

초정밀위치결정을 위한 델타스테이지의 최적 설계 및 컴퓨터 시뮬레이션에 관한 연구

김재열*(조선대 기계공학부), 김영석*(조선대 기계공학부), 송찬일**(조선대 전기공학과),
곽이구*** (조선대 대학원), 한재호*** (조선대 대학원)

A Study on the Optimal Structural Design and Computer Simulation of Delta Stage for Ultra Precision Positioning

J. Y. Kim (Mech. Eng. Dept., CSU), Y. S. Kim (Mech. Eng. Dept., CSU),
C. I. Song (Mech. Eng. Dept., CSU), L. K. Kwac (Graduate School, CSU), J. H. Han (Graduate School, CSU)

ABSTRACT

Recently, high accuracy and high precision are required in various industrial fields that are composed of semiconductor manufacturing apparatus and ultra precision positioning apparatus and information system and so on. The positioning technology is a very important one among them. This technology has been rapidly developed, its field needs for positioning accuracy to high as submicron. It is expected that accuracy with 10 nm in precision working and accuracy with 1 nm in ultra precision working are reached at the beginning of 2000s. Recently, to accomplish this positioning technology, many researches are concerned about it and make efforts it.

This paper contain design technology of ultra precision 2-axis(X-Y Delta) stage for materialize to positioning accuracy with submicron, where, Delta stage is design as optimum against load and disturbance. And computer simulation is performed for stability and dynamic characteristic of Delta stage.

Key Words : 2 Axis X-Y Delta Stage, Ultra Precision Positioning(초정밀위치결정), Optimal Structural Design(최적설계), Computer Simulation, Submicron, Modeling

1. 서론

최근 첨단기계와 특히 반도체 제조장치, 초정밀 공작기계, 정보기기 등의 분야에서 끊임없이 고정도화, 고정밀화의 요구가 계속되어지고 있다. 이처럼 위치결정기술은 산업전반에서 포괄적으로 응용되는 기술로 이러한 기술들이 가속되어 현재는 서브마이크론의 위치정밀도를 요구하고 있으며 2000년대 초의 가공정밀도는 정밀가공분야에서 10 nm, 초정밀 가공분야에서는 1 nm의 수준까지 도달 할 것으로 예상되어지고 있다. 초정밀 가공법은 종래의 래핑, 폴리싱, 절삭, 연삭 등의 정밀가공과 최근 관심이 모아지고 있는 에너지 빔 가공, 포토 리소그라피, 전기 화학적 가공기술 등으로 발전하고 있다. 따라서 초정밀위치결정기술이 장치 실현의 테크놀로지 구축으로 대단히 중요한 부분이라고 할 수 있다.

특히 종래의 기계적인 가공법이 아닌 에너지 빔

가공, 포토 리소그라피, 전기 화학적 가공은 전자 산업의 눈부신 발전을 주도하는 반도체 제조기술로 현대 산업의 혁신을 이루었다. 에너지 빔 가공이나, 포토 리소그라피 가공에서는 초정밀 2 축 X-Y 스테이지가 사용된다. 또한 최근 새로운 특수 미세 가공기술로 반도체 제조기술을 응용한 마이크로 머시닝과 초정밀 측정기에서도 초정밀 2 축 X-Y 스테이지의 요구가 확산되고 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 초정밀위치결정기술에 대한 연구가 학계와 산업현장에서 계속 진행되어지고 있다.

본 논문은 이러한 서브마이크론의 위치정밀도를 실현하기 위한 초정밀 2 축 X-Y 델타 스테이지의 설계에 관한 것으로서 델타 타입의 스테이지를 고안하여 다른 축의 하중과 외력에 대해서 최대한 간섭을 받지 않도록 최적 설계를 하였다 또한 델타 스테이지의 안정성 및 동역학적 특성을 알아보기 위해 Matlab 과 동역학 해석 툴을 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다.

2. 2축 X-Y 델타 스테이지 모델링

본 연구에서 고안한 델타스테이지의 모델은 Fig.1 과 같다. Fig.1 에서 보는 것과 같이 본 스테이지는 다른 축의 하중과 토크등의 외란의 간섭을 최대한 줄일 수 있도록 모델링 및 설계를 하였다.

