

전자기 구동장치를 이용한 병렬형 6 자유도 스테이지의 위치제어

이세한[#]

A Position Control for a Parallel Stage with 6 degrees of freedom Using Magnetic Actuators

Se-Han Lee[#]

ABSTRACT

In this paper, we address a position control for a parallel stage, which is levitated and driven by electric magnetic force. This consists of a levitating object (called platen) with 4 permanent magnetic linear synchronous motors in parallel. Each motor generates vertical force for suspension against gravity and propulsion force horizontally as well. This stage can generate six degrees of freedom motion by the vertical and horizontal force. A dynamic equation of the stage system is derived based on Newton-Euler method and it's special Jacobian matrix describing a relation between the limited velocity and Cartesian velocity is done. There are proposed two control methods for positioning which are Cartesian space controller and Actuator space controller. The control performance of the Cartesian space controller is better than the Actuator space controller in task space trajectory while the Actuator space controller is simpler than the Cartesian space controller in controller realization.

Key Words : Magnetic levitation(자기부상), Position control(위치제어), Cartesian space control(직교공간 제어), Actuator(Joint) space control(관절공간 제어)

1. 서론

최근, 산업기술의 발달함에 따라서 집적도와 정밀도가 향상된 제품의 생산에 발맞추어 초정밀 위치 결정기구의 개발 요구가 증대되고 있다. 이러한 초정밀 위치 결정 기구는 일반적인 초정밀 가공작업(Ultra precision machining), 광기구의 정밀한 정렬 작업 및 고밀도 반도체 생산라인에 투입되는

스테퍼용 스테이지 등에서 응용될 수 있다. 특히, 서브 마이크로미터 정도의 정밀도를 갖는 위치결정 기구는 NT(Nano Technology)의 핵심 요소기술로서 많은 분야에 걸쳐 다양한 파급 효과를 기대할 수 가 있다. 본 연구에서는 향후 반도체 제조용 스테퍼 및 비구면 렌즈 가공기 플랫폼에 적용 가능한 초정밀 위치 결정 기구를 구성하여 그에 유효한 위치 제어기법을 제안 하고자 한다.

접수일: 2004 년 12 월 6 일; 게재 승인일: 2005 년 4 월 15 일

교신저자: 경남대학교 기계자동화공학부

E-mail leesehan@kyungnam.ac.kr Tel. (055) 249-2149

초정밀 위치 결정 기구의 구동방식으로는 크게 피에조 액츄에이터를 이용한 방식과 리니어 모터 및 공기 베어링을 적용한 방식들이 사용되고 있다. 이들 방식들은 가동 범위의 제한, 복잡한 구조, 분진 발생 등, 각각 단점들이 존재하는데, 이러한 단점을 보완할 수 있는 방식으로서 비접촉 자기 부상 방식에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 자기 부상 방식의 장점으로는 시스템의 구성에 따라 구동 변위의 범위 조절이 가능하고 자기력을 이용한 비접촉식 구조를 채용하고 있으므로 제어 성능을 감소시키는 기계적인 마찰력의 영향이 없으며, 구동력 전달을 위한 매개 구조물이 없으므로 기구학적 구조가 매우 간단해서 동역학적 거동이 간단해지는 장점이 있다.

이러한 자기 부상 스테이지와 관련된 연구로서 Tusda 등은 5 자유도를 갖는 자기 부상 시스템을 구성하여 1 마이크로미터급의 정밀도를 달성하고 있다.¹ Busch 는 반도체 장비의 검사용 프루브에 적용하기 위한 2 자유도의 위치결정기구를 개발하였다.⁷ Kim 은 6 자유도를 가지는 선형 동기 모터를 구동 장치로 채용한 자기부상 스테이지를 개발하여 서브 마이크로미터의 정밀도를 실현 하였다.^{4,8}

본 연구에서는 Kim⁸이 제안한 방식의 선형 동기 모터 형태의 자기 부상 구동 장치를 채용한 자기 부상형 위치 결정 기구 시스템을 설계 제작하여 위치 결정 제어기 후보를 제시하고 각각의 특징 확인 실험을 수행하였다.

2 장에서는 자기부상 스테이지의 구조를 소개하고 해당 운동방정식을 구하고 제어기 구성에 중요한 자코비안 행렬을 유도, 그리고 운동방정식의 특징을 기술하였다. 3 장에서는 일반적으로 적용될 수 있는 2 가지 구체적인 제어기법 후보를 보이고 각각의 특징을 기술하였다. 4 장에서는 해석적으로 기술한 제어기의 특성 결과를 실험을 통해서 그 유효성을 확인하였다.

2. 자기부상 스테이지

본 연구에서 제작한 스테이지 구동 시스템의 운동방정식을 유도하기 위해서 여러 가지 방법이 사용될 수 있는데, 본 연구에서는 Newton-Euler 방식을 사용하여 직교좌표 공간에서 유도한 다음에, 그 특성을 살펴보았다. Newton-Euler 방식을 사용한 이유는 전형적인 고전역학 지식을 사용하므로 힘 관

계가 용이하게 가시화될 수 있기 때문이다.

2.1 운동방정식 유도

본 연구에서 사용한 자기부상 스테이지 시스템은 이동할 수 있는 부상체(Platen)와 각각 2 자유도로 움직일 수 있는 4 개의 구동장치들이 병렬로 연결된 형태로 구성되어 있다. 자기부상 스테이지를 기술하는 데 필요한 좌표와 여러 가지 기구학적 벡터들을 Fig. 1 에 나타내었다. 구동장치는 부상체에 부착된 영구자석과 고정자에 부착된 구동 권선이 짝을 이루는 선형 동기모터 형태를 갖고 있다. 부상체에 대한 구동력으로는 병렬로 배치된 비접촉 방식의 자기력 구동장치를 채용하고 있으므로 6 자유도 스튜어트 플랫폼 같은 전형적인 병렬형 기구의 구동방식과는 달리 구동장치 자체의 기구적인 동역학은 존재하지 않는다. 이러한 특징은 전체 운동방정식 기술에 장점이 될 수 있다.

