

정전용량 센서를 이용한 나노급 이송장치의 시스템 식별에 관한 연구

이재호, 김승현, 정준홍, 박기현
 성균관대학교 정보통신공학부

A Study on System Identification of Nano-scale Stage Using Capacitive Sensor

Jeaho Lee, Seunghyun Kim, Joonhong Jung, Kiheon Park

School of Information and Communication Eng., SungKyunKwan University

Abstract - In many cases the systems are so complex that it is not possible to obtain reasonable models using physical laws. Also a model based on physical laws contains a number of unknown parameters even if the structure is derived from physical laws. These problems can be solved by system identification.

In this paper, a nano stage system is selected as an example for system identification. The transfer functions of this system is derived by using state-space model structure based on input/output data through experiment

같이 구성되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 나노 스테이지(P-621.1CL)의 내부 구성으로는 스테이지의 구동을 위한 PZT 액츄에이터와 이동 변위를 검출하기 위한 정전용량 센서로 구성되어 있으며 외부 장치로는 PZT에 인가 되는 전압을 증폭하기 위한 전력 증폭기(LVPZT-Amplifier : E-505), PZT의 구동에 대한 비선형성인 히스테리시스를 보정하기 위한 나노 스테이지 제어기(PZT-Servo Controller), 그리고 입력전압과 변위를 모니터링하고 컴퓨터와 통신하기 위한 디스플레이/인터페이스(Display/Interface : E-516) 장치로 구성되어 있다.

1. 서 론

나노 기술은 전기전자 분야, 생명공학, 초정밀기계분야 등 초정밀 측정 기술 및 가공 기술에 널리 응용되고 있으며 몇몇 분야에서는 실용화 되고 있다. 이 기술은 나노급 측정 기술과 나노급 이송장치(nano-stage) 개발에 의해 이루어질 수 있는 기술이며 현재 수십 나노급 정밀도를 갖는 측정 기술과 이송장치가 개발된 상태이고 반도체 제조 공정, 초정밀 절삭기 등 여러 산업 분야에서 널리 사용되고 있다. 나노급 측정 기술로는 대표적으로 크게 비 접촉식 센서의 일종인 레이저 간섭계와 접촉식 센서인 정전 용량 센서로 나눌 수 있으며 레이저 간섭계의 환경오차에 대한 개선을 위해 두 센서를 혼합한 형태를 사용하기도 한다. 나노급 이송장치 기술은 구동계로 분해능이 높고 온도과 습도 등 환경에 덜 민감한 PZT를 많이 사용하고 있다. 나노급 변위를 제어하기 위해서 이송장치와 센서 간에 동적특성을 해석하는 것이 필요하며 시스템에 대한 정확한 수학적인 모델링이 필요하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 구동계로 PZT를 사용하고 변위 측정 센서로 정전용량 센서를 사용하는 PI사의 나노급 이송장치의 동적특성을 분석하기 위해 이송장치의 전달함수를 구하고자 한다. 일반적으로 사용하는 물리 법칙을 이용하여 시스템을 정확하게 모델링하기 위해서는 스테이지의 마찰계수, 관성 모멘트, PZT의 인장력 등 정확한 시스템의 물리량을 알아야 가능하다. 이런 물리량을 정확하게 아는 것은 불가능하기 때문에 시스템의 각 파라미터 값을 추정하는 방법인 시스템 식별법(system identification)을 사용하여 정확한 시스템의 전달함수를 추정하고자 한다.

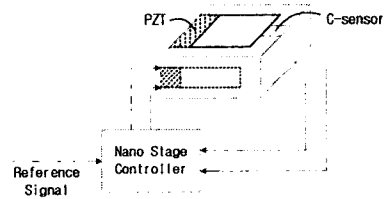


그림 1 나노 구동 시스템의 구성도

2.1.2 나노 구동 시스템의 주파수 특성 분석

시스템 식별에 앞서 먼저 수행해야 할 부분이 분석 가능한 한도 안에서 시스템의 동적 특성을 분석하는 것이 필요하다. 따라서 나노 구동 시스템의 주파수 특성을 분석하기 위해 PZT에 인가되는 신호로 0.1Hz부터 250Hz로 주파수가 시간에 비례하여 변하는 처프 신호(chirp signal)를 사용하였으며 상한 주파수를 250Hz로 선택한 이유는 시스템의 공진 주파수가 237.8Hz 부근에서 발생하기 때문이다. 그림 2는 dSPACE(ds1104)를 이용하여 처프 신호를 PZT에 인가하였고 그에 따른 주파수 응답을 그래프로 도식한 그림이다.

