

병렬구조를 이용한 새로운 6자유도 역감제시 장치의 제어 및 평가

Control and Evaluation of a New 6-DOF Haptic Device Using a Parallel Mechanism

윤 정 원, 류 제 하
(Jungwon Yoon and Jeha Ryu)

Abstract : This paper presents control and evaluation of a new haptic device with a 6-DOF parallel mechanism for interfacing with virtual reality. This haptic device has low inertia, high bandwidth, compactness, and high output force capability mainly due to of base-fixed motors. It has also wider orientation workspace mainly due to a RRR type spherical joint. A control method is presented with gravity compensation and with force feedback by an F/T sensor to compensate for the effects of unmodeled dynamics such as friction and inertia. Also, dynamic performance has been evaluated by experiments. for force characteristics such as maximum applicable force, static-friction force, minimum controllable force, and force bandwidth Virtual wall simulation with the developed haptic device has been demonstrated.

Keywords : haptic device, virtual reality, parallel mechanism, performance evaluation

I. 서론

역감제시장치(haptic device)는 가상현실의 발전과 더불어 로봇틱스의 중요한 연구테마[1]가 되었으며 가상현실 시뮬레이션에서 조작자에게 힘을 피드백 시켜 주어 몰입감과 상호작용느낌을 크게 증진시킬 수 있도록 도와준다. 따라서 가상현실뿐만 아니라 원격조종, 의료 수술 등의 다양한 분야에서 역감제시장치를 적용하기 위한 연구들이 진행되어왔다. 이상적인 역감제시 장치는 넓은 작업공간과 적은 관성, 적은 마찰, 큰 대역폭 등의 성능 특성[2][3]을 가질 것을 요구하지만 이러한 특성들을 모두 만족하는 디바이스를 개발하기는 아주 어렵다. 따라서, 현재까지 개발된 역감제시장치는 성능의 제한을 가지며[4] 개발자는 사용자가 원하는 환경에 맞는 적당한 디바이스를 선택 할 수 있도록 역감제시장치의 성능평가를 제시하여 사용자가 그들의 목적에 맞도록 역감제시장치를 선택하여 최대한 효율적으로 이용할 수 있게 해야 한다. 그러므로 개발자는 역감제시장치의 성능평가를 객관적인 방법으로 수행할 필요가 있으며 몇몇 논문들이 성능평가와 함께 역감제시장치를 발표하였다.

Howe[5]는 5N이상의 힘을 내면서 100Hz의 대역폭을 가지는 원격조종에서 사용되는 수직 평면 디바이스를 제안하였다. Adelstein과Rosen [6]은 적어도 20N의 힘을 유지하면서 48Hz의 대역폭을 낼 수 있는 구형기구(spherical mechanism)를 개발하였다. Ellis [7]는 80Hz의 대역폭을 가지는 평면 역감제시장치를 개발하였다. 또한 큰 대역폭과 적은 관성을 가지는 역감제시

장치를 개발하기 위해 병렬기구를 이용한 연구 개발이 이루어져 왔다. 김희국외[8]는 병렬구조를 이용한 3자유도 구형시스템을 제작하였다. 하지만 높은 기어 비를 갖는 하모닉 드라이브 시스템의 사용으로 손잡이에서 느껴지는 마찰력이 매우 크며 성능 평가에 대한 결과가 나와 있지 않다. 김정태외[9]는 스텔러트 플랫폼 타입의 6자유도 힘 반영 조이스틱을 개발 하였다. 위 장치는 가역성을 증가 시키기 위해서 선형운동을 락 & 피언 구조로 구동부를 구성하였다. 하지만 작업공간에 대한 해석만 나와있고 힘 특성들의 결과는 제시 되지 않고 있다. 직렬-병렬 복합(hybrid) 역감제시장치로 Long과Collins[10]은 3개의 판트그래프(pantograph)로 이루어져 있는 6자유도 역감제시장치를 개발하였다. 진병대등[11]은 3개의 5절 관절(five bar)로 이루어진 원격 수술을 위한 마스터 컨트롤러(master controller)를 개발하였다. 하지만 위 구조들은 모터가 베이스에 위치하지 않아 모터의 관성을 느껴야 하는 문제점이 있고 역시 성능평가가 제시 되지 않고 있다. 적은 관성과 큰 힘을 만들 수 있는 특성 때문에 역감제시장치에 적합한 병렬 타입의 장치들이 개발 되었지만 현재까지 좋은 성능을 가지는 성능 평가된 논문을 발견하기 힘들다. 따라서 병렬구조를 이용한 역감제시장치에의 성능평가 및 실험 방법을 제시할 필요가 있다.

이에 본 논문에서는 6개의 모터가 모두 베이스에 고정되도록 하여 역감제시장치의 관성을 크게 낮추면서 큰 강성과 좋은 다이내믹 특성을 구현 할 수 있는 병렬기구를 이용한 새로운 역감제시장치를 제안하고 그 성능을 평가하여 병렬형 역감제시장치 제작의 기준을 제시하는 것을 목적으로 한다.

제시된 역감제시장치의 기구학 해석과 작업공간 및

접수일자 : 2000. 4. 21., 수정완료 : 2000. 11. 18.

윤정원, 류제하 : 광주과학기술원 기전공학과(garden@geguri.kjist.ac.kr/ryu@kjist.ac.kr)

※ 본 연구는 교육부BK21프로젝트의 지원을 받아 수행되었습니다.

