

## 2축 정밀 스테이지의 강인 최적 제어

### Robust optimization control of two-axes precise stage

박흥석† · 김영식\* · 김인수\*

Heung-Seok Park, Yeung-Shik Kim and In-Soo Kim

#### 1. 서 론

본 논문에서는 압전소자를 작동기로 사용하여 2축 정밀 스테이지의 운동을 제어한다. 스테이지의 동적특성은 주파수영역에서의 커브피팅(curve fitting)방법으로 모델링 되고 스테이지의 구조적 특성에 의해 발생하는 연계효과를 FIR 필터 형태의 비연계기를 통해 최소화 시킨다.

제어기 설계를 위해 LQG/LTR를 제어기법을 사용하며 루프전달회복 설계과정에서 제어입력의 포화상태를 Lyapunov 행렬 방정식과 선형 행렬 부등식을 이용하여 제어입력의 포화상태가 발생하는 경우에도 제어계의 안정성이 보장되는 최적의 설계값을 찾는다.

#### 2. 스테이지 모델링

Fig.1은 2축 정밀스테이지의 제어시스템 구성요

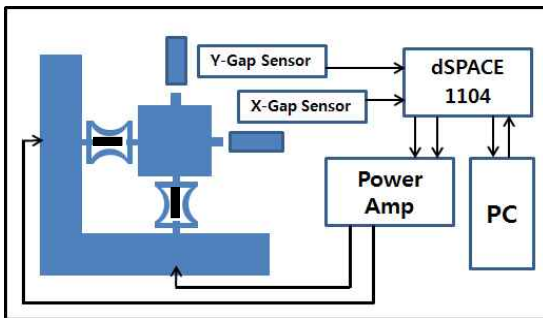


Fig. 1 Schematic diagram of experimental device.

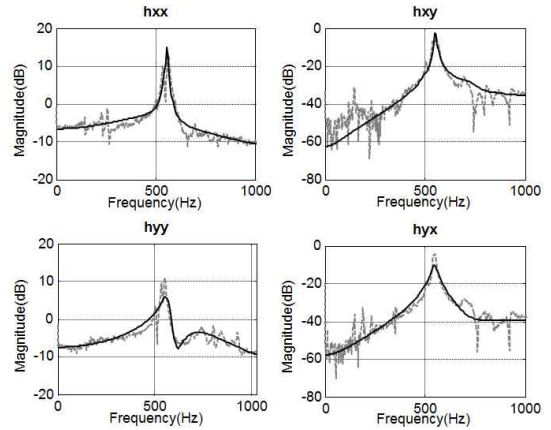


Fig.2 Measured(dash) and identified(solid) FRF of the two axes stage.

소를 나타낸 것이다.

제어 샘플링 주파수는 5kHz로 정하였다. Fig.2는 백색잡음 입력신호에 대한 스테이지의 출력응답을 측정하여 얻어진 주파수 응답곡선과 커브피팅을 통해 규명된 스테이지 모델의 주파수 응답곡선을 보인 것이다. 스테이지는 시스템 모델 차수가 4인 2×2 입출력계로 표현되었고 모델링 과정에 포함된 관심 주파수 영역은 1kHz이하로 정하였다.

#### 3. 제어기 설계 및 제어

##### 3.1 루프전달회복 설계

식 (1)는 제어대상인 2축 스테이지의 압전구동기 특성에 의해 크기가 제한적인 제어입력  $u$ 를 표현한 것이다.

$$0 \leq u(t) \leq u_{saturation} \tag{1}$$

식(2), 식(3)에서 보인 바와 같이 제어이득  $G$ 는

† 교신저자; 금오공과대학교, 기전공학과  
E-mail : naruf211@naver.com

Tel : 054-478-7365 Fax : 054-478-7319

\* 정회원, 금오공과대학교, 기전공학과

가격함수를 최소화 하는 LQR(Linear Quadratic Regulator)방법을 이용하여 결정될 수 있다.

$$G = \frac{1}{\rho} B^T K \quad (2)$$

$$AK + KA^T + Q_2 - \frac{1}{\rho} KB^T BK = 0 \quad (3)$$

식 (1)와 같이 주어지는 포화입력 범위 내에서 안전성이 보장되기 위해서는 LMI 형태의 충분조건 식인 식(4)~식(6)를 동시에 만족시키는 양의 한정 행렬  $S$ 가 존재해야 한다.

