

원격 수술을 위한 햅틱 인터페이스의 설계 및 실시간 제어

이수성*, 이장명**

*대구미래대학, **부산대학교

I. 서론

가상현실 시스템에서 조작자에게 힘 방향을 느끼도록 할 수 있는 입력장치를 haptic interface라고 하며 haptic interface에 관한 연구로는 Northwestern 대학의 Brown과 Colgate 등이 1자유도의 기구를 사용하여 가상벽 구현을 위한 제어를 연구하였다[1]. MIT의 Massie와 Salisbury 등은 PHANTOM이라는 3자유도 기구를 개발하여, 가상공간 상에서 손가락을 사용하여 조작을 모사하기 위한 연구를 수행하고 있다[2]. 이상과 같은 기존의 haptic interface에 관한 연구는 3자유도 이하의 자유도를 갖는 haptic interface에 관한 연구와 특정 응용분야에 대한 연구가 대부분이며, 인체 구조를 모방한 형태(anthropomorphic)이거나 제어되는 로봇과 동일한 형상을 가진 복제형(replica)으로서, 제어 대상이 한정적이고, 혹은 힘 방향이 불완전하다는 단점을 가지고 있다. haptic interface의 개발에 있어서 병렬형 구조는 직렬형에 비해 상대적으로 큰 강성을 가지며 정밀한 작업에 적합하기 때문에 병렬형 구조의 범용 6자유도 haptic interface에 관한 연구가 활발하다. Long 등, Iwata와 Woo등은 6자유도의 병렬형 기구를 제안했다[3-5].

본 연구에서는 원격수술에서 미세 수술과 같은 정밀한 작업의 경우에서처럼 아주 작은 힘이라도 원격지의 의사에게 정확히 피드백 되어져 복원되어질 수 있는 범용 6자유도 haptic interface를 설계 제작하고자 한다. 본 기구는 기존의 haptic interface들이 지니는 단점을 보완할 수 있는 기구로서 3개의 직렬형 구조를 병렬로 조합하여 매우 간단한 구조를 가지며, 조작자가 느끼는 현실감(telepresence)의 증진을 위해 역구동(back-drivable)이 가능하면서 근 감각적인 정보를 피드백 할 수 있는 소형, 경량의 힘 방향 범용 6자유도 haptic interface이며 본 구조는 직렬형 구조의 특징인 큰 작업영역 및 해석의 용이함과 병렬구조의 특징인 소형화 견고함 등의 장점을 동시에 갖는다.

원격수술에서 미세 수술과 같은 정밀한 작업의 경우는 아주 작은 힘이라도 원격지의 조작자에게 정확히 피드백 되어 복원되어져야 한다. 이러한 정밀작업을 위해

haptic interface는 6자유도의 힘/위치 정보를 원격에 있는 슬레이브(slave) 로봇에 정확히 전달할 수 있어야 할 뿐만 아니라 슬레이브 로봇의 말단장치에 부착된 F/T 센서를 통해 측정된 정보를 정확히 피드백 받아 복원할 수 있어야 한다. 이때 조작자는 슬레이브 로봇에서 피드백 되어오는 힘뿐만 아니라, haptic interface의 미찰, 관성, 중력 등을 함께 느끼게 되므로 피드백 되어오는 힘이 작을 경우 조작자는 전달되어 온 힘을 제대로 느낄 수 없다. 그러므로 원격수술과 같은 미세한 힘을 복원하기 위해서는 haptic interface의 동역학 특성을 고려하여야 한다. 뿐만 아니라 임피던스 제어방식을 통한 힘 복원을 위해 조작자와 haptic interface사이의 상호 접촉력의 관계를 접촉 임피던스로 모델링하게 되는데, 조작자가 슬레이브 로봇에 힘/위치 정보를 명령으로 전달하기 위해 haptic interface를 움직이게 되면, 이때 가하는 힘의 변화와 작업의 종류에 따라 접촉 임피던스의 파라미터 값이 변화하게 된다. 이러한 파라미터는 작업도중 수시로 변동하는 값이므로 언제나 불확실성을 포함하게 되어 haptic interface의 안정성을 저해하는 요인으로 작용하게 된다. 그러므로 haptic interface의 모델링 오차 및 조작자와 haptic interface 사이의 접촉 임피던스 파라미터의 변화를 추종할 수 있는 강인하고 안정한 제어기를 설계하고자 한다.

II. Haptic interface의 개념설계

2-1. 상용의 haptic interface 장치

표 1은 상용 제품의 특성을 비교해 놓은 것이다. 상용 제품들 각각은 각기 다른 용용에 적절할뿐이고 매우 비싸며, 널리 쓰여 주목할 만한 결과를 보여준 것들도 현재로는 없는 상황이다. 이러한 haptic 인터페이스에 관한 국내의 연구는 소수의 연구단체에서 실험적으로 연구하고 있을 뿐이다. 다음 그림 1에서 그림 6까지는 몇 개의 haptic interface 장치의 예이다.



그림 47. Karlsruhe의 촉감 제시장치



그림 48. Carnegie Mellon 대학의 MagLev Wrist.



그림 49. 외골격형 haptic 기구 PERCRO.

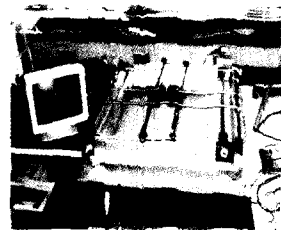


그림 50. Washington 대학의 코대역 힘 제시 장치

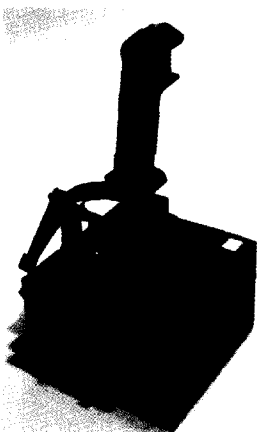


그림 51. Immersion 사의 Impulse Engine



그림 52. Immersion 사의 immersionap.

표 1. 상용의 haptic interface 장치

계 품 명	제 작 사	형 태	성 능(힘 출력값)
4 DOF Force Feedback Master EXOS, Inc.	EXOS, Inc.	능형 타상용 장치	5.1 12.0 oz in의 힘 최고 20.59 oz in의 힘
Force Exoskeleton ArmMaster	EXOS, Inc.	외골격형 (어깨, 팔)	3.4 56.6 lb in의 힘 최고 29.489 oz in의 힘
SAFIRE	EXOS, Inc.	외골격형 (손목, 엄지, 검지)	50 100 oz in의 힘 최고 1.2 lb의 힘
HEHD	EXOS, Inc.	외골격형 (엄지, 검지, 손바닥)	최고 1.5 lb의 힘
Impulse Engine-3000	Immersion Cor.	능형 타상용 장치	0.00435N의 해상도 8.9N의 힘
Laparoscopic Impulse Engine	Immersion Cor.	능형 타상용 장치	0.00435N의 해상도 8.9N의 힘
PER Force 3 DOF	Cybernet Systems Cor.	능형 타상용 장치	1 lb의 힘 최고 9 lb
PER Force Handcontroller	Cybernet Systems Cor.	능형 타상용 장치	2.3 oz의 힘 최고 20.25 lb
PHANTOM	SensAble Devices, Inc.	공부형 타상용 장치	1.5N의 힘 최고 10N

