

6 자유도를 갖는 정밀 위치제어용 병렬 매니플레이터의 기구학 해석 Kinematic Analysis of a 6-Degree-of-Freedom Micro-Positioning Parallel Manipulator

박주연*, 심재홍*, 조형석**, 권동수**

* 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과(Tel: 958-3457; Fax: 968-1638; E-mail: parkjy@robot.kaist.ac.kr)

** 한국과학기술원 기계공학과(Tel: 958-3417; Fax: 968-1638; E-mail: kwon@automation.kaist.ac.kr)

Abstract : This paper studies a class of in-parallel manipulators with special geometry where the forward displacement analysis problem can be solved easier than the fully parallel manipulators. Three horizontal links of this mechanism provide 3DOFs(Degrees of Freedom), which are one degree of orientational freedom and two degrees of translatory freedom. Three vertical links of this mechanism provide 3DOFs, which are two degrees of orientational freedom and one degree of translatory freedom. The main advantages of this manipulator, compared with the Stewart platform type, are the capability to produce pure rotation and to predict the motion of the moving platform easily. Since this manipulator has simple kinematic characteristics compared with the Stewart platform, controlling in real-time is possible due to less computational burden. The purpose of this investigation is to develop an analytical method and systematic method to analyze the basic kinematics of the manipulator. The basic kinematic equations of the manipulator are derived and simulation is carried out to show the performance of the mechanism .

Keyword : Parallel Manipulator , Stewart Platform , Kinematic Analysis

1. 서론

최근 산업계 전반에 걸쳐 로봇을 이용한 초정밀 작업을 요구하는 분야가 증대 됨에 따라서 고강성, 고정밀도, 고동력학적 효율을 가진 병렬 매니플레이터를 산업계의 관련 작업에 응용하려는 노력이 계속되고 있다. 본 논문에서는 정밀 위치 제어가 가능한 6 자유도 병렬 매니플레이터를 제안하고, 기구학 해석을 통하여 기구 구조 변수 결정 방안 에 대하여 고찰 하고자 한다. 6 자유도 병렬 기구는 1965년 D.Stewart 에 의해서 처음으로 고안되어 Stewart Platform 으로 불리며, 현재 병렬 매니플레이터 설계의 기본이 되고 있다. 이와 관련한 기구학 해석의 주요 연구 동향을 살펴보면 다음과 같다. D.Stewart 는 6 자유도 병렬 기구를 처음으로 고안하였으며[1], K.Cleary 와 T.Brooks 는 정기구학 해를 실시간에 구할 수 있는 6 자유도 병렬 기구계를 고안하고 해석하였고[2], E.Ficher 는 Stewart Platform 에 대한 일반적인 기구학적 이론 및 실제 설계시 고려할 사항을 연구 제시하였고[3], P.Nanua 와 J.Waldron 은 6 자유도 병렬 기구에서 첨단부와 베이스가 평면인 경우의 정/역 기구학 해석을 하였다[4]. 또한 C.Innocenti 는 임의의 위치에 길이가 가변되고 양단에 구형 조인트가 형성된 6 자유도 병렬 기구를 고안하였으며[5], F.Behi 는 6 자유도 3-PRPS 병렬 매니플레이터의 기구학을 나사이론(screw theory)을 이용하여 구하는 방법을 제시하였다[6].

본 연구에서는 양방향 텔레오퍼레이션(bilateral teleoperation)에서 정밀 위치제어 기능을 갖는 슬레이브 매니플레이터(slave manipulator)로서 적용 가능한 6 자유도 병렬 매니플레이터를 제안하고, 기구학 해석을 하였다. 제안된 6 자유도 병렬 매니플레이터의 특징은 다음과 같다. 첫째, 텔레오퍼레이션시 위치 및 방향 예측성을 좋게 하고, 높이에 따라 균일한 작업공간의 확보를 도모하기 위하여 첨단부와 베이스를 연결하는 링크를 수평 링크와 수직 링크로 분리 배치하였다. 둘째, 구동 입력에 따르는 수평/수직 링크의 변위를 정밀하게 측정하여 첨단부의 위치와 방향을 실시간에 구할 수 있도록 위치 검출 센서로는 레이저와 PSD(Position

