

병렬구조를 이용한 새로운 6 자유도 역감제시장치의 설계 및 해석

Analysis and Design of a New 6-DOF Haptic Device Using a Parallel Mechanism

윤 정 원, 류 제 하
(Jung-won Yoon and Jeha Ryu)

Abstract : This paper presents design and analysis of a 6 degree-of-freedom new haptic device using a parallel mechanism for interfacing with virtual reality. The mechanism is composed of three pantograph mechanisms that, driven by ground-fixed servomotors, stand perpendicularly to the base plate. Three spherical joints connect the top of the pantograph with connecting bars, and three revolute joints connect connecting bars with a mobile joystick handle. Forward and inverse kinematic analyses have been performed and the Jacobian matrix is derived by using the screw theory. Performance indices such as GPI (Global Payload Index), GCI (Global Conditioning index), Translation and Orientation workspaces, and Sensitivity are evaluated to find optimal parameters in the design stage. The proposed haptic mechanism has better load capability than those of the existing haptic mechanisms due to the fact that motors are fixed at the base. It has also wider orientation workspace mainly due to RRR type spherical joints.

Keywords : haptic device, virtual reality, parallel mechanism, pantograph mechanism

I. 서론

가상현실은 컴퓨터 기술의 급속한 발달과 함께 공학, 의료수술, 원격조종, 복지, 오락 등의 다양한 분야에서 널리 발전하고 있다[1][3]. 따라서 컴퓨터와 상호작용하는 사용자에게 운동감각(kinesthetic)과 촉각(tactile)을 피드백 시켜주는 디바이스인 역감제시장치(haptic device)는 가상현실 시스템에서 몰입감을 증가시키는데 필요 불가결한 요소가 되고 있다[4]. 지금까지 다양한 역감제시장치가 개발되었는데 툴형 타입, 외골격형 타입, 골무형 타입, 직렬로봇 타입 등[5]이 제시되었으며 제시된 여러 역감제시장치 중에서 탁상에 놓여 있는 툴형 타입 역감제시장치는 큰 대역폭과, 안정성, 소형제작 가능한 특성때문에 다른 타입의 장치보다 널리 사용되고 있다. 특히 툴 타입 역감제시장치를 병렬기구를 이용해서 제작할 때 적은 관성과 큰 강성 및 좋은 정밀도를 가진 디바이스의 제작이 가능하게 되어 우수한 성능의 역감제시장치를 개발 할 수 있게 된다. 따라서 병렬기구를 역감제시장치에 적용하는 사례가 점차 늘고 있는데 쉬운 순 기구학과 넓은 작업공간을 위해서 직렬-병렬 복합(hybrid) 구조에 초점이 맞추어졌다.

Long 과 Collins 그리고 Iwata등[6][7]은 병렬구조를 이용한 6자유도 툴 타입 역감제시장치를 제시 하였는데 그 구조는 3개의 판토그래프(pantograph)가 베이스에 수동 회전관절(passive revolute joint)로 연결되며

상판은 판토그래프가 볼 조인트(ball joint)로 연결되는 구조로 이루어져있다. 진병대등[8]은 원격 수술의 마스터 컨트롤러로 판토그래프 대신 5각 관절(five-bar)를 대치한 역감제시장치를 제시하였다. 하지만 위 구조들은 구동모터가 베이스에 고정되지않고 2자유도 운동부(pantograph 와 five-bar)와 함께 회전하므로 상대적으로 큰 모터의 관성을 사용자가 느껴야 하며 큰 파워의 모터를 장착하기 힘든 구조이다. Tsumaki등[9]은 공간상에서 병진운동을 하는 3자유도의 델타로봇(Delta Robot)과 회전운동을 하는 3자유도의 짐벌(gimbal) 구조를 합쳐 6자유도의 역감제시장치를 개발하였다. 하지만 위 구조도 짐벌 구조를 구동하기 위한 모터를 델타로봇 위에 장착함으로써 모터의 관성과 무게를 사용자가 느껴야 하는 문제점이 있다. Millman등[10]은 스튜어트 플랫폼 타입의 4자유도 역감제시장치를 개발 하였는데 이 장치는 3자유도의 병진운동과 roll각이 가능하지만 가상현실 적용에 중요한 tilt 각이 없다는 단점이 있다. 또한 김정태외[11]가 스튜어트 플랫폼구조에서 가역성을 높이기 위해 선형 구동부(prismatic actuator)를 랙(rack)과 피니언(pinion)을 이용한 회전 구동부(revolute actuator)로 교체한 6자유도 역감제시장치를 개발하였다. 하지만 스튜어트 플랫폼 자체가 아주 적은 작업공간을 가지고 있고 위 구조에서도 역시 모터가 베이스에 고정되지 않는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문은 기존의 병렬기구를 이용한 역감제시장치의 문제점을 해결해 구동기가 베이스에 고정되면서 또한 작업공간이 큰 범용적인 6 자유도 역감제시장치를 제시하고자 하며 제안된 기구의 기구학 해석과

접수일자 : 2000. 4. 21., 수정완료 : 2000. 10. 4

윤정원, 류제하 : 광주과학기술원 전기공학과

※ 본 연구는 교육부 BK21 프로젝트의 지원을 받아 수행 되었음

설계 및 본 기구의 여러 기구학적 특성들을 살펴 볼 것이다.

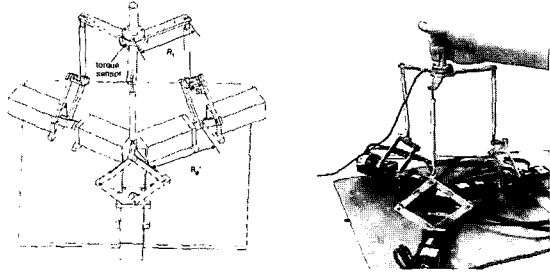


그림 1. 제안된 새로운 역감제시장치.
Fig. 1. Proposed haptic device based on parallel Mechanism.

II. 기구학 해석

1. 병렬 기구의 좌표계 설명

제안된 역감제시장치의 전체 구조는 그림1과 같다. 베이스에 고정된 평면에서 2자유도 운동을 만드는 2자유도 기구부(pantograph)와 연결링크(connecting bar)가 구형관절(spherical joint)로 연결되어 있고 이 연결링크가 다시 상판(end-effector)에 회전관절(revolute joint)로 연결되어 있다. 그리고 이 구조가 서로 3각 대칭을 이루고 있는 구조로 되어 있다. 제안된 구조의 특징은 각 판토크래프 구동부가 하판(base plate)에 고정된 모터 때문에 하판에 수직인 평면에 한정되어 있어 기존 구조들[6]-[8]의 하판과 2 자유도 구동부(pantograph 혹은 five-bar) 사이의 회전관절이 제안된 구조의 상판과 연결링크 사이의 위치로 바뀐 구조라고 할 수 있다.

