

+5 각 관절 병렬 구조를 이용한 6 자유도 힘 반사형 원격 조종기

A 6-Degree-of-Freedom Force-Reflecting Hand Controller using Fivebar Parallel Mechanism

°진병대*, 우기영**, 권동수***

* 국방과학연구소(Tel:+82-42-821-4482;Fax:+82-42-821-2224;E-mail:jinbd@robot.kaist.ac.kr)

** 한국과학기술원 기계공학과 (Tel : 042-869-3082, E-mail : wooky@robot.kaist.ac.kr)

*** 한국과학기술원 기계공학과 (Tel : 042-869-3042, E-mail : kwon@automation.kaist.ac.kr)

Abstracts A Force-reflecting hand controller can provide the kinesthetic information obtained from a slave manipulator to the operator of a teleoperation system. This thesis presents the design and the analysis of a 6-degree-of-freedom force-reflecting hand controller using fivebar parallel mechanism. The goal of this thesis is to construct a superior hand controller that can provide large workspace and good force-reflecting ability. The forward kinematics of the fivebar parallel mechanism has been calculated in real-time using three pin-joint sensors in addition to six actuator position sensors. A force decomposition approach is used to compute the Jacobian. To analyze the characteristics of the fivebar parallel mechanism, it has been compared with the other three parallel mechanisms in terms with workspace and manipulability measure. The force-reflecting hand controller using the fivebar parallel mechanism has been constructed and tested to verify the feasibility of the design concept.

Keywords Teleoperation, Man-machine interface, Telepresence, FRHC, Fivebar parallel mechanism

1. 서론

해 또는 화학물질의 취급과 같은 작업 환경이 거칠고 위험성이 내재되어 있는 경우, 현존의 로봇 기술보다 더 다양한 작업 능력이 필요한 경우, 우주, 해저 등 작업 공간에 대한 기하학적 정보를 얻기 힘든 작업 환경에서는 작업 로봇이 완전 자동으로 작업을 수행할 수 없기 때문에 인간이 제어 루프 안에서 인간의 적절한 판단에 의해 로봇을 실시간 제어하여 동작시키는, 이른바 원격 조종 시스템(Teleoperation system)이 필요하다.

이러한 원격 조종 시스템에서는 종속 매니플레이터가 작업하고 있는 원격지의 작업 환경에 대한 정보를 통하여 작업자가 종속 매니플레이터의 운동에 관한 적절한 판단을 man-machine interface를 통해 종속 매니플레이터의 운동을 제어하게 되므로 적절한 man-machine interface의 성능은 전체 원격 조종 시스템의 성능을 좌우하는 중요한 요소가 되며 종속 매니플레이터의 말단 장치의 위치와 자세 제어를 위한 입력 장치로서의 원격 조종기의 성능은 전체 시스템의 성능을 좌우하는 중요한 인자가 된다.

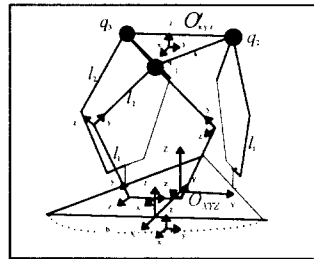
원격 조종 시스템에서 작업자는 원격지 작업장에 없지만 마치 원격지 작업장에서 작업하는 것처럼 느끼기를 원하는 원격지 현실감(Telepresence)을 실현, 증진시키기 위해서는 원격지의 작업 환경에 대한 유용한 정보가 작업자에게 전달되어야 한다. 사람이 정확한 작업을 할 때 가장 중요한 감각은 근 운동 감각이므로 원격 조종 작업에서 종속 매니플레이터의 힘의 반사를 통해 작업자에게 작업 환경에 대한 힘의 정보를 제공한다면 작업자의 작업 능력은 크게 향상될 것이다.[6] 위와 같은 능력을 작업자에게 제공하는 입력 장치를 힘 반사형 원격 조종기(Force-reflecting hand controller)라 한다.

