

미세구동을 위한 3자유도 병렬식 매니플레이터 개발에 관한 연구 Development of Three D.O.F. Parallel Manipulator for Micro-motion

이 계 영(한양대 대학원 정밀기계공학과), 한 창 수(한양대 기계공학과)
K.Y. Lee(Graduate School, Hanyang Univ.), C.S. Han(Hanyang Univ.)

ABSTRACT

In this paper, we have treated the modeling and development of three degree of freedom parallel manipulator for micro-motion based on the Stewart platform type parallel structure. The kinematic modeling was derived from the relation between base coordinate and platform coordinate and the dynamic modeling was from the method of Kinematic Influence Coefficients(KIC) and transferring of the generalized coordinates. Using this method, we presented the method to choose the actuator and joint by investigating the actuating forces needed when the manipulator moves along the given trajectory. In the end, the prototype manipulator was developed and evaluated

Key Words : Stewart platform(스튜어트 플랫폼), micro-motion(미세 구동), actuating forces(작동력), Kinematic Influence Coefficients(KIC, 운동학적영향계수), generalized coordinates(일반좌표)

1 서 론

오늘날 산업 분야에서 링크와 조인트를 직렬 형태로 연결시킨 직렬식 매니플레이터의 형태가 많이 사용되고 있다. 그러나, 직렬식 매니플레이터는 큰 작업공간과 여러 가지 기구적 장점에도 불구하고, 내부하능력과 정밀도에 관해서 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하고자 병렬식 혹은 혼합식 매니플레이터가 등장 하였다. 병렬식 매니플레이터의 대표적인 예로 스튜어트 플랫폼을 들 수 있다. 처음으로 스튜어트 플랫폼이 비행기 시뮬레이터로 고안 되었다[1]. 후에 몇 가지 가능한 대안식 병렬 기구들이 검토 되었고[2], 스튜어트 플랫폼 기구의 매니플레이터로서의 이용 가능성에 대한 기구학적 이론과 실제적인 설계에 관한 연구가 논의 되었다[3][4].

본 연구에서는 정밀 위치 기구로서 두개의 축 방향 회전, 한 개의 직선 자유도를 갖는 3자유도 병렬식 미세 구동 매니플레이터를 제시하고, 기구해석 및 운동학적 영향 계수법[5] 을 이용하여 동역학 해석을 하였다. 그리고, 마지막으로 제안한 모델을 구현하고 검증하였다.

제시된 3자유도 병렬식 미세 구동 매니플레이터의 특징은 첫째, 매니플레이터의 동역학적 특성을 고려하여 관성의 영향을 줄이기 위해 가벼운 링크와 조인트 그리고 로봇 하중의 큰 비중을 차지하는 액추

에이터를 베이스에 가까이 구성하였다. 둘째, 각 액추에이터로 정밀 위치제어에 적합한 AC 서보 모터를 채용한 리니어 모터를 사용하였다. 각 조인트 및 액추에이터의 누적 오차를 고려하여 매니플레이터 플랫폼에 상대 좌표를 설정하고 접촉식 3차원 측정기를 이용하여 플랫폼의 자세와 위치를 측정하였다.

2 기구학적 모델

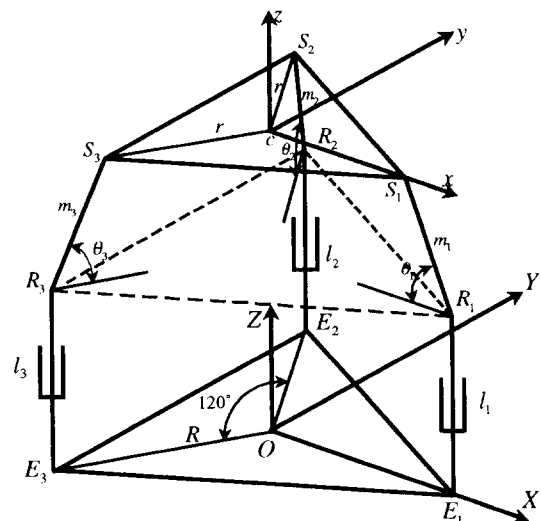


Fig. 1 Geometric configuration

3 자유도 매니플레이터의 기하학적 구성은 다음과 같이 베이스 프레임, 플랫폼 프레임, 선형 액추에이터, 조인트로 구성 되어 있다. XYZ 프레임은 베이스 좌표계를 xyz 프레임은 플랫폼 좌표계를 나타낸다. 매니플레이터의 각 다리(Leg, l_i)는 액추에이터로 구성된다.

