

공간형 3 자유도 Haptic 메커니즘의 구현

이재훈, 이수강(한양대 대학원), 이병주(한양대 전자컴퓨터 공학부),
이석희*(고려대 대학원), 이정현(고려대 대학원), 김희국(고려대 제어계측공학과)

Implementation of A Spatial 3-DOF Haptic Mechanism

J.H. Lee(School of Elec. & Comp. Eng., HU), S.G. Lee(HU), B.J. Yi(HU),
S.H. Lee(CIE. Dept., KU), J.H. Lee, W.K. Kim

ABSTRACT

In this study, a spatial 3-dof haptic mechanism is implemented. The implemented mechanism does not employ the gear transmissions as velocity reducers for all three joints but uses wire-based transmissions, thereby it is able to minimize the frictions significantly. Also, by employing the structure of the four-bar mechanism to drive third joint from close to the base, the mechanism is able to minimize the inertia effect from the third actuator very effectively. Its kinematic analysis such as position and velocity analyses are performed first. Then, its operating software development, hardware implementation, and the related interfaces between a PC and the implemented Haptic device are completed. To evaluate its potential and its performance as a haptic device, a experiment generating a virtual constraint in a operational task space is conducted and preliminary results are discussed.

Key Words : Haptic device(햅틱기기), Kinematic Analysis(기구학 해석), virtual constraint(가상구속), moving average(Low Pass Filter)

1. 서론

원격조종시스템에 사용되는 haptic 기기의 설계에 있어 가장 중요한 기준중의 하나는 작업자에게 원격 로봇이 실제 접하고 있는 작업환경에 대한 정보를 있는 그대로 재현 또는 반영할 수 있을 뿐 만 아니라 haptic 기기 자체의 관성, 중력 그리고 마찰력을 최소화하는 것이다. 이러한 설계기준을 따르기 위해 구조적으로 직렬구조, 병렬 구조 혹은 혼합구조를 사용하는 다양한 형태의 haptic 기기들이 제시되어 있다. 특히, 직렬형 구조의 haptic 기기는 작업공간은 비교적 크지만 사용되는 액츄에이터의 무게 및 관성을 최소화하기 위한 세심한 주의가 요구된다. 이에 반하여 병렬형 구조를 가지는 haptic 기기는 대부분의 액츄에이터를 지면에 가깝도록 위치할 수 있으므로 관성으로 인한 영향은 줄어들지만 작업공간의 크기가 매우 제한된다는 단점이 있다.

특히, 비교적 넓은 작업공간의 크기를 요하는 작업에 적합한 haptic 기기로서는 당연히 직렬구조가 이러한 요건에 적합하며 앞에서 언급한 바와 같이 직렬형 구조의 haptic 기기에 장착될 액츄에이터의

무게 및 관성 그리고 액츄에이터 및 전동장치에서 발생하는 마찰을 줄이기 위한 효율적인 설계적인 측면에서의 보완이 매우 중요하게 된다.

최근 들어 haptic 기기분야에서는 원격조종 시스템의 현실감 재현뿐 만 아니라 작업자의 실수 또는 작업시 안전을 고려한 다양한 알고리즘이 제시되고 있다. 무릎관절 교체작업에의 활용을 위해 개발된 의료용 Acrobot 로봇에는 작업공간을 세 가지의 다른 영역으로 나누어 작업자에게 적절한 크기의 구속력을 제공하는 능동구속제어(active constraint control) 방식이 소개되었으며[2] J.Abbott 등[3,4,5]은 소프트웨어상에서 작업로봇이 제한구역으로 이동을 제한하기 위해 가상고정물(virtual fixture)을 생성에 대한 분석과 알고리즘의 안정성에 관한 연구를 수행하였다.

