

개방형 수치제어기를 이용한 수평암 타입 좌표측정기의 개발

김민석*(한양대 대학원 기계설계학과), 정성중(한양대 기계공학부)

Development of the Horizontal Arm Type Coordinate Measuring Machine Using Open-Architecture Controller

M. S. Kim(Mechanical Design Dept. HYU), S. C. Chung(Mechanical Eng. Dept., HYU)

ABSTRACT

Coordinate measuring machines(CMMs) are used to obtain the dimensional information with micron accuracy. This paper is concerned with the development of the horizontal arm type coordinate measuring machine using open architecture controller. The coordinate measuring machine considered in this paper consists of three orthogonal axes in the x, y and z directions. Open architecture controller is used to implement a measuring system which can be fulfill to various needs of end-users of coordinate measuring machines. The open architecture controller presented here is embodied in personal computers. The programs and man-machine interfaces(MMI) are developed for various measuring conditions. Through the computer simulation based on the mathematical models of the coordinate measuring machine, control parameters are optimally tuned.

Key Words : Coordinate measuring machine (좌표측정기), Open-Architecture controller (개방형 제어기), Parameter tuning (파라미터 선정), Stability (안정성), Responsibility (응답성)

1. 서론

3 차원 좌표측정기는 정밀한 측정이나 자유 곡면과 같은 복잡한 형상을 갖는 물체를 측정하는 장비로서 현대 산업에 있어서 그 필요성은 날로 증대되고 있다. 그러나 현재의 생산 형태는 다품종 소량 생산의 유연생산시스템으로 변하고 있으며 이에 따라 측정 대상물체가 빈번하게 바뀔 수 있다. 따라서 다품종의 복잡한 형상을 가지는 부품의 측정이 요구되며, 각 부품들의 치수와 좌표측정기에의 장착방법 등에 따른 다양한 측정 환경에 적합한 측정 및 제어 시스템이 필요하게 된다⁽¹⁾⁽²⁾

이러한 요구를 충족시키기 위해 기존의 하드웨어와 소프트웨어들을 하나의 표준환경으로 통합운영하여 서로 다른 장비들을 손쉽게 통합할 수 있는 개방형 수치제어 시스템으로의 변화가 요구된다. 개방형 수치제어 시스템은 하나의 새로운 시스템을 구현할 때 각각의 요구에 적합한 시스템을 용이하게 구현할 수 있으며, 다양한 요구에 부응하는 적응성, 여러 다른 시스템들과의 통합이 용이한 통합성, 고능률 · 고정밀도를 추구할 수 있는 고기능성

등의 특징을 가진다.⁽³⁾

기존의 수평암 타입의 좌표측정기(또는 레이아웃 머신, Fig. 1 참조)는 주로 수동구동방식을 채택하고 있으며, 측정물의 모든 각도로 접근이 용이하고 대형물의 측정에 이상적인 구조이다.⁽²⁾⁽⁴⁾ 이와 같은 특징 때문에 주로 자동차 회사의 시작실이나 설계실 등에서 자동차 차체의 측정 등에 많이 사용되고 있다. 그러나 자동차 차체의 측정의 경우, 측정점의 수가 많고 같은 측정과정을 여러 번 반복해야 하기 때문에 기존의 수동구동방식으로는 생산성과 효율성에 많은 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점들을 극복할 수 있는 개방형 수치제어기를 이용한 수평암 타입의 좌표측정기를 개발하였다. 개발된 좌표측정기는 측정경로 파일로부터 자동으로 측정물의 위치 및 측정점에 대한 정보를 해석하여 운동지령을 생성한 후, 각 축의 이송 및 측정 등의 제어를 수행한다. 이러한 좌표측정기의 개발에는 각 축 구동모터의 선정, 개방형 제어시스템 구동용 소프트웨어의 개발, 각 축의 제어 파라미터 선정 등이 핵심적인 기술이 된다.

