리니어 모터를 이용한 고속 고정밀 갠트리형 소형 데스크탑 로봇 개발

조성훈*(고려대학교 대학원 기계공학과),
최우천**(고려대학교 기계공학과), 김용일***(져스텍)

Development of small gantry desktop robot of high speed and high precision using linear motor

S. H. Cho* (Graduate School, Korea Univ.), W. C. Choi** (Mech. Eng. Dept., Korea Univ.),
Y. Y. Kim (JUSTEK) ***

ABSTRACT

Typical small desktop robots have limied application due to their intrinsic feaures like friction, backlash, etc. However, a newly developed small gantry desktop robot needs smaller footprint and shows better performance in position accuracy, velocity, and acceleration. In order to achieve such results, synchronization control of two axes, position compensation methods in plane are suggested.

Key Words : Linear Motor(리니어 모터), Desktop Robot(데스크탑 로봇), High Precision(고정밀), Synchronization Control(동기제어)

1. 서론

기존 소형 데스크탑 로봇은 회전형 서보모터와 볼스크류 및 리니어 모션(LM) 가이드로 구성되어 있다. 이러한 스테이지는 두 가지 장치 사이에서 발생하는 접촉이나 마찰, 슬립 등으로 인한 에너지 손실과 간접적인 구동으로 속도 1 ㎧, 가속도 0.5g, 정밀도 20 ㎛정도의 한계가 있다. 따라서 현재 국내에서 생산 또는 수입 판매되고 있는 데스크탑 로봇은 디스펜서나 볼트-너트 체결, 간단한 비전 검사장비 등 수십 ㎛의 정밀도만이 요구되는 분야에 제한적으로 사용되고 있다. 반도체장비 등에서의 고속, 고정밀 특성 요구에 대한 대안은 리니어 모터로서 구동하는 것인데 기존의 데스크탑 로봇의 획일적인 구조에서 과감하게 탈피하여 리니어 모터를 이용한 갠트리 방식을 개발하였다.

기존의 서보모터와 볼스크류를 이용한 직선 구동 시스템에 비해서도 가격 경쟁력에서 밀리지 않으며, 수 ㎛급 고성능으로 기존 데스크탑 로봇의 제한적인 사용 영역을 크게 확대시키고자 하는 데에 목적을 두었다.

본 개발의 내용을 요약하면 다음과 같다.

- o 구조적으로 안정된 갠트리형 데스크탑 로봇
- o 작업 공간을 적게 차지하여 공간 활용도 극대화
- o 복수개의 Z 축을 설치하여 작업 능률을 높일 수 있음
- o 갠트리축의 동기제어 실현으로 안정된 동작이 가능
- o 고성능 리니어 모터 채용으로 속도 1.5 ㎧, 가속도 1g 초과 달성
- o 평면 위치 보정 기술로 평면 절대 위치 정밀도 10 ㎛ 초과 달성

이상과 같은 목적을 달성하기 위해 리니어 모터를 이용한 갠트리형 데스크탑 로봇을 개발하고 시스템을 구성하여 실제 산업 현장에 적용할 수 있도록 하기 위하여, 수요 조사에서부터 시뮬레이션, 설계, 제작, 성능 실험 등의 일련의 과정을 수행하였다

2. 개발 내용

2.1 갠트리형 데스크탑 로봇에 적합한 리니어 모터의 개발

본 연구에서는 갠트리 축의 구동기로서 공심형 리니어 모터를 채택하였다. 기존의 갠트리 시스템은 갠트리 축에 철심형 리니어 모터를 이용한 것이 대부분이었다. 이는 철심형 리니어 모터가 공심형 모터에 비해 추력이 크기 때문이다. 하지만, 이러한 철심형 리니어 모터는 정밀 추력제어가 어렵기 때문에 초정밀 위치 제어를 요하는 데스크탑 로봇용으로는 부적합하다(Table 1). 그리고 플랫(flat) 타입의 리니어 모터는 단면적을 많이 차지하게 되므로 공간 활용이 중요한 소형 데스크탑 로봇용에 적합하지 않다.

