

갠트리형 3축 이송계의 동특성 평가 및 개선 연구

Evaluation and Improvement of Dynamic Characteristics of 3-axis Gantry-type Stage

박상원*·홍성욱†·William Singhose**·서용규***
S. W. Hong, W. E. Singhose, S. W. Park and Y. G. Seo

Key Words : Dynamic Characteristic(동특성), Input Shaping(입력 성형), CMM(삼차원측정기), Industrial Crane(산업용 크레인), Natural Frequency(고유 진동수), Residual Vibration(잔류 진동)

ABSTRACT

This paper presents a gantry type 3-axes positioning system, which is useful to test control algorithms for coordinate measuring machines and industrial cranes. The dynamic characteristics of the system have been investigated through a series of finite element analysis and experiments. In order to minimize the residual vibration during movement, this paper implements input shaping algorithms for the system with the information from the dynamic analysis. The results show that the dynamic performance of the system can be significantly improved by the dynamic analysis and implementation of input shaping

1. 서론

일반적으로 고속의 이송계에서는 과도상태에서의 큰 진동과 목표지점에서의 잔류진동이 존재하게 된다. 이런 이유로 이송계를 원하는 경로로 이송하거나, 이송 중에 방해물을 피하기가 어려워지게 된다. 또한, 최종 목표지점에서의 위치 안정화 시간을 필요로 하게 된다. 예컨대, 산업용 크레인의 경우 Payload가 이송 중 크게 흔들리거나 목표지점에서의 잔류진동이 많을 경우 작업 시간이 늘어나는 것은 물론, 안전문제가 발생하기도 한다. 정밀 고속 측정이 요구되는 삼차원 측정기(CMM, Coordinate Measuring Machine)의 경우에도 목표지점에서의 잔류진동이 측정 정밀도와 측정 시간에 치명적인 영향을 끼치게 된다. 특히, 프로그램에 의해 미리 정해진 경로를 운전할 때에는 가감속이나 이송속도 등을 프로그램에 의해 적절히 조절하여 잔류진동을 줄일 수 있지만 작업자가 현장에서 직접 운전하여 미리 정해지지 않은 경로로 이송을 시킬 경우, 크레인과 삼차원 측정기 모두 별도의 잔류진동에 대한 대책이 필요하다.

본 논문에서는 삼차원 측정기 혹은 산업용 크레인과 같은 갠트리형 이송장비의 특성을 연구할 수 있는 장비를 제작하였으며 그 동특성을 계산 및 실험으로 평가하고 이 데이터를 근거로 정해지

지 않은 임의의 경로로 움직일 경우 입력 성형 기법을 실시간으로 적용하여 이송계의 성능을 개선하는 방법을 제안하였으며 실험적으로 검증하였다

2. 갠트리형 3축 이송계

Fig. 1은 본 연구에서 개발된 갠트리형 3축 이송계 실험 장치이다. 삼차원 측정기와 산업용 크레인을 모사할 수 있도록 설계/제작 되었다. XY 스테이지와 삼차원 측정기와 동일한 갠트리형 3축으로 구성되어 있으며, XY 스테이지에는 산업용 크레인의 적재물을 대신할 추와 이를 위/아래로 움직일 수 있는 장치가 탑재되어 있다.

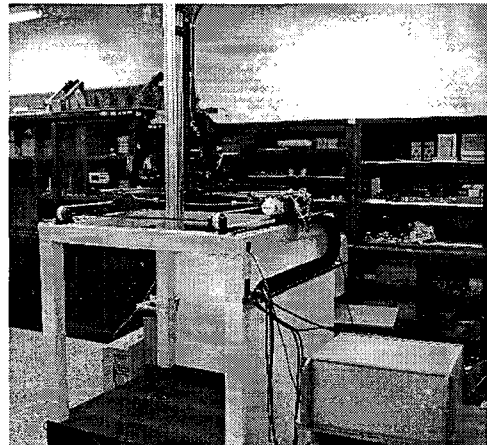
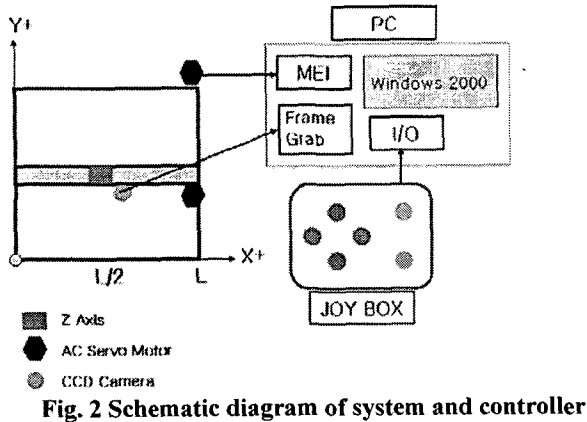


