

# 자기부상을 이용한 초정밀 6 자유도 스테이지의 위치제어

이세한\*(경남대학교), 강제관(경남대학교), 김용주(한국전기연구원)

## Position Control of a Precise 6-D.O.F Stage with Magnetic Levitation

S.-H. Lee(Kyungnam University), J.-K. Kang(Kyungnam University), Y.-J Kim(KERI)

### ABSTRACT

In this paper, we address a position control scheme for a stage system, which is levitated and driven by electric magnetic actuators. 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 forces. Dynamic equations of the stage system are derived based on Newton-Euler method and its special Jacobian matrix describing a relation between the Joint velocity and platen velocity is done. There are proposed two control schemes for positioning, which are Cartesian space controller and Joint space controller. The control performance of the Cartesian space controller is better than the Joint space controller in task space trajectory while the Joint space controller is simpler than the Cartesian space controller in controller realization.

**Key Words :** 자기부상, 초정밀 위치제어, 스테퍼, Nano Technology

### 1. 서론

최근, 산업기술이 발달함에 따라서 고정밀 제품의 생산을 위하여 초정밀 메커니즘의 위치제어 기술이 요구되고 있다. 초정밀 위치제어 메커니즘은 초정밀 가공, 광학계 정렬 기구, 그리고 반도체 생산장비의 일종인 스테퍼에 응용될 수 있다. 특히, 서브-마이크로급 정밀도의 위치제어 메커니즘은 나노(Nano Technology)의 핵심일 뿐만 아니라 여러 가지 응용 분야에 열쇠가 될 수 있다.

본 연구에서는 초정밀 메커니즘의 동역학적 특징과 그에 유효한 제어 기법을 제안하고 있다. 또한, 반도체 제조용 스테퍼, 비구면 렌즈 가공의 플랫폼으로 사용될 수 있는 정도의 정밀도를 갖는 초정밀 제어용 메커니즘이 실험을 위하여 조립되었다. 초정밀 메커니즘 제어용 구동장치로서 PIEZO 혹은 볼-스크류와 선형모터 등이 사용될 수 있는데, 각각은 복잡한 구조, 제한된 행정 등의 단점을 갖고 있어서, 이러한 단점을 극복하기 위해서 많은 연구자들이 비접촉 방식인 자기부상 구동장치를 연구하였다.

자기부상 방식 시스템은 응용 분야에 적절하게 대응하여 이동 행정을 조절할 수 있으며, 자기력을 이용하므로 마모 염려가 있는 기계적인 접촉 부분이 존재하지 않는 장점을 갖고 있다. 비접촉의 구동방식을 채용하고 있으므로 구동력 전달에 필요한

연결 기구를 필요로 하지 않는다.

Tusda[1]는 5 자유도의 자기부상 장치를 이용하여 나노급의 정밀도를 달성하였으며, Busch[2]는 반도체 검사 장치용으로 2 자유도의 메커니즘을 개발하였다. 한편, Kim[3,4]은 4 개의 선형동기모터를 이용한 자기부상형 6 자유도 스테이지를 구성하고 나노급의 정밀도를 달성하였다.

본 연구에서는 Kim[4]의 연구 결과와 유사한 형태의 4 개의 모터를 이용한 메커니즘의 제어를 위한 6 자유도 자기부상 시스템에 대하여 위치제어 실험을 수행하였다.

2 장에는 동역학 방정식이 기술되어 있고, 그 특징과 자코비안 행렬이 기술되어 있다. 3 장에는 구체적으로 2 가지의 제어기 구조와 특징이 기술되어 있다. 마지막으로 5 장에 각각 제어기의 실험 결과 내용을 기술하고 있다.

### 2. 자기부상 스테이지 시스템

이 장에서는 본 연구에서 제작한 스테이지 구동 시스템의 운동방정식을 Newton-Euler 방식을 사용하여 직교좌표 공간에서 유도한 다음에, 그 특성을 살펴보기로 한다

#### 2.1 운동방정식 유도

본 연구에서 사용한 자기부상 스테이지 시스템은 이동할 수 있는 부상체(Platen)와 각각 2 자유도를

갖는 4 개의 구동장치가 병렬로 연결된 형태로 구성되어 있다. 자기부상 스테이지를 기술하는 데 필요한 좌표와 여러 가지 기구학적 벡터들을 Fig. 1에 나타내었다. 자기부상 스테이지는 비접촉 방식의 자기력 구동장치를 채용하고 있으므로 6 자유도 스튜어트 플랫폼 같은 전형적인 병렬형 기구의 구동 방식과는 달리 구동장치 자체의 기구적인 동역학을 갖지 않는다.

