

LQG/LTR을 이용한 Haptic Interface의 강인제어

Robust Control of a Haptic Interface Using LQG/LTR

이 상 철, 박 현, 이 수 성, 이 장 명

(Sang-Chul Lee, Heon Park, Su-Sung Lee and Jang-Myung Lee)

Abstract : A newly designed haptic interface enables an operator to control a remote robot precisely. It transmits position information to the remote robot and feeds back the interaction force from it. A control algorithm of haptic interface has been studied to improve the robustness and stability to uncertain dynamic environments with a proposed contact dynamic model that incorporates human hand dynamics. A simplified hybrid parallel robot dynamic model for a 6 DOF haptic device was proposed to form a real time control system, which does not include nonlinear components. LQG/LTR scheme was adopted in this paper for the compensation of un-modeled dynamics. The recovery of the force from the remote robot at the haptic interface was demonstrated through the experiments.

Keywords : LQG/LTR, Haptic interface, contact dynamics, robust

I. 서론

Haptic interface는 원격지로봇의 자세를 제어할 수 있는 6자유도의 운동을 생성할 수 있는 기구이다. 단순한 자세제어를 위해서는 원격지로부터의 화상정보만으로도 충분히 원격지로봇을 제어할 수 있다. 그러나 원격지수술 등과 같은 정밀한 작업에는 시각정보 뿐만 아니라 손의 감각정보를 복원하여 조작자에게 제공할 수 있어야 한다[1]. 또한 조작자와 Haptic interface와의 접촉력을 원격지로봇에 전달하여 원격지로봇과 작업 대상간의 접촉력을 발생시킬 수 있어야 한다. 이를 구현하기 위해서는 조작자와 Haptic interface, 원격지로봇과 작업대상의 접촉력 유지를 위한 양방향제어가 필요하다[2]-[4].

원격지 로봇과 작업대상의 접촉력을 복원하기 위한 기존의 Haptic interface에 관한 연구는 환경접촉모델에 대한 접촉안정성 및 성능만을 고려해 관성, 마찰 등을 무시함으로써 미세한 기계적 임피던스제어에 어려움이 있었다[5]-[8]. 이를 극복하기 위해서는 Haptic interface의 동적특성을 고려한 힘제어가 필요하게 된다. 즉 Haptic interface의 동역학 방정식을 유도하여 관성, 중력 등에 대한 동적특성을 보상할 수 있어야 한다[9]-[12].

Haptic interface는 6자유도의 운동을 발생시키기 위해 직렬형 매니퓰레이터 3개를 조합한 병렬형 구조를 가지고 있다[13]. 따라서 Haptic interface의 동역학 방정식은 폐쇄형 해가 존재하는 역학으로부터 유도할 수 있다. 그러나 구해진 역동역학 방정식을 통한 힘제어는 계산상의 복잡성으로 인해 실시간 제어에 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 각 링크의 질량을 무시하고 Haptic interface의 질량이 상판에 집중되어있음을 가정하여 간략화 된 역동역학 방정식을 유도하였다.

구해진 역동역학 방정식의 힘-토크간의 관계식으로부터 관

절토크를 유도해 힘을 발생시킬 수 있으나 실제 조작자가 느끼는 힘은 조작자의 손과 Haptic interface 사이의 접촉동역학을 통해서 계산된다. 또한 구해진 역동역학 방정식은 모델링 오차를 포함하고 있으므로 이에 강인한 제어알고리즘이 요구된다. 본 논문에서는 조작자의 손과 Haptic interface 사이의 접촉동역학 모델을 제안하고 LQG/LTR 방법을 사용한 선형제어를 설계하여 효과적으로 힘을 복원하고자 한다. LQG/LTR은 조직적으로 안정도-강인성 및 주파수역 성능을 고려할 수 있는 강인한 선형제어기 설계 방법이다[14]-[16].

본 논문에서는 먼저 2절에서 Haptic interface의 동역학 해석에 대해 설명하고 3절에서 Haptic interface와 조작자의 손과의 접촉 동역학 모델을 제안하고 LQG/LTR 제어기의 설계에 대해 설명한다. 4절에서 설계된 제어기를 실제 플랜트에 적용하여 효과적으로 힘이 복원되는 실험결과를 보이며 5절에서 결론을 맺는다.