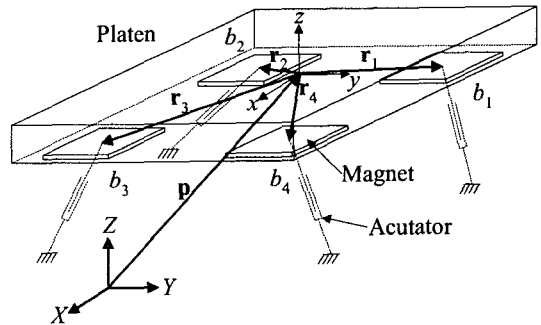


Fig. 1 Magnetic levitating stage system using multi linear synchronous motors

구동력은 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 각 선형 동기모터의 고정자에 해당하는 구동 권선에 입력되는 3 상 전류에 의해서 생성된 자계와 부상체에 부착된 영구자석의 상호작용에 의해서 형성된 부상력과 추력으로 구성된다. 선형 동기모터의 역할은 구동권선에 입력되는 3 상 전류의 제어를 통해서 부상체 영구자석의 b_i 위치에 대하여 수직방향 및 수평방향의 2 자유도 구동력을 발생시키는 것이다. 이 때, 주의할 점은 사용된 선형 동기모터는 4 개 모두 수직방향에 대해서 구동력을 발생시키는 반면에 수평방향에 대해서는 구동권선의 배치에 따라서 f_x 혹은 f_y 방향의 힘만 발생할 수 있

다. 또한, 부상체와 구동권선 사이에 기구적인 구속이 없으므로 구동권선으로부터 부상체에 작용하는 힘 f_i 의 크기는 부상체의 미소한 기울어짐을 무시하면 부상체와 구동권선의 상대 위치에 의존하지 않는다.

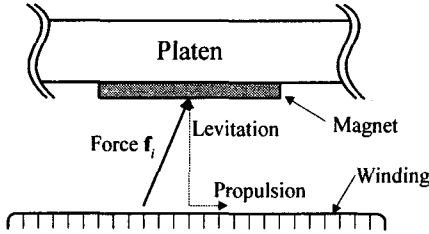


Fig. 2 Driving force on the platen by linear synchronous motor

Newton-Euler 방식을 이용한 운동방정식 유도는 대상 물체의 병진운동에 대해서는 Newton 방정식을, 회전운동에 대해서는 Euler 방정식을 적용한다. 이 때, 부상체를 강체(Rigid body)로 가정한다. 강체의 운동은 무게중심에 대해서 병진운동과 회전운동으로 분리하여 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$m_p \ddot{\mathbf{x}} + m_p \mathbf{g} = \sum_{i=1}^4 \mathbf{f}_i \quad (1a)$$

$$\mathbf{I}_c \dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I}_c \boldsymbol{\omega}) = \sum_{i=1}^4 \mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_i \quad (1b)$$

(1)에서 사용된 변수는 특별한 언급이 없는 경우 모두 관성 좌표계 기준으로 기술되었다. (1)은 다음과 같이 행렬과 벡터를 이용하여 간단히 기술될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_p \mathbf{E} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_c \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} m_p \mathbf{g} \\ \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I}_c \boldsymbol{\omega}) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum \mathbf{f}_i \\ \sum \mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_i \end{Bmatrix} \quad (2)$$

이 때, 중력은 분포력이므로 모멘트 평형식인 Euler 방정식에 영향을 미치지 않는다. m_p 는 부상체의 질량을, \mathbf{g} 는 중력 가속도를, \mathbf{E} 는 단위행렬을, \mathbf{I}_c 는 질량중심에서의 회전관성을, $\ddot{\mathbf{x}}, \dot{\boldsymbol{\omega}}$ 는 각각 부상체의 선가속도 및 각속도를, \mathbf{r}_i 는 질량중심에서의 영구자석의 중심위치 벡터를, \mathbf{f}_i 는 각 모터의

발생력을 나타내며, 모든 모터는 수직방향 힘 성분을 갖지만, 모터의 순서 i 에 따라서 수평방향에 대해서는 x 방향 혹은 y 방향만의 성분만 갖는다.

2.2 자코비안 행렬

제어기 구성에 핵심이 되는 자코비안 행렬을 유도해 보자. 먼저, 부상체의 중심에서 각 영구자석의 중심까지의 거리를 \mathbf{r}_i 라고 하자. 각 영구자석의 중심의 속도를 $\dot{\mathbf{q}}_i$ 라고 할 때, 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\dot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{v}_p + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i = \mathbf{v}_p - \mathbf{r}_i \times \boldsymbol{\omega} \quad (3)$$

속도벡터 $\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{v}_p^T \ \boldsymbol{\omega}^T]^T$ 를 사용하여 다음과 같이 간단히 기술할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{q}}_i = [\mathbf{E} \ -\tilde{\mathbf{r}}_i] \dot{\mathbf{x}} \quad (4)$$

이 때, 행렬 $\tilde{\mathbf{r}}_i$ 는 벡터들 사이의 외적 연산을 다음과 같이 행렬과 벡터의 곱 연산으로 변환하는 역할을 한다.

$$\begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -r_3 & r_2 \\ r_3 & 0 & -r_1 \\ -r_2 & r_1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{Bmatrix} = \tilde{\mathbf{r}} \cdot \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{Bmatrix}$$

