

적응 입력다듬기를 이용한 유연한 조작용기의 진동제어

The Vibration Control of Flexible Manipulators using Adaptive Input Shaper

신효필, 정영무, 강이석
(Hyo-Pil Shin, Young-Moo Jung, and E-Sok Kang)

Abstract : The position control accuracy of a robot arm is significantly deteriorated when a long slender arm robot is operated at a high speed. In this case, the robot arm needs to be modeled as a flexible structure, not a rigid one, and its control system needs to be designed with its elastic modes taken into account. In this paper, the vibration control scheme of a one-link flexible manipulator using adaptive input shaper in conjunction with PID controller is presented. The robot consists of a flexible arm manufactured with a thin aluminium plate, an AC servo motor with a harmonic drive for speed reduction, an optical encoder and an accelerometer. On-line identification of the vibration mode is done using the pruned decimation-in-time FFT algorithm to estimate the parameter of the input shaper. Experimental results of the flexible manipulator with a PID controller and input shaper are provided to show the effectiveness of the advocated controllers.

Keywords : vibration control, flexible manipulator, adaptive, input shaper, on-line identification

I. 서론

최근 로봇은 가공, 운반, 용접, 조립, 포장, 검사 등의 공장 자동화 부분에 널리 사용되어 제품 생산의 원가 절감, 품질, 생산성 및 정밀도의 향상에 크게 기여하고 있다. 특히 인간의 작업영역을 벗어난 원자력에 관련된 위험 지역이나, 우주공간과 같은 극한 환경 등으로 작업영역을 넓히고 있다. 이를 위해 로봇 운동의 고속화, 선단 위치제어의 정밀화, 구동 에너지의 절감 등을 위한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다.

로봇 팔의 위치 정밀도는 생산성 향상을 위해 팔을 고속으로 회전시킬 때, 또는 작업 영역의 확대를 위해 팔의 길이가 길어질 경우 저하되며, 구동 에너지의 절감을 위해 팔을 경량화할 경우 더 크게 저하될 수 있다. 이를 극복하기 위해서는 로봇 팔의 진동 모드를 고려한 제어기의 설계가 요구된다.

조작용기 진동제어를 위해 로봇 팔이 유연하다고 가정하면, 조작용기 운동을 기술하는 방정식은 더욱 복잡해지고, 팔의 운동에 부가하여 팔의 변형에 대한 거동도 고려되어야 한다. 만약, 변형을 작다고 가정하면 유연한 로봇 팔의 연구는 로봇 팔 회전에 대한 강체 제어기의 설계와, 링크의 유연성에 의해 발생하는 진동특성의 동력학적 기술 및 제어문제로 귀결될 수 있다.

유연한 로봇 팔과 같은 유연 시스템의 진동을 제어하는 접근법은 크게 폐회로 피드백 기법과 입력다듬기 기법으로 나눌 수 있다. 지금까지 행해진 많은 연구는 스트레인 게이지를 이용한 최적제어[1][2] 및 슬라이딩 모드 제어[3][4], 역동역학(inverse dynamics)을 이용한 진동제어[5], 가속도 신호를 이용한 PID 제어[6] 등과 같이

폐회로 피드백 기법을 이용하여 제어를 적용했을 때 구조물에 나타나는 진동을 없애는데 초점을 맞추고 있다. 진동 모드를 가진하지 않는 방법으로 진동을 제어하는 입력다듬기 기법은 제어기의 구조가 간단하고 적용이 쉬워 유연 구조물 진동제어의 새로운 대안이 되고 있다 [7][8].

이들 진동제어 기법은 제어기 설계에 필요한 시스템의 파라미터 값이 변하거나 미리 알지 못할 경우 제어의 성능이 저하된다. 따라서, 로봇이 비반복 작업이나 미지의 질량을 가진 물체에 대해 작업을 하는 경우 그 질량을 고려한 제어기를 필요로 한다. 이러한 경우 효과적인 제어를 위해서는 질량의 변화에 따라 변하는 파라미터 값을 실시간으로 추정하여 위치 및 진동제어를 하는 적응제어[9][10]를 적용해야 한다.

본 연구에서는 미지의 질량에 따른 유연한 로봇 팔의 고유진동수를 실시간 주파수 인식 알고리즘을 이용하여 추정하고 이를 이용하여 입력을 다듬는 적응 입력다듬기 기법과 허브의 위치를 제어하는 PID 제어기를 결합하여 허브의 위치와 진동을 동시에 제어한다. 적용된 입력다듬기 기법에 필요한 모드 주파수 인식에는 잡음에 강하고 수렴속도가 빠른 TTFE(Time-varying Transfer function Estimation) 알고리즘[9]을 참고로 하여 출력신호인 끝점의 가속도 신호만을 이용한 인식 알고리즘을 개발 적용하였다. 이를 통하여 입력과 출력신호를 이용한 주파수 인식을 통한 적응 입력다듬기에 비하여 계산량이 적은 출력신호만을 이용한 실시간 주파수 인식이 가능하며, 제안된 입력다듬기 기법이 로봇 팔 끝점 위치제어의 정확도를 향상시킬 수 있는 대안이 될 수 있음을 보였다.

II. 수학적 모델

1. 지배 방정식

단일링크로 구성된 유연한 로봇 팔 제어계는 그림 1

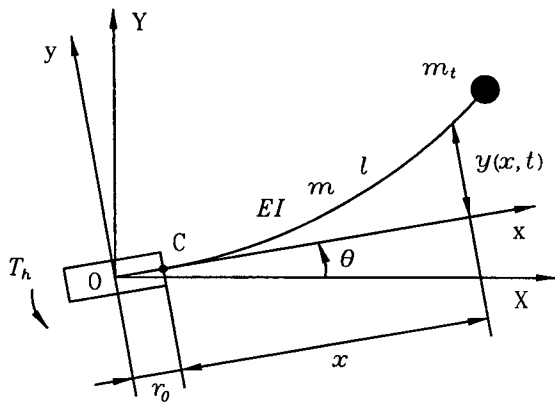


그림 1. 유연한 조작기의 모델링.
Fig. 1. Modeling of the flexible manipulator.