이러한 연구 추세에 따라 본 연구에서는 무엇보다도 현실감을 극대화할 수 있도록 모든 관절에 wire를 사용하는 전동장치를 활용하고 사절기기 구조를 이용하여 세 번째 관절을 구동하는 액츄에이터를 지면에 가깝도록 장착함으로써 상대적으로 적은 관성 및 중력 효과를 갖는 직렬 구조를 가지는 haptic 기기를 설계/제작하고 이 메커니즘의 위치해석 및 일

차 기구학 해석, 그리고 작동 소프트웨어 개발, 하드웨어 제작, 그리고 PC와 제작된 haptic 기기와의 인터페이스를 수행하였다. 그리고 개발된 haptic 기기의 가능성 및 성능을 점검하기 위해 작업공간내에 가상 구속 공간을 설정하고 이에 관련된 예비 실험을 수행하였다.

2. 위치해석 및 일차 기구학 해석

2.1 메커니즘의 구조 및 위치 해석

Fig. 1은 세 개의 회전관절을 가지는 직렬형 구조의 3 자유도 haptic 기기를 나타낸다. 모든 관절은 특수 wire transmission을 이용하여 와이어로 인한 오프셋과 마찰력을 최소화 하였으며 액츄에이터의 설치 위치로서 첫 번째 액츄에이터는 지면에 고정하고 두 번째와 세 번째 액츄에이터는 가능한 지면에 가깝도록 설치하였을 뿐 만 아니라 특히 세 번째 액츄에이터는 사절기구를 이용하여 관성과 중력효과를 최소화하였다. 실제로 제작된 메커니즘의 설계인자들의 값들은 Fig. 2와 같다.

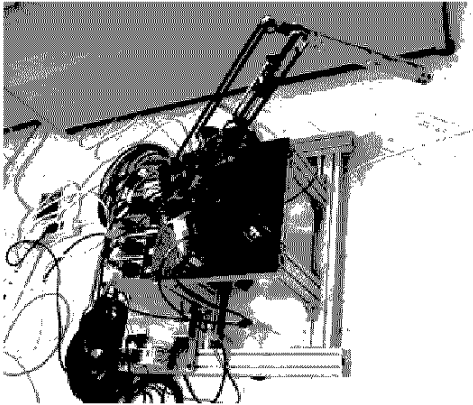


Fig. 1 The Implemented Haptic mechanism

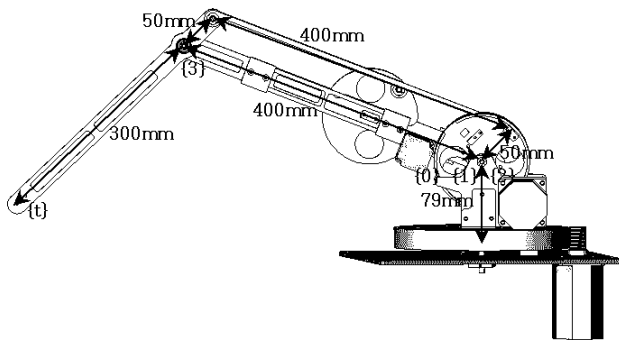


Fig. 2 Schematics of Haptic Mechanism

첫 번째 관절축과 두 번째 관절축이 만나는 위치에서 고정된 메커니즘의 기준좌표계로부터 세 번째 링크의 끝단까지의 출력위치벡터를 \vec{P}_{ee} 라 하자. 그리고 첫 번째, 두 번째, 세 번째 지역좌표계의 원점까지의 위치벡터를 각각 \vec{R}_1, \vec{R}_2 그리고 \vec{R}_3 라 하자. 메커니즘의 Denavit Hartenberg 링크인자는 다음 표 1과 같으며 출력 위치 벡터 $\vec{P}_{ee} = (x, y, z)^T$ 와 입력관절벡터 $\theta = (\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3)^T$ 사이의 정위치 관계식은 아래와 같이 얻어진다.

$$x = c_1(a_2c_2 + a_3c_{23}) \quad (1)$$

$$y = s_1(a_2c_2 + a_3c_{23}) \quad (2)$$

$$z = a_2s_2 + a_3s_{23} \quad (3)$$

출력벡터가 주어졌다고 할 때 역위치 해석은 입력관절벡터를 구하는 것으로서 (1)과 (2)로부터 첫 번째 관절변위는 아래와 같이 얻어진다.