Sensitive Detector)를 채용하였고, 각 링크 구동용 액츄에이터로는 마찰 및 백래쉬가 작아 정밀 제어에 적합한 VCM(Voice Coil Motor)을 채용하였다. 셋째, 힘제어 및 양방향 텔레오퍼레이션에서 힘반사(force reflecting)가 가능하도록 각 수평/수직 링크에 6 개의 단방향 힘센서를 설치하여 6 자유도 정밀 위치제어용 매니플레이터이면서 6 축 force/torque 센서의 기능을 갖도록 고안 하였다. 본 연구의 병렬 매니플레이터에 대한 기구학적 해석 내용은 다음과 같다. 고안된 6 자유도 병렬 매니플레이터를 기구학적 모델링을 통하여 정 기구학 및 역 기구학 해석을 수행하였으며, 수치해석을 이용하여야만 계산되는 정 기구학 해의 실시간 계산 가능성 확인 및 정 기구학 해의 존재 영역 분석, 정 기구학 해의 비유일성(non-unique solution)에 따르는 해의 갯수 산정 및 비유일해의 기구학적 형상을 검증하였다. 또한 기구학 해석을 바탕으로 고안된 기구계의 작업공간을 해석하였고, 제안된 병렬 매니플레이터의 설계지수로 적용할 수 있는 설계시 유용한 기구 구조 변수를 제시하였다.

2. 기구학 해석을 위한 모델링

그림 1 에 제안된 6 자유도 병렬 매니플레이터의 개략도를 도시하였고, 그림 2 는 제안된 6 자유도 병렬 매니플레이터의 기구학 해석을 위한 모델링 결과를 도시하였다. 그림 2 에서 (X,Y,Z) 좌표계(base frame)는 하부 플랫폼의 질량중심을 원점으로 하는 고정된 좌표계이고, (x,y,z) 좌표계(moving frame)는 상부 플랫폼의 질량중심을 원점으로 하는 이동 좌표계이다. 또한, 상부 플랫폼의 (X,Y,Z) 좌표계에 대한 중심 위치는 (X_C, Y_C, Z_C) 이고, 상부 플랫폼의 (X,Y,Z) 좌표계에 대한 방향은 동차변환 행렬(homogeneous transformation matrix)의 (n,0,0) 벡터로 표시한다. 상부,하부 플랫폼의 형상은 질량중심에서 각 꼭지점 까지의 거리가 r, R 인 정삼각형으로 구성되어 있고, 수직 링크와 수평 링크의 연결은 핀 조인트(pin joint) P_i로 구성되며, 수직 링크와 상부 플랫폼의 연결은 볼 조인트(ball joint) B_i로 구성된다.

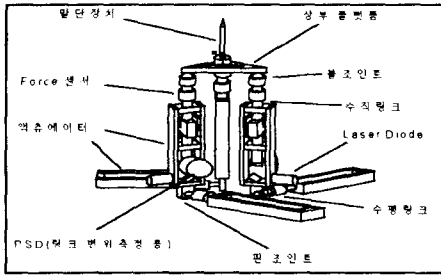


그림 1. 매니플레이터의 구성 개략도
Fig. 1. Schematic of the manipulator

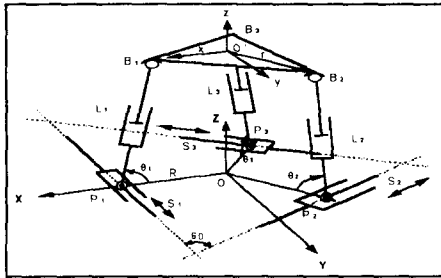


그림 2. 기구학 해석을 위한 모델링
Fig. 2. Modeling for kinematic analysis

3. 역 기구학 해석

역 기구학 해석은 주어진, 카테시안 좌표계에 대한 상부 플랫폼의 중심 위치와 방향인 동차변환 행렬

$$[T] = \begin{bmatrix} n_1 & o_1 & a_1 & X_c \\ n_2 & o_2 & a_2 & Y_c \\ n_3 & o_3 & a_3 & Z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{으로 부터 각 수직 링크의 길이 } L_i \text{ 와}$$

