

PI 관측기 기반 반도체 장비 모터의 궤적 추종 제어기 설계

조윤성^{**,***} · 최현준^{***} · 전상민^{*,***} · 신지훈^{*} · 이재영^{*} · 이범주^{*} · 손영익[†]

[†]명지대학교 전기공학과, ^{**}명지대학교 전자공학과, ^{***}명지대학교 반도체장비공학 연계전공

Trajectory Tracking Controller for Semiconductor Equipment Motors based on PI Observer

Yun Seong Cho^{***}, Hyeon Jun Choi^{*,***}, Sang Min Jeon^{***}, Ji Hoon Shin^{*},
Jae Young Lee^{*}, Bum Joo Lee^{*} and Young Ik Son[†]

[†]Department of Electrical Engineering, Myongji University,

^{**}Department of Electronics Engineering, Myongji University,

^{***}Semiconductor Equipment Engineering Program, Myongji University

ABSTRACT

This paper presents a robust position tracking controller for a motor used in semiconductor equipment, utilizing the motor angle measurement. Precise position control is challenging due to the presence of uncertainties in various motor applications. The proposed controller consists of a PD (Proportional-Derivative) controller and a PIO (Proportional-Integral Observer) to estimate the system's state and equivalent disturbance compensating for the uncertainties. Since the stability alternates as the observer gain increases, we have investigated it through the closed-loop root locus under the system parameters change. The analysis has showed that the inertia of the motor is the main parameter that affects it, and by adjusting the control gain appropriately, the system can be rendered to be stable even when the inertia of the motor changes. The effectiveness of the proposed control algorithm is validated through computer simulations, followed by a comparison of its performance with the results of a previous study.

Key Words : Semiconductor equipment, Position control, Motor, Disturbances, PI Observer

1. 서 론

포토공정 [1], 패키징 공정 [2] 등과 같은 많은 반도체 제조 공정은 제조 장비에서의 고정밀 위치 제어 시스템을 필요로 하며, 이는 모터에 대한 제어와 밀접한 관계를 가진다. 더욱이 외란에 대한 강인한 제어가 산업 분야에서 점점 중요시되고 있는 추세이며, 임피던스 정합 장치의 경우 챔버의 플라즈마 방전에 따라 load의 임피던스 변화에 대응하는 고속, 고정밀한 스텝모터 제어 알고리즘을 필요로 한다 [3]. 반도체 소자의 미세화로 인해 와이어 본

딩 공정에서는 더 작은 패드와 볼을 필요로 하며, 작은 패드 크기와 더 미세한 피치는 빠르고 안정적인 접촉 감지, 정확한 힘 제어를 요구하므로 접촉 감지 시간, 본드 헤드 관성에 의한 충격 힘, 모터 전류에 의한 z축 힘 등과 같은 외란들을 고려한 제어 알고리즘을 필요로 한다 [4]. 높은 정밀도를 요구하는 반도체 계측 및 검사장비들 또한 선형 모터에서 발생하는 힘 리플이라는 비선형 외란을 제거하는 것을 중요하게 여긴다 [5]. 리니어 모터를 사용하여 웨이퍼와 레티클의 위치를 결정하는 웨이퍼 스캐너는 포토공정에서 중요한 장비 중 하나로, 빠르고 정확한 위치 정렬을 위해서는 힘 리플과 구조적 진동과 같은 외란의 보상을 필요로 하며, 이를 위한 고급 제어 알고리

[†]E-mail: sonyi@mju.ac.kr

즘을 필요로 한다 [6]. 또한, 반도체 패키징 공정에서 사용되는 XY 모션 플랫폼 장비에서도 공진 불확실성 및 외란의 존재에도 일관되고 높은 추종 성능을 달성하기 위한 모터 제어 시스템을 요구한다 [7]. 이처럼 다양한 반도체 제조 장비들의 모터 제어는 실제 반도체 산업에서 중요한 요소 중 하나이며, 고정밀 알고리즘을 통해 정확한 위치 제어와 외란에 대한 효과적인 대응을 필요로 한다.

