

## 6 자유도 운동재현기의 다변수 제어기 설계

이호영\* 강지윤 이교일

### A multivariable controller design of 6 DOF motion simulator

Ho-Young Lee\* Ji-Yoon Kang Kyo-Il Lee

Dept. of Mechanical Design and Production Eng.  
Seoul National University

#### ABSTRACT

The Stewart Platform is one example of a motion simulator which generates 6DOF motion in space by six actuators in parallel. The presented control method of 6DOF motion simulator is generally classified into two types, one is SISO and the other is MIMO control type. The SISO control can't compensate for external load variation and different dynamic behavior of 6DOF motion, therefore this type don't control motion precisely. On the other hand, the MIMO control compensates for a interference of 6DOF motion because MIMO controller is designed with 6DOF motion simulator dynamics. But MIMO control of motion simulator has a complexity of 6DOF displacement feedback, because in order to obtain feedback value we must solve the forward kinematics using measurement of cylinder length or design a state estimator, unless measurement of 6DOF displacement is possible.

In this paper, a multivariable controller using  $H_\infty$  optimal control theory is designed to consider a interference of 6DOF motion and to obtain robust, precise control of system. Also in order to solve the mentioned problem of MIMO control, this paper presents a modified MIMO control model which control 6DOF motion by using feedback of measurement of cylinder length.

Key words : 6DOF motion simulator(6자유도 운동재현기), SISO(단일입출력), MIMO(다변수),  $H_\infty$  optimal control( $H_\infty$ 최적제어), cylinder length feedback(실린더 길이 피드백)

#### 1. 서 론

운동재현기는 공간상에서 운용되는 운동체의 조종훈련이나 이들에 장착되는 장비의 개발 및 성능평가를 보다 효과적으로 수행하기 위하여 운동체의 운동을 재현시키는 기구로써, 기구적 특성에 따라 액츄에이터(actuator)가 직렬로 연결된 직렬(cascade)운동방식과 병렬로 연결된 상조(synergistic)운동방식으로 나눌 수 있다. 본 논문의 대상플랫인 스튜어트 플랫폼(Stewart platform)은 비행체 운동을 재현하기 위하여 Stewart<sup>[1]</sup>에 의하여 제안된 상조 운동방식의 운동재현기이며, 근래에 와서 그 응용사례가 다양해지고 있다<sup>[4][5][6]</sup>. Fichter<sup>[2]</sup>는 이러한 병렬운동기구에 대한 기구학 및 동역학적 연구와 스튜어트 플랫폼의 동역학 모델을 제시하였다.

이러한 운동재현기의 기존 제어방식은 크게 단일 입출력제어방식<sup>[3]</sup>과 다변수 제어방식<sup>[4]</sup>으로 구분할 수 있다. 액츄에이터인 실린더 하나에 대하여 등가질량을 고려한 모델을 바탕으로 제어기를 구성하고 이를 제어에 사용하는 단일 입출력제어방식은 운동재현기의 동특성이 고려되지 않았으므로 실린더간의 상호간섭에 의한 6자유도 운동의 간섭을 보상해 줄 수 없다. 따라서 대용량의 부하를 고속정밀하게 제어하기가 어렵다. 이에 비해, 운동재현기의 동특성을 고려한 다변수 제어방식은 액츄에이터에 가해지는 외부부하 변화를 보상해 줄 수 있으므로 운동간의 간섭을 줄일 수 있고 정밀한 제어가 가능해 진다. 하지만 다변수 제어방식은 6자유도 운동을 직접 제어하게 되므로 6자유도 범위 측정이 가능해야 하며, 측정이 불가능할 경우 쉽게 측정되는 실린더 길이로부터 6자유도 범위를 구하는 순기구학(forward kinematics)을 풀거나 상태변수 추정기(state estimator)를 사용하여 6자유도 범위를 추정해야 하는 구조적인 복잡함을 가지고

있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 다음과 같이 고려하였다. 운동재현기를 고속정밀하게 제어하기 위해 다변수 제어모델을 사용하였고, 적용 대상 플랫에서는 Fig.5와 같이 실제 측정값인 실린더 길이를 피드백으로 하는 제어모델을 구성하여 6자유도 운동제어에 용융할 수 있도록 하였다. 또한, 시스템이 갖고 있는 모델링 오차, 작동점자를 벗어난 운동 영역에서의 비선형성, 측정오차 및 외란 등의 불확실성에 대하여 페루프 안정성을 유지하고 성능을 최적화시키는 건설한 제어가 필요하며, 본 논문은 이러한 목적에 따라 선형  $H_\infty$  제어이론을 사용하였다.

