

힘반영 원격조작 매니플레이터의 안정성에 대한 연구

차동혁 박영수 조형석
한국과학기술원 생산공학과

A Study on the Stability of Bilaterally Controlled Tele-manipulator

Dong Hyuk Cha, Young Soo Park and Hyung Suck Cho
Department of Production Engineering
Korea Advanced Institute of Science and Technology

ABSTRACT

In this paper, the stability analysis for the bilateral control of tele-manipulator is considered. Two-port network model is used to describe the tele-manipulator system. The stable conditions are derived using impedance matrix and passive network theory for two different types of bilateral control scheme. It is also shown that such conditions can be successfully applied to the n-d.o.f tele-manipulator system in which the kinematics and dynamics of master and slave manipulators are different.

1. 서론

원격조작 매니플레이터는 원자력 발전소, 심해, 우주공간등 인간이 직접 작업을 할 수 없는 위험한 지역에서 여러가지 작업을 수행하기 위해 이용된다. 원격조작 매니플레이터는 작업자에 의해 조작되는 마스터암(master arm)과 실제 작업을 수행하는 슬레이브암(slave arm)으로 구성된다.

원격조작(telemanipulation)은 원자력 발전소에서 위험물질을 취급하기 위한 동기에서 시작되었으며, 농축된 방사능 물질을 취급하기 위해 R. Goertz가 최초의 기계식 master/slave manipulator(M.S.M)를 개발하였다. 케이블로 구동되는 이기계식 M.S.M의 이용가능 거리는 한정되어 있으므로 이를 극복하기 위해 기계적이 아니라 전기적으로 연결된 H.S.M이 등장하게 되었다.

전기적으로 연결된 M.S.M은 두가지 제어형태로 나눌 수 있는데 힘의 피이드백없이 개회로(open loop)로 제어하는 단방향(unilateral) 제어와, 슬레이브암이 받는 힘을 피이드백하여 이것을 작업자가 직접 느껴서 작업상을 향상시킬 수 있도록 폐회로(closed loop)로 제어하는 힘반영(또는 양방향, bilateral)제어가 있다.

힘반영 제어방식은 반력을 주는 방법에 따라 위치/위치(position/position) 방식, 위치/힘(position/force) 방식, 위치+힘/위치+힘(position+force/position+force)방식으로 나눌 수 있다. [1] 위치/위치 방식은 마스터암과 슬레이브암의 위치 편차에 비례하는 힘을 반력으로 전달하며, 위치/힘 방식은 슬레이브암이 받는 힘을 반력으로 전달하고, 위치+힘/위치+힘 방식은 위치/위치 방식에 힘계환 루프를 더한 것이다.

힘반영 원격조작 매니플레이터를 안정성의 관점에서 해석한 것은 최근에서야 이루어졌다. HannaFord등[2]은 위치/힘 방식의 M.S.M의 안정성을 주파수 영역에서 연구하였으며, Dudragna등[3]은 기준 임피던스 모델을 추종하는 M.S.M이 안정하기 위한 기준 모델의 조건을 제시하였으며, Raju등[4]은 위치/위치 방식의 M.S.M의 안정조건을 임피던스 행렬을 이용하여 구하였고, Anderson등[5]은 위치/힘 방식의 M.S.M에서 시간지연이 존재해도 안정성을 보장할 수 있는 제어방식을 제시하였다.

본 논문에서는, 1 자유도의 M.S.M시스템에서 임피던스 행렬을 이용하여 마스터암과 슬레이브암 사이에 임의의 속도전달비 및 힘전달비 존재하는 경우의 위치/위치 및 위치+힘/위치+힘 방식의 안정조건을 구하고, 이것을 n자유도의 매니플레이터로 구성되는 M.S.M시스템의 경우로 확장하고자 한다.

2. 원격조작 매니플레이터의 구성 및 모델

1) 원격조작 매니플레이터 시스템의 구성

원격조작 매니플레이터 시스템은 크게 작업자(human operator)와 마스터 슬레이브 매니플레이터(M.S.M), 그리고 작업환경(Environment)로 나눌 수 있다. [3]

작업자 : 작업을 수행하는 도중 작업자의 팔의 임피던스는 연속적으로 변한다. 따라서 작업자와 (작업)환경간의 동적 상호관계는 규명하기 어려우며 작업자의 정확한 동적모델(dynamic model)은 존재하지 않는다.