$$\theta_1 = \text{Atan2}(y/(a_2c_2 + a_3c_{23}), x/(a_2c_2 + a_3c_{23})) \quad (4)$$

여기서 $a_2c_2 + a_3c_{23} = 0$ 인 형상은 출력점이 기저판의 좌표계의 원점과 일치하게 되는 형상을 나타내므로 위 식에서는 $a_2c_2 + a_3c_{23} \neq 0$ 로 가정하였다. 한편, Cosine's law를 이용하면 두 번째 관절변위는

$$\theta_2 = \cos^{-1} \frac{a_2^2 + x^2 + y^2 + z^2 - a_3^2}{1a_2 \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (5)$$

로 구해지며 두 가지의 해는 각각 elbow-up과 elbow-down 형상을 나타낸다. 특히, Table 2에 정의한 바에 따르면 $0^\circ < \theta_2 < 180^\circ$ 인 해는 elbow-up 형상을 나타냄을 알 수 있다. 같은 방법으로 세 번째 관절변위

$$\theta_3 = \cos^{-1} \frac{a_2^2 + a_3^2 - (x^2 + y^2 + z^2)}{2a_2a_3} + \pi \quad (6)$$

로 구해지며 마찬가지로 두 가지의 해는 각각 right-arm과 left-arm 형상을 나타내는데 Table 2의 정의로부터 $180^\circ < \theta_3 < 360^\circ$ 는 right-arm 형상을 나타냄을 쉽게 확인할 수 있다.

Table 1. Denavit Hartenberg Link Parameters

	α_{jk}	a_{jk}	d_{ij}	θ_j
0_1T	0°	0	0	θ_1
1_2T	90°	0	0	θ_2
2_3T	0°	a_2	0	θ_3
${}^3_{ee}T$	0°	a_3	0	0

2.2 메커니즘의 일차기구학 해석

직렬형 구조를 가지는 메커니즘의 입력관절벡터

와 출력위치벡터 사이의 속도관계식은 아래와 같이 표현되며[1]

$$\dot{\mathbf{u}} = [G_{\theta}^u] \dot{\theta} \quad (7)$$

여기서 자코비안 행렬 $[G_{\theta}^u]$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$[G_{\theta}^u] = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{s}}_1 \times (\vec{P}_{ee} - \vec{R}_1) & \hat{\mathbf{s}}_2 \times (\vec{P}_{ee} - \vec{R}_2) \\ \hat{\mathbf{s}}_3 \times (\vec{P}_{ee} - \vec{R}_3) \end{bmatrix} \quad (8)$$

그리고

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{s}}_1 \times (\vec{P}_{ee} - \vec{R}_1) &= (-y \ x \ 0)^T \\ \hat{\mathbf{s}}_2 \times (\vec{P}_{ee} - \vec{R}_2) &= (-z c_1 \ z s_1 - y s_1 + x c_1)^T \\ \hat{\mathbf{s}}_3 \times (\vec{P}_{ee} - \vec{R}_3) &= (-a_3 c_1 s_{23} \ a_3 s_1 s_{23} \ a_3 c_{23} (c_1^2 - s_1^2))^T \end{aligned}$$

따라서 가상일의 정리로부터 출력점에 가해진 힘 \mathbf{F}_u 와 입력관절토크 $\boldsymbol{\tau}_{\theta}$ 사이의 관계식은 아래와 같다.

$$\boldsymbol{\tau}_{\theta} = [G_{\theta}^u]^T \mathbf{F}_u \quad (9)$$

2.3 Haptic 시스템 구성

Fig. 3은 제작된 haptic system의 하드웨어, 서버제어기 그리고 PC와의 인터페이스 선도를 보여주고 있다. haptic system은 중량 및 질량을 최소화하기 위해 알루미늄 합금으로 제작되었으며 서버 제어기는 Mitsubishi사의 MR-J2-100A와 MR-J2-200A로서 전류 증폭 모드로서 사용하였다. 구동 액츄에이터로서는 Mitsubishi사의 HC-MF-13과 HC-MF-23이 사용되었으며 센서로서는 상대 회전 엔코더가 각 모터에 장착되었다. 표 2는 구동 액츄에이터 및 엔코더의 사양 그리고 사용된 transmission wire가 감긴 스펀의 직경과 모터의 직경사이의 비를 보여주고 있다. 또한, PC와 센서 그리고 액츄에이터와의 인터페이스를 위해 기판회로가 제작되었다.

