

수직면에서 작동하는 탄성 매니플레이터의 효율적인 제어에 관한 연구

A Study on the efficient control of an elastic manipulator moving in a vertical plane

강준원, 이종섭, 권혁조(전북대 대학원), 오재운(전북대), 정재욱(국방과학연구소)
Junwon Kang, Jungsup Lee, Hyokjo Kwon(Graduate school, Chonbuk National Univ.),
Chaeyoun Oh(Chonbuk National Univ.), Jaewook Chung(ADD)

ABSTRACT

This paper presents a technique to control a robot which has a flexible manipulator moving in a vertical plane. The flexible manipulator is modeled as an Euler-Bernoulli beam. Elastic deformation is represented using the assumed modes method. A comparison function which satisfies all geometric and natural boundary conditions of a cantilever beam with an end mass is used as an assumed mode shape. Lagrange's equation is utilized for the development of a discretized model. A control algorithm is developed using a simple PID control technique. The proportional, integral and derivative control gains are determined based on the dominant pole placement method and tuned to show no overshoot and having a short settling time. The effectiveness of the developed control scheme is showed experimentally. In the position control experiment, three different end masses are used. The experimental results shows little overshoot, no steady state error, and less than 2.5 second settling time in case of having an end mass which is equivalent to 45% of the total system weight. Also the residual vibration of the end point is effectively controlled.

Key Words : assumed mode method(가정된 모드법), dominant pole placement(지배극점배치), residual vibration(잔류진동), settling time(정착시간), PID control(비례적분미분 제어)

1. 서론

현재 산업전반에 사용되고 있는 로봇은 대부분 강체로봇으로서 그 중량이 매우 크기 때문에 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 이에 비해 탄성 매니플레이터를 가지는 로봇은 다음과 같은 많은 장점을 가지고 있으므로 미래의 산업용 로봇으로서 많은 연구가 수행되고 있다. 먼저, 사이클 타임을 줄일 수 있는 빠른 속도를 얻을 수 있으며, 작은 용량의 액츄에이터를 사용할 수 있으므로 해서 경비를 절감할 수 있고, 같은 작업시간에 대해 에너지의 효율을 높일 수 있다. 또 로봇이 가벼워짐으로써 이동이 상대적으로 용이해지고, 자체 무게의 감소로 인해 안전성도 증가하며, 로봇을 지지하기 위한 부분의 부담도 덜어지게 된다. 그러나 위와 같은 장점이 있는 반면 운동시에 발생하는 진동을 제어하는 것이 문제점으로 대두되어 많은 연구가 수행되고

있다.

이와 같은 탄성 매니플레이터를 가지는 로봇의 운동 중에 발생하는 진동을 제어하기 위해 많은 제어 기법들이 제안되었다. 액츄에이터와 다른 위치에서 검출된 센서의 출력을 이용하여 최적제어 알고리즘을 이용한 제어[1,2], 끝지점의 가속도와 상태관측기를 이용한 제어[3,4], 하중(payload)의 변동 등을 능동적으로 대처하는 제어[5-7], 설정된 성능지수를 최적화 하는 최적제어[8,9]등과 같이 탄성 매니플레이터를 가지는 로봇의 위치 및 진동제어를 위한 많은 기법들이 여러 참고문헌에 제시되었다. 위 논문들은 대부분 수평방향의 운동에 국한되어 있으며 수직방향의 운동시 탄성 매니플레이터의 위치 및 진동 제어에 관한 연구는 상대적으로 많이 보고되어 있지 않다.

본 논문에서는 수직면에서 회전운동 하는 탄성 매니플레이터의 위치 및 잔류진동을 구조가 간단하며 적용

이 용이한 PID 제어기법을 이용하여 효율적으로 제어할 수 있는 방법을 제시한다.