M.S.M : 전기적으로 커플된 마스터암과 슬레이브암으로 구성된다. 작업자의 연속적인 동작은 마스터암을 통해 슬레이브암으로 전달되며 역으로 슬레이브암은 마스터암으로 힘을 전달한다. 이 방법에 의해 작업자는 외력이나 부하의 관성에 의한 힘을 느낄 수 있다.

작업환경 : 산업용 로봇은 구조적 환경내에서 작업을 수행하는 반면, M.S.M은 구조화되지 않고 위험한 환경하에서 작업을 하게 된다. 이런 조건에서는 작업환경의 동특성을 실시간으로 식별하는 것은 매우 어렵다.

2) 2-포트(port)회로 모델

작업자와 마스터암 그리고 작업환경과 슬레이브암 사이의 인터페이스 부분을 통해서 M.S.M은 작업자 및 작업환경과 에너지를 서로 주고 받으며 이 인터페이스 부분을 포트로 생각할 수 있다.

이때 원격조작 매니플레이터 시스템은 2-포트회로로 모델링 할 수 있으며[4][6], 그림1 과 같이 표현할 수 있다.

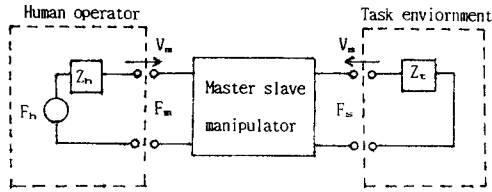


그림 1 원격조작 매니플레이터의 2 포트 회로 모델
Fig. 1 2 port network model of teleoperated manipulator

양방향 원격조작 매니플레이터에서는 마스터암의 end effector(작업자가 마스터암의 end effector를 잡고 조작할 경우)와 슬레이브암의 end effector가 각각 포트가 된다.

시스템이 선형성을 가진다고 가정하면 이 모델을 2 x 2행렬로 표시할 수 있다. 각 포트에서 flow변수(속도 V_m, V_s)를 독립변수로 잡으면 M.S.M은 다음과 같이 임피던스 행렬[Z(S)]를 이용하여 표현할 수 있다.

$$F(s) = [Z(s)] V(s)$$

즉,

$$\begin{bmatrix} F_m(s) \\ F_s(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}(s) & Z_{12}(s) \\ Z_{21}(s) & Z_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m(s) \\ V_s(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $F_m(S), F_s(S)$ 는 각각 마스터포트와 슬레이브포트의 effort(힘)이며 $V_m(S), V_s(S)$ 각각 마스터포트와 슬레이브포트의 flow(속도)이다.

M.S.M의 각 포트에는 서보 액츄에이터가 부착되어 각 포트에서 측정된 힘과 속도에 의해 마스터암과 슬레이브암을 각각 구동하게 된다. 따라서 서보액츄에이터는 각포트의 힘과 속도에 의해 결정되는 힘생성원(effort source), $F_{ms}(F(s), V(s)), F_{ss}(F(s), V(s))$ 로 모델링 될 수 있다. 따라서, M.S.M는 그림2 와 같이 표시할 수 있다.

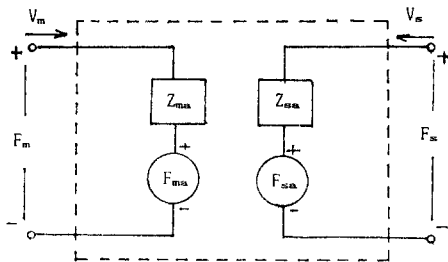


그림 2 마스터 / 슬레이브 매니플레이터의 모델
Fig. 2 The model of master / slave manipulator

여기서, $Z_{ms}(s)$ 은 마스터암과 액츄에이터의 동특성을 나타내는 임피던스이며, 마찬가지로 $Z_{ss}(s)$ 는 슬레이브암과 액츄에이터의 동특성을 나타내며, 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_{ms}(s) &= J_m s + b_m \\ Z_{ss}(s) &= J_s s + b_s \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, J_m, J_s 과 b_m, b_s 는 암과 서보 액츄에이터의 파라미터에 의해 결정되는 값이다.