Table 2. Specifications of motors and actuators

<< 서버 웹프 >>

사양	MR-J2-100A	MR-J2-200A
방식	정현파 PWM, 전류 제어 방식	
속도주파수응답	250 MHz	
토크제한입력	DC 0~+10V	
위치 제어 사양	최대입력펄스	400kpps, 200kpps
	위치결정위험펄스	1 회전당 8192 P/rev
	위치결정단료폭	0~±10000 펄스
	오차과대	±80k 펄스
속도 제어 사양	속도제어범위	아나로그속도 지령 : 1:1000 내부속도지령 : 1:5000
	아나로그속도지령	DC 0~±10V
토크 제어 사양	아나로그토크지령	DC 0~±8V
	토크직선성	±3% 이하
적용서보모터	HC-MF-13	HC-MF-23

<< 서보 모터 >>

사양	HC-MF-13	HC-MF-23
대용서보엔코딩	MR-J2-100A	MR-J2-200A
정격출력	0.1 kw	0.2 kw
정격토크	0.32 N·m	0.64 N·m
정격회전속도	3000 r/min	
최대회전속도	4500 r/min	
순시허용회전속도	3175 r/min	
최대토크	0.95 N·m	1.9 N·m
관성모드	0.03 J	0.088 J
전원소비비용량	0.3 kVA	0.5 kVA
정격전류	0.85	1.5
최대전류	2.6	5.0
질량	0.53 kg	0.99 kg

<< Transmission ratio >>

	Joint-to-motor shaft rotation ratio
joint 1	1 : 10.3427
joint 2	1 : 5.7142
joint 3	1 : 8.5714

2.4 시스템의 성능 검사

먼저, 각각의 모터에 장착된 엔코더 센서로부터 얻어지는 데이터의 고주파 잡음을 제거하기 위해 MATLAB을 이용하여 적합한 low pass 필터가 설계되었다. 엔코더의 출력신호가 1KHz의 속도로 출력됨을 감안하여 10개의 데이터를 평균하여 출력하는 (moving average) 형태를 사용하였다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 low pass filter가 적용되지 않은 관절에 장착된 엔코더로부터의 raw data와 lowpass filtered 데이터를 보여주고 있다. 필터로 인한 지연으로 구현된 전체 페루프 Haptic 시스템의 샘플링 타임은 100Hz 이다.

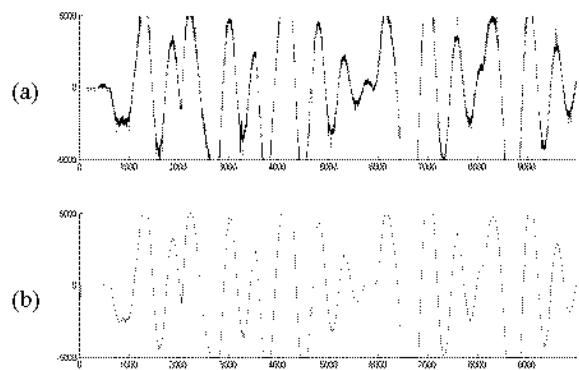


Fig. 3 Input signal from the Encoder :

a) raw data and b) low-pass filter data

개발된 haptic 기기의 성능 검사를 위해 다음과 같은 실험을 수행하였다. 먼저, 실험을 간단하도록 하기 위해, haptic 기기 끝단의 위치로부터 추적하고자 하는 궤적이 $x-y$ 평면상에 위치하며 z 축 방향으로