\mathbf{E} 는 적절한 차수의 단위행렬을 나타낸다. 또, 주의할 점은 식 (4)에서 계산된 속도 벡터 $\dot{\mathbf{q}}_i$ 는 수정되어야 한다는 것이다. 자기부상을 이용한 구동장치의 경우 기구적인 구속이 없으므로 Fig. 2에서의 구동권선에서 부상체에 작용하는 구동력 \mathbf{f}_i 방향에 해당하는 속도를 추출해서 사용해야 한다. 그러므로 (4)는 다음과 같이 수정되어야 한다.

$$\dot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{c}_i \dot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{c}_i [\mathbf{E} \ -\tilde{\mathbf{r}}_i] \dot{\mathbf{x}} \quad (5)$$

식 (5)에서 새롭게 추가된 \mathbf{c}_i 는 해당 구동력의 작용방향에 대하여 나란한 속도 성분을 추출하는 역할을 하며 다음과 같은 상수 행렬이다.

$$\mathbf{c}_1 = \mathbf{c}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{c}_2 = \mathbf{c}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (5)의 맨 우측에 새롭게 생성된 계수행렬을 자코비안 행렬로 다음과 같이 정의하자.

$$J_i = [c_i \quad -c_i \tilde{r}_i] \quad (7)$$

식 (7)을 이용하면 전형적인 병렬형 기구의 자코비안 행렬에 해당하는 관계식과 동일한 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{q} = J\dot{x} \quad (8)$$

식 (8)의 관계를 이용하면 직교 좌표계의 힘 F 와 구동장치의 작용힘 τ 의 관계를 다음과 같이 기술 할 수 있다.

$$F = J^T \tau \quad (9)$$

다시, 앞에서 기술한 직교 좌표계 기준의 운동방정식인 식 (2)의 우변을 구체적으로 기술해 보자

$$\sum f_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot [f_{1x} \ f_{1z} \ f_{2y} \ f_{2z} \ f_{3x} \ f_{3z} \ f_{4y} \ f_{4z}]^T \quad (10a)$$

$$= [c_1^T \ c_2^T \ c_3^T \ c_4^T] \cdot \tau$$

$$\sum r_i \times f_i = [\tilde{r}_1 c_1^T \ \tilde{r}_2 c_2^T \ \tilde{r}_3 c_3^T \ \tilde{r}_4 c_4^T] \cdot \tau \quad (10b)$$

이 때, 각 선형 동기모터에서 발생된 힘을 간단히 $\tau = [f_{1x} \ f_{1z} \ f_{2y} \ f_{2z} \ f_{3x} \ f_{3z} \ f_{4y} \ f_{4z}]^T$ 로 간단히 벡터로 나타내었다.

식 (10a, b)를 간단히 정리하여 벡터 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$F = \begin{bmatrix} \sum f_i \\ \sum r_i \times f_i \end{bmatrix} \quad (10c)$$

$$= \begin{bmatrix} c_1^T & c_2^T & c_3^T & c_4^T \\ \tilde{r}_1 c_1^T & \tilde{r}_2 c_2^T & \tilde{r}_3 c_3^T & \tilde{r}_4 c_4^T \end{bmatrix} \cdot \tau$$

먼저, 식 (5)에 소개된 c_i 를 이용하여 자세히 기술한 구체적인 자코비안 행렬을 표시하면 다음과 같이 간단히 벡터 형태로 정리할 수 있다.

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 \tilde{r}_1 \\ c_2 & -c_2 \tilde{r}_2 \\ c_3 & -c_3 \tilde{r}_3 \\ c_4 & -c_4 \tilde{r}_4 \end{bmatrix} \cdot \dot{x} = J \cdot \dot{x} \quad (11)$$

식 (10c) 과 (11)을 비교해 보면 $F = J^T \tau$ 를 알 수 있다. 즉, 자코비안 행렬이 유도과정에 있어서 적절한 가정이 도입되었음을 의미한다. 이 때, 자코비안 유도과정에서 \tilde{r}_i 은 왜대칭 행렬(skew-symmetric matrix)이므로 $\tilde{r}_i^T = -\tilde{r}_i$ 관계가 있으며, c_i 행렬이 상수 행렬임에 유의하자.

2.3 운동방정식의 특징

앞에서 기술한 식 (2)로 표시되는 부상 스테이지의 운동방정식은 다음과 같은 특징을 갖는다. 자기부상 스테이지 시스템은 병렬형 기구의 운동방정식^{9,10} 을 복잡하게 만드는 요소인 구동장치의 관성이 존재하지 않으므로 그에 따른 복잡한 비선형항이 존재하지 않게 된다. 관성행렬 부분에서 선가속도 \ddot{x} 와 각가속도 $\ddot{\omega}$ 에 해당하는 부분이 서로 독립인 관계가 있을 뿐만 아니라 비선형항 부분의 경우도 완전히 독립인 관계에 있으며, 계산과정의 복잡함은 부상체의 자세각도에 주로 의존함을 알 수 있다. 자기부상 스테이지의 부상체의 최대 자세각도 범위에 대하여 특이값을 이용한 회전관성 행렬의 크기 변화 계산 결과를 다음 Fig. 3 에 나타내었다. 계산 결과에 의하면 자세각도가 $\pm 5^\circ$ 범위에 있으면, 회전관성의 최대 특이값의 변화는 최대 약 10%정도의 변화를 보이고 있음을 알 수 있다. 실제로 부상체가 1도 미만의 자세 각도로 움직이는 특성을 감안할 경우 특이값의 변화는 거의 무시할 수 있다.