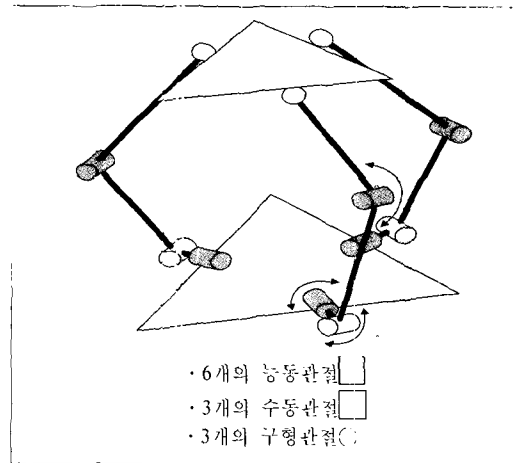


그림 7. 제안된 haptic interface의 구조

2-2. 제안된 haptic interface 의 개념설계

제안된 기구의 구조는 세 개의 직렬링크를 갖는 병렬형 구조를 가지고 있으며 각각의 직렬링크는 3 자유도를 가지며, 2 개의 능동관절과 1 개이 수동관절로 구성되어 있다. 그림 7 에 제안된 haptic interface의 구조를 나타내었으며 회색의 관절이 능동관절이며, 흰색이 수동관절이다. 세 개의 직렬링크는 상, 하판에 각각 구형관절로 연결되어 있고 이 직렬링크의 운동으로 하판에 대한 상판의 운동을 발생시키게 된다. 실제 제작된 haptic interface를 그림 8에서 보이고 있다. 제안된 구조는 상판과 하판의 병렬구조를 가지며, 상판과 하판을 직렬구조를 갖는 링크로 연결하였다. 각각 2개의 구동기를 갖는 3자유도 직렬 링크 3개의 병렬구조로 6자유도의 운동을 발생시킬 수 있게 된다.



그림 8. 실제 제작된 haptic interface.

III. 기구학 해석

3-1. 직렬 구조의 정기구학 해석

직렬형 링크의 정기구학 해를 구하면 다음식(1),(2) 그리고 (3)과 같다.

$$d_{kxi} = \cos(\theta_{1i})(l_1 \cos(\theta_{2i}) + l_2 \cos(\theta_{2i} - \theta_{3i})) \quad (1)$$

$$d_{kyi} = \sin(\theta_{1i})(l_1 \cos(\theta_{2i}) + l_2 \cos(\theta_{2i} - \theta_{3i})) \quad (2)$$

$$d_{kzi} = l_1 \sin(\theta_{2i}) + l_2 \sin(\theta_{2i} - \theta_{3i}) \quad (3)$$

여기서 l_i , θ_{1i} , θ_{2i} , θ_{3i} 는 각각 링크의 길이, 첫 번째 조인트의 각도, 두 번째 조인트의 각도, 세 번째 조인트의 각도이며, $i(i=1,2,3)$ 는 각각의 직렬링크를 의미한다.

3-2. 직렬링크의 역기구학

실제 물리적 시스템에서 기구적 제약으로 해가 존재하는 영역은 0에서 π 까지이므로 이런 제약으로부터 θ_{1i} 는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\theta_{1i} = \cos^{-1} \left(\frac{d_{kxi}}{\sqrt{d_{kxi}^2 + d_{kyi}^2}} \right) \quad (4)$$

실제 시스템에서 θ_{3i} 가 양의 값을 갖게 되면 기구적 제약으로 인해 직렬링크사이에 간섭의 가능성이 높아지므로, θ_{3i} 의 해는 0에서부터 $-\pi$ 사이에 존재하는 것이 바람직하다. 따라서 θ_{3i} 는 다음 식 (5)으로 단일하게 구할 수 있다.

$$\theta_{3i} = -\cos^{-1} \left(\frac{d_{kxi}^2 + d_{kyi}^2 + d_{kzi}^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right) \quad (5)$$

3-3. 병렬구조의 역기구학

병렬구조의 역기구학을 구하는 문제는 하판의 기준좌표에 대해서 상판의 위치와 방향이 주어졌을 때 각 직렬구조의 관절각을 구하는 문제로 정의된다. 그림 9에 병렬구조의 기구학 해석을 위한 좌표관계를 나타내었다. 병렬구조에서는 하판의 중심에 기준 좌표계 {B}(base frame)를 설정하고 상판에 말단효과 장치의 좌표계 {M}(moving frame)을 설정한다. 기준 좌표계와 상판의 중심좌표사이의 위치 변화를 벡터 p_d 로 표시하면 이것이 {B}계를 기준으로 한 {M}계의 위치가 되어진다. 또한 병렬구조의 회전행렬을 ${}^b_b R$ 로 표기할 때 상판과 하판의 두 좌표계사이의 회전으로 정의되며, 이는 {B}계를 기준으로 한 상판의 모서리의 벡터 p_i ($i=1,2,3$)와 {M}계를 중심으로 한 상판모서리 사이의 벡터 p_u 사이의 관

계에 의해 결정되게 된다. 직렬링크의 기준 좌표계를 $\{L_i\}$ ($i=1,2,3$)라고 하고 이를 기준으로 상판모서리의 좌표를 벡터 p_{li} ($i=1,2,3$)로 정의한다. 먼저 하판의 기준좌표를 기준으로 상판의 각 모서리의 위치를 나타내는 벡터 p_i 는 다음 식 (6)과 같이 정의되어진다.

$$p_i = p_d + {}^b_b R p_{ui} = p_d + {}^b_b R p_{ui} \quad (6)$$

식 (6)에 각각의 변수를 대입하여 다음 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$p_i = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{uxi} \\ d_{uyi} \\ d_{uzi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + r_{11}d_{uxi} + r_{12}d_{uyi} \\ y + r_{21}d_{uxi} + r_{22}d_{uyi} \\ z + r_{31}d_{uxi} + r_{32}d_{uyi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{xi} \\ d_{yi} \\ d_{zi} \end{bmatrix} \quad (7)$$

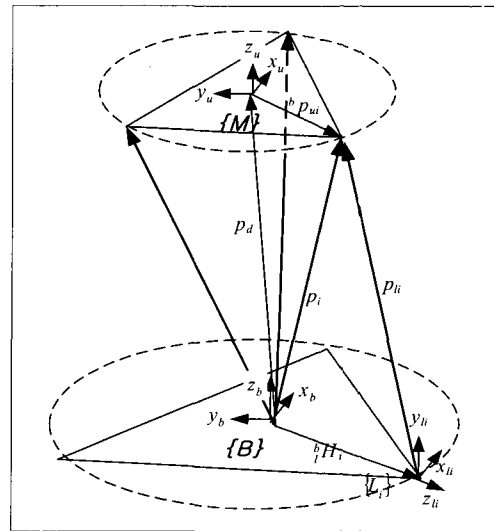


그림 9. 병렬구조의 좌표

하판에 대한 상판의 회전관계 ${}^b_b R$ 를 여러 가지 각도 방법으로 표시할 수 있다. 다음 식 (8)에 나타낸, roll-pitch-yaw 각도 법을 사용하여 최종적으로 다음 식 (9)을 구한다.

