

이 논문은 1993년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

〈논 문〉 SAE NO. 943773

6자유도 진동모델의 위치 및 자세결정을 위한 적응제어기법의 적용에 관한 연구

A Study on Position of Six-Degrees-of-Freedom of Vibration Model and Orientation Decision by Adaptive Control Method

김 재 열,* 송 상 기,** 한 재 호,*** 오 용 훈,**** 조 성 훈*****
J. Y. Kim, S. K. song, J. H. Han, Y. H. Oh, S. H. Cho

ABSTRACT

About vibration model of Six-degrees-of-freedom(DOF), in mass load, examined results for knowing dynamic interference and response variation is as follows :

In case of putting mass load upon the object, experimented results on two-degrees-of-freedom of the translation-1 direction and the rotation-1 direction at open-loop-control system, about 0.19 arcsec on input of the translation-0.1 μ m and 0.022 μ m on input of the rotation-0.5 arcsec, the justice of motion equation is acknowledged as confirming the appearance of the interference-0.022 μ m.

In establishing calculation of transformation matrix by using analogue circuit, as simulating results that used incomplete differentiation, interference is 1.7×10^{-3} arcsec on input of the translation-0.1 μ m and 1.4×10^4 μ m on input of the rotation-0.5 arcsec in open-loop-control system. Also it is 4.2×10^{-4} arcsec on input of the translation-0.1 μ m and 5.6×10^{-5} μ m on input of the rotation-0.5 arcsec in closed-loop-control system. As closed-loop-control system is better than open-loop-control system, equivalent accordance is confirmed on original response.

Finally, fundamental validity of this theory is acknowledged.

주요기술용어 : Six-Degrees-of-Freedom of Vibration Model(6자유도진동모델), Adaptive Control Method (적응제어기법), Analogue Circuit(아날로그 회로), Open-Loop-Control System(개회로 제어계), Closed-loop-Control System(폐회로 제어계)

1. 서 론

최근들어 다자유도 진동모델에 대한 위치 및 자세를 결정하기 위한 연구가 활발히 진행중

있으며 고정도의 위치 및 자세 결정의 기술은 차세대 초 LSI 제조장치의 일부인 웨이퍼(wafer) 밀의 테이블 병진운동과 회전운동을 제어하거나 로봇트 산업에 있어서 고정도 작업을 할수있는

* 조선대학교 정밀기계공학과 **** 조선대학교 대학원 기계설계공학과
** 순천공업전문대학 자동차정비과 ***** 아시아 자동차 기술관리부
*** 조선대학교 대학원 기계공학과

로봇 암의 위치 및 자세제어계로의 응용과 STM이나 광촉침을 이용한 초정밀 미세 3차원 형상 측정분야에 이용되고 있는 실정이다.^{12,3)}

특히 자동차 분야에서 차체가 경량화, 고속화됨에 따라 노면으로부터 전달되는 진동을 효과적으로 흡수하여 차량의 승차감과 조정 안전성을 향상시키기 위한 주행 차륜형 이동체의 진동제어의 연구가 다각도에서 활발히 진행되고 있으므로 이러한 연구의 일환으로 다자유도 진동모델의 위치 및 자세결정에 적응제어기법을 적용하고자 한다.⁴⁻⁷⁾ 다자유도 진동모델은 각 자유도사이에서 원리적으로 정적 및 동적 간섭이 없고 각 자유도의 동적 특성이 같아야 하는것 때문에 착안하는 대상의 운동방향에 대한 동일 제어특성이 요구된다고 하겠다.⁹⁻¹²⁾

본 연구에서는 제작된 6자유도 미동기구를 대상으로 피드백 제어(feed back control)을 적용하는 것이며 미동기구상에 질량부하가 가해진 경우 기구상에서 제어점과 중심을 일치시켜 설계되었기 때문에 중심이 설계의 위치에서 이동하는 경우 각 자유도 사이에 간섭이 생기게되며 대상물의 질량과 관성 모멘트가 변화하므로 응답도 변화하게 된다. 그러므로 이러한 간섭을 줄여서 변화전의 응답으로 되돌리는 방법 또는 변화를 억제하는 방법으로는 적응제어에 의한 제어동작변수(controller parameter)를 변화시켜 응답변화에 대응시키는 것이며 간섭이 생기지 않도록 하기위해서 응답이 변화전과 동일하게 되도록 액츄에이터(actuator)를 구동하게 된다.¹³⁾ 따라서 본 연구에서는 질량부하에 기인하는 동작 간섭과 응답특성 변화에 대처하는 방법을 연구하고자 한다.

2. 제어대상의 모델링

먼저 미동기구의 중심이 이동한 경우의 6자유도의 운동방정식을 세워서 목표값의 입력과 대상물의 위치 및 자세의 관계를 행렬로 표시한다. 이 행렬은 질량부하를 가하기전의 목표값 입력과 대상물의 위치 및 자세의 관계를 나타낸 행렬로 변환한 것으로해서 행렬을 구한다. 또한 본 미

동기구에서 대상물에 질량부하를 가해서 중심이 설계 위치로부터 이동하고 동시에 대상물의 질량과 관성 모멘트가 변화하는 것에 대해 운동방정식을 유도하게 된다.

Fig.1은 다자유도 진동모델을 나타낸것이며 대상물의 위에 질량부하를 가해서 중심이 Z방향으로만 이동한 경우를 고려하여 진동모델에 대한 운동방정식을 라플라스 변환식으로 표기하면 다음의 식 (1)과 같다.

$$Ms^2 (X+e_x \theta_y - e_y \theta_x) = -[C_k(X_3+X_4) - C_k'(\Delta_3+\Delta_4)]$$

$$Ms^2 (Y+e_x \theta_x - e_y \theta_y) = -[C_k(X_5+X_6) - C_k'(\Delta_5+\Delta_6)]$$

$$Ms^2 (Z+e_y \theta_x - e_x \theta_y) = -[C_k(X_1+X_2) - C_k'(\Delta_1+\Delta_2)]$$

$$I_x s^2 \theta_x = -r[C_k(X_1 - X_2) - C_k'(\Delta_1 - \Delta_2)] + Ms^2 (e_x Y - e_y Z)$$

$$I_y s^2 \theta_y = -r[C_k(X_3 - X_4) - C_k'(\Delta_3 - \Delta_4)] + Ms^2 (e_x Z - e_y X)$$

$$I_z s^2 \theta_z = -r[C_k(X_5 - X_6) - C_k'(\Delta_5 - \Delta_6)] + Ms^2 (e_y X - e_x Y)$$

(1)

여기서 각 기호의 의미는 다음과 같다.