#### ■ 본문에서 사용한 표기법

$\bar{U}$	: 정규화된 Plücker 좌표계
${}^A\bar{S}_i, {}^B\bar{S}_i$	: 각 좌표계에 대한 실린더의 정규화된 방향벡터
${}^A\bar{M}_i$	: 플랫폼좌표계로 기술된 실린더의 정규화된 모멘트벡터
${}^B\bar{B}_i$	: 베이스 좌표계에서의 베이스 조인트 좌표
${}^B\bar{P}_i$	: 플랫폼 좌표계에서의 플랫폼 조인트 좌표
$L_i$	: 실린더 길이
$R_B^t$	: 회전변환 행렬 (플랫폼좌표계를 베이스좌표계로 변환)
$R$	: 회전변환행렬( $= \begin{bmatrix} cpcy & sy & 0 \\ -cpsy & cy & 0 \\ sp & 0 & 1 \end{bmatrix}$ )
$cp, sp$	: cosine (p), sine (p)
${}^B\bar{r}_{box}$	: 선형변위 벡터( $= [Sg \ Sw \ He]^T$ )

${}^B a$	: 베이스좌표계로 기술된 플랫폼의 가속도벡터 (= [ ${}^B Sg$ ${}^B Sw$ ${}^B He$ ]')
$f_i$	: 각 실린더의 구동력
${}^B g$ , ${}^B \vec{g}$	: 각 좌표계에 대한 중력벡터
$I_p$	: 플랫폼 회전관성모멘트(moment of inertia) 행렬
${}^B \vec{\omega}$	: 플랫폼좌표계로 기술된 플랫폼의 회전각속도 (= [ ${}^B \omega_x$ ${}^B \omega_y$ ${}^B \omega_z$ ]')
${}^B \vec{\omega}$	: 플랫폼좌표계로 기술된 플랫폼의 회전각속도 (= [ ${}^B \omega_x$ ${}^B \omega_y$ ${}^B \omega_z$ ]')
${}^B H_G$	: 플랫폼좌표계에 대한 각운동량 (= $I_p {}^B \vec{\omega}$ )
$({}^B \vec{H}_G)_{Gxz}$	: 플랫폼좌표계에 대한 각운동량의 변화량 (= $I_p {}^B \vec{\omega}$ )
$\dot{x}_p$	: 실린더 길이방향 속도
$K_d, K_d$	: 유량이득(flow gain)
$K_{d1}, K_{d2}$	: 유량압력계수(flow-pressure coefficient)
$A_1, P_1$	: 실린더 하부 단면적, 압력
$A_2, P_2$	: 실린더 상부 단면적, 압력
$x_c$	: 밸브스풀의 변위
$K_m$	: 밸브 이득
$m$	: 플랫폼 질량
$i$	: 서보밸브에 인가되는 전류
$z_0$	: 중립위치에서의 높이

## 2. 운동재현기의 모델링 및 선형화

### 2.1 좌표계 정의 및 플랫폼 6자유도변위 정의

Fig.1는 하부에 고정된 베이스(base)와 6자유도 운동을 재현시키는 플랫폼(platform), 그리고 액츄에이터로 사용되는 6개의 편도로 유압실린더로 구성된 운동재현기의 구조를 나타내고 있다. 베이스에는 고정좌표계인 GXYZ직각좌표계를 사용하고, 플랫폼에는 플랫폼에 고정된 Gxyz직각좌표계를 사용한다. 그리고 각 실린더의 운동을 쉽게 기술하고, 이것을 바탕으로 6자유도 운동을 간결하게 나타내기 위해 직선좌표계의 하나인 Plucker좌표계를 사용한다.

이상과 같이 정의된 좌표계를 사용하여 플랫폼의 6자유도 운동인 3개의 선형변위와 3개의 각변위를 다음 Fig.2와 같이 나타낼 수 있다.

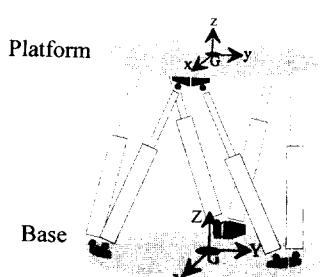


Fig.1 Stewart Platform

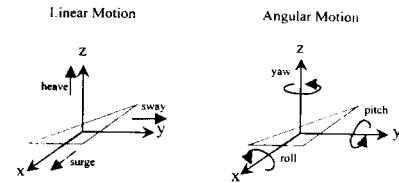


Fig.2 Definition of 6 DOF displacement

플랫폼의 6자유도변위의 정의에 따라 GXYZ 좌표축과 Gxyz 좌표축사이의 벡터관계식은 다음과 같다.

$${}^B \vec{r} = R_B^p {}^p \vec{r} + {}^B \vec{r}_{pos}$$

### 2.2 운동재현기의 운동방정식

6개의 액츄에이터가 플랫폼에 작용하는 힘을  $F_i$ 라 하고, 자중에 의한 중력을  $F_G$ 로 나타내면 플랫폼의 자유물체도로부터 힘과 모멘트 평형방정식을 세울 수 있으며, 플랫폼의 6자유도 운동에 대한 운동방정식을 유도할 수 있다.