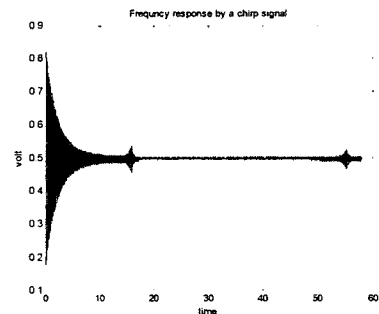


그림 2 실제 시스템의 chirp 신호에 대한 주파수 응답

2. 본 론

2.1 나노 구동 시스템

2.1.1 나노 구동 시스템의 구성

본 연구에서 사용하는 나노 구동 시스템은 그림 1과

그림에서 살펴본 바와 같이 적용된 주파수 대역에서 2개의 모드가 나타남을 알 수 있다. 그림 3과 4는 함수 발생기를 사용하여 각 모드에 대한 주파수를 알아보았다.

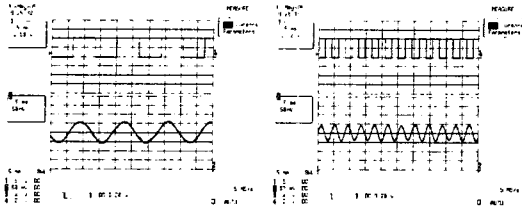


그림 3 제 1 모드 : 74Hz
그림 4 제 2 모드 : 237.8Hz

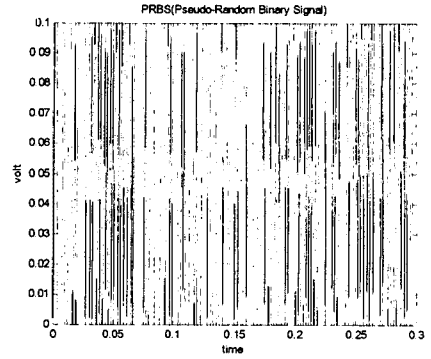


그림 6 PRBS 신호 생성

2.2 나노 구동 시스템의 전달함수 식별

2.2.1 시스템 식별 절차

나노 구동 시스템의 전달함수를 식별하기 위한 식별 절차는 그림 5와 같이 실험의 계획, 자료수집, 모델 구조의 선택, 모델 선정 방법 선택, 파라미터 추정, 모델 검증의 순서로 진행되며, 이와 같은 과정을 추정된 모델의 타당성이 검증될 때까지 반복하게 된다.[1],[2]

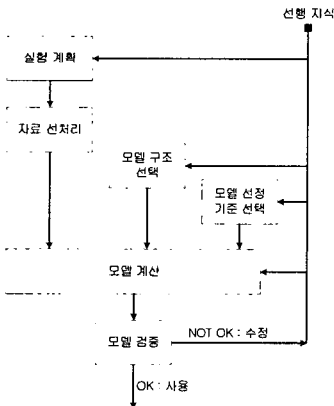


그림 5 시스템 식별 절차

2.2.2 모델 구조 선택

parametric 식별 방법에서 사용되는 대표적인 모델은 ARX 모델, ARMAX 모델, OE(output error) 모델, BJ(box jenkins) 모델, 그리고 상태 공간(state-space) 모델이 있다. 본 연구에서는 일반적으로 파라미터 추정 성능이 우수한 상태 공간 모델을 사용하였다. 상태 공간 모델의 모델 구조는 다음과 같다.[3],[4]

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + Ke(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + e(t)$$