$${}^b_b R = \begin{bmatrix} C_\alpha C_\beta & C_\alpha S_\beta S_\gamma - S_\alpha C_\gamma & C_\alpha S_\beta C_\gamma + S_\alpha S_\gamma \\ S_\alpha C_\beta & S_\alpha S_\beta S_\gamma + C_\alpha C_\gamma & S_\alpha S_\beta C_\gamma - C_\alpha S_\gamma \\ -S_\beta & C_\beta S_\gamma & C_\beta C_\gamma \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$p_i = \begin{bmatrix} x + d_{uxi}(C_\alpha C_\beta) + d_{uyi}(C_\alpha S_\beta S_\gamma - S_\alpha C_\gamma) \\ y + d_{uxi}(S_\alpha C_\beta) + d_{uyi}(S_\alpha S_\beta S_\gamma + C_\alpha C_\gamma) \\ z - d_{uxi}S_\beta + d_{uyi}C_\beta S_\gamma \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서, $i = 1, 2, 3$ 이며, 식 (9)으로부터 {B}계를 기준으로 한 상판의 모서리의 벡터 p_i 와 상판모서리의 좌표 벡터 p_{li} 의 관계를 사용하여 링크 관절 좌표계로 변환하고 직렬구조링크의 각 관절의 관절 각의 해를

나타내는 식(4), (5)에 대입하여 직렬구조링크의 각 관절의 관절 각을 구할 수 있다. 이상과 같이 평행구조의 역기구학은 직렬구조의 정기학과 같이 비교적 간단한 폐쇄형으로 구해진다.

3-4. 속도 기구학 해석

haptic interface의 속도기구학 해석은 각 능동관절의 속도로부터 end-effector의 속도를 구하는 문제로 정의되며, Jacobian으로 정의된 행렬이 이 운동 관계를 연결시켜주게 된다. haptic interface의 정기구학은 각 직렬구조의 관절각이 주어졌을 때 하판의 기준좌표에 대해서 상판중심의 위치와 방향을 구하는 문제로 정의된다. 그러나 일반적으로 병렬형 구조를 갖는 haptic interface의 경우 정기구학 해가 폐쇄형으로 주어지지 않으므로, 정기구학으로부터 속도기구학을 구하기 어렵다. 따라서 폐쇄형 해가 존재하는 역기구학으로부터 Jacobian을 구하는 것이 일반적이다. 그래서 $\dot{\theta}$ 를 정의하면 다음 식 (10)과 같다.

$$\dot{\theta} = J(x) \dot{x} \quad (10)$$

$J(x)$ 가 정칙인 조건에서 다음 식 (11)의 관계가 성립되어야 한다.

$$\dot{x} = J(x)^{-1} \dot{\theta} \quad (11)$$

이와 같이 역기구학으로부터 직접 병렬형 haptic interface의 Jacobian을 구할 경우 그 결과의 복잡성으로 인해 실시간 적용시 불리하게 된다. 그러므로 각 직렬링크의 Jacobian과 상판의 Jacobian의 각 부분으로 나누어 Jacobian을 구하였다. 먼저, 식 (4)과 식 (5)으로부터 상판 모서리 벡터에 대한 역기구학 식을 식 (12)으로 표현할 때 식 (12)의 시간미분은 다음 식 (13)으로 구해진다.

$$\dot{\theta}_i = F_{pi}(P_i) \quad (12)$$

$$\dot{\theta}_i = J_{pi} \dot{P}_i \quad (13)$$

식 (13)에서 $i=1,2,3$ 일 때, $\theta_i = [\theta_{1i} \ \theta_{3i}]^T$, $P_i = [p_{xi} \ p_{yi} \ p_{zi}]^T$ 이며, J_{pi} 은 다음 식 (14)과 같이 정의된다.

$$J_{pi} = \begin{bmatrix} j_{p11i} & j_{p12i} & j_{p13i} \\ j_{p21i} & j_{p22i} & j_{p23i} \end{bmatrix} \quad (14)$$

식(14)에서 $j_{pai \ bi} = \frac{\partial F_{pai}}{\partial p_{bi}}$ ($ai=1i, 3i, bi = xi, yi, zi$)이다. 모든 직렬링크에 대한 Jacobian은 다음 식 (15)과 같다.

$$J_b = \begin{bmatrix} J_{p1} & 0 & 0 \\ 0 & J_{p2} & 0 \\ 0 & 0 & J_{p3} \end{bmatrix} \in R^{6 \times 9} \quad (15)$$

식 (9)에 의해 정의된 상판의 모서리와 상판 좌표계 {M}사이의 관계는 다음 식(16)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 이의 시간 미분은 식 (17)과 같다.

$$P_i = F_x(x) \quad (16)$$

$$\dot{P}_i = J_{xi} \dot{x} \quad (17)$$

여기서 J_{xi} 는 3×6 행렬이며 다음 식 (18)로 정의된다.

$$J_{xi} = \begin{bmatrix} j_{p11i} & j_{p12i} & j_{p13i} \\ j_{p21i} & j_{p22i} & j_{p23i} \end{bmatrix} \quad (18)$$

그러므로, 모든 각 상판 모서리에 대한 Jacobian은 다음 식 (19)과 같다.

$$J_x = \begin{bmatrix} J_{x1} \\ J_{x2} \\ J_{x3} \end{bmatrix} \in R^{9 \times 6} \quad (19)$$

전체 시스템의 Jacobian은 식 (15)과 식 (19)의 곱이며, 다음 식(20)으로 구해진다.

$$J(x) = J_b J_x \in R^{6 \times 6} \quad (20)$$

IV. 기구성능평가

4-1. 전역 등방성 지수

Haptic interface는 조작자가 명령을 내리기 용이하게 하기 위해 뛰어난 운동성을 가져야 하며, 또한 조작자에게 정확한 힘 전달을 위해 임의의 방향의 힘, 모멘트 발생이 용의 해야한다. 그러므로 작업공간 내에서 균일한 입출력 속도 및 힘, 모멘트 특성을 갖도록 하는 것이 필요하다. 이런 특성을 나타내는 것이 등방성(isotropy)이나, 전역 등방성 지수는 다음 식 (21)으로 정의된다[6].

$$GII(p) = \frac{\Psi(p)}{\Lambda(p)} = \frac{\min_{x \in W} s(p, x)}{\max_{x \in W} \bar{s}(p, x)} \quad (21)$$

여기서, $s(p, x)$ 와 $\bar{s}(p, x)$ 는 각각 $\sigma_{\min}[J(p, x) \text{ or } D(p, x)]$, $\sigma_{\max}[J(p, x) \text{ or } D(p, x)]$ 이며 모든 작업공간상에서 velocity ellipsoids의 최소 특이값과 최대 특이값을 의미하며 J 는 기구의 Jacobian, D 는 동역학 방정식의 질량 행렬, p 는 설계인자, x 는 말단효과 장치의 위치와 회전이며, W 는 작업공간이다. 즉 전역 등방성 지수는 모든 작업공간상에서 최소 특이값과 최대 특이값의 비가 되며, 이 값이 최대가 되는 설계 변수를 찾는 것이 최적설계 문제가 된다.

4-2. 기구설계

GII의 값이 최대가 되는 설계변수를 찾는다는 것은 모든 작업공간상에서 만들어지는 최소 특이값과 최대 특이값의 비가 최대값을 갖도록 설계변수를 설계한다는 것이다. 설계인자를 상판과 하판의 반지름으로 정의하였으며 각 반지름에 따른 GII의 값을 구하였다. 즉 상판과 하판의 반지름에 따른 GII값의 변화를 알아보고 GII값이 최대가 되는 때의 상판과 하판의 반지름이 구하고자 하는 설계인자가 된다.

