, 2000.
7. Florussen, G. H. J., et al., “Assessing geometrical errors of multi-axis machines by three-dimensional length measurements,” *Measurement*, Vol. 30 pp. 241-255 2001.
8. Huang, J., “An exact minimum zone solution for three-dimensional straightness evaluation problems,” *Precision Engineering*, Vol. 23, pp. 204-208, 1999.
9. Chou, C., et al., “CCD-based CMM geometrical error measurement using fourier phase shift algorithm,” *Int. J. of Mach. Tools & Manufact.*, Vol. 37, No. 5, pp. 579-590, 1997.
10. Zhang, Q., Fan, K. C. and Li, Z., “Evaluation method for spatial straightness errors based on minimum zone condition,” *Precision Engineering*, Vol. 23, pp. 264-272, 1999.
11. Samuel, G. L. and Shunmugam, M. S., “Evaluation of straightness and flatness error using computational geometric techniques,” *Computer Aided Design*, Vol. 31 pp. 829-843, 1999.