과 같이 길이 r_0 인 허브에 고정된 첨단질량이 부착된 Euler-Bernoulli 보로 이상화하여 해석한다. 그림에서 OXY는 허브 회전중심이 원점인 절대좌표계이며, Oxy는 보와 같이 회전하는 상대회전 좌표계이다. 회전 좌표계의 x축은 C점을 지나는 외팔보의 접선방향, y축은 이에 직교하는 방향이다. 팔 길이 방향의 위치 x 는 계산 편의를 고려하여 C점으로부터의 값을, $y(x, t)$ 는 보의 횡방향 변형량을 나타낸다. 원심력, 로봇 팔의 축 및 폭방향의 변위, 중력 및 회전시 발생하는 Coriolis력의 영향을 무시하고 로봇 팔의 횡방향 진동에 대한 운동방정식과 경계조건을 Hamilton의 원리를 이용하여 유도하면 다음과 같이 표현된다.[2]

$$EI y'''' + \{m + m_t \delta(x-l)\} \ddot{y} = -(r_0 + x) \{m + m_t \delta(x-l)\} \ddot{\theta} \quad (1)$$

$$y(0, t) = y'(0, t) = y'(l, t) = y''(l, t) = 0 \quad (2)$$

여기서 prime (')과 dot (.)는 각각 좌표 x 와 시간 t 에 대한 도함수를 나타내며 $\delta(\cdot)$ 는 Dirac delta 함수를 나타낸다.

또 그림 2와 같이 AC 서보 모터, 하모닉 드라이버, 허브 및 유연한 팔로 구성된 로봇 팔 시스템은 점성 마찰력을 무시하면 구동부의 토오크 평형식은 다음과 같다.

$$T_h = J \ddot{\theta} + T_B + T_f \quad (3)$$

여기서, $T_h = K_t V$

$$T_B = -M_0 + r_0 F_0 \quad (4)$$

$$T_f = C_f \text{sign}(\dot{\theta})$$

여기서 J 는 하모닉 드라이버를 포함한 구동부의 관성 모멘트, K_t , V 는 각각 모터의 회전력 상수와 구동 명령 전압을, T_h , T_B , T_f 는 각각 모터의 구동 토오크, 팔과 모터 사이의 커플링 상수와 쿨롱(Coulomb) 마찰을 나타낸다. 또 M_0 , F_0 는 각각 로봇 팔이 모터 회전축에 미치는 굽힘 모멘트와 전단력을, C_f 는 쿨롱 마찰계수, $\text{sign}(\cdot)$ 은 부호함수(sign function)를 나타낸다.

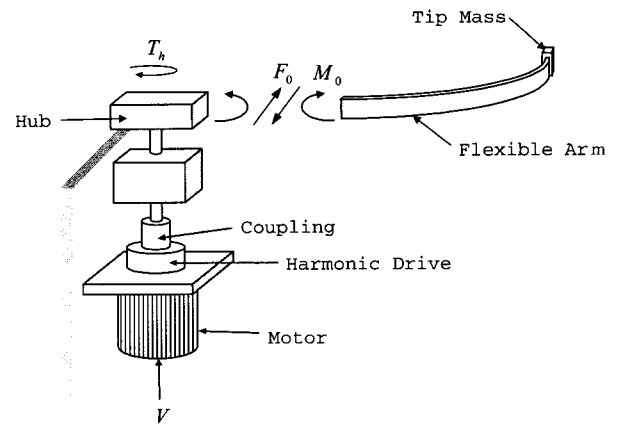


그림 2. 유연한 로봇 조작기 시스템.
Fig. 2. Flexible robot manipulator system.

2. 모달 해석

Galerkin 모드합 방법을 사용하여 (1)의 해를 다음과 같이 가정한다.

$$y(x, t) = \sum_{j=1}^n \phi_j(x) q_j(t) \quad (5)$$

여기서 n 은 가정된 모드 수이며, $q_j(t)$ 는 일반화된 좌표, $\phi_j(x)$ 는 경계조건 (2)를 만족하는 비교함수로 본 연구에서는 첨단질량이 없는 균일 외팔보의 고유함수인 다음 식을 사용한다.

$$\phi_j(x) = (1/\sqrt{ml}) [\cosh \lambda_j(x/l) - \cos \lambda_j(x/l) - \sigma_j \{ \sinh \lambda_j(x/l) - \sin \lambda_j(x/l) \}] \quad (6)$$

여기서, λ_j 는 $1 + \cos \lambda \cosh \lambda = 0$, ($0 < \lambda_1 < \dots < \lambda_n$)의 해이며,

$$\sigma_j = \frac{\sinh \lambda_j - \sin \lambda_j}{\cosh \lambda_j + \cos \lambda_j}, \quad j=1, \dots, n \quad (7)$$

로 표시되는 상수값이다.

(1)에 대하여 (5)로 표현되는 모드식과 (2)의 고유경계조건 (natural boundary condition)을 만족하는 시험함수 $\phi_j(x)$ 를 이용한 변분식으로 변환하고 고유함수의 직교성을 이용하면 모드에 관련된 다음 식을 구할 수 있다.

$$M \ddot{Q} + KQ = \ddot{\theta} F \quad (8)$$

여기서, $M_{ij} = \delta_{ij} + 4m^*(-1)^{i+j}$

$$K_{ij} = \delta_{ij} \lambda_j^4 (EI/ml^4)$$

$$Q_i = q_i(t)$$

$$F_i = -2\sqrt{ml} [(l/\lambda_i^2) + (r_0 \sigma_i / \lambda_i) + m^*(l+r_0)(-1)^{i+1}]$$

$$m^* = m_t/ml, \quad (i, j=1, \dots, n)$$

(8)의 행렬식에 대한 모달행렬 P 를 구하여

$$Q = PH \quad (9)$$

로 상사변환을 하고 직교성 조건을 적용하면 다음과 같은 비연성(decouple) 식을 얻을 수 있다.

$$\bar{H} + \Lambda H = \bar{\theta} E \quad (10)$$

여기서 $\Lambda = P^T K P = \text{diag}(\omega_1^2, \dots, \omega_n^2)$

$$E = P^T F \quad (11)$$

여기서 ω_i 는 로봇 팔의 i 번째 모드의 고유진동수를 나타낸다. 또한, (4)에 (9)를 대입하여 토오크 평형식을 정리하면 다음과 같다.