2. 시스템의 구성

그림 1은 본 논문에서 사용한 탄성 매니플레이터를 가지는 로봇 시스템의 구성을 보여준다. 매니플레이터는 모터 허브에 연결되어 있고 끝부분에는 엔드이펙터와 유로하중에 해당하는 끝지점 질량이 부착되어 있다. 매니플레이터의 단면은 길이에 비해 아주 작으므로 회전관성과 전단변형을 무시할 수 있는 Euler - Bernoulli 빔으로 가정한다. 그리고 매니플레이터는 수직관상에서 움직이므로 중력의 영향을 받으면서 굽힘 변형만을 한다고 가정한다.

3. 운동방정식

시스템의 운동방정식은 Lagrange 방정식을 이용하여 구한다. Lagrange 방정식을 이용하기 위해서는 시스템의 운동에너지와 위치에너지를 구해야 한다. 운동에너지는 허브 부위의 질량에 의한 운동에너지, 매니플레이터와 관련된 운동에너지, 끝지점 질량에 의한 운동에너지로 구성된다. 위치에너지는 탄성에 의한 매니플레이터의 위치에너지, 중력에 의한 매니플레이터의 위치에너지, 중력에 의한 끝지점 질량의 위치에너지로 구성되어 있다. 매니플레이터의 운동 중에 생기는 탄성변형은 유한개의 모드형상을 이용하여 근사할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 탄성변형을 근사하기 위해 가정된 모드법(assumed mode method)을 이용한다. 가정된 모드법은 임의의 탄성변형을 n 개의 공간좌표의 함수인 가정된 모드형상과 시간의 함수인 n 개의 일반화좌표와의 선형적인 조합으로 근사하는 방법이다. 여기서 n 의 수가 커질수록 탄성변형을 좀 더 정확하게 근사할 수 있다. 탄성에 의한 매니플레이터의 횡변형 $w(x, t)$ 는 가정된 모드법을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) q_i(t) = \bar{q}^T \bar{\phi} \quad (1)$$

위 식에서 ϕ_i 는 i 번째 가정된 모드형상이고 q_i 는 ϕ_i 에 대응하는 일반화 좌표를 나타낸다. 본 논문에서 사용되는 가정된 모드형상은 끝지점 질량을 가지는 외관보의 기하학적 · 자연적 (geometric and natural) 경계조건만을 만족하는 비교함수를 개발하여 이용한다.

시스템의 운동에너지와 위치에너지를 Lagrange 운동방정식에 대입하여 식을 정리한 후 식(1)을 이용하여 다시 나타내면 아래와 같은 이산화된 $(n+1)$ 차 비선형 운동방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} Q \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \int_0^l EI \bar{\phi}'' \bar{\phi}''^T dx \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \end{bmatrix} + M_e \begin{bmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \end{bmatrix}$$

PID 제어 기법을 이용하여 제어 알고리즘을 개발하기 위해 위의 시스템 운동방정식을 선형화한다. 임의의 허브각을 유지하기 위한 평형점을 구한 후 이 점에 대하여 교란변수(perturbation variables)를 정의한다. 이의 교란변수들에 관해 선형화를 실시하면 아래와 같은 선형화된 운동방정식이 구해진다.

$$M \Delta \ddot{q} = -K \Delta q + \bar{u} \quad (3)$$

여기서 M 과 K 는 각각 질량행렬과 강성행렬을 나타내며 그 크기는 $(n+1) \times (n+1)$ 으로 사용하는 가정된 모드 수(n)에 의존한다. 가정된 모드 2개를 사용하여 탄성 변형을 근사하는 경우, 식 (3)을 상태공간형태(state space form)로 변환하면 다음과 같다.

$$\dot{\bar{X}} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & 0 \end{bmatrix} \bar{X} + \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & M^{-1} \end{bmatrix} \bar{u} \quad (4)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \bar{X} &= [\Delta \theta, \Delta q_1, \Delta q_2, \Delta \dot{\theta}, \Delta \dot{q}_1, \Delta \dot{q}_2] \\ \bar{u} &= [\Delta Q \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \end{aligned}$$

4. 제어 알고리즘

본 논문에서는 PID 제어 알고리즘을 사용하여 탄성 매니플레이터의 위치 및 진동을 제어하기 위한 알고리즘을 개발한다. PID 제어는 제어기 구조가 간단하면서도 뛰어난 제어성능을 보여주고 적용이 용이하므로 여러 분야에서 널리 쓰이고 있는 제어 기법이다. PID 제어의 기본식은 다음과 같다.