II. Haptic Interface의 동역학 해석

그림 1의 Haptic interface는 병렬형 매니퓰레이터의 형태로서 폐쇄형 해가 존재하는 역기구학을 통해 동역학방정식을 유도할 수 있다. 하지만 이 역동역학 방정식은 그 계산과정의 복잡성으로 인해 실시간 제어에 어려움이 있다. 따라서 실시간 제어를 위한 간단한 동역학 방정식을 위해 다음과 같이 가정하였다.

[가정] Haptic interface의 모든 질량은 상판에 집중되어 있다.

위의 가정에 의해 상판만을 고려하여 간략화 된 동역학 방정식을 구한다.

1. 상판의 운동에너지와 위치에너지

상판의 질량을 m_m , 상판의 직교좌표상의 속도를 v , 직교좌표상의 각 축을 기준으로 한 각속도를 ω 라고 하면 상판의 운동에너지는 아래와 같이 구해질 수 있다.

$$K_m = \frac{1}{2} m_m v^T v + \frac{1}{2} \omega^T I \omega \quad (1)$$

논문접수 : 2001. 11. 1., 채택확정 : 2002. 6. 8.

이상철 : 부산대학교 전자공학과 지능로봇 실험실

(ss2110@hyowon.pusan.ac.kr)

박 현 : (주)현대시스콤 교환 제어 개발실(blueheon@hanmail.net)

이수성 : 부산대학교 전자공학과(Isora@dreamwiz.com)

이장명 : 부산대학교 전자공학과(jmlee@hyowon.cc.pusan.ac.kr)

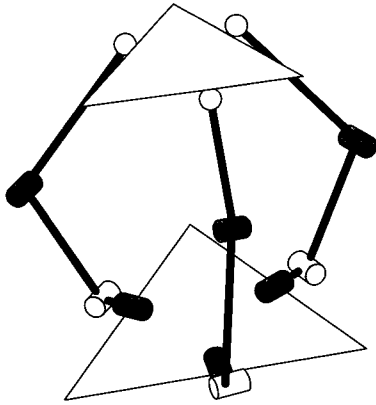


그림 1. Haptic interface.
Fig. 1. Haptic interface.

여기서, I 는 관성모멘트(moment of inertia)를 나타내며 상판의 질량 m_m 을 점질량(point mass)으로 계산하면 관성모멘트 I 는 아래와 같이 정의된다.

$$I = m_m r^2 = \begin{pmatrix} m_m r_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_m r_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & m_m r_z^2 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서 r 은 직교좌표상의 각 축과 상판 질량과의 거리이며 r_x, r_y, r_z 은 각각 x, y, z 축과 상판질량과의 거리이다.

속도와 각속도를 나타내는 벡터 $\dot{x} = [v^T \ w^T]^T = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \dot{\alpha} \ \dot{\beta} \ \dot{\gamma}]^T$, 상판의 질량 및 관성모멘트를 나타내는 행렬을 M_m 이라 하면 운동에너지 K_m 은 아래와 같이 간단히 표현된다.

$$K_m = \frac{1}{2} \dot{x}^T M_m \dot{x} \quad (3)$$

여기서,

$$M_m = \begin{pmatrix} m_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{zz} \end{pmatrix} \text{이다.}$$

상판의 위치에너지는 아래와 같이 표현된다.

$$P_m = m_m g z \quad (4)$$

여기서 g 는 중력가속도, z 는 직교좌표상의 z 축 방향의 상판의 위치를 나타낸다.

2. Haptic Interface의 동역학

구해진 운동에너지와 위치에너지를로부터 직교좌표 공간상의 Lagrange's equation을 사용하여 운동방정식을 구할 수 있다. 직교좌표상의 힘 F 는 다음과 같이 정의된다.

$$F = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L}{\partial x} \quad (5)$$

여기서, L 은 Lagrangian 연산자로 운동에너지와 위치에너지의 차로 정의되며 다음과 같이 정의되어진다.

$$L = K_m - P_m \quad (6)$$

이와 같이 계산되어진 동역학방정식은 고차의 비선형 미분방정식으로 구해지며, 이를 행렬의 형태로 다시 쓰면 아래와 같다.

$$M(x)\ddot{x} + V(x, \dot{x}) + G(x) = F \quad (7)$$

여기서, F 는 직교 좌표상에서 end-effect가 받는 힘이며, $M(x)$ 는 관성행렬, $V(x, \dot{x})$ 는 코리올리 및 원심력 벡터 그리고 $G(x)$ 는 중력항이다.