최적설계는 본 저자들의 다른 논문[12]에 구체적으로 설명되어 있고 본 논문에서는 새로 제작된 역감제시장치의 제어 방법 및 역감제시장치의 중요한 성능평가 척도인 최대 적용 가능한 힘(maximum applicable force), 정지 마찰력(static-friction force), 최소 제어 가능한 힘(minimum controllable force), 힘 대역폭(force bandwidth) 등의 힘 특성 성능 평가치 들을 제시하였고 또한 가상 벽 시뮬레이션을 통하여 안정적으로 시뮬레이션 할 수 있는 가상 벽의 강성 및 댐핑계수를 제시 하였다.

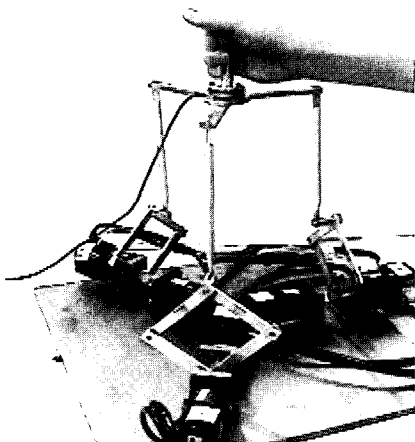


그림 1. 새로운 역감제시장치.
Fig. 1. Proposed haptic device based on parallel mechanism.

II. 역감제시장치 기구부 설계

새로 개발된 역감제시장치는 그림 1에 나타나 있다. 베이스에 고정된 평면에서 2자유도 운동을 만드는 2자유도 기구부(pantograph)와 연결링크(connecting bar)가 구형관절(spherical joint)로 연결 되어 있고 이 연결링크(connecting bar)가 다시 상판(end-effector)에 회전관절(revolute joint)로 연결되어 있으며 이 구조가 상판과 베이스에 대해 서로 3각 대칭을 이루고 있다.

그림 2에 전체 조인트 배열이 나타나 있고 제안된 구조는 기존의 병렬구조 역감제시장치들 [10][11]의 베이스에서의 회전관절이 새로운 역감제시장치의 상판과 연결링크(L_3)사이의 회전관절로 대체된 개념이라 할 수 있다. 따라서 베이스에 위치한 판토크래프를 구동하는 모터 또한 베이스에 놓이게 된다.

그림 2와 같이 제안된 장치의 조인트 배열에서 2자유도 기구부(pantograph)와 연결 링크사이의 구형관절이 위치해야 하는데 이 경우 실제 세 개의 링크(L_{2a} , L_{2b} , L_3)를 연결하는 구형관절이 필요하다. 하지만 기존에 나와 있는 일반적인 볼 소켓(ball socket) 타입의 구형관절은 2개의 링크만을 연결하도록 되어 있고 특수한 구형관절경우에만 3개의 링크를 연결하도록 제작되어 나오며 이 경우 또한 작업반경이 작아지는 단점이 있다. 이에 본 역감제시장치에서는 작

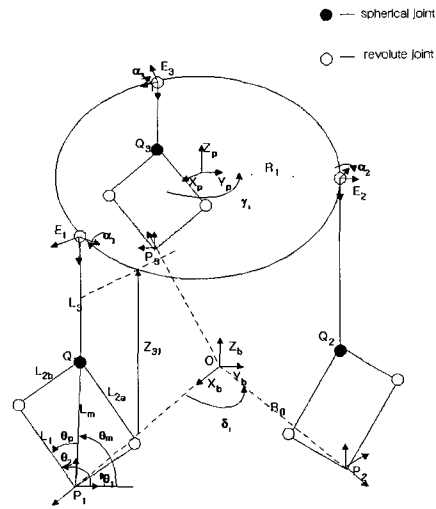


그림 2. 새로운 역감제시장치의 조인트 배열.
Fig. 2. Joint arrays on new haptic device.

업공간을 최대한 크게 하고 쉽게 제작 가능하도록 그림3과 같은 RRR type 구형관절의 설계로 3개의 링크를 연결하면서 구형관절의 작업 범위제한을 최소화하여 작업공간을 최대한 넓게 하였다. 또한 RRR 타입 구형관절의 설계로 2자유도 운동의 판토크래프 구동부에서 1자유도 운동의 구동부로의 변환이 가능하여 상판이 3자유도 운동을 하는 역감제시장치로의 변환이 가능하며 또한 모터의 위치와 상판 회전 관절축의 변화 등으로 다양한 형태의 재배치[12]가 가능하다. 특이점(singularity)의 존재유무도 작업공간 내에 특이점이 존재하는지의 사실을 알기 위해 실제 이산화 방법에 의한 특이점 해석[13]을 수행하였다. 원하는 직 사면체의 범위가 주어질 때 각 범위에 대해 이산화하여 행렬식(determinant) 함수가 연속이면서 부호가 바뀌지 않을 때는 특이점이 존재하지 않는 것으로 반대로 행렬식 부호가 바뀌면 특이점이 존재하는 것으로 해석할 수 있고 주어진 범위 내에서 작업공간 내에 특이점의 존재여부를 살펴보았다. 해석결과 병진작업 공간내에 특이점은 작업 공간의 경계에만 존재하여 작업 영역내에서는 특이점이 없는 것으로 결론 내릴 수 있다.

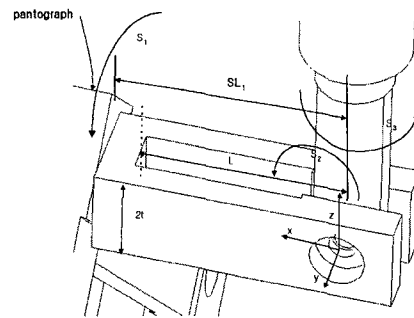


그림 3. RRR type 구형관절.
Fig. 3. RRR type spherical joint.