$$u(t) = K \left[e_p(t) + \frac{1}{T_i} \int e_i(s) ds + T_d \frac{de_d(t)}{dt} \right] \quad (5)$$

여기서 K 는 비례이득, T_i 는 적분시간, T_d 는 미분시간을 나타내고, e_p, e_i, e_d 는 아래 식(6) - 식(8)에서 정의된다. 본 논문에서는 기준입력으로 스텝입력을 사용한다. 그런데 이 값은 초기의 아주 급격한 변화 후에는 상수값을 유지하므로 미분제어시 오차에서 기준입력을 제외한다. 또한 설계에 유연성을 부여하기 위해 비례제어 부분에서는 기준입력에 가중치를 적용하는 방법을 이용한다. 이러한 이유로 다음과 같이 오차신호의 항들을 변형하여 사용한다.

$$e_p(t) = br - y(t) \quad (6)$$

$$e_d(t) = -y(t) \quad (7)$$

$$e_i(t) = r - y(t) \quad (8)$$

여기서 기준입력에 대한 가중치인 상수 b 는 0-1 사이

의 값으로 시스템의 상승시간에 영향을 미친다.

PID 제어기의 이득값을 얻는 방법으로 본 논문에서는 개루프 전달함수로부터 페루프 시스템의 지배극점을 원하는 위치에 배치하는 지배극점 배치법(dominant pole placement method)[10]을 사용하였다. 지배극점을 이용해서 제어 이득값들을 구한 후 이 값들을 기초로 해서 실제 시스템을 정확하게 해석적으로 모델하지 못함으로써 생기는 문제를 보상하기 위해 제어 이득값들을 조율한다. 조율의 기준은 실제 시스템에서 오버슈트와 정상상태 오차가 없으면서 빠른 정착시간을 가지게끔 하는 것이었다. 그림 2는 본 논문에서 개발하여 사용한 PID제어 알고리즘의 블록선도를 나타낸다. 블록선도는 MATLAB의 SIMULINK[11]상에서 실제 실험에 직접 사용할 수 있도록 이산화된 형태로 작성하였으며, 적분제어에서 액츄에이터의 포화에 의한 적분기의 발산(wind-up)현상을 방지하는 부분이 포함되었고, 적분기의 이산화 방법으로는 전방차분법(forward difference)을 미분기의 이산화 방법으로는 후방차분법(backward difference)을 사용하였다.

5. 실험결과

본 논문의 실험은 MATLAB의 SIMULINK에 포함되어있는 real time workshop[11]을 이용하여 수행하였다. 그림 3은 실험을 위한 장치 구성의 전체적 개략도이다. 그림에서와 같이 서보모터의 뒷부분에는 엔코더가 부착되어 있고 앞부분에는 모터의 토크를 증가시키기 위한 하모닉드라이브가 연결되어 있다. 엔코더로부터 나온 신호와 모터의 입력으로 들어가는 신호는 MATLAB과 연결된 A/D, D/A, Counter를 겸한 DSP board에 의해 처리된다.

본 논문에서 개발된 제어 알고리즘이 잔류 진동을 효율적으로 제어함을 보이기 위해 끝지점의 가속도를 가속도계를 설치하여 측정하였다. 실험에 사용된 탄성 매니플레이터와 끝지점 질량에 대한 기계적·물리적 특성값은 표 1에 주어진다. 그리고 그림 4는 실험을 위한 SIMULINK상의 블록선도를 보여준다.

앞 절에서 개발된 제어 알고리즘을 이용하여 끝지점 질량을 변화시켜가며 허브 위치를 0도에서 90도로 회전시키는 실험을 실시하였다. 끝지점 질량으로 전체시스템의 0%(끝지점 질량이 없는 경우), 19%, 45%에 상당하는 질량을 가지는 세 경우를 이용하였다.