$$K_i V = J \ddot{\theta} + S^T H + T_f \quad (12)$$

여기서, $S^T = EI[\{r_0 \phi_1'''(0) - \phi_1''(0)\},$

$$\dots, \{r_0 \phi_n'''(0) - \phi_n''(0)\}]P$$

III. 제어기 설계

제어기는 크게 허브의 각 위치를 제어하는 강체제어기와 유연한 팔의 진동을 감쇠시키기 위한 입력다듬기 제어부 2부분으로 나누어 설계하였다. 강체 제어기는 산업 현장에서 가장 널리 사용되고 있는 PID 제어기로 구성하였으며, 진동 감쇠를 위한 제어기는 팔의 고유 진동 모드를 가진시키지 않도록 제어 입력을 다듬는 제어기로 영향이 가장 큰 1차 모드만을 감쇠시키도록 하였다.

1. 허브 회전각 제어기

PID 제어기는 제어기 구조가 간단하여 실현이 용이하고 피드백 기능, 정상상태 오차 제거 기능, 상태예측 기능, 구동기 포화상태 대처기능 등과 같은 우수한 제어기 성능을 가지고 있기 때문에 산업전반에 걸쳐 가장 널리 쓰이고 있는 제어기법이다. 본 논문에서는 이와같이 제어기 구조가 간단하면서 우수한 성능을 가지고 있는 PID 제어기를 허브 회전각을 제어하는 강체 제어기로 사용하였다.

제어 기준입력으로 계단 입력을 사용하는데 이 값은 초기의 아주 급격한 변화 이후에는 상수값을 유지하므로 미분오차항 계산시 기준입력값을 제외한 다음식으로 표현되는 이산화된 PID 제어기를 적용하기로 한다.

$$u(k) = K_p \left[e(k) + \frac{1}{T_i} \frac{T}{z-1} e(k) - T_d \frac{z-1}{Tz} \theta(k) \right] \quad (13)$$

여기서 K_p , T_i , T_d 는 각각 비례이득, 적분시간, 미분시간을, T 는 샘플링 시간을 나타내며, 우변은 각각 비례, 적분 및 미분오차항을 나타낸다.

또한 적분기를 가진 제어기의 경우 제어오차가 너무 커서 적분기가 포화될 경우 프로세스의 출력이 변화하여도 제어기의 포화된 상태가 지속되어 궤환경로가 무력화되는 와인드업 현상이 발생하여 제어성능이 저하된다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 와인드업을 방지 기법을 고려한 제어기를 구성하였으며, 구성된 제어기의 블록선도는 다음 그림 3과 같다.

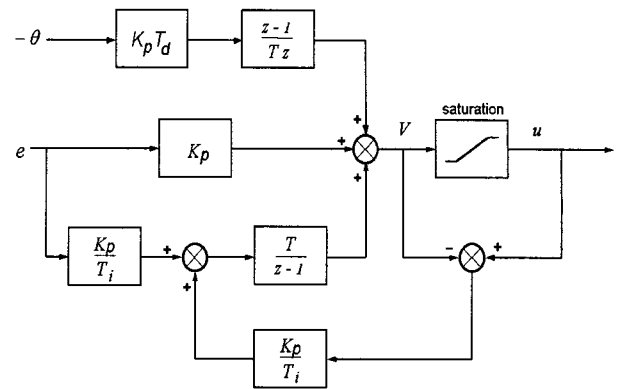


그림 3. 와인드업 방지 보상기를 가진 PID 제어기.
Fig. 3. PID controller with an anti-windup compensator.

2. 입력다듬기 제어기[7]

입력다듬기 필터는 시간 영역 내에서 적당한 크기와 간격을 가진 임펄스의 열로 기준입력을 컨볼루션하는 실시간 컨볼버로 구성된다.

이 때 입력다듬기로 유연 구조물의 진동을 제어하기 위해 가해야 하는 임펄스의 크기와 적용시간 간격을 구하는 방법을 요약하면 다음과 같다.

임의 차수의 비연성(uncoupled) 선형 진동시스템의 임펄스 응답은 다음 식과 같은 감쇠를 가진 2차 시스템 응답의 직렬 집합으로 기술할 수 있다.

$$y(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp^{-\zeta_i \omega_i (t-t_0)} \sin \omega_i \sqrt{1-\zeta_i^2} (t-t_0) \quad (14)$$

여기서, $A_i = A \frac{\omega_i}{\sqrt{1-\zeta_i^2}}$

여기서 A 는 임펄스의 크기, ω_i , ζ_i 는 각각 플랜트의 고유진동수와 감쇠비, t , t_0 는 시간과 임펄스가 가해지는 시간을 나타낸다.

설명을 간략히 하기 위해 단 한 개의 유연 모드 ($n=1$)를 감쇠시키기 위해 N_1 개의 임펄스 열이 적용된다고 가정하자. 각 임펄스는 크기가 $\{A_{1,j}\}$ 이며, 시간 $\{t_{1,j}\}$ 에 적용된다고 하면 시간 t_{1,N_1}^+ (마지막 임펄스가 적용된 직후의 순간)에 N_1 개의 임펄스에 대한 계의 응답은 (14)로부터 크기 $A_{1,tOT}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$A_{1,tOT} = \frac{\omega_1}{\sqrt{1-\zeta_1^2}} \sqrt{(\sum_1)^2 + (\sum_2)^2} \quad (15)$$

여기서, $\sum_1 = \sum_{j=1}^{N_1} A_{1,j} e^{-\zeta_1 \omega_1 (t_{1,N_1} - t_{1,j})} \cos(\omega_1^d t_j)$

$$\sum_2 = \sum_{j=1}^{N_1} A_{1,j} e^{-\zeta_1 \omega_1 (t_{1,N_1} - t_{1,j})} \sin(\omega_1^d t_j)$$

여기서 $\omega_1^d = \omega_1 \sqrt{1-\zeta_1^2}$ 는 시스템의 감쇠 고유주파수에 해당된다. 진동이 완전히 소멸되기 위해서는 시간 t_{1,N_1}^+ 에서 $A_{1,tOT}$ 가 영이 되어야 한다. 이는 (15)의 제곱항 두 개가 모두 영이 되는 경우: 즉

$$\sum_1 = \sum_2 = 0 \tag{16}$$

이다. 여기에 2개의 제한조건 :

$$t_{1,1} = 0, \sum_{j=1}^{N_1} A_{1,j} = 0 \tag{17}$$

을 추가한다. 첫 번째 제한조건은 단순히 시간 원점을 정하는 것이며, 두 번째 제한조건은 $\{A_{1,j}\}$ 항 전체합이 1이 되도록 한다. 이 조건은 1) 다듬기 임펄스 열로 컨볼루션하기 전과 후 임의 입력의 전체 에너지가 같게 하며 2) 컨볼루션된 입력의 최대값이 원래의 입력의 최대값을 초과하지 않도록 하여 작동기의 포화를 피하도록 한다.

