

마이크로 병렬기구 플랫폼의 기구학적 보정

강득수*(서울대 대학원 기계항공공학부), 김종원(서울대 기계항공공학부)

Kinematic calibration for parallel micro machine platform

Deuksoo Kang, Jongwon Kim(School of Mechanical and Aerospace Engineering., SNU)

ABSTRACT

This paper describes the mechanism of parallel micro machine platform and its feedback control system for acquiring high accuracy. The parallel micro machine platform that has developed has 5x5x5 work-space and sub-micron accuracy. For the high accuracy, the feedback control system is important but errors in machining and assembling are inevitable. Kinematic calibration is important for this reason. In this paper, various error components are introduced and the effects of error component are analyzed.

Key Words : Parallel mechanism (병렬기구), Dual stage system (이중 스테이지 시스템), Error component (오차인자), Kinematic calibration (기구학적 보정)

1. 서론

최근 미세 구조(microstructures), MEMS, 마이크로 전자 및 광학 등의 발전으로 수 mm이하의 크기를 가진 복잡한 3 차원 형상을 가진 부품에 대한 가공이 가능해졌다. 이들 부품은 마이크로 로봇, 마이크로 액추에이터, 마이크로 센서, 마이크로 펌프 등에 적용되면서 그 수요 또한 증가하고 있다. 비록 이러한 부품들의 크기는 점점 작아지고 있지만, 이들 부품들은 대부분 CNC 밀링머신 등과 같은 일반적인 생산 시스템을 통해 만들어지고 있으며 정밀도를 요하는 부품의 경우 청정실 등도 필요하게 되어 생산 시스템은 더욱 복잡하고 커지게 된다. 이러한 기존 생산 시스템은 큰 작업 공간을 필요로 하고 더 많은 에너지를 요구한다. 그리하여 공간 및 에너지 절약, 용이한 운송, 환경친화성 등의 장점을 가진 크기가 작은 소형 생산 시스템에 대한 요구가 점점 증가하고 있다.¹

한편, 소형의 정밀한 부품을 만들고, 조립하고, 조작하기 위해서는 비교적 넓은 작업영역을 가지면서 서브 마이크로 이하의 정밀도와 높은 말단장치(end-effector) 회전능력을 가지는 위치결정 기구가 필요하다. 서브마이크론의 정밀도를 달성하는 방법은 압전 구동기(piezoelectric actuator)와 탄성 힌지

(flexure hinge) 메커니즘을 조합한 스테이지를 사용하는 것이 일반적이다. 이러한 스테이지는 작업영역이 수백 μm 이내이며 말단장치의 회전 능력에는 한계가 있다. 이를 해결하기 위하여 조동과 미동 구동기(coarse and fine actuator)로 구성되는 이중 스테이지 시스템(dual stage system)이 제안되었다.^{2,4}

또한, 말단장치에서 높은 정밀도를 구현하기 위해서는 센서 등을 이용하여 위치와 자세에 대한 정보를 추출하여 피드백 제어(feedback control)를 해주어야 한다. 이러한 피드백 제어를 위하여 센서를 사용할 경우 센서 설치를 위한 기구 제작과 조립과정 등에서 오차는 피할 수 없으며 이는 기구 말단장치(end-effector)의 위치와 자세 정밀도에 영향을 준다. 이를 보상하기 위해서는 오차원인을 분석하고 기구학적 보정(kinematic calibration)을 해주어야 한다.⁵

이 논문은 3 자유도 초정밀 위치결정용 마이크로 병렬기구 플랫폼의 구조와 높은 정밀도를 구현하기 위하여 피드백 제어시스템을 제안하였다. 또한, 공칭 기구 파라미터로부터 여러 가지 오차인자를 선정하여 이들 오차인자에 의해 발생하는 말단장치의 오차에 대한 영향을 분석하였다. 이러한 일련의 과정은 마이크로 병렬기구 플랫폼의 기구학적 보정에 적용될 것이다.

2. 마이크로 병렬기구 플랫폼의 기구구조

2.1 이중 스테이지 시스템

서브미크론의 정밀도를 달성하는 일반적인 방법은 압전 구동기(piezoelectric actuator)와 탄성 힌지(flexure hinge) 메커니즘을 조합한 스테이지를 사용하는 것이다. 그러나 이러한 스테이지는 보통 작업 영역이 수백 μm 이내이며 말단장치의 회전능력은 거의 없다. 그리하여 넓은 작업영역에서 서브미크론의 정밀도를 달성하는 실제적 방법은 조동과 미동 구동기(coarse and fine actuator)로 구성된 이중 스테이지 시스템(dual stage system)을 사용하는 것이다. 즉 큰 운동범위와 구동력을 제공하는 조동 구동기와 높은 위치결정을 가능하게 하는 미동 구동기를 조합해 넓은 운동범위에서 높은 정밀도를 달성한다.

