

## 혼합형 5 자유도 마이크로 매니플레이터의 개발

정구봉\* , 이병주\*\* , 오세민\*

\*한양대학교 일반대학원 전자전기제어계측공학과, \*\*한양대학교 전자컴퓨터공학부

### 초록

본 논문에서는 새로운 형태의 혼합형 5자유도 마이크로 매니플레이터를 제안하고 개발하고자 한다. 제안된 기구는 평면형 2자유도 XY-stage와 공간형 3자유도 병렬 기구로 구성된다. 3자유도 병렬기구는 3개의 직렬체인으로 이루어져 있으며, 공간상에서 두 방향의 회전 움직임과 Z축 방향으로의 병진운동을 생성한다. 모의실험을 통하여 개발된 기구의 작업공간과 출력단에서의 정밀도 해석을 수행한다. 개발된 기구는 조작 대상 물체의 미세 위치제어를 필요로 하는 반도체 및 기계, 생물, 의료분야 등에 적용 될 수 있다.

### 1. 서론

마이크로 매니플레이터는 조작 대상 물체의 미세 위치 제어를 목적으로 한다. 미세 위치 제어 기술은 반도체 및 생물, 의료분야 등에서 매우 필요로 하고 있는 기술이며, 그 수요 또한 증가하고 있는 추세이다. 현재까지의 마이크로 매니플레이터에 대한 연구들은 단순한 물체의 파지나 위치만을 위한 기구의 개발에 중점을 두고 있다. 그러나, 마이크로 매니플레이터가 미소입자의 분리 또는 미세 가공품의 조립을 통한 미세 제품의 생산 등, 구조화 및 단순화하기 어려운 작업에 적용하기 위해서는 말단부의 자유도가 확보되어야 한다[1-2]. 따라서 본 연구에서는 마이크로미터 단위의 정밀도를 가지며, 말단부에서 5 자유도를 가지는 마이크로 매니플레이터를 개발하고 이에 대한 기구해석을 수행한다.

### 2. 기구학

제안된 매니플레이터의 구조는 그림 1 에 보여지듯이 상위 모듈과 하위 모듈로 이루어진다. 하위 모듈은 기준좌표계의 X 축과 Y 축 방향으로 각각 배치된 2 개의 미끄럼 관절로 이루어지며, 각 미끄럼 관절은 직렬로 연결된다. 상위 모듈은 상판과 하판 그리고 상판과 하판을 연결하는 3 개의 직렬체인으로 이루어지며, 각 직렬체인은 미끄럼 관절과 회전 관절, 구형 관절이 순서대로 연결된 구조를 지닌다. 모든 미끄럼 관절은 구동기를 부착한 능동 관절이며 다른 관절들은 구동기가 부착되지 않은 수동 관절이다. 제안된 기구의 출력 벡터  $\underline{u}$  는 상판 중심에 부착된 상판 좌표계 원점의 기준 좌표계에 대한 위치  $x, y, z$  와 XYZ 오일러 각  $\alpha$  와  $\beta, \gamma$  로 이루어진다. 이 경우 시스템의 모빌리티(mobility)는 5 이므로 독립 출력벡터  $\underline{u}_{ind}$  는 출력 벡터에서 각 축 방향의 변위  $x, y, z$  와 상판의 X 와 Y 축에 대한 회전을 나타내는  $\alpha$  와  $\beta$  로 선택하고 출력 벡터의 나머지 요소는 종속 출력 벡터의 요소로 정한다. 이상을 식 (1)에 나타내었다.

$$\underline{u} = [x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T, \quad \underline{u}_{ind} = [x \ y \ z \ \alpha \ \beta]^T. \quad (1)$$

기구의 입력벡터는 기준 좌표계의 원점에서부터 상판 중심까지의 경로에 따라 다음과 같이 표현할 수 있다.

$${}^i\phi = [d_1, d_2, {}^i d_3, {}^i\theta_4, {}^i\theta_5, {}^i\theta_6, {}^i\theta_7]^T \square [{}^i\phi_1, {}^i\phi_2, {}^i\phi_3, {}^i\phi_4, {}^i\phi_5, {}^i\phi_6, {}^i\phi_7]^T, \quad (2)$$

여기서  ${}^i\phi_j$ 는  $i$  번째 체인의  $j$  번째 관절변수를 의미한다.