기구의 운동의 관점에서 planer형의 haptic interface의 각 링크의 길이가 같을 때 운동성이 우수하다는 것에 대해서는 이미 선행 연구에 의해 잘 알려져 있다. 따라서 각 링크의 길이를 $l_1 = l_2 = 10$ cm로 정의하고 상판과 하판의 반지름의 변화에 따라서 GII의 값이 최대가 되는 상판과 하판의 반지름의 크기를 구하였다. 그림 10에서 보는 것과 같이 상판이 위치변화만을 고려할 경우 상판과 하판의 반지름의 각각 1 cm 근처에서 GII의 값이 0.191로서 최고점이 되었다. 그림 11은 상판좌표계의 위치 변화뿐만 아니라 회전 roll, pitch, yaw를 각각 -30° 에서 $+30^\circ$ 까지 변화시켰을 때의 GII값을 나타내었다

표 2. 최적의 기구 설계인자

설계인자	최적	차선
상판의 반지름	3 cm	6 cm
하판의 반지름	5 cm	12 cm
l1의 길이	10 cm	10 cm
l2의 길이	10 cm	10 cm
GII	0.0221	0.0165

표 2에는 전역 등방성 지수를 적용하여 본 연구에서 제안한 구조의 설계 인자를 산출한 것이다. 상판과 하판의 반지름이 각각 3 cm, 5 cm일 때 GII의 값이 0.0221로서 최대가 됨을 볼 수 있다. GII의 값이 크다는 것은 그만큼 상판과 하판이 서로 독립적이라는 의미가 되며 모든 작업공간상에서 상판과 하판이 서로의 구속을 받지 않고 최대로 운동을 할 수 있다는 의미가 된다. 그러나 상·하판의 크기가 너무 작아지면 기구적 제작의 어려움 등이 따르므로 차선을 선택해야 한다.

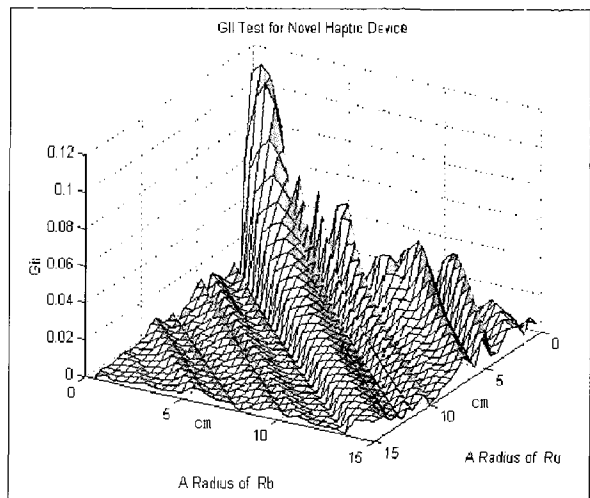


그림 10. 위치변화만을 고려했을 때 GII 변화

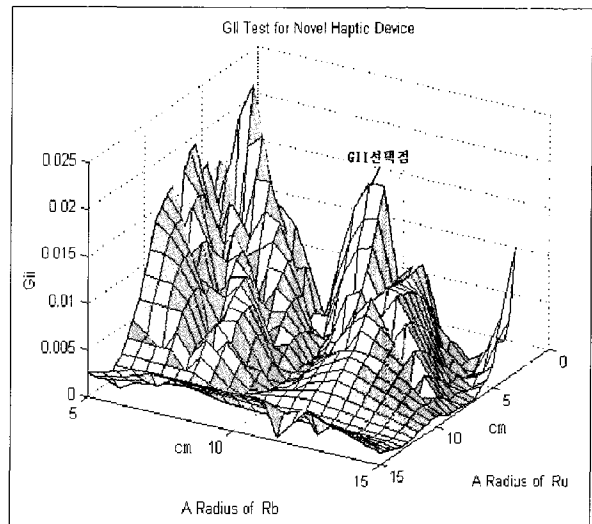


그림 11. 위치 및 회전을 고려했을 때의 GII 변화

표 2에서 보면 하판의 반지름이 12 cm, 상판의 반지름이 6 cm 근처에서 GII값이 0.0165로서 비교적 크게 구해짐을 볼 수 있으므로 이를 제안된 haptic interface의 설계인자로 정의한다.

V. 제어기 설계

5-1. 동역학 해석

병렬형 haptic interface의 경우 기구의 동특성 영향이 적고 해석의 어려움으로 인해 많은 경우에 기구의 동특성이 무시되었다. 그러나 본 연구와 같은 haptic interface에 관한 연구에서 넓은 범위의 기계적 임피던스 제어를 위해서는 haptic interface의 동특성 연구가 선행 되어야 한다. 병렬형 haptic interface의 동역학은 Jacobian

과 마찬가지로 관절 토크에 관한 폐쇄형의 동역학 방정식이 존재하지 않으며 직교공간상의 힘에 대한 폐쇄형 동역학 방정식이 유도될 수 있다[7]. 본 논문에서는 Lagrange 방정식을 이용하여 haptic interface의 직교공간상의 동역학 방정식을 유도하였다. 상판의 운동에너지는 직교좌표 공간상의 속도와 각 속도에 의해 다음 식 (22)과 같이 구해질 수 있다.

$$K_m = \frac{1}{2} v^T m_m v + \frac{1}{2} \omega^T I \omega \quad (22)$$

$$= \frac{1}{2} \dot{x}^T M_m \dot{x}$$

상판의 위치에너지는 상판의 중심에 모든 질량이 점 질량으로 존재한다고 가정할 때 다음 식(23)과 같이 간단히 구해진다.

$$P_m = m_m g z \quad (23)$$

직렬링크의 동역학 해석을 위해 그림 12과 같이 각 관절의 질량은 링크의 한 점에서 점 질량으로 존재한다고 가정한다. 직렬링크의 $\{Li\}$ 좌표계를 기준으로 첫 번째 질량의 위치는 다음 식(24)으로 나타내 질 수 있다.

$$x_{qli} = \begin{bmatrix} x_{qli} \\ x_{qli} \\ x_{qli} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{g1} \cos \theta_{1i} \cos \theta_{2i} \\ l_{g1} \sin \theta_{1i} \cos \theta_{2i} \\ l_{g1} \sin \theta_{2i} \end{bmatrix} \quad (24)$$

식(24)의 양변을 미분함으로 다음 식(25)와 같이 $\{Li\}$ 좌표계를 기준으로 한 속도가 구해진다.

$$v_{qli} = \frac{\partial x_{qli}}{\partial \theta} \dot{\theta}$$

$$= \begin{bmatrix} -l_{g1} c_{\theta_{2i}} s_{\theta_{1i}} & -l_{g1} c_{\theta_{1i}} s_{\theta_{2i}} & 0 \\ l_{g1} c_{\theta_{1i}} c_{\theta_{2i}} & -l_{g1} s_{\theta_{1i}} s_{\theta_{2i}} & 0 \\ 0 & l_{g1} c_{\theta_{2i}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{1i} \\ \dot{\theta}_{2i} \\ \dot{\theta}_{3i} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$= V_{1i}(\theta) \dot{\theta}$$