한편, 부상체는 위치 3 자유도 방위 3 자유도로 총 6 자유도의 운동을 할 수 있다. 위치 변수의 경우 일반적인 직교 좌표계를 사용하여 부상체의 무게 중심 위치를 $p = \{x \ y \ z\}^T$ 로 나타낼 수 있으며, 벡터의 특성을 가지므로 간단히 방정식 기술에 사용할 수 있다. 그렇지만, 자세각도를 기술하는데 각도 변수 $\{\alpha \ \beta \ \gamma\}^T$ 를 사용한다.

회전 각도 기술에는 여러 가지 방법이 존재하지만, Euler 각도법을 사용한다. 먼저, x 축 방향에 대하여 α , y' 축 방향에 대해서 β , 마지막으로 z'' 축 방향에 대해서 γ 회전으로 정의한다. 회전각도는

벡터 특성을 갖지 않으므로 각도 기술에 주의하여 사용해야 한다. 즉, 회전 동작을 적용하는 순서에 영향을 받게 된다.

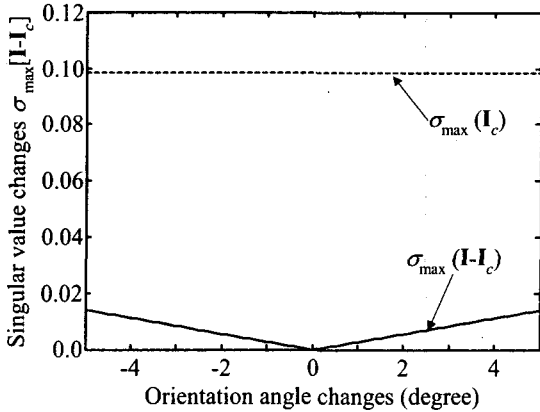


Fig. 3 Maximum singular value changes of I and $\Delta I = I - I_c$ of the platen with respect to orientation angles

3. 제어기 구성

자기부상 스테이지 시스템은 4 개의 선형 동기모터를 이용하여 부상과 추진을 동시에 실현하여 부상체의 6 자유도 제어를 실현하고 있다. 각 선형 동기모터는 2 개의 수직 및 수평방향에 대하여 구동력을 발생시킬 수 있는 2 자유도 구동장치이다. 그러므로 전체적으로 8 개의 자유도를 갖고 있다.

스테이지 시스템의 구조는 병렬형 기구의 구조와 매우 유사하다. 복수개의 구동장치가 말단장치에 병렬로 연결된 형태를 지니고 있다. 그러므로 제어기 구성에 필요한 운동방정식을 직교 좌표계 기준으로 구하는 것이 용이하다고 알려져 있다.² 뿐만 아니라 제어 목표값이 주로 직교 좌표계를 기준으로 주어지는 환경을 고려해 보면 직교 좌표계를 기준으로 운동방정식을 유도하는 것이 유리할 수 있다.

직교 좌표계 기준으로 제어기를 구성하더라도 최종적으로 구동장치에 제어입력을 출력하기 위해서는 제어입력을 구동장치 공간 입력으로 변환해야 한다. 제어기를 구성하는데 있어서 다음과 같이 2 가지 방법을 직관적으로 생각할 수 있다.³

3.1 구동장치 공간 제어기

직교 좌표계 공간에서 구성한 오차 Δx 를 변환블록 $\Delta x \rightarrow \Delta q$ 를 이용하여 구동장치 공간의 오차인 Δq 로 변환하여 구동장치 공간상에서 제어기 C_q 를 구성한 경우를 Fig. 4(a)에 나타내었다.

직교 좌표계 공간의 오차는 자코비안 행렬의 곱을 사용하여 다음과 같이 구동장치 공간의 오차로 변환될 수 있다.

$$\Delta q \approx J \Delta x \quad (12)$$

구해진 구동장치 공간의 오차 Δq 는 다음과 같이 전형적인 PID(Proportional Integral Derivative)제어기를 구성할 수 있다.

$$\tau = K_P \Delta q + K_I \int \Delta q dt + K_D \Delta \dot{q} \quad (13)$$

이 때, K_P, K_I, K_D 는 각각 비례, 적분, 미분 이득에 해당하는 실수 대각행렬을 나타낸다. 계산된 제어입력 τ 은 구동장치에 직접 입력될 수 있다.

앞에서 구성된 PID 제어기를 Figure 4(a)에 구현했을 때, 다음과 같은 페루프 전달함수 행렬 $G_1(s)$ 을 얻을 수 있다. 이 때, 비선형 운동방정식의 전달함수 $P(s)$ 를 구할 수 있다고 가정한다.

$$G_1(s) = [E + P(s)C_q(s)JT]^{-1} P(s)C_q(s)J \\ = [E + P(s)C(s)T]^{-1} P(s)C(s) \quad (14)$$

이 때, T 는 부상체 주변에 부착된 센서의 신호를 직교 좌표계 값으로의 변환하는 오퍼레이터를 나타내며, 실제 부상체가 제어되는 동안에는 부상체의 회전각도는 매우 작으므로 자코비안 행렬 J 는 그 변화를 무시할 수 있으므로 상수 행렬로 취급될 수 있다.

3.2 직교 좌표계 제어기

다른 방법으로, 주어진 직교 좌표계에서 구성한 오차 Δx 를 이용하여 직교 좌표계 공간상에서 제어기 C_x 를 구성하고 그 제어입력을 변환블록 $F \rightarrow \tau$ 을 이용하여 구동장치 발생력으로 변환한다.