따라서 새로 개발된 역감제시장치는 기존의 직렬-병렬 복합(hybrid) 역감제시장치에 비해 모터가 베이스에 고정되어 적은 관성을 가지며 자코비안에 의한 성능평가 지수의 비교[12]에 의해 구조적으로 같은 용량의 모터를 사용하였을 때 더 큰 힘을 전달 수 있는 강성을 가지면서 같은 정밀도의 센서를 사용하였을 때 상판에서 더 높은 정밀도를 가지는 낮은 민감도를 가진다. 또한 작업영역 내에 특이점이 없으면서 RRR 형태의 구형관절 설계로 작업공간을 최대한 크게 한 장치로 별도의 제작 없이 단지 부품의 재배치에 의해 여러 형태의 타입을 구현하여 적용할 수 있는 다 기능의 역감제시장치이다.

III. 역감제시장치 제어

1. 역감제시장치 하드웨어

역감제시장치의 기구부 재료는 적은 무게와 비교적 좋은 강성을 가지는 알루미늄으로 제작되었으며 회전 모터는 감속기 없이 판토프래프의 구동부에 직접 연결하였다. 이러한 직접구동은 모터가 모두 베이스에 고정되어 역감제시장치의 전체 관성에 크게 영향을 주지 않으면서 큰 용량의 모터를 설치 할 수 있기 때문에 가능하다. 따라서, 직접구동의 효과로 구동부에서의 적은 마찰과 큰 대역폭 및 백래시를 제거 시키는 효과를 가져 역감제시장치의 가역성을 최대한 증가 시켰다. 또한 소형 볼 베어링을 모든 회전관절에 삽입 함으로써 링크사이의 마찰력을 최소화시켜 가역성을 더욱 향상시켰다.

컨트롤 시스템으로 다 축 제어기(삼성전자)를 사용하였으며 PWM (Pulse Width Modulation) 증폭기를 지원하는 드라이버를 통해 AC서보모터를 구동하고 모터의 회전은 한 회전 당 2048펄스를 내는 엔코더로 측정된다. 또한 6축 힘/토크 센서(F/T)는 x, y축으로 0.04N, z축으로0.12N의 분해능을 가지고 x, y축으로 최대 ±40 N까지 측정 가능하며 z축으로 ±120 N까지 측정 가능한 Assurance Technologies mini-40FT를 선택하였다. 선택된 F/T 센서는 역감제시장치가 낼 수 있는 힘의 범위를 모두 측정할 수 있으면서 가능한 적은 무게(56g)를 가지도록 선택되었으며 디바이스와 작업자의 모델링 되지않은 부분을 보상하기위해 역감제시장치의 손잡이와 작업자의 손 사이의 힘을 측정하도록 사용 되었다.

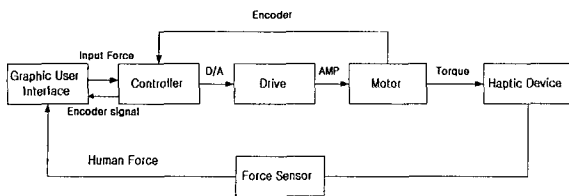


그림 4. 역감제시장치 시스템 블록 선도.
Fig. 4. System block diagram of haptic device control.

Pentium-450의 컨트롤러는 모터 다 축 제어기와 F/T센서를 인터페이스 하면서 역감제시장치의 자코비안과 순 기구학 및 제어부분을 포함하면서 작업자에게 편리하도록 GUI 환경(visual c++)으로 구현되었다. 그림4는 제안된 역감제시장치 시스템의 블록 선도를 나타내고있다.

2. 역감제시장치 중력보상

가상환경에서 시뮬레이션 되는 힘을 정확히 작업자에게 전달하기 위해서는 역감제시장치의 관성이 적어야 한다. 제안된 역감제시장치의 총 무게는 F/T센서를 포함하여 300g이며 이 무게는 50g의 역감제시장치를 가지고 30분간의 조종 후에 조종사가 피로를 느꼈다는 연구[7]에 비취볼 때 상대적으로 무거우므로 중력보상 제어로 보상해 줄 필요가 있다.

역감제시장치의 중력 힘들에 대한 구동 모터 토오크는 다음 (1)과 같이 표현되는 중력 위치 에너지의 미분 값으로 얻어 질 수 있다.

$$V = V_{platform} + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^6 V_{ij}$$

$$\begin{aligned} V_{platform} &= M_p Z_p, V_{1i} = (1/2)M_1 L_1 \sin \theta_{1i} \\ V_{2i} &= (1/2)M_1 L_1 \sin \theta_{2i}, V_{3i} = M_2 (L_1 \sin \theta_{1i} + L_2 / 2 \sin \theta_{2i}) \\ V_{4i} &= M_2 (L_1 \sin \theta_{2i} + L_2 / 2 \sin \theta_{1i}), V_{5i} = M_s L_{mi} \sin \theta_{3i} \\ V_{6i} &= M_3 Z_{3i}, \theta_{3i} = (\theta_{1i} + \theta_{2i}) / 2 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 M_p, M_1, M_2, M_s, M_3 는 그림 2에 나타난 것 같이 각각 상판, 판토프래프 하부 링크 (L_1), 판토프래프 상부링크 (L_2), 그림 3에 나타난 적은 연결링크 (SL_1) 및 연결링크 (L_3)의 무게를 나타낸다. 그리고 Z_p, Z_{3i} 는 상판과 연결링크의 질량중심 높이 (center-of-gravity heights)를 나타내고 있다. 그림 2에 나타난 p_i 와 Q_i 점들 사이의 길이 L_{mi} 는 다음과 같이 2차 방정식으로 나타내어진다.