Fig. 1 Experimental Apparatus

* 금오공과대학교 대학원
† 교신저자, 금오공과대학교 기계공학부
E-mail : swhong@kumoh.ac.kr
Tel : (054) 478-7344, Fax : (054) 478-7319
** Georgia Institute of Technology
*** 금오공과대학교 대학원



그리고 이 장치 상부에는 CCD 카메라를 설치하여 경로를 추적할 수 있도록 하였다.

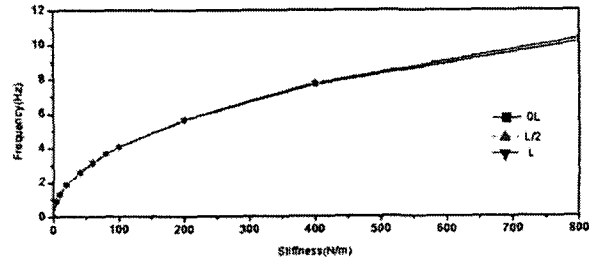
XYZ 축은 정밀 고속 이송을 위하여 AC 서보모터를 사용 하였으며, 최고 속도는 600mm/s 이다. 산업용 크레인 모델에 사용된 모터는 브레이크가 장착된 속도 가변이 되는 AC 모터를 사용하였다. 이 모터를 이용하여 X와 Y 축은 삼차원 측정기에서 모션 특성을 만들기 위해 내부에 철심이 들어 있는 타이밍 벨트를 사용하였으며, X, Y, Z 축 및 크레인모터는 제어기 박스에서 스위치를 이용하여 실시간으로 컨트롤이 가능하다.

모션 컨트롤러는 미국의 MEI 모션 보드를 사용하였으며, 서보 모터와의 제어 모드는 속도로 설정이 되어있다. 또한 모션에 관련된 데이터, 특히 제어이득은 MEI 컨트롤에서 조절이 가능하며, 모든 특성 변수(속도, 가속도, 위치 등)가 실시간으로 모니터링이 되도록 소프트웨어를 설계하였다. 모든 제어 및 데이터 획득은 이 소프트웨어를 통해 이루어지며 그 구성은 Fig.2 와 같다.

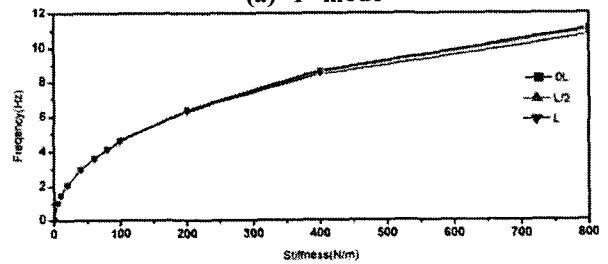
3. 동특성 분석

3.1 해석 모델링 및 계산 과정

유한요소해석 도구인 ANSYS 를 이용하여 본 논문에 사용된 실험 장치를 모델링하고 실험장치 구조에 대한 고유진동수를 계산하였다. 또한 서보 모터 되먹임 제어에 의한 강성을 집중 스프링 상수 k 를 도입하여 모델링하였으며, 스프링 상수 k 를 0.01 부터 800(N/m)까지 변화 시키면서 1 차 모드(X 축방향), 2 차 모드(Y 축 방향)에 대한 각각의 고유진동수를 알아보았다. 또한, 수직축(Z 축)의 이동에 의한 구조물 변화를 고려하여 수직축의 위치를 변화시키면서 특성 변화를 계산하였다. Z 축의 총 행정 L 은 600 mm 이고 계산된 위치는 0, $L/2$, L 이다. 0 의 위치는 Z 축이 X, Y 스테이지와 만나는 부분이다.