#### ▶ 플랫폼의 힘 평형식

플랫폼의 힘 평형방정식을 플랫폼 좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^6 {}^B \vec{F}_i + {}^B \vec{F}_G = {}^B \vec{F}_I \quad (1)$$

$$\text{여기서 } \sum_{i=1}^6 {}^B \vec{F}_i = \sum_{i=1}^6 {}^B \vec{S}_i f_i, \quad {}^B \vec{F}_G = m {}^B \vec{g}, \quad {}^B \vec{F}_I = m {}^B \vec{a}$$

실제 선형운동의 기술은 베이스 고정좌표계로 나타내므로 다음과 같이 벡터변환을 통하여 베이스 좌표계로 나타낸다.

$$R_B^p (\sum_{i=1}^6 {}^B \vec{F}_i + {}^B \vec{F}_G) = R_B^p {}^B \vec{F}_I \quad (2)$$

$$R_B^p (\sum_{i=1}^6 {}^B \vec{S}_i f_i) = \sum_{i=1}^6 R_B^p {}^B \vec{S}_i f_i = \sum_{i=1}^6 {}^B \vec{S}_i f_i$$

$$R_B^p {}^B \vec{F}_G = m {}^B \vec{g}, \quad R_B^p {}^B \vec{F}_I = m {}^B \vec{a}$$

#### ▶ 플랫폼의 모멘트 평형식

플랫폼의 회전운동은 모멘트 평형방정식으로부터 표현할 수 있으며, 플랫폼 좌표계의 원점을 기준으로하여 나타내면 다음과 같다.

$$\sum \vec{M}_G = \vec{H}_G \quad (3)$$

$$\text{여기서 } \sum \vec{M}_G = \sum_{i=1}^6 {}^B \vec{M}_i f_i$$

$$\vec{H}_G = ({}^B \vec{H}_G)_{Gxy} + {}^B \vec{\omega} \times {}^B \vec{H}_G = I_p {}^B \vec{\omega} + {}^B \vec{\omega} \times (I_p {}^B \vec{\omega})$$

위의식(2),(3)으로부터 다음과 같은 운동방정식을 유도할 수 있다.

$$mSg = \sum_{i=1}^6 {}^B S_u f_i = \sum_{i=1}^6 \left[ \frac{[Sg - {}^B B_u + cpcy {}^B P_o - cpy {}^B P_g + sby {}^B P_a]}{L_i} \right] f_i$$

$$mSw = \sum_{i=1}^6 {}^B S_o f_i = \sum_{i=1}^6 \left[ \frac{[Sw - {}^B B_o + (srypcy + crsy) {}^B P_a + (-srypsy + crsy) {}^B P_o - srcp {}^B P_a]}{L_i} \right] f_i$$

$$mHe = \sum_{i=1}^6 {}^B S_u f_i - mg \\ = \sum_{i=1}^6 \left[ \frac{[He + z_0 - {}^B B_u + (-crspcy + srzy) {}^B P_o + (crspay + srzy) {}^B P_o + crcp {}^B P_a]}{L_i} \right] f_i - mg$$

$$I_{px} \dot{x} = \sum_{i=1}^6 {}^B M_u f_i = \sum_{i=1}^6 [{}^B P_o {}^B S_u - {}^B P_u {}^B S_o] f_i$$

$$I_{py} \dot{p} = \sum_{i=1}^6 {}^B M_o f_i = \sum_{i=1}^6 [-{}^B P_u {}^B S_u + {}^B P_o {}^B S_o] f_i$$

$$I_{pz} \dot{y} = \sum_{i=1}^6 {}^B M_u f_i = \sum_{i=1}^6 [{}^B P_o {}^B S_u - {}^B P_u {}^B S_o] f_i \quad (4)$$

다음은 입력변수를 유압시스템 모델링식과 기구학을 이용하여 각 실린더의 구동력으로부터 서보밸브에 인가되는 전류로 만들

고 출력을 각 질린더 길이로 만든다.

#### ▶ 입력변수

입력변수인 액츄에이터 작용력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_1 \Delta P_1 - A_2 \Delta P_2 = \Delta f$$

유압시스템의 유량방정식, 연속방정식과 운동재현기의 기구학을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta f &= \left( \frac{A_1 \cdot K_{gl}}{K_{c1}} + \frac{A_2 \cdot K_{gl}}{K_{c2}} \right) x_r - \left( \frac{A_1^2}{K_{c1}} + \frac{A_2^2}{K_{c2}} \right) x_p \\ &= K_1 \cdot x_r - K_2 \cdot x_p \\ &= K_1 K_{sr} i - K_2 \cdot x_p \end{aligned} \quad (5)$$