플랫폼 프레임과 베이스의 각 다리 사이를 이어주는 조인트로는 플랫폼에 3 개의 회전 자유도(Degree of Freedom)를 가진 구조인트(Spherical Joint, S_i)와 선형 액추에이터에 1 개의 자유도를 갖는 회전조인트(Revolute Joint, R_i)로 이루어져 있다. 그리고, 구조인트의 120° 간격으로 배치되어 있다.

베이스 프레임 XYZ 좌표계에서의 선형 액추에이터의 좌표는 다음과 같다.

플랫폼 xyz 좌표계에서의 구조인트의 좌표는 다음과 같다.

$$s_1 = \begin{bmatrix} r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, s_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}r \\ \frac{\sqrt{3}}{2}r \\ 0 \end{bmatrix}, s_3 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}r \\ -\frac{\sqrt{3}}{2}r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

베이스 프레임에 대해서 구조인트의 좌표와 플랫폼 프레임에 대한 구조인트의 좌표 사이의 관계를 변환 행렬로 표시해 보면,

$$\begin{bmatrix} S_i \\ 1 \end{bmatrix}_{xyz} = [T] \begin{bmatrix} s_i \\ 1 \end{bmatrix}_{XYZ} \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$\text{where, } [T] = \begin{bmatrix} n_1 & o_1 & a_1 & x_c \\ n_2 & o_2 & a_2 & y_c \\ n_3 & o_3 & a_3 & z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.1 역기구학 해석

플랫폼 프레임이 궤적을 따라 움직일 때 각 다리의 변위를 구하기 위한 역기구학 식을 얻어 내는 방법은 다음과 같다. Fig. 1로부터 기하학적 관계를 살펴 보면,

$$m_i^2 = (\bar{s}_i - \bar{E}_i - \bar{l}_i)^2 \quad (3)$$

$$\text{where, } \bar{l}_i = l_i \bar{k} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_i \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, 3$$

위 식으로부터 각 다리 l_i 에 관해서 전개한다.

회전조인트 R_i 는 평면 $R_i S_i O$ 상에서 움직이게 된다. 즉, 평면 $R_i S_i O$ 는 각각 $y=0$, $y=-\sqrt{3}x$, $y=\sqrt{3}x$ 를 나타내고, 식(2)로부터,

$$n_2 r + x_c = 0 \quad (4)$$

$$n_2 = o_1 \quad (5)$$

$$x_c = \frac{r}{2}(n_1 - o_2) \quad (6)$$

변환 행렬 $[T]$ 는 정규직교(Othonormal)성과 회전 조인트에 대한 방향 구속식(5)이 존재 하므로 2 개의 독립적인 방향 코사인만이 존재한다.

2.2 정기구학 해석

기하학적으로 베이스 프레임 XYZ 에 대한 구조인트(Spherical Joint)의 좌표는 Fig. 1로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_{s_i} &= R - m_i \cos \theta_i \\ y_{s_i} &= 0 \\ z_{s_i} &= l_i + m_i \sin \theta_i \\ x_{s_2} &= -\frac{1}{2}(R - m_2 \cos \theta_2) \\ y_{s_2} &= \frac{\sqrt{3}}{2}(R - m_2 \cos \theta_2) \\ z_{s_2} &= l_2 + m_2 \sin \theta_2 \\ x_{s_3} &= -\frac{1}{2}(R - m_3 \cos \theta_3) \\ y_{s_3} &= -\frac{\sqrt{3}}{2}(R - m_3 \cos \theta_3) \\ z_{s_3} &= l_3 + m_3 \sin \theta_3 \end{aligned} \quad (7)$$

플랫폼의 구조인트들 간의 거리가 $\sqrt{3}r$ 이므로 θ_i 와 l_i 의 관계식을 얻을 수 있다. l_i 가 입력으로 주어지면, θ_i 에 대한 비선형 연립 방정식이 된다. 수치해법 중 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson Method)을 이용하면, 플랫폼의 위치를 구할 수 있다. 플랫폼의 방향은 변환 행렬로 표현된 플랫폼의 위치에 대한 식과 θ_i 로 표현된 플랫폼의 위치에 관한 식으로부터 얻을 수 있다.