탄성 매니플레이터의 위치와 끝지점의 진동을 제어하기 위해 본 논문에서는 단지 허브의 각 변위만을 피드백하여 이용하였다. 이와 같이 허브의 각 변위만을 피드백했음에도 불구하고 그림 5~10에서 보여주는 바와 같이 허브의 각 변위가 정상상태 오차와 오버슈트 없이 제어될 뿐 아니라 끝 지점의 진동도 효율적으로 제어할 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 정착시간

(settling time)은 끝지점 질량이 커짐에 따라 약간씩 증가함을 알 수 있었다. 끝지점 질량이 없는 경우(0% 경우) 1.8초 정도, 시스템의 19% 끝지점 질량을 가지는 경우 2.1초 정도, 시스템의 45% 끝지점 질량을 가지는 경우 2.5초 정도의 짧은 정착시간을 보여주었다.

6. 결론

본 논문에서는 수직면상에서 회전운동을 하는 탄성 매니플레이터의 위치 및 잔류진동을 효율적으로 제어하기 위한 기법을 제안하였다. 탄성 매니플레이터는 Euler-Bernoulli 빔으로 모델 되어졌으며 탄성 변위는 가정된 모드법에 의해 근사되었다. Lagrange 방정식을 이용하여 이산화된 운동방정식을 유도하였다.

제어 알고리즘은 PID 제어기법을 이용하여 구성하였다. 먼저 지배극점 배치법을 이용하여 제어이득값들을 구하였다. 그리고 이 값들을 시스템이 정상상태오차와 오버슈트가 없고 짧은 정착시간을 가지게끔 조율하였다.

본 논문에서 제안된 방법을 이용하여 끝지점 질량을 변화시켜가면서 허브 위치를 0도에서 90도로 회전시키는 실험을 실시하였다. 끝지점 질량으로는 전체시스템의 0%(끝지점 질량이 없는 경우), 19%, 45%인 세 경우를 이용하였다. 실험 결과 허브의 각 변위가 정상상태 오차와 오버슈트 없이 제어될 수 있을 뿐 아니라 끝 지점의 진동도 효율적으로 제어할 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 정착시간(settling time)은 끝지점 질량이 커짐에 따라 약간씩 증가하나 끝지점 질량이 없는 경우(0% 경우)는 1.8초 정도, 시스템의 19% 끝지점 질량을 가지는 경우는 2.1초 정도, 시스템의 45% 끝지점 질량을 가지는 경우는 2.5초 정도의 짧은 정착시간을 보여주었다.

7. 참고문헌

1. Nathan, P.L. and Singh, S.N., " Variable structure control of a robotic arm with flexible links," Proceedings 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, No.1, pp.882-887, 1988.
2. Schmitz, E., "Dynamic and Control of a Planar Manipulator with Elastic Links," Proceedings of 25th Conference on Decision and Control, pp.1135-1139, 1989.
3. Cannon Jr., R.H. and Schmitz, E., "Initial Experimental on the end-point control of a flexible one-link robot," The International Journal of Robotics Research, Vol.3 No.3 , pp.62-72, 1984
4. Oakely, C.M. and Cannon Jr., R.H., "End-Point Control of a Two-Link Manipulator with a Very Flexible Forearm: Issues and Experiments,"

Proceedings of the American Control Conference, pp.1381-1388, 1989.

5. Meng, C. and Chen, J., "Dynamic modeling and payload-adaptive control of a flexible manipulators." Proceedings 1989 IEEE International Conference on Robotic and Automation, No.1, pp.488-493, 1988
6. Feliu, V., Ratten, K.S. and Brown, Jr., H.S., "Adaptive Control of a Single-Link Manipulator in the Presence of Joint Friction and Load Changes," Proceedings 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, No.3, pp.1036-1041, 1988.
7. Rovner, D.M., and Cannon Jr., R.H., "Experiments Toward On-Line Identification and Control of a Very Flexible One-Link Manipulator," The International Journal of Robotics Research, Vol.6 No 4, pp.3-19, 1987.
8. 오재윤, "중력장에서 두 개의 탄성링크를 가지는 매니플레이터의 최적제어", 韓國精密工學會誌, 第11卷, 第3號, pp.122-130, 1994
9. Carusone, J., Buchan, K.S and D'Eleuterio, G.M.T., "End-Effector Tracking Control for Structurally Flexible Manipulators," Proceedings of the American Control Conference, pp.1389-1396, 1989
10. Aström, K.J. and Hägglund, T. "Automatic Tuning of PID Controllers" Instrument Society of America, 1988
11. The Mathworks, "SIMULINK, Dynamic System Simulation Software", The Math Works, Inc., 1994