기구학을 해석하기 위한 좌표계를 정의하면 베이스에 고정되어 있는 절대좌표계 (X_b, Y_b, Z_b) , 상판의 중심에서 움직이는 상대좌표계 (X_o, Y_o, Z_o) , 베이스에 고정된 이동좌표계 (X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi}) 로 각 좌표 계를 정의한다. 제안된 구조의 각 변수들을 정의하면 2자유도 기구부(pantograph)의 상부링크의 길이 L_1 , 하부링크의 길이 L_2 ,

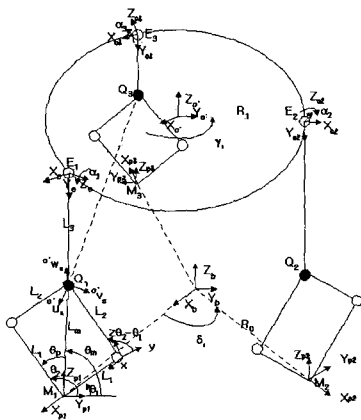


그림 2. 기구학 모델.
Fig. 2. Kinematics model.

연결링크의 길이를 L_3 로 정의하고 베이스에서 2자유도 기구부(pantograph)까지의 반지름을 R_0 , 상판의 반지름을 R_1 로 정의한다. 또한, 2 자유도 기구부와 연결링크를 연결해주는 구형관절의 위치를 Q_i ($i=1,2,3$)로 정의하고, 2자유도의 입력 값이 위치하는 베이스에서 고정된 이동좌표계가 위치한 좌표를 M_i ($i=1,2,3$)으로 정의하며, 연결링크와 상판을 연결하는 회전관절이 위치한 좌표를 E_i ($i=1,2,3$)로 정의한다.

위 구조는 그림 2에서 2자유도 운동 기구부가 (X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi}) 좌표계의 $Y_{pi}-Z_{pi}$ ($i=1, 2, 3$) 평면에서만 운동하므로 2자유도 운동 기구부(pantograph)에 위치한 6개의 모터가 모두 베이스에 고정된 병렬구조를 가진다.

주목할 점으로 구형관절이 판토크래프의 끝점 Q_i 에 위치한 것처럼 보일지라도 (그림 2) 구형관절의 실제 중심은 육섯 거리를 두고 위치하고 있으며(그림 1) 육섯 거리를 고려한 베이스 반지름 R_0 를 $R_0'-SL_1$ 로 대치한다면 기구학 해석에 영향을 미치지 않아 다음장의 기구학 해석은 구형관절의 중심이 판토크래프의 끝점에 있다고 가정하고 구했다.

2. 역 기구학 해석

역기구학은 상판의 주어진 위치, 방향 (x, y, z, u, v, γ) 값에서 판토크래프 하부링크의 능동관절(active joint) 각을 찾는 것으로 정의된다. 구형관절의 위치 Q_i 는 절대좌표계 (X_b, Y_b, Z_b) 로 표시할 때 (4×4) 변환행렬을 이용해 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$Q_i = T(x, y, z)R(u, v, \gamma)T_x(R_1)R_x(-90^\circ)R_z(\alpha_i)T_x(L_3)[0001]^T \quad (1)$$

여기서 $T(x, y, z)$ 는 상판의 병진 운동을 나타내고 $R(u, v, \gamma)$ 는 상판의 세 개의 오일러(Euler) 각들을 나타낸 회전운동을 표시하고 있다. 위 (1)에서 구형관절의 위치점 Q_i 는 미지수 회전 관절 값 α_i 값을 포함하고 있다. 또한 Q_i 점은 판토크래프 $Y_{pi}-Z_{pi}$ 평면에 위치해야 한다는 조건에 따라 평면 조건식 (2)를 다음과 같이 유도 할 수 있다.

$$\cos(\delta_i)(Q_{xi} - R_0 \cos(\delta_i)) + \sin(\delta_i)(Q_{yi} - R_0 \sin(\delta_i)) = 0 \quad (2)$$

여기서 미지수 α_i 는 구형관절의 위치 점 Q_i 가 회전관절 E_i 점에서 회전하는 반경 L_3 의 원과 판토크래프 평면 $Y_{pi}-Z_{pi}$ 의 교점이라는 성질을 이용해서 구할 수 있으며 (1)의 Q_{xi} 와 Q_{yi} 를 (2)에 대입하고 각 α_i 에 대해서 풀면 각 α_i 는 닫힌 해로 풀린다.

다음에 구해진 α_i 값을 (1)에 대입하여 구형관절의 위치 Q_i 점을 구하고 이를 이용해 판토크래프의 역기구학을 구할 수 있다. 그림2에서 Q_i 점과 M_i 점 사이의 거리는 (3)과 같이 표현되고

$$L_{mi} = \sqrt{(M_{xi} - Q_{xi})^2 + (M_{yi} - Q_{yi})^2 + (M_{zi} - Q_{zi})^2} \quad (3)$$

판토크래프의 이동좌표계 (X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi}) 에 대한 구형관절의 위치 점 ${}^P Q_i$ 는 다음과 같이 유도된다.

$${}^P Q_i = R_z^{-1}(\delta_i)(Q_i - OM_i) \quad (4)$$

여기서 각 δ_i ($0, 2\pi/3$, and $4\pi/3$ radians)는 절대좌표계에서 판토크래프 이동 좌표계까지의 회전을 나타낸다. 그림 2에서 θ_{pi}, θ_{mi} 는 다음식으로 주어지고

$$\theta_{pi} = \cos^{-1}\left(\frac{L_{mi}^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_{mi}L_1}\right), \theta_{mi} = \cos^{-1}\left(\frac{L_{mi}^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_{mi}L_1}\right) \quad (5)$$

따라서 능동 관절 각은 다음식으로 구해진다.

$$\theta_{li} = \theta_{mi} - \theta_{pi}, \theta_{2i} = \theta_{mi} + \theta_{pi} \quad (6)$$

3. 순 기구학 해석

순 기구학해석은 구동 각 θ_{li} 과 θ_{2i} 가 주어졌을 때 절대좌표계 (X_b, Y_b, Z_b) 를 기준으로 상판에 위치한 상대좌표계 (X_o, Y_o, Z_o) 의 위치와 방향을 결정하는 것이다. 순 기구학을 구하기 위해선 우선 E_i 점에서의 회전관절 각 α_i 값을 구해야 한다. 이 각은 절대좌표계 (X_b, Y_b, Z_b) 에서 본 Q_i 점들과 상판의 상대좌표계 (X_o, Y_o, Z_o) 를 기준으로 구한 ${}^oQ_i(\alpha_i)$ 점들의 거리가 같다는 사실을 이용하여 구할 수 있다. 순 기구학을 구하는 순서를 살펴보면 다음과 같다.

