

가속도계를 이용한 칼만 추정 기반의 유연 외팔보의 종단 제어

Tip Position Control of a Flexible Cantilever Based on Kalman Estimation Using an Accelerometer

김국환¹, 이순걸^{1,✉}
Gook-Hwan Kim¹ and Soon-Geul Lee^{1,✉}

¹ 경희대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, KyungHee Univ.)
✉ Corresponding author: sglee@khu.ac.kr, Tel: 031-201-2506

Manuscript received: 2010.6.14 / Revised: 2010.11.19 / Accepted: 2011.2.14

Tip position control of a flexible cantilever is difficult due to the non-minimum phase dynamics that result from the finite propagating speed of a mechanical wave along the cantilever. In this paper, we propose a method for the tip position control using a light and cheap accelerometer that does not bring any significant change to the dynamics of the cantilever system. The linear system identification model of the flexible cantilever is obtained with measurements by a laser displacement sensor. A Kalman estimator is designed with this model and calculates the estimated tip position with the acceleration data of the accelerometer that is attached on the tip of the cantilever. To verify reliability of the estimator, the estimated tip position is used to the feedback control system that uses a fuzzy logic controller. The control results are compared with those of the fuzzy control system where the real tip position is measured by a laser displacement sensor. Also, the performance of the estimator with the accelerometer is presented and discussed.

Key Words: Cartesian Robot (직교좌표 로봇), Flexible Cantilever (유연 외팔보), System Identification (시스템 식별), Kalman Estimation (칼만 추정), Fuzzy Controller (퍼지 제어기)

1. 서론

우주정거장이나 인공위성 등 경량화가 불가피한 분야에 사용되는 대부분의 장치들은 유연성을 갖는다. 또한 반도체장비나 LCD 패널 제작공정 등에서 쓰이는 직교좌표 로봇(Cartesian robot)의 경우에는 고속화된 움직임에 따른 머니플레이터의 진동문제를 수반하게 된다. 유연성을 갖는 구조물에서 발생하는 진동문제는 비선형성을 포함, 복잡한 동적 특성으로 인해 제어에 어려움이 따른다. 이 같은 문제점들을 해결하기 위하여 유연한 링크요소의 모델링과 제어방법들에 대한 다양한 연구들이

이 진행되어 왔다.¹⁻⁷

다양한 제어기법들이 진동저감에 이용되었지만, 가장 문제가 되는 것은 진동이 나타나는 부분의 변위를 측정하는 방법이다.^{8,9} 초기에는 유연한 링크요소의 팁(tip)의 상태, 즉 변위를 측정하기 위하여 광학센서(optical sensor)를 주로 이용하였다. 하지만, 이로 인해 부가적인 생산비용이 추가되고, 센서의 설치로 인하여 공간적 제약을 받게 된다는 단점이 있다.¹⁰⁻¹² 또한, 2 차원 이상의 공간상 이동에 대해서는 다른 센서와의 융합을 통해야만 변위의 측정이 가능하여 시스템이 보다 복잡하게 된다. 영상시스템을 이용한 경우도 있지만, 영상처리에

많은 시간이 소요되기 때문에 실시간으로 처리해야 되는 고속의 시스템에 적용하기 어렵다.^{13,14} 영상처리 시간의 단축을 위해 고효율의 발광소자를 팁에 부착하고 UDT 카메라를 이용하여 발광소자의 움직임을 측정하는 방법도 제안되었다.¹⁵

팁의 변위측정을 위하여 링크요소의 탄성력에 비하여 상대적으로 무거운 센서를 탑재하였을 경우, 링크요소 고유의 특성이 변하여 팁의 거동에 문제를 야기할 수 있다. 이러한 영향을 배제하기 위해 절대위치의 측정이 가능한 고가의 센서를 사용하게 된다. 보통 2 차원 이상의 공간상에서의 움직임을 측정하기 위해서는 보다 많은 센서가 필요하게 되는데, 이는 계산을 복잡하게 만들 뿐 아니라, 부가적인 비용을 증가시킨다.