각 수평 링크의 길이 S_i 를 구하는 것으로 그림 2에서 간단한 벡터 연산을 이용하면 역 기구학 해석 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_1 &= Y_{B1} = n_1 r + Y_c \\ S_2 &= -\frac{\sqrt{3}}{2} X_{B1} - \frac{Y_{B1}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{4} n_1 r + \frac{1}{4} n_1 r - \frac{3}{4} o_1 r - \frac{\sqrt{3}}{4} o_1 r - \frac{\sqrt{3}}{2} X_c - \frac{1}{2} Y_c \\ S_3 &= \frac{\sqrt{3}}{2} X_{B1} - \frac{Y_{B1}}{2} = -\frac{\sqrt{3}}{4} n_1 r + \frac{1}{4} n_1 r - \frac{3}{4} o_1 r + \frac{\sqrt{3}}{4} o_1 r + \frac{\sqrt{3}}{2} X_c - \frac{1}{2} Y_c \end{aligned} \quad (1)$$

또한 $\vec{L}_i = [X_{Bi} \ Y_{Bi} \ Z_{Bi}]^T - [X_{Pi} \ Y_{Pi} \ Z_{Pi}]^T$ 관계에서 $\|\vec{L}_i\|^2 = \vec{L}_i \cdot \vec{L}_i$

$$\begin{aligned} L_1^2 &= X_c^2 + Y_c^2 + Z_c^2 + r^2 + R^2 + S_1^2 - 2RX_c - 2SY_c + 2m_1(X_c - R) + 2m_2(Y_c - S_1) + 2m_3 Z_c \\ L_2^2 &= X_c^2 + Y_c^2 + Z_c^2 + r^2 + R^2 + S_2^2 + RX_c - \sqrt{3}RY_c + \sqrt{3}S_2 X_c + S_2 Y_c \\ &\quad + (X_c + \frac{1}{2}R + \frac{\sqrt{3}}{2}S_2)(\sqrt{3}o_1 - n_1)r + (Y_c - \frac{\sqrt{3}}{2}R + \frac{1}{2}S_2)(\sqrt{3}o_2 - n_2)r + (\sqrt{3}o_3 - n_3)r Z_c \\ L_3^2 &= X_c^2 + Y_c^2 + Z_c^2 + r^2 + R^2 + S_3^2 + RX_c + \sqrt{3}RY_c - \sqrt{3}S_3 X_c + S_3 Y_c \\ &\quad - (X_c + \frac{1}{2}R - \frac{\sqrt{3}}{2}S_3)(\sqrt{3}o_1 + n_1)r \cdot (Y_c + \frac{\sqrt{3}}{2}R + \frac{1}{2}S_3)(\sqrt{3}o_2 + n_2)r - (\sqrt{3}o_3 + n_3)r Z_c \end{aligned} \quad (2)$$

위와 같이 병렬 매니플레이터의 역 기구학 해는 직렬 매니플레이터와 달리 간단하며, 유일하게 결정된다.

4. 정 기구학 해석

정 기구학 해석의 목적은 주어진 수직 링크의 길이 L_i 및 수평 링크의 길이 S_i 로 부터 상부 플랫폼의 (X, Y, Z) 좌

표계에 대한 질량 중심위치 (X_c, Y_c, Z_c) 와 방향 $(\vec{n}, \vec{o}, \vec{a})$ 벡터를 계산하는 것으로, 즉, 주어진 링크 길이로 부터 동차 변환행렬 $[T]$ 를 구하는 것이다. 기구학 해석을 위한 모델링 그림 2에서 간단한 벡터 합성 법칙을 적용하면 다음과 같은 식(3)의 벡터 방정식을 유도할 수 있다.

$$\vec{OP}_i + P_i \vec{B}_i + B_i \vec{B}_j = \vec{OP}_j + P_j \vec{B}_j \quad (\text{for } i=1,2,3 \quad j=2,3,1)$$

$$\|\vec{B}_i \vec{B}_j\|^2 = (\sqrt{3}r)^2 = \|\vec{OP}_j + P_j \vec{B}_j - \vec{OP}_i - P_i \vec{B}_i\|^2 \quad (3)$$