i) (7)과 같이 절대좌표계 기준의 Q_i 점은 능동조인트의 각 θ_{li} 과 θ_{2i} 이 주어졌을 때 판토크래프의 순 기구학을 구함으로써 구해진다.

$$Q_i = R_z(\delta_i)T_x(R_0)R_x(\theta_{li})T_y(L_1)R_x(\theta_{2i} - \theta_{li})T_y(L_2)[0001]^T \quad (7)$$

그리고 상판의 상대 좌표계에서 점 ${}^oQ_i(\alpha_i)$ 는 미지수 α_i 를 포함한 다음식으로 나타난다.

$${}^oQ_i = R_z(\gamma_i)T_x(R1)R_x(-90^\circ)R_z(\alpha_i)T_y(L3)[0001]^T \quad (8)$$

ii) 다음 세 개의 조건식을 이용하여 미지수 α_i 값을 구한다.

$$\begin{aligned} |{}^oQ_1 - {}^oQ_2| &= |Q_1 - Q_2| \\ |{}^oQ_2 - {}^oQ_3| &= |Q_2 - Q_3| \\ |{}^oQ_3 - {}^oQ_1| &= |Q_3 - Q_1| \end{aligned} \quad (9)$$

비선형방정식 (9)는 미지수 α_i 값에 대해 Newton-Raphson[19]의 수치 해석적인 방법으로 구해지며 Newton Raphson방법은 주어진 식에서 해석적인 미분행렬식이 구해지기 때문에 계산상 아주 효과적이다.

iii) 계산된 각 α_i 을 사용하여서 상판의 상판좌표계 (X_o, Y_o, Z_o) 기준으로 그림 2에 나타난 ${}^o u_s$ 축을 정의하는 방향벡터는 다음과 같이 주어지며

$${}^o u_s = ({}^oQ_1 - {}^oQ_3) \wedge ({}^oQ_1 - {}^oQ_2) \quad (10)$$

또한 Q_1, Q_2, Q_3 점에 의해서 정의되는 평면에 수직한 ${}^o w_s$ 축은 ${}^oQ_1, {}^oQ_2$ 와 ${}^oQ_1, {}^oQ_3$ 의 외적에 의해 구해지며

$${}^o w_s = ({}^oQ_1 \wedge {}^oQ_2) \times ({}^oQ_1 \wedge {}^oQ_3) \wedge ({}^oQ_1 \wedge {}^oQ_2) \wedge ({}^oQ_1 \wedge {}^oQ_3) \quad (11)$$

다음으로 ${}^o v_s$ 축은 다음과 같이 주어진다.

$${}^o v_s = ({}^o w_s \times {}^o u_s) / |w_s \times u_s| \quad (12)$$

따라서 상판 좌표계 (X_o, Y_o, Z_o) 에서 구형관절 좌표

계 (X_s, Y_s, Z_s) 까지의 변환행렬 T_o^s 은 (13)과 같이 표시된다.

$$T_o^s = \begin{bmatrix} {}^o u_s[1] & {}^o v_s[1] & {}^o w_s[1] & {}^o Q_1[1] \\ {}^o u_s[2] & {}^o v_s[2] & {}^o w_s[2] & {}^o Q_1[2] \\ {}^o u_s[3] & {}^o v_s[3] & {}^o w_s[3] & {}^o Q_1[3] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

비슷하게 절대좌표계에서 구형관절 좌표계 (X_s, Y_s, Z_s) 로의 변환행렬 T_b^s 는 (14), (15)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} u_s &= (Q_1 - Q_3) / |Q_1 - Q_3| \\ w_s &= (Q_1 Q_2 \times Q_1 Q_3) / |Q_1 Q_2 \times Q_1 Q_3| \\ v_s &= (w_s \times u_s) / |w_s \times u_s| \end{aligned} \quad (14)$$

$$T_b^s = \begin{bmatrix} u_s[1] & v_s[1] & w_s[1] & Q_1[1] \\ u_s[2] & v_s[2] & w_s[2] & Q_1[2] \\ u_s[3] & v_s[3] & w_s[3] & Q_1[3] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

iv) 절대좌표계에서 상판좌표계로의 (4×4) 변환행렬 $T_b^{o'}$ 은 다음과 같이 얻어진다.

$$T_b^{o'} = T_b^s (T_o^s)^{-1} \quad (16)$$

위 변환행렬을 이용해 순 기구학은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} u &= \tan^{-1}(-T_b^{o'}[2,3], T_b^{o'}[3,3]), v = \sin^{-1}(T_b^{o'}[1,3]), \\ \gamma &= \sin^{-1}\left(-\frac{T_b^{o'}[1,2]}{\cos v}\right) \end{aligned} \quad (17)$$

$$x = T_b^{o'}[1,4], y = T_b^{o'}[2,4], z = T_b^{o'}[3,4] \quad (17)$$

여기서 $T_b^{o'}[i,j]$ 는 행렬 $T_b^{o'}$ 의 (i,j) 째 구성 요소이다.

4. Screw 이론을 이용한 자코비안의 유도

자코비안 행렬은 역 나선(reciprocal screws)[12] 개념을 이용하여 구해질 수 있다. 판토크래프의 오른쪽 링크를 기준으로 한 병렬구조의 직렬 체인에서 상판의 트위스트(twist) \bar{T} 는 actuator-screws 의 선형 조합이다.

$$\bar{T} = \dot{\theta}_{1,i} \bar{S}_{1,i} + \dot{\theta}_{3,i} \bar{S}_{2,i} + \dot{\alpha}_i \bar{S}_{\alpha,i} + \dot{\theta}_{s,i} \bar{S}_{s,i} \quad (18)$$

여기서 $\dot{\theta}_{1,i}$ 는 능동조인트 각속도이고 $\dot{\theta}_{3,i}, \dot{\alpha}_i$ 는 수동조인트의 각속도를 나타내며 $\dot{\theta}_{s,i} \bar{S}_{s,i}$ 는 구형관절의 three-system에 관한 트위스트를 나타낸다. (18)에서 수동조인트의 각속도는 역성(reciprocity) 개념에 의해서 제거된다. 즉, 두개의 나선 \bar{S}_m, \bar{S}_n 는 (19)의 조건을 만족하면 역적(reciprocal)이라고 말해진다.

$$\bar{S}_m^T \bar{S}_n = 0, m \neq n \quad (19)$$

여기서 \bar{S} 가 $[a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6]^T$ 로 정의 되었을 때 \bar{S}^T 는 $[a_3, a_4, a_5, a_1, a_2, a_6]$ 로 정의되고 \bar{S}^T 는 스크류 \bar{S} 의 전치(transpose)이다. $\bar{S}_{1,i}$ 가 $\bar{S}_{1,i}$ 나선을 제외하