강성을 증가시킨다던가, 고가의 신소재를 이용하는 것과 같이 부가적인 비용을 들여서 진동을 저감하는 방법도 있다. 본 논문에서는 저가의 가속도계(accelerometer)를 이용하여 팁의 변위를 추정하고 베이스(base)와 팁의 변위에 대한 데이터를 시스템식별 알고리즘(system identification algorithm)에 적용하여 최소의 오차를 갖는 유연 외팔보 모델을 구하였다. 이 모델을 이용하여 유연 외팔보의 종단 위치추정을 가능하게 하는 칼만추정기(Kalman estimator)를 설계하였다. 동역학적 해석과 전자기계 시스템(electro-mechanical system)의 능동적 결합을 통하여 일반적 운동시스템의 생산성(정밀도, 생산속도 등)을 향상시키고자 시뮬레이션과 시스템의 특성 및 제어성능을 비교, 분석하였다. 또한, 시스템의 불확실성, 매개변수의 변화, 외란 등에 대하여 견고한 응답을 얻을 수 있는 퍼지제어기를 이용하여 제안한 추정기의 신뢰성을 검증하고자 하였다.

2. 유연 외팔보 시스템

2.1 시스템 구성

본 논문에서는 유연 외팔보를 이용하여 비정렬 제어에 관한 실험 및 시스템 해석을 수행하였다. Fig. 1 은 시스템의 전체 구성을 개략적으로 보여준다. 유연 외팔보의 한 끝단인 베이스는 구동장치(actuator)에 장착하여 중력방향으로 이동이 가능하게 하였다. 베이스의 변위는 구동장치에 내장된 인코더로 측정이 가능하다. 팁의 절대위치를 측정하기 위하여 레이저변위센서를 팁의 거동범위 밖의 아랫부분에 설치하였다. 이 센서는 추후 제어 결과에 대한 검증에 활용되었다.

가속도계와 레이저변위센서의 아날로그 신호를 입력하고 모터구동용 PWM 신호를 발생시키기 위하여 내셔널 인스트루먼트사(NI: National Instrument Inc.)의 6025E 보드를 사용하였다. NI 사의 6602 보드의 타이머/카운터 채널을 이용하여 베이스에 내장된 인코더의 신호를 변위데이터로 변환시켰다. 센서들에 의해 측정된 데이터 실시간 처리와 모터의 구동 및 제어는 MATLAB Simulink 의 xPC target 을 이용하였다.

비최소위상(non-minimum phase)의 동역학적 특성을 갖는 유연한 링크요소를 구현하기 위하여 길이 500mm, 폭 30mm, 두께 1mm 의 스테인리스-스틸 자(stainless-steel ruler)를 이용하였다. 링크요소의 베이스는 중력방향으로 이동하는 구동장치에 부착하였고, 반대편 끝단인 팁에는 10g 의 추를 달아 진동특성을 높였다. 진동특성에 따른 팁의 상대변위를 추정하기 위해 가속도계를 부착하였고, 팁의 수직하단에는 제어결과를 검증하기 위해 레이저변위센서를 설치하였다. Fig. 2 는 실제 구현된 시스템을 보여준다.

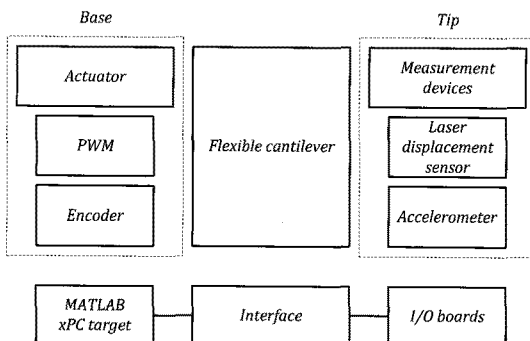


Fig. 1 Schematic diagram of system configurations



Fig. 2 Picture of the experimental device

2.2 시스템 모델링

유연 외팔보 시스템을 단일의 지배적 탄성모드를 갖는 시스템이라 하면, Fig. 3 과 같이 두 개의 질량이 평행하게 움직이는 선형스프링과 감쇠기로 연결된 하나의 시스템으로 모델링할 수 있다.¹⁵ 유연 외팔보의 한 끝인 베이스에는 구동장치에 부착하였고, 다른 끝 단인 팁의 절대위치는 베이스의 움직임에 따라 결정된다. Fig. 3 에서 m_{base} 는 중력방향으로 움직이는 구동장치에 부착되어 유연한 링크요소의 운동에 지배적인 역할을 하는 베이스의 질량을 의미하고, m_{tip} 은 유연한 링크요소의 다른 끝 단인 팁의 질량을 의미한다. k 와 b 는 링크요소의 유연성(flexibility)을 표현하는데 사용되는 물성치로써 b 는 k 에 비하여 상대적으로 작은 값으로 나타난다. z_{base} 와 z_{tip} 은 각각 베이스와 팁의 변위를 나타내며, 그 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_{base}\ddot{z}_{base} = u - k(z_{base} - z_{tip}) - b(\dot{z}_{base} - \dot{z}_{tip}) \quad (1)$$

$$m_{tip}\ddot{z}_{tip} = k(z_{base} - z_{tip}) + b(\dot{z}_{base} - \dot{z}_{tip}) \quad (2)$$