이 벡터 방정식을 정리하면, 하부 플랫폼과 각 수직 링크가 이루는 각도인 ϑ_i 와 L_i, S_i 사이의 관계를 규정하는 3개의 비선형 연립방정식이 유도된다.

$$\begin{aligned} f_1 &= L_1^2 + L_2^2 + L_4 L_2 \cos \vartheta_1 \cos \vartheta_2 - 2L_4 L_2 \sin \vartheta_1 \sin \vartheta_2 - L_4 \cos \vartheta_1 (3R + \sqrt{3}S_2) + \\ &\quad L_2 \cos \vartheta_2 (-3R + \sqrt{3}S_1) + 3R^2 - 3r^2 + S_1^2 + S_2^2 + S_1 S_2 + R(-\sqrt{3}S_1 + \sqrt{3}S_2) = 0 \\ f_2 &= L_2^2 + L_3^2 + L_2 L_3 \cos \vartheta_2 \cos \vartheta_3 - 2L_2 L_3 \sin \vartheta_2 \sin \vartheta_3 - L_2 \cos \vartheta_2 (3R + \sqrt{3}S_3) + \\ &\quad L_3 \cos \vartheta_3 (-3R + \sqrt{3}S_2) + 3R^2 - 3r^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_2 S_3 + R(-\sqrt{3}S_2 + \sqrt{3}S_3) = 0 \\ f_3 &= L_1^2 + L_3^2 + L_1 L_3 \cos \vartheta_1 \cos \vartheta_3 - 2L_1 L_3 \sin \vartheta_1 \sin \vartheta_3 - L_1 \cos \vartheta_1 (3R - \sqrt{3}S_3) - \\ &\quad L_3 \cos \vartheta_3 (3R + \sqrt{3}S_1) + 3R^2 - 3r^2 + S_1^2 + S_3^2 + S_1 S_3 + R(\sqrt{3}S_1 - \sqrt{3}S_3) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 상기 (4)식의 3개의 연립방정식은 고도의 비선형 방정식이므로 ϑ_i 를 L_i, S_i 에 대한 closed form으로 직접 풀 수 없고, 수치 해석적 방법을 이용하여야만 ϑ_i 를 구할 수 있다. 상부 플랫폼 상에 설치된 말단 장치의 위치와 방향을 직접 측정 하는 외부의 부가적인 측정장치 없이, 병렬 매니플레이터를 실시간 제어하기 위해서는 내부의 링크 변위 센서로 부터 측정된 L_i, S_i 를 이용하여 상기의 비선형 연립 방정식으로 부터 ϑ_i 를 가능한 빨리 계산하므로써 상부 플랫폼의 위치와 방향을 실시간에 계산하는 것이 중요한 문제가 된다. 본 연구에서는 수치해석 기법중 해에 대한 수렴속도가 매우 빠르다고 알려진 Newton-Raphson Method를 적용하였다. 이제, (4)식에서 수치해석을 통하여 구한 ϑ_i 를 이용하여 정 기구학 해인 (X, Y, Z) 좌표계에 대한 상부 플랫폼의 중심위치 (X_c, Y_c, Z_c) 와 방향 $(\vec{n}, \vec{o}, \vec{a})$ 를 구하면 그 결과는 다음과 같다. (단, $\vec{a} = \vec{n} \times \vec{o}$)