$$L_{mi}^2 - 2L_1 L_{mi} \cos\{(\theta_{2i} - \theta_{1i})/2\} + L_1^2 - L_2^2 = 0 \quad (2)$$

(1) 은 다음과 같이 단순화 되며

$$\begin{aligned} V &= (1/2)(M_1 + M_2)L_1(\sin \theta_{1i} + \sin \theta_{2i}) + \\ &(M_2 + M_s)L_{mi} \sin \theta_{3i} + M_3 Z_{3i} + M_p Z_p \end{aligned} \quad (3)$$

따라서, 역감제시장치의 중력보상에 의한 모터 토오크는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \tau_{gki} &= \frac{\partial V}{\partial \theta_{ki}} \\ &= (M_1 + M_2)L_1 \cos \theta_{ki} / 2 \\ &+ (M_2 + M_s) \left(\frac{\partial L_{mi}}{\partial \theta_{ki}} \sin \theta_{3i} + L_{mi} \cos \theta_{3i} / 2 \right) \\ &+ M_3 \frac{\partial Z_{3i}}{\partial \theta_{ki}} + M_p \frac{\partial Z_p}{\partial \theta_{ki}} \end{aligned} \quad (4)$$

(k=1, 2 ; i=1, 2, 3)

여기서 $\frac{\partial L_{mi}}{\partial \theta_{ki}} = -\frac{\partial L_{mi}}{\partial \theta_{2i}}$ 는 (2)의 편 미분에 의한 닫힌 해로 구해지며 $\frac{\partial Z_p}{\partial \theta_{ki}}$ 는 (5)와 같이 정의된 자코비안 행렬 J 을 이용하여 구할 수 있으며 \dot{q} 는 상판에서의 속도를 나타내고 $\dot{\Delta}$ 는 구동부의 속도를 나타내고 있다. 제안된 병렬구조의 역자코비안 J^{-1} 은 역 나선(reciprocal screws) 이론을 이용하여 윤정원외[7]에 구해졌고

$$\dot{q} = J^{-1} \dot{\Delta} \quad (5)$$

자코비안 J 는 상판의 무게중심높이 Z_p 가 상판중심에 위치하고 있다고 가정할 때 $\frac{\partial Z_p}{\partial \theta_{ki}}$ 를 포함한 다음 (6)과 같이 나타내어진다.

$$J = \left[\frac{\partial X_p}{\partial \theta_{ki}}, \frac{\partial Y_p}{\partial \theta_{ki}}, \frac{\partial Z_p}{\partial \theta_{ki}}, \frac{\partial \phi}{\partial \theta_{ki}}, \frac{\partial \gamma}{\partial \theta_{ki}}, \frac{\partial \varphi}{\partial \theta_{ki}} \right]^T \quad (6)$$

여기서 X_p, Y_p 는 베이스 좌표에서의 상판 중심점의 x, y 값을 나타내고 ϕ, γ, φ 는 연속한 오일러 각을 나타내고 있다. $\frac{\partial Z_{3i}}{\partial \theta_{ki}}$ 를 구하기 위한 과정으로 그림 2에서 $\frac{\partial Z_p}{\partial \theta_{ki}}$ 를 (7)과 같이 표현할 수 있고 여기서 α_i 는 E_i 점에 위치한 회전관절(revolute joint) 각을 나타내고 있다.

$$Z_{3i} = OE_i(z) + E_i Z_{3i}(z) = f_{li}(Z_p, \alpha_i) \quad (7)$$

를 θ_{ki} 에 대하여 편 미분하면 (8)과 같이 나오며

$$\frac{\partial Z_{3i}}{\partial \theta_{ki}} = \frac{\partial f_{li}(Z_p, \alpha_i)}{\partial Z_p} \frac{\partial Z_p}{\partial \theta_{ki}} + \frac{\partial f_{li}(Z_p, \alpha_i)}{\partial \alpha_i} \frac{\partial \alpha_i}{\partial \theta_{ki}} \quad (8)$$

미지수 $\frac{\partial \alpha_i}{\partial \theta_{ki}}$ 를 구하기 위해 구형관절의 좌표 값 OQ_i 는 판토티그래프의 평면에 위치한다는 조건을 이용해 판토티그래프 평면의 방정식을 (9)와 같이 표현하고

$$n_i \cdot (OQ_i - Op_i) = 0 \quad (9)$$

여기서 OQ_i 는 다음과 같이 $OQ_i = OE_i + E_i Q_i$ 구해지며, n_i 는 판토티그래프 평면에 수직인 벡터를 나타낸다. f_{2i} 를 (10)과 같이 정의하고 (10)을 (9)에 대입하고 미분하였을 때

$$f_{2i}(Z_p, \alpha_i) = n_i \cdot OQ_i \quad (10)$$

회전관절 각 α_i 에 대한 Z_p 의 편 미분 값은 (11)과 같이 구해지고

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial Z_p} = - \left(\frac{\partial f_{2i}}{\partial \alpha_i} \right)^{-1} \left(\frac{\partial f_{2i}}{\partial Z_p} \right) \quad (11)$$

(11)을 (12)에 대입하여 $\frac{\partial \alpha_i}{\partial \theta_{ki}}$ 값을 구한다음 (8)에 삽입하여 $\frac{\partial Z_{3i}}{\partial \theta_{ki}}$ 값을 계산한다.