구해진 동역학 방정식을 이용하여 동적특성을 보상하고 접촉력 f_c 를 유지하기 위해서 식(5)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$M(x)\ddot{x} + V(x, \dot{x}) + G(x) = F + f_c \quad (8)$$

관절모터가 발생시켜야 할 토크 τ 는 힘-토크 관계식 $F = J(x)^T \tau$ 를 이용하면

$$F = J(x)^T \tau \quad (9)$$

$$\tau = J(x)^{-T} (M(x)\ddot{x} + V(x, \dot{x}) + G(x) - f_c) \quad (10)$$

식(7)의 힘-토크 관계식을 이용하여 관절모터가 발생시켜야 할 토크는 f_c 를 제어입력으로 하는 식(10)과 같이 표현된다.

III. LQG/LTR제어기

센서를 통해 획득되는 힘 정보는 조작자의 손과 Haptic interface사이의 관계로 모델링될 수 있다. 조작자의 손과 Haptic interface와의 관계로서 환경접촉모델을 제안한다. 실제 필연적으로 왜란 및 동역학 모델오차가 존재하기 때문에 LQG/LTR 방법을 사용하여 이에 강인한 선형제어기를 설계한다[17].

1. 접촉 동역학 모델

Haptic interface의 동적특성을 보상해 주기위한 접촉 동역학 모델은 아래의 그림과 같다.

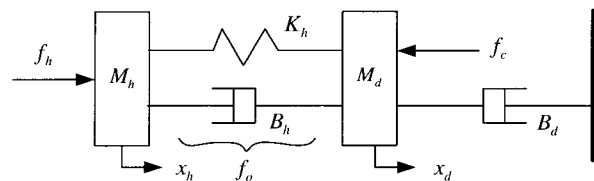


그림 2. 접촉 모델.
Fig. 2. Model of contact environment.

제안된 접촉 동역학 모델에서 조작자의 손을 스프링-댐퍼로 모델링하였다. x_h 는 조작자의 손의 변위를 나타내며 x_d 는 Haptic interface의 변위를 나타낸다. M_d 와 B_d 는 각각 동역학 모델 오차에 기인한 질량, 점성마찰이다. M_h 는 조작자의 손의 질량이며, K_h, B_h 는 각각 조작자의 손의 탄성계수, 댐핑계수이며, f_h 는 인간이 Haptic interface에 가하는 힘으로서 실제로 시스템을 안정화 시키는 역할을 한다. f_c 는 제어입력이며 f_o 는 인간과 Haptic interface 사이에 작용하는 힘으로 F/T 센서를 통해 측정되는 힘이다.

힘을 복원하는 측면에서 x_h 가 고정되었다고 가정하면 그림 2의 접촉 동역학 모델은 아래의 수식으로 표현된다.

$$\ddot{x}_h = -\frac{1}{M_h} \{K_h(x_h - x_d) + B_h(\dot{x}_h - \dot{x}_d) - f_h\} \quad (11-a)$$

$$\ddot{x}_d = -\frac{1}{M_d} \{K_h(x_d - x_h) + B_h(\dot{x}_d - \dot{x}_h) + B_d\dot{x}_d + f_c\} \quad (11-b)$$

$$f_o = K_h x_d + B_h \dot{x}_d \quad (11-c)$$

여기서, 상태벡터 $x = [x_d \ x_h \ \dot{x}_d \ \dot{x}_h]^T$ 이며 상태방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (12-a)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (12-b)$$

여기서, 행렬 A, B, C 는 아래와 같이 정의된다.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_h}{M_d} & \frac{K_h}{M_d} & -\frac{B_d + B_h}{M_d} & \frac{B_h}{M_d} \\ \frac{K_h}{M_h} & -\frac{K_h}{M_h} & \frac{B_h}{M_h} & -\frac{B_h}{M_d} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{M_d} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C = (K_h \ 0 \ B_h \ 0)$$

2. LQG/LTR 제어기

LQG/LTR 제어기의 구조는 그림 3과 같다. LQG/LTR 제어기의 설계절차는 먼저, 식(12-a), 식(12-b)의 설계플랜트 모델에 대해 바람직한 루프형상을 얻을 수 있는 목표필터루프(target filter loop)를 설계하고 둘째로, 보상된 시스템의 루프 전달함수의 특이값을 목표필터루프의 특이값 형상으로 회복 하는 루프전달회복(loop transfer recovery) 단계로 구분된다[18].