식(1)과 (2)를 라플라스 변환(Laplace transform)하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{Z_{tip}(s)}{Z_{base}(s)} = \frac{(bs + k)}{(m_{tip}s^2 + bs + k)} \quad (3)$$

$$\frac{Z_{base}(s)}{U(s)} = \frac{(m_{tip}s^2 + bs + k)}{m_{base}m_{tip}s^4 + (m_{base} + m_{tip})bs^3 + (m_{base} + m_{tip})ks^2} \quad (4)$$

식 (3)은 베이스와 팁간의 전달 함수 $G_{tip}(s)$ 가 되며, 식 (4)는 입력 u 에 대한 베이스의 출력 z_{base} 의 전달 함수 $G_{base}(s)$ 를 의미한다. 선형 시스템에 대한 모델은 k, b, m_{base}, m_{tip} 의 값에 의하여 결정된다. 특히 k 와 b 는 유연한 링크요소의 재질에 의해 결정되는데, 재질이 일정하지 않아 그 값이 정확하지 않다. 또한, 시스템이 갖고 있는 불확실성과 비선형성 및 외란의 영향을 고려하지 않은 선형시스템 모델이기 때문에 정확한 위치를 구하기란 쉽지 않다.

Fig. 4 는 기준궤적 $z_{desired}$ 에 대한 팁의 거동을 나타낸다. 여기서 팁의 변위는 레이저변위센서(laser displacement sensor)를 사용하여 측정하였다. 기준궤적은 2~3 초 동안 50mm 만큼 중력 반대방향

으로 이동시키고 9 초 동안 정지한 후, 11~12 초 동안 원래의 위치로 되돌아 가도록 주어졌다. 응답을 보면 기준궤적을 따라 이동하는 구간뿐만 아니라 멈춰 있어야 하는 시점에서도 진동이 발생함을 알 수 있다. 이때, 잔류진동의 진폭은 10~18mm 이고, 지배적인 탄성 모드의 진동수는 3.4Hz 임을 알 수 있다.

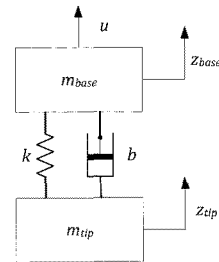


Fig. 3 Schematic model of the single dominant elastic system for the flexible cantilever

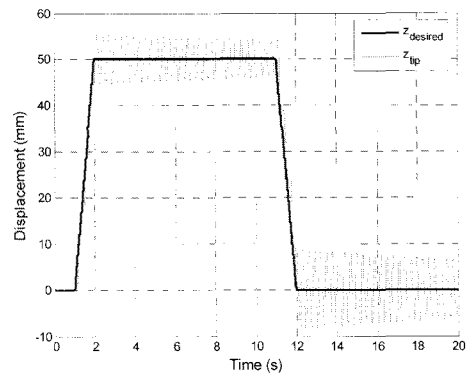


Fig. 4 Behavior of the tip corresponding to reference trajectory

3. 추정기 설계

3.1 시스템식별

시스템식별은 시스템의 관측된 데이터를 가지고 동적 모델의 수학적 모델을 찾는 문제를 다루는데, 시스템의 분석이나 제어를 위해 대상 시스템의 수학적 모델을 선정하여 식별하고 평가하는 방법이다. 최소자승법, 최대공산법, 베이어스 추정법 등은 매개변수 추정기법(parameter estimation method)을 기초로 한 기본적인 식별방법이다. 대부분의 시스템들은 비선형성을 포함하고 있기 때문에 측정된 데이터가 비선형이라 하더라도 시스템

을 물리적으로 조사하여 모델링하고 새로운 변수들을 사용하여 선형화되도록 변환해야 한다.¹⁷⁻²⁰

시스템식별 알고리즘을 이용하여 모델을 구하기 위해서는 입력과 출력 데이터가 있어야 한다. 입력 데이터는 베이스의 구동장치에 내장된 인코더를 이용하여 얻은 변위 z_{base} 를, 출력 데이터는 레이저변위센서를 이용하여 측정된 팁의 변위 z_{tip}^* 를 사용하였다. 시스템모델을 결정하기 위한 입력으로 기준입력 $z_{desired}$ 을 사용해도 좋지만, 베이스를 부착한 구동장치가 갖고 있는 비선형요소들까지 그 모델에 포함된다. 이로 인하여 불명확하고 해석이 어려운 모델 구조가 생성될 것이다. 이러한 영향을 최소화시키고자 가장 근접한 환경(베이스와 팁의 관계), 즉 유연한 링크요소만의 입, 출력 데이터를 이용하여 최적의 모델을 결정하였다.