이러한 이중 스테이지 시스템에서는 보통 조동 구동기의 끝단에 미동 구동기가 직렬로 연결되는 구조를 가진다. 그러나, 직렬 이중 스테이지 시스템은 큰 관성 질량을 가지기 때문에 시스템이 커지고, 낮은 속도와 잔류진동을 가지며, 주로 평면형 스테이지에 적용되어 말단장치에 높은 회전능력이 요구되는 곳에는 부적절하다.

이러한 단점을 해결하기 위하여 이 논문에서는 이중 스테이지 시스템을 갖는 병렬기구를 제안하였다.

2.2 기구구조

소형의 기계에 적합하도록 간단하고 말단장치에 높은 회전능력을 가진 새로운 기구를 고안하였다. 이 기구는 $5 \times 5 \times 5$ 의 작업영역과, $\pm 50 \text{ deg}$ 의 플랫폼의 회전각을 갖는다.

이의 기구학적 모델을 Fig. 1의 좌측에 나타내었다.⁶ 여기서는 해석을 위하여 필요한 좌표와 각 링크의 상관관계를 보였다. 우측의 그림은 미동 구동기를 포함한 완전한 기구구조를 보인 것이다.

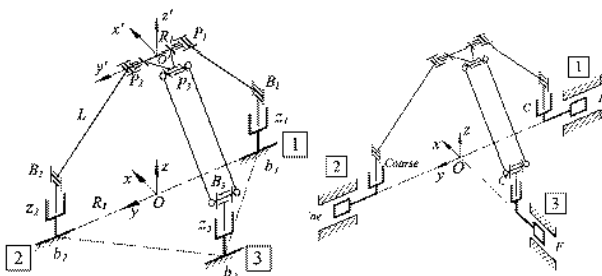


Fig. 1 A kinematic model of the 3-DOF parallel mechanism

3. 피드백 제어시스템의 기구구조

3.1 피드백 제어시스템

설계한 3 자유도 마이크로 병렬기구 플랫폼은 서브미크론 단위의 높은 정밀도를 구현할 수 있어야 한다. 이를 위해 플랫폼의 위치와 자세에 대해 피드백 제어가 필요하게 된다. 이를 위하여 플랫폼에 3 개의 리니어 센서를 장착하여 센서 길이방향의 정보를 얻는 구조를 고안하였다. 3 개의 길이 정보로부터 기구학식을 이용하여 플랫폼 원점에서의 위치와 자세에 대한 값을 얻게 된다. 3 개의 리니어 센서를 장착하여 피드백 제어를 구현할 수 있는 마이크로 병렬기구 플랫폼의 외관은 Fig. 2와 같다.

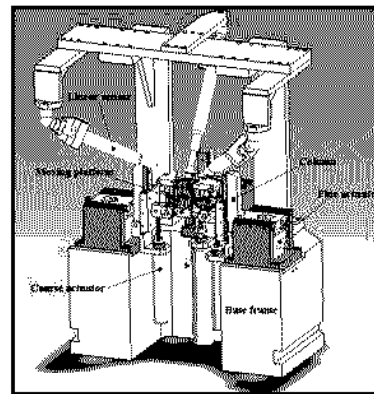


Fig. 2 3D model of the micro parallel platform with feedback system

이때 센서의 설치위치는 센서의 측정범위와 센서와 플랫폼간의 간섭을 피할 수 있는 위치를 기준으로 선정하였다. 또한, 플랫폼 각 위치와 자세에 대한 값과 3 개의 센서 값 사이의 일대일 대응을 구현할 수 있는 위치에 설치하였다. 센서 양측의 고정은 플랫폼의 회전에 방해를 주지 않도록 볼 조인트를 이용하여 설계하였다.

3.2 기구학 해석

이 시스템은 하단의 마이크로 병렬기구 플랫폼과 별도로 센서와 플랫폼 그리고 프레임으로 구성된 별도의 병렬기구로 구성되는 것으로 생각할 수 있다. 따라서, 피드백 제어를 구현하는 부분 즉 전술한 센서, 플랫폼과 프레임으로 구성된 새로운 병렬기구에 대한 해석을 실시함으로써 플랫폼의 위치와 자세에 대한 값을 구할 수 있다.

3.2.1 센서 부착위치와 좌표

센서의 설치위치와 플랫폼의 원점 및 좌표 관계

는 Fig. 3 에 보인 것과 같다.

여기서 S_i ($i = 1, 2, 3$)는 플랫폼에 부착된 센서 말단부의 좌표, B_i ($i = 1, 2, 3$)는 센서 프레임에 부착된 센서 말단부의 좌표를 의미한다. 또한, O-xyz는 플랫폼 중심에 위치하는 좌표축을 의미한다.