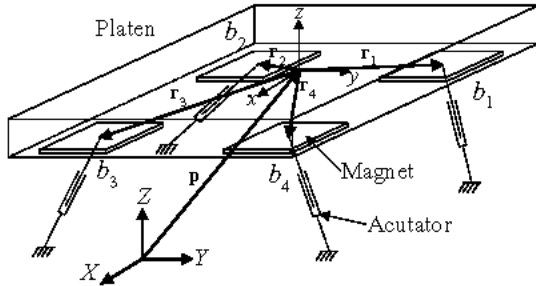


Fig. 1. Magnetic levitating stage system using multi linear synchronous motors.

구동력  $\mathbf{f}_i$ 는 Fig. 2와 같이 구동 권선에 입력되는 3 상 전류에 의해서 생성된 자계와 부상체에 부착된 영구자석의 상호작용에 의해서 형성된 부상력과 추력으로 구성된다.

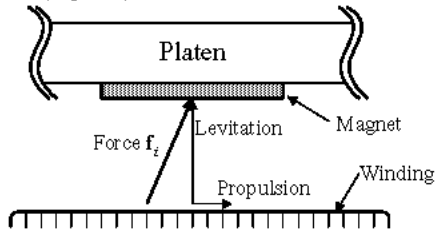


Fig. 2. Driving force on the platen by linear synchronous motor.

Newton-Euler 방식을 이용한 운동방정식은 병진 운동과 회전운동으로 분리하여 다음과 같이 행렬 형태로 기술될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_p \mathbf{E} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_p \mathbf{g} \\ \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I}_c \boldsymbol{\omega}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \mathbf{f}_i \\ \sum \mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

이 때,  $m_p$ 는 부상체의 질량,  $\mathbf{g}$ 는 중력 가속도,  $\mathbf{E}$ 는 단위행렬,  $\mathbf{I}_c$ 는 질량중심에서의 회전관성,  $\ddot{\mathbf{x}}$ ,  $\boldsymbol{\omega}$ 는 각각 부상체의 선가속도 및 각속도,  $\mathbf{r}_i$ 는 영구자석의 중심위치 벡터,  $\mathbf{f}_i$ 는 각 모터의 발생력을 나타낸다.

## 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.

$$\dot{\mathbf{q}}_i = [\mathbf{E} \quad -\tilde{\mathbf{r}}_i] \dot{\mathbf{x}} \quad (2)$$

이 때,  $\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{v}_p^T \quad \boldsymbol{\omega}^T]^T$ ,  $\tilde{\mathbf{r}}_i$ 는 벡터를 사이의 외적을 행렬과 벡터의 곱으로 변환하는 역할을 한다.  $\mathbf{E}$ 는 적절한 단위행렬을 나타낸다. 또, 주의할 점은 (2)에서 계산된 속도 벡터  $\dot{\mathbf{q}}_i$ 는 다음과 같이 수정되어야 한다.

$$\ddot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{c}_i \dot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{c}_i [\mathbf{E} \quad -\tilde{\mathbf{r}}_i] \ddot{\mathbf{x}} \quad (3)$$

(3)에서  $\mathbf{c}_i$ 는 다음과 같은 상수 행렬이다.

$$\mathbf{c}_1 = \mathbf{c}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{c}_2 = \mathbf{c}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

(3)에서 자코비안 행렬을 다음과 같이 정의하자.

$$\mathbf{J}_i = [\mathbf{c}_i \quad -\mathbf{c}_i \tilde{\mathbf{r}}_i] \quad (5)$$

(5)를 이용하면 전형적인 병렬형 기구의 자코비안 행렬에 해당하는 관계식과 동일한 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J} \dot{\mathbf{x}} \quad (6)$$

(6)의 관계를 이용하면 직교 좌표계의 힘  $\mathbf{F}$ 와 구동장치의 작용힘  $\boldsymbol{\tau}$ 의 관계를 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}^T \boldsymbol{\tau} \quad (7)$$