본 논문에서는 네 가지 모델구조(ARX model, ARMAX model, OE model, BJ model)에 대한 모델링을 각각 수행하였다. 각 모델구조에 대하여 2 차부터 5 차까지의 시스템모델을 구한 후 모든 경우에 대해 계수를 결정하였다. 각 모델의 계수들은 직선회귀(linear regression)와 최소자승법을 사용하여 예측오차(prediction error)를 최소화시키는 매개변수 추정법을 활용하여 결정하였다. 모델의 차수가 높으면 계산량 증가로 인한 부하가 커지므로 낮은 차수의 오차가 적은 모델을 선정하였다. 결정된 모델을 이용하여 추정된 변위들을 레이저변위센서로 측정된 실제 데이터와 비교하여 오차를 구했다. 각 모델의 최대 오차를 Table 1 에 나타냈다.

Table 1 Estimation error of each model (unit: mm)

Model structures	Maximum magnitude	Model structures	Maximum magnitude
ARX 2 nd model	7.1684	OE 2 nd model	1.1948
ARX 3 rd model	7.1821	OE 3 rd model	8.7429
ARX 4 th model	6.2393	OE 4 th model	8.2557
ARX 5 th model	6.276	OE 5 th model	8.6677
ARMAX 2 nd model	3.7911	BJ 2 nd model	1.2131
ARMAX 3 rd model	0.6451	BJ 3 rd model	7.0201
ARMAX 4 th model	4.3023	BJ 4 th model	0.6104
ARMAX 5 th model	4.3	BJ 5 th model	6.2398

최종적으로 결정된 모델은 ARMAX 3 차 모델이다. 오차의 크기가 서로 비슷하다면, 칼만 추정기를 수행할 때에 활용되는 역행렬을 계산하기 위

해서는 차수가 낮을수록 계산속도가 빠르기 때문에 ARMAX 3 차 모델을 선별한 것이다. 모델의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_{sys.id}(z) = \frac{-0.021937z^2 + 0.043861z - 0.021898}{z^3 - 2.9409z^2 + 2.8822z - 0.94133} \quad (5)$$

$$H_{sys.id}(z) = \frac{z^3 - 0.8280z^2 - 0.9963z + 0.8293}{z^3 - 2.9409z^2 + 2.8822z - 0.94133} \quad (6)$$

ARMAX 3 차 모델에 대한 Bode 선도 는 Fig. 5 와 같다. 주파수가 무한대일 때, 90 도의 위상 지연이 발생하는 비최소위상 시스템임을 알 수 있다. 이 모델은 칼만추정기의 설계에 적용되어 유연 외팔보의 팁의 변위추정에 활용되었다.

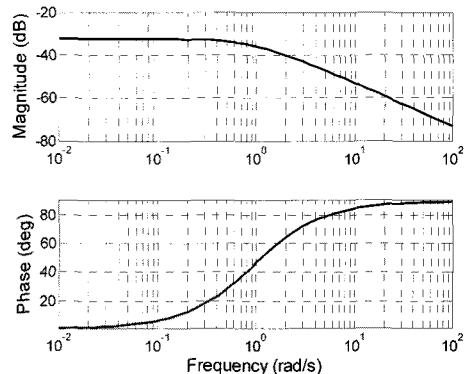


Fig. 5 Bode plot of the ARMAX 3rd model

3.2 칼만추정

칼만필터는 선형시스템의 상태변수를 추정하는 방법으로써 1960 년 칼만(Kalman)에 의하여 소개된 이후로 현재까지 매우 많은 연구가 진행되어 왔다. 칼만필터는 구조가 선형적이며 여러 가지 의미에서 최적성을 나타내고 있고, 수렴성과 강인성이 보장되며 종전의 스펙트럼 분석 방법에서 벗어난 시간영역에서의 처리기법으로 실시간 처리가 가능한 특성이 있다. 또한, 재귀적 데이터처리 알고리즘으로 추정오차의 분산값을 최소화시키는 관점에서 최적의 예측과 수정을 반복하는 수학적 방정식의 한 형태이다. 최적성이 유지되는 가장 큰 이유는 칼만필터의 오차공분산행렬이 일정한 값에 수렴한다는 점에 있는데, 그 수렴값은 최소추정오차의 공분산행렬 형태로서 추정된 상태변수는 모델