일반적으로 LQG/LTR 제어기를 설계시 플랜트는 안정가능(stabilizable)하고 검출가능(detactable)해야 하며 최소위상(minimum phase), 비특이(nonsingular) 시스템이어야 한다[20].

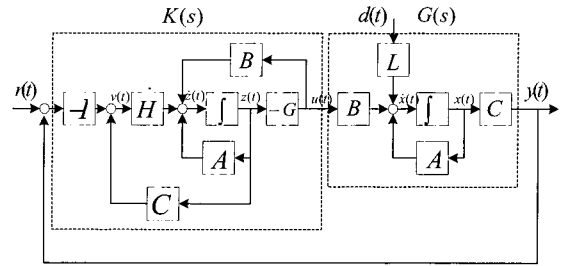


그림 3. LQG/LTR 제어기.

Fig. 3. LQG/LTR controller.

3. 목표필터루프 설계

목표필터루프 설계는 페루프 시스템이 요구되는 명령추종 성능 및 안정도-강인성 조건을 만족하도록 루프의 형상을 결정하는 과정으로서 필터게인행렬 H , 설계파라메타 L 을 선정한다[19].

프로세스와 센서에 대한 잡음을 백색잡음으로 가정하여 식(12-a), 식(12-b)로 표현되는 설계플랜트모델을 수정하면 아래와 같다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + L\xi(t) \quad (13-a)$$

$$y(t) = Cx(t) + \theta(t) \quad (13-b)$$

여기서 $\xi(t)$ 와 $\theta(t)$ 는 평균이 0인 백색잡음으로 각각 아래와 같다.

$$E[\xi(t)] = 0, \quad E[\xi(t)^T \xi(\tau)] = I\delta(t - \tau) \quad (14-a)$$

$$E[\theta(t)] = 0, \quad E[\theta(t)^T \theta(\tau)] = \mu I\delta(t - \tau) \quad (14-b)$$

목표필터루프는 모델기준보상기(model based compensator) 로서 설계플랜트모델과 같은 차수의 칼만필터이다. 센서잡음에 대한 Kalman 필터문제를 해결하면 아래의 필터게인행렬 H 를 선정할 수 있다.

$$H = \frac{1}{\mu} PC^T \quad (15)$$

여기서 P 는 아래의 필터대수 Riccati식으로부터 구할 수 있다.

$$AP + PA^T + LL^T - \frac{1}{\mu} PC^T CP = 0 \quad (16)$$

선정된 H 에 따른 목표필터루프의 전달함수는 아래와 같이 표현된다.

$$G_c(s) = C(sI - A)^{-1} H \quad (17)$$

설계파라메타 L 은 저주파 및 고주파에서 특이값을 일치시키기 위해 선정된다. 설계플랜트모델은 자체에 자유적분요소를 포함하는 특이시스템(Singular System)이며 단일입출력 시스템이므로 자유적분요소를 제외한 모든 극점이 제거되도록 함으로써 행렬 L 을 구할 수 있다[20].

자유적분요소를 제외한 모든 극점을 제거하기 위해서는 먼저 목표필터루프의 개루프 전달함수인 아래식의 $(n \times 1)$ 벡터인 L 의 각 요소를 1로 하고 나머지 요소를 0으로 하여 n 개의 개루프 전달함수를 구한다.

$$G_{FOL}(s) = C(sI - A)^{-1}L \quad (18)$$

이 개루프 전달함수의 영점다항식의 계수를 열벡터로 하는 행렬 Z_c 를 구하면 아래와 같은 설계파라메타 L 을 선정할 수 있는 선형방정식을 만들 수 있다. 여기서 z_d 는 자유적분요소를 제외한 바람직한 영점다항식의 계수벡터이다.

$$Z_c L = z_d \quad (19)$$

L 은 아래의 식으로부터 선정되며, 이때 해 L 이 유일하게 존재하기 위해서는 $\text{rank}(Z_c) = n$ 이어야 한다.