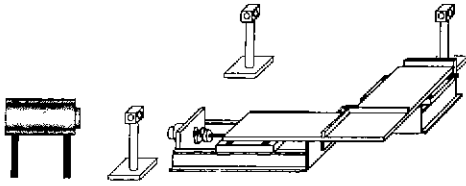


Fig.1 Model of 2-Axis X-Y Delta Stage

본 기구는 커플링과 볼 나사 및 너트사이의 스프링효과는 무시하고, 모터축 커플링과 이송나사 축을 하나의 강체로 보고 모델을 간략화 했으며 마찰토크도 무시하였다. 먼저 이송 나사 축의 운동방정식을 세우면

$$J\ddot{\theta} + C\dot{\theta} = K_2 i_m + K_1 \{K_n(x - K_x \theta) + C_n(\dot{x} - K_c \dot{\theta})\} - \tau_f \quad (1)$$

테이블의 운동방정식은

$$M\ddot{x} = -K_n(x - K_x \theta) + C_n(\dot{x} - K_c \dot{\theta}) \quad (2)$$

더블너트의 회전과 테이블의 변위는

$$K_x = \frac{l}{2\pi}, \quad x_c = \frac{l}{2\pi}\theta \equiv K\theta \quad (3)$$

모터에 흐르는 전류와 발생 토크는

$$T = K_2 i_m \quad \text{or} \quad \tan \theta = \frac{l}{\pi d} \quad (4)$$

의 관계가 성립한다.

모터의 회로 방정식은

$$G_m v_m = R_m i_m + L_m \dot{i}_m + K_1 \dot{\theta} \quad (5)$$

식(1)~(5)에 의해서 θ_c , $\dot{\theta}_c$, x_c , \dot{x}_c , i_m 을 상태 변수로 하고, 입력은 모터 앰프의 입력전압으로 하는 상태방정식을 유도하면 식(6)이 된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_m \\ \dot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_m}{L_m} & 0 & -\frac{K_1}{L_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ K_2 & \frac{K_n K_x^2}{M} & \frac{C_n + C_n K_x^2}{M} & \frac{K_x K_n}{M} & \frac{K_x C_n}{M} \\ J & \frac{J}{M} & \frac{J}{M} & \frac{J}{M} & \frac{J}{M} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{K_x K_n}{M} & \frac{K_x C_n}{M} & \frac{K_n}{M} & \frac{K_n}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_m \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{G_m}{L_m} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_m \quad (6)$$

출력방정식은 아래 식(7)과 같이 된다.

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_m \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (7)$$

이렇게 X 축을 동적 모델링을 하였으며 Y 축 또한 같은 방법으로 모델링 하였다.

3. 동적 해석

본 연구에서 고안한 Fig.2 와 같은 델타 타입 2-Axis Stage 를 각 축별로 분리하여 모델링 하였고 분리된 Stage 의 주요 구성요소인 Ball Screw, Double Nut, Thrust Bearing, LM Guide, Table, Motor Shaft 로 나누어서 각 특성을 고려하여 ADAMS(Automated Dynamic Analysis of Mechanical System) Software 를 이용하여 모델링을 하여 동적 특성을 알아보았다.

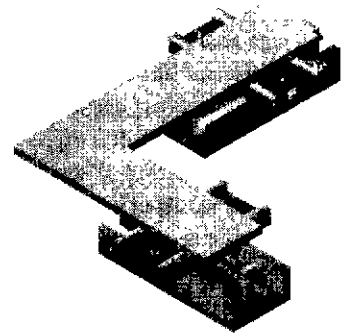
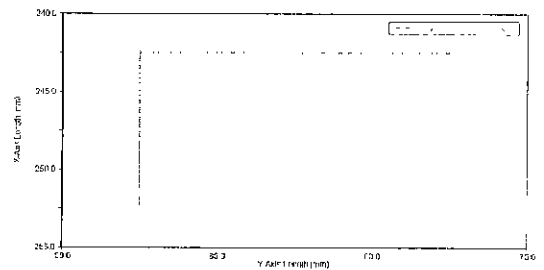
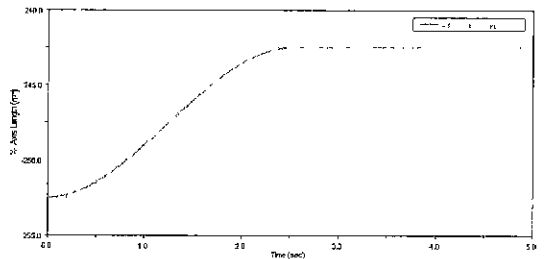