•  $x_p$ 의 상태변수 변화

$$\begin{aligned} \dot{x}_p &= L_i \\ L_i &= \begin{bmatrix} {}^B S_{ix} \\ {}^B S_{iy} \\ {}^B S_{iz} \end{bmatrix}' R_B^{-1} \begin{bmatrix} \dot{S}_g \\ S_w \\ H_e \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} ({}^B P_{ix} {}^B S_{iz} - {}^B P_{ix} {}^B S_{iy}) \\ ({}^B P_{ix} {}^B S_{ix} - {}^B P_{ix} {}^B S_{iz}) \\ ({}^B P_{ix} {}^B S_{iy} - {}^B P_{iy} {}^B S_{iz}) \end{bmatrix}' R \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{p} \\ y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

#### ▶ 출력변수

질린더 길이는 플랫폼이 움직였을 때 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} L_i &= \| {}^B \vec{S}_i \| \\ \frac{\partial L_i}{\partial \dot{x}_k} &= \frac{\partial \| {}^B \vec{S}_i \|}{\partial \dot{x}_k}, \quad k=1, \dots, 12 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $\| {}^B \vec{S}_i \| = [({}^B \vec{S}_i')' ({}^B \vec{S}_i')]^{1/2}$

### 2.3 운동방정식의 선형화

$$\bullet \text{초기 상태 : } f_0 = mg \frac{L_0}{6z_0}, \quad f_{bi} = f_0, \quad i=1 \dots 6$$

• 작동점 : 중립위치에서 6자유도 운동 및 변위를  
작동점으로하여 선형화

$$Sg_0 = Sw_0 = r_0 = p_0 = y_0 = 0, \quad He_0 = z_0$$

$$\dot{S}g_0 = \dot{Sw}_0 = \dot{He}_0 = \dot{r}_0 = \dot{p}_0 = \dot{y}_0 = 0$$

• 식(4)를 선형화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bullet mSg &= \sum_{i=1}^6 \frac{-{}^B B_{ix} + {}^B P_{ix}}{L_0} \Delta f_i \\ \bullet mSw &= \sum_{i=1}^6 \frac{-{}^B B_{iy} + {}^B P_{iy}}{L_0} \Delta f_i \\ \bullet mI\ddot{r} &= \sum_{i=1}^6 \frac{z_0}{L_0} \Delta f_i \\ \bullet I_{pix}\dot{r} &= \sum_{i=1}^6 {}^B P_{ix} \frac{z_0}{L_0} \Delta f_i \\ \bullet I_{pix}\dot{p} &= -\sum_{i=1}^6 {}^B P_{ix} \frac{z_0}{L_0} \Delta f_i \\ \bullet I_{pix}\dot{y} &= \sum_{i=1}^6 \frac{[{}^B P_{iy} {}^B B_{ix} - {}^B P_{ix} {}^B B_{iy}]}{L_0} \Delta f_i \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)을 이용한 상태방정식은 다음과 같다<sup>[8]</sup>.

$$\dot{x} = Ax + B \Delta f \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \\ I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_{ij}, i, j = 1 \dots 6 \\ \cdots \\ 0_{6 \times 6} \end{bmatrix}$$

• 식(6)의 선형화

$$\begin{aligned} \dot{L}_i |_{op} &= \dot{x}_p |_{op} \\ &= [{}^B S_{ix0} {}^B S_{iy0} {}^B S_{iz0}] \begin{pmatrix} \dot{S}g \\ Sw \\ He \end{pmatrix} \\ &+ [{}^B M_{ix0} {}^B M_{iy0} {}^B M_{iz0}] \begin{pmatrix} \dot{r} \\ \dot{p} \\ y \end{pmatrix} \\ &= H [Sg \ Sw \ He \ \dot{r} \ \dot{p} \ y]' \end{aligned} \quad (10)$$

#### ▶ 식(7)의 선형화

$$L_i = \left( \frac{1}{L_0} \right) \left[ \frac{\partial ({}^B \vec{S}_i)}{\partial \dot{x}_k} \right]_{op} x, \quad x = [x_1, \dots, x_{12}]'$$

$$y = L_i$$

$$\begin{aligned} &= \begin{bmatrix} 0_{6 \times 6} \\ {}^B P_{ix} - {}^B B_{ix} \\ {}^B P_{iy} - {}^B B_{iy} \\ z_0 \\ {}^B P_{iy} z_0 \\ - {}^B P_{ix} z_0 \\ {}^B P_{ix} {}^B B_{ix} - {}^B P_{iy} {}^B B_{iy} \end{bmatrix} x \\ &= C_n x \end{aligned} \quad (11)$$