제한된 기법의 모드 주파수 변동에 대한 강건성은 $\omega \simeq \omega_1$ 부근에서 다음과 같이 전개한 후 $\sum_1(\omega)$ 와 $\sum_2(\omega)$ 의 잔류항의 크기에 관련된다.

$$\begin{aligned} \sum_1(\omega) &= \sum_1(\omega_1) + (\omega - \omega_1) \frac{d\sum_1(\omega)}{d\omega} \\ &+ \frac{1}{2}(\omega - \omega_1)^2 \frac{d^2\sum_1(\omega)}{d\omega^2} + \dots \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned} \sum_2(\omega) &= \sum_2(\omega_1) + (\omega - \omega_1) \frac{d\sum_2(\omega)}{d\omega} \\ &+ \frac{1}{2}(\omega - \omega_1)^2 \frac{d^2\sum_2(\omega)}{d\omega^2} + \dots \end{aligned} \tag{19}$$

따라서, 강건성을 더하기 위해서는 $\omega = \omega_1$ 일 때 $d\sum_1(\omega)/d\omega = d\sum_2(\omega)/d\omega = d^2\sum_1(\omega)/d\omega^2 = d^2\sum_2(\omega)/d\omega^2 = \dots = 0$ 을 만족하도록 해야 한다. 이 경우 미분의 각 차수에 대한 위의 조건식으로부터 요소 $\{A_{1,j}\}$ 와 $\{t_{1,j}\}$ 사이에 적용되는 추가적인 제한조건을 구할 수 있다.

$$\sum_{j=1}^{N_1} A_{1,j}(t_{1,j})^j e^{-\xi_1 \omega_1 (t_{1,m} - t_{1,j})} \cos(\omega_1^d t_j) = 0 \tag{20}$$

$$\sum_{j=1}^{N_1} A_{1,j}(t_{1,j})^j e^{-\xi_1 \omega_1 (t_{1,m} - t_{1,j})} \sin(\omega_1^d t_j) = 0 \tag{21}$$

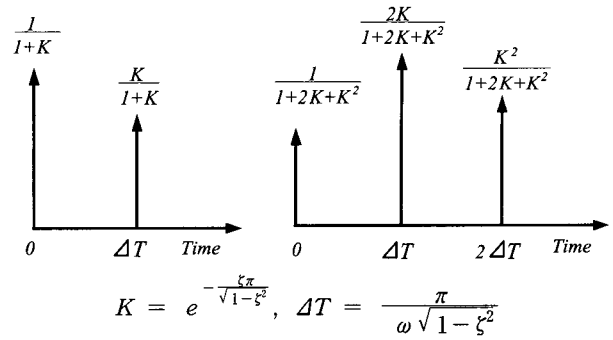
따라서, $2N_1$ 개의 미지수 $\{A_{1,j}\}$ 와 $\{t_{1,j}\}$ 는 4개의 독립적인 방정식 (16),(17)과 (16)을 (N_1-2) 번 미분하여 얻어지는 $2(N_1-2)$ 개의 (20)과 (21)를 풀어서 구할 수 있다. N_1 개의 다듬기 입력의 크기 $A_{1,j}$ 와 지연시간 $t_{1,j}$ 에 대한 해는 다음과 같다:

$$A_{1,j} = \frac{\binom{N_1-1}{j-1} K_1^{j-1}}{\sum_{i=0}^{N_1-1} \binom{N_1-1}{i} K_1^i} \tag{22}$$

$$t_{1,j} = (j-1) \frac{\pi}{\omega_1 \sqrt{1-\xi_1^2}} \tag{23}$$

$$K_1 = e^{-\frac{\xi_1 \pi}{\sqrt{1-\xi_1^2}}} \tag{24}$$

예를 들면 한 개의 진동모드를 감쇠시키기 위해 2개 및 3개의 임펄스를 사용하는 경우 적용하는 임펄스 열의 크기와 적용시간 간격을 그림으로 나타내면 그림 4와



(a) 2 impulse input (b) 3 impulse input

그림 4. 입력다듬기 임펄스 열.

Fig. 4. Impulse trains for the input shaper.

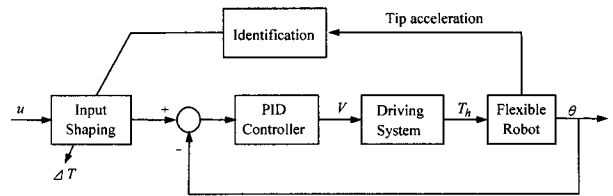


그림 5. 적응 입력다듬기 루프.

Fig. 5. Adaptive input shaping loop.

같다.

3. 적응제어

입력다듬기 기법을 이용한 진동 감쇠를 위해서는 시스템의 모드 주파수와 감쇠비에 대한 정보를 미리 알고 있어야 한다. 이들 정보가 없는 경우 미지의 외팔보 침단질량에 따라 정해지는 모드 주파수를 실시간으로 추정하고 이 값을 이용하여야 한다. 이를 위해 적용된 적응 입력다듬기 루프의 개략도는 그림 5와 같다.