$$\begin{aligned} X_c &= \frac{1}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} S_3 - \frac{\sqrt{3}}{2} S_2 - L_1 \cos \vartheta_1 + \frac{1}{2} L_2 \cos \vartheta_2 + \frac{1}{2} L_3 \cos \vartheta_3 \right) \\ Y_c &= \frac{1}{3} \left(S_1 - \frac{1}{2} S_2 - \frac{1}{2} S_3 + \frac{\sqrt{3}}{2} L_2 \cos \vartheta_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} L_3 \cos \vartheta_3 \right) \\ Z_c &= \frac{1}{3} \left(L_1 \sin \vartheta_1 + L_2 \sin \vartheta_2 + L_3 \sin \vartheta_3 \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \eta_1 & \eta_2 & \eta_3 \\ \eta_2 & \eta_3 & \eta_4 \\ \eta_3 & \eta_4 & \eta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R - L_1 \cos \vartheta_1 - X_c & -\sqrt{3}S_2 + L_2 \cos \vartheta_2 - L_1 \sin \vartheta_1 - 3X_c & \eta_{23} - \eta_{32} \\ r & \sqrt{3} & \eta_{31} - \eta_{13} \\ \frac{S_1 - Y_c}{r} & \frac{\sqrt{3}R + S_1 - S_2 - \sqrt{3}L_2 \cos \vartheta_2 - 3Y_c}{r} & \eta_{23} - \eta_{32} \\ r & \sqrt{3} & \eta_{31} - \eta_{13} \\ \frac{L_1 \sin \vartheta_1 - Z_c}{r} & \frac{L_1 \sin \vartheta_1 + 2L_2 \sin \vartheta_2 - 3Z_c}{\sqrt{3}} & \eta_{23} - \eta_{32} \end{bmatrix} \quad (6)$$

앞식에서 보듯이 정 기구학 해인 상부 플랫폼의 중심위치 및 방향 관계식이 모두 ϑ_i 의 함수인데, (4)식의 비선형 연립방정식의 해인 ϑ_i 가 다중해를 가지므로 정 기구학 해는 유일하게 결정되지 않는다. 일반적으로 직렬 매니플레이터의 정 기구학해는 단일해로 유일하게 결정되나, 병렬 매니플레이터의 정 기구학 해는 일반적으로 유일하지 않은 다중해를 갖는다.

5. 정 기구학 해의 존재성, 다중성 및 실시간 계산성

폐쇄로(closed chain)로 구성된 병렬 기구는 폐쇄로 구조의 특성상 각 링크의 운동을 구속하는 구속조건(constraints)이 존재하므로 수직/수평 링크 변위 L_i, S_i 의 임의의 조합에 따라 항상 정 기구학 해가 존재하는 것은 아니다. 이러한 링크의 운동을 제한하는 구속조건이 앞의 정 기구학 해석에서 유도한 식(4)이다. 이제 f_1, f_2, f_3 의 변화율이 0인 점을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} + \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} &= 0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} + \frac{\partial f_2}{\partial \theta_3} &= 0 \\ \frac{\partial f_3}{\partial \theta_1} + \frac{\partial f_3}{\partial \theta_3} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 상부 플랫폼의 반경 r 과 하부 플랫폼의 반경 R 의 비율을 ρ 라고 정의하고 ($\rho = \frac{r}{R}$), 기구계의 형상을 고려하면 (7)식을 동시에 만족하는 해는 ρ 값에 따라서 다음과 같은 두 경우 밖에 없음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho = \frac{r}{R} \leq 1 \text{ 일 때} & : \theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0 \\ \rho = \frac{r}{R} > 1 \text{ 일 때} & : \theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \pi \end{aligned} \quad (8)$$

그런데 위의 두 경우는 6자유도 병렬 매니플레이터의 정 기구학 해가 유일하게 단일해(unique solution)로 존재하는 기구 형상과 동일함을 알 수 있다. 이것은 상기 조건이 정 기구학 해가 존재하는 임계조건에 해당된다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구의 6자유도 병렬 매니플레이터의 정 기구학 해가 존재할 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho = \frac{r}{R} \leq 1 \text{ 일 때} & \quad f_i(0,0) \leq 0 \\ \rho = \frac{r}{R} > 1 \text{ 일 때} & \quad f_i(\pi,\pi) \leq 0 \quad \text{for } i=1,2,3 \end{aligned} \quad (9)$$

정 기구학 해가 존재할 조건에서 특별한 경우로 $L=L_1=L_2=L_3$, $S=S_1=S_2=S_3$ 인 경우, 즉 세개의 수직 링크의 길이가 동일하고, 세개의 수평 링크의 길이가 동일한 경우를 고려하자. 이 경우 식(9)의 연립 부등식을 만족하는 해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho = \frac{r}{R} \leq 1 \text{ 일 때} & : L \geq R - \sqrt{r^2 - S^2} \quad (\text{단, } -r \leq S \leq r) \\ \rho = \frac{r}{R} > 1 \text{ 일 때} & : L \geq -R + \sqrt{r^2 - S^2} \quad (\text{단, } -r \leq S \leq r) \end{aligned} \quad (10)$$

따라서 $L=L_1=L_2=L_3$, $S=S_1=S_2=S_3$ 인 경우 정 기구학 해가 존재할 조건을 그래프로 나타내면 그림 3. 과 같다.