직교 좌표계 공간에서 구성된 오차 Δx 를 이용

다음과 같이 PID 제어를 구성할 수 있다.

$$F = K_P \Delta q + K_I \int \Delta q dt + K_D \Delta \dot{q} \quad (15)$$

구성된 제어기는 전술한 구동장치 공간의 제어기 (13)과 매우 유사하다. 앞에서 구성된 PID 제어기를 Figure 4(b)에 구현했을 때, 다음과 같은 페루프 전달함수 행렬 $G_2(s)$ 을 얻을 수 있다.

$$G_2(s) = [E + P(s)J^{-T}C_X(s)T]^{-1}P(s)J^{-T}C_X(s) \\ = [E + P(s)C(s)T]^{-1}P(s)C(s) \quad (16)$$

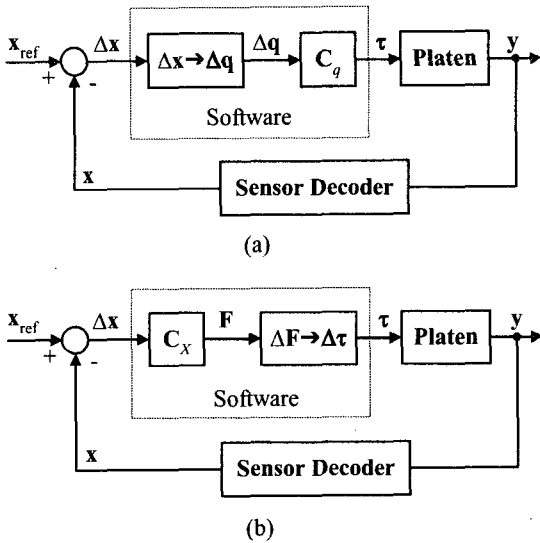


Fig. 4 A controller structure based on Actuator space(a), Cartesian coordinate space(b)

식 (14)와 (16)을 비교해 보면, 각 경우에 해당하는 제어기 부분들은 각각 $C_q J$ 와 $J^{-T} C_X$ 임을 알 수 있다. 이들 제어기 부분들은 다음과 같이 등가시켰을 때, C_q 와 C_X 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$J^T C_q(s) J = C_X(s) \quad (17)$$

식 (17)은 직교 좌표계 공간의 제어기는 구동장치 공간의 제어기의 좌우에 자코비안 행렬들을 곱한 것과 등가임을 알 수 있다. 그러므로 어떤 제어기를 선택해서 사용하더라도 식 (17)에 의하여 동

일한 결과를 얻을 수 있는 것이 가능함을 알 수 있다. 제어 성능은 제어기의 종류에 무관하므로 제어기 종류의 선정에 계산의 복잡성, 실현의 용이성 등 다른 인자들을 고려할 필요가 있다. 또한, 각각 경우의 제어기에 해당하는 $C_q J$ 와 $J^{-T} C_X$ 를 살펴보면 자코비안 행렬 J 와 전치 역행렬 J^{-T} 에 의하여 제어대상의 형상 변화에 따라서 두 경우 모두 그 제어이득이 변화되는 특성을 갖고 있다. 그러므로 궁극적으로 고정된 이득을 가질 수 없는 점이 공통점이다.

4. 실험 결과 및 토론

본 연구에서는 4 개의 선형 동기모터와 영구자석형 부상체로 구성된 자기부상 스테이지를 제작하였다. 제작된 자기부상 스테이지를 Fig. 5에 나타내었다.

4.1 실험 장치

자기부상 스테이지의 부상체의 가동범위는 $50mm \times 50mm$ 이며, 부상체의 평면 x - y 변위 및 z 축 방향에 대한 회전각도 검출에는 $0.3nm$ 정밀도의 레이저 간섭계 (Agilent 10898B) 3 채널을 사용하였으며, z 변위 및 x 축, y 축의 회전각도 검출에는 3 개의 정전 용량형 검출기를 사용하였다. 선형 동기모터 구동용 드라이버는 전기적 잡음이 발생할 수 있는 일반적인 PWM(Pulse width modulation)형 앰프를 사용하지 않고 제어 정밀도 향상을 위하여 선형앰프를 사용하였다.

제어기는 두 부분으로 나누어져 있다. PC를 사용하는 상위 제어기는 실험장치의 전반적인 동작을 제어하고 그 결과를 분석하는데 사용되며 고속 샘플링을 실현하기 위해서 4 개의 TMS6701을 병렬로 연결한 하위 DSP 제어기는 부상체의 기구학 계산 및 부상체 동작제어 알고리즘을 연산을 담당한다. A/D 변환기, D/A 변환기 등 주변 장치들은 VME bus를 이용하여 DSP 제어기와 연결되어 있다.

4.2 구동장치 공간의 PID 제어기

그림 4.(a)와 같은 제어기 구조에 대하여 식 (13)과 같은 제어기를 구성하였다. 이 때, 목표값으로 주어지는 x_{ref} 는 구태여 직교 좌표계 공간으로 주어질 필요가 없다. 이것은 미리 q_{ref} 로 계산

되어 질 수 있다. 그러므로 그림 4.(a)의 변환블록을 위하여 실질적으로 자코비안 행렬 J 의 구성이 필요 없게 되어 효율적인 계산을 실현할 수 있는 장점이 있다.