3 동역학적 모델

동역학적 모델링에 사용될 좌표계는 베이스의 원점에 위치한 베이스 프레임($X^*Y^*Z^*$), 플랫폼 원점에 위치한 플랫폼 프레임 xyz, 그리고 X 가 베이스의 원점을 가리키도록 각각의 다리 좌표계(X_i, Y_i, Z_i)가 존재한다. 다리 좌표계는 다음과 같고 베이스에 대칭적으로 존재한다.

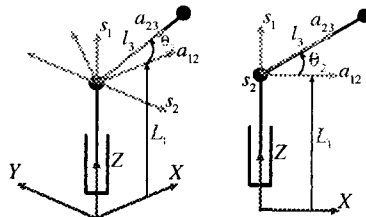


Fig. 2 Link Parameters

KIC를 이용한 연쇄식 매니플레이터의 모델링[5]에 따라, r 번째 다리에 대한 구조인트의 가속도와 동역학식을 유도하면 다음과 같다.

$${}^r\ddot{P} = [{}^rG_u^p] \ddot{\phi}_+ + \dot{\phi}_+^T [{}^rH_{uu}^p] \dot{\phi}_+ \quad (10)$$

$${}^rT_u = [{}^rI_{uu}^*] \ddot{\phi}_+ + \dot{\phi}_+^T [{}^rP_{uu}^*] \dot{\phi}_+$$

다음은 플랫폼 좌표계에 대한 구조인트의 가속도 관계식이다.

$${}^r\ddot{P} = [{}^rG_u^p] \ddot{u} + \dot{u}^T [{}^rH_{uu}^p] \dot{u} \quad (11)$$

$$[{}^rG_u^o] = [{}^rG_u^p] [{}^rG_u^p]^{-1} \quad (12)$$

$$[{}^rH_{uu}^o] = ([{}^rG_u^p]^{-1})^T \cdot [{}^rH_{uu}^p] - [{}^rG_u^p]^{-1} ([{}^rG_u^p]^{-1})^T \cdot [{}^rH_{uu}^p] [{}^rG_u^p]^{-1}$$

$$[{}^rI_{uu}^*] = [{}^rG_u^p]^{-1} [{}^rI_{uu}^*] [{}^rG_u^p]$$

$$[{}^rP_{uu}^*] = ([{}^rG_u^p]^{-1})^T \cdot [{}^rP_{uu}^*] + [{}^rG_u^p]^{-1} ([{}^rG_u^p]^{-1})^T \cdot [{}^rP_{uu}^*] [{}^rG_u^p]$$

식(10,11)과 일반좌표변환법 식(12)를 이용해서 플랫폼 좌표에 의한 모델을 구하고, 플랫폼의 관성에 의한 동역학적 모델을 조합함으로써 다음과 같은 전체 매니플레이터의 플랫폼에 대한 동역학적 모델을 구할 수 있다.

$$T_u = [{}^rI_{uu}^*] \ddot{u} + \dot{u}^T [{}^rP_{uu}^*] \dot{u} \quad (13)$$

$$\text{where, } [{}^rI_{uu}^*] = [{}^rI_{uu}^*] + \sum_{r=1}^2 [{}^rI_{uu}^*]$$

$$[{}^rP_{uu}^*] = [{}^rP_{uu}^*] + \sum_{r=1}^2 [{}^rP_{uu}^*]$$

액추에이터 좌표와 플랫폼 좌표를 연결시키는 1,2 차 KIC 식(14)와 일반좌표변환을 수행하면, 액추에이터 좌표에 대한 전체 매니플레이터의 동역학 모델을 구할 수 있다.

$$[G_u^d] = \begin{bmatrix} {}^1G_u^o \\ {}^2G_u^o \\ {}^3G_u^o \end{bmatrix}, \quad [H_{uu}^d] = \begin{bmatrix} {}^1H_{uu}^o \\ {}^2H_{uu}^o \\ {}^3H_{uu}^o \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$T_d = [I_{dd}^*] \ddot{d} + \dot{d}^T [P_{dd}^*] \dot{d} \quad (15)$$

$$\text{where, } [I_{dd}^*] = [G_u^d]^{-1} [I_{uu}^*] [G_u^d]$$

$$[P_{dd}^*] = [G_u^d]^{-1} ([G_u^d]^{-1})^T \cdot [P_{uu}^*] - [I_{dd}^*]^{-1} \cdot [H_{uu}^d] [G_u^d]^{-1}$$