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial \theta_{ki}} = \frac{\partial \alpha_i}{\partial Z_p} \frac{\partial Z_p}{\partial \theta_{ki}} \quad (12)$$

3. 역감제시장치 마찰 및 관성보상

역감제시장치의 힘을 작업자에게 정확하게 전해주기 위해선 또한 역감제시장치의 마찰과 관성 및 작업자의 모델링되지 않은 외란을 보상해주어야 한다. 따라서 F/T 센서를 이용해 위 효과를 제거하면 전체 제어 입력은 (6)과 같이 구현되고 그림 5에 전체 역감제시장치의 제어 블록이 나타나있다

$$\tau = J^T (K_p(F_{des} - F) + K_d \frac{d}{dt}(F_{des} - F) + F_{des}) + \tau_g \quad (13)$$

여기서 J 는 자코비안 행렬이고 F_{des} 는 가상현실에서 계산된 힘이며 K_p, K_d 는 PD 제어기 게인 값이다.

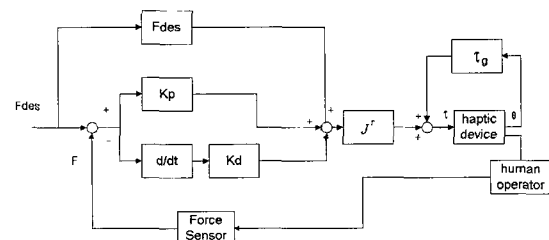


그림 5. 폐 루프 제어.
Fig. 5. Closed loop control.

IV. 성능평가

이 장에서는 역감제시장치의 척도인 최대 적용 가능한 힘(maximum applicable force), 정지 마찰력(static-friction force), 최소 제어 가능한 힘(minimum controllable force), 힘 대역폭(force bandwidth) 등의 힘 특성 성능평가들을 살펴 제안된 역감제시장치의 적용 가능한 사용범위를 밝히고자 한다. Ellis등[7]은 평면상의 손목 자유운동에서 조작자의 성능조건과 기계적인 성능조건을 제시하여 평면 역감제시장치를 설계하는 기준으로 사용하였다. Ellis외는 조작자의 성능조건으로 작업공간 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$, 최소 힘 1N, 최대 힘 40N, 힘 대역폭 50Hz 을 제시하였고 장치와 사용자와의 기계적인 상호작용의 고려 사항들로부터 나오는 기계 성능조건으로 1) 작업자의 적은 피로를 위해 적은 질량과 관성을 가지면서 2) 최대 힘의 5% 이내의 마찰력을 가지며 3) 큰 기계 강성을 가지며 4) 작업공간 내에서 기구적인 특이 점이 없을 것 등을 제시하였다. 그리고 Fisher외[2]는 최대 힘 대역폭 50Hz, 작업공간 300 mm^3 및 모든 축에서 $\pm 30^\circ$, 입력 장치에 의한 최대 관성 힘 0.1 Kg이내, 최대 중력 힘 0.5N 이내 등의 이상적인 역감장치의 성능등에 대해서 제시 하였다. 따라서 제안된 6자유도 역감제시장치도 위의 성능제한 조건들에 기준을 맞추어 성능을 평가하고자 한다.

우선 역감제시장치의 힘 특성을 살펴보기 위하여 최대 적용 가능한 힘과 정지마찰력, 최소 제어 가능한 힘 등을 평가하였다. 각 성능평가 항목의 측정 방법을 설명하면 최대 적용 가능한 힘은 개 루프로 제어기에

서 손잡이에서의 힘이 상수 값을 가지도록 서버모터에 입력 값을 주고 손잡이를 움직이지 않게 작업자가 잡은 상태에서 손잡이에 설치된 토오크 센서를 통해 결과 값을 측정하게 한다. 정지 마찰력은 피드포워드 증력보상으로 중립 위치에 역감제시장치가 서 있게 하고 입력 값을 조금씩 증가 시켜 손잡이의 위치 분해능 값 이상 움직였을 때의 입력증가 분을 측정한다. 최소 제어 가능한 힘[7]은 힘이 피드백 된 상태에서 조작자가 손잡이를 움직일 때의 손잡이와 조작자와의 힘의 차이가 0이 되도록 제어 할 때 측정된 최소 힘으로써 움직임을 발생시키고 유지하기 위한 최소 힘을 말하며 장치의 가역성의 정도를 알 수 있으며 최소제어 가능한 힘이 적을수록 더 정밀한 힘을 제시할 수 있다.

힘 대역폭을 결정하기 위해서는 제어기를 통해 디바이스에 사인과 힘을 유지하도록 입력 값을 주고 역감제시장치의 손잡이를 손으로 잡고 손목이 베이스에 닿지 않게 잡고 손잡이와 조작자의 힘을 F/T 센서를 통해 측정한다. 위 방법은 Ellis[7]의 방법론을 이용하였고 실험은 1Hz에서 120Hz의 주파수까지 행해지고 최대 피크 값의 크기를 각 주파수에서 기록한다. 위 힘 대역폭은 역감제시장치의 강성과 관성, 댐핑, 마찰, 구동기 제한, 컨트롤 계인, 조작자 임피던스등에 영향을 받는 종합적인 디바이스의 측정 지수[14]이다.