본 연구에서는 큰 체적, 고 중량, 고가, 낮은 힘 반사 기능, 불충분한 현실감(telepresence) 등으로 특징 지워질 수 있는 대부분의 현존하는 힘 반사 원격 조종기의 단점을 극복할 수 있는 5각 관절 병렬 구조를 제안하고 이 구조의 원격 조종기로서의 실현 가능성을 확인하였다.[10]

2. 기구학해석

2.1 기구 모델링 및 자유도 해석

5각 관절 병렬 구조는 3개의 5각 관절(Fivebar)이 상판과 하판을 연결해주는 형태로 되어 있고 상,하판과 각 5각 관절은 구형 조인트(spherical joint)와 핀 조인트(pin joint)로 연결되어 있는 형상을 지니고 있다. 각 좌표계는 그림 1의 (a)와 같으며 고정 좌표계에 대한 상판 중심의 위치를 O' 로 표시하고 고정



(a) 좌표 설정



(b) 실물

그림 1 5각 관절 병렬 구조

Fig. 1 Fivebar parallel mechanism

(a) modelling (b) real mechanism

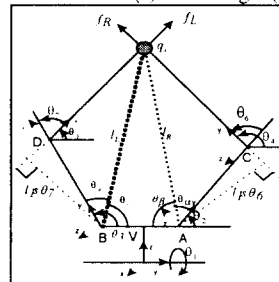


그림 2 5각 관절

Fig.2. Fivebar

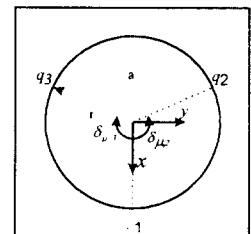


그림 3 상판 좌표 구성도

Fig.3 Upper platform coordination

좌표계에 대한 상판의 자세는 RPY(roll, pitch, yaw)각을 이용한 회전 변환 행렬 R 로 표시했다. 하판과 각각의 5각 관절의 체인이 이루는 각도를 능동 변수 θ_2, θ_3 로 설정하였다.

Grübler의 자유도(mobility) 계산식 (1)에 의하여 5각 관절 병렬 구조는 구동 입력이 능동적인 경우 6 자유도의 움직임을 갖고 구동 입력이 모두 고정 되었을 경우 자유도가 0이 되어 하나의 강체가 되어 모든 요소들은 최대 6 자유도의 작업 공간 내로 한정 됨을 확인 할 수 있다.[2]

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^k f_i \quad (1)$$

2.2 정기구학 해석

정기구학 해석은 각 능동 변수 θ_2, θ_3 가 주어진 경우 매니플레이터의 말단 장치의 위치 P^m 와 자세 R 을 구하는 것이므로 그림 3에서 이동 좌표계에 대한 구형 조인트의 위치 q_i^m 은

$$q_i^m = [r c \delta_{m,i} \quad r s \delta_{m,i} \quad 0]^T \quad i = 1 \sim 3$$

$$\delta_{m,1} = 0^\circ \quad \delta_{m,2} = 60^\circ \quad \delta_{m,3} = -60^\circ \quad (2)$$

이고 여기서 c 는 \cos 을 s 는 \sin 을 의미하고 윗 첨자는 좌표계를, 아래 첨자는 각 5각 관절을 의미한다. 또 $rot_x(\theta)$ 는 x 축으로 θ 각 회전을, $transl(a,b,c)$ 는 x 축으로 a , y 축으로 b , z 축으로 c 만큼의 이동을 의미한다.

5각 관절의 왼쪽 체인과 오른쪽 체인은 한 점 q_i 에서 만난다는 기구학적 특성으로 부터 식 (3)을 유도할 수 있다.

$$d + l_1 c \theta_{2,i} + l_2 c \theta_{4,i} = -d + l_1 c \theta_{3,i} + l_2 c \theta_{5,i}$$

$$l_1 s \theta_{2,i} + l_2 s \theta_{4,i} = l_1 s \theta_{3,i} + l_2 s \theta_{5,i}$$

$$s \theta_{4,i} - s \theta_{5,i} = l_1 / l_2 (s \theta_{3,i} - s \theta_{2,i}) \Rightarrow J$$

$$c \theta_{4,i} - c \theta_{5,i} = l_1 / l_2 (-2d l_2 + c \theta_{3,i} - c \theta_{2,i}) \Rightarrow K \quad (3)$$

