

유연 힌지를 이용한 초정밀 3 자유도 병렬 매니플레이터 개발

Development of 3-DOF Parallel Manipulator Using Flexure Hinge

신동익¹, 김영수¹, 서승환¹, 한창수^{1,✉}, 최두선², 황경현²
 Dong Ik Shin¹, Young Soo Kim¹, Seung Whan Suh¹, Changsoo Han^{1,✉}, Doo Sun Choi²
 and Kyung Hyun Whang²

¹ 한양대학교 기계공학과 (Department of Precision Engineering, Hanyang Univ.)

² 한국기계연구원 (Korea Institute of Machinery and Materials)

✉ Corresponding author: cshan@hanyang.ac.kr, Tel: 031-400-5247

Manuscript received: 2007.11.30 / Revised: 2009.1.30 / Accepted: 2008.4.3

We present a 3-PRS compliant parallel manipulator actuated by PZTs. The motion ranges are 400- μ m translation to the z-direction and 5.7-mrad rotation about any axis on the x-y plane. A mechanical amplifier whose advantage is approximately 5.5 is designed and integrated with flexure revolute and spherical joints in a monolithic way. We evaluated the performance of the system: kinematic and dynamic characteristics. In kinematic point of view, the flexures play the roles of conventional mechanism but any nonlinearity such as dead-zone and backlash, which make it possible to achieve the steady-state resolution less than 0.1 μ m. The system shows resonance near 86 Hz with high magnitude and, therefore, poor transient response. But the settling is faster when the flexures are strained higher.

Key Words: Parallel Manipulator (병렬 매니플레이터), 3-PRS, Mechanical Amplifier (기계 변위 증폭기), Flexure Hinge (유연 힌지), Piezoelectric Actuator (압전 액추에이터)

1. 서론

바이오, 나노 과학과 기술이 발달함에 따라서 관련분야의 연구개발과 제조작업에서 수 마이크로미터 혹은 그보다 낮은 수준으로 위치결정을 하거나 미세한 물체 조작이 필요하게 되었다. 최근에는 이러한 기술적 요구로 인하여 초정밀 스테이지나 초정밀 매니플레이터가 개발되고 있다. 특히 Kleindiek¹은 정밀 3 자유도 직렬 매니플레이터를 개발하여 주사전자현미경 내에서 미세한 물체를 조작하였다.

일반적으로 직렬 매니플레이터가 구동범위가 크고 기구가 간단하다는 장점이 있으나 병렬 매니플레이터에 비해 큰 힘을 낼 수 없고 분해능이나

쁜 단점이 있다.² 이러한 이유에서 한창수와 이계영^{3,7}은 3 자유도 병렬 매니플레이터를 개발하였다. 하지만 전통적인 기계 관절은 기어의 백래시와 베어링의 불완전한 접촉 등으로 인해 수 마이크로미터의 오차를 수반한다. Koyachi⁴ 등은 관절의 오차를 줄이기 위해 유연 힌지를 이용하여 병렬 매니플레이터를 개발하였다. 유연 관절은 백래시가 없고 연속적인 변위를 갖는 장점이 있지만, 기생 방향의 움직임이 있고 동작 범위가 작다는 단점이 있다⁵. 최우천⁶ 등은 압전소자로 구동되는 평면 스테이지의 동작 범위를 확대하기 위해 유연 관절을 이용한 지레 구조에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 유연 관절과 변위 증폭 구조를 결합한 형태의 3 자유도 공간(spatial) 병렬 매니플

레이터를 제안한다. 이 시스템은 3-PRS(prismatic-revolute-spherical, 밑줄은 능동 관절을 나타냄) 형태의 관절 구조를 가지며, 압전소자로 구동된다. 능동 관절인 선형 관절 (prismatic joint)의 변위를 증폭하기 위해 지레 구조를 적용하였으며, 이는 이어지는 회전 관절과 일체를 이루고 있다. 마지막 구 조인트는 가공 편의성을 감안하여 와이어로 구현하였다.