3) passive 회로의 특성

passive 회로는 다음과 같은 성질을 가진다. [7]

- passive 회로의 총 에너지는 리아프노프 함수(Lyapunov function) 꼴로 표시되므로 passivity는 안정성을 위한 충분조건이다.
- 해밀톤(hamilton) 또는 라그랑지(lagrange)꼴로 표현가능한 임의의 passive한 선형 또는 비선형의 환경과 결합된 임의의 passive한 회로는 안정하다.
- 자이레이터(gyrator)를 제외한 모든 passive한 소자로 구성된 passive 회로는 reciprocal하다.

reciprocal한 n 포트회로가 passive할 필요 충분조건은 immittance(임피던스 또는 어드미턴스) $Z(s)$ (또는 $Y(s)$)가 positive real(PR)이 되는 것이다. [8]

원소가 유리함수인 n자의 대칭행렬이 positive real일 필요충분조건은 다음과 같다. [9]

- i) 행렬의 각 원소는 실계수이어야한다.
- ii) 행렬의 각 원소는 RHS(right half-plane)에 pole이 없어야 한다.
- iii) 행렬의 각 원소는 j축상에서 단일 pole을 가져야 하며 이에 대한 유수(residue) 행렬은 positive semidefinite해야 한다.
- iv) $s=j\omega$ 일때 실수부로 구성되는 행렬이 모든 ω 에 대해 positive semidefinite 이어야 한다.

3. 1축 M.S.M에 대한 안정성 해석

1축 M.S.M에 대한 안정성 해석을 위해 다음과 같이 가정하자.

- i) M.S.M의 링크는 강체이다.
- ii) 작업자와 작업환경은 passive하다.

1) 위치/위치 제어 방식

- 속도전달비:1, 힘전달비:1

M.S.M의 제어법칙은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} F_{ms}(s) \\ F_{ss}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_m(s) & G_m(s) \\ G_s(s) & G_s(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m(s) \\ V_s(s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기에서 $V_m(S)$ 와 $V_s(S)$ 의 방향은 서로 반대이므로, $V_m(S)+V_s(S)$ 는 두

포트의 속도차를 나타내게 된다.

이때 마스터포트에서의 힘은 다음과 같이 표시된다.

$$F_m(s) = Z_{mm}(s) V_m(s) + G_m(s) (V_m(s) + V_n(s)) \\ = [Z_{mm}(s) + G_m(s)] V_m(s) + G_m(s) V_n(s)$$

슬레이브 포트에서의 힘도 마찬가지로 표시되며, 다음과 같은 임피던스 행렬을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_m(s) \\ F_n(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{mm}(s) + G_m(s) & G_m(s) \\ G_n(s) & Z_{nn}(s) + G_n(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m(s) \\ V_n(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기에서 임피던스 행렬을 reciprocal 하도록 두자. 즉 $G(S)=G_m(S)=G_n(S)$ 라고 두자. 두 포트의 속도차이에 대해 PI 제어를 한다고 하면 $G(s) = g_1/s + g_2$ 로 표현된다.

이때 임피던스 행렬 $Z(s)$ 는 다음과 같다.

$$Z(s) = \begin{bmatrix} J_m s + b_m + g_1/s + g_2 & g_1/s + g_2 \\ g_1/s + g_2 & J_n s + b_n + g_1/s + g_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

이것이 PR일 조건은 다음과 같다.

pole이 $s=0$ 일때 유수 행렬이 positive semidefinite 해야하므로

$$g_1 \geq 0 \quad (6)$$

모든 ω 에 대한 $\text{Re}\{Z(j\omega)\}$ 이 positive semidefinite 해야하므로

$$\text{Re}\{Z(j\omega)\} = \begin{bmatrix} b_m + g_2 & g_2 \\ g_2 & b_n + g_2 \end{bmatrix}$$

위의 행렬이 positive semidefinite할 조건은

$$g_2 \geq -b_m, \quad g_2 \geq -b_n, \quad \text{그리고} \quad g_2 \geq -(b_m b_n)/(b_m + b_n) \quad (7)$$

(6),(7)의 조건을 만족하면 M.S.M은 passive하고, 작업자와 작업환경은 passive 하다고 했으므로 전체 시스템은 안정하다. 그러므로 전체 시스템이 안정할 조건은 (6),(7)이 된다.