2.2.3 PRBS(pseudo-random binary signal)생성

시스템 식별에 사용되는 입력 신호로는 시스템의 동적 특성이 출력에 모두 나타나도록 입력을 선택해야 한다. 이런 입력으로는 임펄스 신호가 있으며 이 신호를 실제 시스템에 인가하지 못하므로 임펄스 신호와 유사한 특성을 가지는 PRBS(pseudo-random binary signal)를 선택하여 시스템의 동적특성을 출력으로부터 나타내게 한다. 그림 6은 나노 구동 시스템의 입력으로 사용되는 PRBS신호이며, 이 신호는 MATLAB의 함수를 이용하여 생성하였다.[4]

2.2.4 입/출력 자료

입/출력 자료는 PZT에 인가하는 PRBS 신호와 정전 용량 센서에서 나오는 출력신호를 dSPACE Trace[5]를 이용하여 수집하였다. 그림 7은 나노 구동 시스템의 입/출력 자료이다.

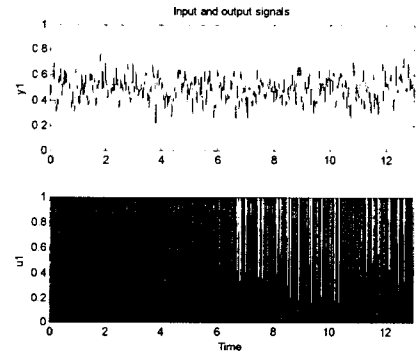


그림 7 나노 구동 시스템의 입/출력 자료

2.2.5 시스템 식별 과정

입/출력 자료를 수집하여 MATLAB의 GUI-identification 프로그램을 사용하여 시스템 식별을 수행하였다. 시스템 구조는 상태 공간 모델을 사용하였고, 상태 공간 모델의 차수를 바꿔가면서 시행착오적인 방법을 통해 가장 적절한 모델 차수를 선택하였다. 모델 검증(model validation)은 1차적으로 실제 시스템과 추정 모델에 대한 추정 성능 비율(fit rate)로 분석하였으며, 2차적인 검증 방법으로는 나머지 해석(residual analysis) 중 자기상관관계(auto-correlation)와 상호상관관계(cross-correlation) 검증을 이용하였다.

그림 8은 상태 공간 모델의 차수를 13차로 적용하였을 때 실제 시스템의 출력과 추정 모델의 출력을 일치성을 비교한 출력 그래프이다. 이때 얻어진 추정 성능은 97.6842%로 추정 성능을 우수함을 1차적으로 입증하였다. 그림 9는 추정 모델에 대한 2차적인 모델 검증으로 상관관계 그래프를 통해 모델의 타당성을 판별하였다. 두 상관관계 그래프는 모두 confidence level안에 존재함으로 모델의 타당성이 입증되었으며, 자기상관관계는 미지의 파라미터가 얼마나 정확하게 추정되었는지를 나타내며, 상호상관관계는 잡음이 없는 모델이 실제 시스템과 얼마나 잘 일치하는지를 나타낸다. 그림 10은 추정된 모델의 주파수 응답 곡선을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 1모드와 2모드가 추정 모델에서 잘 나타남을 알 수 있다.

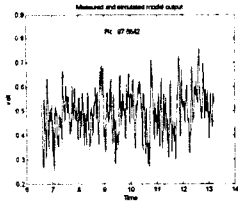


그림 8 실제 시스템의 출력과 추정 모델의 출력의 일치성

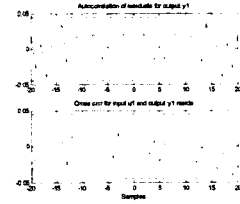


그림 9 추정 모델에 대한 상관관계 그래프

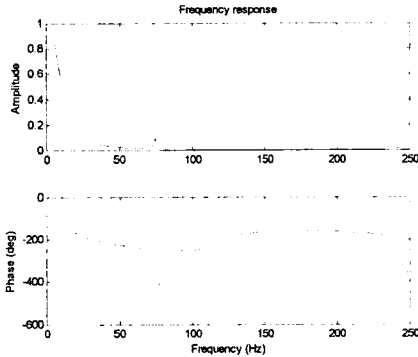


그림 10 추정 모델의 주파수 응답 곡선

2.2.6 모델 축소(model reduction)