(5)에 소개된  $\mathbf{c}_i$ 를 이용하여 자세히 기술한 구체적인 자코비안 행렬을 표시하면 다음과 같이 간단히 벡터 형태로 정리할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1 & -\mathbf{c}_1 \tilde{\mathbf{r}}_1 \\ \mathbf{c}_2 & -\mathbf{c}_2 \tilde{\mathbf{r}}_2 \\ \mathbf{c}_3 & -\mathbf{c}_3 \tilde{\mathbf{r}}_3 \\ \mathbf{c}_4 & -\mathbf{c}_4 \tilde{\mathbf{r}}_4 \end{bmatrix} \cdot \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J} \cdot \dot{\mathbf{x}} \quad (8)$$

## 2.3 운동방정식의 특징

자기부상 스테이지는 운동방정식[9]을 복잡하게 만드는 요소인 구동장치의 관성이 존재하지 않으므로 복잡한 비선형항이 존재하지 않는다. 관성행렬에서 선가속도  $\ddot{\mathbf{x}}$ 와 각가속도  $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ 에 해당하는 부분이 서로 독립일 뿐만 아니라 비선형항의 경우도 완전히 독립인 관계에 있으며, 계산과정의 복잡함은 부상체의 자세각도에 주로 의존함을 알 수 있다.

부상체의 최대 자세각도 범위에 대하여 특이값을 이용한 회전관성 행렬의 크기 변화 계산 결과를 다음 Fig. 3에 나타내었다. 자세각도가  $\pm 5^\circ$  범위에 있으면, 회전관성의 최대 특이값의 변화는 최대 약 10%정도의 변화를 보이고 있음을 알 수 있다

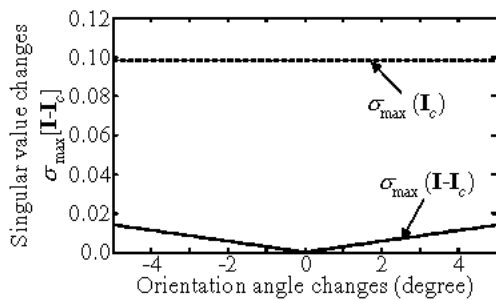


Fig. 3. Maximum singular value changes of  $\mathbf{I}$  and  $\Delta \mathbf{I} = \mathbf{I} - \mathbf{I}_c$  of the platen with respect to orientation angles.

## 3. 제어기 구성

스테이지 시스템은 복수개의 구동장치가 말단장치에 병렬로 연결된 형태를 지니고 있다. 그러므로

제어기 구성에 필요한 운동방정식을 직각 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. 직각 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

직각 좌표계 공간에서 구성한 오차  $\Delta x$  를 다음의 (9)를 사용하여  $\Delta q$  로 변환하여 구동장치 공간 제어기  $C_q$  를 구성한 경우를 Fig. 4(a)에 나타내었다.

$$\Delta q \approx J\Delta x \quad (9)$$

구해진 구동장치 공간의 오차  $\Delta q$  는 다음과 같이 전형적인 PID(Proportional Integral Derivative)제어기를 구성할 수 있다.

$$\tau = K_p\Delta q + K_I \int \Delta q dt + K_D\Delta \dot{q} \quad (10)$$

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

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

$$G_1(s) = [E + P(s)C_q(s)JT]^{-1}P(s)C_qJ \quad (11)$$

이 때,  $T$  는 부상체 주변에 부착된 센서의 신호를 직각 좌표계 값으로의 변환하는 오퍼레이터를 나타낸다.

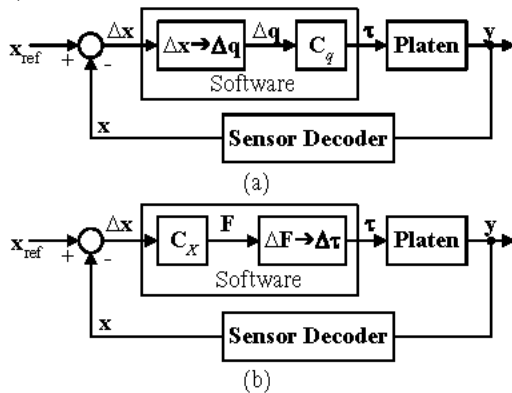


Fig. 4. A controller structure based on Actuator space(a), Cartesian coordinate space(b).