식 (3)을 $\theta_{4,i}$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\theta_{4,i} = -\omega + \text{asin}(\text{sqrt}(J + K) / 2)$$

$$\omega = -\text{atan2}(K, J) \quad (4)$$

고정 좌표계에 대한 구형 조인트의 위치 q_i 는 식 (5)와 같다

$$q_i = \text{rotz}(\delta_{m,i}) \text{transl}(b, 0, 0) \text{rotz}(\theta_{1,i}) \text{transl}(0, d, f) \text{rotz}(\theta_{2,i})$$

$$\text{transl}(0, l_1, 0) \text{rotz}(\theta_{6,i}) \text{transl}(0, l_2, 0) [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (5)$$

여기서 $\theta_{6,i} = \theta_{4,i} - \theta_{2,i}$ 이다.

각 구형 조인트 사이의 거리는 상판의 한 변의 길이가 a 로 일정하다는 구속 조건으로 부터 $\theta_{1,i}$ 에 관한 3개의 비선형 방정식을 유도한 후 가장 일반적이고 수렴 속도가 빠른 수치해석 방법인 Newton-Raphson 방법을 사용하여 $\theta_{1,i}$ 를 구한다.

고정 좌표계에 대한 이동 좌표계 중심의 위치 O' 은

$$O' = (q_1 + q_2 + q_3) / 3 \quad (6)$$

과 같이 표시되고 고정 좌표계에 대한 이동 좌표계 중심의 회전 행렬 R 은 식(7)을 통해 식 (8)과 같이 표시된다.

$$q_i - O' = R q_i^m \quad (7)$$

$$[q_1 - O' \quad q_2 - O' \quad q_3 - O'] = R [q_1^m \quad q_2^m \quad q_3^m]$$

$$R = [q_1 - O' \quad q_2 - O' \quad q_3 - O'] [q_1^m \quad q_2^m \quad q_3^m]^{-1} \quad (8)$$

그러나 이와 같은 수치 해석 방법을 사용할 경우 초기값 선정 문제와 해 수렴 보장성 문제가 수반되어 기구의 실제 작업 영역보다 작은, 수치해석 방법이 수렴하는 지역을 작업 공간으로 정해야 하는 문제가 발생한다.

또한 대부분의 병렬형 구조의 경우 정 기구학 해가 유일하게 존재하지 않고 상,하판의 기하학적 구조와 기구의 형상에 따라 4개 이상의 다중 해를 갖고며 Closed 형태의 해를 구하기 어렵고 비선형 고차 연립 방정식으로 구성되어 있기 때문에 실시간 제어에 적용하기 힘들다.[8]

5각 관절 구조는 해석 결과 16개의 정기구학 해를 갖고 있으며 그림 4는 그 중 4가지 형상을 나타내고 있다.

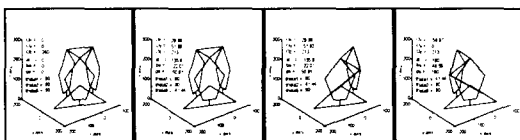


그림 4 정기구학 해의 다중성
Fig. 4 Multiple solution of Forward kinematics

이상과 같이 정 기구학 해의 다중성으로 인한 해 선택의 문제를 피하고 고차 비선형 방정식을 풀어야 하는 계산 부하를 줄임으로써 실시간 제어를 가능하게 하기 위하여 실제 시스템에 적용 시에는 수치 해석적인 방법 대신 하판에 위치한 3개의 편 조인트에 여분의 위치 센서를 편 조인트 축과 동일 직선 상에 추가적으로 설치하여 위와 같은 문제를 해결하였다.

2.3 역 기구학 해석

역 기구학은 고정 좌표계에 대한 상판의 중심의 위치 O' 와 회전 변환 행렬 R 이 주어질 경우 각 능동 변수 $\theta_{2,i}, \theta_{3,i}$ 를 유도하는 것이다.

고정 좌표계에 대한 각 구형 조인트의 위치 q_i 는 식 (5)와 같이 표시된다.