M : 질량부하후의 대상물의 질량

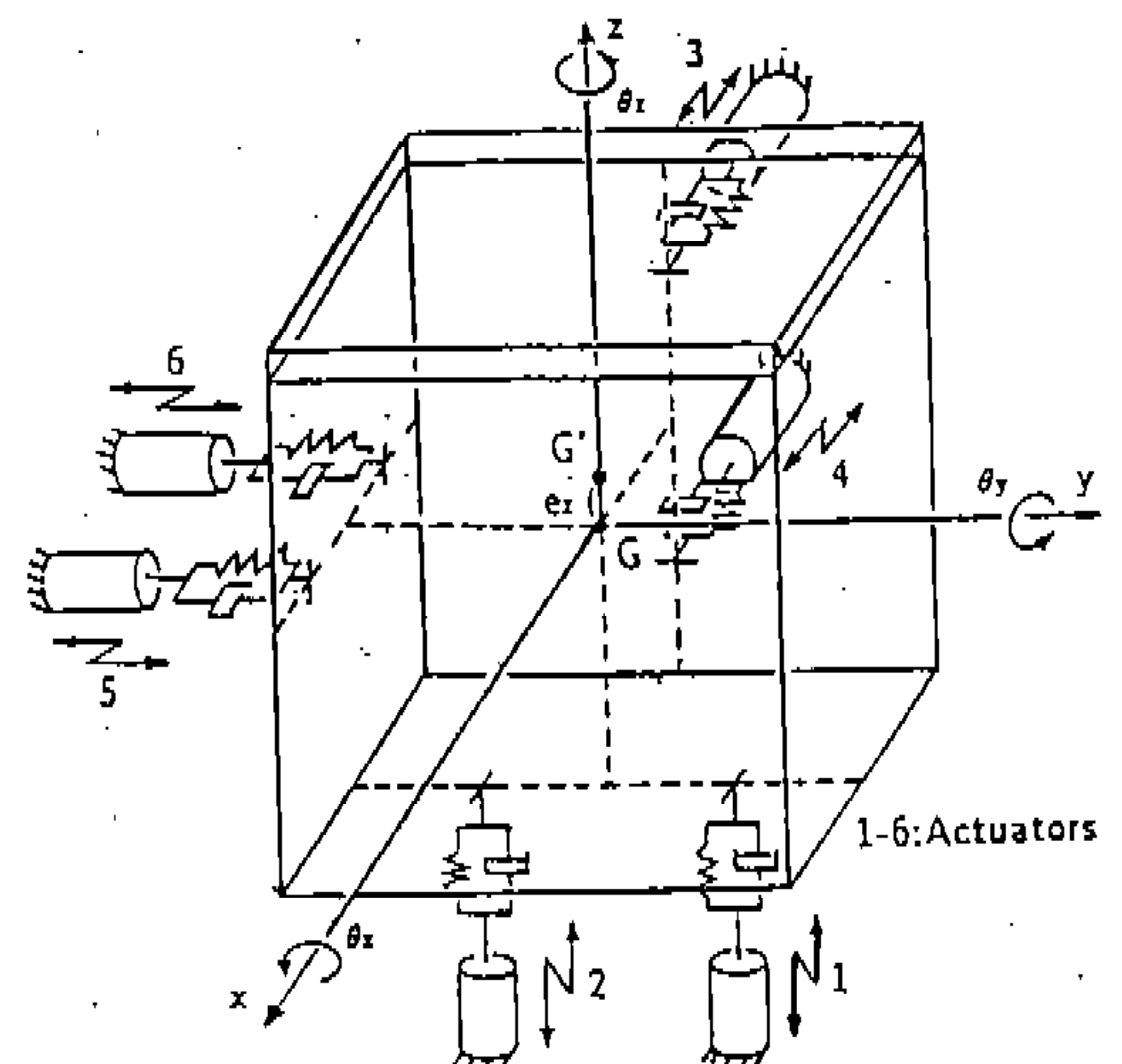


Fig.1 Vibration model subjected to mass load

I_x, I_y, I_z : 질량부하후의 대상물의 X, Y, Z축 회전 관성모멘트

e_x, e_y, e_z : X, Y, Z 방향의 중심 이동량

$X_i (i=1, 2, \dots, 6)$: 액츄에이터와 대상물의 접점 이동량

$\Delta_i (i=1, 2, \dots, 6)$: 액츄에이터의 신축량

또한 $X_1 \sim X_6$ 과 X, Y, Z, $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 의 관계 및 $\Delta_1 \sim \Delta_6$ 과 $X_r, Y_r, Z_r, \theta_{xr}, \theta_{yr}, \theta_{zr}$ 의 관계는 다음식 (2)와 식 (3)으로 나타내게 된다.

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & r \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -r \\ 1 & 0 & 0 & r & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -r & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & r & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -r & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ \theta_y \\ \theta_z \\ \theta_x \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \\ \Delta_4 \\ \Delta_5 \\ \Delta_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & r \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -r \\ 1 & 0 & 0 & r & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -r & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & r & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -r & 0 \end{pmatrix} G_p \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ \theta_{yr} \\ \theta_{zr} \\ \theta_{xr} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$X_1 \sim X_6$ 및 $\Delta_1 \sim \Delta_6$ 를 $X_r, Y_r, \theta_{xr}, \theta_{yr}, \theta_{zr}$ 과 X, Y, Z, $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 로 써서 바꾸면 식(1)을 행렬의 형태로 나타내면 다음의 식 (4)와 같다.

$$\begin{pmatrix} Ms^2+2C_k' & 0 & 0 & e_z Ms^2 & -e_y Ms^2 & 0 \\ 0 & Ms^2+2C_k' & 0 & 0 & e_x Ms^2 & -e_z Ms^2 \\ 0 & 0 & Ms^2+2C_k' & -e_x Ms^2 & 0 & e_z Ms^2 \\ e_z Ms^2 & 0 & -e_x Ms^2 & I_y s^2+2r^2 C_k' & 0 & 0 \\ -e_y Ms^2 & e_x Ms^2 & 0 & 0 & I_z s^2+2r^2 C_k' & 0 \\ 0 & -e_z Ms^2 & e_y Ms^2 & 0 & 0 & I_x s^2+2r^2 C_k' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ \theta_y \\ \theta_z \\ \theta_x \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 2C_k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2C_k & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2C_k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2C_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2C_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2C_k \end{pmatrix} G_p \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ \theta_{yr} \\ \theta_{zr} \\ \theta_{xr} \end{pmatrix} \quad (4)$$

또한 이 식을 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$G_1 X = G_2 X_r \quad (5)$$

G_1 의 역행렬을 구함으로써 목표값 X_r 과 대상물의 위치 및 자세의 관계는 다음식과 같다.

$$X = G_1^{-1} G_2 X_r = G X_r$$

$$G' = 2C_k \cdot G_p \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} Ms^2+2C_k' & 0 & 0 & r^2 e_z Ms^2 & -r^2 e_y Ms^2 & 0 \\ 0 & Ms^2+2C_k' & 0 & 0 & r^2 e_x Ms^2 & -r^2 e_z Ms^2 \\ 0 & 0 & Ms^2+2C_k' & -r^2 e_x Ms^2 & 0 & r^2 e_y Ms^2 \\ e_z Ms^2 & 0 & -e_x Ms^2 & r^2(I_y s^2+2r^2 C_k') & 0 & 0 \\ -e_y Ms^2 & e_x Ms^2 & 0 & 0 & r^2(I_z s^2+2r^2 C_k') & 0 \\ 0 & -e_z Ms^2 & e_y Ms^2 & 0 & 0 & r^2(I_x s^2+2r^2 C_k') \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ \theta_{yr} \\ \theta_{zr} \\ \theta_{xr} \end{pmatrix} \quad (7)$$

이 G' 는 $X = G X_r$ 의 G 와 비교하면 대각행렬이 아니기 때문에 각 방향사이에 간섭이 발생하게 된다. 또한 질량과 관성 모멘트가 변화함에 따라

각 방향의 특성도 원래의 특성으로부터 변화한다.