링 된 상태변수에 접근하지만, 실제의 상태변수에 어느 정도 접근하게 되는지는 모델링이 얼마나 정확하게 되었는가에 따라 결정된다.²¹⁻²³

칼만필터의 경우 모델의 정확도에 따라 성능의 차이가 현저하게 달라진다. 모델이 실제 시스템에 근사할수록 뛰어난 추정성능을 보이기 때문에, 시스템식별 알고리즘을 이용하여 불확실성과 비선형성 및 외란 등의 요소를 포함한 시스템모델을 만들어 전달함수에 적용시켰다. 식 (5), (6)으로 표현된 전달함수를 칼만추정기에 적용하기 위하여 이산시간에 대한 상태공간 방정식과 계수들로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 x_k &= \mathbf{A}x_{k-1} + \mathbf{B}u_{k-1} + w_{k-1} & (7) \\
 z_k &= \mathbf{H}x_k + v_k \\
 \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 2.9409 & -2.8822 & 0.9413 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{B} &= [1 \ 0 \ 0]^T \\
 \mathbf{H} &= [-0.0219 \ 0.0439 \ -0.0219]
 \end{aligned}$$

이 때, 시스템잡음 w_{k-1} 과 측정잡음 v_k 은 시스템식별 알고리즘을 통해 구해진 시스템모델에 포함되어 칼만추정기에 적용되었다.

칼만필터로 팁의 위치를 추정하기 위하여 베이스의 변위와 가속도계로 추정한 팁의 변위를 사용하였다. 이 때, 칼만추정기로의 입력 u_k 은 베이스의 변위 z_{base} 가 되고, 측정 값 z_k 은 가속도계를 이용하여 추정한 팁의 변위 \hat{z}_k 이 된다. 칼만추정기는 이를 이용하여 팁의 변위 \hat{z}_{tip} 을 추정하게 된다. Fig. 6 은 칼만추정기를 포함한 제어루프를 나타내고 있다.

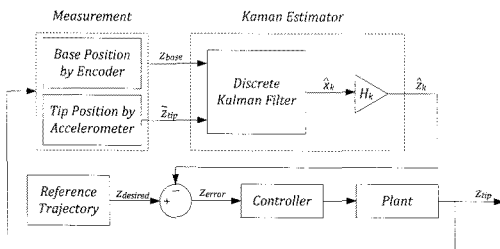


Fig. 6 Block diagram of the control loop with the Kalman estimator

Fig. 7 은 제어기를 부착하지 않은 상태에서, 모

델기반으로 구현한 칼만추정기가 추정한 변위와 실제 측정된 팁의 변위에 대한 오차를 나타내고 있다. 레이저변위센서로 측정된 변위와 칼만추정기로 추정한 변위와의 오차가 0.1mm 이내에 있음을 알 수 있다.

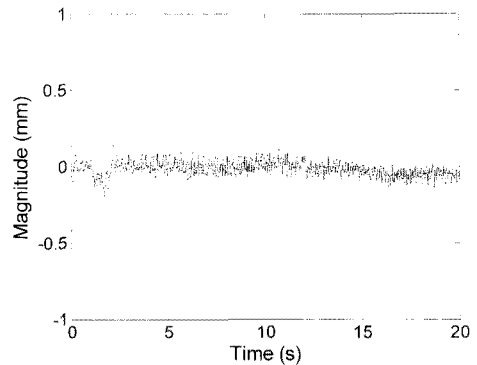


Fig. 7 Error between the measured tip position and the estimated one of the Kalman estimator without control

4. 퍼지제어기

시스템의 운동을 제어하기 위한 제어기의 입력 변수로 사용한 값은 위치에 대한 오차 e 와 오차에 대한 변화율 \dot{e} 이다. 입력 값들은 퍼지제어기의 추론과정 전, 퍼지화하기 위해 소속함수(memberhip function)를 거치게 된다. 본 논문에서는 여러 가지 형태 중에서 삼각형형태(triangular type)의 소속함수를 사용하였다. 입력 값들에 대한 추론 후의 값을 결정하는 소속함수도 삼각형형태의 함수로 구현하였다.