시스템 식별에서 얻어진 모델의 차수는 13차임으로 제어를 목적으로 이 모델을 사용하는 것은 제어기 설계에 있어 어려운 요소로 작용한다. 따라서 식별된 모델의 차수를 축소하여 적절한 차의 모델을 구해야 한다. 그림 11은 6차로 모델 축소하여 얻어진 주파수 응답 곡선이다. 이 그래프에서도 마찬가지로 두 모드가 잘 표현되었음을 알 수 있다.

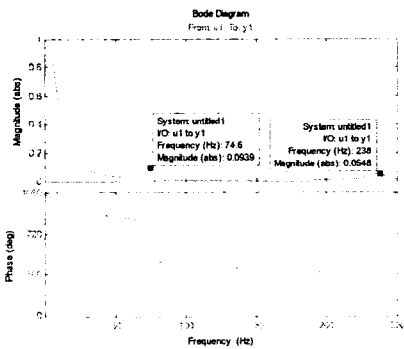


그림 11 6차로 모델 축소를 통한 주파수 응답 곡선

2.2.7 나노 구동 시스템의 전달함수 식별 결과

6차로 모델 축소된 나노 구동 시스템의 전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{0.008531s^6 - 9.263s^5 + 2.731e^4s^4 - 1.949e^7s^3 + 1.265e^{10}s^2 - 4.022e^{12}s + 1.562e^{15}}{s^6 + 138.8s^5 + 2.44e^6s^4 + 2.386e^8s^3 + 4.949e^{11}s^2 + 4.368e^{13}s + 1.578e^{15}} \quad (2)$$

그림 12는 식(2)의 chirp 신호를 인가하여 얻어진 주파수 응답 곡선이다. 이 그래프의 결과가 실제 시스템의 주파수 응답 곡선과 일치함을 알 수 있다.

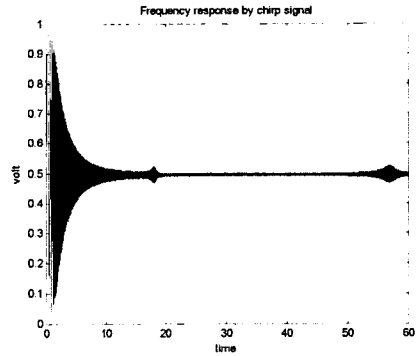


그림 12 추정 모델의 chirp 신호에 대한 주파수 응답

3. 결 론

본 연구에서는 나노 구동 시스템의 전달함수를 시스템 식별법을 이용하여 정확한 수학적 모델을 구하였다. 실제 시스템의 주파수 응답 곡선에서 나타나는 2개의 모드가 추정 모델의 주파수 응답 곡선에서 모두 정확한 주파수에서 나타남을 확인하였으며, 시스템 식별법을 통해 얻어진 추정 모델의 추정 성능을 실제 시스템에 대한 추정 모델의 일치성과 자기상관관계 그래프와 상호상관관계 그래프를 통해 입증하였다. 향후 본 논문에서 얻어진 전달함수를 이용하여 나노 구동 시스템의 변위 제어 및 속도 제어에 적용될 제어기 설계에 이용될 수 있을 것이다.

본 연구는 과학 기술부 목적 기초 연구(과제번호: R01-2004-000-10338-0) 지원으로 수행되었음

[참 고 문 헌]

- [1] Lennart Ljung, "System Identification Theory for the user", Prentice Hall, 1999.
- [2] Rolf Johansson, "System Modeling and Identification", Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993.
- [3] Lennart Ljung, "System Identification Toolbox For Use with MATLAB", The MathWorks Inc., May 1995.
- [4] Stacy S. Wilson, Charles L. Carnal, "System Identification with disturbances", Department of Electrical Engineering Tennessee Technological University Cookeville, TN 38505
- [5] 최수영, "아라고 원판 시스템을 이용한 파라미터 모델 식별에 관한 연구", 2001년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2001.7.18-20.