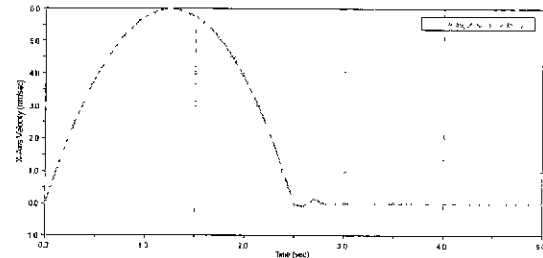
Fig.2 Modelling of Delta Type 2-Axis Stage Using ADAMS



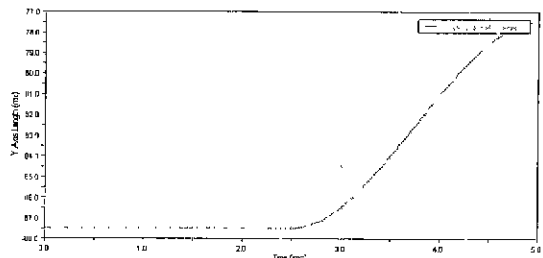
(a) Displacement of X-Y Axis



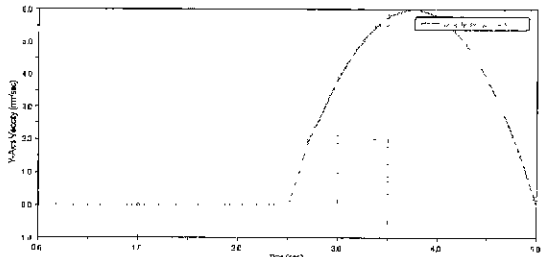
(b) Displacement of X-Axis



(c) Velocity of X-Axis



(d) Displacement of Y-Axis



(e) Velocity of Y-Axis

Fig.3 Dynamic Characteristic of X-Y 2-Axis Delta Stage

위와 같이 초정밀 X-Y 2축 델타 스테이지의 모델링을 하였고 시스템을 컴퓨터상에서 구동 시켜 동적 거동을 가시적으로 확인하였다. Fig. 3 은 ADAMS 를 이용하여 시스템을 구동 시킨 결과이다. Fig. 3 의 (a)는 X 축을 2.5 초 동안 10mm 구동시키고 2.5 초 이후에는 Y 축을 구동한 X-Y 축의 상대변위를 나타낸 것이다. (b)는 2.5 초 동안 구동한 X 축의 변위이다. 그리고 (c)는 이때의 X 축 속도를 나타내고 있다. (d)와 (e)는 Y 축을 나타낸 것이다.

Fig. 3 에서 확인할 수 있듯이 본 델타 스테이지는 동적 상태량은 전형적인 변화를 보여 주었으며 기구학적으로 문제가 없는 시스템임을 확인하였다. 차후에 MATLAB 과의 연동 시뮬레이션을 통하여 컴퓨터상에서 가상 시제품의 다양한 제어 모델을 완벽하게 시뮬레이션 할 수 있을 것으로 사료된다.

본 논문에서는 델타스테이지의 동적특성 및 기구학적 특성을 ADAMS 를 통해 확인 하였으며 제어 모델은 MATLAB 을 이용하여 시뮬레이션 및 제어 성능 평가를 하였다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션

위와 같이 동적 해석을 하였고 그 결과 본 시스템의 동적 특성은 양호한 것으로 판단하고 Matlab 의 Simulink 를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. Fig.6 은 2 축 X-Y 스테이지의 Simulink 를 보여주고 있으며 Fig.7 과 Fig.8 에는 각 축의 subsystem 의 Simulink 를 나타내었다.