식 (5)에서 우변의 첫번째 두개 항을 좌변으로 넘겨 정리한 후 우변을 임의의 벡터 P 라 놓으면 식 (9)로 정의된다.

$$P_{x,i} = s \theta_{1,i} (l_2 s \theta_{2,i} c \theta_{6,i} + l_2 c \theta_{2,i} s \theta_{6,i} + l_1 s \theta_{2,i} + f)$$

$$P_{y,i} = l_2 c \theta_{2,i} c \theta_{6,i} - l_2 s \theta_{2,i} s \theta_{6,i} + l_1 c \theta_{2,i} + d$$

$$P_{z,i} = c \theta_{1,i} (l_2 s \theta_{2,i} c \theta_{6,i} + l_2 c \theta_{2,i} s \theta_{6,i} + l_1 s \theta_{2,i} + f) \quad (9)$$

식 (9)로부터 $\theta_{1,i}$ 에 대한 식은 다음과 같다.

$$\theta_{1,i} = \text{atan2}(P_{x,i}, P_{z,i}) \quad (10)$$

그림 3에서 각 구형 조인트와 능동 조인트의 거리는 다음과 같다.

$$l_R = \|q_i - A\|$$

$$l_L = \|q_i - B\| \quad (11)$$

식 (12)를 이용하여 코사인(cosine) 정리를 적용하여 θ_a 를 유도하면 다음과 같다.

$$c \theta_a = (l_R^2 + l_1^2 - l_2^2) / (2 l_R l_1)$$

$$\theta_a = \text{acos}((l_R^2 + l_1^2 - l_2^2) / (2 l_R l_1)) \quad (12)$$

$\theta_b, \theta_c, \theta_d$ 도 같은 방식으로 구하면 θ_2 와 θ_3 는 식 (13)과 같이 표시된다.

$$\theta_2 = 90 - (\theta_a + \theta_b)$$

$$\theta_3 = \theta_c + \theta_d \quad (13)$$

이와 같이 병렬 구조의 역 기구학의 해는 직렬 구조와는 반대로 유일하게 Closed 형태로 표현 됨을 알 수 있다.

3. Jacobian 해석 및 검증

매니퓰레이터의 말단 장치의 선속도 v , 각속도 w 와 능동 조인트 속도를 $\dot{\theta}$ 과의 관계를 나타내는 자코비안(Jacobian)의 해석은 병렬 구조의 경우 역 기구학 해가 Closed 형태로 유일하게 존재하기 때문에 역기구학 관계식을 통하여 자코비안을 유도하는 것이 일반적인 방법이나 역 기구학을 이용할 경우 식이 복잡하고 계산량의 증가로 실시간 제어에 불리하다. 본 연구에서는 자코비안은 능동 조인트에서의 토크 τ 와 말단 장치에 작용하는 힘/모멘트 F 와의 관계를 규정 짓는다는 사실로부터 자코비안을 계산함으로써 계산량을 줄여 실시간 제어에 유리하게 하였다.[5]

조인트에서의 토크 τ 와 말단 장치에 작용하는 힘/모멘트 F_{ee} 의 관계는 구형 조인트에 작용 하는 힘에 의해 상호 관계가 식 (14)와 같이 표현된다.

$$F_{ee} = J_{sj}^{ee} F_{sj}$$

$$F_{sj} = J_{act}^{sj} \tau \quad (14)$$

구형 조인트에 작용하는 힘 F_{sj} 과 말단 장치에 작용하는 힘 F_{ee} 의 관계는 첫째, 구형 조인트에는 모멘트가 작용하지 않고 둘째, 구형 조인트는 그림 5에서 f_R 과 f_L 의 힘만 받고 두 성분은 수직인 방향으로 힘을 받지 않는다는 사실로부터 다음과 같이 표시된다.

$$F_{ee} = \begin{bmatrix} \hat{f}_{R,1} & \hat{f}_{L,1} & \hat{f}_{R,2} & \hat{f}_{L,2} & \hat{f}_{R,3} & \hat{f}_{L,3} \\ P_{1,1} \times \hat{f}_{R,1} & P_{1,1} \times \hat{f}_{L,1} & P_{1,2} \times \hat{f}_{R,2} & P_{1,2} \times \hat{f}_{L,2} & P_{1,3} \times \hat{f}_{R,3} & P_{1,3} \times \hat{f}_{L,3} \end{bmatrix} F_{sj}$$