### 3.2 직각 좌표계 제어기

다른 방법으로 주어진 직각 좌표계에서 구성한 오차  $\Delta x$  를 이용하여 직각 좌표계 제어기  $C_x$  를 구성하고 그 제어입력을 변환블록을 이용하여 구동장치 발생력으로 변환한다.

직각 좌표계 공간 오차  $\Delta x$  를 이용 다음과 같이 PID 제어기를 구성할 수 있다.

$$F = K_p\Delta q + K_I \int \Delta q dt + K_D\Delta \dot{q} \quad (12)$$

앞에서 구성된 PID 제어기를 이용하여 다음과 같은 페루프 전달함수 행렬  $G_2(s)$  을 얻을 수 있다.

$$G_2(s) = [E + P(s)J^{-T}C_x(s)T]^{-1}P(s)J^{-T}C_x \quad (13)$$

각 경우에 해당하는 제어기  $C_qJ$  와  $J^{-T}C_x$  를 다음과 같이 등가 시키면  $C_q$  와  $C_x$  는 다음과 같은 관계가 있다.

$$J^T C_q(s)J = C_x(s) \quad (14)$$

(14)는 직교 좌표계 공간의 제어기는 구동장치 공간의 제어기의 좌우에 자코비안 행렬들을 곱한 것과 등가임을 알 수 있다. 그러므로 어떤 제어기를 선택해서 사용하더라도 (14)에 의하여 동일한 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  $C_qJ$  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. 5 에 나타내었다.

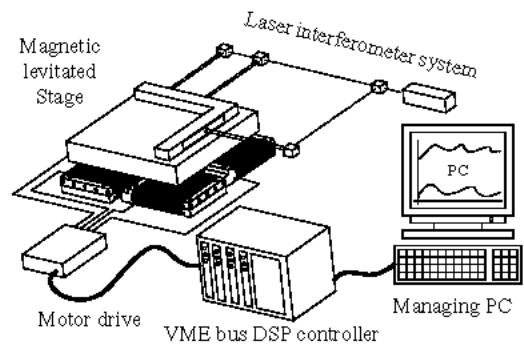


Fig. 5. Photo of the magnetic levitating stage system.

### 4.1 실험 장치

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 검출센서를 사용하였다. 부상체 구동에 4 개의 선형 동기모터를 사용하였다.

제어기 구성으로, PC 를 사용하는 상위 제어기는 실험장치의 전반적인 동작 제어를 담당하고 그 결과를 분석하는데 사용되며, 4개의 TMS6701 을 병렬로 연결한 하위 DSP 제어기는 부상체의 기구학 계산 및 부상체 동작제어 알고리즘을 연산을 담당한다.

#### 4.2 구동장치 공간의 PID 제어기

그림 4.(a)와 같은 제어기 구조에 대하여 식 (10)과 같은 제어기를 구성하였다. 이 때,  $\mathbf{x}_{ref}$  는 미리  $\mathbf{q}_{ref}$  로 계산되어 질 수 있다. 효율적인 계산을 위해서 변환블록을 위한 자코비안 행렬  $\mathbf{J}$  의 구성이 필요 없다.

#### 4.3 직교 좌표계 공간의 PID 제어기

그림 4.(b)와 같은 제어기 구조에 대하여 (12)와 같은 제어기를 구성하였다. 최종적으로 구해진 제어 입력  $\mathbf{F}$  는 자코비안 전치 역행렬을 이용하여 구동력  $\mathbf{\tau}$  로 바뀌게 된다.

본 연구의 추종 성능을 평가하기 위해서 각변의 길이 24mm 의 사각형 궤적이 도입되었다. 2 개의 제어기 모두 유사한 전형적인 과도현상을 보이고 있다. 2 개 제어기의 추종 성능(Fig. 6)은 제어기의 이득이 증가함에 따라 개선되고 있다.

직교 좌표계 제어기의 경우 Y 축의 간섭은 X 축의 과도현상 주기와 유사한 진동주기를 갖고 있다. 관절공간 제어기의 경우 제어기의 이득이 증가할수록 Y 축과 X 축의 과도현상 사이에 유사점을 찾기 어렵다. 그러나, 작업공간 제어기(Fig. 6,a)는 이득이 증가 하더라도 유사한 간섭량을 갖는다.