2. 기구학 해석

3-PRS 공간 병렬 매니퓰레이터는 2000년에 Gosselin⁹ 등이 제안한 것으로 알려져 있다. 그들은 메커니즘 구조를 제안하였고 역기구학을 해석하였으며, 기생 운동(parasitic motion)을 최소화하는 최적 설계 방법을 제시하였다. 그러나 국내에서는 그 이전 1997년에 본 논문의 저자 한창수와 이계영^{3,7}이 함께 비슷한(선형 관절이 베이스에 평행한 전자와 달리 수직함) 메커니즘을 발표하였고, 역기구학 해석과 KIC(kinematic influence coefficient) 방법을 이용한 동역학 해석을 시도하였다. 3-PRS 공간 병렬 매니퓰레이터의 완전한 정기구학 해석은 2003년 Tasi¹⁰ 등에 의해 이루어졌으며, 2007년에 Li¹¹는 기구학(kinematics), 야코비 행렬(Jacobian matrix), 특이점(singularity), 조작성(manipulability), 작업공간(reachable workspace), 능숙도(dexterity) 해석을 종합적으로 정리하였다. 이 절에서는 3-PRS 병렬 매니퓰레이터의 역기구학과 정기구학을 리뷰 하되, 깔끔한 벡터식을 통해 기하학적 직관과 가독성을 도모하였다.

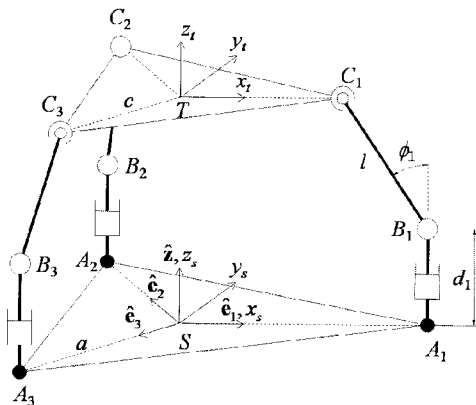


Fig. 1 Geometric structure of the 3-PRS parallel manipulator

Fig. 1은 제안된 시스템의 구조를 도식적으로 나타낸다. i 제 체인의 선형축은 고정된 하판 상의 A_i 점에서 시작하여 수직으로 향하고, 관절 변수를 d_i 를 갖는다. 회전 관절(revolute joint) B_i 는 이 선형축을 따라 움직이며, 상판에 부착된 구 관절 (spherical joint) C_i 와 길이가 l 인 링크에 의해 연결되어 있다. $\{A_i\}$ 와 $\{C_i\}$ 는 각각 반지름이 a 와 c 인 원주 상에 등간격으로 존재하는데, 세 점 A_i, B_i, C_i 는 항상 수직인 평면을 이룬다. $\{A_i\}$ 와 $\{C_i\}$ 의 각 중점에 각각 관성 좌표계 S 와 톨 좌표계 T 를 붙이되, A_i 와 C_i 의 방향이 S 와 T 의 x 축이 되게 한다. 한편, 회전 관절의 관절 변수를 ϕ_i 라 하고 그림과 같이 정의한다. 표현의 간결성을 위해 S 에 대한 A_i 의 방향을 나타내는 단위 벡터를 \hat{e}_i 라 하고, 수직 방향의 단위 벡터를 \hat{z} 라고 이름 지었다.