여기서, 첫 번째 질량의 속도행렬 $V_{1i}(\theta)$ 에 역기구학 해를 대입함으로써 직교공간변수에 대한 식을 얻을 수 있다. 또한 Jacobian의 관계로부터 식(25)은 식(26)과 같이 직교좌표 공간상의 속도로 다시 쓸 수 있다.

$$v_{qli} = V_1(\theta) \dot{\theta} = V_1(x) J(x) \dot{x} \quad (26)$$

모든 직렬링크의 직교공간변수에 대한 첫 번째 질량의 속도행렬 V_1 은

$$V_1(x) = \begin{bmatrix} V_{11}(x) & 0 & 0 \\ 0 & V_{12}(x) & 0 \\ 0 & 0 & V_{13}(x) \end{bmatrix} \in R^{9 \times 9}$$

이며, 이로부터 첫 번째 질량의 전체 운동에너지는 식 (27)과 같이 직교공간 변수에 대해 구해진다.

$$K_1(x) = \frac{1}{2} v_{qli}^T M_1 v_{qli}$$

$$= \frac{1}{2} \dot{x}^T J(x)^T V_1^T(x) M_1 V_1(x) J(x) \dot{x}$$

$$= \frac{1}{2} \dot{x}^T \widehat{M}_1 \dot{x} \quad (27)$$

여기서 \widehat{M}_1 은 직교공간 변수에 대한 질량 행렬이다.

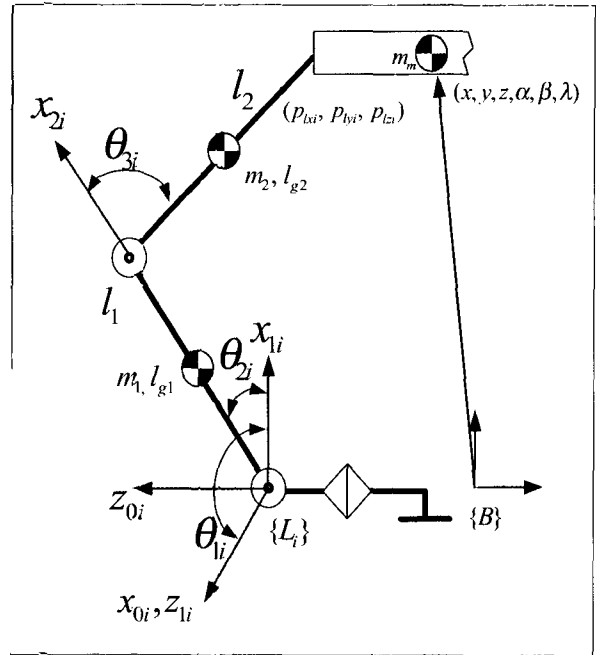


그림 12. 동역학 해석을 위한 좌표정의

위치에너지는 다음 식(28)으로 구해진다.

$$P_1 = m_1 g \sum_{i=1}^3 y_{q1yi} \quad (28)$$

여기서 g 는 중력 상수, x_{qliyi} 는 식(24)의 두 번째 요소에 역기구학 해를 대입하여 얻어진다. 그리고 두 번째 질량의 경우도 첫 번째 질량의 경우와 같은 방법으로 다음 식(29)과 식(30)으로 구해진다.

$$K_2 = \frac{1}{2} \dot{x}^T J^T V_2^T M_2 V_2 J \dot{x} \quad (29)$$

$$= \frac{1}{2} \dot{x}^T \widehat{M}_2 \dot{x}$$

$$P_2 = m_2 g \sum_{i=1}^3 y_{q2yi} \quad (30)$$

이상과 같이 구해진 운동에너지와 위치에너지로부터 직교공간상의 Lagrange's 방정식을 사용하여 운동방정식을 구할 수 있다. 직교좌표상의 힘 F 는 다음 식(31)으로 정의된다.

$$F = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L}{\partial x} \quad (31)$$

여기서 L 은 Lagrangian 연산자로 운동에너지와 위치에너지의 차로 정의되며 본 연구의 경우 다음 식(32)과 같이 정의되어진다.

$$L = K - P = K_m + K_1 + K_2 - P_m - P_1 - P_2 \quad (32)$$

이와 같이 계산되어진 동역학 방정식은 고차의 비선형 미분 방정식으로 구해지며, 이를 행렬의 형태로 다시 쓰면 다음 식(33)과 같다.

$$M(x)\ddot{x} + V(x, \dot{x}) + G(x) = F \quad (33)$$

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

5-2. 임피던스 제어

임피던스 제어는 로봇 haptic interface의 자세와 접촉 환경과의 힘의 관계를 일정하게 유지시키는 방법이다. 임피던스 제어에서는 힘과 속도와의 관계를 다음 식(34)의 선형전달함수의 관계식으로 나타낸다.

$$f(s) = Z_e(s) \dot{x}(s) \quad (34)$$

여기서 s 는 라플라스 변환의 변수이며, $f(s)$ 는 환경과 로봇이 접촉한 점에서의 힘을 나타내며, $\dot{x}(s)$ 는 접촉점에서의 속도를 나타낸다. $Z_e(s)$ 는 접촉점에서의 힘과 속도의 관계를 나타내는 환경의 임피던스를 나타낸다. 주어진 환경 임피던스 모델에 대하여 목적 임피던스라고도 하는 로봇의 임피던스 모델을 설정하여 힘, 위치 제어기를 설계할 수 있다. 로봇의 임피던스를 $Z_m(s)$ 라고 하고 속도의 오차와 접촉력의 관계로서 정의한다. 제어기 즉, 로봇의 임피던스는 힘의 오차를 입력받아 속도를 생성하는 형태가 된다.

5-3. 조작자와 haptic interface와의 접촉임피던스 모델링

먼저 임피던스 제어기를 구성하기 위해서는 조작자와 haptic interface 기구 사이의 접촉 모델링이 필요하다. 임피던스 모델에 의해 haptic interface 기구와 조작자 사이에 작용하는 힘 f 는 다음과 같이 모델링한다[8].

$$f = b\dot{x} + kx \quad (35)$$

여기서 b , k 는 조작자의 질량, 점성계수, 강성을 나타내고, 조작자에 따라 다르다. 식(35)을 라플라스 변환하여 접촉환경 임피던스를 구하면 식(36)과 같다.

$$Z_e(s) = b + k/s \quad (36)$$

또한 haptic interface는 실제 수술하는 슬레이브 로봇의 F/T센서를 통해 진송되어져 온 force 및 torque 값을 원격지에 위치한 조작자에게 정확히 복원시켜주는 기능을 가져야 한다. 로봇 임피던스를 다음 식(37)과 같이 설계한다.

$$Z_m(s) = \gamma s, \quad (0 < \gamma < \infty) \quad (37)$$

5-4. 임피던스 파라미터 값 추종을 위한 적응제어

조작자와 haptic interface기구 사이에 작용하는 힘을 식(35)과 같이 모델링 하였으며, 조작자가 haptic interface에 가하는 힘의 크기에 따라 임피던스 파라미터 b, k 값이 변화하게 된다. 그러므로 슬레이브 로봇에서 전달되어져 오는 힘을 정확히 복원하기가 어렵다. 이러한 임피던스 파라미터 값은 작업도중 수시로 변동하므로 모델링된 일정한 값을 사용할 경우 언제나 불확실성을 포함하게 되어 haptic interface의 안정성을 저해하는 요인으로 작용하게 된다. 한편 조작자가 haptic interface에 가하는 힘의 변화가 커지면 파라미터 값 또한 큰 폭으로 변화하게 되므로, 이 값을 추종할 수 있는 적응 알고리즘이 필요하다.