3.1 모드 주파수 추정

본 논문의 경우 외팔보의 끝점 위치정밀도에 가장 크게 영향을 미치는 지배적인 진동 모드인 1차 모드를 감쇠시켜야 하며, 이를 위해서는 두 번째 임펄스를 적용하기 전, 즉 모드 주파수의 반주기 내에 1차 모드 주파수를 인식해야 한다. 그러나 진동의 반주기 내의 측정자료를 이용하여 그 주파수를 인식하는 것은 이론적으로 불가능하다. 따라서 여기서는 1차 모드의 반주기 내에 최소한의 데이터를 입력받아 고속 푸리에 변환 (Fast Fourier Transform; FFT)을 이용하여 2차 모드 주파수를 인식한 후 실험을 통하여 오프 라인으로 미리 구한 1, 2차 모드 사이의 관계를 이용하여 1차 모드 주파수를 추정한다.

본 연구에서 사용한 1차 모드 주파수 추정을 위한 2차 모드 인식 알고리즘을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 계산부하와 허용되는 계산시간을 고려하여 선정된 원하는 개수의 데이터를 받아서 버퍼에 저장한다.
- 2) 계산 부하와 인식 주파수의 분해능을 고려하여 측정된 데이터에 추가적인 '0'을 덧붙여 입력 데이터 블록을 형성한다(zero-padding).

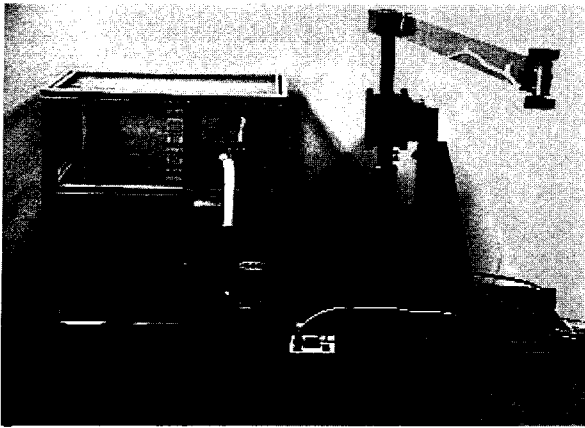


그림 6. 유연한 조작기 시스템 실험장치.
Fig. 6. Experimental setup of the flexible manipulator system.

3) 계산량을 줄이기 위하여 불필요한 가지를 제거한 시분해 알고리즘(pruned decimation-in-time algorithm)을 적용하는 고속 프리에 연산을 통하여 입력 데이터 블록에 해당하는 주파수 변환된 데이터 블록을 만든다.

4) 시스템의 2차 모드 주파수 범위에 해당되는 검색 대상 주파수 대역 내에서 주파수 변환된 데이터의 크기를 비교하여 크기의 최대값에 해당되는 2차 모드 주파수를 검색한다.

3.2 적응 제어

시스템의 감쇠비는 크게 변하지 않으며 입력다듬기에 의한 진동감쇠 성능도 감쇠비의 변화에 민감하지 않다. 그러나 첨단 질량이 변함에 따라 변하는 진동모드 주파수는 진동감쇠 성능을 좌우하는 중요 파라미터이다. 따라서 본 연구에서는 감쇠비는 일정하다고 가정하여 (24)와 같이 시스템의 감쇠비만의 함수인 임펄스의 크기는 변화시키지 않고, (23)으로부터 다음 식으로 표현되는 감쇠비와 주파수의 함수인 임펄스 적용시간 간격을 실시간으로 추정된 모드 주파수를 이용하여 계산하고 이를 적용하였다.

$$\Delta T = \frac{\pi}{\hat{\omega} \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (25)$$

여기서 $\hat{\omega}$ 는 진동모드 주파수의 추정값이다.

IV. 실험

1. 실험 장치

실험장치는 그림 6과 같이 하모닉 드라이버가 부착된 AC 서보 모터에 의해서 구동되는 강제 허브에 얇은 알루미늄 판으로 제작된 유연한 로봇 팔을 부착하여 구성하였다. 팔의 다른 한쪽 끝에는 홀더를 부착하여 첨단질량을 부착하고 변경할 수 있도록 하였다. 팔의 회전각은 모터 회전축에 부착되어 있는 엔코더를 이용하여 측정하고, 로봇 팔의 진동값은 팔의 끝단에 부착한 가속도계의 신호를 사용하였다. 이들 물리량을 컴퓨터와 연결하기 위하여 엔코더 펄스 신호는 24비트 카운터를 이용하고, 가속도 신호는 12비트 AD 변환기를 이용하였다. 이들은

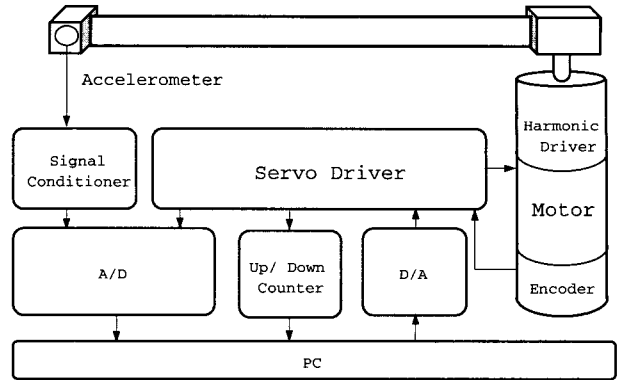


그림 7. 실험장치 개략도.
Fig. 7. Schematic of the experimental equipment.

표 1. 유연한 로봇 조작기 시스템의 파라미터.
Table 1. Parameters of the flexible robot manipulator system.

Parameters		Value
Length of the flexible link (l)		0.87 m
Mass per unit length of the flexible link (m)		0.222 kg/m
Bending stiffness of the flexible link (ET)		1.70 Nm ²
Tip mass (m_t) (Percentage to the mass of the flexible link)	mass 1	0.023 kg (12%)
	mass 2	0.052 kg (27%)
	mass 3	0.104 kg (54%)
	mass 4	0.209 kg (108%)
Hub length (r_0)		0.051 m
Inertia of the hub (J_h)		9.46 kgm ²
Total inertia of the flexible arm system (J)		16.05 kgm ²
Proportional gain of the driving system (K_t)		16.98 Nm/V
Velocity saturation bound in hub (S_b)		3.27 rad/s
Friction torque in hub (T_f)		8.815 Nm
Gear reduction ratio (N)		80
Damping ratio of the flexible arm (ζ)		0.025

인터페이스 카드를 통하여 486 PC와 연결하고 계산된 제어입력은 DA 변환기를 통하여 서보드라이버로 전달하도록 하였다. 제작된 실험장치의 개략도는 그림 7과 같으며, 사용된 실험장치의 파라미터 값은 표 1과 같다.