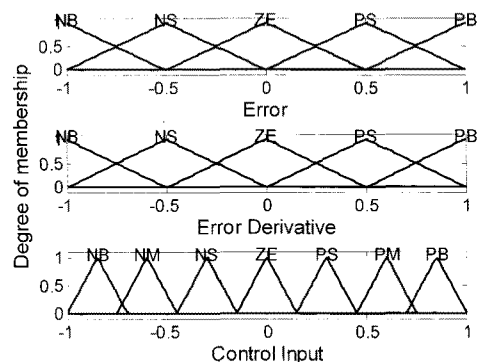


Fig. 8 Membership functions

Fig. 8 은 각 입력 변수와 출력 값에 대한 소속 함수를 나타내고 있고, 소속 함수를 이용하여 저감쇠 시스템 응답(underdamped system response)을 기반으로 Table 2 와 같은 퍼지 규칙(fuzzy rule)을 적용하였다. 이 때, 입력 및 출력에 대한 소속함수의 범위를 정규화(normalization)한 삼각형형태의 함수를 적용하였다. Fig. 9 는 퍼지제어기에 입력되는 오차와 오차의 변화율을 크기보정 값(scale factor) k_1 과 k_2 를 사용하여 정규화시키고, 비퍼지화(defuzzification) 후의 출력도 제어입력 u 에 상응하는 값으로 바꾸기 위해 k_3 를 사용하여 보정하는 과정을 나타낸다. 보정 값들은 각각 $k_1=0.00978$, $k_2=0.0000001$, $k_3=103$ 이고, 이는 시행착오(trial and error)를 통하여 구하였다.

Table 2 Fuzzy rules

	Rules	
1	IF (e is NB) and (\dot{e} is ZE)	THEN (u is PM)
2	IF (e is NS) and (\dot{e} is ZE)	THEN (u is PS)
3	IF (e is NS) and (\dot{e} is PS)	THEN (u is ZE)
4	IF (e is ZE) and (\dot{e} is NB)	THEN (u is PM)
5	IF (e is ZE) and (\dot{e} is NS)	THEN (u is PS)
6	IF (e is ZE) and (\dot{e} is ZE)	THEN (u is ZE)
7	IF (e is ZE) and (\dot{e} is PS)	THEN (u is NS)
8	IF (e is ZE) and (\dot{e} is PB)	THEN (u is NM)
9	IF (e is PS) and (\dot{e} is NS)	THEN (u is ZE)
10	IF (e is PS) and (\dot{e} is ZE)	THEN (u is NS)
11	IF (e is PB) and (\dot{e} is ZE)	THEN (u is NM)

where, NB(Negative Big), NM(Negative Middle), NS(Negative Small), ZE(Zero Equal), PS(Positive Small), PM(Positive Middle), PB(Positive Big)

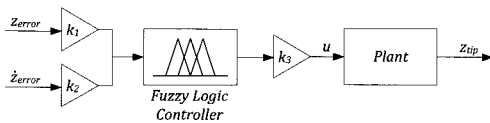


Fig. 9 Block diagram of the fuzzy logic control system

5. 결과

본 논문에서는 저가의 센서인 가속도계와 칼만 추정기를 이용하여 팁의 변위를 추정하였다, 이 값을 제어에 이용할 수 있는지를 검증하기 위하여 설계가 용이하면서 단순한 PD 형태의 퍼지논리제어기를 이용하여 효용성을 검증해 보았다. 시행착

오를 통하여 구한 보정계수들과 소속함수, 퍼지 규칙들을 적용하여 제어한 결과는 Fig. 10 과 같이 나타났다. 점선은 칼만추정기를 이용하여 실시간으로 제어한 결과이고, 실선은 추정하는 동안 레이저변위센서로 팁의 변위를 측정 한 결과이다. 칼만 추정기의 민감도가 높아 변화량이 큰 것처럼 보이지만 레이저변위센서의 측정치와 비교하면 보다 안정하게 기준궤적에 수렴하고 있음을 보여준다. Fig. 11 은 칼만추정기로 추정한 변위를 피드백하여 제어하였을 때 그 추정변위와 레이저변위센서 측정변위 간의 오차를 보여준다. 정지 상태(2-11 초와 12-20)에 대한 정상상태오차가 0.1mm 이내이며 제안한 칼만추정기가 팁의 변위를 잘 추정하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12 는 레이저변위센서로 측정한 변위 데이터를 피드백한 결과와 칼만추정기로 추정한 변위를 피드백하여 제어한 결과를 비교한 것이다. 가속도계와 칼만추정기를 이용하여 제어한 결과는