여기서

$$F_{ee} = [f_x \quad f_y \quad f_z \quad m_x \quad m_y \quad m_z]^T$$

$$F_{sj} = [f_{R,1} \quad f_{L,1} \quad f_{R,2} \quad f_{L,2} \quad f_{R,3} \quad f_{L,3}]^T$$

이고 $P_{i,j}$ 는 상판의 중심에서 각 구형 조인트로의 벡터, \hat{f} 은 고정 좌표계에 대한 f 의 방향 벡터를 표시한다.

구동 조인트의 토크 τ 와 구형 조인트에 작용하는 힘 F_{sj} 사이의 관계는 다음과 같다.

$$\tau_{2,i} = l_i s\theta_{6,i} f_{R,i}$$

$$\tau_{3,i} = -l_i s\theta_{7,i} f_{L,i} \quad (16)$$

따라서

$$\begin{bmatrix} \tau_{2,i} \\ \tau_{3,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_i s\theta_{6,i} & 0 \\ 0 & -l_i s\theta_{7,i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{R,i} \\ f_{L,i} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$F_{sj} = \begin{bmatrix} [J_{act}^{sj}]_1 & 0 & 0 \\ 0 & [J_{act}^{sj}]_2 & 0 \\ 0 & 0 & [J_{act}^{sj}]_3 \end{bmatrix} \tau \quad (18)$$

식 (17)와 식 (18)로 부터 말단 장치에 가해지는 힘 F_{ee} 와 구동기의 토크 τ 는 식 (19)와 같이 정리되어 진다.

$$F_{ee} = J_{sj}^{ee} J_{act}^{sj} \tau \quad (19)$$

현재 말단 장치의 위치 u_o 에서의 능동변수 θ_o 와 말단 장치를 조금 움직인 후의 위치 u_n 과 그때의 능동 변수 θ_n 의 변화율은 u_o 에서 구한 Jacobian 값과 같아야 한다는 사실로부터 Jacobian 의 타당성을 검증하였다.

$$d\theta = J_p du$$

$$J_p = \frac{\theta_n - \theta_o}{u_n - u_o} \quad (20)$$

4. 기구 특성 분석

4.1 작업 공간 비교

원격 조종기의 작업 공간은 중속 매니플레이터의 작업 성능에 영향을 주기 때문에 중요한 기구 특성값이 된다.

병렬 구조의 작업 공간 해석은 기구의 구조가 복잡하여 기하학적인 접근은 어려우며 본 연구에서는 역 기구학을 이용하였다. [1]

본 연구에서 제시한 5 각 관절 구조 외에 그림 5에 있는 병

렬 기구들을 비교 대상 기구로 선정하여 작업 공간을 해석, 비교하였다. [2,3,4,]

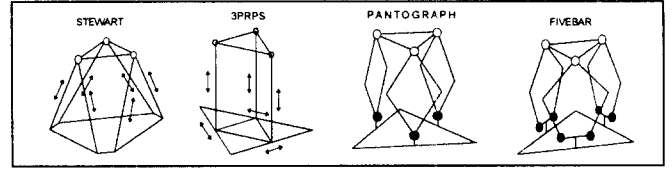


그림 5 비교 대상 기구

↔ 선형 구동부 • 회전 구동부 o 구형 조인트

Fig. 5 Compared mechanism

각 기구들의 구동 방식이 다르고 병렬 구조의 작업 공간은 상판의 크기와 각 기구 구성 요소의 변화에 따라 변화하기 때문에 다음과 같은 기준을 가지고 작업 공간을 비교, 분석 하였다.

1. 작업 공간의 Z축으로의 최대 값을 동일하게 설정한다.
2. 각 기구의 상판과 하판의 크기는 같게 하고 상판과 하판의 비율은 0.5로 한다.

상판과 하판이 평행인 상태로 회전이 없을 경우 그림 6과 같이 각 기구가 도달할 수 있는 작업 공간을 구하였다.