고 모든 구동부 나선에 역적(reciprocal)인 단위 나선이
라 정의할 때 일반적으로 다른 5개의 나선 $\bar{s}_{3,i}$, $\bar{s}_{\alpha i}$,
 $\bar{s}_{s,i}$ 는 선형독립이기 때문에 $\bar{s}'_{1,i}$ 는 유일하게 정해진다.
따라서 $\dot{\theta}_{1,i}$, $\dot{\theta}_{2,i}$ 는 역성(reciprocity) 관계를 이용하여
(18)에서 $\bar{s}'_{1,i}$ 의 전치를 양변에 곱하는 것에 의해
구할 수 있다.

$$\dot{\theta}_{1,i} = \frac{[\bar{s}'_{1,i}]^T \bar{T}}{[\bar{s}'_{1,i}]^T \bar{s}_{1,i}}, \dot{\theta}_{2,i} = \frac{[\bar{s}'_{2,i}]^T \bar{T}}{[\bar{s}'_{2,i}]^T \bar{s}_{2,i}} \quad (20)$$

$\dot{\theta}_{1,i}$ 과 $\dot{\theta}_{2,i}$ 에 관한 표현을 단일 행렬식으로 표현하면
(21)과 같이 나오며

$$\dot{\Theta} = J^T \bar{T} \quad (21)$$

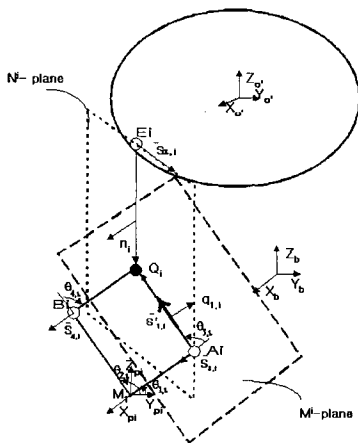


그림 3. 제안된 구조의 역 나선.
Fig. 3. Reciprocal screws of the proposed mechanism.

여기서 $\dot{\Theta} = [\dot{\theta}_{1,1}, \dot{\theta}_{2,1}, \dot{\theta}_{1,2}, \dot{\theta}_{2,2}, \dot{\theta}_{1,3}, \dot{\theta}_{2,3}]^T$ 이고 J 는 (6×6)
역기구학 자코비안이며 $W_{R,i}$ 와 $W_{L,i}$ 가 각각 $[\bar{s}'_{1,i}]^T \bar{s}_{1,i}$
와 $[\bar{s}'_{2,i}]^T \bar{s}_{2,i}$ 로 대치 되었을 때 J 는 다음과 같이 표
현된다.

$$J = \left[\frac{\bar{s}'_{1,1}}{W_{L,1}}, \frac{\bar{s}'_{2,1}}{W_{R,1}}, \frac{\bar{s}'_{1,2}}{W_{L,2}}, \frac{\bar{s}'_{2,2}}{W_{R,2}}, \frac{\bar{s}'_{1,3}}{W_{L,3}}, \frac{\bar{s}'_{2,3}}{W_{R,3}} \right]^T \quad (22)$$

역(reciprocal) 나선 $\bar{s}'_{1,i}$ 는 그림 3에서 보듯이 구형관
절 위치 Q_i 점을 지나고 Q_i 점과 $\bar{s}_{\alpha i}$ 축을 포함하는
 N^i 평면과 Q_i 점과 $\bar{s}_{3,i}$ 축을 포함하는 M^i 평면의 교선
을 따라 작용하는 제로 피치나선(zero pitch screw) 이
다. 각 α_i 가 제로일 때 역(reciprocal) 나선 $\bar{s}'_{1,i}$, $\bar{s}'_{2,i}$ 들
은 구형관절 위치 Q_i 를 통과하고 판토크래프 상부 링
크 방향으로 작용한다(C. L. Collins [13]). $E_i Q_i$ 벡터와
 $\bar{s}_{\alpha,i}$ 벡터의 외적으로 정의되는 N^i 평면에 수직한 벡터
 n_i 은 다음과 같이 표현되며

$$n_i = E_i Q_i \times \bar{s}_{\alpha,i} \quad (23)$$

M^i 평면에 수직한 벡터 $q_{1,i}$ 는 다음과 같이 정의되고

$$q_{1,i} = A_i Q_i \times s_{3,i} \quad (24)$$

따라서 나선 축 $\bar{s}'_{1,i}$ 방향을 나타내는 단위벡터 $t_{1,i}$ 은

(25)와 같이 구해진다.

$$t_{1,i} = \frac{n_i \times q_{1,i}}{|n_i \times q_{2,i}|} \quad (25)$$

$\bar{s}'_{1,i}$ 를 제외하고 모든 나선에 역적(reciprocal) 나선
은 다음과 같다.

$$\bar{s}'_{1,i} = [t_{1,i}, Q_i \times t_{1,i}]^T \quad (26)$$

비슷하게 $\bar{s}'_{2,i}$ 를 제외하고 모든 나선에 역적인
(reciprocal) 나선 $\bar{s}'_{2,i}$ 은 (27)에서 구해진다.

$$q_{2,i} = B_i Q_i \times s_{4,i} \quad (27)$$

$$t_{2,i} = \frac{n_i \times q_{2,i}}{|n_i \times q_{2,i}|}, \bar{s}'_{2,i} = [t_{2,i}, Q_i \times t_{2,i}]$$

특이점(singularity) 형상은 $\bar{s}'_{1,i}$, $\bar{s}'_{2,i}$ 이 $\bar{s}_{1,i}$, $\bar{s}_{2,i}$ 에
역적(reciprocal) 일 때 발생하고 현재까지 발견된 제안
된 구조의 특이점은 판토크래프의 링크가 베이스에
놓일 때 혹은 바로 섰을 때 발생하고 연결링크(L_3)가
판토크래프 평면에 수직할 때 발생한다. 위 경우들에
 $\bar{s}'_{1,i}$, $\bar{s}'_{2,i}$ 는 서로 독립적이지 않고 종속된다.

III. 역감제시장치 설계

역감제시장치가 가역성(backdrivability), 넓은 힘 대
역폭, 넓은 힘의 범위등[14] 좋은 동력학 특성 및 기구
학 특성을 가지기 위해서는 적은 관성, 큰 강성, 적은
백래시(backlash), 큰 작업공간, 소형, 등방성(isotropy)
같은 많은 기계적인 요구사항을 만족시켜야 한다. 이
러한 조건들을 만족시키기 위해 이장에서는 큰 작업공
간과 큰 강성 그리고 등방성(isotropy)과 좋은 정밀도
를 가지는 최적 설계 구조를 얻기 위한 설계해석을 수
행한다. 또한 보다 다양한 환경에 사용 가능토록 제안
된 구조의 재배치에 대해서도 논할 것이다.

