https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.6.381

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. ISSN 2508-5107(Online)

Check for updates

# 가공용 위치 보상 2축 스테이지 최적설계

조수제<sup>a</sup>, 안다훈<sup>b</sup>, 정안목<sup>c\*</sup>, 이학준<sup>c\*</sup>

# Optimal Design of 2-DOF Position Compensation Stage for Machining

Suje Cho<sup>a</sup>, Dahoon Ahn<sup>b</sup>, Anmok Jeong<sup>c\*</sup>, Hak-Jun Lee<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup> Department of mechanical engineering, Konkuk University

<sup>b</sup> Department of mechanical system design engineering, Seoul National University of Science and Technology

<sup>c</sup> Department of Smart Manufacturing R&D system, Korea Institute of Industrial Technology

#### **ARTICLE INFO**

Kinematics

Article hist	orv:						
Received	22	November	2022				
Revised	30	November	2022				
Accepted	3	December	2022				
<i>Keywords:</i> Optimal de Flexure hir	<i>Keywords:</i> Optimal design Flexure hinge						
Location compensation							

#### ABSTRACT

Recent, manufacturing industry has demand that a robot milling system with higher DOF than CNC milling due to an increase in demand for processing complex and flexible shapes. However, a disadvantage of low surface quality exists owing to vibrations caused by the low rigidity of the robot. The main reason for the low surface quality of a target workpiece is the resonant frequency of the robot occurring below 200 Hz . To overcome this problem, we developed a 2-DOF position compensation stage that has high dynamics. In this study, the stage of parallel kinematics using an L-shaped flexible hinge was presented and optimized for rigidity higher than that of the serial kinematics structure. The optimally designed stage through the crab-leg structure was designed with high stiffness with a moving range of 26.1  $\mu$ m and natural frequency of 513.54 Hz.

## 1. 서 론

현재 빠르게 발전중인 항공, 우주, 반도체 등의 산업에서 정 밀 포지셔닝 시스템에 대한 수요가 증가하고 있다. 광학 현미 경, 우주 망원경, MEMS(micro electro mechanical system)기 구 등 다양한 제품에서 높은 위치 정밀도를 요구하고 있다. 가공 산업에서 로봇 팔을 이용한 밀링의 경우 CNC 가공의 경우보다 높은 자유도를 갖기에 다양한 형상을 빠르게 가공할 수 있는 장점을 가지며, 제품의 다품종 유연생산 트렌드로 인 해 로봇가공의 수요가 점점 늘어나고 있는 상황이다. 그러나 로봇은 낮은 강성으로 인해 가공 시 진동이 발생하여 공작물 의 품질이 낮은 단점을 갖는다. 이를 보상하기 위해 로봇 팔이 나 가공물 표면에 ECD(Eddy current damper)를 장착하여 가 공 중 발생하는 진동을 감쇠하여 스핀들의 위치를 보상하는 방법이 제시되었다<sup>[1,2]</sup>. ECD는 큰 영구자석을 사용할수록 효 과가 좋지만 로봇 팔에 부착할 경우 무게의 증가로 낮은 강성 을 가지며, 소형 ECD의 경우 조립이 힘들고 큰 감쇠력을 얻기 힘들다는 단점이 있다. 이에 소형으로 큰 힘을 낼 수 있는 피 에조 액츄에이터(Piezo actuator)를 통하여 위치를 보상하는 방법도 제시되었으며, 다양한 방법을 이용하여 로봇 가공 시

<sup>\*</sup> These authors contributed equally to this work.

<sup>\*</sup> Corresponding author. Tel.: +82-42-589-8318 *E-mail address:amjeong@kitech.re.kr* (Anmok Jeong).

<sup>\*</sup> Corresponding author. Tel.: +82-42-589-8553 E-mail address: hak1414@kitech.re.kr (Hak-Jun Lee).

공작물의 품질을 높이기 위한 연구가 진행되고 있다<sup>[3-5]</sup>.

피에조 액츄에이터를 이용한 2-DOF 스테이지 형상의 경우, 크 게 Serial Kinematics와 Parallel Kinematics 로 나눌 수 있다. Serial Kinematics의 경우 x, y축 모션이 서로 영향을 주지 않아 제어가 용이하나 가공 시 스테이지의 고유 진동수가 각 축에 따라 다른 점을 고려해야 한다. Parallel Kinematics의 경우 제어가 Serial Kinematics의 경우보다 복잡하나 높은 정밀도를 얻을 수 있으며 x, y축 방향으로 거의 동일한 고유 진동수를 갖는다<sup>[7]</sup>.