2) 위치/위치 제어 방식

- 속도전달비: n 힘전달비: a

마스터암과 슬레이브 암이 기하학적으로 동일하지 않고 크기가 서로 차가 나가는 경우는 작업공간(work space)의 형태와 체적이 서로 다르므로 양 작업공간의 대응을 위해서는 마스터암과 슬레이브 간의 속도비를 주어야 한다. 그리고 슬레이브 암에 걸리는 힘이 작업자가 느끼기에 너무 크거나, 작은 경우에는 슬레이브암에 걸리는 힘에 힘전달비를 곱하여 전달해 줄 필요가 있다.

이때 제어법칙은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} F_{mm}(s) \\ F_{nn}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aG_1(s) & anG_2(s) \\ G_3(s) & nG_4(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m(s) \\ V_n(s) \end{bmatrix} \quad (8)$$

이 경우 임피던스 행렬은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{bmatrix} F_m(s) \\ F_n(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{mm}(s) + aG_1(s) & anG_2(s) \\ G_3(s) & Z_{nn}(s) + nG_4(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m(s) \\ V_n(s) \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기에서 임피던스 행렬이 reciprocal 하도록 $G_2(S)$ 와 $G_3(S)$ 를 정해 주자.

$$\text{즉,} \quad anG_2(S) = G_3(S) \quad (10)$$

그리고, $G_i(s) = g_{i1}/s + g_{i2}$ ($i = 1, \dots, 4$)로 두면 앞에서와 마찬가지로 방법으로 다음과 같은 안정 조건을 얻을 수 있다.

$$g_{11} \geq 0, \quad g_{41} \geq 0, \quad g_{31} \leq \sqrt{(an g_{11} g_{41})} \\ g_{12} \geq -b_m/a, \quad g_{42} \geq -b_n/n, \quad (11)$$

$$\text{그리고} \quad g_{32} \leq \sqrt{\{(b_m + a g_{12})(b_n + n g_{42})\}}$$

3) 위치+힘/위치+힘 제어 방식

- 속도전달비: n 힘전달비: a

제어법칙은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} F_{mm}(s) \\ F_{nn}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aG_1(s) & anG_2(s) \\ G_3(s) & nG_4(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m(s) \\ V_n(s) \end{bmatrix} \quad (12) \\ + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_m(s) \\ F_n(s) \end{bmatrix}$$

이 경우 임피던스 행렬은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{bmatrix} F_m(s) \\ F_n(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{mm}(s) + aG_1(s)}{1-K} & \frac{anG_2(s)}{1-K} \\ \frac{G_3(s)}{1-K} & \frac{Z_{nn}(s) + nG_4(s)}{1-K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m(s) \\ V_n(s) \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기에서 임피던스 행렬이 reciprocal 하도록 $G_2(S)$ 와 $G_3(S)$ 를 정해 주자.

$$\text{즉,} \quad anG_2(S) = G_3(S) \quad (14)$$

이때, 안정조건은 다음과 같이 주어진다.

$$g_{11}/(1-K) \geq 0, \quad g_{41}/(1-K) \geq 0, \quad g_{31} \leq \sqrt{(an g_{11} g_{41})} \\ (b_m + a g_{12})/(1-K) \geq 0, \quad (b_n + n g_{42})/(1-K) \geq 0, \quad (15)$$

$$\text{그리고} \quad g_{32} \leq \sqrt{\{(b_m + a g_{12})(b_n + n g_{42})\}}$$

4. N 자유도의 매니플레이터로의 확장

이 장에서는 M.S.M이 다자유도를 가진 매니플레이터로 구성되어 있는

경우에 대하여 생각해보자. 단, 매스터와 슬레이브는 동일한 자유도를 가지며, redundancy는 없다고 하자.