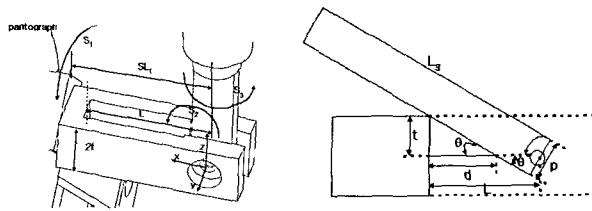
1. RRR type 구형관절 설계

제안된 역감제시장치는 하나의 구형관절이 세 개의
링크와 연결된 구조를 가진다. 그러나 기존의 볼-소켓
타입 조인트로 이루어진 구형관절로는 두개의 L_2 링크
와 한 개의 L_3 를 한 점에서 구형관절로 연결하기가 불
가능하다. 그러므로 가능한 큰 범위의 회전이 일어나
면서 3개의 링크를 연결시키기 위해 RRR 타입의 구형
관절을 제시하였다(그림 4(a)). 제시한 구형관절은 그림
4(a)에서 단지 y 축만이 회전에 대한 제한을 가지
기 때문에 작업공간을 최대한 넓히기 위해 y축 회전
관절의 설계가 필요하다. 따라서, 그림 4(b)에서 본 구
조에 맞는 최적 구형관절을 제작하기 위해 회전관절을
모델링 하였으며 사인공식을 이용해서 링크가 회전하
지 못하는 각 θ 는 (28)로 유도하였다.

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{p}{\sqrt{(2L)^2 + (2t)^2}} \right) - \tan^{-1} \left(-\frac{t}{L} \right) \quad (28)$$

여기서 p 는 $\sqrt{(2L)^2 + (2t)^2}$ 보다 작아야 한다.

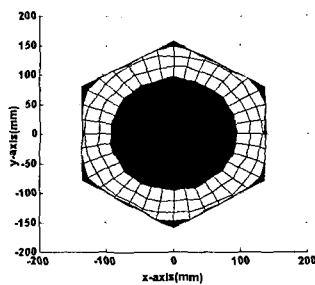
(28)에서 구형관절의 y-축 회전 제한 각 θ 값을 조



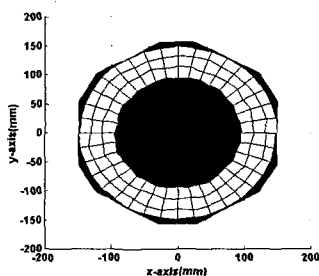
(a) RRR type 구형관절 (b) y축에 대한 구형관절 회전

그림 4. RRR type 구형관절 모델링.
Fig. 4. RRR type spherical joint modeling.

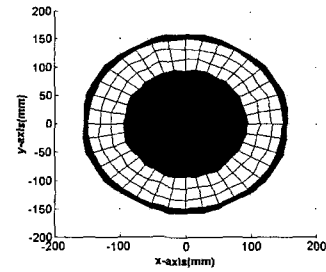
절할 수 있는 설계변수 p, t, L 값이 그림 4(b)에 나타나 있다. 적은 θ 값을 구현하기 위해서는 p, t 값을 작게 하고 L 값을 크게 설계하여야 한다. 하지만 p, t 값이 적어 진다면 구형관절의 강도가 약해지며 구형관절 읍셋거리 L 이 길어진다면 다음 장에서 수행할 성능지표가 나빠진다. 따라서 θ 값이 0에 가까울수록 작업공간은 커지지만 제작상의 어려움과 다른 성능을 감소시키는 문제 때문에 θ 값의 변화에 대한 작업공간의 감소 현상을 살펴본다. 작업공간에 영향을 미치지 않는 한 p, t 값을 크게 하고 L 값을 작게 설계하도록 p, t, L 를 선택해야 한다. 그림 5에서는 병진 작업 공간의 투영된 x-y축 단면을 나타내고 있으며 y-축 회전 제한 각 $\theta=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 에 대하여 θ 값이 적어질수록 병진 작업공간의 작업공간이 적게 훼손 되는 것을 볼 수 있다. 위 그림에서 $\theta=20^\circ$ 를 잡을 때 비교적 작업공간 손실을 적게 하면서 다른 성능들을 감소시키지 않도록 t, p, L 의 설계변수를 잡을 수 있다.



(a) $\theta = 30^\circ$



(b) $\theta = 20^\circ$



(c) $\theta = 10^\circ$

그림 5. 구형관절 y축 회전 제한 값에 대한 병진 작업공간의 변화.

Fig. 5. Constant orientation workspace variation with respect to y-axis limitation angle θ at spherical joint.

2. 최적설계를 위한 변수디자인

이장에서는 GPI (Global Payload Index)[15], GCI (Global Conditioning Index)[16], S(Sensitivity) [17], COW(Constant Orientation Workspace) 와 같은 설계지표를 사용하여 제안된 구조에 대한 최적설계 변수값들을 구하고자 한다.

(29)와 같이 특이 값 (Singular value)이 정의되고 조건 수 (Condition Number)는 (30)과 같이 정의된다.

$$M = \sqrt{\det(JJ^T)} = \sigma_1 \sigma_2 \Lambda \sigma_n \quad (\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \Lambda \sigma_n \geq 0) \quad (29)$$

$$CN = \frac{\sigma_1}{\sigma_n} \quad (30)$$

여기서 n 은 J 의 행렬 차수를 나타낸다. GPI는 (31)과 같이 정의되고 말단부(end-effector)에 작용하는 하중(payload)의 최대값 및 최소값을 전 작업공간에 대해서 평균한 값이다. 물리적인 의미로 6개의 능동관절에 $1Nm$ 의 모멘트가 작용할 때 말단부에서 받을 수 있는 힘을 나타내고 범위는 최소값보다는 크고 최대값보다는 작은 값을 나타낸다.

$$GPI_{max} = \frac{\int \sigma_1 dw}{\int dw}, \quad GPI_{min} = \frac{\int \sigma_n dw}{\int dw} \quad (31)$$

여기서 w 는 전체 작업공간을 나타낸다. GCI는 (32)와 같이 정의되며 전 작업공간에 대한 조건 수 CN (Condition Number)의 역수를 나타내고 있으며 각 방향에 대한 등방성(isotropy)의 정도를 나타낸다.

$$GCI = \frac{\int \frac{1}{CN} dw}{\int dw} \quad (32)$$

하지만 자코비안의 성능지수 평가에 있어 단위의 불일치로 인한 물리적인 해석의 어려움으로 인해 역기구학 자코비안의 단위를 속도/각속도 힘/모멘트의 관계를 분리[20]하여 해석할 필요가 있다.

$$J = [J_v, J_w] \quad (33)$$

여기서 $J_v, J_w \in R^{6 \times 3}$ 는 역 기구학 자코비안 J 의 속도와 각속도 항이다. 따라서 (31)과 (32)의 GPI 및 GCI를 계산 할 경우 J 대신 J_v, J_w 를 대입하여 그 특이 값 (Singular value)의 최대값과 최소값을 이용하여 속도와 각속도가 분리된 성능지수를 평가 할 수 있다. 또한 관절 변수 값에서의 섭동(perturbation)의 말단부에서의 민감도(S)는 (34)와 같이 자코비안 행렬의 한 행의 절대값의 합으로 표현되는데 이 값은 worst case gain을 표현한다.

$$S_x = \sum_{i=1}^6 \left| \frac{\partial x}{\partial q_i} \right|, S_y = \sum_{i=1}^6 \left| \frac{\partial y}{\partial q_i} \right|$$

$$(q = \theta_{11}, \theta_{21}, \theta_{12}, \theta_{22}, \theta_{13}, \theta_{23}) \quad (34)$$

마지막으로 COW 는 말단부의 병진 작업공간의 크기를 나타낸다.

