

유연한 조작기를 이용한 입력성형기법의 비교 연구 A Comparative Study on Input Shaping Techniques using a Flexible Manipulator.

심 호석, 이 재원*, 주해호*

영남대학교 기계공학부(Tel: 053-810-2458; Fax: 813-3703; E-mail: jwlee@yucc.yeungnam.ac.kr)

Abstract Several input shaping techniques are suggested to reduce the vibration of a flexible manipulator. The theories of typical 4 methods(Singer, Tuttle, Feddema, Zuo) are explained and are tested by the experiment of one link flexible manipulator. Zuo's method is the best of all with respect to its robustness.

Key words Input shaping, Flexible manipulator, Vibration reduction, Robustness

1. 서론

작업반경이 큰 대형로봇으로 작업하기 위해서는 자체 중량을 이길 수 있는 구동력이 큰 모터를 사용하거나, 운동속도를 줄여야 한다. 그렇지않고, 모터의 크기와 운동속도를 그대로 유지하기 위해서는 로봇구조물을 가벼운 재질로 만들어야 한다. 가벼운 구조물의 로봇을 고속으로 운전하게 되면 로봇구조물이 진동하게 된다. 진동이 소멸될 동안은 로봇작업을 중단하여야 하기 때문에 로봇의 작업사이클이 길어지게 되는 단점이 있다. 이러한 진동을 줄이기 위한 여러 가지 제어기법이 최근에 많이 연구되어 왔다. 이를 크게 분류하면 적극적 제어기법과 소극적 제어기법이 있다.

적극적 제어기법이란 진동을 측정하여 그 진동을 억제하는 방향으로 모터를 구동하는 방법이다. 진동 측정신호로는 스트레인 또는 가속도[6]를 사용하였다. 이러한 적극적 제어기법은 여러 가지 형태의 입력이나 시스템의 특성이 변화하여도 잘 적용될 수 있지만 스트레인 및 가속도를 측정할 수 있는 별도의 센서가 필요하다. 또한 이러한 센서들은 현장에서 자주 고장이 난다든지 파손될 염려가 있다. 반면, 소극적 제어기법으로는 진동이 잘 일어나지 않는 입력지령을 가하는 방법이다. 이를 성형입력법(input shaping technique)이라 부른다. 이 성형입력기법은 개회로 기법이기 때문에 시스템의 특성이 변하든지 외란이 작용할 경우 성능이 떨어지는 단점이 있지만, 별도의 측정신호를 필요로 하지 않고 오직 구조물의 진동주파수 및 감쇠비만 알면되므로 현장에서 쉽게 사용할 수 있다.

이러한 입력성형기법의 연구의 주된 내용은 개회로의 단점인 시스템특성 변화에 따른 성능저하를 최대한 줄일 수 있는 강인성에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 본 연구에서는 지금까지 발표된 여러가지 입력성형기법을 여러 측면에서 비교 분석하고자 한다.

2. 입력성형 이론

2.1 Singer 방법 [2]

Smith[3]는 계단 입력을 두 단계로 나누어 입력함으로써 잔류 진동이 없애는 포시캐스트(Posicast)기법을 발표하였다. 이 방법은 그림 1과 같이 첫번째의 임펄스가 작용되어 발생하는 진동을 반 주기 후 두 번째 임펄스를 작용시켜 그 잔류 진동을 상쇄시

키는 것이다.

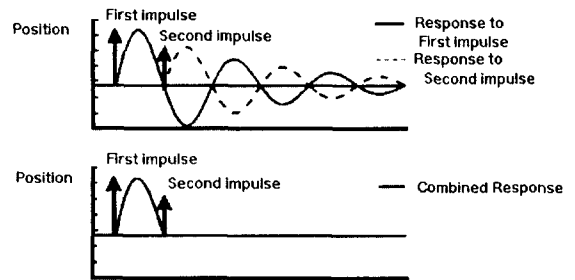


그림.1 진동 상쇄의 원리

Fig.1 Principle of the vibration cancellation

하지만, 이 방법은 진동 모드의 변화에 대한 강인성이 나쁘고, 진동 모드가 두 개이상인 경우에는 사용할 수 없었다. Singer와 Seering은 이 Posicast방법을 발전시켜 진동모드의 변화에 강인한 입력을 줄 수 있는 방법을 제시하였다.[2] 각 임펄스 열의 크기 및 주기는 다음과 같이 구한다. 일반적인 2차 진동 시스템에서 임펄스 입력에 대한 출력을 시간의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$y(t) = [A \frac{\omega}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega(t-t_0)}] \sin(\omega\sqrt{1-\zeta^2}(t-t_0)) \quad (1)$$

여기서 A는 임펄스의 크기, ω 는 시스템의 비감쇠 고유진동수, ζ 는 시스템의 감쇠비이고, t_0 는 임펄스 입력이 작용될 때의 시간이다. 서로 다른 n개의 임펄스가 동시에 작용하면 임펄스의 응답은 다음과 같다.

$$B_1 \sin(at + \phi_1) + B_2 \sin(at + \phi_2) + \dots + B_n \sin(at + \phi_n) = A_{amp} \sin(at + \phi) \quad (2)$$

여기서

$$A_{amp} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (B_i \sin \phi_i)^2 + \sum_{i=1}^n (B_i \cos \phi_i)^2} \quad (3)$$

$$\phi_i = \omega t_i \sqrt{1-\zeta^2} \quad (4)$$

$$B_i = A_i \frac{\omega}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega(t-t)} \quad (5)$$