본 논문에서는 대상물의 위에 분동을 올려서 중심이 Z 방향으로만 이동한 경우를 검토하고자 한다. 그래서 중심이 다른 방향으로 이동할 경우나 3차원적으로 이동할 경우에도 동일한 방법으로 처리가 가능하게 되고 본질적인 차이가 없게 된다. 따라서 중심이 Z 방향으로만 이동할 경우의 G를 다음식으로 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} Ms^2+2C_k' & 0 & 0 & r^2 e_z Ms^2 & 0 & 0 \\ 0 & Ms^2+2C_k' & 0 & 0 & 0 & -r^2 e_z Ms^2 \\ 0 & 0 & Ms^2+2C_k' & 0 & 0 & 0 \\ e_z Ms_2 & 0 & 0 & r^2 (I_y s^2 + 2r_2 C_k') & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r^2 (I_z s^2 + 2r_2 C_k') & 0 \\ 0 & -e_z Ms^2 & 0 & 0 & 0 & r^2 (I_z s^2 + 2r_2 C_k') \end{bmatrix} \quad (8)$$

이 경우 x 방향과 θ_y 방향, y 방향과 θ_z 방향 사이에서 서로 간섭이 일어난다는 것을 알았다. 따라서 이 중심이 이동한 경우의 전달함수 G를 원래의 전달함수 G로 변환하도록 행렬을 구한다. 결국 G를 G로 변환한 행렬을 A라고 하면 다음 식을 만족시키게 된다.

$$G = GA \quad (9)$$

여기서 A는 G의 역행렬을 구함에 따라 구해지게 된다.

$$A = G^{-1} G = \frac{1}{Ms^2 + 2C_k'}$$

$$\begin{bmatrix} Ms^2+2C_k' & 0 & 0 & \frac{K_{p0} e_z M}{s^2/K_{px}} & 0 & 0 \\ 0 & Ms^2+2C_k' & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{p0} e_z M}{s^2/K_{px}} \\ 0 & 0 & Ms^2+2C_k' & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{p0} e_z M}{s^2/r^2/K_{p0}} & 0 & 0 & \frac{(I_y s^2 + 2r_2 C_k')}{r^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(I_z s^2 + 2r_2 C_k')}{r^2} & 0 \\ 0 & -\frac{K_{p0} e_z M}{s^2/r^2/K_{p0} r^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{(I_z s^2 + 2r_2 C_k')}{r^2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

이 행렬 연산을 Fig.2에 나타낸 것처럼 진동 모델의 제어계로부터 액츄에이터의 입력원에 삽입하여 G에 걸므로 외관상 제어 대상의 특성을 원래의 G로 변환시키면 간섭은 없게 되고 또한 원래의 특성으로 되돌리게 되어 모든 방향이 동일하게 된다.

앞에서 기술된 바 있는 식(10)의 행렬 A의 연산을 실행하는 방법으로는 전자계산기로 실시하는 방법이 있으며 변환행렬의 연산을 이론적으로 실시하면 동작간섭은 완전히 없어지게 되고 응답도 질량부하를 가하기전의 상태에서 완전하게 일치한다.

그래서 아날로그 회로로 연산을 할 경우의 미분요소는 불완전 미분으로 할 경우 어느정도 간섭을 낮출수가 있고 원래의 특성으로 되돌아가게 하는 것을 추적하는 시뮬레이션을 가능하게 한다.

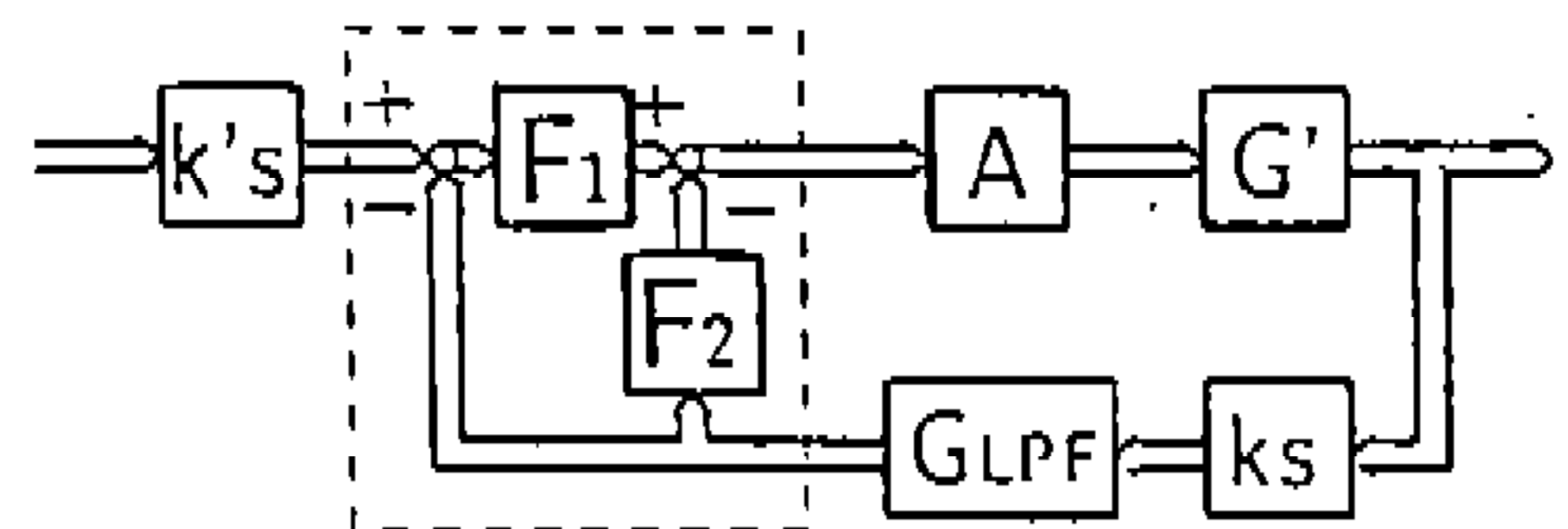


Fig.2 Block diagram of control system(The case of inserting transfer matrix A)