새로 개발된 역감제시장치의 힘 특성 실험 결과는 다음과 같다. 최대 적용 가능한 힘은 각 축에 따라 z 축으로 40N, x, y 축으로 20N나왔고 정지 마찰력은 z 축으로 1.5N, x, y 축으로 0.8N으로 나왔다. 최소 제어 가능한 힘은 그림 6과같이 작업자가 손잡이를 임의적으로 움직일 때 측정된 힘 및 토오크를 나타내고 있으며 위 실험 값에 근거해 움직임을 일으키는 최소 힘은 z 축 방향에 대해서는 0.4N이하이고 x, y 축 방향에 대해서는 0.3N이하 이며 최소 토오크는 0.01Nm이하의 값이 나왔다.

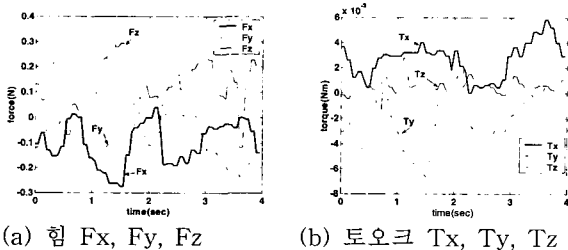


그림 6. 최소 제어 가능한 힘 및 토오크.

Fig. 6. Minimum controllable forces and torques.

힘 대역폭 결과는 그림 7과 같이 x축에 관해서 DC 레벨아래로 -3dB의 교차 주파수(crossover frequency)에 관해서 70Hz의 대역폭을 나타내고있다. 따라서 제작된 본 역감제시장치는 비행조종사의 손목 운동연구 [7]에서 제시한 최고 힘 대역폭 50Hz를 넘어서면서 6 자유도의 구동을 만들어 내는 우수한 디바이스라는 결론을 내릴 수 있다.

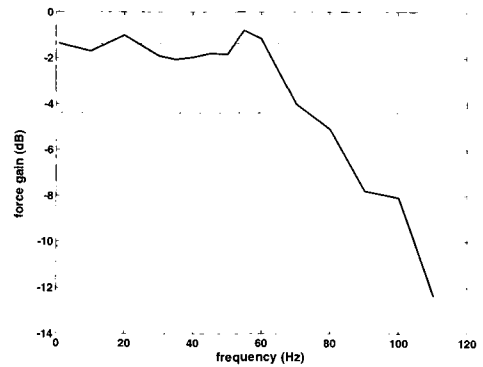


그림 7. x축 힘 대역폭.

Fig. 7. X-axis force bandwidth.

또한 마찰력은 최대 힘의 5%이내로 들어와야 한다는 조건을 만족하며 역감제시장치의 병진작업공간은 최대 지름 30cm이상 ($9.4583 \times 10^6 \text{ mm}^3$) 이고 회전 작업 공간은 모든 축에 대해서 50° 이상의 값을 가짐을 확인하였다.

역감제시장치의 성능평가를 표 1에 요약해 놓았으며 Ellis 등[7]에서 제안된 구속 조건들과 비교할 때 제안된 역감제시장치는 충분히 작업자와 기계적인 구속 조건들을 만족시켰다.

표 1. 역감제시장치의 성능.

Table 1. New haptic device characteristics.

베이스 치수 (Base Dimensions)	450mm×450mm
작업공간(Workspace)	최대지름30cm ($9.4583 \times 10^6 \text{ mm}^3$) 모든 회전각 >50°
최대 힘 최대 토오크 (Maximum Force, Torque)	40N(z), 20N(x, y), 6Nm(z), 3Nm(x, y)
정지 마찰력 (Static-friction force)	1.5N(z), 0.8N(x, y)
힘 대역폭 (Force bandwidth)	70Hz
힘 분해능 (Force resolution)	0.04N(x, y), 0.12N(z), 1.0N-mm
위치 분해능 (Position resolution)	0.4mm(x, y), 0.16mm (z), 0.12°
최소 제어가능(Minimum controllable force)	0.4N(z), 0.3N(x, y), 0.01Nm

V. 가상 벽 실험

이 장에서는 가상환경 시뮬레이션의 패 루프 응답을 보기 위해 개발된 역감제시장치로 가상 벽 시뮬레이션을 수행하였다. 구현된 가상현실 시스템에서 Pentium III-450 컴퓨터는 역감제시장치 제어기로서 사용되었고, 가상 벽 환경은 NT시스템에서 Sense8사의 WTK (World Tool Kit)시뮬레이션 소프트웨어에 의해 시뮬레이션 되며 위 두 컴퓨터는 RS-232시리얼통신에

의해 115200bps 속도로 데이터를 주고 받는다. WTK는 또한 작업자에게 그래픽 인터페이스를 제공하는데 사용되었다.

가상 벽은 스프링과 댐퍼 시스템으로 모델링 되었으며 가상 벽에 따른 반력은 다음과 같다.

$$F_{wall} = -\zeta[K(X_h - X_{wall}) + \gamma B \dot{X}_h] \quad (14)$$

여기서 ζ 와 γ 는 단일방향 구속 변수들이고 K 는 가상 벽 스프링상수, B 는 가상 벽 댐퍼 계수이다. 단일방향 구속변수들은 다음과 같이 주어진다.

$$\zeta = \begin{pmatrix} 1 & X_h > X_{wall} \\ 0 & X_h \leq X_{wall} \end{pmatrix}, \gamma = \begin{pmatrix} 1 & \dot{X}_h > 0 \\ 0 & \dot{X}_h \leq 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

구속 변수 ζ 는 핸들이 벽을 통과할 때에만 손잡이에서의 힘이 생성되도록 하게 하며 비슷하게 γ 는 댐퍼가 벽에서 핸들이 제거 되고 있을 때에는 힘이 발생하지 않도록 하게 한다. 전체 제어 블록은 그림 8에 나타나 있고 작업자에 의해 구동 되는 역감제시장치의 위치 x_h 와 가상 벽의 기준 위치 x_{wall} 의 차는 X 로 표현된다. 이 X 값은 (14)의 가상 벽 반력을 발생하기 위해 사용되며 가상 벽 시뮬레이션을 통해서 시스템을 안정하게 유지하면서 얻을 수 있는 가상 벽 임피던스를 발견하는데 사용되었다.