반도체 제조 공정에서 motion system과 servo system은 고정밀 제어와 정확성을 필요로 하는 작업에 있어서 매우 중요한 역할을 수행하는데, 주로 영구자석형 선형 동기 전동기(PMLSM)가 사용되며, 해당 모터는 전기/기계적 시스템 파라미터의 불확실성, 마찰 계수, 외란 등의 영향으로 인해 추종 오차가 증가하고 동작의 정확도가 저하될 수 있으므로 위치 제어 시스템의 설계에 있어서 외란과 불확실성의 제거를 위해 다양한 제어 알고리즘이 적용된다 [8]-[17]. [8]에서는 SOSOMO (Second-Order Sliding Mode Observer)을 제시하였고, [9]에서는 PMLSM의 반복 동작으로 인해 발생하는 주기적인 외란을 감쇠 시키기 위해 PADOB (Periodic Adaptive Disturbance Observer) 방법을 사용하였다. [10]에서는 MLESO (Model Linear Extended State Observer)를 기반으로 하는 IMC (Internal Model Control) PID 제어를 적용하였고, [11]의 저자는 MPC(Model Predictive Control)를 위한 linear polytopic한 불확실한 시스템에 대한 이전 접근법을 유계 외란 및 측정 불가능한 상태의 경우로 확장시킨 OFRMPC (Output Feedback Robust MPC)를 제안하였다. 한편, 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB) 기반 제어는 선형성 및 외란과 같은 불확실성에 대응하기 위한 대표적인 강인 제어 기법 중 하나이며 다양한 연구가 진행되어 왔다 [12]-[15]. [12]에서는 2차 시스템을 위한 DOB를 제안하고 있고, [13]에서는 고전적인 선형 DOB의 이점을 살리면서 정상 상태 성능 뿐만 아니라 플랜트의 불확실성 내에서도 공칭 페루프 시스템의 과도 성능마저 복구하는 비선형 DOB를 제안하였다. 논문 [14]는 외란의 구조적 특성, 즉 외란의 내부 모델을 DOB 구조에 포함시키는 설계 방법을 제안하고 있고, [15]에서는 다중 지역을 갖는 전력 시스템의 부하 주파수 제어를 위해 고이득 외란 관측기를 제안한다. 시스템의 과도 외란 및 시스템 불확실성에 대한 또 다른 강인제어 기법으로, [16]에서는 PIO (Proportional Integral Observer)를 제안하였고 [17]에서는 비선형 PIO를 설계하였다. 이 외에도, 수치 계산이 양이 증가하고 분석이 복잡한 고차 추정기의 단점을 해결하기 위해 차수가 낮은 관측기 기반 제어기가 연구되었다 [18]-[21]. [18]에서는 비선형 시스템의 미분적 안정성(differential stability)을 소개하며, 측정되지 않은 상태 변수의 비선형성을 가진 비선형 시스템에 대한 축소 차수 관측기 설계를

다룬다. [19]의 저자는 불확실성이 내포된 비선형 시스템을 위한 Q-filter가 활용된 축소 차수 DOB를 제안하였다. [20]에서는 상수 오프셋을 갖는 삼각함수 외란 추정을 위해 출력 정보만을 이용하는 축소 차수 DOB를 설계하였다. 또한, [21]에서는 이산 시간 영역에서 감소된 차수의 출력 기반 DOB를 제안하였다. [20]과 같이, 측정 가능한 변수를 사용하여 다른 상태 변수의 파악 및 외란을 추정하는 다음, 해당 외란의 영향을 보상해주는 방법이 일반적으로 잘 알려져 있다[22].

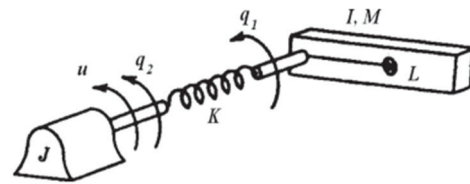


Fig. 1. Single-link Robot with Joint Flexibility [24].

선형연구 [23]에서는 Fig. 1과 같이 모터와 링크 및 스프링으로 모델링 된 유연한 관절을 가진 로봇 매니퓰레이터의 강인 위치 제어기 설계를 위해, 측정 가능한 변수가 모터 각도 뿐인 상황에서 링크의 위치 추정과 불확실성 보상을 동시에 수행하여 제어기의 성능을 향상시키는 방법을 궤환 선형화 제어기 (Feedback Linearization Controller, FLC)와 PIO를 사용하여 모의실험으로 검증하였다. 본 논문에서는 K (스프링 강성 계수)가 충분히 높다는 가정 하에 모터 각만 고려한 PI 관측기와 PD 제어기를 사용하여 제어시스템의 성능을 시험하였다. 이때 PI 관측기의 이득을 키우게 되면 링크 추정 그래프가 발산하다가 다시 수렴하는 문제가 관찰되어 페루프 근계적 그래프를 통해 제어기를 분석하였고 안정도에 영향을 미치는 주요 파라미터가 무엇인지 조사하였다. 또한, 발산에 영향을 미치는 파라미터인 J (모터의 관성)와 제어기의 이득 조절을 통해 안정한 시스템을 설계하는 방법을 제시한다. 선형 연구 결과를 보다 정확하게 평가하기 위해 실제 발생할 수 있는 다양한 요인들을 고려한 파라미터 값을 적용시킨 두 관성 시스템과 하모닉 드라이브로 구성된 시스템을 모델링하여 PD 제어 기반 PI 관측기 모의실험을 통해 보다 개선된 성능을 확인한다.