2.1 역기구학

관성좌표계 S 에 대한 상판의 자세가 톨 좌표계 T 의 원점 위치벡터 \mathbf{p}_i 와 회전행렬 \mathbf{R}_i 로 주어지면, S 에 대한 C_i 의 위치벡터 \mathbf{c}_i 는 강체변환에 의해

$$\mathbf{c}_i = c\mathbf{R}_i\hat{\mathbf{e}}_i + \mathbf{p}_i \quad (1)$$

이다. 한편, \mathbf{c}_i 를 i 제 체인의 관절 변수 ϕ_i 와 d_i 로 써 표현하면

$$\mathbf{c}_i = (a - l\sin\phi_i)\hat{\mathbf{e}}_i + (d_i + l\cos\phi_i)\hat{\mathbf{z}} \quad (2)$$

다. 식 (1)과 (2)를 같게 두면 다음과 같은 벡터 식을 얻게 된다.

$$(a - l\sin\phi_i)\hat{\mathbf{e}}_i + (d_i + l\cos\phi_i)\hat{\mathbf{z}} = c\mathbf{R}_i\hat{\mathbf{e}}_i + \mathbf{p}_i \quad (3)$$

이 식의 $\hat{\mathbf{e}}_i$ 성분과 $\hat{\mathbf{z}}$ 성분에서 ϕ_i 와 d_i 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} l\sin\phi_i &= a - c\hat{\mathbf{e}}_i^T\mathbf{R}_i\hat{\mathbf{e}}_i - \hat{\mathbf{e}}_i^T\mathbf{p}_i \\ d_i &= -l\cos\phi_i + c\hat{\mathbf{z}}^T\mathbf{R}_i\hat{\mathbf{e}}_i + \hat{\mathbf{z}}^T\mathbf{p}_i \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3)의 나머지 $\hat{\mathbf{z}} \times \hat{\mathbf{e}}_i$ 성분

$$0 = c(\hat{\mathbf{z}} \times \hat{\mathbf{e}}_i)^T(\mathbf{R}_i\hat{\mathbf{e}}_i + \mathbf{p}_i) \quad (5)$$

은 해를 갖기 위한, 즉 $(\mathbf{R}_i, \mathbf{p}_i)$ 이 작업공간에 놓이기 위한 구속 조건이다. 식 (5) 형태로 주어지는 3 개의 구속조건은 본 시스템의 작업 공간이 특수 유클리드 군(special Euclidean group) SE(3) 안에 포함된 3차원 공간임을 의미한다.

2.2 정기구학

능동 관절 변수 (d_1, d_2, d_3) 가 주어졌을 때 T 의 자세 $(\mathbf{R}_i, \mathbf{p}_i)$ 를 결정하는 문제다. C_i 의 위치는 식 (3)과 같고, 이를 C_i 상호간 거리가 일정하다는 조건

$$\|\mathbf{c}_1 - \mathbf{c}_2\|^2 = \|\mathbf{c}_2 - \mathbf{c}_3\|^2 = \|\mathbf{c}_3 - \mathbf{c}_1\|^2 = 3c^2 \quad (6)$$

에 대입하여 전개하되,

$$\hat{\mathbf{e}}_i^T \mathbf{e}_j = \frac{1}{2} (i \neq j), \quad \hat{\mathbf{z}}^T \hat{\mathbf{e}}_i = 0$$

를 감안하면, 수동 관절 변수 (ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3) 를 미지수로 하는 다음과 같은 꼴의 방정식 3 개를 얻게 된다.

$$(a - l \sin \phi_1)^2 + (a - l \sin \phi_2)^2 + (a - l \sin \phi_3)^2 + (d_1 + l \cos \phi_1 - d_2 - l \cos \phi_2)^2 - 3c^2 = 0 \quad (7)$$

이 식을 수치적으로 풀면 (ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3) 를 결정할 수 있고, 이를 다시 식 (2)에 대입하면, 구 관절의 위치벡터 $\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \mathbf{c}_3$ 를 구할 수 있다. 상판의 자세 $(\mathbf{R}_i, \mathbf{p}_i)$ 는 이 세 점의 위치에 의해 다음과 같이 유일하게 결정된다.