(a) 1st mode



(b) 2nd mode

Fig. 3 Comparison of frequency response along stiffness

Fig. 3 은 Z 축의 위치와 강성의 변화에 대한 유한요소 계산 결과 1 차, 2 차 모드에 대한 결과를 비교한 데이터이다. 1 차 모드는 X 축 방향의 진동이고, 2 차 모드는 Y 축 방향의 진동이다. Fig. 3 의 (a), (b)에서 나타나는 것처럼 1 차, 2 차 모드 모두 Z 축의 위치에 따른 변화는 미미하며, 서보계의 강성의 변화에 의해 고유 진동수가 변화함을 알 수가 있다. 상대적으로 서보계의 강성이 낮아 1,2 차 모드에서 수직축 전체가 강체처럼 움직이는 형태의 진동모드를 보이고 있으며 수직축 및 구조물의 탄성효과를 3 차 이상의 모드에서부터 나타나기 시작한다.

Fig. 4 는 유한요소 해석에 의해 계산된 1 차부터 4 차 모드까지의 고유 진동수를 서보강성 및 Z 축의 위치 변화에 따른 차이에 대해 비교한 그림이다. Fig. 4 의 (a)는 Z 축이 가장 아래 위치(OL)에 있을 때이고 (b)는 중간위치(L/2), 그리고 (c)는 가장 위(L)에 있을 때이다. 1, 2 차 모드는 Fig. 3 에서 설명한 바와 마찬가지로이며, 3 차 모드는 Z 축의 상단부가 Y 방향으로 진동하는 것이고 4 차 모드는 Z 축의 상단부가 X 방향으로 진동하는 모드이다. 1, 2 차 모드와 달리 3, 4 차 모드는 Z 축의 위치에 의해서도 비교적 큰 영향을 받음을 알 수가 있다. 특히 Fig. 4(a)와 Fig. 4(c)를 비교해 보면 그 경향이 더욱 확연히 나타나게 되는데 3, 4 차 모드가 Z 축의 위치가 L 일 때 강성의 증가에 따라 서로 근접해하는 경향을 볼 수 있다. 반면 Z 축이 OL 의 위치에 있을 경우에는 3, 4 차 모드의 고유 진동수 차이가 줄어들지 않는다. 또한 Z 축의 위치가 L 일 경우 강성이 매우 커지면 1 차 모드와 2 차 모드,

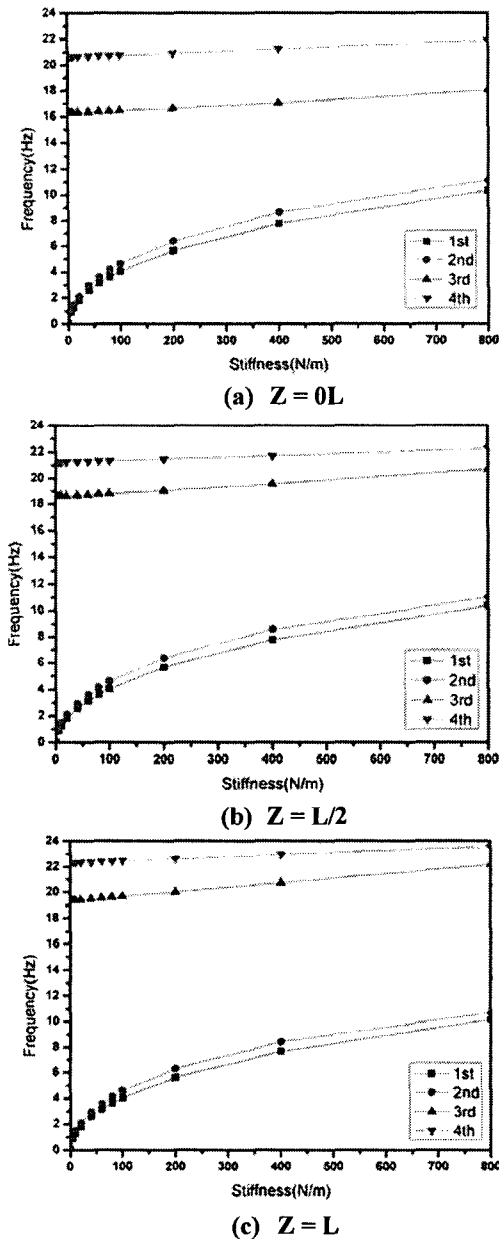


Fig. 4 Comparison of natural frequencies with Z axis position varied by 0L, L/2, L.