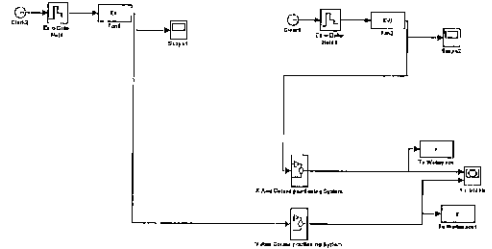


Fig.6 Simulink of 2-Axis X-Y Delta Stage

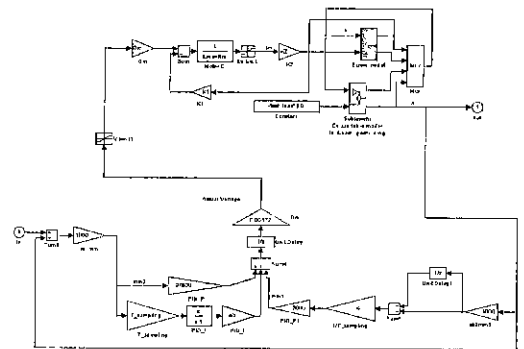


Fig.7 Simulink of 2-Axis X-Y Delta Stage

2 축의 연동제어 시뮬레이션에 앞서 한 축만 구동하여 시뮬레이션을 행하였으며 그 결과 양호한 시뮬레이션 결과를 보여 주었으며, 그 다음 동일한 모델링의 두 축을 결합하여 연동 제어 시뮬레이션을 하였다. 보통 주파수 영역에서 시스템을 분석한 후 주파수 응답 해석법을 사용하여 제어시스템을 설계하면 설계과정이나 변수에 약간의 오차가 있더라도 제어시스템의 성능이 웬만큼 보장되기 때문에 시간영역에서 설계하는 것에 비해 상당히 견실한 제어시스템을 구성할 수 있다. 그리고 제어기 설계는 궁극적으로 폐루프(Closed loop) 전달함수가 원하는 주파수 응답특성을 가지도록 만드는 것이지만 폐루프 이득을 직접 다루기가 쉽지 않기 때문에 대신 개루프 이득(open loop)을 이용한다. 다음의 주파수영역과 시간영역분석은 한 축만을 한 것이다. 본 시스템의 개루프 주파수 분석은 Fig. 10 에서와 같이 $G_m=96.589\text{dB}$, $P_m=89.998\text{ deg}$ 이 나왔다. 이득 여유가 6dB 이상인 반면 위상여유가 60deg 이상이다.

따라서 위상여유를 보다 작게 하는 제어기의 설계가 필요하다. 여기서 바람직한 안정도 여유는 이득여유가 6[dB] 이상이고 위상여유가 30~60[degree]이다. 위에서 설계한 PID 제어기를 적용하여 Fig. 10 과 Fig. 11 와 같이 주파수영역의 Bode 선도와 시간영역의 스텝 응답을 분석한 결과 좋은 응답을 보여주었다.

본 시스템의 제어기를 포함한 폐루프(close loop) 주파수 분석은 $Gm=7.079dB$, $Pm=42.054 deg$ 이 나왔다. 이득여유가 6dB 이상이고 위상여유가 30~60deg 이다. 그리고 시간영역 스텝응답에서도 Table 1 과 Fig. 12 와 같이 좋은 응답특성을 보여주고 있다. 그리고 위의 시뮬레이션에 의해 구해진 PID 제어기의 파라미터 값은 $K_p=0.9750[V/\mu m]$, $K_i=4.00 \times 10^{-4}[V/\mu m]$, $K_d=2.00 \times 10^{-2}[V/\mu m]$ 이다.

따라서 PID 제어기를 포함한 PID 제어기를 포함한 본 시스템은 안정하다고 판단된다.