n 자유도를 가지는 M.S.M 시스템의 구성은 두가지의 방법을 생각할 수 있다. 첫째는, 일반적인 M.S.M와 같이 매스터와 슬레이브가 기하학적으로 동형인 경우이다. 이 경우는 (12)와 같은 제어방법을 서로 대응되는 관절에 대해 독립적으로 적용할 수 있다. 이 방법은 동력학적인 커플링이 무시될 수 없는 경우에도 만족할 만한 결과를 얻을 수 있다. [10] 이 방법은 적용이 쉬우며 역운동학(inverse kinematics)을 풀지 않아도 되므로 특이점 문제(singularity problem)가 발생하지 않는 장점이 있다.

둘째는, 매스터와 슬레이브가 기하학적으로 서로 다른 경우이다. 따라서, 기구학적이거나 동력학적으로도 달라지게 된다. 이 경우는 다음과 같이 생각할 수 있다.

직교 좌표계에서 M.S.M은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{매스터} : F_{ms} &= D_{xms}(\theta_m) \ddot{X}_m + H_{xms}(\theta_m, \dot{\theta}_m) + G_{xms}(\theta_m) + F_m \\ \text{슬레이브} : F_{ss} &= D_{xss}(\theta_s) \ddot{X}_s + H_{xss}(\theta_s, \dot{\theta}_s) + G_{xss}(\theta_s) + F_s \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, F_{ms} , F_{ss} 는 액츄에이터에 의해 end effector에 작용하는 힘이고, F_m , F_s 는 외력, X_m , X_s 는 end effector의 위치 및 방향을 나타내는 벡터이며, $D_{xi}(\theta_i)$, $H_{xi}(\theta_i, \dot{\theta}_i)$, $G_{xi}(\theta_i)$ ($i=m,s$)는 각각 직교 좌표계폴로 표시한 관성항, 코리올리트 원심력항, 중력항이다.

제어법칙을 다음과 같이 두자.

$$\begin{aligned} F_{ms} &= D_{xms}(\theta_m)U_m + H_{xms}(\theta_m, \dot{\theta}_m) + G_{xms}(\theta_m) + F_m \\ F_{ss} &= D_{xss}(\theta_s)U_s + H_{xss}(\theta_s, \dot{\theta}_s) + G_{xss}(\theta_s) + F_s \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, U_m , U_s 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} U_m &= aG_1V_m + anG_2V_a + KF_m \\ U_s &= G_3V_m + nG_4V_s + KF_s \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, V_m , V_s 는 각각 직교 좌표계에서 end effector의 속도이다. (17), (18)을 (16)에 대입하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} aG_1(s)V_m(s) + anG_2(s)V_s(s) + KF_m(s) &= \ddot{X}_m \\ G_3(s)V_m(s) + nG_4(s)V_s(s) + KF_s(s) &= \ddot{X}_s \end{aligned}$$

이 경우 임피던스 행렬은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{bmatrix} F_m(s) \\ F_s(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{s - aG_1(s)}{K} & \frac{-anG_2(s)}{K} \\ \frac{-G_3(s)}{K} & \frac{s - nG_4(s)}{K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m(s) \\ V_s(s) \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기에서 $anG_2(s)=G_3(s)$ 라고 두고, $G_i(s)$ ($i=1, \dots, 4$)를 대칭인 행렬로 두면 임피던스 행렬 $Z(s)$ 는 $2n$ 차원의 대칭행렬이 되며, 이것이 PR이 되도록 $G_i(s)$ ($i=1, \dots, 4$)와 K 를 선정해주면 전체 시스템은 안정하다.

- 비고 i) 위의 경우 매스터와 슬레이브의 각 조인트의 액츄에이터가 발생시켜야하는 토크는 다음과 같다.