그리고 3 차와 4 차 모드가 교차하게 된다. 고유 진동수 크기는 Z 축의 위치가 0L 에서 L 로 이동할수록 높아짐을 알 수가 있다.

3.2 동특성 측정

Fig. 5 와 같이 가속도 센서 및 신호 분석기를 사용하여 고유 진동수를 측정 하였다. 실험 장치 구조물에 대한 고유 진동수 측정은 석정반 위에 고정된 프레임(Frame)의 X, Y 축 방향에서 측정이 이루어졌다. 측정된 위치는 Fig. 5 와 같이 X, Y 축 모두 L/2 이다. 실제 시스템에서 서보 모터의 강성 값을 변화시키기 위해 모션 컨트롤러의 P 값

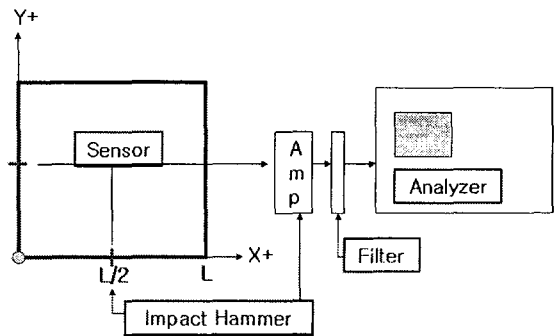


Fig. 5 Schematic diagram of measuring mechanism.

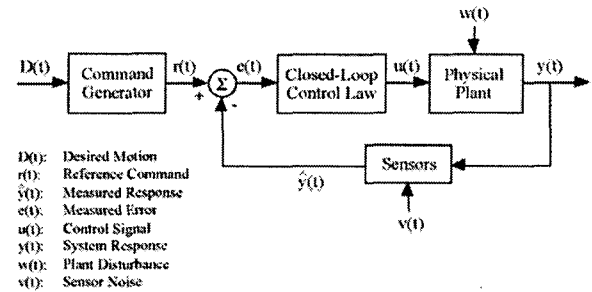


Fig. 6 Block Diagram of a Generic Control System[1]

Table 1 Comparison of measured and computed natural frequencies with the P gain and the equivalent stiffness changed

P Gain	Measurement		FEM	
	Natural Frequency(Hz)	Stiffness(N/m)	Natural Frequency(Hz)	Stiffness(N/m)
20	4.1	100	4.04	
40	4.5	150	4.68	
65	6.5	300	6.65	

을 변화시키면서 고유진동수를 측정하였고 이를 유한요소해석 결과의 고유 진동수와 비교하여 서보강성 값을 추정하였다.

Table 1 은 고유진동수의 관계를 이용하여 얻어진 P 계인과 서보강성의 상관관계를 나타내고 있다.

4. 입력성형에 의한 동특성 개선

4.1 입력성형 방법 개요

Fig. 6 은 전형적인 제어 시스템의 블록 선도를 나타낸다. 그림 중에서 점선으로 표시된 부분은 요구하는 운동에 대한 기준 명령(Reference Command)을 생성시켜주는 명령 생성기이다. 명령 생성기에서 기준 명령을 생성시킬 때 제어 목적에 맞도록 기준 명령을 수정 혹은 재생성할 수 있다.

본 논문에서는 FIR 필터의 확장인 입력 성형 (Input Shaper)을 사용하여 초기에 생성된 기준 명령을 수정하여 잔류진동을 없앨 수 있는 새로운 기준 명령을 만드는 방법을 사용하였다. 또한 이와 같은 입력 성형과정을 실시간으로 적용함으로써 현장 작업자에 의해 임의로 입력된 명령에 의한 이송시에도 잔류진동을 최소화할 수 있는 이송이 가능하도록 하였다.