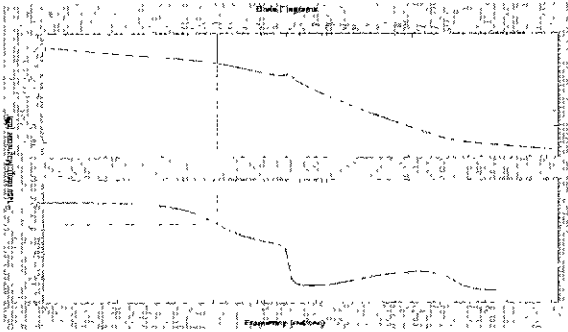


Fig.10 The Bode diagrams of 2-Axis X-Y Delta Stage by Open Loop to Perform Simulation

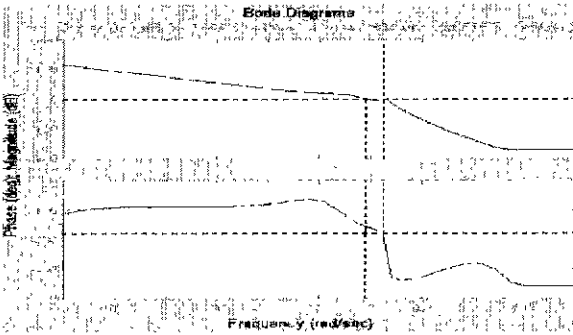


Fig.11 The Bode diagrams of 2-Axis X-Y Delta Stage by Closed Loop to Perform Simulation

Table. 1 Step response of Coarse Apparatus to Perform Simulation

Title	Parameter	Unit
Steady state error	0	
Maximum Overshot	0.1(10%)	[%]
Rise Time	0.047	[s]
Setting Time	0.062	[s]

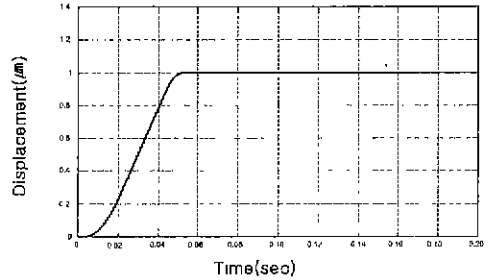
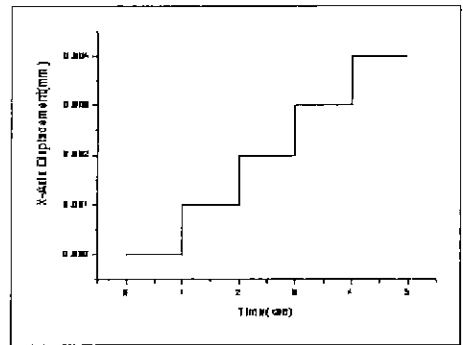


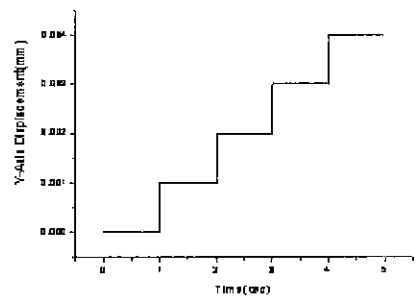
Fig.12 The Step response of 2-Axis X-Y Delta Stage to Perform Simulation

위에서 보여주는 것과 같이 주파수영역과 시간영역 분석에서 본 시스템은 만족할만한 성능을 보여주었다. 이렇게 시스템 성능을 보았으며 실제 연동제이 구동 시뮬레이션을 행하였다.

연동 제어에서는 먼저 Fig.13 과 같은 계단형 파형을 X-Y 축에 동시에 입력하였을 때 Fig.14 와 같은 출력을 보여주었다. 여기서 두 축의 연동이 동시에 구동되고 있으며 입력신호를 그대로 추종해 나가고 있다. 더 확실하게 확인하기 위하여 Fig.15 과 같은 Rectangular Type 의 신호를 입력해 보았다. 출력은 Fig.16 처럼 입력과 거의 동일한 결과를 보여 주었다.