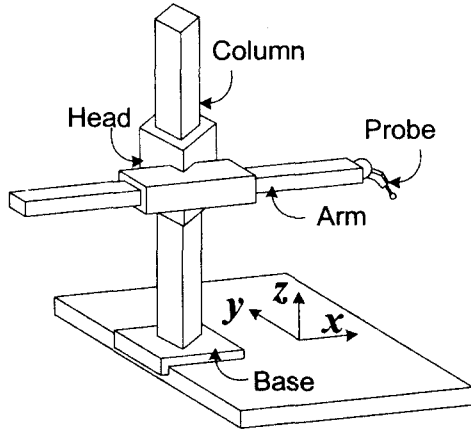


Fig. 1 Horizontal arm type CMM

2. 좌표측정기 구동부 설계

2.1 구동모터의 선정

좌표측정기의 각 축을 구동하는 모터를 선정하기 위해서는 측정운동시 각 축에 작용되는 마찰토크와 부하토크 등을 고려해야 한다. 각 축의 구동모터는 등속도 운동의 경우 자중에 의한 마찰토크와 예압하중에 의한 마찰토크를, 가감속 운동의 경우에는 가속에 의한 부하토크를 극복해야 한다. 좌표측정기 각 축의 구동모터에 작용하는 마찰토크는 식(1)과 같이 자중에 의한 마찰토크와 예압에 의한 마찰토크의 합으로 나타낼 수 있다.

$$T_F = T_p + T_d = \frac{\mu W l + \eta \cdot k \cdot F_{ao} l}{2\pi \eta} \quad (1)$$

여기서, T_F 는 모터에 작용하는 총 마찰토크, T_p 는 자중에 의한 마찰토크, T_d 는 예압에 의한 마찰토크, W 는 구동부 질량, l 은 구동부 피치(pitch), η 은 구동부의 효율, k 는 베어링 내부의 예압마찰계수, F_{ao} 는 예압하중, 그리고 μ 은 구동부 슬롯면의 마찰계수이다.

또한 가감속에 의한 부하토크는 식(2)로부터 계산할 수 있다.

$$T_J = \frac{W}{g} \left(\frac{l}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{2\pi n}{60t} \quad (2)$$

여기서, g 는 중력가속도, n 은 모터의 회전수, 그리고 t 는 가감속 시간이다.

따라서 식(3)과 같은 모터선정에 대한 관계식을 유도할 수 있다.

Table 1. Specification of selected servo motors

Power(W)	100	200
Rated torque (Nm)	0.32	0.64
Max. torque (Nm)	0.95	1.91
Torque constant(Nm/A)	0.39	0.49
Rotor inertia (kgm ²)	0.042E-4	0.2E-4
Weight (kg)	0.5	1.1

$$\begin{aligned} T_{rate}^* &\geq \alpha \cdot T_F \\ T_{peak}^* &\geq \beta \cdot (T_F + T_J) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, T_{rate}^* 는 모터의 정격토크, T_{peak}^* 는 모터의 최대토크, 그리고 α, β 는 안전계수(safety factor)이다. Table 1에 식(1)-(3)을 이용하여 선정한 3 차원 좌표 측정기 각 축의 서보모터 사양을 나타내었다.

3. 좌표측정기 제어부 설계

현대의 다양한 생산시스템은 제품에 대한 소비자들의 폭넓은 요구를 만족시키고 생산기술의 변화와 컴퓨터 관련기술의 급격한 발달에 빠르게 적응하기 위해서 개방형 제어구조로의 변환이 요구되고 있다. 이러한 개방형 제어 시스템을 좌표측정기에 도입하여 각 축의 위치와 속도를 제어하는 시스템의 구성도를 Fig. 2에 나타내었다. 제어 프로그램이나 조이스틱(joy-stick)으로부터 위치 또는 속도지령이 발생하면, 직선 또는 원호보간(interpolation)이 이루어지고, 각 축의 제어기로 제어정보가 입력된다. 또한 실제 각 축의 속도 및 위치 신호는 좌표측정기 각 축에 부착된 리니어 스케일로부터 피드백 된다.

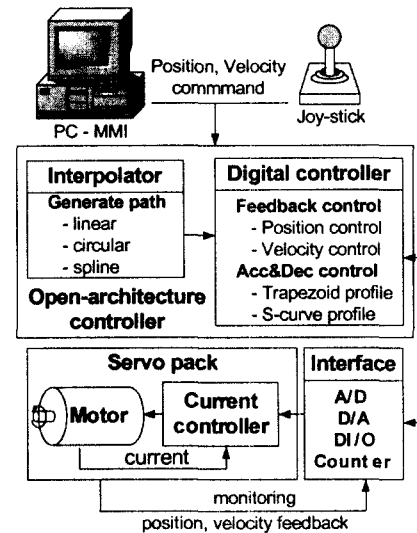


Fig. 2 Schematic diagram of developed control system

3.1 제어 프로그램 모듈

본 연구의 제어 프로그램은 Windows 9.x 환경에서 개발되었다. 제어 프로그램은 자동측정, 파라미터 튜닝, 상태감시 등 여러 가지 모듈로 구성되어 있다.