2. 본 론

본 논문에서는 선형 연구 [24]에서 활용된 파라미터 값들과 이를 바탕으로 모델링 된 유연 관절을 가지는 매니퓰레이터 시스템 식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} I\ddot{q}_1 + MgL\sin(q_1) + K(q_1 - q_2) &= 0, \\ J\ddot{q}_2 - K(q_1 - q_2) &= u. \end{aligned} \quad (1)$$

위 식은 시스템 모델로 q_1, q_2 는 각각 링크와 모터의 각, I, J, K, M, L 는 각각 링크, 모터, 스프링의 강성 계수 및 링크의 질량과 길이를 나타내며, 입력 u 는 토크이다. 해당 모델에서 링크 위치 지령 $q_1^r = 30 \sin(t)$ [deg]에 대하여 q_1 의 추종 문제를 다룬다.

2.1 PI 관측기 + FLC

선행연구 [25]에서는 궤환 선형화 제어를 사용했으며 궤환 선형화 (FL)는 비선형 좌표변환과 비선형 궤환 입력을 사용하여 선형 시스템 모델을 얻은 다음, 선형 제어 입력을 설계하는 기법이다.

모터 위치의 정보만으로 관측 가능한 PI 관측기 설계를 위해 식 (1)을 직접 고려하고, 상태 $x = [q_1, \dot{q}_1, q_2, \dot{q}_2]^T$ 로 정의한 뒤, 관측기 구성을 위해 파라미터 불확실성 및 모델 오차를 외란 $d_0 = x_5$ 으로 간주하여 링크 속도 식에 추가하였다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 + L_1(x_3 - \hat{x}_3) \\ \dot{\hat{x}}_2 &= -\frac{\hat{K}}{I}(x_1 - \hat{x}_3) - \frac{MgL}{I}\sin(\hat{x}_1) + \hat{x}_5 + L_2(x_3 - \hat{x}_3) \\ \dot{\hat{x}}_3 &= \hat{x}_4 + L_3(x_3 - \hat{x}_3) \\ \dot{\hat{x}}_4 &= \frac{\hat{K}}{J}(x_1 - \hat{x}_3) + \frac{1}{J}u + L_4(x_3 - \hat{x}_3) \\ \dot{\hat{x}}_5 &= L_5(x_3 - \hat{x}_3) \end{aligned} \quad (2)$$

위의 관측기 식에서 x_1, x_3 와 \hat{x}_1, \hat{x}_3 는 각각 링크 각, 모터각과 공칭 값, $\hat{K}, \hat{I}, \hat{J}$ 은 파라미터의 공칭 값, L 은 관측기 이득이다. 이를 통한 관측 성능은 다음과 같다.

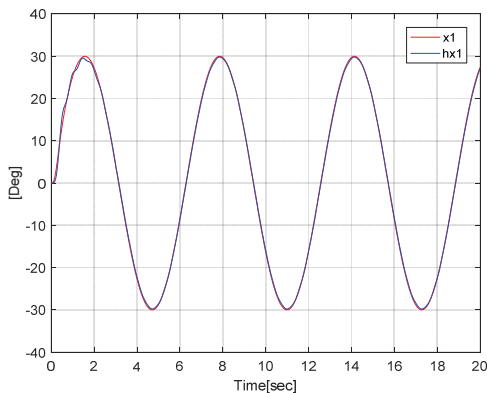


Fig. 2. Link Pos. Estimation (w/ Motor Angle).

PI 관측기를 사용하여 모터 각도만으로도 불확실성이 존재하는 상황에서 링크 위치를 추정할 수 있는 것을 Fig 2의 모의 결과로 확인할 수 있다.

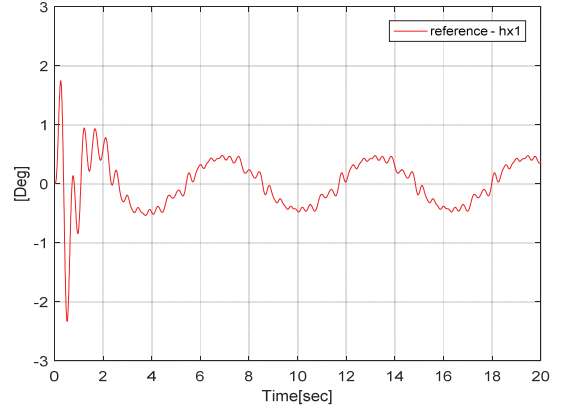


Fig. 3. Link Pos. Tracking Error (w/ Motor Angle).