는 오류가 발생하지 않도록 단순한 수평면 위에 놓음과 동시에 궤적에 수직인 벡터가 쉽게 구해질 수 있도록 추적하고자 하는 궤적을 원 궤적으로 설정하였다. 그리고 작업자로 하여금 주어진 원형 궤적을 따라 haptic 기기의 끝단을 이동하도록 하였다. 그 후, 작업자의 실수를 차단하기 위해 주어진 궤적의 주변을 궤적으로부터 자유영역(free region), 경고영역(warning region), 그리고 불가영역(forbidden region)인 세 단계의 영역으로 구분한 후 각 영역에 대해 다른 형태의 가상구속환경을 제공하는 제어 알고리즘을 적용한 상태에서 작업자로 하여금 주어진 원형 궤적을 따라 haptic 기기의 끝단을 이동하도록 하였다. 이러한 실험의 특징은 다음과 같이 요약된다. 첫째 원형 궤적이 시간의 함수로 설정되지 않으므로 시간에 무관하게 주어진 원형 궤적을 정확히 추적하는 것을 목적으로 한다. 둘째는, 가상구속환경을 세 가지의 영역으로 구분하여 단지 정확히 주어진 궤적을 추종하는 것 뿐만 아니라 적용된 제어규칙이 실험적으로 얼마나 안정되게 적용될 수 있는 가를 확인하기 위함이다.

먼저, 작업자가 haptic 기기를 이동하는 동안에 haptic 기기 끝단의 점 $\mathbf{u} = (x, y, z)^T$ 으로부터 중심 $\mathbf{u}_o = (x_o, y_o, z_o)^T$ 에 위치하며 반경 R 인 원 궤적상의 현재 추종위치 \mathbf{u}_d 는 원 궤적이 위치한 $x-y$ 평면상에 투영된 현재 haptic 기기 끝단의 점에서 원형 궤적에 가장 가까운 점(Fig. 4)으로 아래와 같이 구해진다.

$$\mathbf{u}_d = \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_o + \frac{R}{r} (x - x_o) \\ y_o + \frac{R}{r} (y - y_o) \\ z_o \end{bmatrix}, \quad (10)$$

여기서

$$r = \sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2} \quad (11)$$

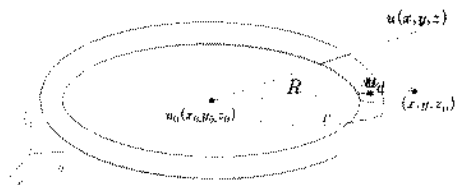


Fig. 4

다음은 궤적 주변의 영역별로 사용된 제어규칙을 기술한다. 첫 번째 자유 영역 내에서는 haptic 기기에 가해지는 가상구속 제어입력이 없으며 두 번째 경고 영역에서는 PD 제어 알고리즘이 적용되었다. 끝으로 불가영역에서는 상당한 크기의 힘이 불가영역의 경계면에 수직인 방향으로 가해지도록 하였다.

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_o &= \mathbf{0}, \text{ for } |\Delta \mathbf{u}| \leq r_1, \\ \mathbf{F}_a &= -K_p \Delta \mathbf{u} - K_v \Delta \dot{\mathbf{u}}, \\ &\text{for } r_1 \leq |\Delta \mathbf{u}| \leq r_2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\mathbf{F}_b = -\mathbf{F}_{wall} \Delta \hat{\mathbf{u}}, \text{ for } r_2 \leq |\Delta \mathbf{u}|$$

여기서

$$\Delta \mathbf{u} = \mathbf{u}_d - \mathbf{u} \quad (13)$$

따라서, 각 관절에서의 제어출력토크는 (9)로부터

$$\boldsymbol{\tau}_\theta = [C_\theta^u]^T \mathbf{F}_a + \boldsymbol{\tau}_g \quad (14)$$

이 되며 $\boldsymbol{\tau}_g = (\tau_{g1} \tau_{g2} \tau_{g3})^T$ 는 각 관절에서의 중력보상 토크를 나타내며 아래와 같다:

$$\begin{aligned} \tau_{g1} &= 0, \\ \tau_{g2} &= m_2 g l_{c2} \cos \theta_2 + m_2 g l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ &\quad + m_2 g a_2 \cos \theta_2 \\ \tau_{g3} &= m_3 g l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) \end{aligned} \quad (15)$$

Fig. 5 는 본 실험을 위해 구성된 전체 햅틱 시스템의 블록 다이어그램을 보여주고 있다.