본 연구에서는 가공 시 발생하는 위치 오차 보상을 Parallel Kinematics를 채택 후 L 형상의 유연 힌지를 이용해 고강성 스테 이지의 최적 설계를 진행하였다.

# 2. 스테이지 설계

로봇 밀링 가공의 경우 로봇의 낮은 강성에 의해 가공 중 발생하는 진동이 가공물의 결과에 영향을 미친다. 기존 로봇의 경우 200 Hz 이하의 저주파수 영역대에서 진동이 발생하였으며, 약 10 µm 정도 의 Chatter 진동이 발생함을 확인하였다<sup>[7,8]</sup>. 본 논문에서는 진동을 저감하기 위해 Table 1과 같이 설계 목표를 설정하고 시스템 개발을 수행하였다. 10μm 정도의 Chatter 진동을 보상하기 위해 20 μm 정도의 Stage 설계목표를 설정하였으며, 200 Hz 이하의 진동 저감 을 위해서 Stage 공진점을 400 Hz를 목표로 설계하였다. Stage 공 진점을 200 Hz로 목표를 설정하게 되면, 실제 구동 시 공진점 근처 에서 제어가 불가능하기 때문에 더높은 설계목표를 설정하였다.

로봇 밀링은 다음과 같은 구성을 갖는다(Fig. 1). Work table 위에 로봇 팔과 workpiece holder를 고정하고, workpiece holder 위에 workpiece를 고정한다. Workpiece holder는 2축 스테이지로, 실시간으로 발생하는 진동을 측정하기 위한 센서와 진동을 제어할



Fig. 1 Overall system

Table 1 Design target of workpiece holder

	Design target
Working range	20 µm
1st Resonance frequency	400 Hz



Fig. 2 Design of stage

수 있는 액츄에이터로 구성된다. Fig. 2와 같이 work table에 고정할 수 있도록 4개의 fix hole을 구성하였으며, x, y 방향으로 각각 변위를 측정하고 제어할 수 있도록 piezo part와 gap sensor part를 설계하였다. 다양한 workpiece와 결합할 수 있도록 cover hole을 설계하였다.

압전 액츄에이터는 짧은 구동 범위를 갖지만 정밀하고 강한 힘을 전달할 수 있다. 가공 시 진동에 의한 변위는 최대 20 um 정도로, 최대 30 um 변위를 제공하는 PI(physik instrumente)의 P216.2s를 액츄에이터로 선정하였다. 진동에 의한 변위를 측정하는 갭 센서(gap sensor)는 Lion precision의 CP290으로 선정하였다. 스테이지의 재질은 AL-6061으로 선정하였다.

스테이지의 변위는 유연 힌지의 형상에 따라 크게 변동한다. 힌지의 강성이 감소하면 변위는 증가하고 고유진동수는 감소하는 경향을 보인다. 고유진동수의 감소는 로봇 팔과의 공진을 야기할 수 있고 이는 가공 시 표면품질에 결함을 남길 수 있다. 공진을 회피할 수 있도록 스테이지의 고유진동수를 로봇 팔의 고유진동수보다 3~4배 높게 설계하였다. Table 2과 같이 치수들을 설정하였으며, Fig. 3에 변수를 나타내었다.

		Units: mm
		Units (mm)
	L	40
Hinge part variables	Т	5
	В	30
Body part variables	Gap	10
	Px	61
	Ру	30
	Xbody	200
	Ybody	170

Table 2 Parameters of variables



Fig. 3 Parameters of stage



## Fig. 4 Free body diagram of hinge 1

# 3. 모델링

위 스테이지의 작동 구조는 각각 하단, 우측에 있는 피에조 액츄 에이터가 가운데 body 방향으로 힘을 가해 body의 x, y위치를 제 어하는 형식이다. 이때 body와 연결된 4개의 L 형상 힌지들이 유 연하게 구동한다<sup>[9]</sup>. 각 힌지는 2개의 단순 합성보로 볼 수 있으며, 힌지의 거동은 Castigliano 이론을 통해 유도할 수 있다. 스테이지 의 우측 상단의 힌지부터 반시계 방향 순서대로, 1번 힌지의 자유 물체도는 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

H, V, K는 각각 x방향, y방향의 힘과 모멘트를 나타낸 것이고, F, M은 body 중심에 작용하는 힘과 모멘트이다. a, b는 body 중심 에서 힌지 작용점까지의 거리를 나타낸 것이다. 평형방정식을 통해 각 힌지에 작용하는 힘의 관계식을 식 (1)-(3)으로 나타내었다.

