

유연힌지를 채용한 3 차원 정밀 스테이지 연구 Study on 3D precision stage using flexible hinge

*한장희¹, #최우천²

*J. H. Han¹, #W. C. Choi(wcchoi@korea.ac.kr)²

¹ 고려대학교 기계공학과 대학원, ² 고려대학교 기계공학부

Key words : Flexible hinge, Precision stage, Kinematics

1. 서론

유연힌지는 기어나 핀 조인트와 같은 기계적 운동전달 메커니즘에 비하여 백래쉬(backlash)가 없고 윤활이 필요치 않으며 조밀한 구조로 설계가 가능하기 때문에 고정밀 장치에 적합하다. 특히, 적층형 압전소자는 큰 구동력에 비하여 cm 당 10 μm 이하의 제한된 구동변위를 갖기 때문에 압전소자에 유연힌지 메커니즘을 부착하여 변위를 증폭하여 많이 사용되고 있다.[1-4]

기존의 유연힌지를 적용한 초정밀 스테이지의 경우 주로 평면운동을 하였으며, 3 차원 운동을 하는 스튜어트 플랫폼의 경우에는 베이스와 플랫폼 사이에 액추에이터가 사용되기 때문에 전체적인 구조가 액추에이터의 크기만큼 커지는 문제점이 있었다.[5-6]

본 연구는 압전 액추에이터와 유연힌지를 채용하여 마이크로미터 분해능을 가지면서도 작은 크기의 3 차원 정밀 스테이지를 제안하고, 시뮬레이션을 통해 그 움직임을 예측하고자 한다.

2. 스테이지 설계

본 연구에서 제안한 스테이지는 Fig. 1 과 같이 4 자유도를 가진 3 차원 스테이지로서 입력부에 입력값($\delta_1 \sim \delta_4$)이 가해지면 플랫폼이 x-y 평면운동과 x 축, y 축 틸팅(tilting)을 하도록 설계되었으며, 크기는 25 mm × 25 mm × 25 mm 이다.

구조는 베이스, 중간 프레임, 플랫폼 그리고 각각의 링크로 구분된다. 베이스는 전체 스테이지를 고정시켜주며, 힌지를 고정하는 역할을 한다. 두 개의 링크에 의해 중간 프레임에 실질적인 x-y 평면운동이 발생되고, 이 움직임이 플랫폼에 전달되어 x-y 평면운동을 하게 된다. 나머지 두 개의 링크는 플랫폼을 틸팅시키는 역할을 한다. 각 부분의 링크-힌지 구조는 서로 연관되는 움직임을 차단시켜 x-y 평면운동과 x 축, y 축 틸팅 운동이 각각의 레버에 의해 독립적으로 나타나게 된다.

3. 스테이지 운동 해석

스테이지의 운동에 따른 각각의 폐루프는 Fig. 2-5 에 나타내었다. 각 링크에 입력되는 $\delta_1 \sim \delta_4$ 은 각각 한 방향의 운동을 만들기 때문에 각 링크에 대해서 플랫폼의 중점을 지나는 폐루프를 구성할 수 있다. 육면형 병렬기구에서 역기구학은 플랫폼의 위치가 결정되어 있을 때 각 링크의 길이를 구하는 문제가 되지만, 본 연구에서 제안한 스테이지의 경우는 링크의 길이가 정해져 있기 때문에 역기구학으로 구해지는 해는 입력값이 된다.

역기구학으로 얻은 입력값을 이용하여 순기구학으로 플랫폼의 위치를 구하였고, 두 값을 비교함으로써 수식의 타당성을 검토하였다.