자동측정 모듈은 측정경로 파일(*.pat)로부터 자동으로 측정물의 위치 및 측정점에 대한 정보를 해석하여 운동지령을 생성, 실행한 후 측정된 좌표값의 저장을 수행하는 모듈이며, 파라미터 튜닝모듈은 좌표측정기 제어 시스템의 제어 파라미터인 비례이득, 적분이득, 미분이득 등의 설정기능을 가진다. 또한 상태감시 모듈은 좌표측정기 각 축의 위치, 속도, 발생 이벤트 등을 실시간으로 감시하는 기능을 가진다. Fig. 3 에 개발된 좌표측정기의 파라미터 튜닝모듈의 사용자 인터페이스 화면을 나타내었다.

이와 같이 특별한 목적에 부합하는 제어 시스템의 구성에는 개방형 제어가 가장 적합한 형식이다.

3.2 제어 파라미터의 선정

본 연구에서는 시스템의 전달함수로부터 유도한 시스템의 동적특성과 제어특성을 사용하여 특정한 성능함수를 정의한 후, 정의된 성능함수를 최소화 하는 최적의 파라미터를 선정하였다. 좌표 측정기의 속도제어루프의 전달함수는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G_v(s) = \frac{V_{act}}{V_{cmd}} = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

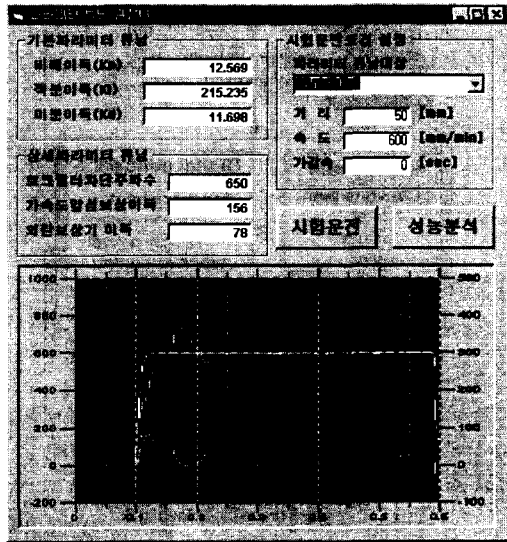


Fig. 3 MMI of parameter tuning module

여기서, ζ 는 시스템의 감쇠비(damping ratio), ω_n 은 고유주파수(natural frequency)를 나타낸다. 본 연구의 제어 파라미터인 비례이득 K_p 와 적분이득 K_i 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_t}{J_{eq}} K_p}, \quad \zeta = \frac{K_t}{2\omega_n J_{eq}} K_i \quad (5)$$

여기서 J_{eq} 는 좌표측정기 각 축의 등가관성, K_t 는 각 축 구동모터의 모터상수이다. 식(5)에서 알 수 있듯이, 제어시스템에 대한 감쇠비와 고유주파수가 결정되면 시스템의 제어 파라미터를 결정할 수 있다. 감쇠비는 시간응답(time response)의 오버슈트(overshoot)와 연관되고, 고유주파수는 주파수 대역폭(bandwidth)과 연관되므로, 결국 시스템의 응답성(responsibility)과 안정성(stability)은 시간응답의 오버슈트와 대역폭에 의해 결정된다. 따라서, 시간응답의 오버슈트와 대역폭을 식 (6)과 같이 성능함수로 정의하고, 이러한 성능함수를 최소화 하는 최적의 제어 파라미터를 선정할 수 있다.

$$F(\zeta, \omega_n) = \chi_1 \cdot \begin{cases} 1 + e^{\left(\frac{-\zeta \{ \pi - \cos^{-1}(1 - 2\zeta^2) \}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \right)}, & \zeta < 1 \\ 1 + \left(\frac{\zeta + \bar{\zeta}}{\zeta - \bar{\zeta}} \right)^{-\frac{\zeta}{\bar{\zeta}}}, & \zeta > 1 \end{cases} + \chi_2 \cdot \omega_n \sqrt{(2\zeta^2 + 1) + \sqrt{4\zeta^4 + 4\zeta^2 + 2}} \quad (6) + \chi_3 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{2\zeta}{\sqrt{\sqrt{1 + 4\zeta^4} - 2\zeta^2}} \right)$$

여기서, $\bar{\zeta} = \sqrt{\zeta^2 - 1}$, χ_1, χ_2, χ_3 는 무차원수를 의미한다. 식(6)을 이용한 파라미터 설정과정을 Fig. 4 에 도시하였다.