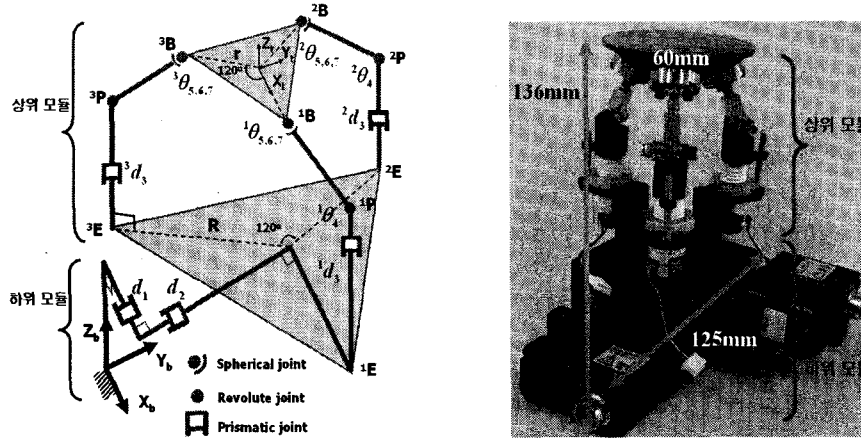


그림 1. 개발된 5 자유도 마이크로 매니플레이터 및 구조

## 2.1 역기구학

본 절에서는 제안된 메커니즘의 역기구학 해석을 수행한다. 역기구학은 주어진 독립 출력 벡터  $\underline{u}_{ind}$ 로부터 각 체인의 입력 벡터  ${}^i\phi$ 를 구하는 것이다. 독립 출력 벡터 요소 중  $z$ 와 상판의  $X$ 와  $Y$ 축에 대한 회전을 나타내는  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 상위 모듈에 의해서만 생성될 수 있다. 따라서, 기준 좌표계의 원점을 상위 모듈의 하판 중심에 위치시키면, 상위 모듈의 역 기구학으로부터 상위 모듈의 전체 관절 변수들을 구할 수 있다[2,3]. 상위 모듈의 관절 변수 중  $i$  번째 체인의 구동 관절 변수  ${}^i d_3$ 는 식 (3)과 같이 구할 수 있다. 상세한 내용은 참고 문헌 [2]와 [3]을 참고하시오.

$${}^i d_3 = {}^i B_z - \sqrt{{}^i B^T P^2 - ({}^i B_x - {}^i P_x)^2 - ({}^i B_y - {}^i P_y)^2}, \quad (3)$$

여기서,  ${}^i B_x$ 와  ${}^i B_y$ ,  ${}^i B_z$ ,  ${}^i P_x$ ,  ${}^i P_y$ 는 각각  $i$  번째 체인의 B점과 P점의  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  위치를 나타내는 요소들이다. 상위 모듈은 3자유도 기구이므로 상판 중심점에서의 독립 출력 요소  $z$ 와  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 생성하기 위한 관절들의 움직임에 의하여 부가적인 출력이 발생한다. 이때 발생하는 종속 출력 중  $X$ 축 방향의 움직임을  $x_c$ ,  $Y$ 축 방향의 움직임을  $y_c$ 라 하면, 하위 모듈의 관절 변수  $d_1$ 과  $d_2$ 는 식 (4)와 같이 구해진다.

$$d_1 = x - x_c, \quad d_2 = y - y_c. \quad (4)$$

## 2.2 일차기구학

각 체인의 말단에서의 속도는 각 체인의 관절들의 속도에 의해서 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\underline{u}} = [{}^i G_{\phi}^u] {}^i \dot{\phi}, \quad (5)$$