5-5. 적응제어 알고리즘

추정값 $\hat{\theta}$ 는 미지의 실제 파라미터의 값 θ 을 다음 식(38)과 같은 법칙에 의해 추종해간다.

$$\dot{\hat{\theta}} = \hat{\theta} - \eta e \phi, \quad 0 < \eta < \infty \quad (38)$$

Lyapunov function을 다음 식(39)과 같이 정의하고

$$v = \phi^T \phi + \frac{\eta}{2} \int_t^\infty \epsilon^2(\tau) d\tau \quad (39)$$

식(39)을 미분하면 다음 식(40)과 같이된다.

$$\begin{aligned} \dot{v} &= -2\eta (\phi^T \phi)^2 - 2\eta (\phi^T \phi) \epsilon - \frac{\eta}{2} \epsilon^2 \\ &= -2\eta \left(\phi^T \phi + \frac{\epsilon}{2} \right)^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (40)$$

모든 시간 $t \geq 0$ 에 대하여 $0 \leq v(t) \leq v(0)$ 이고, 다음 식 (41)과 같이 나타낼 수 있으므로 $e \rightarrow 0$ 로 수렴한다.

$$-\frac{1}{2\eta} \int_0^\infty \dot{v} dt \simeq \int_0^\infty e^2 dt \leq \infty \quad (41)$$

여기서 퍼센트 오버슈트, 정착시간 등 조작자가 편안하게 작업을 할 수 있는 파라미터 영역의 범위를 다음 식(42)과 같이 설정하고, 이 영역 내에서 각 파라미터 값을 추종해 간다.

$$\hat{\theta} \in [\theta^-, \theta^+] \quad (42)$$

5-6. 양방향 임피던스 제어

조작자가 haptic interface를 통해 슬레이브 로봇에 위치/힘 명령을 내리면 슬레이브 로봇이 위치/힘 명령을 추종하는 단방향 위치/힘 제어가 수행되며, 슬레이브 로봇이 환경과 접촉하여 힘이 발생하면 조작자에게 haptic interface를 통해 접촉힘을 전달하는 단방향 힘 제어를 결합하여 양방향 제어기를 설계한다. 현재까지 이루어진 haptic interface 제어에 관한 연구는 기구의

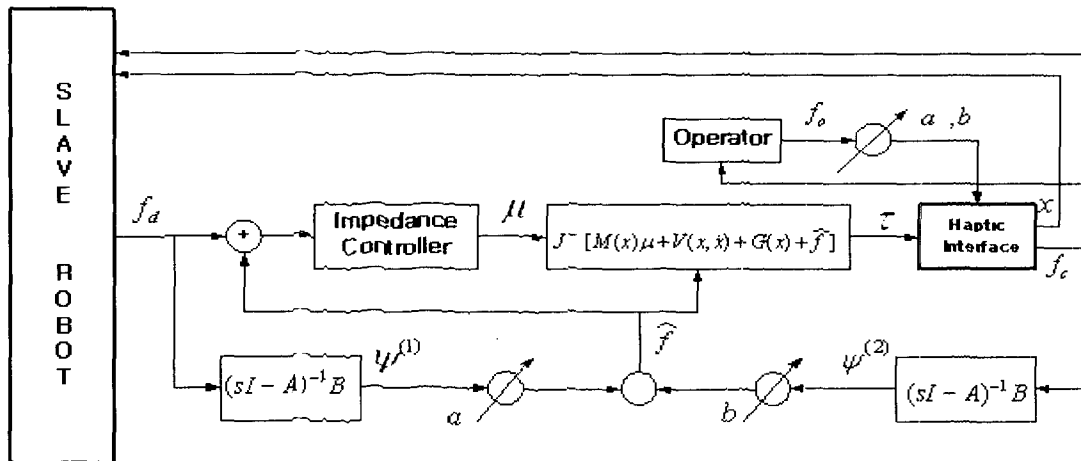


그림 13. haptic interface의 제어 블록도

기계적 동역학은 무시하고 환경 접촉 모델에 대한 접촉안정성 및 성능에 관한 연구가 대부분이었다 [9-12].

Haptic interface 제어기 설계에 있어 가장 중요한 사항은 가능한 넓은 영역에서 기구의 기계적 임피던스를 제어할 수 있도록 하는 것이다. 즉, 가용 상태에서는 조작자가 기구를 사용하는 것을 느낄 수 없어야 하고, 슬레이브 로봇이 대상환경과의 접촉시 발생하는 접촉힘을 조작자가 정확히 느낄 수 있어야 한다. 이를 위해서는 조작자의 운동을 인식하여 그에 대응하는 기구의 동특성을 보상함으로써 가능하다. 제안된 haptic interface의 제어 블록도를 그림 13에 나타내었다. 기구의 동특성을 보상하면서 일정 힘 f_h 를 발생시키기 위해서는 식(33)의 직교공간상의 동역학 방정식을 다음 식(43)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$f = M(x) \ddot{x} + V(x, \dot{x}) + G(x) + f_h \quad (43)$$

여기서 f_h 를 식(35)과 같이 모델링 하였으며 조작자가 haptic interface에 가하는 힘의 크기에 따라 b, k 의 값이 변화한다. 적응제어 알고리즘에 의해 추종된 \hat{b}, \hat{k} 값을 식(35)에 대입하여 구한 \hat{f}_h 를 사용한다. 이때 힘-토크 관계식이 다음 식(44)과 같다.

$$f = J(x)^T \tau \quad (44)$$

식 (44)으로부터 다음 식(45)과 같이 능동관절토크를 얻을 수 있다.

$$\tau = J^{-T}(x)[M(x)\ddot{x} + V(x, \dot{x}) + G(x) + \hat{f}_h] \quad (45)$$

식(45)의 관절토크는 기구의 동특성을 포함하기 때문에 기구의 관성 및 중력 등에 의한 동역학적 특성을 보상할 수 있다. 이 경우 관절 토크는 \hat{f}_h 에 의해 제어되며, 이를 통해 haptic interface와 조작자 사이에 발생하

는 힘을 제어 할 수 있게 된다.

5.7. 시뮬레이션

조작자는 슬레이브 로봇에 힘/위치 정보를 전달하기 위해 haptic interface를 움직이게 되는데, 이때, 조작자가 가하는 힘의 변화에 따라 식(35)에서 표현된 접촉 임피던스의 파라미터 k, b 값이 변화하게 된다.