Fig. 4 에서 알 수 있듯이 성능함수를 최소화 하는 2 가지 종류의 곡선이 존재한다. 이러한 두 곡선 중 높은 파라미터 값을 갖는 곡선을 선택하여 파라미터를 선정할 경우 시스템의 응답성 보다 안정성에 초점을 맞추게 되며, 낮은 파라미터 값을 갖는 곡선을 선택하여 파라미터를 선정할 경우 시스템의 응답성에 초점을 맞추게 된다. Table 2 에 두 가지 종류의 최적 파라미터값을 나타내었다.

이와 같은 과정을 거쳐서 선정된 파라미터값을 파라미터 튜닝모듈을 이용하여 실제의 좌표측정기 제어 시스템에 대입한 후, 단위계단 속도지령에 대한 응답을 Fig. 5 에 나타내었다. Fig. 5(a)는 파라미터

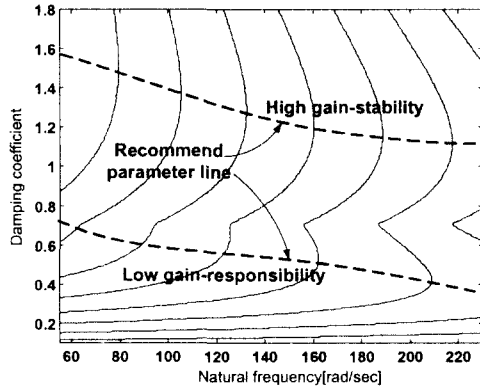


Fig. 4 Performance index function

Table 2 Optimal parameter lists

Parameters	Responsibility	Stability
Natural frequency	82.23	132.36
Damping	0.70	1.28
P-gain	1.365	1.985
I-gain	296.325	68.236

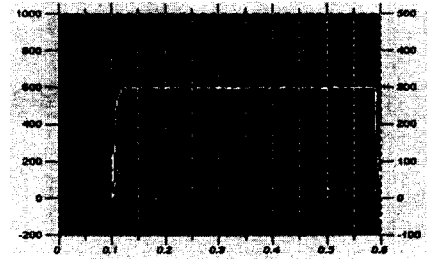
선정과정을 거치지 않은 제어 시스템의 응답을 나타낸 것이며, Fig. 5(b)와 Fig. 5(c)는 각각 응답성과 안정성에 초점을 맞춘 경우의 응답특성을 나타낸 것이다.

4. 결론

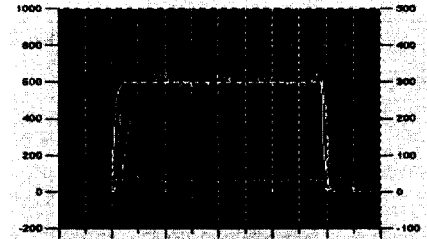
개방형 수치제어기를 이용하여 수평암 타입의 3 차원 좌표측정기를 개발하였다. 측정 운동시 각 구동모터에 작용되는 마찰토크 및 부하토크를 계산하여 수평암 타입 좌표측정기에 적합한 구동모터를 선정하였으며, 다양한 측정 환경에 적응하기 위하여 개방형 제어기를 이용한 3 차원 좌표측정기의 제어 시스템을 구현하였다. 또한 좌표측정기의 수학적 모델을 기초로 하여 응답성과 안정성을 고려한 제어 파라미터를 선정하였다.

참고문헌

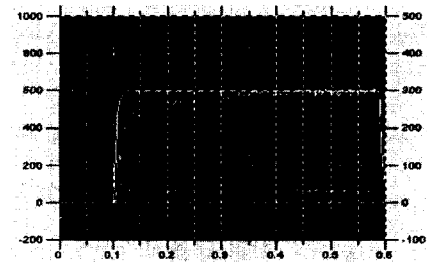
1. S.D. Jones and A.Galip Ulsoy, "An optimization Strategy for maximizing Coordinate Measuring machine Productivity, Part 1: Quantifying the Effects of operating Speed on Measurement Quality", ASME, Vol. 117, pp. 601 ~ 608, 1995.
2. John A. Bosch, "Coordinate Measuring Machine and Systems", Marcel Dekker, Inc., 1995.



(a) Before parameter tuning



(b) Parameter 1: focus on responsibility



(c) Parameter 2: focus on stability

Fig. 5 Response of unit-step velocity command

3. Stephen J. Rober and Yung C. Shine, "Modeling and Control of CNC Machines using a PC-Based Open Architecture Controller", Mechatronics, Vol. 5, No. 4, pp. 401-420., 1995
4. A.M. Higginson and S.handley, "The modeling and Automatic commissioning of a High Precision Coordinate Measuring Machine", Mechatronics, Vol. 6, No. 3, pp. 261-281, 1997.