1 번 링크와 2 번 링크에 대해서 플랫폼의 중점의 위치를 나타내는 d_1 과 d_2 는 동일하며, 식 (1)과 같다.

$$\vec{d}_1 = \vec{b}_1 + R_p \vec{h}_1 + j\vec{h}_1 + \vec{m}_1 + \vec{c}_1 + \vec{th}_1 + j\vec{p}_1 + R_t \vec{i}_1 + R_p \vec{P}_1 \quad (1)$$

$$b_1 = \begin{bmatrix} 7 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad h_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 14 \end{bmatrix} \quad jh_1 = \begin{bmatrix} 25 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad m_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 55 \\ 0 \end{bmatrix} \quad c_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad th_1 = \begin{bmatrix} -4 \\ 0 \\ 15 \end{bmatrix} \quad jp_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 25 \end{bmatrix} \quad t_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3 \end{bmatrix} \quad P_1 = \begin{bmatrix} -55 \\ -55 \\ 0 \end{bmatrix}$$

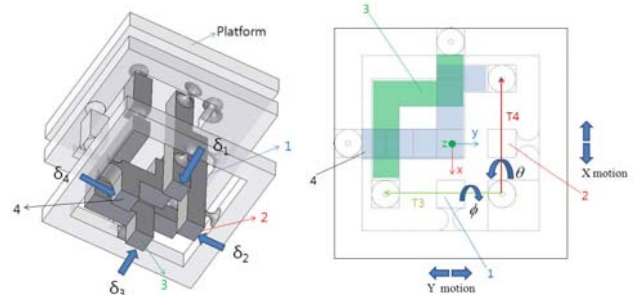


Fig. 1 Stage model and links

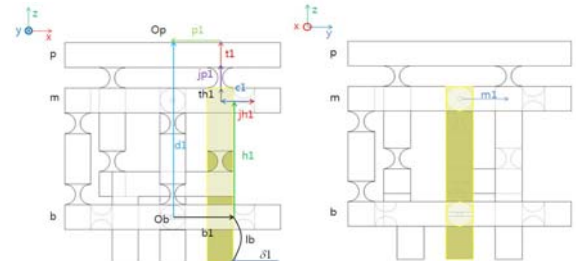


Fig. 2 Loop with 1st link - x motion

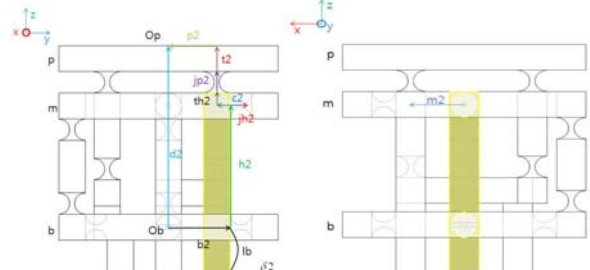


Fig. 3 Loop with 2nd link - y motion

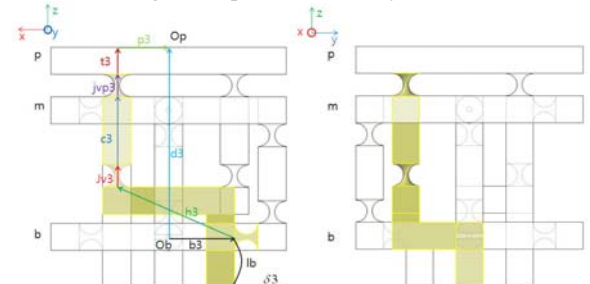


Fig. 4 Loop with 3rd link - x axis tilting

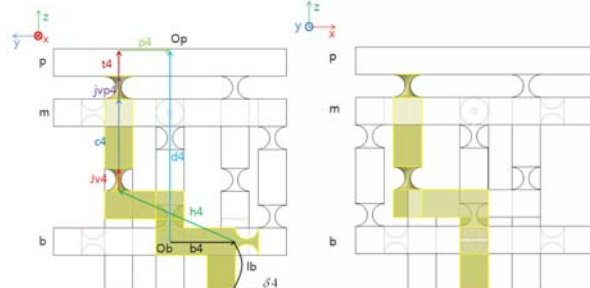


Fig. 5 Loop with 4th link - y axis tilting

$$R_h = \begin{bmatrix} \cos \beta_1 & 0 & \sin \beta_1 \\ \sin \alpha_2 \sin \beta_1 & \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 \cos \beta_1 \\ -\cos \alpha_2 \sin \beta_1 & \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 \cos \beta_1 \end{bmatrix}$$

$$R_l = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ \sin \theta \sin \phi & \cos \theta & -\sin \theta \cos \phi \\ -\cos \theta \sin \phi & \sin \theta & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix}$$

$$R_p = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ \sin \theta \sin \phi & \cos \theta & -\sin \theta \cos \phi \\ -\cos \theta \sin \phi & \sin \theta & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix}$$