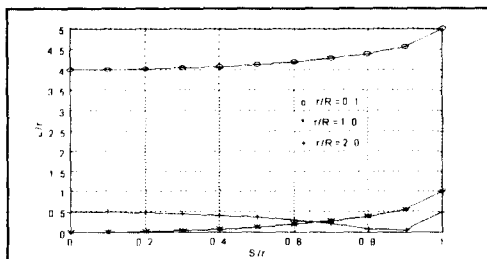


그림 3. 정 기구학 해의 존재영역

Fig.3. Existence range of the forward kinematic solution

일반적으로 병렬 매니플레이터의 정 기구학 해는 직렬 매니플레이터와는 달리 유일하지 않으며, 다중해(multiple solution)를 갖는다. 본 연구의 매니플레이터 경우 수치 해석 시 초기치를 변경하여 해를 구해본 결과 ρ 비에 무관하게 8개의 정 기구학 해가 존재함을 확인하였다.

$R = 50$ (mm), $r = 50$ (mm), $L_1 = L_2 = L_3 = 100$ (mm), $S_1 = S_2 = S_3 = 0$ (mm)인 경우를 식(4)에 대입하고, $-180^\circ \leq \theta_i \leq 180^\circ$ (for $i=1,2,3$)에 대하여 f_1, f_2, f_3 를 구한 결과를 그림 4의 (a),(b),(c)에 나타내었다. 그림 4에서 $f_1(\theta_1, \theta_2) = 0$, $f_2(\theta_2, \theta_3) = 0$, $f_3(\theta_1, \theta_3) = 0$ 를 만족하는 (θ_1, θ_2) , (θ_2, θ_3) , (θ_1, θ_3) 의 값은 각각 일정한 띠(band)를 형성하고 있음을 알 수 있고, 따라서 (4)식을 동시에 만족하는 해는 여러개 존재함을 알 수 있으며, 수치 해석적 방법을 통하여 다음 그림 5와 같이 8개의 형상으로 정 기구학 해가 분포하고 있음을 확인하였다.

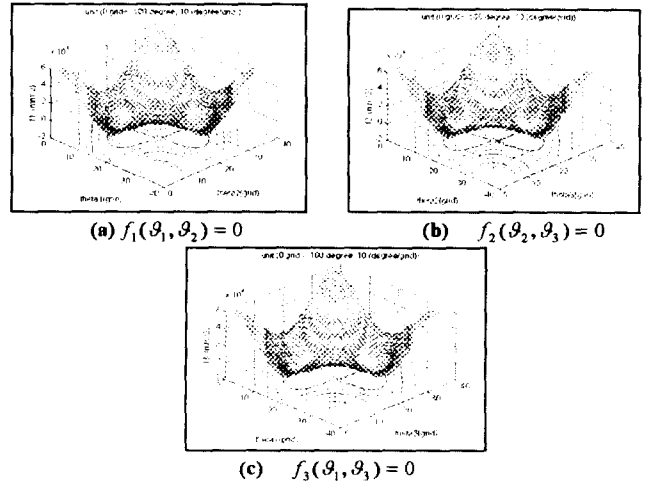
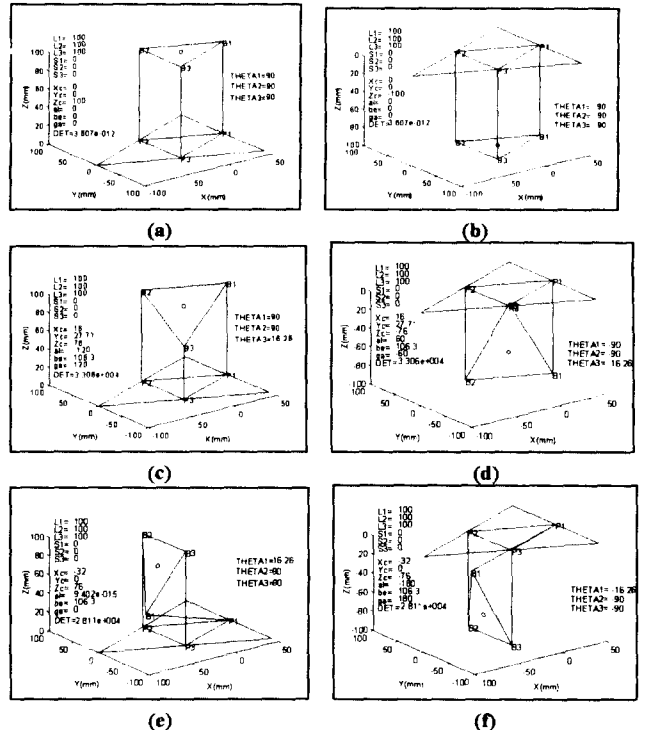