$$F_X = \sum_{k=1}^4 H_k \tag{1}$$

$$F_{Y} = \sum_{k=1}^{4} V_{k}$$
 (2)

$$M_Z = \sum_{k=1}^{4} (M_k + a_k V_k + b_k H_{k)}$$
(3)

각 힌지의 작용점에 Castigliano의 이론을 적용하면 12개의 방 정식을 얻을 수 있다. 식 (4)-(6)에서 &는 힌지의 각 축 방향으로의 변위를 나타내고, U는 각 힌지에 저장된 변형 에너지이다. Euler-Bernoulli 이론에 따라 힌지에 저장된 총 변형에너지를 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_{xk} = \frac{\partial U_k}{\partial H_k} \tag{4}$$

$$\delta_{yk} = \frac{\partial U_k}{\partial V_k} \tag{5}$$

$$\delta_{\theta k} = \frac{\partial U_k}{\partial M_k} \tag{6}$$

$$U_{k} = U_{k-1} + U_{k-2} = \int \left( M(x_{k}) / EI \right) dx_{k} + \int \left( \frac{M(y_{k})}{EI} \right) dy_{k}$$
(7)

Body 중심에서 힌지 작용점까지 변위 관계는 식 (8)-(10)으로 나타낼 수 있다. Body 중심부의 위치 변화는  $C(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta)$ , 힌지 작용점의 위치 변화는  $C_k(\delta_{xk}, \delta_{yk}, \delta_{\ell k})$ 로 나타내었다.

$$\delta_{xk} = \Delta_x - b_k \Delta_\theta \tag{8}$$

$$\delta_{yk} = \Delta_y + a_k \Delta_\theta \tag{9}$$

$$\delta_{\theta k} = \Delta_{\theta} \tag{10}$$

식 (4)부터 식 (10)까지, 6를 소거하여 정리하면 식 (11)-(13)을 얻을 수 있다.

$$\Delta_x - b_k \Delta_\theta = (3l^2 M_k + (8/3)l^3 H_k + l^3 V_k) / (2EI)$$
(11)

$$\Delta_y + a_k \Delta_\theta = (l^2 M_k + l^3 H_k + (2/3) l^3 V_k) / (2EI)$$
(12)

$$\Delta_{\theta} = (4lM_k + 3l^2H_k + l^2V_k)/(2EI)$$
(13)

$$\left[\omega_x \ \omega_y \ \omega_\theta\right] = \left[\sqrt{(K_x/m)} \ \sqrt{(K_y/m)} \ \sqrt{(K_\theta/j)}\right]$$
(14)

위 식에서 I은 보의 길이, E는 탄성계수이며 I는 중립축에서의 관성 모멘트를 나타낸다. @는 고유진동수, K는 스테이지의 강성을 나타내며 m은 질량, j는 2차 관성 모멘트를 의미한다. 이를 통해 힌지에 연결된 body의 변위를 구할 수 있고, 첫번째 고유 진동수도 식 (14)를 통해 구할 수 있다. 행렬식으로 나타내면 Fig. 5와 같이



Fig. 6 Static and modal analysis: (a) X-axis static deformation, (b) Y-axis static deformation, (c) 1<sup>st</sup> natural frequency (309.1 Hz), (d) 2<sup>nd</sup> natural frequency (315.4 Hz)

나타낼 수 있으며, 강성행렬을 의미한다.

위 모델링을 바탕으로 Matlab을 통해 변위와 진동수를 구해 FEM과 비교한 결과를 Table 3에 나타내었으며, FEM 결과값과 진동 mode를 Fig. 6에 나타내었다. 모두 낮은 오차범위를 가지며 모델링의 유효함을 검증하였다.

# 4. 최적설계

위 검증된 모델링을 바탕으로, 스테이지의 최적설계를 진행하였다.

스테이지의 치수들이 변화할 때 강성과 진동수, 구동 범위 등 치수들이

Table	3	Verifying	modeling
-------	---	-----------	----------

L = 40 mm, T = 5 mm					
Matlab FEM error					
Moving range (x)	28 um	28.1 um	0.4%		
Moving range (y)	28 um	29.1 um	3.8%		
First natural frequency	318.1 Hz	309.1 Hz	2.9%		
Second natural frequency	318.1 Hz	315.4 Hz	0.9%		



Fig. 7 Parameter analysis on, (a) L, (b) T, (c) B

복잡한 관계로 변화하기 때문에 관계를 잘 나타낼 수 있는 알고리즘이 필요하며, 알고리즘은 Matlab을 통해 SQP(sequential quadratic programming) 방법으로 구현하였다. 이는 제약조건이 있는 비선형 미분방정식의 해를 구할 수 있으나 전역최소값을 보장할 수 없으므로 변수의 초기 조건을 무작위로 선정하여 반복 실행하였다.