여기서 벡터값은 각각의 링크와 힌지의 길이이다. R_h, R_l, R_p 는 각도 변화에 의한 HTM 이고, 각도 $\beta_1, \alpha_2, \theta, \phi$ 는 각각 $\delta_1 \sim \delta_4$ 에 의해 결정된다.

3 번 링크와 4 번 링크에 대해서 플랫폼의 중점의 위치를 나타내는 d_3 과 d_4 는 동일하며, 식 (2)와 같다.

$$\vec{d}_3 = \vec{b}_3 + R_{h3}\vec{h}_3 + j\vec{v}_3 + R_{c3}\vec{c}_3 + jv\vec{p}_3 + R_l\vec{t}_3 + R_p\vec{P}_3 \quad (2)$$

$$b_3 = \begin{bmatrix} -7 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad h_3 = \begin{bmatrix} 12.5 \\ -7 \\ 5.5 \end{bmatrix} \quad jv_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.5 \end{bmatrix} \quad c_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 7.5 \end{bmatrix} \quad jvp_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.5 \end{bmatrix} \quad t_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3 \end{bmatrix} \quad P_3 = \begin{bmatrix} -5.5 \\ 7 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{h3} = \begin{bmatrix} \cos \beta_3 & 0 & \sin \beta_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_3 & 0 & \cos \beta_3 \end{bmatrix}$$

$$R_{c3} = \begin{bmatrix} \cos \beta_{c3} & 0 & \sin \beta_{c3} \\ \sin \alpha_{c3} \sin \beta_{c3} & \cos \alpha_{c3} & -\sin \alpha_{c3} \cos \beta_{c3} \\ -\cos \alpha_{c3} \sin \beta_{c3} & \sin \alpha_{c3} & \cos \alpha_{c3} \cos \beta_{c3} \end{bmatrix}$$

역기구학의 표현은 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$\vec{d}_1 - R_p\vec{P}_1 - R_l\vec{t}_1 - j\vec{p}_1 - t\vec{h}_1 - \vec{c}_1 - \vec{m}_1 - j\vec{h}_1 - \vec{b}_1 = R_h\vec{h}_1 \quad (3)$$

식 (3)은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 그리고 식 (5)에서와 같이 β_1 과 α_2 를 구하면, 식 (6)을 사용하여 δ_1, δ_2 를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x+5.5\cos\phi-3\sin\phi-5.5 \\ y+5.5(\sin\theta\sin\phi+\cos\theta)+3\sin\theta\cos\phi-5.5 \\ z+5.5(-\cos\theta\sin\phi+\sin\theta)-3\cos\theta\cos\phi-4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 14\sin\beta_1 \\ -14\sin\alpha_2\cos\beta_1 \\ 14\cos\alpha_2\cos\beta_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\beta_1 = \sin^{-1}\{(x+5.5\cos\phi-3\sin\phi-5.5)/14\} \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \sin^{-1}\{(y+5.5(\sin\theta\sin\phi+\cos\theta)+3\sin\theta\cos\phi-5.5)/(-14\cos\beta_1)\}$$

$$\delta_1 = l_b \times \sin(-\beta_1) \quad (6)$$

$$\delta_2 = l_b \times \sin(\alpha_2)$$

δ_3 과 δ_4 는 동일한 방법으로 구할 수 있다.

4. 결과

Fig. 6 과 Fig. 7 은 각각 역기구학과 순기구학의 결과 그래프이고 각각의 대표값은 Table 1 과 Table 2 에 나타내었다.

순기구학으로 구한 x-y 평면운동과 x 축, y 축의 틸팅값을 소수점 6 자리로 나타내었을 때 역기구학에서의 운동값과 일치하는 것을 확인할 수 있다.