위와 같은 식(5),(8),(10),(11)을 이용하면 본 논문에서 다루고자 하는 제어모델을 구성할 수 있으며, (9)식을 이용하여 다음과 같은 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B \Delta f \\ &= Ax + B (K_1 \cdot K_{sr} \cdot i - [K_2 H \ 0_{6 \times 6}] x) \\ &= (A - B [K_2 H \ 0_{6 \times 6}]) x + B K_1 K_{sr} i \\ &= A_n x + B_n u \end{aligned} \quad (12)$$

$$y = C_n x$$

여기서 입력·출력변수, 상태변수는 다음과 같다.

$$x = [S_g \ S_w \ H_e \ \dot{r} \ \dot{p} \ y \ S_g \ S_w \ H_e \ r \ p \ y]'$$

$$u = [i_1 \ i_2 \ i_3 \ i_4 \ i_5 \ i_6]'$$

$$y = [L_1 \ L_2 \ L_3 \ L_4 \ L_5 \ L_6]'$$

### 3. 제어기 설계

6자유도 운동재현기의 기준 제어방식은 Fig.4에서 잘 나타나 있다. 서론에서 그 문제점을 지적하였다.

본 논문에서 제시한 모델은 Fig.5에서 볼 수 있듯이 측정하기가 비교적 경제적이고 쉬운 질린더 길이를 제어모델의 피드백으로 사용하여 다변수 제어를 가능하게 하였다는 점에서 기존의 다변수 제어방식을 보다 간략화 할 수 있다.

### 3.1 $H_\infty$ 제어기 설계

일반적인  $H_\infty$ 문제를 적용하기 위해서 Fig.6와 같은 블럭다이아그램을 통하여 명령추종과 외란에 대한 출력, 기준입력에 대한 제어입력의 전달함수를 구하여 분석하고 이를 바탕으로 Fig.7와 같은 표준문제로 재구성할 수 있다. 여기에 특정주파수대역에서 바람직한 성능을 가지도록 가중함수(weighting function)를 선정하고 이를 설계과정에 반영하므로 시스템의 특이치선도를 바람직한 형상으로 형성시킬 수 있다. 본 논문에서는  $H_\infty$ 제어기를 구성하기 위하여 상용화되어져 있는 시뮬레이션 프로그램인 Matlab의  $\mu$ -toolbox를 사용하였다.

#### ■ Mixed Sensitivity Problem Formulation

Fig.6로부터 다음과 같은 문제정의를 할 수 있다.

▶ 외란제거 :

$$\frac{y}{d} = \frac{e}{r} = S(s) = (I+GK)^{-1}$$

$$e_f = W_e e = W_e(I+GK)^{-1}r = W_e(s)S(s)r$$

여기서  $S(s)$  : 민감도 함수(sensitivity function)

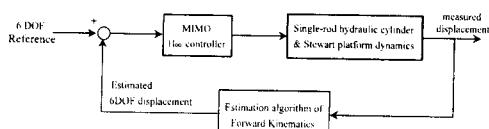
▶ 명령추종 :

$$\frac{y}{r} = \frac{y}{e} = T(s) = GK(I+GK)^{-1}$$

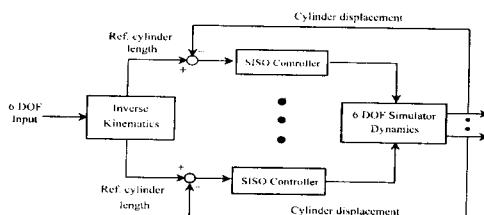
$$y_f = W_y G(I+GK)^{-1}r = W_y(s)T(s)r$$

여기서

$T(s)$  : 보민감도 함수(complementary sensitivity function)



(a) MIMO control structure



(b) SISO control structure

Fig.4 Presented control types of 6DOF motion simulator

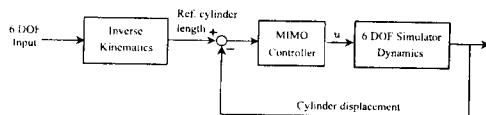


Fig.5 The proposed MIMO control type in this paper

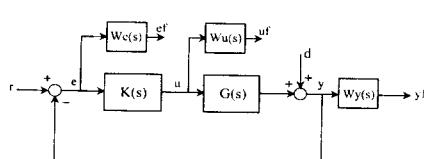


Fig.6 System block diagram with weighting function

▶ 제어 입력 :

$$\frac{u}{r} = \frac{u}{e} = K(I+GK)^{-1}$$

$$u_f = W_e u = W_e K(I+GK)^{-1}r$$

위의 사항을 다음과 같은 표준 문제로 만들 수 있으며, 이 모델을 사용하여  $H_\infty$ 제어기를 구성할 수 있다.