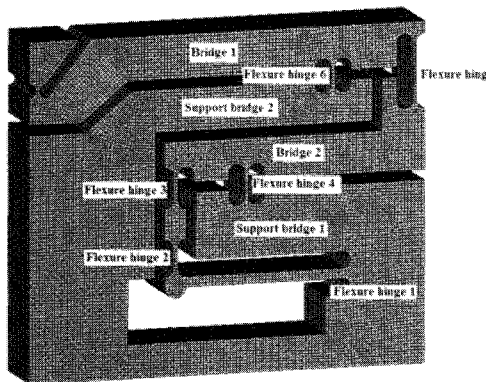


Fig. 2 Design of flexure-hinged mechanical amplifier

Table 1 Optimum dimensions of corner-filletted flexure hinges

| No.(Fig. 2) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------|------|------|------|------|------|------|
| Thickness | 1.5 | 0.5 | 0.7 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Length | 24.0 | 3.5 | 4.5 | 4.0 | 9.0 | 3.5 |
| R. of fillet | 1.75 | 1.25 | 1.75 | 1.75 | 1.75 | 1.75 |

$$\mathbf{p}_i = \frac{1}{3}(\mathbf{c}_1 + \mathbf{c}_2 + \mathbf{c}_3)$$

$$\mathbf{R}_i = \left[\frac{1}{c}(\mathbf{c}_1 - \mathbf{p}_i), \frac{1}{\sqrt{3}c}(\mathbf{c}_2 - \mathbf{c}_3) \right]^* \quad (8)$$

\mathbf{R}_i 의 세번째 열은 앞의 두 열의 외적(cross product)으로 구할 수 있다.

3. 시스템 설계

3.1 변위 확대 구조

본 연구에서 개발하고자 하는 병렬 매니플레이터의 목표 사양은, 동작 범위 400 μ m 와 분해능 0.1 μ m 이다. 이 조건을 충족하기 위해 매니플레이터의 병진 관절을 구동시키는 액추에이터는 압전 소자(PI 사의 P-841.60)로 결정하였다. 하지만 이 압전소자의 구동범위는 90 μ m 밖에 되지 않으므로 변위 확대 구조가 필요하다.

변위 확대 구조는 Fig. 2 와 같이 단순 지레구조를 직렬로 연결하여 설계하였다. 이것은 제한된 공간 내에서 큰 증폭 비를 구현하기 위하여 르자 형태를 갖고 있다. 설계에서 목표로 하는 지레의