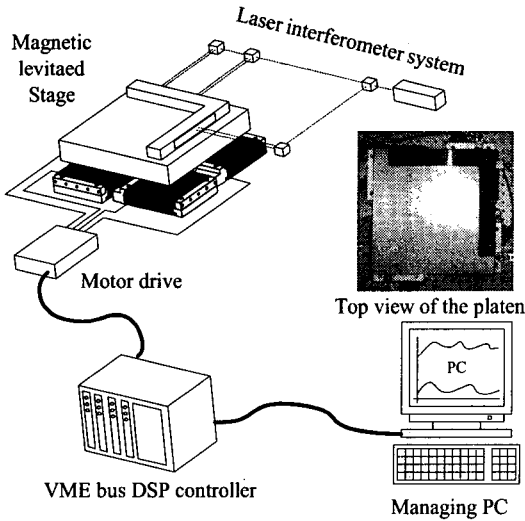


Fig. 5 Photo of the magnetic levitating stage system

4.3 직교 좌표계 공간의 PID 제어기

그림 4.(b)와 같은 제어기 구조에 대하여 식 (15)와 같은 제어기를 구성하였다. 최종적으로 구해진 제어입력 F 는 자코비안 전치 역행렬을 이용하여 구동력 τ 로 바뀌게 된다. 자코비안 행렬은 정방행렬이 아니므로 전치 역행렬을 구하기 위해서는 복잡한 유사 역행렬로 대치되어야 한다. 만일 부상체의 자세각도의 변화가 무시할 만큼 작다면 자코비안 행렬은 상수행렬로 근사 될 수 있으며, 그 유사 역행렬도 상수행렬로 근사 될 수 있다.

제어기의 추종 성능을 평가하기 위해서 한 번의 길이가 24mm 인 사각형 궤적을 목표궤적으로 사용하였다. 사각형 궤적의 경우 급격한 모서리 부분에는 저주파부터 고주파 성분까지 포함되어 있으므로 자연스럽게 주파수에 따른 추종성능을 평가할 수 있기 때문이다. 사용한 제어기의 주파수 대역을 유사하게 설정하기 위해서 먼저, 직교좌표 제어기용 이득은 각축의 과도응답에 기초하여 제어 시스템이 감쇠비 0.7 을 갖는 표준 2 차 시스템에 근사하도록 반복적인 실험을 통하여 결정하였으며, 구

동장치 공간 제어가 이득 역시 각 구동장치의 과도응답에 기초한 반복적인 실험을 통하여 결정하였다. 최종적으로 유사한 Bode 선도를 갖도록 각 제어기의 이득을 재조정하였다. Fig. 6 에 각 제어기의 Bode 선도를 나타내었다. Bode 선도를 구성하는데 필요한 데이터는 제어 입력과 출력 변위를 이용하여 실험 장치에 사용된 Lab Windows CVI 에서 제공하는 전용 함수를 이용하여 구하였다.

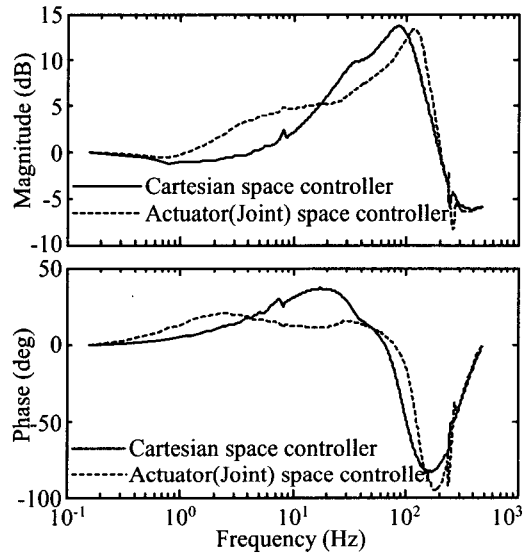


Fig. 6 Bode plot of each controller

사각형 궤적에 대하여 시간에 따른 X 축 및 Y 축의 목표궤적을 Fig. 7 에 나타내었다. 본 연구의 스테이지는 수십 nm 급의 오차를 갖는 추종 성능을 나타낸다. 스테이지가 사각형 궤적을 추종할 때, 모서리에서 발생하는 과도현상을 고찰하기 위하여, Fig. 7 에서 실선으로 표시된 X 축의 정지 상태를 나타내는 A 영역 및 X 축이 정지할 때, 점선으로 표시된 Y 축이 간섭 받는 상태를 나타내는 a 영역을 살펴보도록 한다.

사각형 모서리 영역 A 부근에서 각 제어기에 대하여 X 축에 대한 추종성능을 Fig. 8 에 나타내었다. Y 축의 추종 궤적의 과도 현상인 B 점 부근의 결과는 앞의 A 점 결과에 매우 유사하므로 생략한다.

직교 좌표계 제어기(Cartesian space controller)와 구동장치 공간 제어기(Actuator space controller) 모

두 유사하게 이득의 증가에 따라서 추종이 성능이 개선되는 특징을 보이고 있으며, 전형적인 과도 상태 추종 궤적 형태를 보이고 있다.

Y 축의 간섭량 변위 결과는 다음과 같다. 직교 좌표계 제어기의 경우 X 축 방향의 추종 궤적과 유사한 주기를 갖는 진동 곡선을 보이는 반면에, 구동장치 공간 제어기는 제어기 이득이 높은(High gain) 경우, 서로 연관성을 관찰하기 곤란하며, 이득이 낮은(Low gain) 경우, 직교 좌표계 제어기 경우와 유사한 경향을 보이고 있다.

이것은 구동장치 공간의 오차와 직교 좌표계의 오차 사이에 비선형 관계가 존재하기 때문이라고 추정된다. 즉, 직교 좌표계 제어기는 주로 직교 좌표계 형태로 주어지는 작업궤적과 동일한 공간에서 계산된 오차를 이용하는 반면에 구동장치 공간 제어기는 주어진 작업궤적 공간에서 얻어진 오차를 삼각함수 등 비선형성이 강한 역기구학을 통해서 계산된 오차를 이용할 뿐이다. 그러므로 구동장치 공간 오차에 해당하는 직교 좌표계 오차는 구동장치 공간의 오차와는 그 비선형적인 기구학 관계에 의하여 전혀 다른 형태를 가질 수 있음에 유의할 필요가 있다.