(a) X-Axis



(b) Y-Axis

Fig.13 Command Signal of 2-Axis X-Y Delta Stage to Perform Simulation

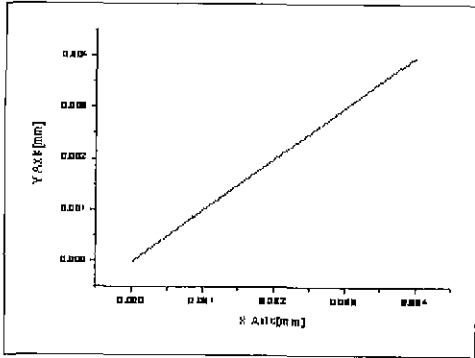


Fig. 14 Output Signal of 2-Axis X-Y Delta Stage to Perform Simulation

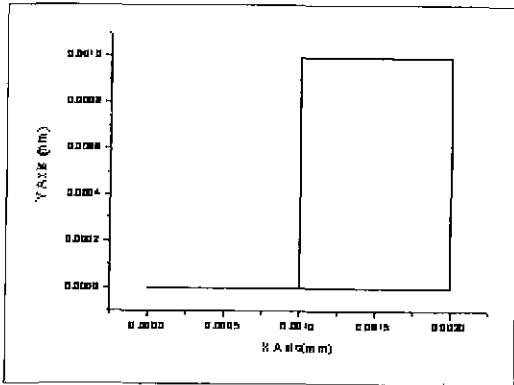


Fig. 15 Rectangular Signal input of 2-Axis X-Y Delta Stage to Perform Simulation

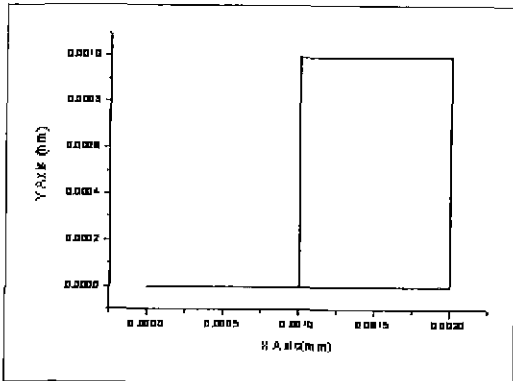


Fig. 16 Rectangular Signal output of 2-Axis X-Y Delta Stage to Perform Simulation

4. 결 론

위와 같이 ADAMS 와 MATLAB 을 사용하여 동적 거동 및 제어 모델의 시뮬레이션을 통하여 본 연구에서 고안한 초정밀 2 축 델타 스테이지의 최적설계와 실제 시스템에 적용하였을 때의 시행착오를 줄이기 위해서 본 연구를 수행하게 되었으며, 또한 본 스테이지의 유효성을 확인 하고자 하였다.

그 결과 본 스테이지의 동적 거동 및 기구학적인 문제는 없었으며 실제 시스템에 적용하여도 문제가 없음을 확인하였다. 또한 MATLAB 을 이용한 2 축의 연동 시뮬레이션을 통하여 제어기를 설계하였으며 제어성능 또한 만족 할 만한 수준 이었다.

이러한 결과를 아래와 같이 요약 하였다.

- 1) ADAMS 를 이용한 가상시제품 모델링과 동적거동 및 기구학적 특성 파악.
- 2) MATLAB 을 이용한 델타 스테이지의 Dual Positioning 시뮬레이션 알고리즘 개발을 통한 Dual Servo Control 의 가능성 확보.
- 3) 초정밀 2 축 델타스테이지의 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 제어성능평가.
- 4) 초정밀 2 축 델타스테이지의 실제 시스템의 적용 가능성 확보.

후 기

본 발표논문은 2001 년 과학기술부지원 국제공동연구의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Benjamin C. Kuo, "Automatic Control Systems", Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J 07632, pp. 689~699, 1994.
2. Kaiji SATO, "performance Evaluation Lead screw Positioning System with Five Kinds of Control Method(2nd Report)", JSPE vol. 63. No. 12, p.1759~1763, 1997.
3. Simokohbe, "Control performance of Lead screw Positioning with Intelligent Control Methods", JSPE, vol. 64. No. 11, p.1627~1632, 1998.
4. A. Arenz, W. Borchert, E. Schnieder, "Simulation of a goliath transfer robot combining the software tools ADAMS and MATLAB", 21th European ADAMS User' Conf. 1996.
5. 박기형, 김재열, 윤성운, 이규태, 곽이구, 송인석, 한재호, "DC Servo Motor 를 이용한 초정밀위치결정기구의 컴퓨터 시뮬레이션 및 제어성능 평가", 한국공작기계학회, 9 권 6 호, P.164~169, 2000
6. 김재열, 김영석, 곽이구, 마상등, 한재호, 초정밀 서보기구의 제어성능 평가(II), 정밀공학회 춘계발표논문집, P.617~620, 2000.