따라서 이때에 X방향과 θ_y 방향의 요소만을 2×2의 행렬로 표시한 행렬을 A'라하면 이것은 다음 식과 같이 된다.

$$A' = \begin{bmatrix} \frac{M}{M} + \frac{1-M/M}{Ms^2+2c's+2k'} \left(\frac{2c's}{Tcs+1} + 2K' \right) & \\ \frac{e_z M}{M} - \frac{2e_z M/M}{Ms^2+2c's+2k'} \left(\frac{2c's}{Tcs+1} + k' \right) & \\ \frac{e_z M}{r^2 M} + \frac{2e_z M/r^2 M}{Ms^2+2c's+2k'} \left(\frac{2c's}{Tcs+1} + k' \right) & \\ \frac{I}{r^2 M} - \frac{I-I/r^2 M}{Ms^2+2c's+k'} \left(\frac{2c's}{Tcs+1} + 2K' \right) & \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 T_c : 불완전 미분의 시정수이다.

3. 실험장치 및 실험결과

3.1 실험장치

Fig.3에서는 6자유도 진동 모델을 하고 있는 미동기구에 대한 질량부하에 기인하는 동적간섭 및 응답특성 변화의 시험을 하기위한 측정계와 데이터 처리의 계통도를 나타내고 있다. 따라서 본 6자유도의 동적모델에서 사용되어진 센서는 정전용량형 변위계(ADE사의 마이크로 센서)를 액츄에이터의 정면에 배치하고 대상물의 미소변위량을 비접촉으로 검출하게 된다. 그래서 검출된 신호를 증폭기(Conditioning Amp.)를 통해 증폭하고 FFT 분석장치로 보존하게 되며 마이크로 컴퓨터와의 인터페이스에 의해서 진동모델의 실험을 실시한 것이다.

본 진동모델에서는 밴드폭 15KHz로서 제어하고 방향이 6방향인 경우도 아주 빠른 고속의 CPU와 A/D변환기 및 D/A변환기가 필요하게되며 진동모델에서 컨트롤러 등은 모든 연산을 아날로그 회로로 실시하게 된다.