4 시뮬레이션

2 장과 3 장에서 구해진 기구학적, 동역학적 모델을 바탕으로 특정 궤적(trajjectory)과 운동 사양에 따라 매니플레이터가 움직일 때 액추에이터에 필요한 작동력을 구해 보았다. 매니플레이터의 플랫폼이 중심축 z 축을 따라 10mm 이동하면서, 동시에 x 축에 대해서 10도 만큼 회전한다. 운동사양은 캠의 변위 곡선에 쓰이는 조화(harmonic) 곡선과 4-5-6-7 차 다항

식을 이용하였다. Fig. 4에 각 액추에이터에 대하여 작동력의 속도 및 가속도 항과 작동력을 비교하여 표시하였다. 속도와 가속도에 해당하는 인자는 $[P_{dd}^*]$, $[I_{dd}^*]$. 속도와 가속도항을 살펴보면, 가속도 그래프와 작동력 그래프에 인접함을 볼 수 있다. 즉, 가속도 항인 관성($[I_{dd}^*]$)인자가 작동력에 미치는 영향이 크음을 알 수 있다. 이로써, 시뮬레이션의 타당성 및 액추에이터의 설정의 방향을 제시하였다.

5 실험 및 고찰

5.1 시스템 구성

구동부는 액추에이터를 구동하는 AC 모터 드라이버와 드라이버에 부착된 제어기에 신호를 주기위한 퍼스널 컴퓨터에 설치된 디지털 I/O 보드로 구성되어 있다. 퍼스널 컴퓨터가 매니플레이터가 원하는 자세에 필요한 각 액추에이터에 필요한 구동 펄스를 계산하여 I/O 보드를 통해서 드라이버에 장착된 제어기에 신호를 준다. 측정부는 접촉식 3 차원 측정기를 이용하여 매니플레이터의 플랫폼 자세를 측정하게 된다.

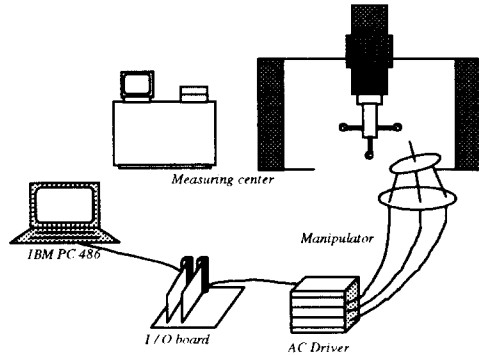


Fig. 3 System schematic

매니플레이터 성능을 검증하기 위해 각 자유도(x, y 회전, z 병진)에 대해 Fig. 5은 실험 값과 시뮬레이션 값을 비교한 것이다. 시스템은 Fig. 3과 같고, 매니플레이터를 각 자유도에 대해서 다음과 같이 움직였을 때 플랫폼의 자세를 접촉식 3 차원 측정기를 이용하여 측정하였다.

Table 1 Measuring range

자유도	측정 범위	측정 단위
x축 회전	0 ~ 0.2 deg.	0.01 deg.
y축 회전	0 ~ 0.2 deg.	0.01 deg.
z축 병진	0 ~ 0.02 mm	0.001 mm

5.2 고찰

결과로부터, 회전에 대한 정밀도를 0.01 도, 병진에 대한 정밀도 0.001 mm 를 얻을 수 있었다. 측정기 오차 범위(회전 0.003 도, 병진 0.0003 mm)를 고려하고 실험오차를 고려할 때 타당한 결과값으로 볼 수 있다. 실험에서 사용한 측정장비는 Zeiss 사의 MC850 Measuring center 를 이용하였다.

6 결론

기존의 연쇄식 매니플레이터의 단점들을 해결할 수 있는 병렬식 매니플레이터의 장점을 보여 주었다. 연쇄식 매니플레이터의 장점인 넓은 작업공간과 병렬식 매니플레이터의 큰 유효하중(payload), 고정밀도를 이용한 기계 요소들이 산업 현장에서 큰 역할을 할 것이라고 생각한다.