$$L = Z_c^{-1} z_d \quad (20)$$

설계파라메타 μ 는 교차주파수 혹은 대역폭을 결정하는데 사용된다. 먼저 안정도-강인성을 만족하기 위한 안정도-강인성 판별식은 아래와 같다.

$$|C(jw)| < E_{\max}(w)^{-1} \quad (21)$$

공칭 페루프 전달함수를 $C(jw)$, 출력측으로 반영되는 최대 모델링오차를 $E_{\max}(w)$ 라고 할 때, 위 식을 만족하는 교차주파수의 범위는 아래와 같이 제한되어야 한다.

$$w_c < \hat{w}_m \quad (22)$$

여기서 w_c 는 교차주파수이며, w_m 은 $|E(jw)| = 1$ 되는 주파수이다.

설계파라메타 μ 에 따라 루프형상이 아래 위로 이동하게 되는데 이로써 요구되는 교차주파수 혹은 대역폭을 만족시킬 수 있다.

4. 루프전달회복

루프전달회복은 페루프시스템을 목표루프필터에 근사적으로 일치시키는 과정으로 제어게인행렬 G 를 선정하는 과정이다. 루프전달회복은 저가제어 LQR문제(cheap control linear quadratic regulator problem)로 다음 식(21)의 제어대수 Riccati식의 해 K 를 구하여 아래의 식(22)의 제어게인행렬 G 를 구한다.

$$KA + A^T K + C^T C - \frac{1}{\rho} KBB^T K = 0 \quad (23)$$

$$G = \frac{1}{\rho} B^T K \quad (24)$$

선정된 제어게인행렬 G 로써 보상기의 전달함수 $K(s)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$K(s) = G(sI - A + BG + HC)H \quad (25)$$

5. 제어기설계

측정된 조작자의 손의 무게 $M_h \approx 10\text{kg}$ 이며, 조작자의 손의 탄성계수 K_h , 댐핑계수 B_h 는 각각 10N/m, 2N/m/s로 하였다. Haptic interface의 상관질량 m_m 의 오차를 10%로 하면 $M_d = 1\text{kg}$ 이며, 점성마찰계수 $B_d = 10\text{N/m/s}$ 로 두었다.

주어진 설계플랜트모델의 시스템 행렬 A, B, C 는 아래와 같다.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -10 & 10 & -12 & 2 \\ 1 & -1 & 0.2 & -0.2 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C = (10 \ 0 \ 2 \ 0)$$

특이 단일입출력 시스템인 플랜트의 목표루프필터를 구하기 위해서는 목표루프필터의 개루프 전달함수의 L 의 각 요소를 1로 하고 나머지 요소를 0으로 하여 n 개의 개루프 전달함수를 구한다. 이 개루프 전달함수의 영점다항식의 계수를 열벡터로 하는 행렬 Z_c 를 구하면 아래와 같다.

$$Z_c = \begin{pmatrix} 100 & 0 & 10 & 100 \\ 30 & 100 & 4 & 40 \\ 102 & 20 & 10.4 & 4 \\ 10 & 0 & 2 & 0 \end{pmatrix}$$

바람직한 영점다항식 z_d 는 자유적분요소를 제외한 개루프 특성방정식의 계수로 이루는 벡터로 다음과 같다.

$$z_d = (10 \ 13 \ 12.2 \ 1)^T$$

행렬 L 은 다음과 같다.

$$L = (0.1 \ 0.1 \ 0 \ 0)^T$$

최대 모델링오차 $E_{\max}(w) = 0.2w$ 로 정의하면, 교차주파수 w_c 를 5rad/s로 선정할 수 있다. 이 때, 설계파라메타 $\mu = 0.03$ 로 선정된다.

선정된 행렬 L 과 설계파라메타 μ 로써 칼만필터게인 H 를 구하면 다음과 같다.

$$H = (0.5774 \ 0.5774 \ 0 \ 0)^T$$

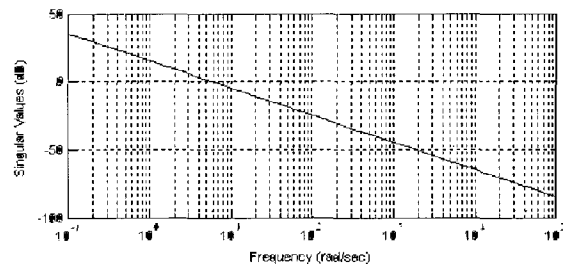


그림 4. 설계된 목표필터루프의 특이선도.