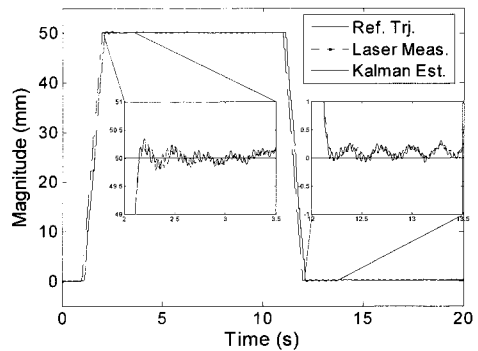


Fig. 10 Control response of the tip positions estimated using the estimator and measured by the sensor

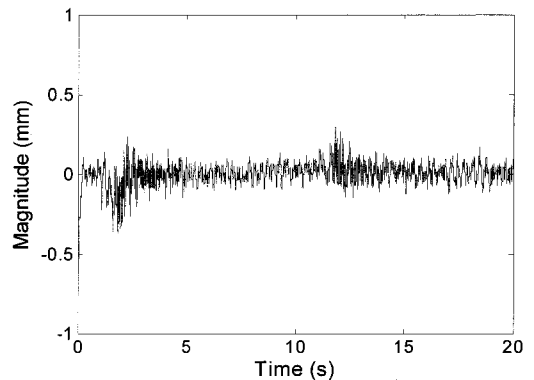


Fig. 11 Error between the results above

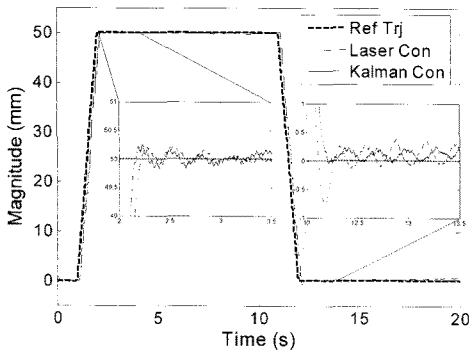


Fig. 12 Comparison between the tip positions controlled by the laser displacement sensor and with the Kalman estimator

레이저변위센서를 사용하였을 때와 유사하나 일정 부분 차이를 보여주고 있다. 이는 제어기의 보정 값의 차이 또는 환경에 의한 영향 때문일 수도 있지만, 저가의 가속도계와 칼만추정기를 사용하여 제어한 결과가 고가의 장비인 레이저변위센서를 이용하여 제어한 결과와 유사하게 나타나는데 큰 의미가 있다.

6. 결론

본 논문에서는 비최소위상을 갖는 시스템에서 발생하는 진동특성을 최소화시키기 위하여 저가의 센서인 가속도계를 이용하여 변위를 추정하고 이를 피드백하여 제어에 활용하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 가속도 신호를 칼만추정기를 사용하여 위치 추정을 하고 이를 피드백하여 제어하는 방법이다. 모델의 정확도에 따라 추정성능의 차이가 큰 칼만추정기의 특성을 고려하여 최대한 실제 시스템과 유사한 선형모델을 구현하기 위하여 시스템식별 알고리즘을 활용하였다. 다양한 시스템식별 알고리즘 중에서 최적의 동적 거동을 나타내는 모델구조는 ARMAX 3 차 모델구조임을 검증하였고 이를 칼만추정기에 적용하였다.

인코더로 측정된 베이스의 변위와 가속도계로 추정된 팁의 변위를 각각 칼만추정기의 입력과 측정 값으로 이용하여 추정한 팁의 변위를 레이저변위센서로 측정된 팁의 변위와 얼마나 유사한지를 비교, 검증하였다. 추정한 변위의 제어 활용 가능성을 검증하기 위해 퍼지논리제어기를 설계하여 적용시켜 보았고, 그 결과 0.1mm 이내의 정상상태 오차를 가짐을 알 수 있었다.

또한, 제안된 방식으로 추정한 팁의 변위를 이용한 제어성능을 가늠해 보기 위하여 고가의 장비인 레이저변위센서를 이용하여 팁의 변위를 피드백하여 동일한 퍼지제어기에 적용시켜 보았다. 그 결과, 가속도계를 이용하여 제어한 결과와 레이저 변위센서를 이용하여 제어한 결과는 유사한 제어 성능을 나타내었다. 이는 저가의 센서인 가속도계를 이용하여도 충분히 높은 제어성능을 나타냄을 의미하는 것이고, 복잡한 환경에 적용된다 하여도 다른 부가비용 없이 성능 면에서 유사하거나 좋은 특성을 나타내는 시스템 구현이 가능함을 의미한다.