SCARA 타입의 매니플레이터와 같이 연쇄식이며 동시에 평면운동을 하는 기구에 병렬식 매니플레이터를 장착함으로써 평면 자유도를 보강할 수 있는 회전 자유도와 고정밀의 움직임을 구현하였다. 또한, 계측 시스템을 이용하여 타당성을 검증하였다.

향후 연구 과제로 다자유도 병렬식 및 하이브리드 매니플레이터의 정밀 피드백 제어가 수행 과제로 남아 있다. 또한 병렬식 매니플레이터의 자세 계측에 있어서도 많은 방법들이 제시 되어 할 것이다.

참고 문헌

- [1] D. Stewart, "A platform with six degrees of freedom", Proc. Institution of Mechanical Engineers, vol. 180, part 1, no. 15, pp. 371-386, 1965/1966
- [2] K. H. Hunt, "Structural kinematics of in-parallel-actuated robot arms", Trans. ASME, Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, vol. 105, pp. 705-712, 1983
- [3] D. C. H. Yang and T. W. Lee, "Feasibility study of a platform type of robotic manipulators from a kinematic viewpoint", Trans. ASME, Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, vol. 106, pp. 191-198, June 1984
- [4] E. F. Fichter, "A Stewart platform-based manipulator: General theory and practical construction", International Journal of Robotics Research, vol. 5, no. 2, pp. 157-182, Summer 1986
- [5] R. A. Freeman and D. Tesar, "Dynamic Modeling of Serial and Parallel Mechanisms / Robotic systems: Part I-Methodology", Mechanical engineering department, The University of Texas at Austin, February, 1988

- [6] K. M. Lee and D. K. Shah, "Kinematic Analysis of a Three Degrees of Freedom In-Parallel Actuated Manipulator", Proceedings of IEEE Int'l conf. Of Robotics and Automation, pp. 345-350, 1987

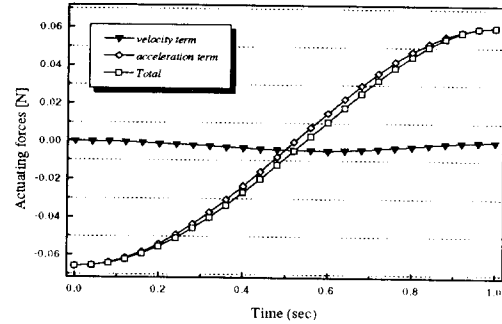


Fig. 4 Each terms of force (harmonic, actuator#1)

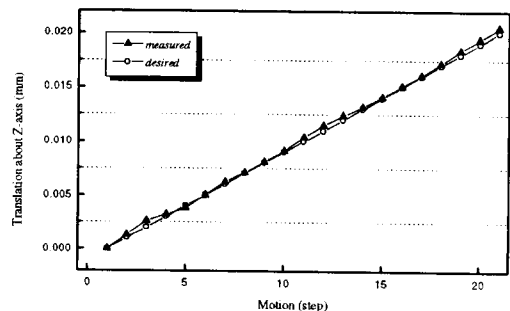
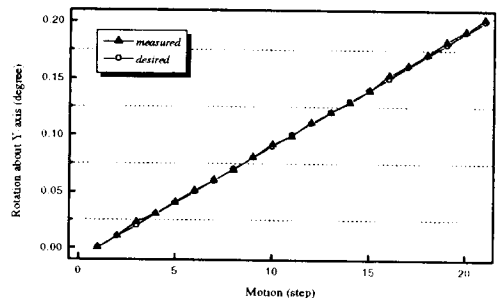
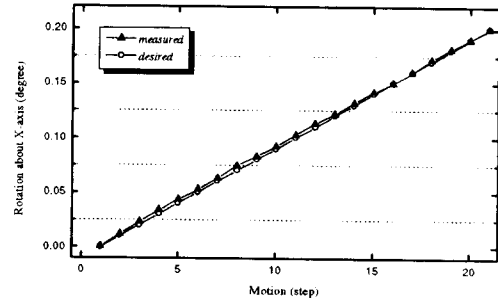


Fig. 5 Experimental result vs. Simulation