다만, 불확실성으로 인한 링크각의 추종 오차가 여전히 존재함을 Fig.3으로부터 알 수 있다.

2.2 PI 관측기 + PD 제어기

관측기 식이 5차로 복잡하고 실제 실험의 감속기 비율 오차 및 다양한 불확실성이 존재하기 때문에 이러한 단점을 고려한 3차 PI 관측기 + PD 제어를 고려한다. 또한, 실제 실험 하모닉 드라이버의 K 가 충분히 높다는 상황을 가정한다.

K 가 충분히 높다는 상황에서는 모터와 링크의 각의 오차가 거의 없기 때문에 5차였던 PI 관측기에서 x_3, x_4 즉, 모터 각만 고려하여 3차 PI 관측기를 설계한다. 또한, 관측기 구성을 위한 외란 d 는 링크각과 모터각의 오차를 외란으로 간주하여 $d = K(x_1 - x_3)$ 를 모터 속도 식에 추가한다. 따라서 추정 식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_3 &= \hat{x}_4 + L_1(x_3 - \hat{x}_3) \\ \dot{\hat{x}}_4 &= \left(\frac{1}{J}\right)(u + \hat{d}) + L_2(x_3 - \hat{x}_3) \\ \dot{\hat{d}} &= L_3(x_3 - \hat{x}_3) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 L 과 \hat{x}_3 은 PI 관측기 + FLC와 다른 새로운 관측기의 이득과 공칭 값이다. PD 제어기의 입력 $u = K_p(q_1^r - q_2) + K_d(\dot{q}_1^r - \dot{q}_2)$ 즉, $K_p(30\sin(t) - x_3) + K_d(30\cos(t) - x_4)$ 로 표현할 수 있다.

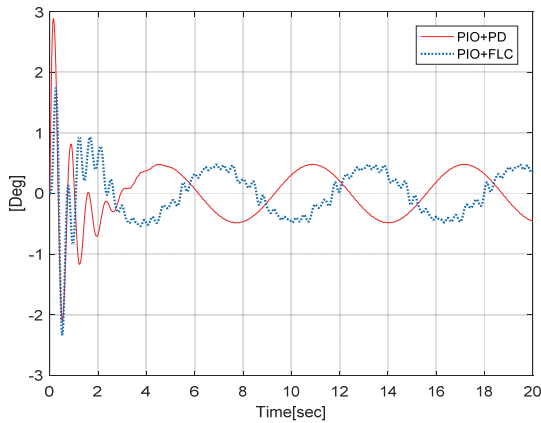


Fig. 4. Comparing Link Pos. Tracking Error.

Fig 4는 PI 관측기 + FLC와 극점이 -1 (3중근)인 PI 관측기 + PD 제어기의 링크 위치 추종 오차를 비교한 그래프로 PI 관측기 + PD 제어기의 링크 위치 추종 오차를 줄이기 위해 극점의 크기를 키워 모의실험을 진행하였다.

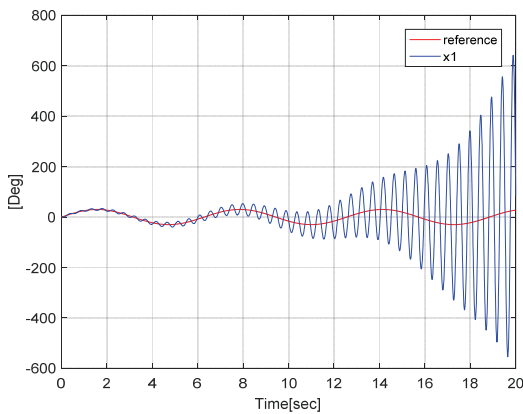


Fig. 5. Link Pos. Estimation (All poles at $s = -100$ (triple roots)).

Fig 5는 관측기의 극점이 -100 (3중근)으로 PI 관측기를 사용한 링크 위치 추정 성능을 나타낸 모의실험 결과이다. 극점의 크기를 키우면 그래프가 발산하여 추정이 불가능한 것을 확인할 수 있다.