그림 4. 정 기구학 해의 다중성 분석도

Fig.4. Analysis graphs of the forward kinematic multiple solution



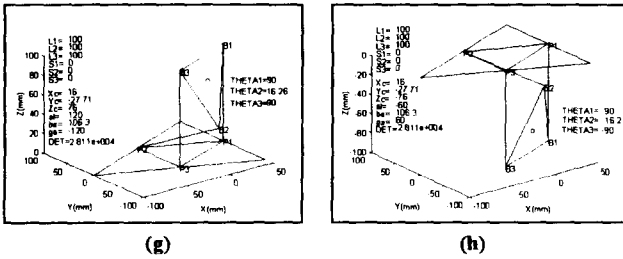


그림 5. 8 개의 정 기구학 해의 형상
Fig.5. 8 configurations of the forward kinematic solution

위치센서로 부터 측정된 수평/수직 링크의 변위로부터 정 기구학 해인 상부 플랫폼의 중심위치와 방향을 실시간에 계산하는 것은 매니플레이터를 실시간 제어 하기 위해서는 반드시 필요하다. 병렬 매니플레이터 경우 정 기구학 해를 closed form 으로 구할 수 없으므로 수치해석을 통하여 계산하게 된다. 따라서 수치해석에 걸리는 계산시간이 정 기구학 해를 실시간에 구할 수 있는 관건이 된다. 본 연구의 병렬 매니플레이터 경우 수치해석으로 풀어야 할 비선형 연립 방정식(4)가 일반적인 Stewart Platform 의 경우에 비하여 간단하고, 수치해석 방법중 해에 대한 수렴속도가 빠른 Newton-Raphson 방법을 적용하므로써 정기구학 해를 실시간에 구할 수 있음을 확인하였다. (486-DX2 기준 MATLAB 상에서 CPU time 5msec 이하)

6. 작업공간 해석

일반적으로 Stewart Platform 형태의 병렬 매니플레이터의 작업 공간은 높이에 따른 작업 공간의 단면 크기 변화가 심한 우산형이다. 이것은 매니플레이터를 범용적으로 사용하는데 커다란 제약조건이 된다. 본 연구의 6자유도 병렬 매니플레이터는 높이에 따른 작업공간의 단면 변화가 없도록 연구된 3-PRPS(P:Prismatic, R:revolute, S:Speherical) 조인트 형태로 설계되었고, 작업 공간의 형상은 그림 6 과 같이 $\rho=r/R$ 비에 무관하게 항상 정육각 기둥의 형태를 가진다. 여기서 아래 그림 6 의 결과는 하부 플랫폼의 반경을 $R=50(mm)$, 수직 링크의 길이를 $0 \leq L_4 \leq 1.2R$, 수평 링크의 길이를 $-0.1R \leq S_1 \leq 0.1R$ 로 취한 경우이다. 또한 링크의 동일 구동 스트로크(stroke)에 대하여 $\rho=r/R$ 비에 따른 작업공간의 부피 변화 관계를 그림 7 에 나타내었다. 결론적으로 본 연구의 병렬 매니플레이터의 경우 전체 작업 공간을 크게 확보할 필요가 있는 작업에 대하여는 가능한 ρ 가 작게 되도록 상부와 하부의 플랫폼 반경을 설정하여야 한다.