그리고 부하질량은 대상물의 질량의 약 10%로 질량부하를 가한 경우의 거동을 실험하고 시뮬레이션을 실시하였다. 또한 본 실험은 X 방향과

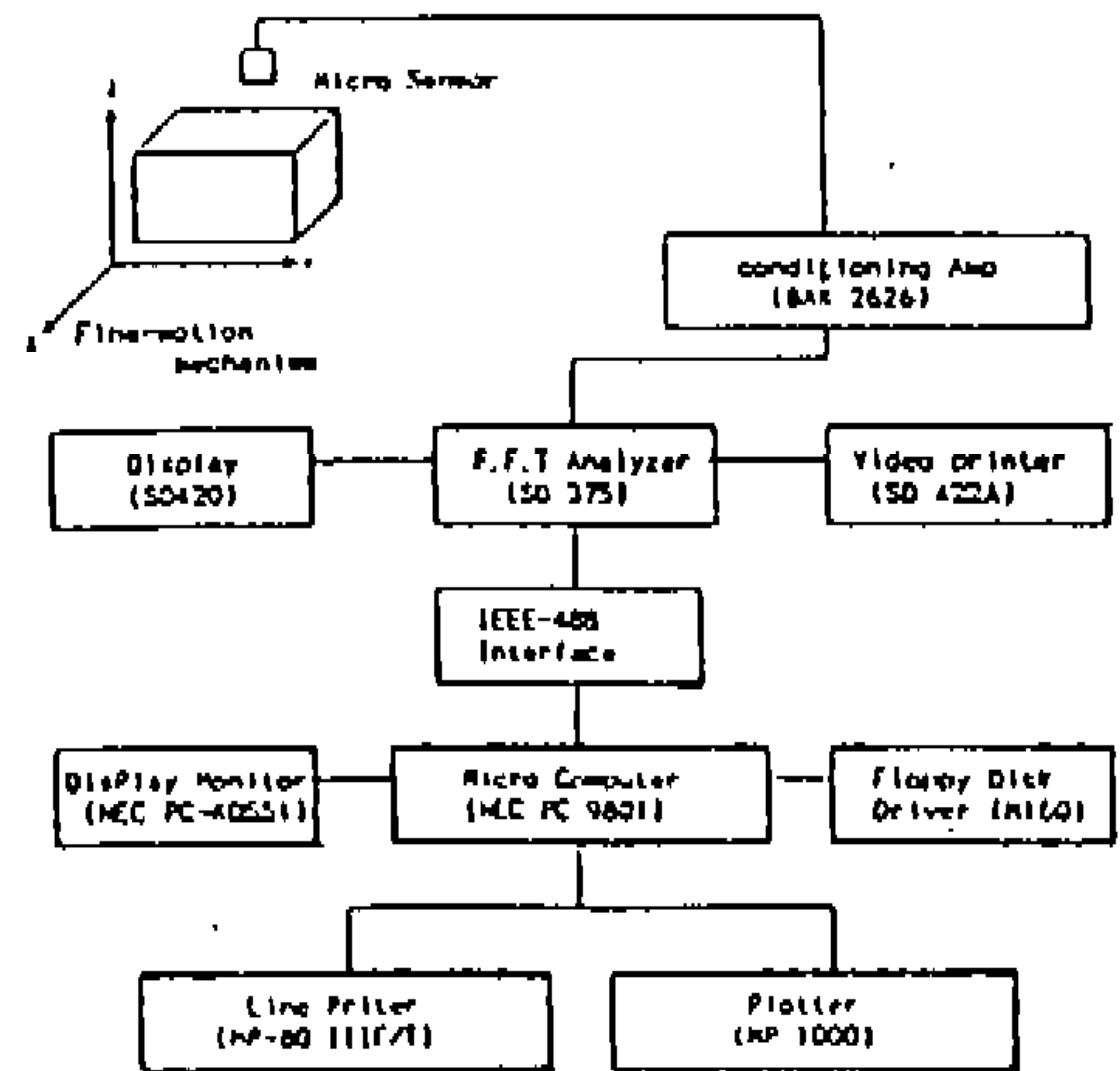


Fig.3 Block diagram of measuring system and data processing

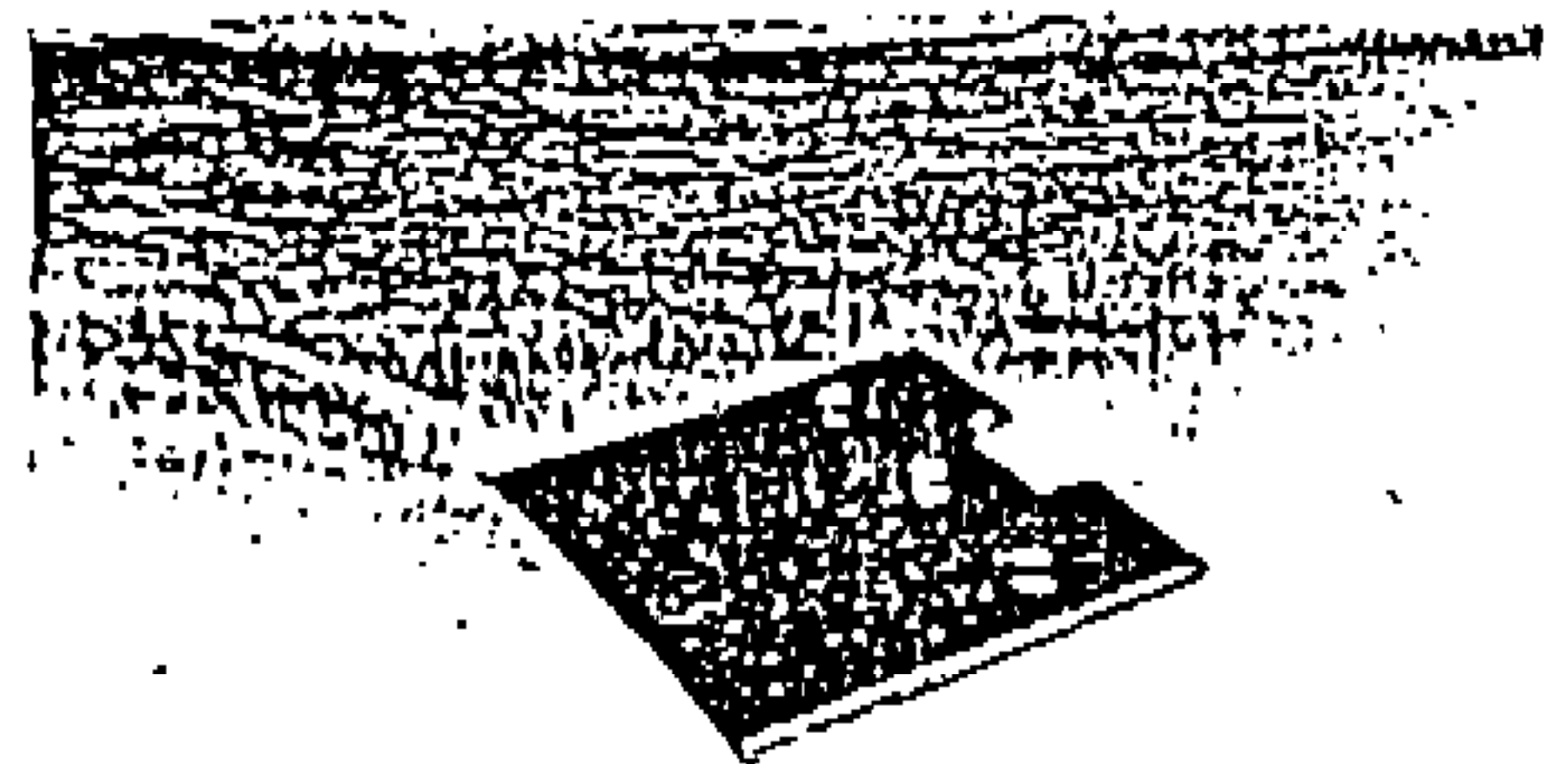


Photo.1 Form of mass

θ_y 방향에 대해서만 실험 실시를 했으며 모든 방향에서도 같게 되리라 생각되어진다.

Photo.1은 본 연구에서 사용되어진 분동의 외관을 나타낸다.

이 분동은 원래 70mm×70mm×6.3mm로 중량은 130g(대상물의 10%)의 강제의 직방체이며 탄성힌지(elastic hinge)의 부품이 대상물의 윗면에 대해서 돌출되므로 장방형으로 절단한 ㄷ자 모양으로 하고 있다. 또한 이것을 대상물에 고정해야 하기 때문에 나사구멍이 있으며 이 잘린 부분이나 나사구멍 및 나사가 x 방향이나 y 방향으로 중심이동을 발생시키는가 어떤가를 계산하므로 중심은 x 방향으로 약 0.1mm 정도만이 이동하게되고 이것은 거의 응답특성에 영향이