디자인 변수들의 변화에 따른 성능지수 들의 변화가 표1에 요약되어있고 디자인 변수들의 범위는 다음과 같다.

$$0.5 \leq L_1 / L_2, (L_1 + L_2) / L_3, R_0 / R_1 \leq 1.5$$

$$\text{and } 0 \leq SL_1 \leq 200mm$$

이 표에서 위쪽을 향하는 화살표는 성능지수의 증가 혹은 설계변수 비율(ratio)의 증가를 나타내고 있다. 여기서 제안된 역감제시기구의 최적 변수 값은 $L_1 = L_2$, $(L_1 + L_2) = L_3$, $R_0 = R_1$, $SL_1 = (\theta = 20^\circ)$ 일 때의 p , t , L 값으로 나왔고 위 설계변수의 결정으로 병진작업공간은 지름300mm 이상 회전 작업공간은 tilt 각이 50° 이상 그리고 견딜 수 있는 최고 하중은 4kg이상이 되도록 설계되었다.

표 1. 성능지표의 변화.

Table 1. Variations of performance indices.

	GPI	GCI	S	COW
$L_1 / L_2 \uparrow$	↓	↑	↑	Max at $L_1 = L_2$
$(L_1 + L_2) / L_3 \uparrow$	↓	↑	↑	If < 1, Constant If > 1, ↓
$R_0 / R_1 \uparrow$	GPI _{max} =Min, GPI _{min} =Max at $R_0 = R_1$	↑	↓	Max at $R_0 = R_1$
$SL_1 \uparrow$	Constant	↓	↑	Constant

3. 제안된 구조의 재배치(Rearrangement)

그림 1과 같은 구조로 역감제시장치를 구현 하였지만 제안된 역감제시장치의 구조에서 기존의 링크를 제거하든지, 조인트의 방향을 변화 시킨 다든지, 혹은 구동기만을 이동함으로써 제안된 구조의 배치를 변화 시킬 수 있다. 제안된 역감제시장치에서 구형관절을 3개의 회전관절로 대체하였기 때문에 보다 간단한 자유도를 가진 디바이스 운동을 가지기 위해 링크들이 제거 될 수도 있으며 또한 같은 자유도를 유지하면서 기본

구조에서 판토히그래프와 상판의 회전관절의 방향을 변화 시켜 구조를 재 배치 시킬 수 있다.

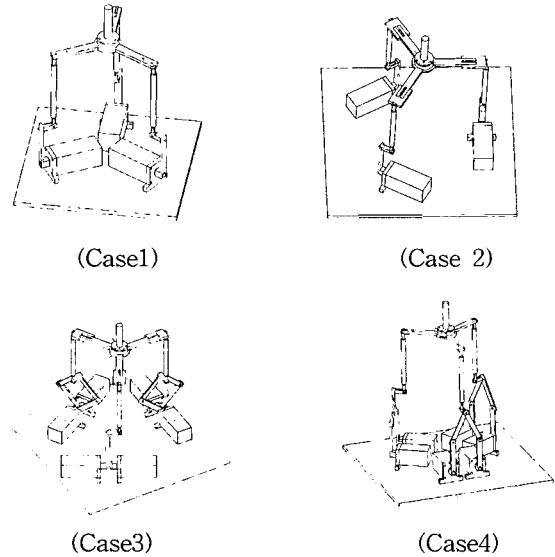


그림 6. 가능한 재배치 구조들.

Fig. 6. Possible rearrangements.

(case1)은 단순히 판토히그래프의 하부링크가 제거 되어, (case2)는 판토히그래프의 하부링크가 제거되고 상판의 회전관절의 회전방향이 바뀌어, (case3)에서는 상판의 회전관절의 방향 및 판토히그래프의 운동 평면이 바뀌어 새로운 재 배치를 한 것을 볼 수 있다. 게다가 2 자유도 운동을 만들어 내는 판토히그래프가 단순히 5각관절 (five-bar)로 변환되었을 때 구동기만의 위치를 변화 시켜 (case4)와 같은 재배치가 가능하다. 그림6은 제안된 구조의 4가지 변형 가능한 배치를 보여주고 있으며 이러한 재배치는 다른 성능이 필요한 다양한 상황에서 역감제시장치의 유동적인 사용을 가능하게 한다.

IV. 성능비교

이장에서는 제안된 구조의 작업공간, GPI, GCI, 민감도를 기존의 비슷한 구조를 가진 디바이스와 비교 하였다. KAIST master [8]와 UCI Force-Reflecting Hand Controller [6]가 비교대상으로 선택 되었으며 위 구조들은 그림 7에서 볼 수 있듯이 세 개의 5각관절 (five-bar)이나 판토히그래프로 구성되고 위 구조들이 상판에 구형관절로 연결되고 베이스에 수동 회전관절로 연결되는 구조를 가지고 있다. 공정한 비교를 위해 다음과 같은 조건에서 비교하였다.

i) 상판과 하판의 반지름이 같도록 각 구조의 변수들을 설정하였다.

$$R_{base} = R_{endeffector} = 128mm$$

ii) 그림 7과 같이 각 구조가 중립 축 능동관절의 값이 모두 45° 일 때의 말단부 $O_z = 270mm$ 가 되도록

각 변수들을 조정하였다.