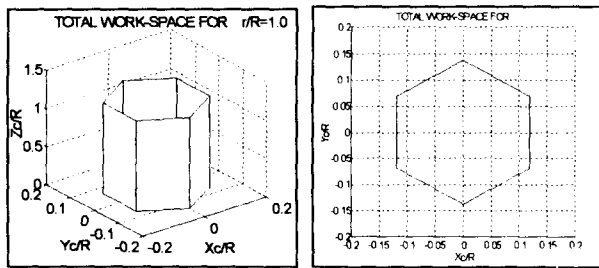


그림 6. $\rho=r/R=1$ 경우의 매니플레이터의 작업공간
Fig.6. Workspace of the manipulator in case of $\rho=r/R=1$

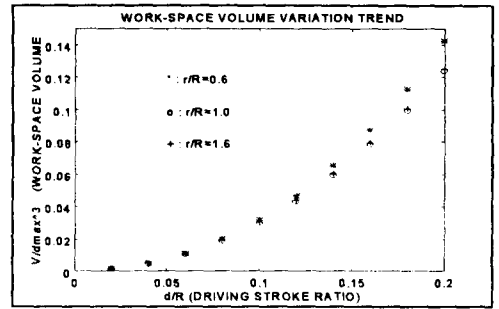


그림 7. ρ 에 대한 작업 공간의 부피 변화
Fig.7. Workspace volume variation trend w.r.t. ρ

7. 결론

본 연구에서는 정밀 위치제어가 가능한 6자유도 병렬 매니플레이터를 제안하고, 기구학 해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 역 기구학 해는 유일하게 결정되나, 정 기구학 해는 수치해석 방법으로 구해야하며, 유일하게 결정되지 않고 하부 플랫폼 기준 상부평면에 4개 하부평면에 4개가 존재한다. 따라서 원하는 정 기구학해를 선정하기 위한 수치해석의 초기치 선정이 중요하다. 더불어 수치 해석(Newton Raphson Method)을 통한 정 기구학 해는 실시간 계산이 가능하다. 둘째, 정 기구학 해가 존재하는 각 링크 변위 사이의 상호 관계를 규명하였다. 이 관계식은 상/하 플랫폼 반경 크기의 비율 ρ 가 결정되었을 때 각 링크의 길이를 정하는 설계기준으로 사용 할 수 있다. 셋째, 본 연구의 6자유도 병렬 매니플레이터는 높이에 따른 단면 변화가 없는 정육각 기둥의 형태의 작업공간을 가지며, 작업공간의 크기에 큰 영향을 주는 설계인자는 ρ 이다. 따라서 매니플레이터 설계시 수행작업의 작업공간 특성에 따라서 ρ 를 결정하여야 한다.

8. 참고문헌

- 1] D.Stewart, "A Platform with Six Degree of Freedom", Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 180, PP. 1, No. 15, pp. 371-386, 1965/1966
- 2] K.Cleary and T.Brooks, "Kinematic Analysis of a Novel 6-DOF Parallel Manipulator", Proc. IEEE Inst. Conf. Robotics and Automation, pp. 708-713, 1993
- 3] E.F.Fischer, "A Stewart Platform-Based Manipulator : General Theory and Pratical Construction", The International Journal of Robotics Research, Vol. 5, No. 2, 1986
- 4] Pkabhjot Nanua, Kenneth J. Waldron and Vasudeva Murthy, "Direct Kinematics Solution of a Stewart Platform", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 6, pp. 438-444, 1990
- 5] Carlo Innocenti and Vincenzo Parenti-Castelli, "Direct Position Analysis of the Stewart Platform Mechanism", Mech. Mach. Theory, Vol. 4.4, No. 5, pp. 561-565, 1988
- 6] Fariborz Behi, "Kinematic Analysis for a 6-Degree-of-Freedom 3-PRPS Parallel Mechanism", IEEE J. Robotics and Automation, Vol. 4.4, No. 5, pp. 561-565, 1988