부상체가 Fig. 7의 사각형 목표궤적을 추종할 때, 각 제어기의 X 축 방향에 대한 제어입력을 Fig. 10에 나타내었다. 각각 제어기 모드 전반적으로 유사한 경향을 나타내고 있다. Fig. 8 및 Fig. 9에 해당하는 시간대의 X 축 응답 및 Y 축 간섭량을 확대한 응답을 나타내고 있다. 직교 좌표계 제어기의 경우는 부드러운 제어 입력을 보이고 있는 반면에 구동장치 공간 제어기의 제어 입력은 고주파 성분이 상대적으로 많이 포함되어 있음을 알 수 있으며, 이것은 제어 대상인 부상체를 가진 시킬 염려가 있다.

위치 제어 시스템의 목적은 주어진 목표 위치를 양호하게 추종하는 것이므로 주어진 사각형 궤적에 대한 추종 결과를 Fig. 11 과 12 에 각 제어기에 해당하는 추종결과를 나타내었다. 외형적인 오차의 크기 만으로 Fig. 11 과 Fig. 12 을 고찰해 보면, 목표 궤적에 대한 추종 성능 측면에서 구동장치 공간 제어기의 경우가 직교 좌표계 제어기의 추종 성능 보다 우수한 것으로 나타낸다. 반면에 구동장치 공간 제어기의 추종 궤적의 형태는 직교 좌표계 제어기의 그것 보다 매우 복잡함을 알 수 있다. 이것은 적절한 제어기 이득 선정을 통해서 직교 좌표

계 제어기와 구동장치 공간 제어기의 추종 오차의 크기를 유사하게 유지 할 수 있다면, 직교 좌표계 제어기의 추종 오차 궤적이 구동장치 공간 제어기의 그것 보다 원활함을 알 수 있다.

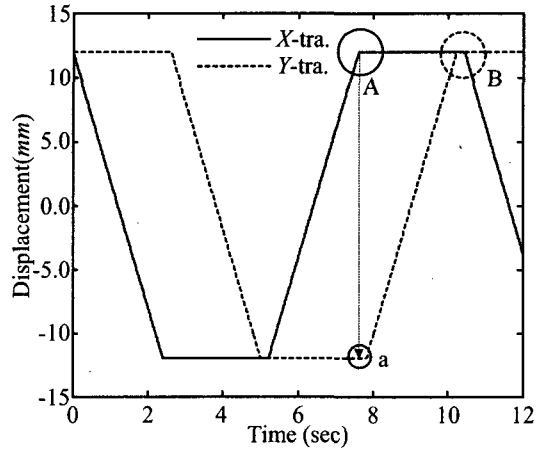


Fig. 7 Each axis trajectory corresponding to a square reference

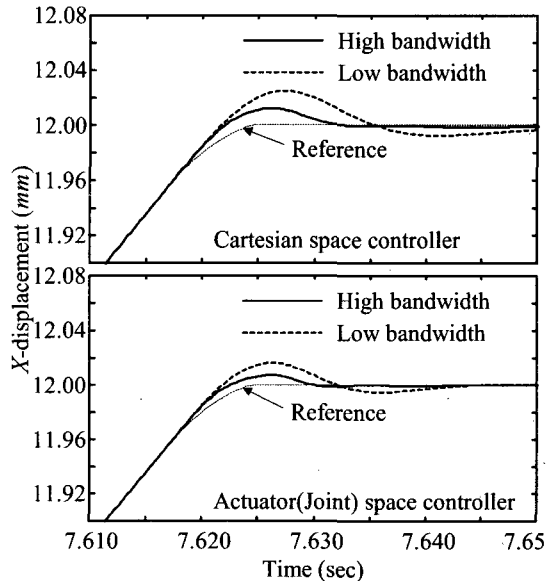


Fig. 8 Tracking performance of X-axis of each control bandwidth with respect to each controller type

5. 결론

본 연구에서는 자기부상 스테이지의 정밀한 위치제어를 위하여 해당 운동방정식을 유도하고 그 특징을 기술하였다. 자기 부상 스테이지 시스템은 비접촉 전자기 구동장치를 사용하였으므로 복잡한 구동장치 동역학이 포함하지 않으며, 병진운동 부분과 회전운동 부분이 서로 독립임을 알 수 있었다.

위치 제어기로서, 직교 좌표계 공간과 구동장치 공간 각각에 대하여 전형적인 PID 제어기를 구성하여 특성을 비교하였다. 이론적으로 2 가지 제어기는 수식적으로 등가임을 확인하고 제어 성능을 실험을 통하여 비교 하였다. 제어기 구성 측면에 있어서 구동장치 공간 제어기는 복잡한 자코비안 행렬의 유사 역행렬을 구할 필요가 없어서 실현 비용이 상대적으로 작은 반면에, 직교 좌표계 제어기는 주어진 목표 궤적 공간 측면에서 보다 부드러운 추종 성능을 보임을 알 수 있었다. 최근 제어기용 고속 프로세서를 염가로 사용할 수 있는 상황에 비추어 보면, 직교 좌표계 제어기가 유리함을 알 수 있다

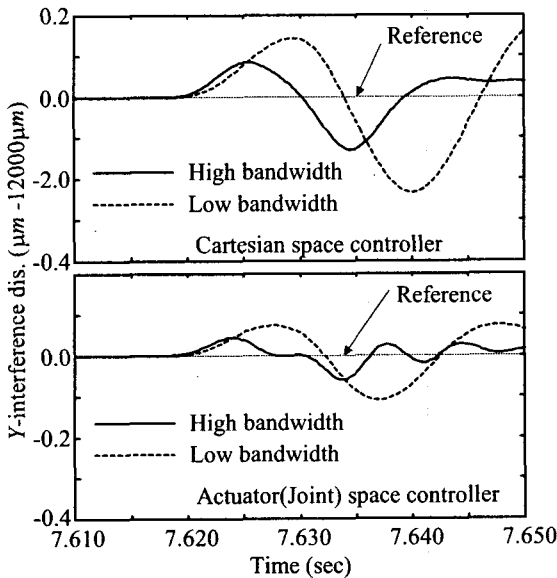


Fig. 9 Interference displacement of Y-axis of each control bandwidth with respect to each controller type