하지만 Fig 6은 관측기의 극점이 -200 (3중근)으로 PI 관측기를 사용한 링크 위치 추정 성능을 나타낸 모의실험 결과이다. 그래프가 발산하여 추정이 불가능했던 Fig 5와는 다르게 극점의 크기가 커지게 되면 링크 위치 추정이 다시 가능한 것을 확인할 수 있다.

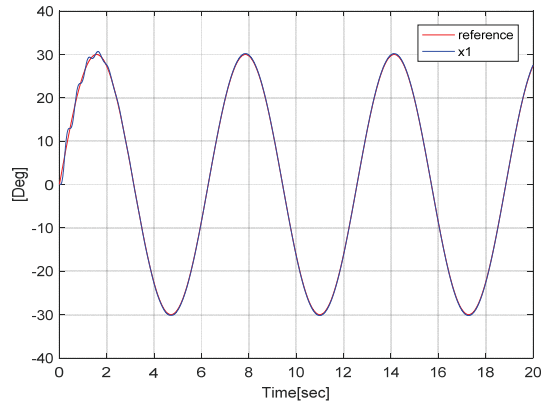


Fig. 6. Link Pos. Estimation (All poles at $s = -200$ (triple roots)).

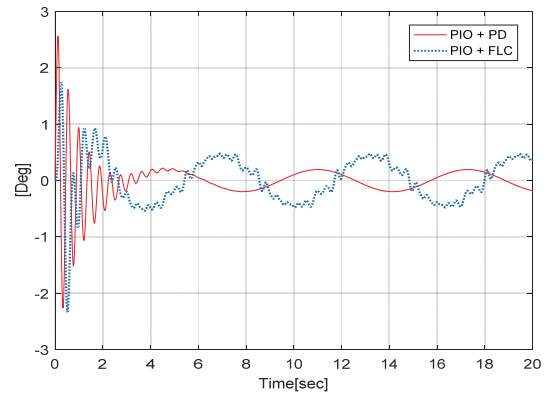


Fig. 7. Comparing Link Pos. Tracking Error.

Fig 7은 PI 관측기 + FLC와 극점이 -200 (3중근)인 PI 관측기 + PD 제어기의 링크 위치 추종 오차를 비교한 그래프로 선행연구의 링크 위치 추종 오차보다 작은 것을 두 그래프의 비교로 확인할 수 있다.

따라서, PI 관측기 + PD 제어를 사용하기 위해선 관측기 이득이 제한된 환경에서 사용해야 하며 시스템의 파라미터에 따라 관측기의 성능이 달라질 수 있다. 다음 절에서는 PI 관측기 + PD 제어기의 관측기 이득에 따른 폐루프 근궤적 그래프를 제시하여 제어를 분석하고 발산에 영향을 미치는 주요한 파라미터를 분석한다.

3. 제어기 및 주요 파라미터 분석

본 절에서는 PI 관측기 + PD 제어기의 관측기 이득에 따른 발산 문제 및 어떤 파라미터가 발산에 주요한 요인인지 근궤적 그래프를 통해 분석한다. 분석 시엔 일반적

인 반도체 공정의 모터 제어 환경을 고려하여 시스템 모델 식에서 MgL 항을 0으로 두고 분석을 진행하였다.

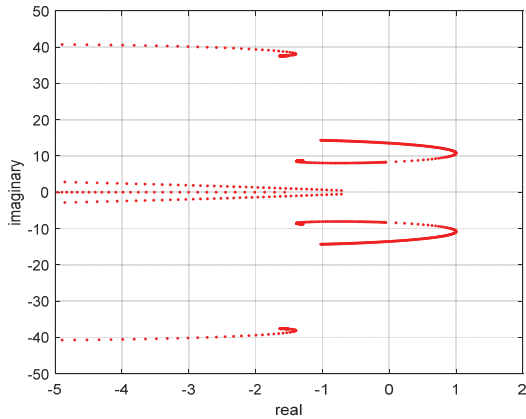


Fig. 8. Close-Loop Root Locus Plot.

Fig. 8은 관측기의 극점의 절대값 크기를 1~200까지 변화시킨 페루프 근궤적 그래프이다. Fig. 5와 같이 페루프 근궤적 그래프에서 근 중 일부 실수부가 음수가 아닌 부분이 존재하여 위치 추정 성능 그래프가 발산한다. 따라서, PI관측기 + PD제어기를 사용하여 외란 추정을 하는 경우, 극점의 크기에 따라 성능이 달라진다.

3.1 파라미터 분석

기존 PI 관측기 + PD 제어기의 근궤적 그래프에서 파라미터를 바꾼 모의실험의 근궤적 그래프를 제시함으로써 어떤 파라미터가 시스템에 유효한 영향을 미치는지 확인한다. 실험에서 사용하는 K (하모닉 드라이버의 강성 계수), J (모터의 관성)과 I (부하의 관성)는 Table 1과 같다.