안정성의 기준은 작업자와 장치가 가상 벽에 상호 작용할 때 진동이 발생 할 때를 불 안정하다고 정의 하였고 불안정 하기 직전의 강성 및 댐퍼를 최대 적용 가능한 강성 및 댐퍼라고 정의 하였다. 진동이 벽과의 접촉동작동안 가상 벽의 경계에서 일어나는 상황에서 얻을 수 있는 최대 강성은 댐핑이 존재하지 않을 때 구해졌고 비슷하게 댐핑만 존재하고 강성이 없을 때의 최대 적용 가능한 댐핑 계수 값을 구했다. Lawrence[15]는 1자유도의 역감장치를 모델링하여 이상적인 역감제시장치의 성능을 위해서는 이론적인 극값을 자유운동(free motion)에서는 force sensing threshold를 0.1N으로 제한운동(constrained motion)에서는 최대 강성을 10KN/m으로 제시하였고 실험값으로 3040N/m를 제시하였다. 높은 강성을 내기 위해서[16]는 역감제시장치 자체의 댐핑을 가져야 되고, 높은 센서 정밀도, 높은 sampling rate, 속도 필터 등의 사용으로 높아 질 수 있고 제작된 역감제시장치는 비교적 쉬운 순기구학에 의해 전체 제어 sampling rate가 Pentium-450 컴퓨터를 사용하였을 때 600Hz 이상이 나와 실시간 제어가 가능하였고 NT-system의 경우도 Open-GL 전용 가속 보드를 사용하여 초당 그래픽 플레임이 50Hz 이상 나올 수 있게 하였다. 제작된 6자유도 역감제시장치는 실험결과로부터 안정한 강성 값은 450N/m로 나왔고 최대 댐핑계수 $B_x=1500\text{Nsec/m}$ 으로 나왔다. 만약 강성에 댐핑 값 1000Nsec/m을 첨가 하였을 때는 600N/m까지 안정한 강성을 구현할 수 있었다. 또한 진동이 느껴지는 상황에서 적응성을 가지는 손으로 역감제시장치를 제어 할 때 최대 강성은 3500N/m까지

나왔고 이때의 느낌은 딱딱한 벽돌을 두들기는 것 같은 느낌을 가질 수 있었다.

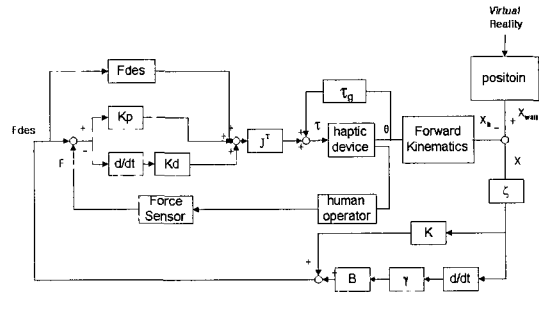


그림 8. 가상 벽을 포함한 제어 블록.

Fig. 8. Control block diagram including virtual environment.

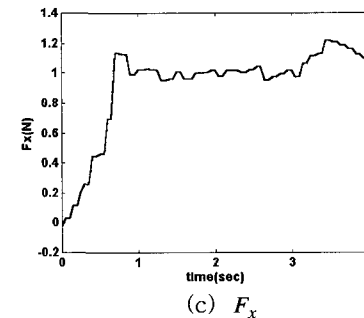
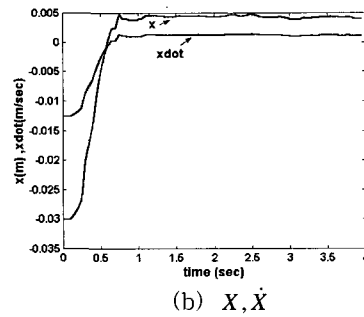
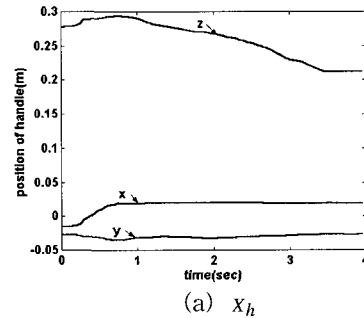


그림 9. 가상 벽 시뮬레이션.

Fig. 9. Virtual wall simulation results.

그림 9는 가상의 벽이 $K_x=250\text{N/m}$, $B=10\text{Nsec/m}$ 일 때 벽을 따라 내려올 때의 역감제시장치의 손잡이의 위치 x_h (그림 9(a)) 와 X 의 위치와 속도를 보여주며 그때 벽에서의 반력을 보여주고 있다. 위 시뮬레이션

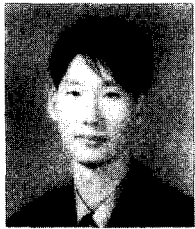
에서 작업자는 우선 역감제시장치를 잡은 상태로 x축으로 벽을 향해 진행하고 벽에 접촉한 후에는 가상 벽과 접촉을 유지하면서 z축 방향 아래로 내려온다. 위 작업동안 작업자는 역감제시장치를 통한 힘 피드백 때문에 가상 벽의 표면을 따라 접촉을 유지 할 수 있었으며(그림 9(b)) 위 실험에서 가상 벽은 부드러운 진흙같이 느껴졌다 (그림 9(c)).