(17), (18)에서,

$$\begin{aligned} F_{ms} &= D_{xms}U_m + H_{xms} + G_{xms} + F_m \\ &= J_m^{-T}D_mJ_m^{-1}U_m + J_m^{-T}(H_m - D_mJ_m^{-1}\dot{J}_m\dot{\theta}_m) + J_m^{-T}G_m + F_m \\ &= J_m^{-T}D_mJ_m^{-1}(U_m - \dot{J}_m\dot{\theta}_m) + J_m^{-T}H_m + J_m^{-T}G_m + F_m \end{aligned} \quad (20)$$

여기서, D_i, H_i, G_i ($i=m,s$)는 각각 조인트 공간(joint space) 상에서 표시한 관성항, 코리올리트 원심력항, 중력항이며, J_i, θ_i ($i=m,s$)는 마찬가지로 표시한 자코비안(jacobian) 행렬 및 각 조인트의 각도이다.

$$\begin{aligned} \tau_m &= J_m^T F_{ms}, \quad V_m = J_m^{-1} \dot{\theta}_m \text{이므로,} \\ \tau_m &= D_m J_m^{-1} (U_m - \dot{J}_m \dot{\theta}_m) + H_m + G_m + J_m^T F_m \\ &= D_m J_m^{-1} (aG_1 J_m^{-1} \dot{\theta}_m + anG_2 J_m^{-1} \dot{\theta}_s + KF_m - \dot{J}_m \dot{\theta}_m) + H_m + G_m \\ &\quad + J_m^T F_m \\ &= D_m J_m^{-1} [(aG_1 J_m^{-1} - \dot{J}_m) \dot{\theta}_m + anG_2 J_m^{-1} \dot{\theta}_s] + H_m + G_m \\ &\quad + (J_m^T + D_m J_m^{-1} K) F_m \end{aligned} \quad (21)$$

τ_s 도 동일한 방법으로 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_s &= D_s J_s^{-1} [(nG_4 J_s^{-1} - \dot{J}_s) \dot{\theta}_s + G_3 J_s^{-1} \dot{\theta}_m] + H_s + G_s \\ &\quad + (J_s^T + D_s J_s^{-1} K) F_s \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 $\tau_{m,s}$ 는 각 조인트의 액츄에이터가 발생하는 토크이다.

- 비고 ii) 위의 제어 방법은 매스터나 슬레이브만의 형상이 특이점(singular point)이나 그 부근에 위치하는 경우는 적용이 곤란하다.

5. 결 론

1 자유도의 원격조작 매니플레이터를 2 포트 회로로 모델링 하여, 이 때 나타나는 임피던스 행렬을 이용하여 위치/위치 및 위치+힘/위치+힘 제어방법에 대한 안정성을 해석하였고, 각 방법에 대한 안정조건을 제시하였다. 그리고 이것을 N 자유도의 매니플레이터의 경우에도 확장하였다. 이 해석 방법은 원격조작 매니플레이터의 설계시 기준 조건이 될 수 있다. 앞으로는, 매스터와 슬레이브만이 안정되면서도 원하는 임피던스들까지도록 하는 제어방법이 제시되어야 하고, n 자유도의 M.S.M에서 특이점 문제를 극복할 수 있는 제어방법이 제시되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] J.Vertut and P.Coiffet, "Robot Technology, Vol.3A, Teleoperation and Robotics", Prentice Hall Inc. 1986.
- [2] B.Hannaford, "Stability and Performance Tradeoffs in Bilateral Telemanipulation", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1989.
- [3] J.Dudragne, et.al, "A Generalized Bilateral Control Applied to Master-Slave Manipulators", 20th ISIR.
- [4] G.J.Raju, et.al, "Design Issues in 2-port Network Models of Bilateral Remote Manipulation", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1989.

- [5] R.J.Anderson and M.W.Spong. "Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay". IEEE Trans. Automatic Control, Vol.34 No.5, 1989.
- [6] B. Hannaford. " A Design Framework for Teleoperators with Kinesthetic Feedback". IEEE Trans. Robotics and Automaton, Vol.5 No.4. 1989.
- [7] J.E.Colgate et.al. "Robust Control of Dynamically Interacting Systems". Int.J.Control. Vol.48 No.1. 1988.
- [8] W.K.Chen. "Active network and feedback amplifier theory", McGraw Hill Co. 1980.
- [9] L.Weinberg. "Network analysis and synthesis". McGraw Hill Co. 1962.
- [10] C.Vibet. " Emerging Methods for Master-Slave Manipulator Design". International J. of Robotics and Automation, Vol.1 No.2. 1986.