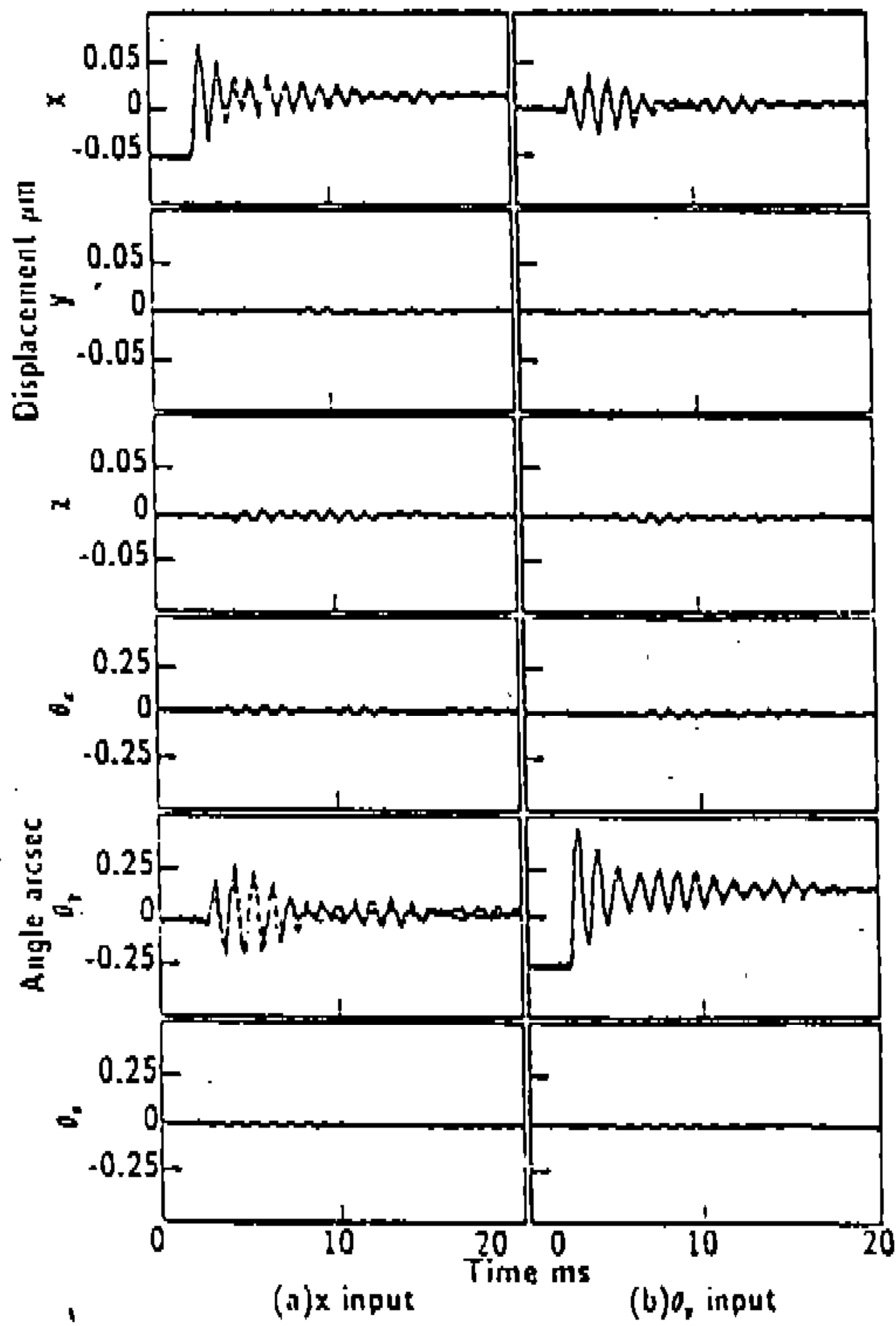


Fig.4 Step responses of open loop control system(The case subjected to mass load)

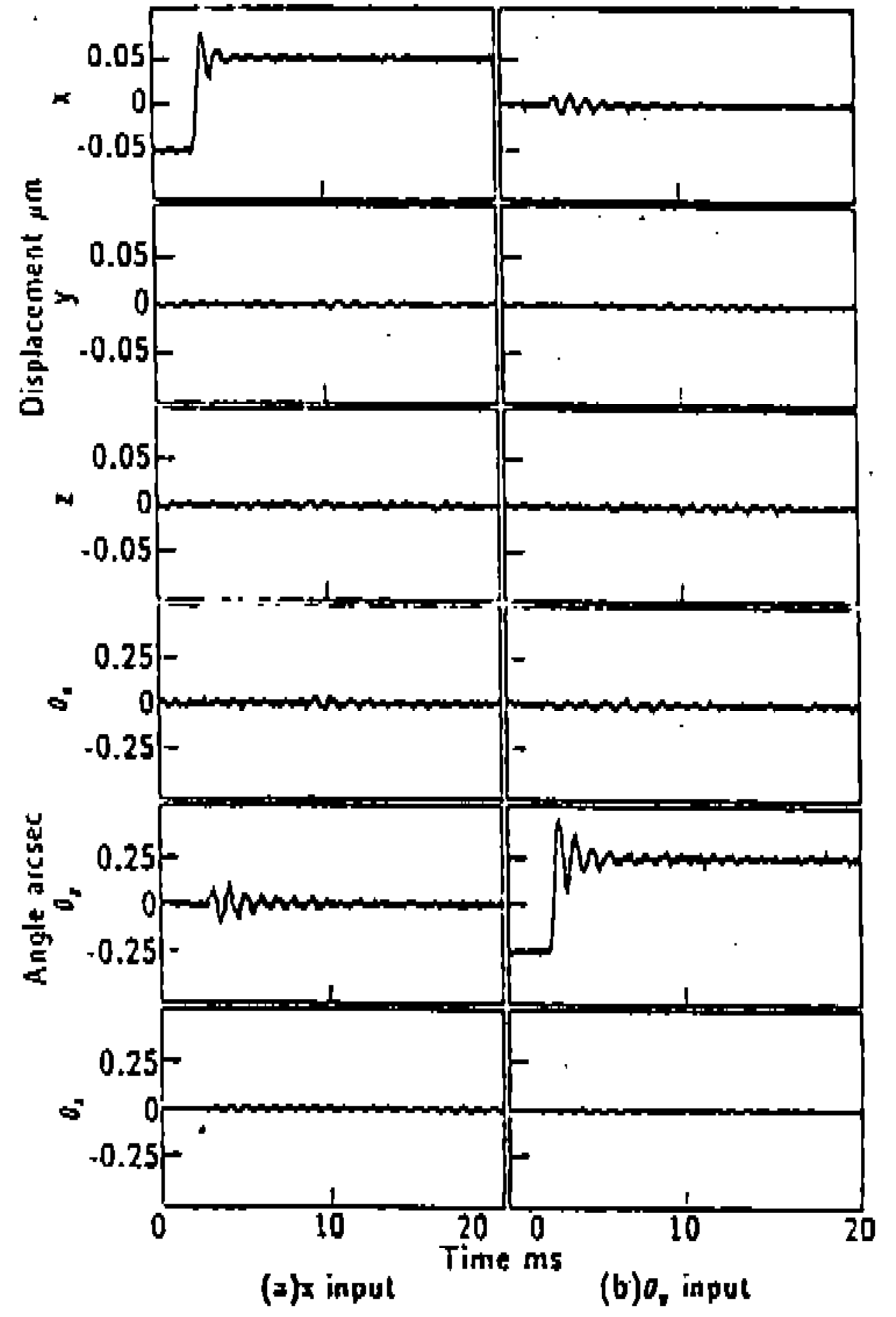


Fig.5 Step responses of closed loop control system(The case subjected to mass load)

Table 1 Interference amount of post-and ante-insertion of transfer matrix, A'

	Post-mass load				Post-insertion of transfer matrix, A'
	Open-loop Control system		Closed-loop Control system		Open-loop Control system
	Data of experimentation	Data of calculation	Data of experimentation	Data of Calculation	Data of experimentation
X (θ_y -input) $\times 10^{-2} \mu\text{m}$	6.4	5.8	2.2	2.1	1.4×10^{-2}
θ_y (X-input) $\times 10^{-1} \text{arcsec}$	4.3	3.9	1.9	1.5	1.7×10^{-2}

없는 것으로 생각된다.

3.2 실험결과

분동을 진동모델에 올려서 질량부하를 가한 경우의 실험결과와 앞에서 언급했던 운동방정식의 결과를 기초로해서 실시한 시뮬레이션의 결과를 Fig.4와 Fig.5에 나타낸다.

여기에서 실험결과는 실선으로하고 시뮬레이션 결과를 파선으로 나타내었다. 또한 Fig.4는 개회로 스텝 응답을 말하며 Fig.5는 폐회로 스텝응답을 보이고 있다. Fig.4와 Fig.5의 양쪽 모두 x 방향입력과 θ_y 방향입력의 2개를 나타내고 있으며 양쪽모두 입력은 병진이 0.1 μ m, 회전은 0.5 arcsec로 한다.

앞에서 기술된 바 있는 운동방정식에서 나타낸것 처럼 x방향 입력의 경우에는 θ_y 방향으로 혹은 θ_y 입력의 경우에는 x방향에 간섭이 생기는 것을 알았다. 또한 입력의 크기에 따른 간섭량을 Table 1에 나타냈으며 실험결과와 시뮬레이션이 매우 잘 일치하고 있어서 운동방정식의 정당성이 확인되었다.