2. 허브 회전각 제어

허브 회전각 제어기는 와인드업 현상을 보상하는 이산 PID 제어를 사용하였고 제어기의 이득은 실험을 통하여 선정하였으며, 실험에 사용된 제어 이득은, $K_p = 0.7$, $T_i = 3$, $T_d = 0.07$ 샘플링 주기는 200Hz로 하였다. 기준 입력은 30계단입력을 사용하였다.

3. 적응 제어

실험장치의 고려 대상 첨단질량 변화에 대한 1차 진동모드의 주파수 범위는 0.97 - 1.76Hz이다. 따라서 입력다듬기 기법을 적용하기 위해서는 주파수가 가장 높은 1.76Hz의 반주기에 해당되는 0.284초 이내에 모드 주파수의 인식이 완료되어야 한다.

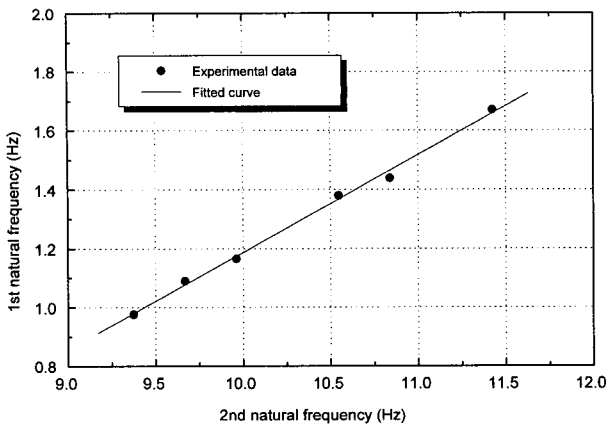


그림 8. 2차 모드주파수에 대한 1차 모드주파수 추정값.

Fig. 8. 1st natural frequency estimation based on 2nd natural frequency.

따라서, 본 연구에서는 600Hz 샘플링으로 128개의 가속도 신호를 입력받은 후 1920개의 0을 추가한 데이터 블록에 대하여 불필요한 가지를 제거하는 시분해 알고리즘을 적용한 2048점 고속 푸리에 연산을 수행하여 2차 모드를 인식했으며, 데이터 블록을 형성한 후 인식을 위한 계산에 70ms 이내의 시간이 소요되었다.

2차 모드의 검색이 첨단 질량 변화에 대한 2차 모드의 변화 범위에 해당되는 9.3 - 11.5Hz 내에서만 이루어지므로 측정된 가속도 신호를 필터링하지 않고 그대로 사용하였으며, 2048점 FFT를 적용할 경우 2차 모드 주파수의 공칭 분해능은 0.293Hz이다.

임펄스 적용 시간 간격은 실험을 통하여 오프라인으로 미리 구한 첨단 질량의 변화에 대한 1차 모드와 2차 모드의 관계(그림 8)로부터 1차 모드 주파수를 추정하고, (25)를 이용하여 계산하도록 하였다.

입력다듬기 필터에는 FFT 알고리즘의 분해능, 불충분한 입력 데이터의 수 등에 따른 모드 주파수 인식오차와 실제 계산된 임펄스 적용시간과 샘플링 시간의 불일치 및 시스템의 비선형성에 기인된 오차에 보다 강건하게 하기 위하여 3개의 임펄스를 사용하였다.

4. 실험 결과

진동제어를 실시하지 않고 허브의 회전각 위치만을 제어한 경우와 위치와 진동을 비적용 및 적용 입력 다듬기 제어를 한 경우에 4가지 첨단질량에 대해 실험을 수행하고 결과를 서로 비교하였다.

그림 9는 Math Work Inc.사의 Simulink를 이용한 모의실험과 실제 실험결과를 비교한 결과이다. 거의 일치하는 것으로 보아 계의 모델링이 비교적 정확히 되었음을 알 수 있다.

그림 10에서 그림 13은 허브 위치 제어만 한 경우와 적용 입력다듬기 제어를 한 경우의 실험결과 비교이다. 적용 제어기를 사용한 경우 허브 위치제어만 한 경우와 달리 가속도 신호에서 1차 모드 성분은 거의 소멸되고, 2차 이상의 고차 모드 성분이 주로 남아있음을 보

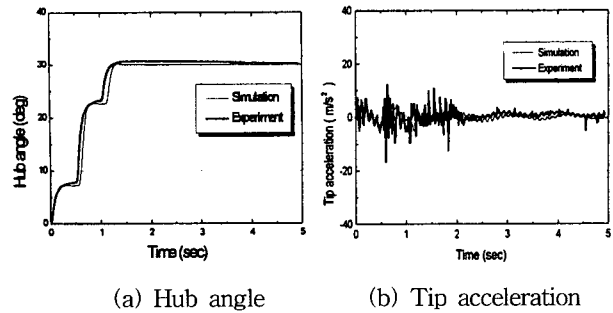


그림 9. 전산모사와 실험결과 비교(적용제어, 질량 4).
Fig. 9. Comparison between simulation and experimental results (adaptive control, mass 4).

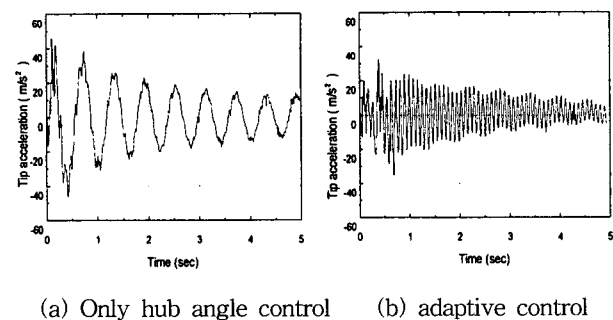


그림 10. 실험결과 비교(질량 1).
Fig. 10. Comparison of the experimental results (mass 1).