$$A^T S + SA < 0 \quad (4)$$

$$A^T S + SA - (Z^T S + SZ) < 0 \quad (5)$$

$$Z = \frac{1}{\rho} K B B^T \quad (6)$$

MATLAB 에서 제공하는 LMI toolbox를 이용하여 가중행렬  $Q_2$ 를 고정시킨 상태에서 양의 한정 행렬  $S$ 의 존재가 보장되는  $\rho$ 의 최소값을 구할 수 있다. 제어기의 전달함수  $T$ 는 다음과 같이 결정 된다.

$$T(s) = G(sI - A + BG + FC)^{-1}F + D \quad (7)$$

### 3.2 스테이지 제어

Fig.4는 X축과 Y축으로 복잡한 형태의 기준입력이 동시에 인가될 때 각축의 응답이다. 비연계기와 각축의 독립제어로 연계효과에 의한 과도오차가 제거되고 기준입력에 대한 추종성이 우수한 제어성능을 나타냄을 알 수 있다.

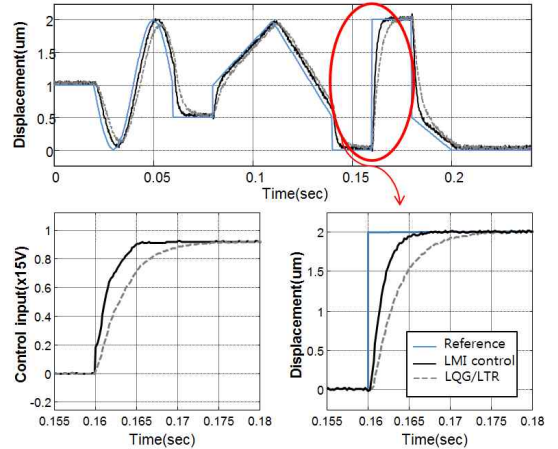


Fig. 5 Measured responses and control input of LQG/LTR control system and LMI control system to step input.

Fig.5 는 복잡한 기준입력신호에 대한 LQG/LTR 제어기와 LMI 강인 최적제어기를 갖는 2축 스테이지 제어기의 고속응답특성 결과를 보인 것이다. LMI 강인 최적제어기가 LQG/LTR제어기에 비해 응답속도가 40%이상 증가 되었음을 알 수 있다.

## 5. 결론

압전소자 작동기를 갖는 2축 정밀스테이지의 동적특성은 주파수영역에서의 모델링을 통해 규명할 수 있고 스테이지 운동제어 시의 연계효과는 FIR 필터 형태의 비연계기를 통해 최소화 시킬 수 있다. LMI 최적설계 기법을 이용하면 제어입력의 포화시에도 안정성이 보장되는 설계값  $\rho$ 를 쉽게 확인할 수 있고 이로서 LQG/LTR제어기를 보다 안정성 및 응답속도 면에서 우수한 제어기로 설계가 가능하다.

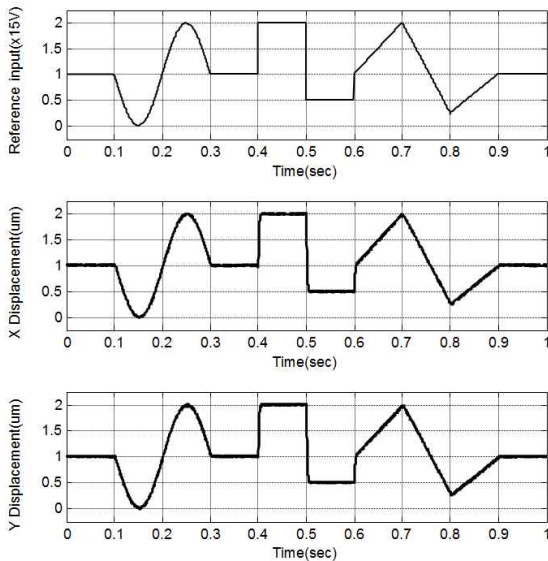


Fig. 4 Measured responses of control system to two axes complex reference input.