# 4.1 설계변수

위 시스템 상 스테이지의 주요 성능을 나타내는 특성은 강성과 진동수, 변위이다. 강성, 진동수, 변위 모두 힌지의 형상에 따라 크 게 변할 수 있다. 힌지의 주요 변수인 두께, 폭, 길이 값에 따라 스테이지의 특성에 미치는 민감도를 분석하기 위해 parameter analysis를 진행하였다. 모델링을 바탕으로 변수들의 50% 오프셋 을 주어 범위를 설정하고 스테이지의 x축 방향에 대해 진행하였고, 이 때 스테이지의 특성들에 대한 거동을 나타내었다.

Fig. 7의 모든 y축은 normalized value로 위 모델링 치수를 적용했 을 때 얻을 수 있는 결과값에 대해 증가한 비율을 나타낸다. L, T 변수에 대해 parameter analysis를 진행했을 때 normalized value 는 최대 8배까지 변화하는 것을 확인하였다. 또한 변위를 나타내는 delX 값은 T변수에 대해 더 민감하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 반면 강성을 나타내는 Kx값은 L변수에 대해 더 민감하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 고유진동수는 L, T 경우 모두 거의 선형적으로 감소, 증가하는 모습을 보인다. B 변수는 L, T변수에 비해 특성이 급격하게 변화하는 모습을 보이지 않는다. 세 특성



Fig. 8 Optimization target hinges

Table 4 Range of design variables

Units:	mn

		Units (mm)
Design	L	20 < L < 60
variables	Т	2.5 < T < 7.5

모두 거의 선형적으로 변화하는 모습을 확인할 수 있다. 위 parameter analysis 결과를 통해서 특성 값에 크게 영향을 미치는 인자는 L, T임을 파악할 수 있다. 따라서 최적설계의 목적으로 하는 설계 변수는 Fig. 8의 L, T로 고정하고, 범위는 모델링 수치에 대해 50% 오프셋을 적용하여 Table 4에 나타내었다.



Fig. 9 Convergence of (a) cost function, (b) hinge L, (c) hinge T

Table 5 Optimal design results

L (mm)	44.2	27.5	48.4	20.5	32.4	42.7	43
T (mm)	6.8	4.9	6.3	4.2	5.1	7.5	7.5

#### Table 6 Verifying optimized results

	Matlab	FEM	error
Moving range	25.1 µm	26.1 µm	3.8%
First natural frequency	526.7 Hz	513.54 Hz	2.6%

#### 4.2 목적함수

스테이지에 발생할 수 있는 공진을 회피하기 위해 스테이지의 첫번째 고유진동수를 최대화 할 수 있도록 식 (15)과 같이 목적함 수를 설정하였다.

$$f(L,T) = \frac{1}{\omega_1^2} \tag{15}$$

### 4.3 제약조건

설계제약조건은 총 3가지로 선정하였다. 위치 보상을 위한 구동 범위와, *θ*, 방향으로의 비틀림, 최소 고유진동수로 선정하였으며, 각 제약조건에 대한 값은 식 (16)-(18)에 나타내었다.

$$f \ge 400 \text{ Hz} \tag{16}$$

$$\Delta_{(moving range)} \ge 25 \text{ um} \tag{17}$$

$$\theta_{z, \text{ torsion}} \leq 10^{-6} \tag{18}$$

### 4.4 결과

위 조건들을 바탕으로 최적설계를 진행하였다. Fig. 9와 같이 초기 실행 조건을 달리하여 5회 수행했음에도 동일한 목적함수 값을 갖는 것을 확인했으며, 설계 목표를 모두 만족하였다. Table 5의 *S*<sub>n</sub>은 초기 실행값이며, 각 초기 조건마다 구한 최적 설계값은 *S*<sub>design</sub>으로 표기하였다.

얻은 최적 설계값을 FEA를 통해 비교했을 때의 오차는 Table 6에 표기했으며, 최적설계가 잘 이루어졌음을 확인하였다. FEM 해석은 상용 소프트웨어인 Inventor를 이용하였다.