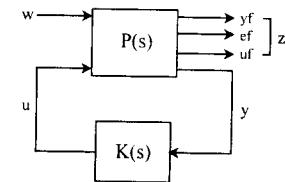


Fig.7 Standard form

$$\begin{aligned} z &= \begin{bmatrix} e_f \\ u_f \\ y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_e & (I+GK)^{-1} \\ W_u K & (I+GK)^{-1} \\ W_y G & (I+GK)^{-1} \end{bmatrix} r \\ &= T_{zw} r \end{aligned}$$

여기서  $P(s)$ 는 Lower Linear Fractional Transformation(LLFT)에 의하여 다음과 같이 표현되어진다.

$$\begin{aligned} P(s) &= \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \\ F_l(P, K) &= P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21} \\ P_{11} &= \begin{bmatrix} W_e \\ 0 \end{bmatrix}, P_{12} = \begin{bmatrix} -W_e G \\ W_u G \\ W_y G \end{bmatrix}, P_{21} = I, P_{22} = -G \end{aligned}$$

결국  $\|T_{zw}\|$ 을 최소화하는 최적화문제가 되며,  $\|T_{zw}\|_\infty$ 를 최소화함으로써 제거하고자 하는 항들의 영향을 최소화할 수 있다.

### 3.2 가중함수 선정

$H_\infty$ 제어이론을 이용한 견실한 제어기의 설계는 상용화된 소프트웨어들을 사용하므로써 보다 접근방법이 용이하여졌지만, 가중함수의 선정문제는 늘 남아있게 된다.

이러한 측면에서 가중함수 선정은 시스템 성능에 있어서 매우 중요한 요소가 되며 가중함수를 이용하여 주파수영역에서 성능에 관계되는 시스템의 전달함수 루프(loop)를 바람직한 형상으로 형성시킬 수 있다[1][2].

#### ▶ 가중함수 $W_e(s)$ 와 $W_y(s)$ 을 선정

$W_e(s)$ 는 외란으로부터 출력까지의 전달함수(=기준입력으로부터 예리신호까지의 전달함수), 즉 외란제거성능에 관계된 민감도함수에 가중치를 줄 수 있다. 주로 저주파영역에서 민감도함수의 기울기를 크게 만들어 줌으로써 외란에 대해 더욱 견실함을 가지도록 설계하는 것이 바람직하다. 본 시스템에서 3차의 가중함수를 사용한 경우 저주파대역에서 40dB 기울기의 민감도함수를 설계할 수 있으나, 그로인해 약 20% 오버슈트를 동반하게 되며 용답특성에서 오버슈트가 없는 것이 시스템의 성능면에서 바람직하므로 적합하지 않다.

$W_y(s)$ 는 명령추종성능과 고주파영역에서의 노이즈 제거에 관계된 보민감도 함수에 주파수 영역의 가중치를 주므로 시스템의 대역폭을 개선시킬 수 있지만 민감도 함수와의 철총(trade-off)문제로 인해 역시 제한되어진다.

본 논문에서 설계에 이용한 가중함수는 Fig.9와 같으며 다음과 같은 2차 함수로, 저주파영역에서 민감도 함수의 기울기를 20dB, 대역폭은 12Hz로 설계하였다.

$$W_e = \text{gain1} \frac{s^2 + cw_1s + dw_1}{s^2 + aw_1s + bw_1}$$

$$W_y = \text{gain3} (s^2 + cw_3s + dw_3)$$

#### ▶ 가중함수 $W_u(s)$ 의 선정

$W_u(s)$ 는 기준입력으로부터 제어입력까지의 전달함수에 주는 가중치가 되며, 제어입력에 주파수영역의 가중치를 줌으로써 기준입력으로부터 제어입력까지의 전달함수가 가지는 최대특이치를 낮출 수 있다.

하지만 제어입력에 가중함수를 주면 민감도 함수인  $S(s)$ 와의 결합이 이루어 진다. 여기서는 대역폭이후의 고주파대역에서 제어입력 포화를 고려하여 기울기를 -20dB되게 주었다.

$$W_u = \text{gain2} \frac{s^2 + cw_2s + dw_2}{s^2 + aw_2s + bw_2}$$

#### 4. 시뮬레이션 결과 분석

선형모델과 가중함수  $W_u(s)$ 와  $W_v(s)$ 를 사용하여  $H_\infty$ 제어기를 구성하고 선형·비선형모델에 대하여 시뮬레이션을 하였으며, 다음과 같은 결과를 볼 수 있다.