제안된 병렬구조 $L_1=L_2=80mm, L_3=160mm$
 UCI hand controller $L_1=L_2=190mm$
 KAIST master $L_1=L_2=190mm, B=60mm$

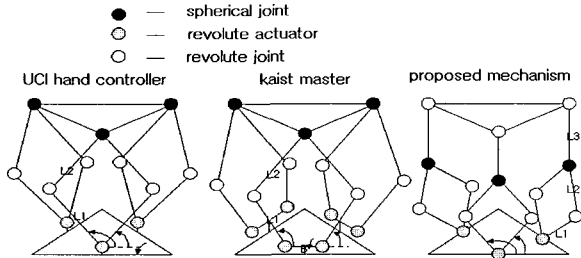
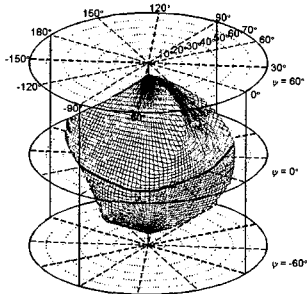


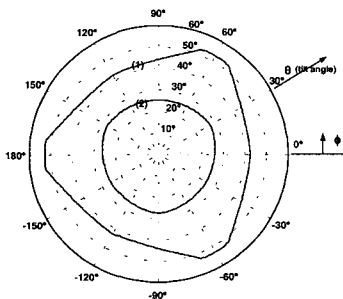
그림 7. 역감제시장치 비교
 Fig. 7. Comparison of haptic mechanisms

1. 작업공간비교

KAIST master와UCI Hand Controller의 병진 작업 공간(constant orientation workspace)은 상대적으로 제안된 구조에 비해서 크다. 그 이유로 기존의 구조들은 5각관절(five-bar)과 판토프래프가 베이스에서 회전하는 구조이지만 제안된 구조는 상판과 판토프래프에 연결되어 있는 연결링크(L_3)의 운동에 의해 병진작업공간이 결정되기 때문이다. 하지만 기존의 구조들은



(a) 실린더 좌표계에서의 회전작업



(b) 투영된 작업공간((1)제안된 구조, (2) UCI 핸드 컨트롤러)

그림 8. $O_x=0, O_y=0, O_z=230mm$ 에서의 회전작업공간.

Fig. 8. Orientation workspace at a nominal position ($O_x=0, O_y=0, O_z=230mm$).

구형관절의 범위에 따라 작업공간의 크기가 급속도로 줄어드는 반면에 제안된 구조는 RRR타입 설계로 구형관절의 범위 제한을 거의 받지 않는다.

역감제시장치의 또 다른 성능지수로 회전 작업공간이 있다. 회전작업공간(orientation workspace)의 정의는 고정된 한 점에서 상판이 얻을 수 있는 모든 방향들의 집합으로 정의되며 해석방법은 변형된 Euler 각 [18]의 사용에 기초를 두었다. 실린더 좌표계가 회전작업공간을 표현하기 위해 제안된 구조에 대해 사용되었고 (그림 8(a)) 투영된 작업공간(projected orientation workspace)은 상판의 가능한 방향벡터(approach vector)의 집합으로 정의된다. 회전작업공간의 경우 제안된 구조는 기존 구조들의 구형관절의 영향을 고려하지 않았을 때의 작업공간을 가지므로 큰 회전작업공간을 가진다. 기존 구조와의 회전작업공간을 비교하기 위해서 그림 8(b)에서 투영된 회전작업공간을 나타내고 있으며 기존 구조들의 경우 구형관절 범위를 60° 도로 제한 하였을 때 제안된 구조가 50° 이상의 tilt 각을 가지는 것에 비해 기존의 구조들은 30° 이내의 tilt 각을 가지는 것을 볼 수 있다.

2. 다른 성능비교

GPI, GCI 의 경우 전체 작업공간에서의 평균 값이지만 본 논문에서는 각 구조의 중심위치(능동관절의 값이 모두 45° 일 때)에서 $30mm \times 30mm \times 30mm$ 정육면체의 작업공간에 대해서 평균한 값을 사용하였으며 그 경향성은 크게 변하지 않을 것으로 본다. 또한 위 성능지표에서 보다 물리적인 의미를 얻기 위해서 GPI의 경우 힘과 모멘트 부분을 분리하였고 GCI의 경우 위치와 방향을 분리하여 그 값을 비교하였다. 말단부의 위치를 다음과 같이 변화 시킬 때

$$O_x = O_y = 0, 240mm \leq O_z \leq 290mm, u = v = \gamma = 0$$

GPI, GCI, 민감도 해석(S)에 관해서 제안된 구조와 기존의 구조들을 비교하였다. 그림 9(a)-(b)은 GPImax에 대해서 힘(그림 9(a))과 토크(그림 9(b)) 성분을 분리하여 차원이 동일한 상태에서 세 개의 구조들에 대해 구한 최대 하중 값을 나타내고 있으며 새로운 역감제시장치의 GPImax 값이 기존 구조들보다 2배 이상 큰 것을 볼 수 있다. 즉 같은 모터 용량을 사용할 때 2배 많은 힘을 견딜 수 있으며 보다 큰 강성을 가지고 있는 것으로 해석 가능하다. 그림 9(c)-(d)에서는 GCI 값을 역시 위치와 방향으로 분리해서 구한 값을 보여지고 있다. 위치에 의한 GCI 값은 KAIST master[8]가 가장 크지만 방향에 의한 값은 새로운 역감제시구조가 가장 크며 UCI hand controller[6]는 각각 중간 값을 나타냈다.

또한, 상대적으로 제안된 구조의 병진 작업공간이 두 구조에 비해 작아 GPI, GCI 값이 z축의 증가에 대해 변화가 큰 것을 볼 수 있다. 그림 9(e)-(f)에서는 민감도(Sensitivity) S의 S_z, S_γ 에 대해서 각 구조에 대해 비교 하였으며 KAIST master[8]와 UCI hand

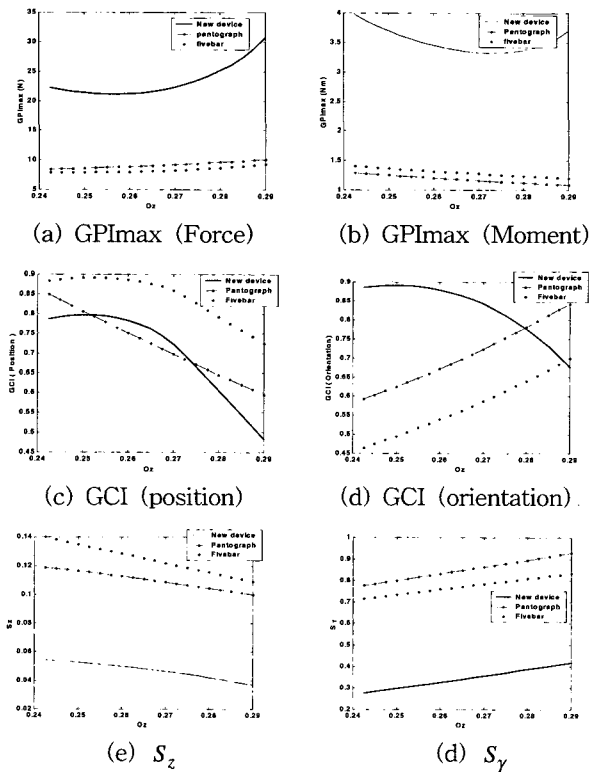


그림 9. GPI, GCI, sensitivity 비교.
 Fig. 9. GPI, GCI, sensitivity comparison.

controller[6] 보단 새로운 역감제시장치가 적은 값을 나타내고 있으며 위 민감도 해석으로 제안된 구조가 같은 모터 엔코더의 정밀도에 대해 말단부에서 좋은 정밀도를 가진다고 해석할 수 있다.