후 기

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업(NIPA-2010-C1090-0904-0005)과 한국연구재단의 지원사업(No. R01-2008-000-20645-0), 그리고 서울시 산학연 협력사업(10890)의 지원을 받아 수행되고 있는 연구결과입니다.

참고문헌

1. Yim, W., "Adaptive Control of a Flexible Joint Manipulator," Proc. of IEEE International Robotics & Automation, pp. 3441-3446, 2001.
2. Oh, J. H. and Lee, J. S., "Control of Flexible Joint Robot System by Backstepping Design Approach," Proc. of IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 3435-3440, 1997.
3. Ghorbel, F., Hung, J. Y. and Spong, M. W., "Adaptive Control of Flexible Joint Manipulators," Control Systems Magazine, Vol. 9, No. 7, pp. 9-13, 1989.
4. Lin, L. C. and Yuan, K., "Control of Flexible Joint Robots via External Linearization Approach," Journal of Robotic Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 1-22, 2007.
5. Tomei, P., "A Simple PD Controller for Robots with Elastic Joints," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 36, No. 10, pp. 1208-1213, 1991.
6. Yeon, J. S. and Park, J. H., "Practical Robust Control for Flexible Joint Robot Manipulators," Proc. of IEEE International Conference on Robotic and Automation, pp. 3377-3382, 2008.
7. Shin, Y. J., "A Control Strategy for Systems with

- Single Flexible Mode to Reduce Residual Vibration,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 24, No. 11, pp. 91-100, 2007.
8. Li, Y. and Wang, G., “Sensing Strategies for a Flexible Manipulator,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 49, No. 3, pp. 565-571, 2000.
 9. Li, Y. and Chen, X., “End-Point Sensing State Observation of a Flexible-Link Robot,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 6, No. 3, pp. 351-356, 2001.
 10. Parsa, K., Angeles, J. and Misra, A., “Estimation of the Flexural States of a Macro-Micro Manipulator Using Point-Acceleration Data,” *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 4, pp. 565-573, 2005.
 11. Cannon, R. and Schmitz, E., “Initial Experiments on the End-Point Control of a Flexible on-Link Robot,” *Int. L. Robot. Res.*, Vol. 3, No. 3, pp. 62-75, 1984.
 12. Chian, W., Kraft, R. and Cannon, R., “Design and Experimental Demonstration of Rapid, Precise End-Point Control of a Wrist Carried by a Very Flexible Manipulator Arm,” *Int. J. Robot Res.*, Vol. 10, No. 1, pp. 30-40, 1991.
 13. Alder, L. and Rock, S., “Adaptive Control of a Flexible-Link Robotic Manipulator with Unknown Payload Dynamics,” *Proc. American Control Conference*, pp. 2088-2092, 1993.
 14. Jiang, Z. and Goto, A., “Visual Sensor Based Vibration Control and End-Effector Control for Flexible Robot Arms,” *IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 383-388, 2005.
 15. Geniele, H., Patel, R. and Khorasani, K., “End-Point Control of Flexible-Link Manipulator: Theory and Experiments,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 5, No. 6, pp. 556-570, 1997.
 16. Rhin, S. and Hu, A.-P., “Control of a Flexible Manipulator Tip Using a Multirate Repetitive Learning Controller Based on Filtered Tip Reference Input,” *American Control Conference*, Vol. 6, pp. 4805-4810, 2003.
 17. Ljung, L. and Glover, K., “Frequency Domain Versus Time Domain Methods in System Identification,” *Automatica*, Vol. 17, No. 1, pp. 71-86, 1981.
 18. Ljung, L., “System Identification: Theory for the User,” Prentice Hall, 1987.
 19. Young, P., “Parameter Estimation for Continuous-Time Models- A Survey,” *Automatica*, Vol. 17, No. 1, pp. 23-39, 1981.
 20. Unbehauen, H. and Rao, G., “Continuous-Time Approaches to System Identification- A Survey,” *Automatica*, Vol. 26, No. 1, pp. 23-35, 1990.
 21. Lee, J. G. and Lee, Y. S., “Advanced Kalman Filter - A Survey,” *Proc. of IEEK Korea Automatic Control Conference*, Vol. 1, pp. 464-469, 1987.
 22. Guo, S., Shieh, L. and Coleman, N., “Observer-Type Kalman innovation Filter for Uncertain Linear Systems,” *IEEE Transactions on Aerospace and Systems*, Vol. 37, No. 4, pp. 1406-1418, 2001.
 23. Mohinder, S. and Angus, P., “Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB,” Wiley Interscience, 2001.