여기서,  $[{}^i G_{\phi}^u]$ 는  $i$  번째 체인에서의 입력과 출력 사이의 자코비안이다. 각 체인은 상판 중심점에서 서로 만나며 동일한 속도를 지니므로, 식 (5)로부터 다음 두 개의 구속식이 존재하게 된다.

$$[{}_1G_p^n]^1 \dot{\phi} = [{}_2G_p^n]^2 \dot{\phi}, \quad [{}_2G_p^n]^2 \dot{\phi} = [{}_3G_p^n]^3 \dot{\phi}. \quad (6)$$

이 두 개의 구속식으로부터 수동(종속)관절의 속도벡터  $\dot{\phi}_p$  과 능동(독립)관절의 속도벡터  $\dot{\phi}_a$  사이의 관계는 다음과 같이 표현 할 수 있다[3,4].

$$\dot{\phi}_p = [G_a^p] \dot{\phi}_a. \quad (7)$$

식 (7)에서 능동 관절벡터  $\dot{\phi}_a$  와 수동 관절벡터  $\dot{\phi}_p$  는 아래와 같이 정의한다.

$$\phi_a = [d_1 \ d_2 \ {}^1d_3 \ {}^2d_3 \ {}^3d_3]^T, \quad (8)$$

$$\phi_p = [{}^1\phi_4 \ {}^1\phi_5 \ {}^1\phi_6 \ {}^1\phi_7 \ {}^2\phi_4 \ {}^2\phi_5 \ {}^2\phi_6 \ {}^2\phi_7 \ {}^3\phi_4 \ {}^3\phi_5 \ {}^3\phi_6 \ {}^3\phi_7]^T. \quad (9)$$

첫 번째 체인의 관절 속도벡터는 식 (7)에 의해서 독립 관절변수들로 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\phi}_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ [G_a^p]_1 \\ [G_a^p]_2 \\ [G_a^p]_3 \\ [G_a^p]_4 \end{bmatrix} \dot{\phi}_a = [{}_1G_a^p] \dot{\phi}_a, \quad (10)$$

여기서  $[G_a^p]_j$  는  $[G_a^p]$  의 j번째 행을 의미한다.

식 (10)을 식 (5)에 대입하면, 독립 관절 속도벡터로부터 출력 속도벡터를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{u} = [{}_1G_p^n] [{}_1G_a^p] \dot{\phi}_a = [G_a^n] \dot{\phi}_a, \quad (11)$$

결과적으로 독립 출력 속도벡터와 입력 속도벡터와의 관계는 식 (11)에서 독립 출력속도에 해당하는 행을 선택하여 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\dot{u}_{ind} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \dot{\alpha} \ \dot{\beta}]^T = [G_a^{ind}] \dot{\phi}_a, \quad (12)$$

### 3. 성능 해석

그림 1 에 나타내었듯이 개발된 기구는 60×125×136mm 의 크기를 지닌다. XY 축의 구동을 위하여 AdvenTech 사의 TSA60-20X 스테이지를 2 개 사용하였다. 스테이지의 최대 행정거리는 20mm 이며 정밀도는 1um 이다. 상위 모듈의 미끄럼 관절에는 최대 행정거리가 15mm 이고 정밀도가 20um 인 Haydon사의 LC15 linear actuator 를 부착하였다.

그림 2 는 개발된 기구의 도달 가능한 작업 영역을 나타낸다. Z 축 방향의 값은 상위 모듈의 하판 중심에 부착된 기준 좌표계에 대한 상관 중심의 위치를 의미하며, 초기상태의 값은 87.2585mm 이다. 그림 2(a)는 XY 위치에 대한 도달 가능한 Z 축 값을 도시 하였으며, 그림 2(b)와 (c)는  $-10mm \leq X \leq 10mm$ ,  $-10mm \leq Y \leq 10mm$  인 영역에서  $\alpha$  와  $\beta$  만큼 회전 가능한 Z 축 값에 대한 최대값과 최소값을 도시하였다. 그림에서 보여지듯이 개발된 기구는  $\alpha$  에 대하여 최대  $\pm 50^\circ$  만큼 회전이 가능하며,  $\beta$  에 대해서는 최대  $-30^\circ$  에서  $50^\circ$  까지 회전 가능하다.