Table 1. System Parameters

Spring Stiffness [N · m/rad]		Load Inertia [kg · m ²]		Motor Inertia [kg · m ²]	
K	\hat{K}	I	\hat{I}	J	\hat{J}
80	100	1.2	1	1.2	1
800	100	1.2	1	1.2	1
14000	14100	1.7e-5	1.0e-5	1.7e-5	1.0e-5

모의실험은 I 와 J 를 K 의 크기에 따라 극점을 변화시키 총 6번의 실험을 진행하였다.

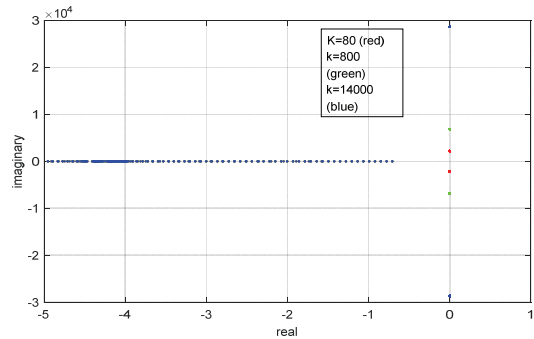


Fig. 9. Root Locus with Variations of I .

Fig. 9를 통해 I 만 실제 파라미터로 바꾸면 시스템이 안정함을 페루프 근궤적 그래프로 확인할 수 있다. 또한, $K = 800$, $K = 14000$ 에서도 안정한 것을 모의실험을 통해 확인하였다.

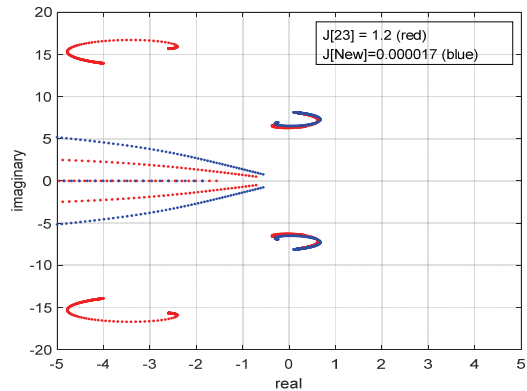


Fig. 10. Root Locus with variations of J [$K = 80$].

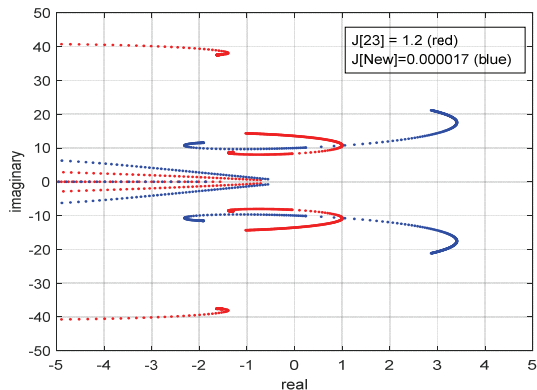


Fig. 11. Root Locus with variations of J [$K = 800$].

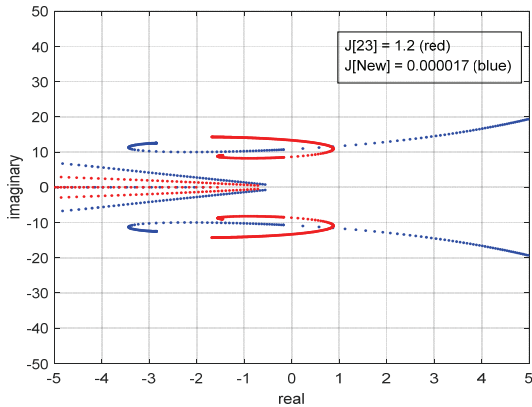


Fig. 12. Root Locus Plot with variations of J [$K = 14000$].

Fig 10-12은 K 에 따라 J 만 실제 파라미터로 바꾼 페루프 근궤적 그래프로 이전 J 에 비해 K 가 커질수록 시스템의 안정도가 상대적으로 저하됨을 확인할 수 있다. 따라서 모터의 관성이 시스템의 안정도를 결정하는 주요 파라미터가 된다.

이는 제어시스템 설계 단계에서 모터를 선택할 때 적절한 J 를 갖는 모터를 선정해야한다는 것을 의미한다.