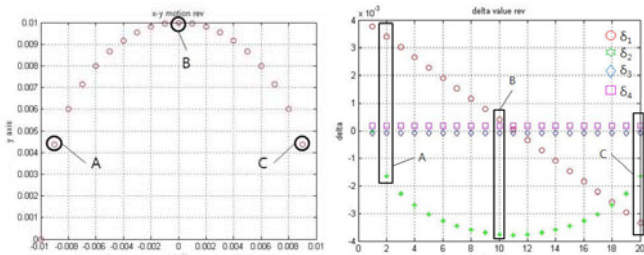


Fig. 6 Result about reverse kinematics(x-y motion and $\delta_1 \sim \delta_4$)

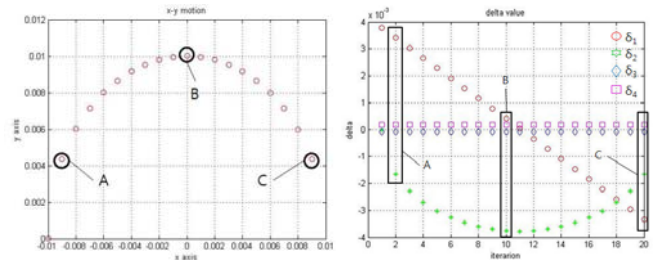


Fig. 7 Result about forward kinematics(x-y motion and $\delta_1 \sim \delta_4$)

Table 1 Value of x-y motion and $\delta_1 \sim \delta_4$ of reverse kinematics

Position	A	B	C
X value (mm)	-0.009	0	0.009
Y value (mm)	0.004359	0.01	0.004359
X axis tilting (°)	0.001	0.001	0.001
Y axis tilting (°)	0.002	0.002	0.002
δ_1 (mm)	0.003414	0.000039	-0.003336
δ_2 (mm)	-0.001654	-0.003770	-0.001654
δ_3 (mm)	-0.000093	-0.000093	-0.000093
δ_4 (mm)	0.000182	0.000182	0.000182

Table 2 Value of x-y motion and $\delta_1 \sim \delta_4$ of forward kinematics

Position	A	B	C
X value (mm)	-0.009000	0.000000	0.009000
Y value (mm)	0.004359	0.010000	0.004359
X axis tilting (°)	0.000999	0.001000	0.001000
Y axis tilting (°)	0.002000	0.002000	0.002000
δ_1 (mm)	0.003414	0.000039	-0.003336
δ_2 (mm)	-0.001654	-0.003770	-0.001654
δ_3 (mm)	-0.000093	-0.000093	-0.000093
δ_4 (mm)	0.000182	0.000182	0.000182

5. 결론

본 연구에서 제안한 정밀 스테이지를 해석해 본 결과, 실제 운동이 가능함을 확인하였으며, 추후 실제 모델을 제작하여 실험을 할 계획이다.

참고문헌

1. J. M. Paros and L. Weisbord, "How to design flexure hinges", *Mechine Design*, Vol.. 27, pp. 151-156,1965.
2. Y. Rong, Y. Zhu, Z. Luo, and X. Lie "Design and analysis of Flexure-Hinge Mechanism used in Micro-positioning Stage", *Proc. Of the 1993 JSME Int. Conf. on Advanced Mechatronics*, Aug 1993, pp.577-582
3. Chen, K. S., Trumper, D.L., and Smith, S.T., 2002, "Design and Control for an electro - magnetically driven X-Y-stage", *Precision Eng.*, Vol. 26, pp.355-369
4. Chang, S. H. and Du, B. C., "A precision piezodriven micropositioner mechanism with large travel range", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 69, No. 4, pp. 1785-1791, April, 1998
5. Fichter, E. F. "A Stewart Platform-Based Manipulator General Theory and Practical Construction", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 5, No. 2, pp. 157-182, 1986.
6. 정태중, 최우친, "육면형 병렬기구의 작업공간 해석", *대한기계학회 추계학술대회 논문집 A*, pp. 795~800, 2000