Fig. 4. Singular value plot of target loop filter.

그림 4는 설계된 목표필터루프의 특이선도로서 자유적분요소를 제외한 모든 극점이 제거되었음을 볼 수 있다.

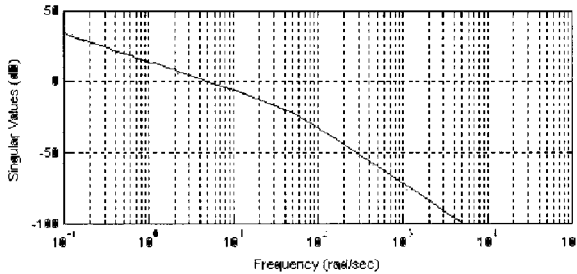


그림 5. 회복된 개루프 TFM 특이선도.
Fig. 5. Singular value plot of recovered loop.

루프전달회복을 위해 설계파라메타 $\rho = 2 \times 10^{-3}$ 으로 정의할 경우, 그림 5에서 만족할 만한 루프전달회복을 얻을 수 있음을 볼 수 있으며 이때 제어게인행렬 G 는 다음과 같다.

$$G = [213.9949 \quad 9.6119 \quad 38.7283 \quad 3.4326]$$

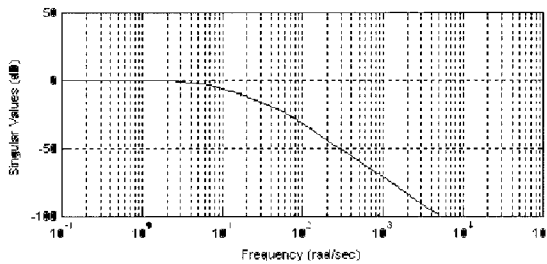


그림 6. 폐루프 시스템의 특이선도.
Fig. 6. Singular value plot of closed loop.

그림 6은 폐루프 시스템의 특이선도로서 설계된 제어기는 대략 5rad/s 까지는 좋은 명령추종 성능과 고주파에서 좋은 잡음제거 성능을 갖는 것을 볼 수 있다.

IV. 실험결과

실험에 사용된 시스템은 그림 7의 블록도와 같다. 위의 그림에서 Haptic interface가 local control site에 위치하여 remote task site에서 전송된 힘 정보를 복원하며 현재의 위치정보를 전송한다. remote task site에 위치한 원격지 로봇(slave robot)은 Haptic interface의 위치정보에 따라 자세제어를 하며 end-effector에 장착된 F/T sensor의 힘 정보를 피드백(feed back)한다.

본 논문에서는 작업대상과 원격지 로봇의 접촉모델은 고려하지 않았으며 원격지 로봇이 전송하는 힘 정보를 변화시켜 원격지의 힘 정보를 복원하고 조작자가 Haptic interface를 움직였을 때에도 조작자의 손과 Haptic interface 사이의 접촉력이 유지되는가를 실험하였다.

설계된 LQG/LTR 제어기 및 동역학 방정식을 이용한 힘제어기는 Pentium 300MHz 를 사용하여 구현하였고 힘 f_d 를 발생시킬 수 있는 6 개의 관절모터 제어기는 87C196CA 마이크

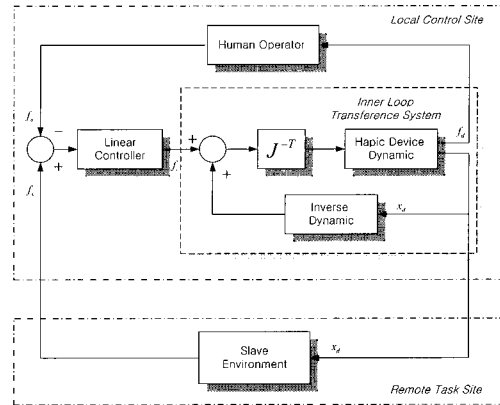


그림 7. 실험에 사용된 전체 시스템의 블록도.
Fig. 7. Block diagram of control system.