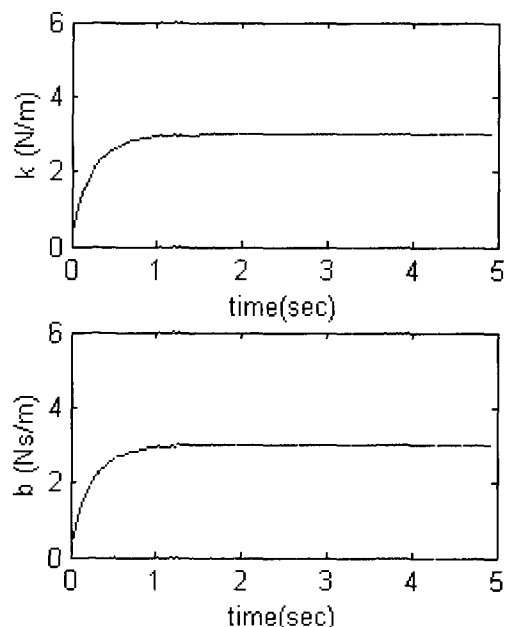


그림 14. \hat{k}, \hat{b} 의 추종성능 ($k=3N/m, b=3Ns/m$)

그림 14은 실제 파라미터 값 k, b 를 각각 3 N/m, 3 Ns/m로 설정하고, 추종값 \hat{k}, \hat{b} 는 초기값으로 0 N/m, 0 Ns/m로 설정했을 때, 적응제어 알고리즘을 통한 추

중성능을 나타낸다. 이때 추종속도는 식(40)에서 η 값의 크기가 클수록 빨라진다. 그림 15은 실제 파라미터 값 k , b 이 각각 3 N/m, 3 Ns/m에서 6 N/m, 6 Ns/m으로 변화할 때, 적응제어 알고리즘을 통한 \hat{k} , \hat{b} 의 추종성능을 나타낸다. 그림 16은 기준입력 f_d 가 10 N이고, 그림 15에서처럼 실제 파라미터 값 k , b 이 각각 3 N/m, 3 Ns/m에서 6 N/m, 6 Ns/m으로 변화할 때, haptic interface와 조작자의 상호작용력 f_c 의 변화를 나타낸다. 즉, 조작자가 haptic interface에 가하는 힘을 변화시키는 동안에도 슬레이브 로봇으로부터 전달되어져 오는 입력 f_d 를 그대로 유지하고 있음을 알 수 있다.

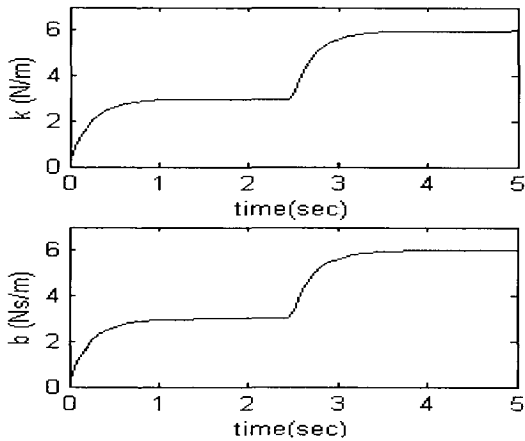


그림 15. \hat{k} , \hat{b} 의 추종성능
($k=3 \rightarrow 6N/m$, $b=3 \rightarrow 6Ns/m$ at 2.5s)

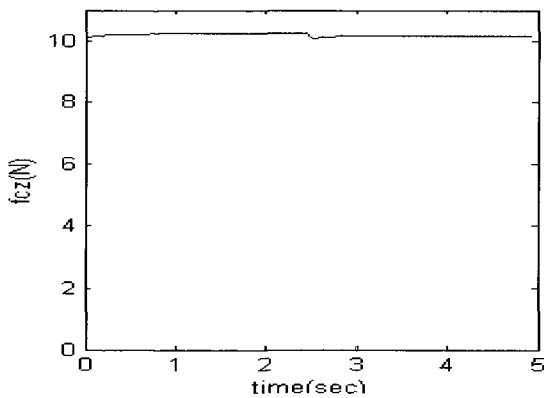


그림 16. 상호작용력의 변화
($k=3 \rightarrow 6N/m$, $b=3 \rightarrow 6Ns/m$ at 2.5s)

VI. 실험결과 및 검토

6-1. 시스템 구성도

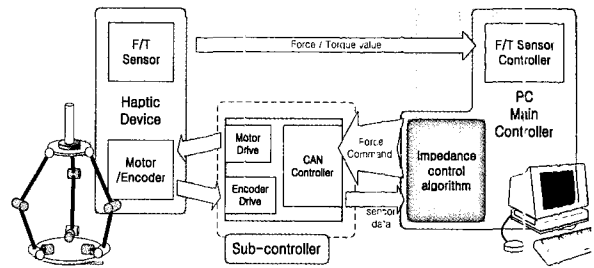


그림 17. 시스템의 전체구성

실험에 사용한 시스템의 구성도는 그림 17과 같다. 시스템에 사용한 주 제어기는 PC Pentium 300MHz를 사용하였으며 PC에서의 제어명령은 CAN BUS를 통해 250Kbps의 통신속도로서 haptic interface 기구의 관절 토크를 발생시키는 하부제어기로 전달된다. haptic interface의 각 관절을 제어하는 하부제어기는 87C196CA microprocessor를 사용한 6개의 관절모터 제어기로 구성하였고 외부로부터의 힘과 토크를 입력받을 수 있는 F/T sensor는 ATI INDUSTRIAL AUTOMATION의 ISA F/T-16 model을 사용하였다.

6-2. 검토

Haptic interface의 기구학 해석시 각 직렬링크의 길이를 $l_1 = l_2 = 16$ cm, 상판의 반지름을 $r_m = 96$ cm, 하판의 반지름을 $r_b = 19.2$ cm로 하였으며, 동역학 방정식을 단순화하기 위해 각 링크의 질량을 무시하였으므로 상판의 질량을 $m_m = 10$ kg로 실제 기구보다 무겁게 설정하였다. 이로 인한 모델링 오차를 극복하기 위해 강인 제어 알고리즘을 사용하여 실험을 수행하였다 먼저 haptic interface를 움직이지 않고 조작자가 쥐고 있는 상태에서 기준입력 f_d 를 2초 후에 0 N에서 4 N으로 변화시켰을 때, x , y , z 축에 대한 힘 복원 성능을 그림 18, 19, 20에 각각 나타내었다.

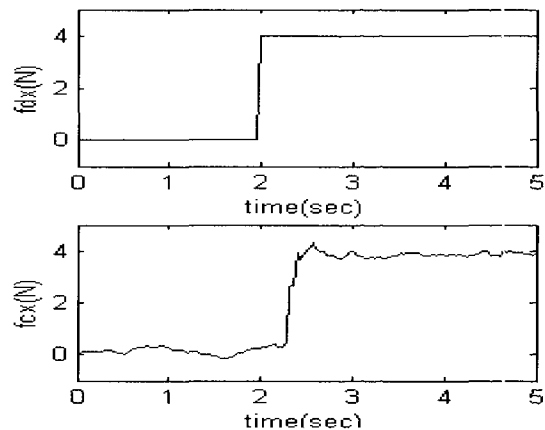


그림 18. X축 방향의 스텝입력 및 힘 응답특성

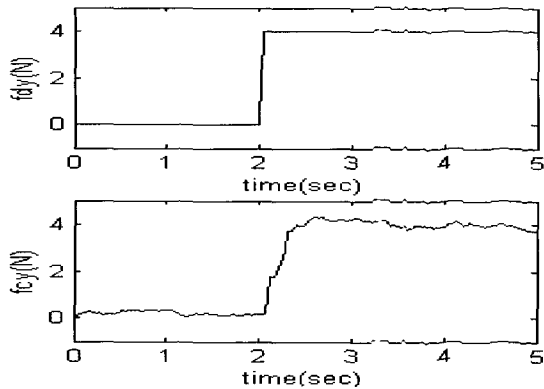


그림 19. Y축 방향의 스텝입력 및 힘 응답특성

그림에서처럼 어느 정도의 시간지연을 가지지만 기준 입력 f_d 를 그대로 복원하고 있음을 알 수 있다. 여기서 f_c 는 haptic interface의 상판에 부착된 F/T 센서에서 측정된 값으로 조작자가 실제로 느끼는 힘이다.