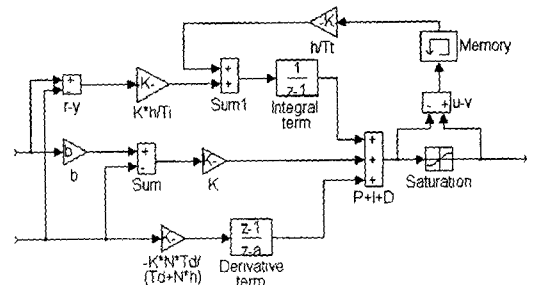


그림 2 Simulink block diagram for the experiment

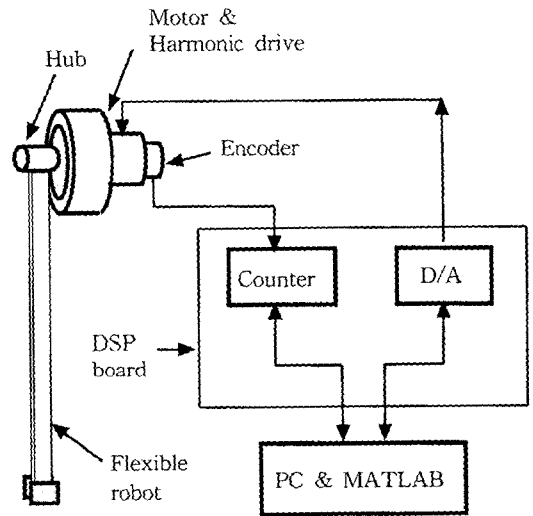


그림 3 Schematic diagram of the test bed

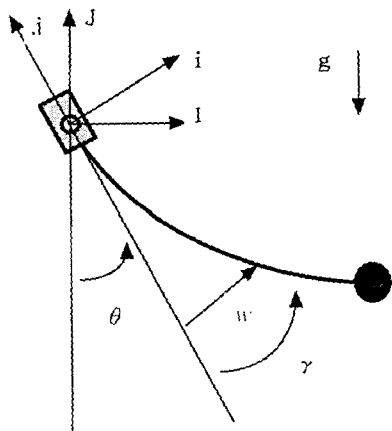


그림 1 A schematic diagram of a flexible manipulator

표 1 Physical and mechanical properties of the flexible manipulator

Property		Unit
Length	1.00	m
Density	2.70×10^3	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Modulus of elasticity	6.90×10^{10}	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
Area moment of inertia	6.75×10^{-11}	m^4
Area	0.90×10^{-4}	m^2
Mass moment of inertia(Hub)	5.45×10^{-3}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
End Mass(M_e)	0	0
	1	4.67×10^{-3}
	2	10.83×10^{-3}
Mass moment of inertia (End Mass, J_e)	0	0
	1	5.55×10^{-6}
	2	21.15×10^{-6}