# 5. 결 론

본 연구에서는 높은 강성을 가질 수 있도록 Crab-leg 형식의 Parallel Kinematics 유연힌지 스테이지를 밀링 가공 보상을 위하여 개발하였으며, 가공 보상을 위해 강성을 최대화 할 수 있도록 최적설계를 수행하였다. 최적설계된 스테이지는 26.1 μm 의 Moving range 성능을 가지며, 513.54 Hz의 1<sup>st</sup> Resonance frequency를 가짐을 확인하였다.

L 형상의 유연 힌지 구조에 대해 이론적인 모델링을 수행하였으 며, 이를 FEM simulation과 비교하여 정확도 5% 이내의 이론적 모델링을 구축하였다. 또한 구축된 모델링을 활용하여 시스템 설 계변수들의 민감도분석을 수행하고 최적설계를 수행하여 최적의 가공용 스테이지를 설계하였다.

향후 최적설계 된 스테이지를 활용하여 로봇 밀링가공을 수행 할 예정이며, 기존에 발생하던 진동을 스테이지를 통해 저감할 수 있을 것으로 기대한다. 진동 저감을 통해 로봇 밀링가공에서 Stability lobe를 더 넓게 가져갈 수 있으며, 가공물의 우수한 표면 조도를 획득할 수 있을 것으로 기대한다.

# 후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 "한/체코 국 제공동기술개발사업(No. P0019623)"과 2021년도 중소벤처기업 부의 기술개발사업 [S3143469-반도체 전공정 검사/계측/고진공 장비를 위한 초정밀 모션 스테이지 표준 플랫폼 개발] 지원에 의한 연구입니다.

# References

- Chen, F., Zhao, H., Ding, H., 2018, Eddy Current Damper Design for Vibration Suppression in Robotic Milling Process, 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 799-804, https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460693.
- [2] Yang, Y., Xu, D., Liu, Q., 2015, Milling Vibration Attenuation by Eddy Current Damping, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 81 445– 454, https://doi.org/10.1007/s00170-015-7239-3.
- [3] Hong, T. H., 2021, A Study on the Desgin and Control of Active Vibration Reduction Stage for Chatter Reduction, Master Thesis, Tech University of Korea, Republic of Korea.
- [4] Kim, J. J., Choi, Y. M., Ahn, D. H., Hwang, B. S., Gweon, D. G., Jeong, J. H., 2012, A Millimeter-range Flexure-based Nano-positioning Stage using a Self-guided Displacement Amplification Mechanism, Mech. Mach. Theory, 50 109-120, https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.11.012.
- [5] Jo, J.-H., Lee, J.-H., Shin, K.-W., Kim, T.-G., Kim, H.-Y., Lee, S.-W., 2018, 6-Axis Robotic Carbon Fiber Reinforced Plastic Drilling Process Using Real-Time Path Control, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 27:3 175-181, https://doi.org/ 10.7735/ksmte.2018.27.3.175.
- [6] Campatelli, G., Sallese, L., Scippa, A., 2015, Design of An Active

Workpiece Holder, Procedia CIRP, 34 217-222, https://doi. org/10.1016/j.procir.2015.07.041.

- [7] Cordes, M., Hintze, W., Altintas, Y., 2019, Chatter Stability in Robotic Milling, Robot. Comput.-Integr. Manuf., 55 11-18, https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.004.
- [8] Hong, T. H., Lee, J. H., Seo, C. H., Kim, K. H., Kim, H. Y., 2021, Vibration Reduction During Milling of Highly Flexible Workpieces using Active Workpiece Holder System, Rev. Sci. Instrum., 92:4 045105, https://doi.org/10.1063/5.0046394.
- [9] Kang, S., Lee, M. G., Choi, Y. M., 2020, Six Degrees-of-freedom Direct-driven Nanopositioning Stage using Crab-leg Flexures, IEEE-ASME Trans. Mechatron., 25:2 513-525, https://doi.org/ 10.1109/TMECH.2020.2972301.



### Suje Cho

Student in the Department of Mechanical Engineering, Konkuk Univerity.. His research interest is mechanical design of semiconductor equipment.

E-mail: jsj0414@konkuk.ac.kr



# Dahoon Ahn

Professor in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is precision motion mechanism and energy harvesting. E-mail: dhahn@seoultech.ac.kr



# Anmok Jeong

Researcher in the Department of Smart Manufacturing R&D System, Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is Machine.

E-mail: amjeong@seoultech.ac.kr



## Hak-Jun Lee

Senior researcher in the Department of Smart Manufacturing R&D System, Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is precision motion mechanism and semiconductor/display equipment. E-mail: hak1414@kitech.re.kr