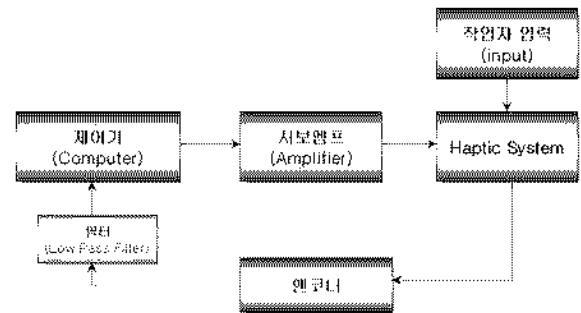


Fig. 5 Block diagram of the haptic system.

Fig. 6는 작업자가 $x-y$ 평면상의 원 궤적을 추적했을 때 haptic 기기 끝단의 궤적을 나타낸다. 그리고 Fig. 7는 작업자가 동일한 작업을 수행하는 동안 가상 구속 환경 제어 알고리즘이 적용된 경우에 대한 Haptic 기기 끝단의 궤적을 나타낸다. 본 실험으로부터 적절한 제어 게인의 설정으로 향상된 성능을 확보할 수 있다는 사실을 확인할 수 있다.

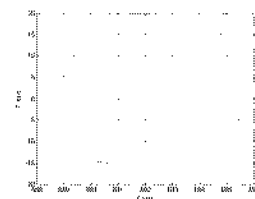


Fig. 6 trajectory by the operator without control

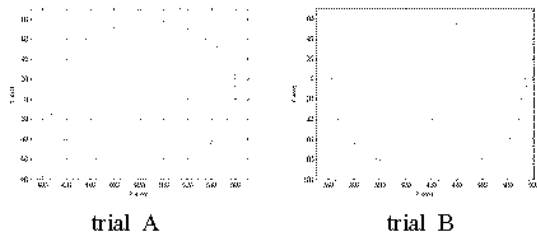


Fig. 7. trajectory by the operator with virtual constraint control action

4. 결론

본 연구에서는 wire transmission를 이용한 경량의 직렬형 3 자유도 haptic 기기를 제작하였다. 제작된 haptic 기기의 성능 시험을 위해 작업자의 실수에 대한 경고 또는 차단기능을 나타내는 가상 구속 환경을 생성기능을 실험하였다. 실험을 통하여 제작된 haptic 기기는 비교적 효과적인 가상 구속환경을 생성할 수 있는 것으로 나타났으나 실제 활용을 위해서는 보다 정밀하고 효과적인 제어 알고리즘의 개발 또는 적용이 요구된다 하겠다. 차후 연구로 이러한 구동 알고리즘에 대한 연구가 있으며 현재 진행 중에 있다.

후기

본 연구는 보건복지부 한국건강 21 연구개발과제 (02-PJ3-PG6-EV04-0003)에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

1. M. Thomas and D. Tesar, "Dynamic Modeling of Serial Manipulator Arms," Transactions of the ASME, vol. 104, 1982, pp. 218-228.
2. M. Jakopec, et al., "The Hands-On Orthopaedic Robot "Acrobot":Early Clinical Trials of Total Knee Replacement Surgery," IEEE transactions on Robotics and Automation, vol. 19, no. 5, 2003, pp. 902-911.
3. J.J.Abbott and A. Okamura, "Analysis of Virtual Fixture Contact Stability for Telem Manipulation," IEEE IROS conference, 2003, pp. 2699-2706.
4. J.J.Abbott, G.Hager and A. Okamura, "Steady-Hand Teleoperation with Virtual Fixtures," 12th IEEE workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2003, pp. 145-151.
5. J.J. Abbott and A. Okamura, "Virtual Fixture Architectures for Telem Manipulation," IEEE ICRA conf., 2003, pp. 2798-2805.