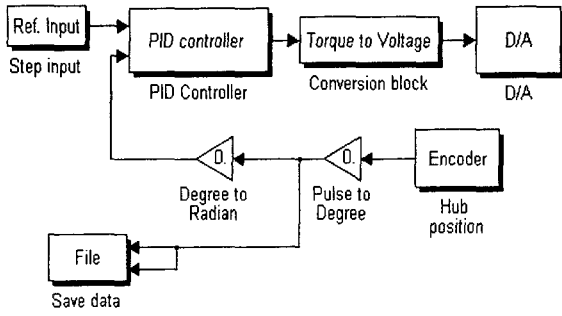


그림 4 Block diagram of a control algorithm

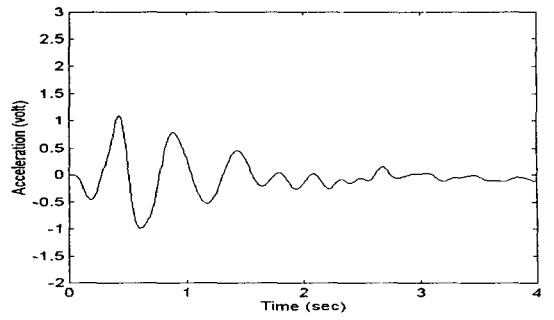


그림 8 End point acceleration with 19% end mass

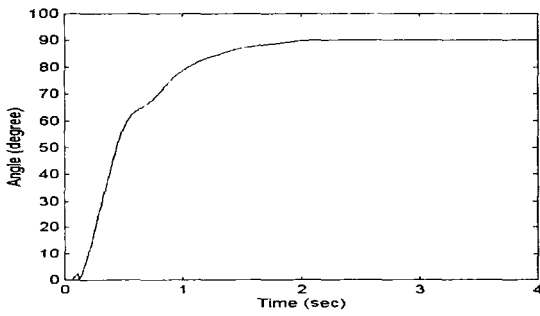


그림 5 Hub position without an end mass

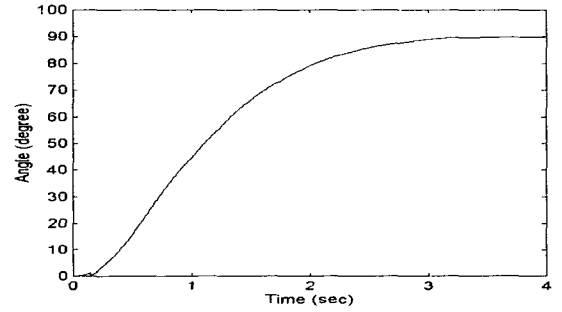


그림 9 Hub position with 45% end mass

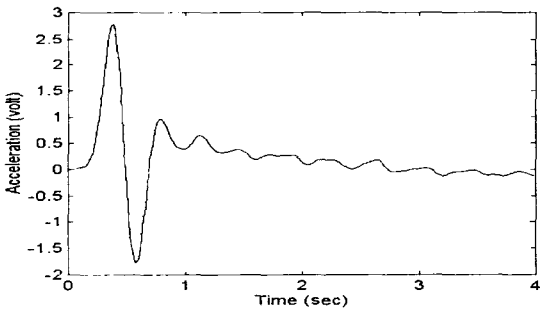


그림 6 End point acceleration without an end mass

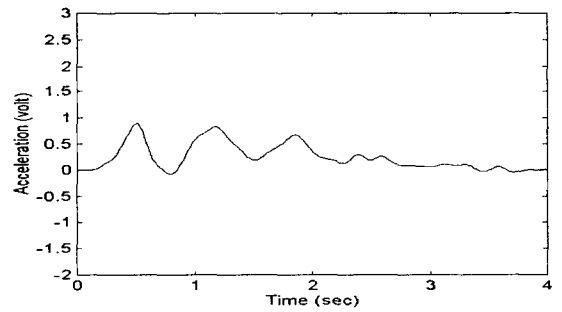


그림 10 End point acceleration with 45% end mass

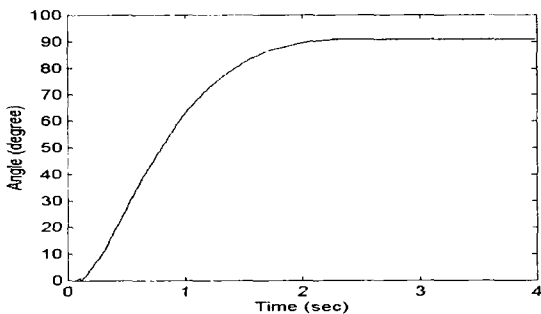


그림 7 Hub position with 19% end mass