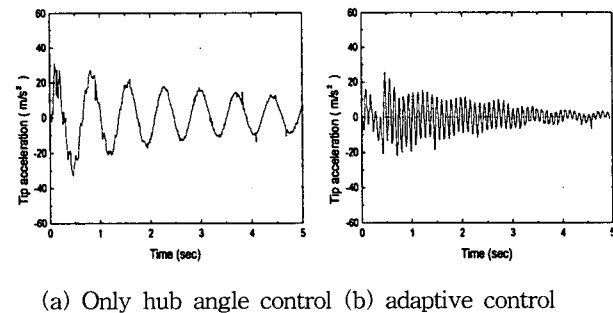
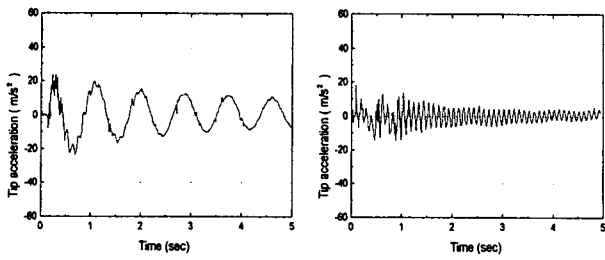


그림 11. 실험결과 비교(질량 2).
Fig. 11. Comparison of the experimental results (mass 2).

여준다. 이들 2차 이상의 고차 모드는 실제 끝점 위치에는 크게 영향을 미치지 않는다는 점을 고려하면 적응제어의 경우 첨단질량의 크기에 관계없이 위치 및 진동 제어가 잘 됨을 알 수 있다. 또한, 그림을 통하여 보면 첨단질량이 클수록 잔류 진동량이 적은 것은 첨단질량이 커질수록 고차 모드에 비하여 1차 모드가 상대적으로 더 지배적이기 때문으로 판단된다.

표 2는 오프라인 실험과 온라인 인식을 통하여 추정된 모드주파수를 보여주며, 비교적 서로 잘 일치하는 것으로 보아 인식 알고리즘이 적절함을 보여준다.

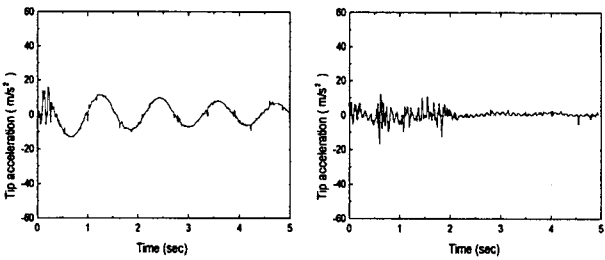
그림 14에서 그림 17은 각 첨단질량에 대해 질량 1에 대한 모드주파수를 이용한 비적용 입력다듬기와 적용 입



(a) Only hub angle control (b) adaptive control

그림 12. 실험결과 비교(질량 3).

Fig. 12. Comparison of the experimental results (mass 3).



(a) Only hub angle control (b) adaptive control

그림 13. 실험결과 비교(질량 4).

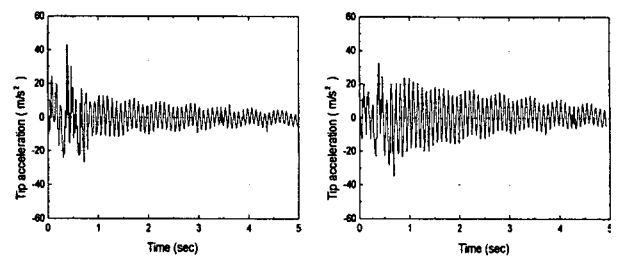
Fig. 13. Comparison of the experimental results (mass 4).

표 2. 첨단질량 변화에 대한 고유진동수.

Table 2. Natural frequencies for tip mass variation.

Tip mass (kg)	mode	natural frequency (Hz)	
		measured	estimated
mass 1 (0.023)	1st	1.758	1.755
	2nd	11.503	11.719
mass 2 (0.054)	1st	1.367	1.368
	2nd	10.547	10.547
mass 3 (0.104)	1st	1.172	1.174
	2nd	9.961	9.961
mass 4 (0.209)	1st	0.977	0.980
	2nd	9.375	9.375

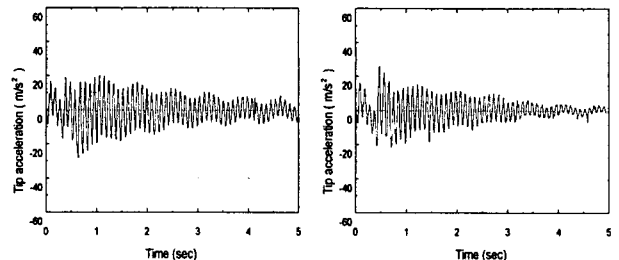
력다듬기의 실험결과를 비교한 것이다. 각 그림에서 (a)는 질량 변화에 따른 영향을 확인하기 위하여 질량 1인 경우에 대하여 오프라인으로 구한 모드주파수를 이용한 비적응 입력다듬기를 각각의 질량에 적용한 실험결과이며, (b)는 각각의 질량에 대하여 앞에서 설명한 적응제어 방법에 따라 온라인으로 모드주파수를 구하면서 적응 입력다듬기를 수행한 실험결과이다. 그림 14의 경우 적응제어의 경우가 비적응제어에 비하여 제어목표인 1차 모드의 감쇠성능은 서로 차이가 없으나, 끝점 위치정밀도에 영향이 적은 2차 모드는 다소 증폭되는 경향을 보인다. 이는 비적응제어의 경우 질량 1에 대해 많은 량의 데이터를 이용하여 오프라인으로 미리 구한 모드주파수를 이용하여 제어를 하는 반면, 적응제어는 질량을 모르는 상태에서 한정된 데이터를 이용하여 온라인으로 진동



(a) Non-adaptive (b) Adaptive

그림 14. 실험결과 비교(질량 1).

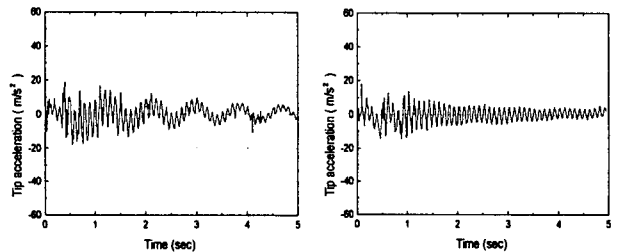
Fig. 14. Comparison of the experimental results (mass 1).