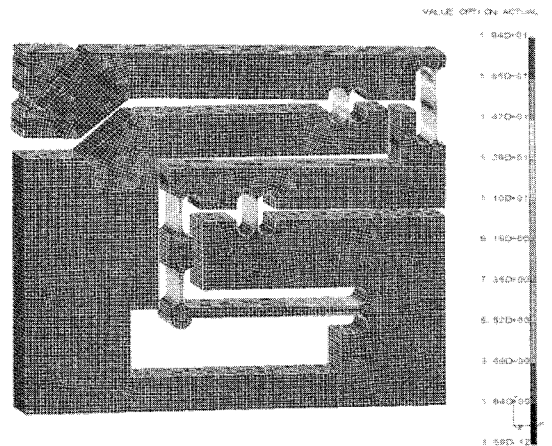


Fig. 3 Stress distribution when maximum displacement is applied

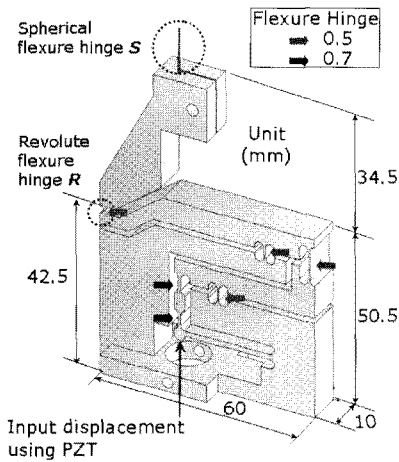


Fig. 4 Design of monolithic chain of the manipulator

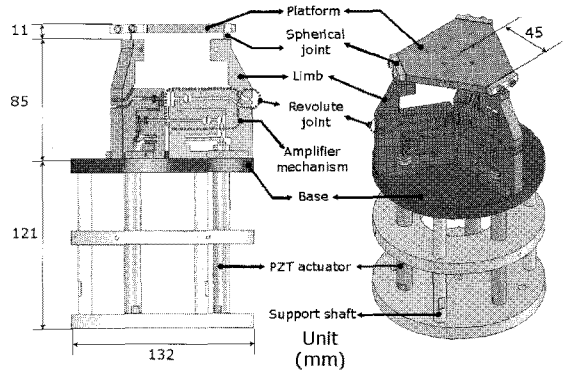


Fig. 5 Design of 3-chained system

기하학적 지렛대 비는 7 로 결정하였는데, 이는 탄성 변형 등을 고려하여 약 1.5 배의 여유를 둔 것이다.

유연 힌지는 필릿 모서리(corner-filletted) 형태로 선정하였으며, 그 치수(길이, 필릿 반경, 두께)는 최적 설계를 통해 결정하였다. 여기에 사용된 목적함수는 기계적 증폭비이며, 구속조건은 최대응력으로서, 소재로 사용될 6061 계열의 항복강도 200MPa 의 절반인 100MPa 이하가 되도록 설정하였다. 최적화 결과를 바탕으로 가공 가능성과 용이성을 검토하여 최종적으로 힌지의 길이와 반경 그리고 두께를 결정하였으며, 이는 Table 1 과 같다.

설계한 변위확대 구조에 유한요소해석을 통한 기계적 증폭비의 시뮬레이션 결과는 약 6.67 이다. 최종적으로 설계변수를 결정한 후에 Fig. 3 과 같이 유한요소 해석을 통해 모든 유연힌지가 탄성영역 내의 응력수준을 갖고 있는지 판단하였다. 최대 응력 집중은 변위 확대 구조의 출력단과 반대 부분의 힌지에서 발생하였으며 출력단의 변위를 목표 값보다 20% 큰 480µm 로 하였을 때 최대 응력은 약 84.1MPa 로서 소재의 항복강도의 약 42% 정도의 수치임을 확인하였다.

3.2 매니플레이터 설계

PRS 형태의 병렬 매니플레이터의 체인은 Fig. 4 와 같이 변위 확대 구조가 병진관절을, 원형 평면 힌지가 회전 관절을 이루고 있다. 구 관절은 강선을 이용하여 구현 하였다.⁷ 이러한 체인을 바탕으로 Fig. 5와 같이 전체 시스템을 디자인 하였다.

4. 성능평가

본 연구에서 개발한 3 자유도 병렬 매니플레이터의 작업공간은 근사적으로 x 축과 y 축에 대한 회전과 z 축에 대한 병진으로 볼 수 있다. 왜냐하면, x 축과 y 축에 대한 병진은 z 축에 비해 매우 작고, 비슷하게 z 축에 대한 회전은 다른 두 축에 비해 매우 작기 때문이다. 극단적인 예로서, 1 번과 2 번 액추에이터가 최대 변위를 일으켰을 경우, 즉, $\mathbf{d} = [0.4 \ 0.4 \ 0]^T$ 일 경우, 2.2 절에서 설명한 정기구학 식을 통해 말단부의 자세를 계산하면,

$$\mathbf{p}_i = [-1.98 \times 10^{-4} \ 3.43 \times 10^{-4} \ 2.67 \times 10^{-1}]^T + \mathbf{p}_i^{(0)}$$

$$\hat{\mathbf{r}}_i = [8.67 \times 10^{-1} \ -5.00 \times 10^{-1} \ 1.68 \times 10^{-9}]^T$$

이다. (여기서, $\mathbf{p}_i^{(0)}$ 는 기준 자세에서의 \mathbf{p}_i 이고, $\hat{\mathbf{r}}_i$ 는 회전축 벡터이다.) 위 식에서 \mathbf{p}_i 의 경우 z 성분이 다른 두 성분에 비해 월등히 크고, $\hat{\mathbf{r}}_i$ 는 x 와 y 성분이 돋보이는 것을 볼 수 있다. 따라서 말단부의 자세는 z -축 방향의 병진과, x - y 평면상에 있는 회전축에 대한 회전에 근사화할 수 있다. 게다가, 회전 성능 평가를 위해서 1 번 액추에이터만 변위를 일으키는 경우(회전축이 y 축이 된다)로 한정하더라도 일반성을 잃지 않는다.