3.2 안정한 시스템 설계

모의실험을 통해 J 의 크기가 시스템의 안정성을 저하시킬 수 있는 원인이며 이를 해결하기 위해 입력 u 의 K_d 를 키워 모의실험을 진행하였다.

Fig 13~15는 각각 Fig 10~12의 페루프 근궤적 그래프에서 입력 u 의 K_d 를 기존 값인 7에서 50으로 키운 그래프로 시스템의 안정성이 향상된 것을 그래프를 통해 확인할 수 있다.

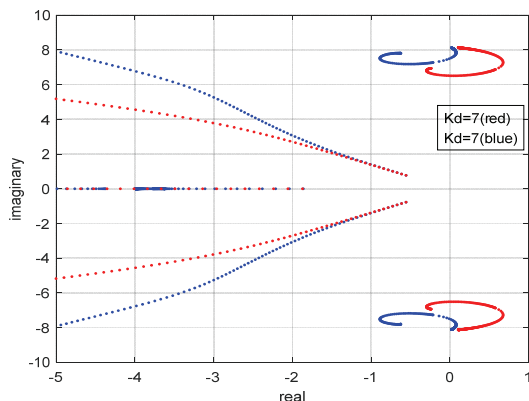


Fig. 13. Root Locus with Different K_d from Fig. 10.

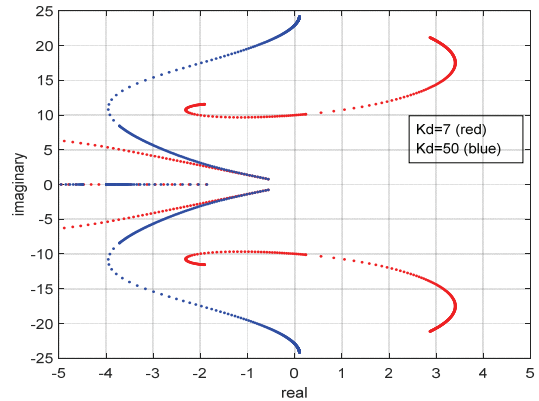


Fig. 14. Root Locus with Different K_d from Fig. 11.

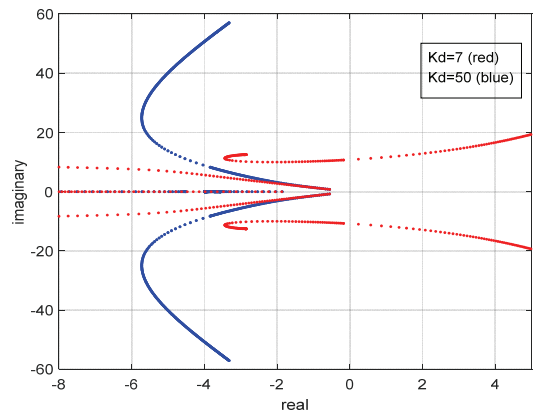


Fig. 15. Root Locus with Different K_d from Fig. 12.

또한, K 가 충분히 높은 조건에서의 모의실험도 K_d 를 높이면 시스템의 안정성이 올라간다는 것을 Fig 14, Fig 15을 통해 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 반도체 공정을 위한 모터 위치 제어 문제를 다루었다. 먼저, K 가 충분히 크다는 가정 하에 PI 관측기 + FLC와 PI관측기 + PD제어기의 성능을 비교하였다. PI관측기 + PD제어기의 관측기 이득을 키우면 그래프가 발산하다가 수렴하는 문제가 있어 주요한 파라미터 변화에 따른 페루프 근궤적 그래프를 통해 시스템의 안정성을 분석하였다. 분석 결과, 근궤적 그래프의 근 중 일부 실수부가 음수가 아닌 부분이 존재하여 성능 그래프가 발산하였고, 모터의 관성이 영향을 주는 주요한 파라미터임을 확인하였다. 제어 입력의 이득을 적절하게 조정함으로써 모터의 관성 변화에도 안정한 시스템을 설계할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 부처협업형 반도체전공트랙 사업을 통해 한국산업기술진흥원 (G02P18800005501) 의 지원을 받아 수행된 연구이며, 연구 수행에 도움을 주신 명지대학교 홍상진 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