(a) Non-adaptive (b) Adaptive

그림 15. 실험결과 비교(질량 2).

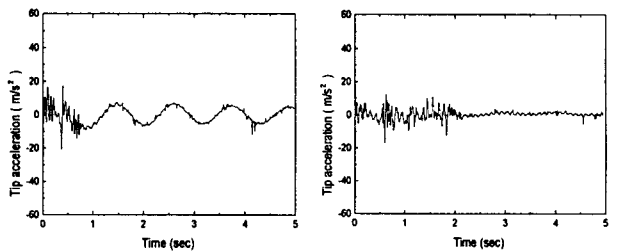
Fig. 15. Comparison of the experimental results (mass 2).



(a) Non-adaptive (b) Adaptive

그림 16. 실험결과 비교(질량 3).

Fig. 16. Comparison of the experimental results (mass 3).



(a) Non-adaptive (b) Adaptive

그림 17. 실험결과 비교(질량 4).

Fig. 17. Comparison of the experimental results (mass 4).

주파수를 추정하여 제어하기 때문이다. 그러나 그림 15-

17에서와 같이 다른 질량에 대한 모드주파수를 이용한 비적응제어에 비하여 적응제어가 우수한 성능을 보임을 알 수 있다. 이 결과를 통하여 볼 때 비적응제어의 경우에 비하여 적응제어의 경우가 첨단질량의 크기 변화에 대하여 강건하게 진동 감쇠 성능을 유지하고 있음을 보여준다.

V. 결론

본 논문에서는 미지의 첨단질량을 갖는 유연한 로봇 팔 시스템의 끝단 진동과, 허브의 위치를 AC 서보모터를 이용하여 동시에 제어하였다. 허브의 위치를 제어하는 강제 제어기로는 와인드업 현상을 보상해준 이산 PID 제어기를 사용하고, 로봇 팔 끝단의 진동은 실시간으로 인식된 모드주파수 정보를 이용하는 입력다듬기 기법을 결합한 적응 입력다듬기를 적용하였다.

실험을 통하여 미지의 첨단 질량을 갖는 유연한 로봇 팔의 위치뿐만 아니라 끝점의 진동을 실시간으로 인식된 주파수 인식 정보를 이용한 적응 입력다듬기 기법으로 제어함으로써 적응 입력다듬기 기법이 진동모드를 감쇠시켜 로봇 팔 끝점 위치의 정확성을 향상시킬 수 있는 대안이 될 수 있음을 입증하였다.

또한, 기존의 입력과 출력신호를 이용한 주파수 인식을 통한 적응 입력다듬기에 비하여 계산량이 적은 출력신호만을 이용한 실시간 모드 주파수 인식이 가능함을 실험을 통하여 보였다.

그러나 본 연구에서 사용된 제어기법은 외란보 끝단의 정보를 되먹임(feedback)하지 않았기 때문에 외란에 의한 진동에는 적절하게 반응하지 못하는 단점이 있다. 그러므로 외란에도 강건하게 진동을 감소시킬 수 있는 알고리즘의 개발이 필요하다.

참고문헌

[1] R. H. Cannon, and E. Schmitz, "Initial experiments on end-point control of a flexible one-link

robot," *Intl. J. of Robotics Research*, vol. 3, no. 3, pp. 62-75, Fall, 1984.

[2] 하영균, 김승호, 이상조, 박영필, "유연한 단일링크 로봇 조작기의 최적기환제어," *기계학회논문집*, 11권 6호, pp. 923-934, 1987.

[3] K. S. Yeung and Y. P. Chen, "Sliding-mode controller design of a single-link flexible manipulator under gravity," *J. of Control*, vol. 52, no. 1, pp. 101-117, 1990.

[4] 신효필, 윤여산, 윤지섭, 강이석, "유연한 로봇팔의 진동제어," '96 자동제어 학술회의 논문집, pp. 229-232, 1996.

[5] D.-S. Kwon and W. J. Book, "A time domain inverse dynamics tracking control of a single-link flexible manipulator," *Trans. ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 116, pp. 193-200, 1994.

[6] S. Yurkovich and F. E. Pacheco, "On cotroller tuning for a flexible-link manipulator with varying payload," *J. of Robotic Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 233-254, 1989.

[7] N. C. Singer and W. P. Seering, "Preshaping command inputs to reduce system vibration," *Trans. ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 112, pp. 76-82, May, 1990.

[8] K. Zuo and D. Wang, "Closed loop shaped-input control of a class of manipulators with a single flexible link," *Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automations*, pp. 782-787, 1992

[9] S. Yurkovich and A. P. Tzes, "Experiments in identification and control of flexible-link manipulators," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 41-47, Feb. 1990.

[10] 박영욱, 김재원, 박영필, "유연한 단일링크 조작기의 적응진동제어," 한국소음진동학회지, 제5권, 제3호, pp. 385-394, 1995.



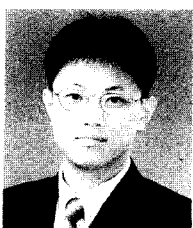
신 호 필

1953년 1월 29일생, 1977년 울산대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1991년 충남대학교 기계설계공학과 졸업(공학석사). 1992년-현재 충남대학교 기계설계공학과 박사과정. 1977-현재 국방과학연구소 재직중. 주관심분야는 로봇틱스, 제어이론의 응용, 유압제어 공학.



강 이 석

1952년 2월 14일생, 1974년 서울대학교 기계공학과 졸업(공학사). 아주대 기계공학과 졸업(공학석사). 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학박사). 1991년-1992년 MIT대학 방문연구원. 1981년-현재 충남대학교 기계설계공학과 교수. 주관심분야는 제어이론의 응용, 로봇틱스, 인공지능, 공장자동화.



정 영 무

1971년 1월 21일생, 1996년 충남대학교 기계설계공학과 졸업(공학사). 1998년 동대학원 석사. 1998-현재 (주)현대자동차 근무. 주관심분야는 적응제어, 로봇틱스.