로 제어기를 사용하여 구현하였다. Haptic Interface의 힘 f_o 를 측정할 수 있는 센서로는 ATI INDUSTRIAL AUTOMATION 의 ISA F/T-16 model을 사용하였고 동역학 파라메타로서 상판의 질량은 $m_m = 10\text{kg}$ 이다.

실험은 먼저 Haptic Interface를 움직이지 않고 있을 때, 힘 f_s 를 15N의 스텝입력으로 주어 출력 f_o 가 f_s 에 수렴하도록 하였다.

그림 8은 스텝입력에 대한 응답을 나타낸다. 점선으로 표시된 것은 게인이 1인 비례제어를 사용했을 때의 스텝응답이며 실선으로 표시된 것은 LQG/LTR제어기를 사용하였을 때의 스텝응답이다. 그림 8로써 LQG/LTR 제어기를 사용하였을 때 힘추종 특성이 빨라짐을 알 수 있다.

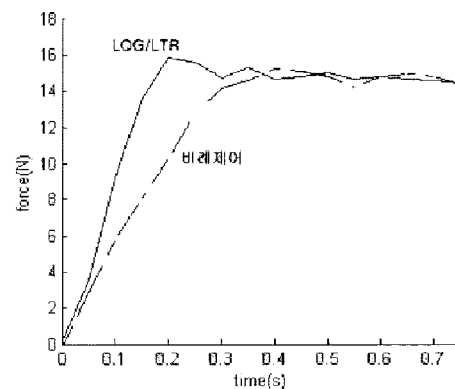


그림 8. 스텝응답.
Fig. 8. Step response.

다음 실험은 Haptic Interface 를 조작자가 움직였을 때에도 접촉력을 ON으로 유지하도록 하는 실험이다.

그림 9는 시간에 따른 z방향의 궤적을 나타낸 것이며 그림 10은 F/T 센서로부터 측정된 힘이다. Haptic interface를 움직였을 때 운동을 발생시키면서 ON의 접촉력을 일정하게 유지할 수 있음을 볼 수 있다.

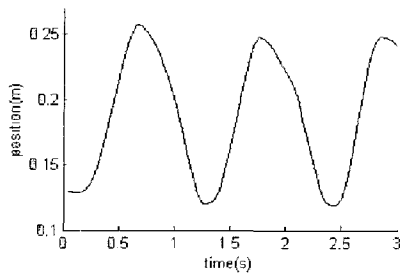


그림 9. Haptic Interface 의 궤적.

Fig. 9. Trajectory Haptic Interface.

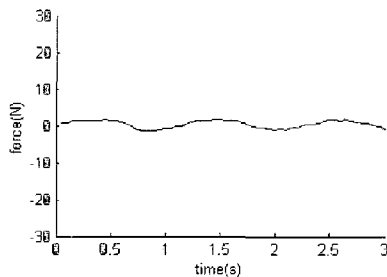


그림 10. Haptic Interface 를 움직였을 때 측정된 힘.

Fig. 10. Force from F/T sensor.

V. 결론

본 논문에서는 Haptic Interface를 사용하여 원격지 로봇에 설치된 F/T 센서로부터의 힘 정보를 효과적으로 복원하도록 하였다. 실시간 제어를 실현하기 위하여 계산량을 줄이기 위해 상판의 질량 및 관성모멘트만을 고려한 간략화 된 역동역학 방정식을 유도하여 사용하였다. 제한된 접촉 동역학모델을 사용하여 LQG/LTR 방법을 적용한 강인한 선형제어기를 설계하였다. 설계된 제어기를 사용하여 원격지의 힘 정보를 효과적으로 복원하고 Haptic interface를 조작할 때에도 Haptic interface와 조작자의 손과의 접촉력을 일정하게 유지할 수 있음을 실험을 통해 검증하였다.