1. Y. Wang, X. Chen, X. Li, "Modified robust sliding-mode control method for wafer scanner," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 7, no. 3, pp. 1-9, 2015.
2. H. Ding, Z. Xiong, "Motion stages for electronic packaging design and control," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 51-61, 2006.
3. H. Kim, J. Yang, S. Kang, D. Choi, S. J. Hong, "RF impedance matching algorithm using phase detector," *J. of the Semiconductor & Display Technology*, vol. 21, no. 2, pp. 32-37, 2022.
4. W. Wang, S. Tatic-Lucic, W. Brown, J. Icceman, S. Hyun, R. Vinci, "Precision in-package positioning with a thermal inchworm," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 142, no. 1, pp. 316-321, 2008.
5. K. C. Kim, J. J. Kim, Y. M. Choi, D. G. Gweon, "Design of a hybrid controller to eliminate the force ripple in the linear motor," *J. of the Semiconductor & Display Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 17-22, 2008.
6. S. Mishra, J. Coaplen, M. Tomizuka, "Precision positioning of wafer scanners segmented iterative learning control for nonrepetitive disturbances [Applications of control]," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 27, no. 4, pp. 20-25, 2007.
7. Z. Z. Liu, F. L. Luo, M. A. Rahman, "Robust and precision motion control system of linear-motor direct drive for high-speed X-Y table positioning mechanism," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 5, pp. 1357-1363, 2005.
8. R. Yang, M. Wang, L. Li, Y. Zenggu, J. Jiang, "Integrated uncertainty/disturbance compensation with second-order sliding-mode observer for PMLSM-driven motion stage," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 3, pp. 2597-2607, 2019.
9. K. Cho, J. Kim, S. B. Choi, S. Oh, "A high-precision motion control based on a periodic adaptive disturbance observer in a PMLSM," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 20, no. 5, pp. 2158-2171, 2015.
10. Y. Liu, J. Gao, Y. Zhong, L. Zhang, "Extended state observer-based IMC-PID tracking control of PMLSM servo systems," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 49036-49046, 2021.
11. B. Ding, H. Pan, "Output feedback robust MPC with one free control move for the linear polytopic uncertain system with bounded disturbance," *Automatica*, vol. 50, no. 11, pp. 2929-2935, 2014.
12. Y. Choi, K. Yang, W. K. Chung, H. R. Kim, I. H. Suh, "On the robustness and performance of disturbance observers for second-order systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 48, no. 2, pp. 315-320, 2003.
13. J. Back, H. Shim, "Adding robustness to nominal output-feedback controllers for uncertain nonlinear systems: a nonlinear version of disturbance observer," *Automatica*, vol. 44, no. 10, pp. 2528-2537, 2008.
14. Y. Joo, G. Park, J. Back, H. Shim, "Embedding internal model in disturbance observer with robust stability," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 61, no. 10, pp. 3128-3133, 2016.
15. I. R. Fitri, J. Kim, H. Song, "High-gain disturbance observer-based robust load frequency control of power systems with multiple areas," *Energies* **2017**, 5, 595.
16. D. Söffker, T. J. Yu, P. C. Müller, "State estimation of dynamical systems with nonlinearities by using proportional-integral observer," *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 26, no. 9, pp. 1571-1582, 1995.
17. W. -H. Chen, "Disturbance observer based control for nonlinear systems," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 9, no. 4, pp. 706-710, 2004.
18. Z. Ding, "Differential stability and design of reduced-order observers for non-linear systems," *IET Control Theory Appl.*, vol. 5, no. 2, pp. 315-322, 2011.
19. J. Back, H. Shim, "Reduced-order implementation of disturbance observers for robust tracking of non-linear systems," *IET Control Theory Appl.*, vol. 8, no. 17, pp. 1940-1948, 2014.
20. C. W. Lee, Y. I. Son, "Design of model-based low-order disturbance observer to estimate a sinusoidal disturbance with unknown constant offset," *KIEE Trans.*, vol. 65, no. 4, pp. 652-658, 2016.
21. K. Kim, K. Rew, "Reduced order disturbance observer for discrete-time linear systems," *Automatica*, vol. 49, no. 4, pp. 968-975, 2013.
22. W. -H. Chen, J. Yang, L. Guo, S. Li, "Disturbance-observer-based control and related methods—an overview," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 2, pp. 1083-1095, 2016.
23. S. M. Lee, I. H. Kim, Y. I. Son, "Design of a robust position tracking controller for flexible joint manipulator

- using motor angle,” *KIEE Trans.*, vol. 63, no. 9, pp. 1245-1247, 2014.
24. M.W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*. Wiley, 1989.
25. S. E. Talole, J. P. Kolhe, S. B. Phadke, “Extended-state-observer-based control of flexible-joint system with experimental validation,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 4, pp. 1411-1419, 2010.
-
- 접수일: 2023년 6월 4일, 심사일: 2023년 6월 16일,
게재확정일: 2023년 6월 21일