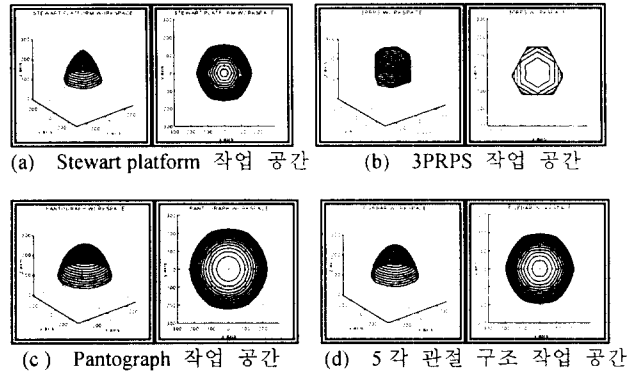


그림 6 각 기구의 작업 공간

Fig.6 Workspace

(a) Stewart platform (b)3PRPS (c)Pantograph (d) Fivebar

그림 6에서 5 각 관절 구조의 작업 공간이 Stewart platform 과 3PRPS 보다는 훨씬 크며 또한 높이에 따른 작업 공간의 변화가 완만하므로 원격 조종기에 적용될 경우 다른 기구 구조보다 원격 조종기의 움직임이 유리할 것으로 예측된다. Pantograph의 작업 공간은 5 각 관절 구조보다는 약간 크나 구동기가 한 점에 위치해야 하므로 제작상의 어려움이 따른다.

5 각 관절 기구는 부분적으로 직렬형 기구인 서브 체인을 사용함으로써 병렬 구조의 장점인 구조의 강성을 지니면서, 직렬형 기구의 특징인 큰 작업 공간을 가짐을 알 수 있다.

4.2 Manipulability 비교

조인트의 움직임에 대한 말단 장치의 운동 능력(manipulability)의 척도로써 식 (21)로 정의되는 운동 능력 지수(manipulability measure) w_p 와 기구학적 관점에서 매니플레이터가 효율적으로 힘을 주고 받을 수 있는 능력(force acting/force resisting ability)의 척도로써 식(22)로 정의 되는 저항 능력 지수(resistivity measure) w_R 이 연구 제안되었다[9].

여유도를 갖지 않을 경우

$$w_p = |det J_p(u)^{-1}| \quad (21)$$

$$w_R = \frac{l}{|det J_p(u)^{-1}|} \quad (22)$$

- [1] Chi-Mei Luh, F.A. Adkins, E.J. Haug, C.C. Qiu, "Working Capability Analysis of Stewart Platforms", *Transactions of the ASME*, Vol.118, pp.220-227, June, 1996
- [2] Fariborz Behi, "Kinematic Analysis for a Six-Degree-of-Freedom 3-PRPS Parallel Mechanism", *IEEE J. of Robotics and Automation*, Vol.4, No.5, October 1988
- [3] Gregory L. Long, Curtis L. Collins, "A Pantograph Linkage Parallel Platform Master Hand Controller for Force-Reflection", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.390-395, May, 1992
- [4] Kai Liu, Mick Fitzgerald, Derren M. Dawson, "Modeling and Control of a Stewart Platform Manipulator", *Control of Systems*, DSC-Vol.33, ASME, 1991
- [5] Kevin Cleary, Mark Uebel, "Jacobian Formulation for a Novel 6-DOF Parallel Manipulator", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.2377-2382, 1994
- [6] Mark D. Bryfogle, Charles C. Nguyen, Sami S. Antrazi, Peter C. Chiou, "Kinematics and Control of a Fully Parallel Force-Reflecting Hand Controller for Manipulator Teleoperation", *Journal of Robotic Systems*, Vol.10, No.5, pp.745-766, 1993
- [7] P. Fisher, R. Daniel, "Specification and Design of Input Devices for Teleoperation", In *Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation*, Vol.1, pp.540-545, 1990
- [8] R. Nair, J.H. Maddocks, "On the Forward Kinematics of Parallel Manipulator", *The International Journal of Robotics Research*, Vol.13, No.2, pp.171-188, April, 1994
- [9] T. Yoshikawa, "Manipulability of Robotic Mechanisms", *Int. J. Robotics Research*, Vol.4, No.2, pp.3-9, 1985
- [10] 김희국, 이병주, "병렬형 3 자유도 구형 모듈의 해석과 힘반영 원격 조정기로의 구현", *대한기계학회 논문집*, 제 10 권, 제 10 호, pp.2501-2513, 1994