개발된 기구의 정밀도를 표 1 에 나타내었다. X 축과 Y 축 방향의 정밀도는 스테이지의 정밀도와 같으며, Z 축 방향의 정밀도는 상위 모듈의 미끄럼 관절에 부착된 linear actuator 의

정밀도와 같다. 또한  $\alpha$  와  $\beta$  방향의 회전에 대한 정밀도는 식 (12)로부터 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta \underline{u}_{ind} = [G_a^{ind}] \Delta \phi_a \quad (13)$$

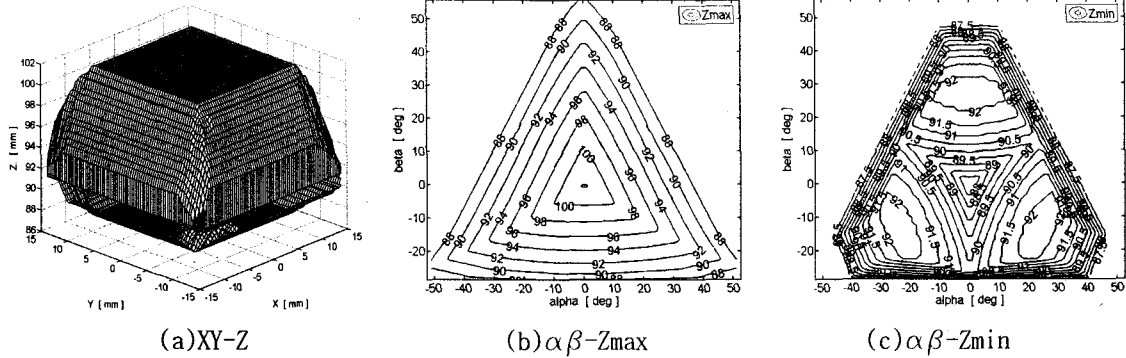


그림 2. 개발된 5 자유도 마이크로 매니플레이터의 도달 가능한 작업영역

표 1. 개발된 5 자유도 마이크로 매니플레이터의 정밀도

축	X	Y	Z	$\alpha$	$\beta$
정밀도	1 $\mu$ m	1 $\mu$ m	20 $\mu$ m	0.035°	0.04°

#### 4. 결론

본 논문에서는 미세 위치 제어가 가능한 혼합형 5 자유도 마이크로 매니플레이터를 제안하고 개발하였으며, 기구학 해석을 수행하고 이를 기반으로 개발된 기구의 작업공간 및 정밀도를 모의 실험을 통하여 확인하였다. 추후 연구과제로는 실제 실험을 통하여 개발된 기구의 작업공간 및 정밀도를 확인하고, 미세 물체의 미세 위치 제어 또는 뇌 수술시의 바늘 삽입 연구에 적용할 계획이다.

#### 후기

본 연구는 보건복지부 한국건강 21 연구개발과제(02-PJ3-PG6-EV04-0003)에 의해 지원되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] Portman, V.T., Sandler, B.-Z., and Zahavi, E., "Rigid 6x6 parallel platform for precision 3-D micromanipulation: Theory and design application", IEEE Trans. Robot. Automat., Vol. 16, No. 6, pp. 629-643, 2000.
- [2] Lee, K. M., and Shah, D. K., "Kinematic Analysis of a Three Degrees of Freedom In-Parallel Actuated Manipulator," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 345-350, 1987. Also, IEEE Trans. Robot. Automat., Vol. 4, No. 3, pp.354-360, 1988.
- [3] G. B. Chung, B.-J. Yi, W. K. Kim, I. H. Suh, and W. K. Chung "Design and Analysis of a Spatial 3-DOF Micromanipulator for Teleoperation," Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 337-342.
- [4] Freeman, R.A. and Tesar, D., "Dynamic modeling of serial and parallel mechanisms/robotic systems, Part I-Methodology, Part II-Applications," Proceedings of 20th ASME Mechanisms Conference, Orlando, FL, DE-Vol. 15, No. 3, pp. 7-27, 1988.