향후 원격지로봇을 제어하는 양방향제어에 있어서 필연적인 시간지연 및 원격지로봇의 접촉모델을 고려한 강인한 제어에 관해 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 진병대, 우기영, 권동수, "5각 관절 병렬 구조를 이용한 6 자유도 힘 반사형 마스터 콘트롤러," 제어자동화시스템 공학논문지, Vol. 5, No. 3, April, 1999.
- [2] Richard J. Adams and Blake Hannaford, "Stable haptic interaction with virtual environments," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 3, June, 1999.
- [3] Noriaki ANDO, Masahito OHTA, Kouhei GONDA, Hideki HASHIMOTO, "Micro teleoperation with parallel manipulator," *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings*, Vol. 8, No. 12, July, 2001.
- [4] Noriaki ANDO, Masabito OHTA, Kouhei GONDA, "Micro teleoperation with parallel manipulator," *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings*, Vol. 8, No. 12, July, 2001.
- [5] J. E. Colgate and J. M. Brown, "Factors affecting the Z-Width of a haptic display," *Proc. of the 1994 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation*, 1994.
- [6] P. Millman and J. Edward Colgate, "Design of a high performance interface to virtual environments," *IEEE Annual Virtual Reality International Symposium*, 1993.
- [7] Manuel Moreyra and Blake Hannaford, "A practical measure of dynamic response of haptic devices," *Proc. of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998.
- [8] Richard J. Adams and Blake Hannaford, "Stable haptic interaction with virtual environment," *IEEE Transactions on robotics and Automation*, 1999.
- [9] Dong-Soo Kwon, Ki-Young Woo, "Control of the haptic Interface with friction compensation and Its performance evaluation," *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 2, pp. 955-960, February, 2000.
- [10] Toshiyuki Ohashi, Peter Szemes, Peter Korondi, Hideki Hashimoto, "Nonlinear disturbance compensation for haptic device," *Proceedings of the IEEE International Symposium*, Vol. 1, pp. 304-309, January, 1999.
- [11] Dong-Soo Kwon, Ki-Young Woo, Hyung-Suk Choi, "Haptic control of the master hand controller for a microsurgical telerobot system," *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Detroit, Michigan, Vol. 3, pp. 1722-1727, March, 1999.
- [12] C. L. Clover, "A control-system architecture for robots used to simulate dynamic force and moment interaction between humans and virtual objects," *IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics-Part C, Applications & Reviews*, Vol. 29, No. 4, November, 1999.
- [13] 이수성, 한승준, 이원구, 하성기, 이장명, "원격 작업을 위한 6자유도 Haptic 인터페이스 설계," 대한전자공학회 부산경남지부 추계합동학술논문발표회논문집, pp. 323-328, December, 1998.
- [14] Athans, M. "A tutorial on the LQG/LTR method," *Proceedings of the American Control conference*, Seattle, WA, pp. 1289-1296, 1986.
- [15] Stein, G. and Athans, M., "The LQG/LTR procedure for multivariable feedback control design," *IEEE Transactions on A. C.*, Vol. AC-32, pp. 105-114, 1987.
- [16] 이승국, 이명의, 권오규, "견실한 다변수 제어에 의한 모형 헬리콥터의 자세제어기 설계 및 실현," 제어자동화시스템 공학논문지, Vol. 4, No. 1, February, 1998.
- [17] A. Grewal, V. J. Modi, "Dynamics and control of flexible multibody systems: An application to orbiting platforms," *IEEE International conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 3, pp. 2093-2098, March, 1995.
- [18] Xu gang and Cao Guangzhong, "On the LQG and LQG/LTR methodology," *Proceedings of the Autonomous Decentralized Systems*, 2000.
- [19] Rajiva Prakash, "Target feedback loop/loop transfer recovery (TFL/LTR) robust control design procedure," *Proceedings of the 29th Conference on Decision and Control*, October, 1990.
- [20] 한성익, 김종식, "LQG/LTR 제어를 위한 루프형성기법에 관한 연구," *Proceedings of the KACC*, pp. 1028-1033, October, 1992.



이 상 철

2000년 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2002년 부산대학교 전자공학과 졸업(공학석사). 관심분야는 원격제어, 실시간 운영체제등.



박 현

1998년 부산대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2002년 부산대학교 전자공학과 졸업(공학석사). 관심분야는 원격제어, 비전응용시스템등.



이 수 성

1998년 충남대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2002년 부산대학교 박사(공학박사). 주요 관심분야는 원격제어 기반의 의료용 로봇등.



이 장 명

현재 부산대학교 공과대학 전자공학과 교수. 부산대학교 컴퓨터 및 정보통신 연구소 소장. 제어 자동화 시스템공학 논문지 제5권, 제1호, 참조.