V. 결론

본 논문은 병렬구조를 이용한 새로운 역감제시장치를 제시하였다. 이 구조는 모터가 베이스에 고정되어 좋은 다이내믹 특성을 가지며 구형 관절을 RRR type 으로 대처하고 작업공간에 영향을 미치지 않도록 설계하여 큰 작업공간을 가지며 좋은 정밀도, 큰 강성을 가짐을 기존의 직렬-병렬 구조들과 비교하여 검증하였다. 또한 제안된 구조의 능동적인 활용을 위해 가능한 재배치 구조들을 제시하였으며 제안된 병렬구조를 이용하여 우수한 역감제시장치를 만들 수 있다는 결론을 내릴 수 있다.

참고문헌

[1] G. C. Burdea and P. Coiffet, *Virtual Reality Technology*, John Wiley & Sons, New York City, 1994.
 [2] K. Warwick, J. Gray, and D. Roberts, *Virtual Reality in Engineering*, The Institution of Electrical Engineering, London, UK, 1993.
 [3] R. S. Kalawsky, *The science of Virtual Reality and Virtual Environments*, Addison Wesley Pub.

Co., 1993.
 [4] G. C. Burdea, *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*, John Wiley & Sons, NY, 1996.
 [5] 최한호, "Haptic 인터페이스 현황," 전기공학회지, 제 25 권, 제 2 호, pp. 148-155, 1998. 2.
 [6] 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.
 [7] H. Iwata, "Artificial reality with force feedback: Development of desktop virtual space with compact master manipulator," *Computer Graphics*, vol. 24, no. 4, pp. 165-170, 1990.
 [8] 진병대, 우기영, 권동수, "5각 관절 병렬 구조를 이용한 6자유도 힘 반사형 마스터 컨트롤러," 제어.자동화.시스템공학 논문지, 제5권, 제3호, pp. 288-296, 1999. 4.
 [9] Y. Tsumaki, H. Naruse, D. N. Nenchev, and M. Uchiyama, "Design of a compact 6-DOF haptic interface," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2580-2585, 1998.
 [10] P. A. Millman, M. Stanley, and J. E. Colgate, "Design of a high performance haptic interface to virtual environments," *IEEE VRAIS '93*, pp. 208-216, 1993.
 [11] 김정태, 김문생, "6 자유도 조작장치의 설계와 기구학적 특성에 관한 연구," 대한기계학회논문집, A권, 제21권, 제2호, pp. 467-475, 1996.
 [12] V. Kumar, "Instantaneous kinematics of parallel-chain robotic mechanism," *ASME J. Mechanical Design*, vol. 114, no. 3, pp. 349-358, 1992.
 [13] C. L. Collins and G. L. Long, "The singularity analysis of an in-parallel hand controller for force-reflected teleoperation," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 11, no. 5, pp. 661-669, 1995. 10.
 [14] P. Fischer, R. Daniel, and K. V. Siva, "Specification and design of input devices for teleoperation," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 540-545, 1990.
 [15] H. Ozaki, H. Wang, X. Liu, and F. Gao, "The atlas of the payload capability for design of 2-DOF planar parallel manipulators," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1483-1487, 1996.
 [16] C. Gosselin and J. Angeles, "A global performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators," *Transactions of The*

ASME, vol. 113, pp. 220-226, 1991.

[17] K. W. Grace and J. E. Colgate, "A six degree-of freedom micromanipulator for ophthalmic surgery," *IEEE*, pp. 630-633, 1993.

[18] I. A. Bonev and J. Ryu, "A new approach to orientation workspace analysis of 6-DOF parallel manipulators," *Mechanism and Machine*

Theory, to appear 2000.

[19] C. F. Gerald and P. O. Wheatley, *Applied Numerical Analysis*, Addison Wesley Pub. Co., 1994.

[20] 김점구, 홍금식, 박종우, 김종원, "병렬형 공작기계의 조작성 해석:기구부 최적설계에 적용," 한국정밀공학회지, 제16권, 제11호, pp. 213-222, 1999. 11.

술어 (Nomenclature)

- R_0 : 베이스에서 2자유도 기구부(pantograph)까지의 반지름
- R_1 : 상판의 반지름
- L_1 : 2자유도 기구부(pantograph)의 상부링크의 길이
- L_2 : 2자유도 기구부의 하부링크의 길이
- L_3 : 상판의 회전관절과 구형관절의 연결링크의 길이
- SL_1 : 구형관절의 옵셋(offset) 거리
- Q_i : 2자유도 기구부와 연결링크를 연결해주는 구형관절의 좌표
- M_i : 2자유도의 입력 값이 위치하는 베이스에서 고정된 이동좌표계가 위치한 좌표
- E_i : 연결링크와 상판을 연결하는 회전관절이 위치하는 좌표
- α_i : E_i 점에서의 회전관절 각
- (X_b, Y_b, Z_b) : 베이스에 고정되어 있는 절대좌표계
- (X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi}) : 베이스에 고정된 이동좌표계
- (X_o, Y_o, Z_o) : 상판의 중심에서 움직이는 상대좌표계

- oQ_i : 상판의 상대좌표계 (X_o, Y_o, Z_o) 를 기준으로 구한 구형관절의 좌표
- δ_i : 절대좌표계에서 판토그래프 이동좌표계까지의 회전
- θ_{1i}, θ_{2i} : 능동 조인트 각
- T_o^s : 상판좌표계 (X_o, Y_o, Z_o) 에서 구형관절 좌표계 (X_s, Y_s, Z_s) 까지의 변환행렬
- T_b^s : 절대좌표계에서 구형관절 좌표계 (X_s, Y_s, Z_s) 로의 변환행렬
- J : (6x6) 역기구학 자코비안
- $\bar{s}_{1,i}$: 능동 관절(active joint)인 θ_{1i} 의 나선 (screw)
- $\bar{s}'_{1,i}$: θ_{1i} 의 역 나선(reciprocal screw)
- θ : 구형관절의 y-축 회전 제한 각
- L : 구형관절 옵셋거리
- p : 연결 링크 L_3 의 지름
- σ : J 의 특이 값 (singular value)
- w : 전체 병진 작업공간(constant orientation workspace)



윤 정 원

1973년 5월 1일생. 1998년 전북대학교 정밀기계공학과(공학사). 2000년 광주과학기술원 기전공학과(공학석사). 2000 ~ 현재 동 대학원 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 연구

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