우선, 각 체인을 조립하기 전 증폭 성능을 단독으로 평가하였다. Fig. 6 은 PZT 변위 대비 회전관절의 수직 변위를 측정된 결과이다. 측정된 증

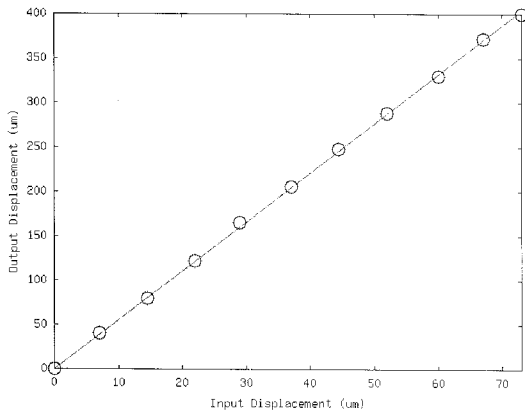


Fig. 6 Linearity and gain of displacement amplifier

폭비는 5.53 으로서 유한 요소 해석을 통해 예측한 값 6.67 과는 큰 차이가 있으나, 선형성을 유지하는 것을 볼 수 있다. 그리고 목표 출력 변위 400μm 가 PZT 최대 변위 90μm 보다 작은 72μm 의 입력에 의해 도달하였기에, 그 차이를 쉽게 보정할 수 있었고, 각 체인이 상판에 의해 조립되었을 때에도 이 관계가 계속 유지되는 것을 볼 수 있다.

Table 2 는 조립된 시스템의 상판의 병진과 회전에 대한 최대변위를 측정된 결과이다. 병진 운동은 이론 값과 거의 일치하나 회전은 약 4.5%의 다소 큰 오차가 발생함을 볼 수 있다. 이는 모든 액추에이터가 같은 양의 변위를 일으킬 때보다 변위 차가 클 때에 각 관절의 변형 양과 그에 상응하는 응력이 커서 기생 운동(parasitic motion)이 발생했기 때문인 것으로 판단된다.

Table 2 Motion range of the system

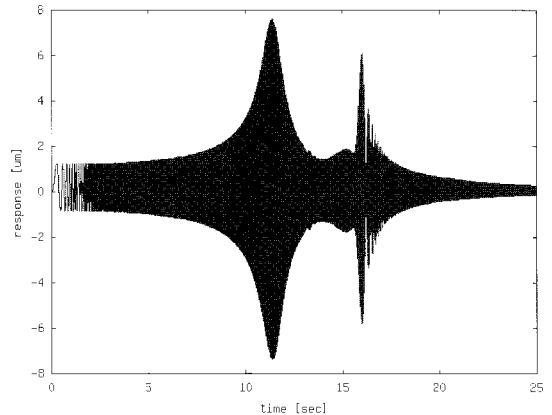
| | Measured | Theoretical | Ratio |
|-------------|----------|-------------|--------|
| Translation | 398.4μm | 400.0μm | 99.6 % |
| Rotation | 5.71mrad | 5.92mrad | 96.5 % |