VI. 결론

직렬타입의 역감제시장치에 비해 우수한 성능을 낼 수 있는 대부분의 병렬기구 역감제시장치관련 논문에서 설계 사양이나 실험에 의한 성능평가가 없어 병렬타입 역감제시장치의 설계 및 제작의 어려움을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 병렬구조를 이용한 6자유도 역감제시장치의 제어 방법을 제시하였고 객관적인 실험 방법에 따른 평가를 수행하여 역감제시장치 설계의 기준을 제시하려 하였다. 제어방법에 있어서는 중력보상을 앞섬 제어(feedforward control)로 넣고 모델링 되지 않은 관성과 마찰력을 소거하기위해 F/T 센서를 이용한 PD제어를 사용하여 가능한 단순한 제어로 계산량을 적게 하였다. 또한 실험으로 힘 대역폭, 적용 가능한 최대 힘, 최소 제어 가능한 힘, 정지 마찰력, 작업공간 같은 성능 평가를 수행하였으며 측정된 결과를 토대로 제작된 역감제시장치는 큰 힘 대역폭(70Hz), 좋은 가역성(0.4N), 넓은 작업공간($9.4583 \times 10^6 \text{mm}^3$, 모든 축에 50° 이상의 회전각)을 가짐을 보였고 병렬기구의 장점을 최대한 살려 6자유도의 운동을 가지면서 역감제시장치의 성능요건을 충족시키는 장치라는 결론을 내릴 수 있다. 마지막으로 제작된 역감제시장치를 통해 가상 벽 시뮬레이션을 수행하여 안정한 범위에서 사용할 수 있는 강성 및 댐핑 값을 제시 하였다.

참고문헌

- [1] G. C. Burdea, Force and Touch Feedback for Virtual Reality, John Wiley & Sons, NY, 1996.
- [2] P. Fisher, R. Daniel, and K. V. Siva, "Specification and design of input devices for teleoperation", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 540-545, 1990.
- [3] D. A. McAfee and P. Fiorini, "Hand controller design requirements and performance issues in telerobotics", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 186-191, 1990.
- [4] 최한호, "Haptic 인터페이스 현황," 전기공학회지, 제 25권, 제 2호, pp. 148-155, 2. 1998.
- [5] R. D. Howe and D. Kontarinis, "Task performance with a dextrous teleoperated hand system," *Proc. of the SPIE Conf. On Telemanipulator Technology (OE/Technology 92)*, pp. 199-207, 1992.
- [6] B. D. Adelstein and M. J. Rosen, "Design and implementation of a force reflecting manipulum for manual control research" *IN: Advances in Robotics*, DSC vol. 42, pp. 1-12, 1992.
- [7] R. E. Ellis, O. M. Ismaeil, and M. G. Lipsett, "Design and evaluation of a high-performance haptic interface," *Robotica*, vol. 14, pp. 321-327, 1996.
- [8] 김희국, 이병주, "병렬형 3자유도 구형 모듈의 해석과 힘반영 원격조종기구의 구현," 대한기계학회논문집, 제18권, 제10호, pp. 2501-2513, 1994.
- [9] 김정태, 김문생, "6 자유도 조작장치의 설계와 기구학적 특성에 관한 연구," 대한기계학회논문집, A권, 제21권, 제2호, pp. 467-475, 1996.
- [10] G. L. Long and C. L. Collins, "A pantograph linkage parallel platform master hand controller for force-reflection," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 390-396, 1992.
- [11] 진병대, 우기영, 권동수, "5각 관절 병렬 구조를 이용한 6자유도 힘 반사형 마스터 컨트롤러," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제5권, 제3호, pp. 288-296, 4. 1999.
- [12] 윤정원, 류제하, "병렬기구를 이용한 새로운 역감제시장치의 설계 및 해석," 제어계측·자동화·로보틱스연구회 합동 학술 발표회, pp. 29-34, 2000.
- [13] Merlet, J-P., *Les robots parallèles*, 2^e éd., Hermès, Paris, 1997.
- [14] T. L. Brooks, "Telerobotic response requirements," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 113-120, 1990.
- [15] D. A. Lawrence and J. D. Chapel, "Performance trade-offs for hand controller design," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3211-3216, 1994.
- [16] J. E. Colgate and J. M. Brown, "Factors affecting the Z-Width of a haptic display," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3205-3210, 1994.



윤 정 원

1973년 5월 1일생. 1998년 전북대학교 정밀기계공학과 (공학사). 2000년 광주과학기술원 기전공학과(공학석사). 2000 ~ 현재 동대학원 기전공학과 박사과정. 관심분야는 병렬로봇 설계/제어 및

힘 반영장치 설계/제어.



류 제 하

1959년 7월 19일생. 1982년 서울대학교 기계공학과 (공학사). 1984년 KAIST 기계공학과 (공학석사). 1991년 The University of Iowa, 기계공학과(공학박사). 1992 ~ 1994년 United Defense LP 선임

연구원. 1995년 ~ 현재 광주과학기술원 기전공학과 조교수/ 부교수. 관심분야는 병렬로봇 기구학/동역학 /제어/ Calibration, Haptic Device for VR interface.