위의 두 식은 구동기에 의해 어떤 움직임이 이루어 질 경우 말단 장치의 잘 움직이는 자세에서는 힘을 내는 능력이 저하된다는 물리적인 의미를 내포하고 있다. 이는 곧 외력이 가해질 경우 매니플레이터 자체가 외력에 견딜 수 있는 지수를 의미하기도 한다.

원격 조종기는 어떠한 자세를 이루고 있더라도 원격 로봇으로부터 오는 힘을 조작자에게 정확하게 전달하고 반대로 조작자가 가하는 힘을 포함한 외부의 힘에 자체의 형상을 유지해야 하므로 운동 능력(manipulability)과 저항 능력(resistivity)이 어느 한쪽으로 치우치지 않는 것이 중요하다.

이상으로 제시된 운동 능력 지수와 저항 능력 지수를 이용하여 그림 7은 특이 형상을, 그림 8은 높이에 따른 지수의 변화를 나타낸다.

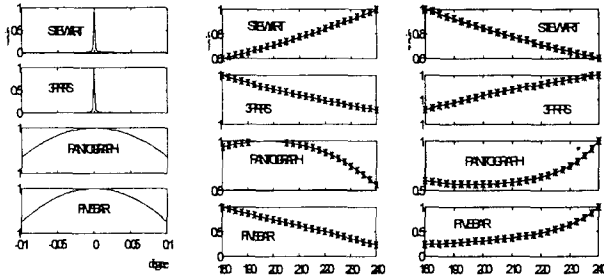


그림 6 특이형상
Fig.6 Singularity

(a) 운동 능력 (b) 저항 능력
그림 7 운동 능력
Fig.7 Manipulability

그림 7에서 Stewart platform 과 3PRPS 는 상,하판이 평행으로 정위치(nominal point)에 있을 경우 특이형상이 발생하여 운동능력(manipulability measure)이 무한대가 됨을 알 수 있다.(그림 6은 정규화된 값이다.) 이는 설계 시 구조 상으로 특이형상 방지를 위해 상,하판이 평행이 안되게 설계가 되어야 하고 이로 인한 작업 공간의 왜곡이 발생하게 되는 단점을 가진다. 그러나 5각 관절 구조의 경우 이런 현상이 없어 제어 시 유리함을 알 수 있다.

그림 8에서 5각 관절 구조의 경우 z축의 높이의 변화에 대한 운동 능력 지수(manipulability measure)가 완만히 감소함을 알 수 있고 저항 능력 지수(resistivity measure)의 변화 추이는 미소하게 증가함을 알 수 있다. 그림 9는 저항 능력 지수의 상대적 크기를 표시한 그림이다.

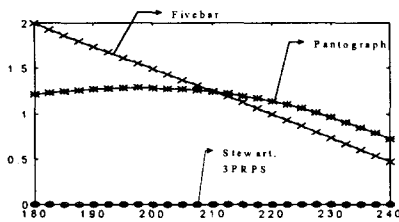


그림 9 저항 능력 지수의 상대적 크기
Fig.9 Magnitude of resistivity measure

5. 결론

제안되어진 5각 관절 구조는 다른 병렬 구조 보다 원격 조종기로서의 기구적 특성이 우수하다. 실제 기구를 제작, RS-232C 통신을 이용하여 486 PC 에 구축된 로봇 시뮬레이터와 연결하여 모의 원격 조종 시스템을 구축하였다. 실험을 통해 제안된 5각 관절 구조의 원격 조종기로서의 실현 가능성을 입증하였다. F/T 센서를 상판에 부착하여 원격지 현실감 향상을 위한 실험을 계속 진행 중이다.

본 연구는 보건복지부(계정번호 HMP-96-E-5-1015)와 한국과학기술원(계정번호 NN23110)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.