4.2 이송계의 정밀도 평가 및 개선

Fig.7 은 본 연구에 사용된 이송장치의 Y 축에 대해 레이저 간섭계를 이용하여 초기 상태의 평탄도(Flatness)를 측정한 결과(a)와 조립상태를 조정하여 보정한 후 측정한 결과(b)이다. 조정 전에 비하여 조정한 후 평탄도가 대략 80%정도 향상되어, 이송정밀도가 높아졌을 뿐만 아니라 이송의 안정성이 개선되었다.

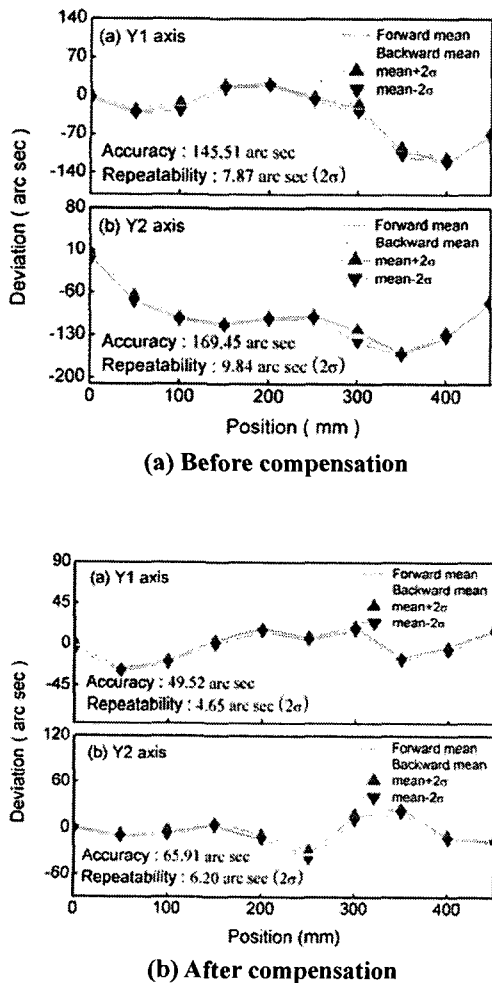


Fig. 7 Flatness of the stage before and after the flatness is compensated.

4.3 입력 성형 적용

Singhose[1]가 제시한 입력 성형 방법 중 ZV와 ZVD를 이용한 경우와 알고리즘(Algorithm)을 적용하지 않았을 때의 이송계 가속도를 비교하는 방식으로 입력성형 효과를 검토하였다. 가속도 센서의 부착 위치는 Z 축의 0L인 위치에 X 축 방향으로 설치하였다. 측정은 실제로 컨트롤 박스에서 동일한 사람이 입력 성형을 적용했을 때와 그렇지 않았을 때로 구분해서 연속적으로 이루어졌다. 가속 및 감속시간은 400ms 이고, 고유진동수는 6.1Hz, 최고 속도는 대략 600m/s 이다. 그 결과는 Fig 8 과 같다.