Table 1 Comparison between iron core and coreless type linear motors

철심형 모터	공심형 모터
- 주행 중 이동자 위치에 따른 코깅 추력 발생 - 코깅 추력 감소에 따른 Commutation 추력 변화 발생 - 이동자의 관성력이 큼 - 중량 대 추력 비 우수 - 가격 대 추력 비 우수 - 흡인력에 따른 마찰 저항 증가 - 주행 중 속도에 비례하는 저항력 발생 - 저가속, 중속 등의 비교적 단순한 모션에 적합	- 주행 중 추력의 변화가 매우 적음 - 코깅 추력이 없음 및 Commutation 추력 변화 없음 - 이동자 관성이 작음 - 전기 시상수가 낮음 - 양측식 자석의 배열로 사용 전류 감소 - 흡인력 없음 - 냉각 및 소음 저감이 어려움 - 고가속, 고속, 고정밀 운전에 유리

갠트리의 구조를 최대한 이용하면서 단면적을 최소로 하기 위해, 단일 리니어 모션 가이드 방식의 갠트리 전용 리니어 모터를 개발하였다. 하부축이 갠트리 구조이기 때문에 양쪽 모터의 리니어 모션가이드에 의해 안정된 구동을 할 수 있으면서도, 각 모터의 단면적이 작기 때문에 데스크탑 로봇에 적합하다. 이 구조는 기존의 모델(JTM20)에 비해 리니어 모션 가이드와 이동자를 경량화하여 마찰력(씰 저항력)을 줄임으로써 데스크탑 로봇에 더욱 적합하다.

이를 위해 영구 자석의 크기, 코일의 형상 및 권선 굵기, 공극, 이동자의 크기 등을 선정하여 반영하고 리니어 모터의 기계적인 구조의 안정성, 내구성, 신뢰성, 제작의 용이성 및 실제 산업 현장에서의 적용 가능성을 고려하여 베어링 등 각종 부분품을 선정하였다. 그리고 이를 바탕으로 리니어 모터의 세부 설계를 수행하고 리니어 모터의 평면도, 정면도, 측면도, 세부 부품도 및 실제 제작을 위한 조립도 등을 제작하였다.

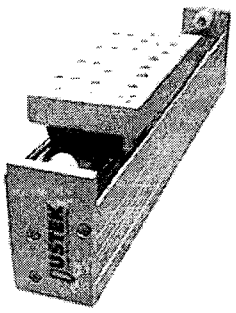

Fig. 1 Actual linear motor

2.2 갠트리형 데스크탑 로봇의 구동

설계된 데스크탑 로봇은 다음과 같이 구성된다.

- 하축 Y1: 리니어 모터(JTM20S4) 및 서보 드라이버(JTD02)
- 하축 Y2: 리니어 모터(JTM20S4) 및 서보 드라이버(옵션 사항)
- 상축 X: 리니어 모터(JTM05) 및 서보 드라이버(JTD02)
- 상위 모션 콘트롤러: UMAC(Delta Tau)

Fig. 2 은 개발된 데스크탑 로봇의 외형도이다. 갠트리형 데스크탑 로봇을 구동하기 위해, 리니어 모터에 최적화된 서보 드라이버를 사용한다(JTD02)

동기 제어란 독립된 두개의 축을 하나의 축처럼 동기를 맞추어 제어하는 것을 말한다. X-Y 갠트리 시스템에서는 Y1 축과 Y2 축이 트윈 서보를 구성하고, 여기에 상부축인 X 축이 고정되어 있는 구조를 가진다. 따라서 X 축은 독립적으로 움직일 수 있지만, Y1 과 Y2 축의 경우에는 서로 종속되어 있다. 이 경우 Y1 축과 Y2 의 동기문제는 전체 제어 성능을 가늠하는 핵심요소가 된다.