Fig. 7은 처프(chirp) 신호

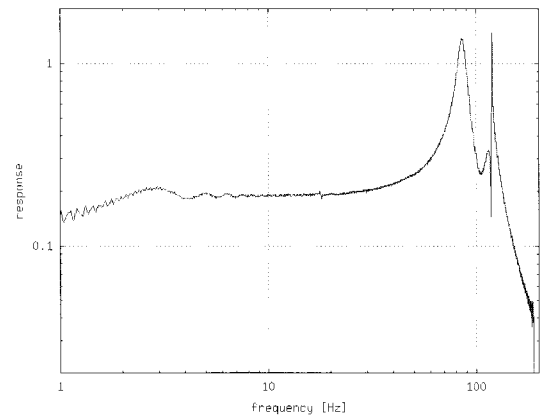
$$u(t) = A \sin 23.8t^2, \quad t \in [0, 25) \quad (9)$$

를 세 축에 함께 가했을 때, 상판의 z 축 방향의 변위를 측정된 결과이다. 실험은 동작 범위 중간 지점에서 구동하였으며, 입출력 신호는 2kHz 단위로 샘플링하였다. 식 (9)의 입력 신호는 대략 3~180Hz 대역폭을 갖는 흰색 노이즈로 볼 수 있으

므로, 이 신호에 대한 응답 Fig. 7(a)를 푸리에 변환한 결과 Fig. 7(b)는 같은 주파수 영역 내에서 이 시스템의 주파수 응답이다. 86, 115, 120Hz 에서 공진이 관찰되었으나, 뒤의 두 개는 각 체인의 작은 동특성 차이에 의한 것일 가능성을 배제할 수 없다. 이 시스템의 댐핑 계수는 매우 낮으며, 밴드위스(bandwidth) 주파수는 140Hz 이다.



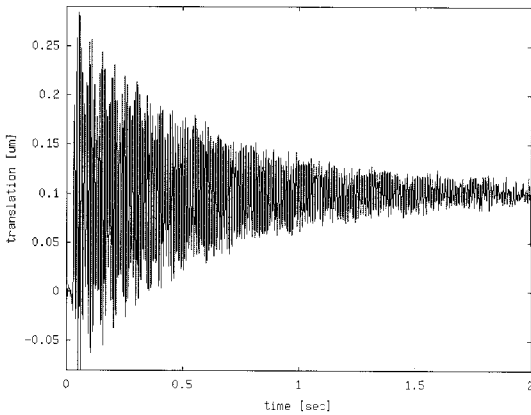
(a) Time response to chirp signal



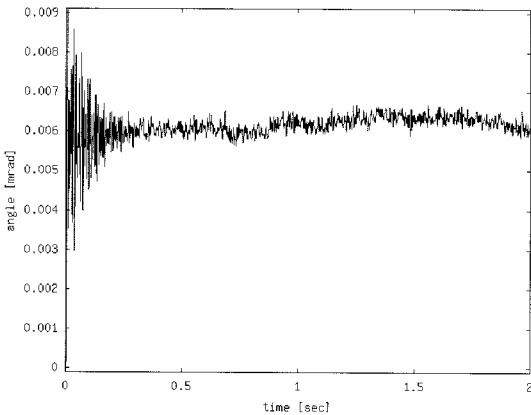
(b) Frequency response

Fig. 7 Dynamic characteristics of the system

Fig. 8은 미소한 크기의 계단 입력(step input)에 대한 응답을 측정된 결과이다. 이 절의 처음에 설명하였듯이, 병진 응답은 세 축을 동시에 같은 증폭 변위 0.1μm 만큼 구동하여 취하였고, 회전 응답을 위해서는 한 축만 약 0.4μm 구동하였다. 전체적으로 감쇄가 매우 더디게 진행하나, 회전은 병진에 비해 5배 이상 빠르게 일어나는 것을 볼 수 있다. 이는 유연 힌지에서의 비대칭적인 변형률 에너지가 감쇄를 촉진하는 것으로 보인다.