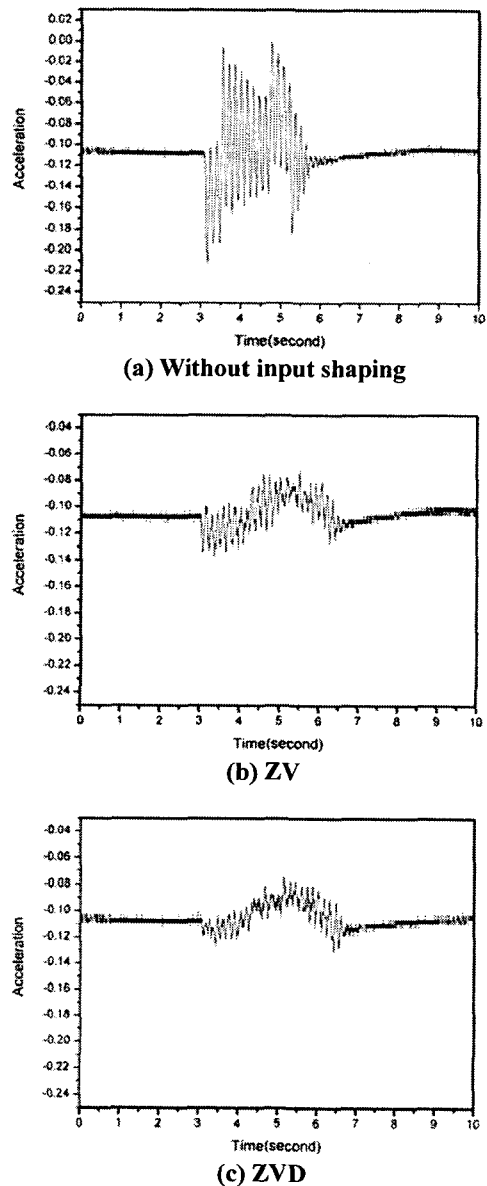


Fig. 8 Comparison of the accelerations with and without input shaping.

Fig. 8 은 시스템의 강성이 300(N/m)일 때 일반적인 운동과 입력 성형을 사용한 경우의 가속도 신호를 비교해서 보여주고 있다. Fig. 8 (a), (b), (c)는 각각 입력 성형을 적용하지 않은 경우, ZV 와 ZVD 을 적용한 경우이다. 동일한 이동 명령에 대한 가속도의 피크-피크 기준 크기가, 입력 성형을 적용하지 않은 경우에 비해 ZV 를 적용하였을 경우에는 35.3%, ZVD 를 적용하였을 경우에는 41.5% 수준으로 줄어들게 됨을 알 수 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 갠트리형 3 축 이송계를 개발하였고 그 동특성을 평가/개선하였다. 이를 위해 유한요소해석 도구를 이용한 동특성을 계산하고 이를 실험을 통해 비교하였으며 미지의 매개변수를 추출하였다. 또한 이송시의 잔류진동을 최소화할 수 있는 방법으로 입력성형 알고리즘을 적용하였으며 그 결과를 관찰하였다. 동특성 분석을 통해 얻어진 고유진동수는 입력성형에 적용되었다. 이송특성을 개선하기 위해 사용된 입력 성형 ZV, ZVD 는 실제 이송계의 동특성을 변화시키지 않으면서도 잔류진동의 크기를 줄여 전체 시스템의 성능을 개선하는 효과가 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Singhose, W. E., 1997, *Minimum Generation For Flexible Systems?* Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts.
- (2) Meckl, P. H. and Seering, W. P., 1990, *Experimental Evaluation of Shaped Inputs to Reduce Vibration for a Cartesian Robot?* ASME journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 112, pp. 159-165.
- (3) Pao, L. Y. and Singhose, W. E., 1995, *On the Equivalence of Minimum Time Input Shaping with Traditional Time-Optimal Control?* Proceedings of the 4th IEEE Conference on Control Applications, pp. 1120-1125.
- (4) 노상현 등, 1999, "디지털 IIR 필터를 이용한 입력 성형기법에 의한 2 축 천정크레인의 진동제어", 한국산업응용학회논문집, 제 2 권, 제 1 호, pp 53-59.
- (5) Sung, Y. G., 1999, *Adaptive Robust Vibration Control with Input Shaping as a Flexible Maneuver Strategy?* KSME International Journal, vol. 13, no. 11, pp. 807-817.
- (6) Singhose, W. E., Crain, E., and Seering, W., 1997a, *Involved and Simultaneous Two-Mode Input Shapers?* IEE Proceedings of Control Theory and Applications, vol. 114, no. 6, pp. 515-520.

(7) Singhose, W. E., Banerjee, A., and Seering, W., 1997b, *Flexible Spacecraft with Deflection-Limiting Input Shaping?* Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol. 20, no. 2, pp. 291-298.

(8) Singhose, W. E., Porter, L., Kenison, M., and Krikku, E., 2000, *Effects of Hoisting on the Input Shaping Control of Gantry Cranes?* Control Engineering Practice, vol. 8, no. 10, pp. 1159-1165