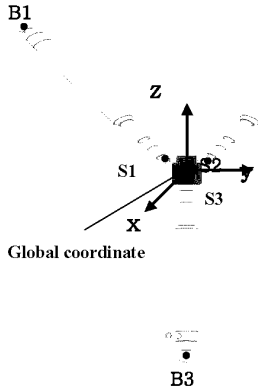


Fig. 3 Sensor location and coordinate system

3.2.2 피드백 제어부의 역기구학

역기구학은 움직이는 말단장치 좌표계의 위치와 자세가 주어졌을 때, 해당 위치와 자세를 달성하기 위한 각 구동 관절의 관절값을 구하는 문제이다.

여기서 말단장치는 플랫폼, 구동 관절은 리니어 센서라고 생각할 수 있다.

이 시스템은 좌표계 O-xyz 에 대하여 플랫폼의 운동이 x 방향 병진운동은 제한되며 y, z 방향의 병진운동과 y 축에 대한 회전 β 가 존재하는 3 자유도 기구이다. 따라서, 말단장치 즉 플랫폼과 연결된 센서의 위치 S_i 는 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$S_i = R \cdot {}^M S_i + P_C \quad (1)$$

여기서, S_i ($i = 1, 2, 3$)는 고정 기준좌표계에 대한 센서의 위치좌표, ${}^M S_i$ ($i = 1, 2, 3$)는 움직이는 말단장치 좌표계에 대한 센서의 위치좌표 R 은 y 축에 대한 회전행렬, P_C 는 말단장치의 위치를 의미한다.

따라서, 이 기구의 역기구학은 다음의 구속조건식 (2)를 이용하여 풀 수 있다.

$$L_i = |S_i - B_i| \quad (2)$$

L_i ($i = 1, 2, 3$): 각 센서의 길이

3.2.3 피드백 제어부의 정기구학

정기구학은 각 구동관절의 관절값이 주어졌을 때 이에 해당하는 말단장치 좌표계의 위치와 자세를 구하는 문제이다. 정기구학은 해석적으로 구하기 힘든 특성을 가지고 있기 때문에 수치해석방법을 이용하여 해결하였다. 피드백 제어부의 정기

구학은 아래의 식(3)을 뉴턴-랩슨 방법(Newton Raphson method)을 이용하여 구하였다.

$$[S_i - B_i]^T [S_i - B_i] - L_i^2 = 0 \quad (3)$$

4. 오차인자의 영향

4.1 기구학적 오차인자

이 시스템은 말단장치 즉 플랫폼에 리니어 센서가 직접 연결된 구조로 피드백 제어를 해준다. 따라서 하부 병렬기구부에 관계없이 피드백 제어부로 구성되는 병렬기구부분에 대해 기구학적 해석을 실시하여도 말단장치의 위치와 자세를 얻을 수 있다.

오차인자를 추출하는데 있어 센서와 말단장치, 센서와 프레임 사이를 연결하는 볼 조인트 부분에서는 이상적으로 결합되어 오차가 발생하지 않는다는 가정을 해주었다. 이러한 가정에 따라 말단장치에 센서를 결합해주는 부품, 상부 프레임에 설치되어 센서를 결합해주는 부품의 x, y, z 축에서 벗어나는 오차와 말단장치인 플랫폼이 조립될 때 어긋나게 되는 자세오차만을 고려대상으로 선정하였다(총 21 개). 이에 대해 다시 정리하면 다음과 같다.

말단장치측 위치오차 : $\Delta S_{xi}, \Delta S_{yi}, \Delta S_{zi}$

프레임측 위치오차 : $\Delta B_{xi}, \Delta B_{yi}, \Delta B_{zi}$

말단장치 자세오차 : $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$

4.2 오차인자를 고려한 기구학 해석

오차인자를 고려한 정기구학 해석은 다음 식(4)를 이용하여 수행할 수 있다.

$$[S'_i - B'_i]^T [S'_i - B'_i] - L_i'^2 = 0 \quad (4)$$

여기서,

$$S'_i = R' \cdot {}^M S'_i + P_C$$

$$R' = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y \\ \varepsilon_z & 1 & -\varepsilon_x \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^M S'_i = {}^M S_i + \Delta {}^M S_i$$

$$B'_i = B_i + \Delta B_i$$

4.3 오차인자에 의한 영향 분석

각 오차인자들간의 정량적 비교를 위하여 민감도 해석을 하였다. 먼저 앞에서 고려한 오차인자 중 오직 한가지 해당 오차인자만 독립적으로 발생한다는 가정을 하였다. 분석 절차는 Fig. 4 에 나타내었다.