갠트리는 두개의 리니어 모터에 의해 구동을 하기 때문에 흔히 트윈 서보'라고 불린다. 갠트리의 트윈 서보를 구성하는 두 모터는 각각 마스터(master) 모터와 슬레이브(slave) 모터로 정의할 수 있는데, 마스터 모터는 동기제어에 있어서 위치의 기준이 되는 모터를 말한다. 데스크탑 로봇에서는 Y1 축이 마스터 모터, Y2 축이 슬레이브 모터가 되

고(Fig. 2 참조), 갠트리의 구동 방식은 마스터 모터와 슬레이브 모터의 구동방식의 차이에 의해 3 가지 방식을 제안하였다(Table 2 참조).

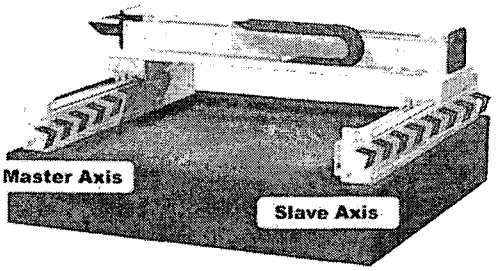

Fig. 2 Master, slave motors for gantry robot

Table 2 Synchronization mode of the lower axis

	single servo	integrated servo	twin servo
master axis	linear motor + servo driver	linear motor + servo driver	linear motor + servo driver
slave axis	idle	linear motor	linear motor + servo driver

2.3 평면위치 보정

스테이지를 구성하는 각 축 모터들에 대한 단축 위치 보정만으로는 X-Y 평면상에서 원하는 위치 정확도를 얻을 수 없으므로, 가공 평면 전체에 대한 평면 위치 보정이 필요하다. 본 연구에서는 단축 모터에 대한 위치 보정 기술을 바탕으로, 정밀 스테이지의 위치 제어에 적합한 위치 보정 알고리즘을 개발하였다.

갠트리 시스템에서는 각 축별로 거리 보정이 되어 있어도, Y1, Y2 축과 상부의 X 축이 기구적으로 간섭하는 구조이기 때문에 Y1, Y2 옵셋에 의한 X 축의 비틀림 등의 원인으로 추가적인 보정이 필요하다. 즉, 작업 평면의 각 격자점에 대하여 X 축 및 Y 축 방향의 보상 값을 테이블로 만들어서 위치 제어 시에 보상 값을 적용해야 한다

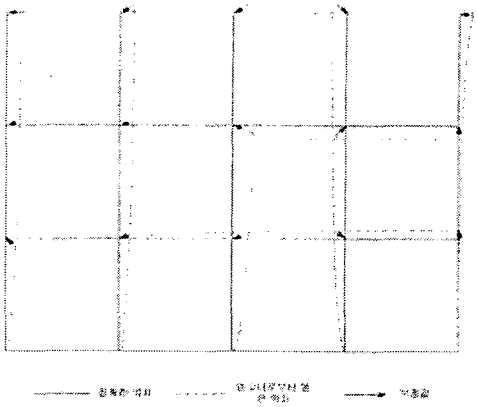

Fig. 3 Concept of position interpolation of plane

격자보정 방법은 X, Y 축 상의 기준점들을 기준으로 축별 각 격자점에서의 위치 보정 값을 모두 구한 뒤, 축별 요(yaw)보정을 한 후에 직각도를 적용하여 전체 평면에서의 보정테이블을 생성하는 방법이다. 보정테이블은 XY 평면상의 각 격자점에서의 X 축 방향 보정값과 Y 축 방향보정값을 나타내는 2 개의 테이블로 구성된다. 보정테이블의 격자에 해당되지 않는 위치의 보정값은 보간기법(interpolation)에 의해 근사값을 구하여 적용한다. 위치 보정값의 보간은 3 가지 알고리즘중 하나를 택하여 수행할 수 있으며, 각각의 알고리즘은 선형보간법, 가중평균법, 스플라인 보간법을 사용한다.

① 선형보간 알고리즘: 구하고자 하는 위치 주변 4 점의 보정값들을 선형 보간하여 보정값을 얻는다.