우선 개별로 전달함수의 특이치신도인 Fig.8을 보면 각 실린더의 동특성이 고주파영역에서 차이가 남을 볼 수 있고, 이것은 고주파대역에서 시스템의 제어가 까다롭다는 것을 말한다. 따라서 설계된 제어기는 이런 상이한 동특성을 고려할 수 있어야 하며, 이런 사실은 Fig.9, Fig.10에서 잘 볼 수 있다. Fig.10은 가중함수를 사용하여 특정주파수영역에서 시스템의 전달함수 형상을 고려할 수 있음을 나타내고 있으며 제어입력에 대한 가중함수를 추가하였을 때 그 영향을 Fig.11에서 볼 수 있다. 또한 다변수 모델을 사용하여 운동간의 간섭을 줄이려고 했던 의도는 Fig.14에서 보듯이 선형모델을 사용한  $H_\infty$ 제어의 경우 선형운동에 대한 각운동이 거의 나타나지 않음을 볼 수 있다. 비선형 시뮬레이션에서는 선형시뮬레이션과는 차이가 있었지만 그 경향은 비슷하였다. 기준입력의 추종성능은 만족할 만 하며, 대략 1Hz정도로 큰 간섭없이 잘 추종함을 볼 수 있으며, 전보드 유압실린더 모델링에서 팽창과장을 기준모델로 설정하였기 때문에 수축과정에서의 성능이 약간 떨어짐을 확인 할 수 있다. 운동간의 간섭은 선형시뮬레이션과는 달리 운동간의 간섭에 대한 보상이 이루어지지 않았는데 이것은 중립위치를 작동점으로 하여 선형화함에 따라 이 범위를 벗어난 운동상태에서 비선형성의 영향이 큼을 볼 수 있다. 또한 액츄에이터의 상이한 동특성이 고주파영역에서 나타나기 때문에 사용범위가 되는 대역폭 내에서는 운동간의 간섭문제에 있어서 다변수제어의 효과가 나타나지 못하였다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 6자유도 운동재현기의 기존 제어방식이 가지고 있는 문제에 대하여 개선된 다변수 제어모델을 제시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 단일 출력제어가 모델 자체에서 가지게 되는 운동간의 간섭문제를 다변수 모델을 사용하여 고려하였다.
- 측정되는 실린더 길이를 피드백하여 다변수제어가 가능하도록 다변수모델을 개선하였다.
- 제시된 다변수 제어방식을 사용하여 시뮬레이션을 한 결과 만족스러운 성능을 얻을 수 있었으나, 간섭의 영향에 대한 보상은 미비하였다.

#### 참고문헌

1. Stewart D., "A Platform with Six Degrees of Freedom", Proc. of the Institute of Mechanical Engineers, vol.180, part2, no.15, pp371-386, 1965-66
2. Fichter E.F., "A Stewart Platform-Based Manipulator: General Theory and Practical Construction", The Int.J.of Robotics Research, vol.5, no.2, pp157-182, 1986
3. D.W. Repperger, M.Z. Huang, R.G. Roberts, "Dynamic Controller Design for a Fixed Based Motion Simulator", Proc.of the ACC,Baltimore,Maryland,pp2298-2302,1994
4. Z.J. Geng, L.S. Haynes, "Six Degree-of-Freedom Active

Vibration control using the Stewart Platforms", IEEE Trans. on Control Systems Technology, vol.2, no.1, pp45-53, March 1994

5. N. Mimura, Y. Funahashi, "A New Analytical System Applying 6 DOF Parallel Link Manipulator for Evaluating Motion Sensation", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp227-233, 1995
6. J. Schiehlen, E.D. Dickmanns, "Design and control of a Camera Platform for Machine Vision", Intelligent Robots and Systems, 1994
7. J.C.Doyle, G.Stein, "Multivariable Feedback Design: Concepts for a Classical/Modern Synthesis", IEEE Trans. on Automatic control, vol.26, no.1, pp4-16, February 1981
8. 정 규홍, "  $H_\infty$  최적제어이론을 이용한 6자유도 운동재현기의 다변수 견실제어에 관한 연구", 서울대학교 공학박사학위 논문, 1993
9. M.Green, J.N.Limebeer, Linear Robust Control, Prentice Hall,1995
10. J.M. Maciejowski, Multivariable Feedback Design, Addison Wesley, 1989
11. V.Kneppová, U.Kiffmeier, H.Unbehauen, " WEIGHTING FUNCTION SELECTION IN  $H_\infty$ -OPTIMAL CONTROL WITH APPLICATION TO A THYRISTOR-DRIVEN DC-MOTOR ", Proc. of the ACC, Seattle,Washington,1995
12. C.D. Yang, "Experimental Design of  $H_\infty$  Weighting Functions for Flight Control Systems", Proc.of the ACC,Baltimore,Maryland,1994