더욱이 본 진동모델에 실험은 실시하지 않고 대처 방법만을 실시한 경우의 시뮬레이션의 결과를 얻기위해서 Fig.2에서 나타낸 변환행렬 A를 삽입한 경우의 블록선도로부터 제어계에 대해서 목표값 특성을 다음과 같은 식으로 나타낸다.

개회로계

$$X = GAK_s X \quad (12)$$

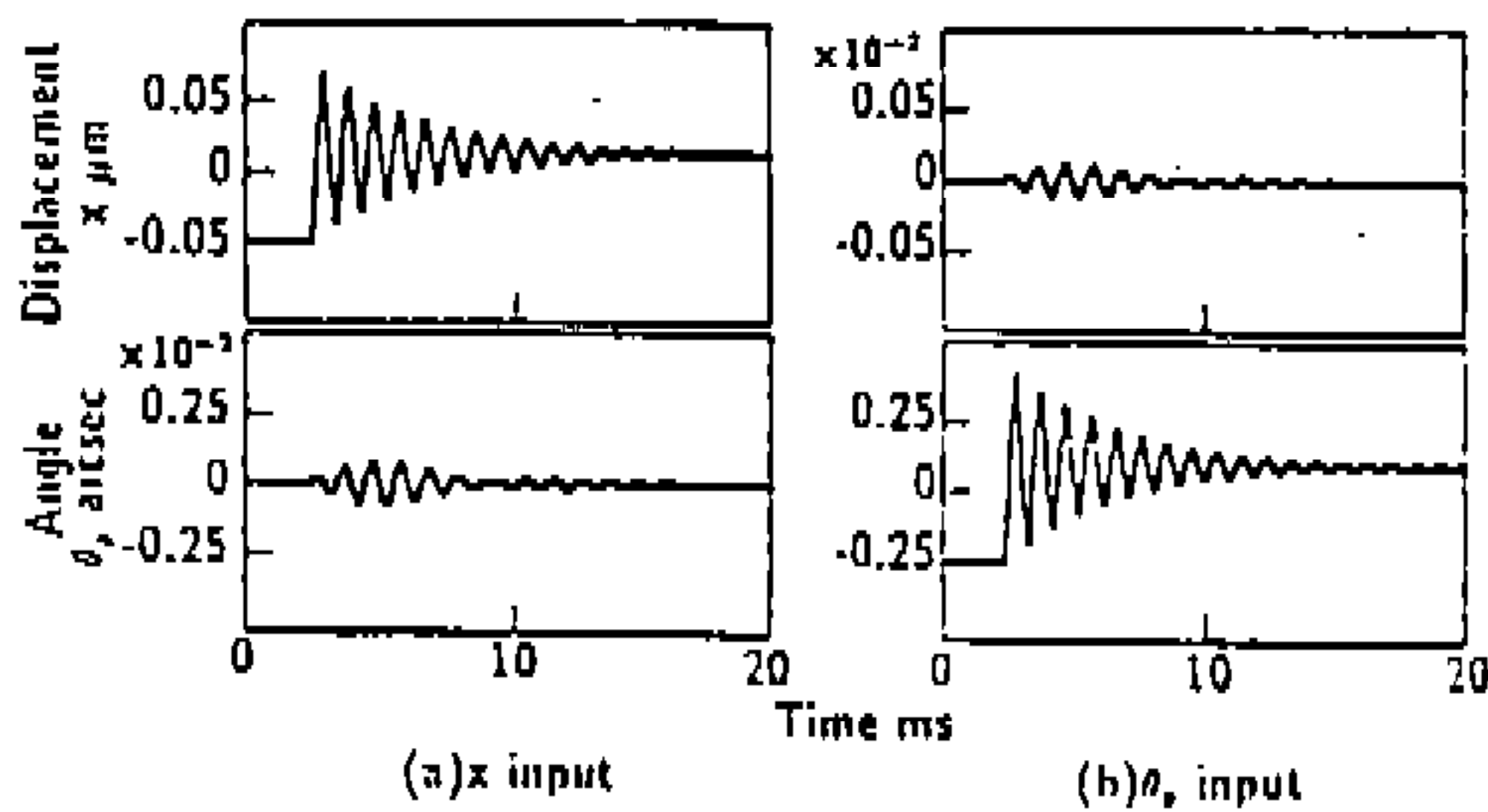


Fig.6 Step responses of open loop control system(Simulation of inserting transfer matrix A')

폐회로계

$$X = \{E + GAX(F_1 + F_2)G_{LPF}\}^{-1} GAF_1 K_s X \quad (13)$$

여기서 K는 센서의 이득(gain)이고 F_1, F_2 는 제어기(Controller), G_{LPF} 는 저역 통과 필터(Low pass filter)의 특성이다. 이 식을 기초로해서 실시한 시뮬레이션 결과를 Fig.6으로 나타낸다.

Fig.6은 개회로시스템응답을 Fig.7은 폐회로시스템 응답을 나타내는데 X방향과 θ_y 방향으로 입력할때의 양방향으로 응답특성을 나타내고 있다. 병진은 0.1 μ m, 회전은 0.5arcsec의 step을 입력하고 있다. 시뮬레이션 결과로부터 알수있듯이 X방향으로 입력할때의 θ_y 응답과 θ_y 방향으로 입력할때의 X방향 응답은 간섭의 모양을 알기 쉽도록 종축의 스케일을 1/100 배로 축소하고 있는것을 보이고 있다. 따라서 시뮬레이션 결과로부터 알 수 있듯이 간섭이 낮아지고 특성 역시 부하질량을 가하기전과 같게됨을 알수있다. 그러므로 부하 질량을 가하지 않은경우의 스텝응답과 거의 일치하고 있다.

이상으로부터 이론적으로 언급된바 있던 운동방정식의 유효함이 확인되었으며 아날로그 회로로 연산을 해서 변환행렬을 이용하는것이 유효함도 추정할수 있을 것으로 본다.