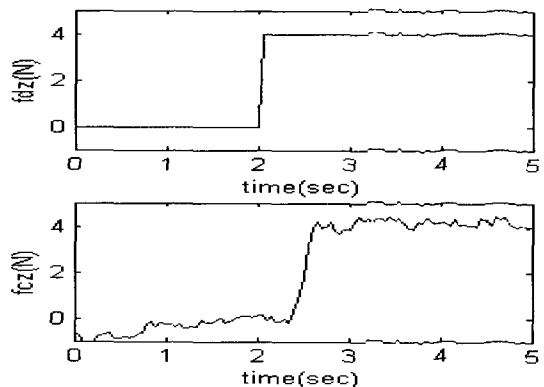


그림 20. Z축 방향의 스텝입력 및 힘 응답특성

그림 21는 기준입력 f_d 를 6 N의 스텝입력으로 하고, 조작자가 haptic interface를 쥐고 z 축 방향으로 움직일 때의 힘 복원 성능을 나타내었다.

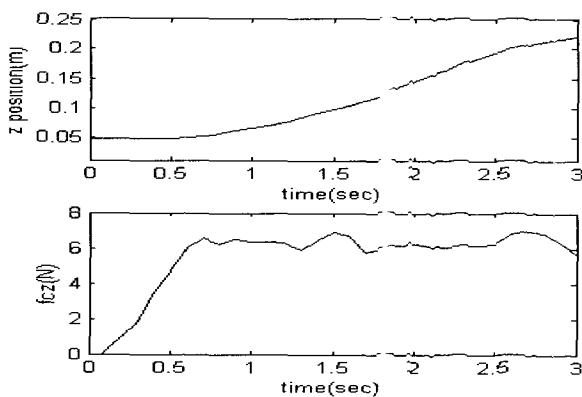


그림 21. Z축 방향의 위치변화 및 힘 응답특성

그림 21에서 변화하는 파라미터 값을 추종해 감으로써 보다 정확한 힘 복원 성능을 나타냄을 알 수 있다. 그러므로 조작자가 haptic interface를 쥐고 정지해 있을 때 뿐 만 아니라 슬레이브 로봇에 힘/위치 정보를 전달하기 위해 힘을 가하며 움직이는 동안에도 변화하는 접촉 임피던스의 값을 추종하며, 슬레이브 로봇으로부터 전달되어져 오는 힘 f_d 를 그대로 복원할 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다.

VII. 결론

본 논문에서는 이를 위해 크게 두가지를 제안하였다. 첫째 6자유도의 튜링 haptic interface 기구를 제안하였다. 제안된 기구는 3개의 직렬형 매니플레이터를 조합하여 병렬형 구조를 갖도록 함으로써 직렬형 구조의 큰 작업영역 및 해석의 용이함과 병렬구조의 소형화, 진고함의 장점을 함께 갖는다. 제안된 기구의 정기구학, 역기구학, 속도기구학 및 동역학을 해석하였으며, 기구학적 관점에서의 기구 파라미터를 계산하였다.

또한 설계된 기구 파라미터를 적용한 경우의 진역 등방성 지수를 검사하여 제안된 구조가 haptic interface로의 사용이 용이함을 확인하였다.

특히 제작된 haptic interface 기구를 사용하여 슬레이브 로봇에 명령을 내리고, 슬레이브 로봇에 장착된 F/T 센서를 통한 힘 정보를 이용하여 조작자가 실제 작업장에 위치할 듯한 감각을 느끼도록 하였다. 또한 조작자가 haptic interface에 가하는 힘의 변화가 커지면 접촉 파라미터 값 또한 큰 폭으로 변화하게 되므로, 이 값을 추종할 수 있는 적응 알고리즘을 개발하였다.

이상의 연구를 통해 가상현실 및 원격수술 등에 사용될 수 있는 범용의 haptic interface와 그 제어 알고리즘을 개발하였다. 개발된 기구와 제어알고리즘을 사용하여 가상현실 등의 응용에서 보다 현실감 있는 사용자 인터페이스를 제공할 수 있으리라 판단된다. 앞으로 진행되어야 할 연구과제로는 가상현실상의 대상물체로부터 효율적으로 haptic interface에 haptic 정보를 제공하기 위한 가상현실 시스템에 대한 연구와 실제 원격의 네트워크 환경을 고려하여 시간에 따라 변화하는 시간지연에 강인한 제어에 대한 연구가 필요할 것이다.

참고문헌

1. J. Michael Brown and J. Edward Colgate, "Passive Implementation of Multibody Simulations for Haptic Display," Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, Dallas, 1997.

2. Massie, T. Stalisbury, K. "PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects," Dynamic System and Control, ASME, New York, NY. pp.295-299, 1994.
3. G. L. Long and C. L. Collins, "A pantograph linkage parallel platform master hand controller for force-reflection," Proc. IEEE Int Conf. Robotics and Automation, pp.390-306, 1992.
4. H. Iwata, "Artificial reality with force-feedback: Development of desktop virtual space with compact master manipulator," Comput. Graph, vol.24, no.4, pp. 165-170, 1990.
5. K. Woo, B.Jin, and D. Kwon, "A 6 DOF force-reflecting hand controller using the fivebar parallel mechanism," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1597-1602, 1998.
6. Leo J. Stocco, "Mechanism Design for Global Isotropy with Applications to Haptic Interfaces," The ASME 6th Annual Symp. Dallas, Texas, pp. 15-21, 1997.
7. D. Gershon and V. Baruch, "Impedance Control with autonomous mode switching," 5th International Conference on Advanced Robotics, pp. 482-486, 1991.
8. Y. H. Chen and S. Pandey, "Robust hybrid control of robot manipulators," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.236-241, 1989.
9. P. Millman and J. E. Colgate, "Design of a High Performance Interface to Virtual Environments," IEEE Annual Virtual Reality International Symposium, pp.210-222, Piscataway, NJ, 1993.
10. P. Buttolo and Blake Hannaford "Advantages of Actuation Redundancy for the Design of Haptic Displays," Forth Annual Symposium on Haptic Interface for Virtual Environment and Teleoperator System, DSC-Vol. 57-2, pp. 623-630, San Francisco, Nov. 1995.
11. M. Moreyra and Blake Hannaford, "A Practical Measure of Dynamic Response of Haptic Devices," Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotic and Automation, pp. 369-374, Leuven, Belgium, May. 1998.
12. C. Y. Su and Y. Stepanenko, "Adaptive variable structure tracking control for constrained robots," IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, vol.30, no.2, pp. 493-503, 1994.

이 수 성

1985년 충남대 전자공학과 졸업. 동의대 석사(1998), 부산대 박사(2002). 2002년~현재 대구미래대학 재활공학과 교수. 관심분야는 로봇틱스 및 의용전자제어 및 응용.

이 장 명

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업. 동대학원 석사(1982), University of Southern California 박사(1990). 1992년~현재 부산대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 이동로봇 및 로봇의 지능제어 및 응용.