(a) Translation (0.1 μ m)



(b) Rotation (0.006mrad)

Fig. 8 Step response of the system

5. 결론

본 연구에서는 서브 마이크로미터에서 수백 마이크로미터의 범위에서 동작이 가능한 3 자유도 병렬 매니퓰레이터를 개발하였다. Z-축 방향의 병진과 X 와 Y 축에 대한 회전 운동을 생성하기 위해 기구적으로 PRS 형태의 체인을 채택했으며, 액추에이터는 압전소자를 이용했다. 각 체인에 대해서 압전 소자의 변위를 5.53배 증폭시키는 구조를 설계하여 유연체(flexure)로 구현한 회전 관절 및 구 관절과 일체화하였다. 증폭비는 당초 유한 요소 해석을 통해 예측한 6.67과는 다소 큰 차이가 있었으나, 입-출력 변위 간에 선형성이 훌륭하게 유지되어 쉽게 보정할 수 있었다. 시스템의 동작 범위는 병진 운동의 경우 이론 값과 잘 일치한 반면에, 회전 범위는 약 4.5% 오차가 있었다. 이는 회전 운동을 구현하기 위해 각 관절의 변위가 병

진에 비해 크고, 비대칭적이어서 유연 관절에서의 도하지 않은 기생 변위가 생겼기 때문으로 판단된다. 반면에 이러한 탄성 변형 및 비대칭성은, 동적인 관점에서 감쇄를 촉진하는 순기능 효과도 보였다.

향후, 유연 관절의 이론적 모델을 적용한 기구학과 동역학적 모델을 통해 정밀도를 더욱 향상시킬 수 있을 뿐 아니라 동적 특성을 개선할 수 있는 방안의 모색이 요구된다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원의 초정밀 기계부품 시스템 공정혁신 센터 구축사업에 의해 진행되었으며 이에 감사합니다.

참고문헌

1. Kleindiek, S., Kim, H., Kratschmer, E. and Chang, T., "Miniature Three-Axis Micropositioner for Scanning Proximal Probe and Other Applications," Journal of Vacuum Science and Technology B, Vol. 13, No. 6, pp. 2653-2656, 1995.
2. Merlet, J.-P., "Parallel Robots," Springer, pp. 1-11, 2006.
3. Lee, K. Y., "A Study on the Development of Three DOF Parallel Manipulator for Micro-Motion," A Master's Thesis of Mechanical Engineering, Hanyang University, 1998.
4. Tanikawa, T., Arai, T. and Koyachi, N., "Development of Small-Sized 3 DOF Finger Module in Micro Hand for Micro Manipulation," Proc. of IEEE Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, pp. 876-881, 1999.
5. Smith, T., "Flexures: Elements of Elastic Mechanisms," Gordon and Breach Science Publishers, pp. 2-3, 2000.
6. Hwang, E. Y., Min, K. S., Song, S. H. and Choi, W. C., "Analysis of Flexure Hinge Neck Thickness of a Lever in Ultra Precision Stages of a Long Travel Range," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 5, pp. 121-129, 2005.
7. Dong, W., Du, Z. and Sun, L., "Stiffness Influence Atlases of a Novel Flexure Hinge-Based Parallel Mechanism with Large Workspace," IEEE/RSJ

- International Conference, pp. 856-861, 2005.
8. Lee, K. Y. and Han, C. S., "Development of Three D.O.F. Parallel Manipulator for Micro-Motion," Proc. of Korean Society of Precision Engineering Autumn Conference, pp. 1067-1070, 1997.
 9. Carretero, J., Podhorodeski, R., Nahon, M. and Gosselin, C., "Kinematic Analysis and Optimization of a New Three Degree-of-Freedom Spatial Parallel Manipulator," Journal of Mechanical Design, Vol. 122, No. 1, pp. 17-24, 2000.
 10. Tsai, M.-S., Shiau, T.-N., Tsai, Y.-J. and Chang, T.-H., "Direct Kinematic Analysis of a 3-PRS Parallel Mechanism," Mechanism and Machine Theory, Vol. 38, No. 1, pp. 71-83, 2003.
 11. Li, Y. and Xu, Q., "Kinematic Analysis of a 3-PRS manipulator," Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 23, No. 4, pp. 395-408, 2007.