4. 결 론

6자유도 진동모델을 대상으로 질량부하에 기인한 동적 간섭 및 응답변화를 알아보기 위해서

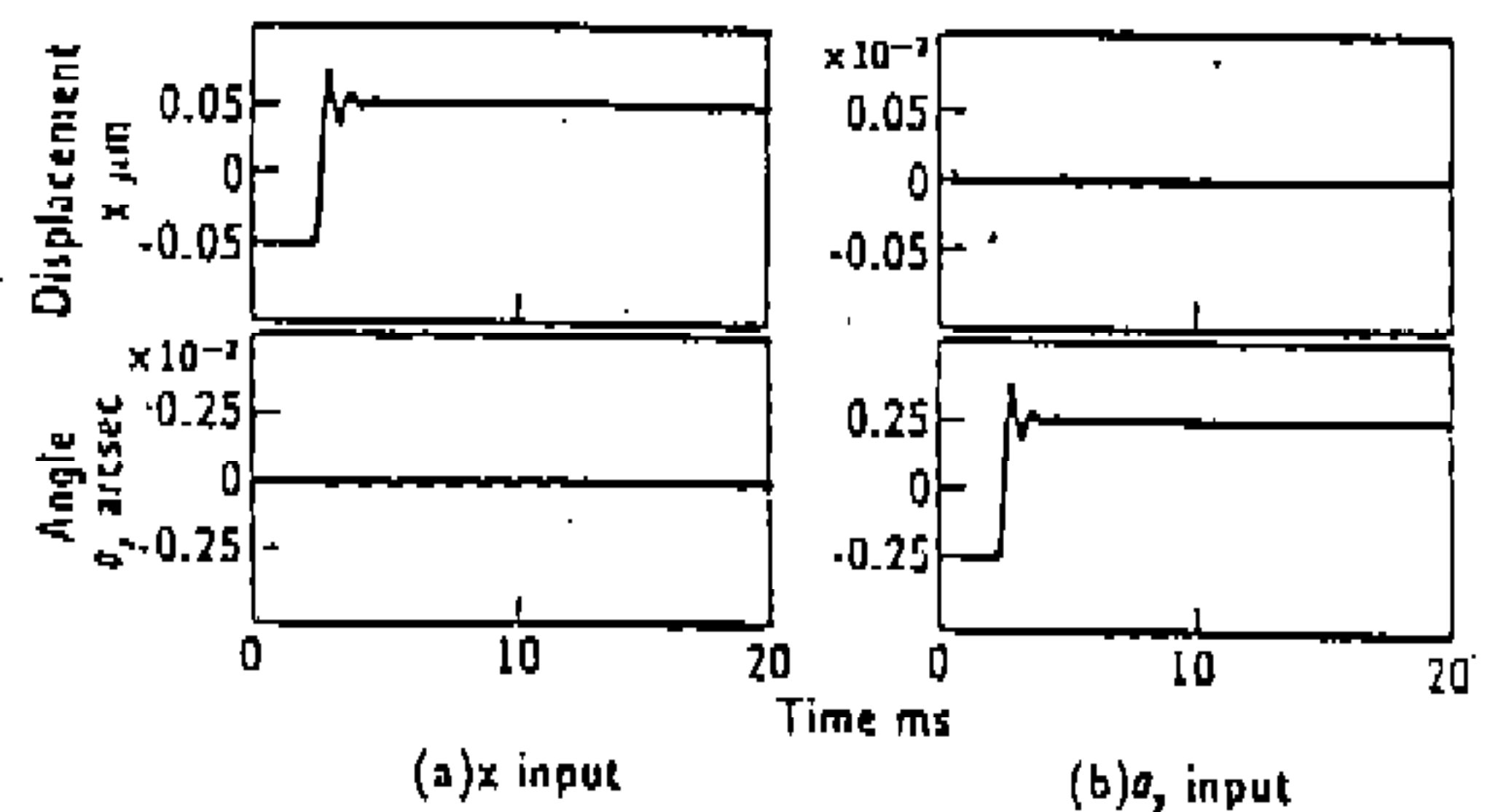


Fig.7 Step responses of closed loop control system(Simulation of inserting transfer matrix A')

검토한 결과는 다음과 같다.

- 1) 대상물에 질량부하를 가한 경우의 병진 1 방향 및 회전 1방향의 2자유도에 관해 실험한 결과 개회로계에 있어서 병진 $0.1\mu\text{m}$ 의 입력에 대해서 0.19 arcsec , 회전 0.5 arcsec 의 입력에 대해서 $0.022\mu\text{m}$ 의 간섭이 생기는것을 확인하여 운동방정식의 정당성을 확인하였다.
- 2) 변환행렬의 연산을 아날로그 회로로 실시한 경우를 임의로 정해서 미분을 불완전 미분으로 할경우의 시뮬레이션 한결과 간섭은 개회로계에 있어서 병진 $0.1\mu\text{m}$ 의 입력에 대해서 $1.7 \times 10^{-3} \text{ arcsec}$, 회전 0.4 arcsec 입력에 대해서 $1.4 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ 로 되었고, 폐회로에 있어서 병진 $0.1\mu\text{m}$ 의 입력에 대해서 $4.2 \times 10^{-4} \text{ arcsec}$, 회전 0.5 arcsec 입력에 대해서 $5.6 \times 10^{-5} \mu\text{m}$ 로 폐회로계의 경우가 양호하게 되었으므로 원래의 응답에 거의 일치함을 확인 하였으며 본 이론이 원칙적으로 유효함을 알수가 있었다.

참 고 문 헌

1. Mori Yama, "Precision machine 50", 4, p.718, 1984.
2. Kouno. E., Ann, "CIRP", 33, 1, p.369, 1984.
3. Patterson, S. R. and Magrab, E. B. "PRECIS. ENG", 7, 3, p.123, 1985.
4. Shimizu. H., "Proc, China-Jpn Symp. Mechatron", p.58, 1988.
5. S. Yamazaki, S. Nakayama, S. Ishihara and S. Sasayama, "High Accuracy X-ray Lithography System", Bull JSPE, 14, 3, p.137, 1980.
6. T. M Lyszczarz, D.C. Flanders, N.P. Economou and P.D. DeGraff, "Experimental Techniques for Multiple Mask Registration", J.Vac. Sci.Technol., 19, 4, p.1214, 1986.
7. H. Shimizu, Y. Takeuchi, H. Inada and T. Sata, "A Basic Study on the Development of a Highly Accurate Rotation Positioning Actuator", JSPE, 88, 9, p.1641, 1989.
8. N. Henmi, S. Wada, H. Aoyama, H. Osada and A. Shimokohbe "A Six-Degrees-of-Freedom Fine Motion Mechanism", JSPE, 55, 4, p.761, 1989.
9. F. E Scire and E. C Teague, "Piezodriven $50\mu\text{m}$ range Stage with Subnanometer Resolution", Rev. Sci. Instrum., 49, 12, p.1735, 1978.
10. H. Aoyama, I. Watanabe and A. Shimokohbe, "Control Mechanism for a High Precision Straight Motion System", IFTOMM, 7th World Congress, p.1477, 1987.
11. H. Ozisik and R. F. Keltie, "Development and Implementation of a High Speed Loop Control Technique for Micro-positioning of Mechanical Structures", JSPE, 58, 4, p.225, 1989.
12. 김재열, "PZT Autuator를 이용한 6자유도 미동기구의 궤적특성에 관한 연구" 대한기계학회 학술강연회, pp.21-28, 1992.
13. 김재열, 오환교, "6자유도 미동기구의 제어특성에 관한 연구", 조선대학교 생산기술연구소, Vol.14, No.2, pp.125-132, 1992.