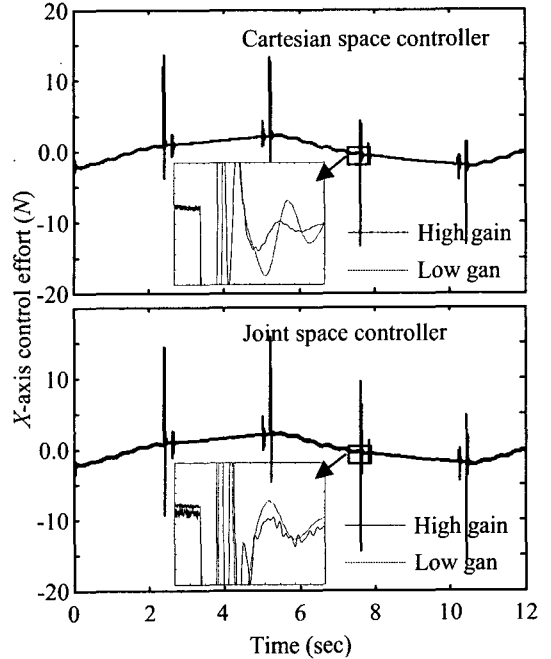


Fig. 10 Control effort of X-axis of each control gain with respect to each controller type

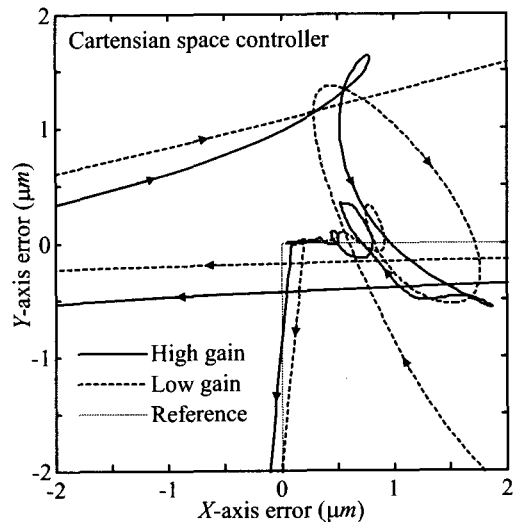


Fig. 11 Vertex tracking performance of square trajectory in case of the Cartesian space controller

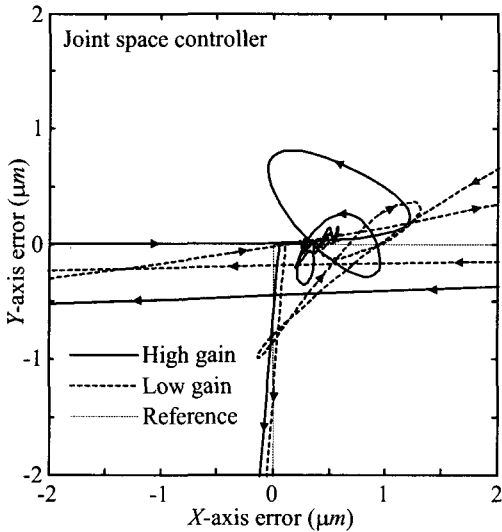


Fig. 12 Vertex tracking performance of square trajectory in case of the Actuator space controller

후 기

본 연구는 경남대학교 학술연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Murray, Richard M., Li, Zexiang, Sastry, S. Shankar , "A Mathematical Introduction to ROBOTIC MANIPULATION," CRC Press, 1994.
2. Dasgupta, Bhaskar, Mruthyunjaya, T. S., "Closed-form dynamic equations of the general Stewart platform through the Newton-Euler approach," Mechanism and Machine Theory, Vol. 33, No. 7, pp. 993-1012, 1998.
3. Craig, John J., "Introduction to Robotics Mechanics and Control," ADDISON-WESLEY, 1989.
4. Kim, W. J., "High Precision Planar Magnetic Levitation, Ph.D. Dissertation," MIT, 1997.
5. Lee, Se Han, Song, Jae Bok, Choi, Woo Chun, Hong, Dae Hie, "Position control of a Stewart platform using inverse dynamics control with approximate dynamics," Mechatronics, Pergamon, Vol. 12, pp. 605-619, 2003.
6. Tsuda, M., Higuchi, T. and Fujiwara, S., "Magnetic levitation servo for flexible assembly automation," The

- international journal of robotics research, Vol. 11, No. 4, pp.329-345, 1992.
7. Busch, I. J., "Magnetically levitated automated contact analytical probe tool," Journal of IEEE Trans. On Semiconductor Manufacturing, Vol. 8, No. 1, pp.72-78, 1995.
8. Kim, W. J., Trumper, David L., Lang, Jeffrey H., "Modeling and Vector Control of Planar Magnetic Levitator," IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 34, No. 6, Nov./Dec., pp.1254-1262, 1998.
9. Lee, Se-Han, Song, Jae-Bok, Choi, Woo-Chun, Hong, Daehie, "Position Control of a Stewart Platform Using Approximate Inverse Dynamics," Journal of Control, Automation, and Systems Engineering, Vol. 7, No. 12, pp.993-1000, 2001.
10. Kim, Jin Sung, Kim, Jongwon, "Eclipse: A New Parallel Mechanism Platform," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 7, pp.19 - 26, July 2001.