Fig. 6 과 Fig. 7 은 확대된 추종 결과를 나타낸다. 직교 좌표계 제어기는 관절공간 제어기보다 부드러운 파형을 나타내고 있다.

위치 제어기의 목적은 주어진 목표값을 신속하게 추종하는 것이다. Fig. 7 은 사각형 궤적에 대한 추종 성능을 나타내고 있다.

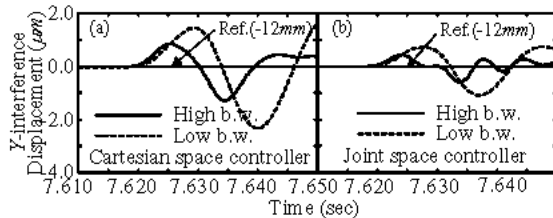


Fig. 6. Interference displacement of Y-axis of each control bandwidth with respect to each controller type.

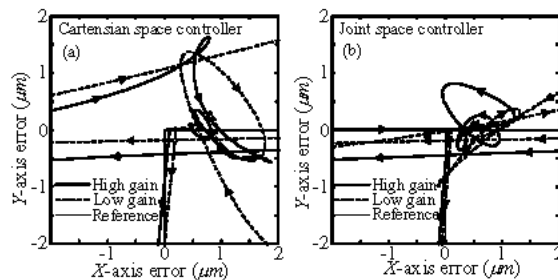


Fig. 7. Vertex tracking performance of square trajectory in case of the Cartesian(a), Joint space controller (b).

외형적인 오차의 크기 만으로 Fig. 7 을 고찰해 보면, 목표 궤적에 대한 추종 성능 측면에서 구동장치 공간 제어기의 경우가 직교 좌표계 제어기의 추종 성능보다 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 좌표계 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.

### 5. 결론

본 연구에서는 자기부상 스테이지의 정밀한 위치 제어를 위하여 직교 좌표계 공간과 구동장치 공간에서 각각의 전형적인 PID 제어기를 구성하여 특성을 비교하였다. 이론적으로 2 가지 제어기는 수식적으로 동가임을 확인하고 제어 성능을 실험을 통하여 비교 하였다.

제어기 구성 측면에 있어서 구동장치 공간 제어기는 복잡한 자코비안 행렬의 유사 역행렬을 구할 필요가 없어서 실험 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 구할 수 있는 상황에 비추어 보면, 직교 좌표계 제어기가 유리함을 알 수 있다.

### 참고문헌

1. Richard M. Murray, Zexiang Li, S. Shankar Sastry, *A Mathematical Introduction to ROBOTIC MANIPULATION*, CRC Press, 1994.
2. Bhaskar Dasgupta, T. S. Mruthyunjaya, "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. John J. Craig, *Introduction to Robotics Mechanics and Control*, ADDISON-WESLEY, 1989.
4. W. J. Kim, *High Precision Planar Magnetic Levitation*, Ph.D. Dissertation, MIT, 1997.
5. Se-Han Lee, Jae-Bok Song, Woo-Chun Choi, Dashie Hong, "Position control of a Stewart platform using inverse dynamics control with approximate dynamics," *Mechatronics*, Pergamon, vol. 12, pp. 605-619, 2003.
6. M. Tsuda, T. Higuchi and S. Fujiwara, "Magnetic levitation servo for flexible assembly automation," *The international journal of robotics research*, vol. 11, no. 4, pp.329-345, 1992.
7. I. J. Busch Vishniac, "Magnetically levitated automated contact analytical probe tool," *Journal of IEEE Tras. On Semiconductor Manufacturing*, vol. 8, no. 1, pp.72-78, 1995.
8. Won-jong Kim, David L. Trumper, Jeffrey H. Lang, "Modeling and Vector Control of Planar Magnetic Levitator," *IEEE Trans. On Industry Applications*, vol. 34, no. 6, Nov./Dec., pp. pp.1254-1262, 1998.
9. 이세한, 송재복, 최우천, 홍대회, "근사 역동역학을 이용한 스테이트 플랫폼의 위치제어," 제어 자동화 시스템공학 논문지, 제 7 권, 제 12 호, pp.993-1000, 2001.