② 가중평균 알고리즘: 주변 9 격자점들의 보정값을 거리에 따른 가중평균을 하여 구한다. 선형보간법과는 달리 격자점에서 보정값이 원래 테이블상의 값과 비슷한 부드러운 곡면을 얻을 수 있다.

③ 스플라인(spline)알고리즘: 주변 9 격자점들의 보정값은 목표 위치까지의 거리에 따라 스플라인 함수와 같은 형태로 된다. 스플라인 함수를 썼을 경우 2 차 미분이 연속이 되는 부드러운 보정값을 얻을 수 있다.

3 성능 평가

개발된 갠트리형 데스크탑 로봇의 성능을 테스트하기 위하여 실험 시스템을 구성하여 3 가지 동기제어 방식에 대한 성능을 비교하였고 자체적으로 데스크탑 로봇의 속도, 가속도, 위치 정확도, 반복

정밀도를 측정하는 실험을 수행하였다. 시스템 구성개념은 다음과 같다.

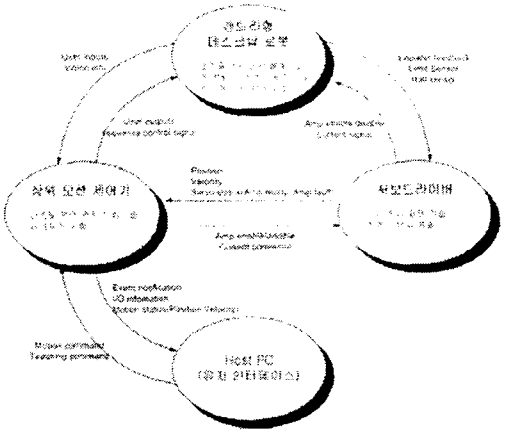

Fig. 4 System configuration

3.1 동기제어성능 평가

갠트리의 아래축을 이루는 Y1 모터와 Y2 모터의 구동방식에 따라 2.2 절에서 언급한 3 가지 형태로 구분 적용하여 실험 비교하였다. 실험 결과, 트윈 서보 구동방식에서 Y1 축과 Y2 축의 비틀림이 가장 작았다. 단일서보(single servo) 구동의 경우, 가·감속 구간에서 40 ㎛ 정도의 비틀림을 보였으며, 정속 구간에서도 15 ㎛ 발생했다. 또한, Y1 축만 구동함으로써 Y2 축에 대해 가속도 전치보상이 불가능하므로, 가속구간에서는 30pulse 정도 뒤쳐지고, 감속구간에서는 반대로 30pulse 정도 앞서는 오버슈트 현상이 발생하였다.(Fig. 5 참조)

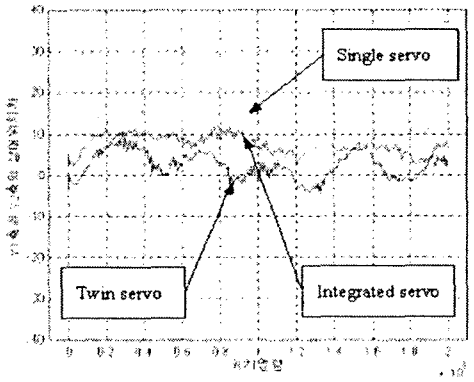

Fig. 5 Performance comparision according to driving methods

3.2 최대속도

최대속도를 평가하기 위하여 주기적으로 반복되는 위치 명령을 주고 서보 드라이버로부터 위치 데이터를 받아서 최대 속도를 측정하였다. 그래프에서 최대 속도는 1.67 ㎧로, 개발 목표인 1.5 ㎧를 초과하였다.(Fig. 6 참조)