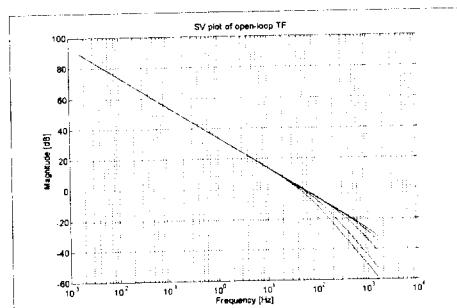


Fig.8 Open loop singular value plot

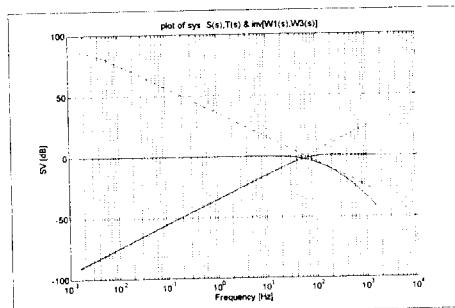


Fig.9  $|W_u(s)|^{-1}$ ,  $|W_v(s)|^{-1}$  and  $S(s)$ ,  $T(s)$  plot

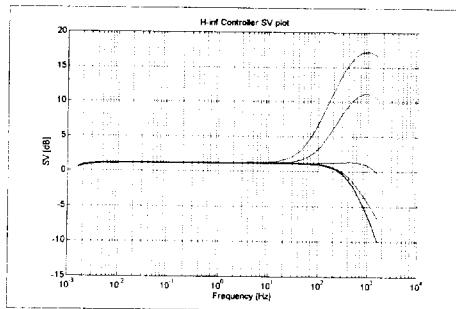


Fig.10  $H_\infty$  controller singular value plot

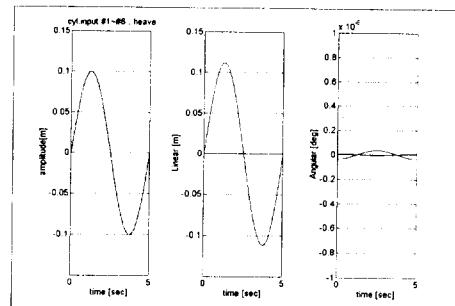


Fig.14 Cylinder length ref. 0.1m - sine input  
[linear,angular motion]

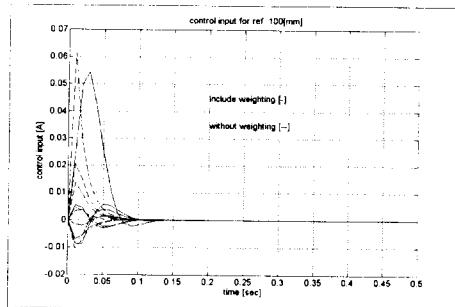


Fig.11 Control input : include weighting or not

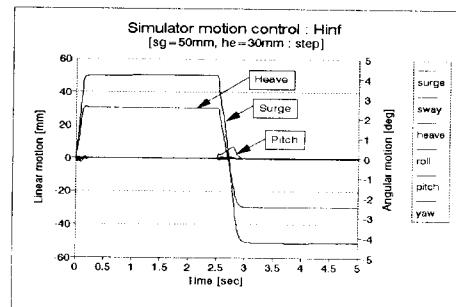


Fig.15 nonlinear simulation : step input  
[Sg=50mm, He=30mm]

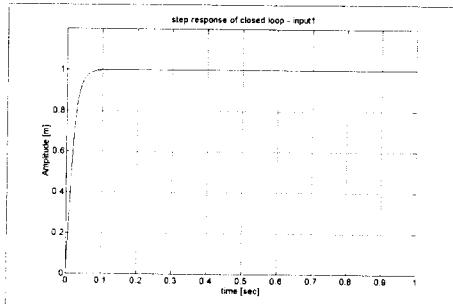


Fig.12 Step response

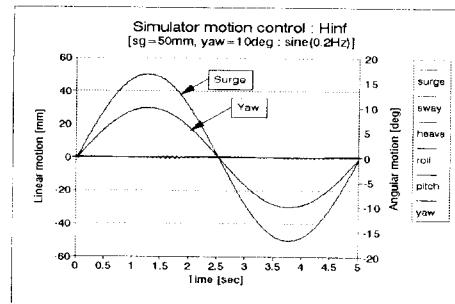


Fig.16 nonlinear simulation : sine input  
[Sg=50mm, Yaw=10deg, 0.2Hz]

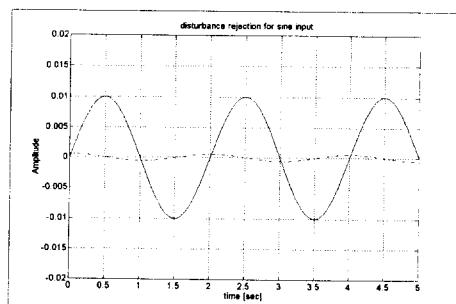


Fig.13 Disturbance rejection : sine input

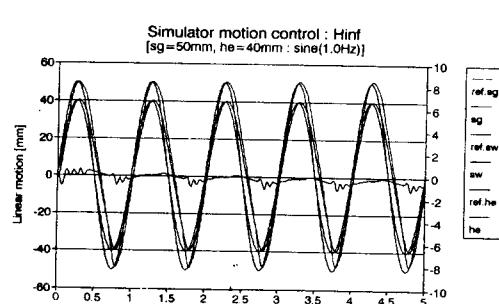


Fig.17 nonlinear simulation : sine input  
[Sg=50mm, he=40mm, 1.0Hz]