이때 오차인자의 오차량은 3 가지 종류에 대해 각각 3 가지 레벨로 나누어 고려해 주었다. 즉 말단장치 오차인자의 오차량은 각각 10, 20, 40 μm , 프레

입측 오차인자의 오차량은 각각 20, 40, 80 μm , 말단 장치 자세 오차인자의 오차량은 각각 0.25, 0.5, 1.0 deg.를 고려하였다.

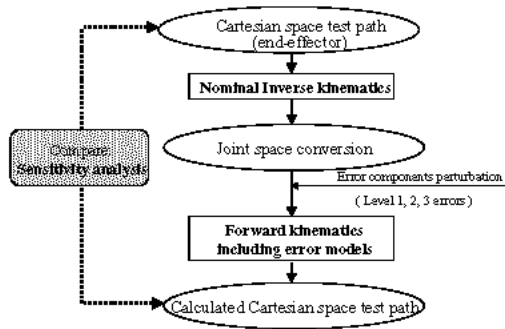


Fig. 4 The procedure of sensitivity analysis

레벨 1 (10 μm , 20 μm , 0.25 deg.)의 경우에 대한 말단장치 원점에서 측정되는 오차량을 Table 1에 정리하였다. 레벨 2, 3의 경우도 경향은 유사하다. 이로부터 각 오차인자가 말단장치의 오차에 어떤 영향을 주는지 알 수 있다.

Table 1 Error data according to error components(Level 1)

		Level 1		
		Δy	Δz	$\Delta \beta$
1	ΔS_{x1}	0.00653	0.00775	0.0287
2	ΔS_{x2}	0.00653	0.00775	0.0287
3	ΔS_{x3}	0	0.0136	0.0566
4	ΔS_{y1}	0.0051	0.0101	0.0240
5	ΔS_{y2}	0.0051	0.0101	0.0240
6	ΔS_{y3}	0	0.0003	0.0007
7	ΔS_{z1}	0.0058	0.0104	0.0247
8	ΔS_{z2}	0.0058	0.0104	0.0247
9	ΔS_{z3}	0	0.0192	0.0399
10	ΔB_{x1}	0.0074	0.0088	0.0326
11	ΔB_{x2}	0.0074	0.0088	0.0326
12	ΔB_{x3}	0	0.0120	0.0492
13	ΔB_{y1}	0.0102	0.0202	0.0481
14	ΔB_{y2}	0.0102	0.0202	0.0481
15	ΔB_{y3}	0	0.0007	0.0015
16	ΔB_{z1}	0.0110	0.0221	0.0523
17	ΔB_{z2}	0.0110	0.0221	0.0523
18	ΔB_{z3}	0	0.0456	0.1039
19	ε_x	0.0957	0.0014	0.0015
20	ε_y	0	0.0003	0.2506
21	ε_z	0.0594	0.0012	0.0015

4. 결론

본 연구에서는 정밀한 위치제어가 가능한 소형의 마이크로 병렬기구 플랫폼에 대한 기구적 특성을 소개하였다. 그리고 정밀한 위치제어가 가능하도록 3개의 리니어 센서를 이용한 피드백 시스템에 대해 소개하였다.

리니어 센서로 구성된 피드백 시스템은 별도의 병렬기구로 해석하였다. 이 때 정밀한 제어를 위해서는 기구학적인 보정이 필요하게 되며 이를 위해 먼저 발생 가능한 오차인자를 선정하고 이를 오차인자에 의해 발생하는 말단장치 즉 플랫폼에서의 오차량을 구하여 각 오차인자의 영향을 분석하였다.

후기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kawahara, N., Suto, T., Hirano, T., Ishikawa, Y., Kitahara, T., Ooyama, N., and Ataka, T., "Microfactories; new applications of micromachine technology to the manufacture of small products," *Microsystem Technologies*, Vol.3, No.2, pp.37-41, 1997.
2. Park, H. J., Lee, D. S., and Park, J. H., "Ultra precision positioning system for servo motor-piezo actuator using the dual servo loop and digital filter implementation," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.41, No.1, pp.51-63, 2001.
3. Kwon, S., Chung, W. K., and Youm, Y., "On the coarse/fine dual-stage manipulators with robust perturbation compensator," *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.121-126, Seoul, Korea, May 21-26, 2001.
4. Takeda, Y., Ichikawa, K., Funabashi, H., and Hirose, K., "An in-parallel actuated manipulator with redundant actuators for gross and fine motions," *2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Taipei, Taiwan, 2003.
5. Vischer, P., and Clavel, R., "Kinematic calibration of the parallel delta robot", *Robotica*, Vol. 16, pp.207-218, 1998.
6. Liu, X. J., Wang, J., Gao, F., and Wang L. P., "On the analysis of a new spatial three-degrees-of-freedom parallel manipulator", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 6, pp.959-968, 2001.