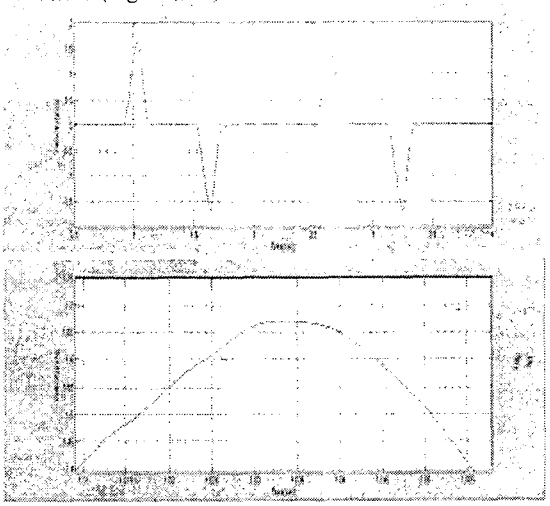

Fig. 6 Graph of velocity(upper) and magnified(lower)

3.2 최대가속도

최대가속도를 평가하기 위하여 주기적으로 반복되는 위치 명령을 주고 서보 드라이버로부터 위치 데이터를 받아서 수치 미분을 통해 최대 가속도를 계산하였다. 그래프에서 최대 가속도는 약 2.2g 로, 최종 개발 목표인 1g 를 초과하였다. (Fig. 7 참조)

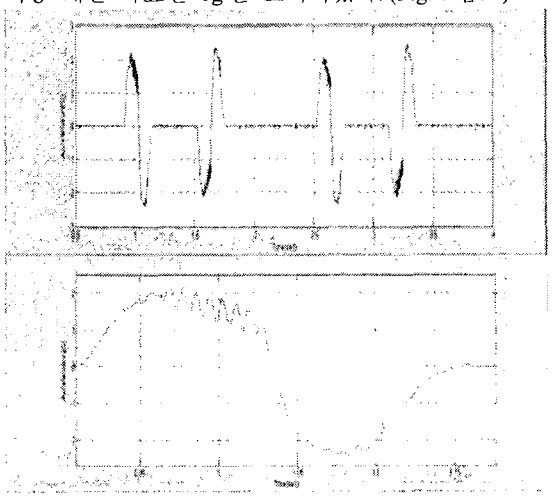

Fig. 7 Graph of acceleration(upper) and magnified(lower)

3.3 위치정확도

위치 정확도를 평가하기 위하여 레이저 간섭계를 이용하여 위치를 측정하였다. Fig. 8 과 9 는 레이저 간섭계를 이용하여 전체 이동거리에 걸쳐 일정 간격으로 모터를 이동했을 때 각각의 위치에서의 위치오차를 기록한 그래프이다. 5 회 반복하여 측정하였을 때 모든 오차가 보정 전에는 10 ㎛ 이지만, 위치 보정을 수행한 뒤에는 4.5 ㎛ 범위 내에 분포함을 알 수 있다.

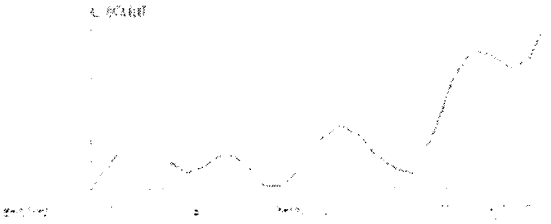

Fig. 8 Position error measured using laser interferometer (before position compensation)

Fig. 9 Position error measured using laser interferometer (after position compensation)

4. 결론

기존의 데스크탑 로봇에 비해 공간을 더 적게 차지하며 성능이 우수한 새로운 형태의 갠트리 데스크탑 로봇을 개발하였다. 이를 위해 적합한 리니어모터를 개발하였고, 3 가지 동기제어방식을 제안하여 개개의 성능을 평가 비교하여 용도에 따라 선택적으로 적용할 수 있도록 하였다. 또 평면에서의 위치결정이 중요한 응용분야에 대응하기 위해 평면 위치 보정, 보간 알고리즘을 개발하여 적용할 수 있도록 하였다.

후 기

본 연구는 중소기업청에서 시행한 기술혁신개발사업의 지원하에 수행되었음.

참고문헌

1. Alexander H. Slocum, 밟recision Machine Design? Prentice-Hall, 1992
2. International standard ISO 230-2, second edition 1997