A_i, t_i 는 i 번째 가해지는 임펄스의 크기와 시각이며 t_n 은 마지막 임펄스가 가해진 시각이다. 모든 임펄스가 가해지고 난 후의 시각 t_n 에서 응답 A_{amp} 가 영이 되기 위해서는 다음 조건들을 만족하여야 한다.

$$V_1 = \sum_{i=1}^n A_i e^{\xi \omega (t-t_i)} \sin(\omega t_i \sqrt{1-\xi^2}) = 0 \quad (6)$$

$$V_2 = \sum_{i=1}^n A_i e^{\xi \omega (t-t_i)} \cos(\omega t_i \sqrt{1-\xi^2}) = 0 \quad (7)$$

$$t_0 = 0, \quad \sum_{i=0}^n A_i = 1, \quad A_i \geq 0 \quad (8)$$

이러한 2원 2차 연립 방정식을 풀면 t_0, t_1 의 시간에서 크기가 A_0, A_1 인 2개의 임펄스 열을 설계할 수 있다.

$$t_0 = 0, \quad t_1 = \frac{\pi}{\omega \sqrt{1-\xi^2}} \quad (9)$$

$$A_0 = \frac{1}{1+K}, \quad A_1 = \frac{K}{1+K}, \quad K = e^{\frac{-\xi \pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (10)$$

시스템 변수인 ω, ξ 들이 변화하더라도 설계된 목적대로 진동을 제어하기 위해서는 강인한 임펄스 열이 설계되어야 한다. 강인한 임펄스 열을 설계하기 위해서는 임펄스의 갯수를 증가시키면 된다. 임펄스의 갯수가 증가하게 되면 임펄스열을 구성하는 미지수의 갯수가 증가하게 되므로 식(6)과 (7)를 ω 로 미분한식을 영으로 놓음으로써 추가식들을 얻을 수 있고 따라서 여러 개의 임펄스 열을 얻을 수 있다.

2.2 Tuttle 방법 [4]

이산시간 영역에서 입력성형기를 적용한다는 것은 제어대상 시스템의 극점들을 입력성형기의 영점들로 상쇄시키는 의미를 가진다. 이산시간 영역에서 제어 대상 시스템의 i 번째 감쇠 진동 모드가 다음과 같은 공액 복소수 형태의 극점을 가진다고 가정하자.

$$P_i = R_i e^{j\theta_i} = e^{-\xi \omega_s T} e^{j\omega_d T} \quad (11)$$

$$P_i^* = R_i e^{-j\theta_i} = e^{-\xi \omega_s T} e^{-j\omega_d T}$$

여기서 T 는 임펄스 사이의 시간 간격을 의미한다. 여기서 제어 대상 시스템이 m 개의 원하지 않는 진동 모드를 포함하고 있다면 이 진동모드에 해당하는 시스템의 극점은 $2m$ 개이다. 따라서, 입력 성형기의 전달함수는 다음과 같이 된다.

$$H(Z) = \frac{C}{Z^r} (Z-P_1)^{n_1} (Z-P_1^*)^{n_1} \cdots (Z-P_m)^{n_m} (Z-P_m^*)^{n_m} \quad (12)$$

여기서 C 는 입력성형기의 계인을 1로 만들어 주기 위한 상수이며, n_m 은 강인성을 증가시키기 위한 차수이며 이 때의 임펄스 개수는 $(2n_m + 1)$ 이 된다. 입력성형기의 극점의 차수가 영점의 차수와 같거나 더 커야하므로 극점의 차수는 $r = 2(n_1 + n_2 + \cdots + n_m)$ 이 된다.

식(11)을 식(12)에 대입하여 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$H(z) = \frac{C(Z^r + a_1 Z^{(r-1)} + a_2 Z^{(r-2)} + \cdots + a_r)}{Z^r} \quad (13)$$

여기서 a_i 는 임펄스의 크기이다. $Z=e^{sT}$ 를 대입하고 역 Z -변환하면 다음과 같은 FIR필터를 얻게 된다.

$$h(t) = C(\delta(t) + a_1 \delta(t-T) + a_2 \delta(t-2T) + \cdots + a_r \delta(t-rT)) \quad (14)$$

2.3 Feddema 방법 [1]

진동시스템의 전달함수가 다음과 같은 일반적인 2차 시스템이라 하면

$$G(S) = \frac{kw^2}{S^2 + 2\xi wS + w^2} \quad (15)$$

이를 이산시간 등가시스템으로 바꾸면 다음과 같다.

$$G(Z) = (1-Z^{-1}) \left(\frac{G(S)}{S} \right) = \frac{k(AZ+B)}{Z^2 - 2e^{-\alpha T} \cos(\beta T)Z + e^{-2\alpha T}} \quad (16)$$

여기서 T 는 샘플 시간이며,

$$\alpha = \xi w, \quad \beta = w\sqrt{1-\xi^2}$$

$$A = 1 - e^{-\alpha T} \cos(\beta T) - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\alpha T} \sin(\beta T) \quad (17)$$

$$B = e^{-2\alpha T} + \frac{\alpha}{\beta} e^{-\alpha T} \sin(\beta T) - e^{-\alpha T} \cos(\beta T)$$

이다. 그리고 원하는 전달함수 $G_d(S)$ 는 다음과 같다.

$$G_d(S) = \frac{kw_d^n}{(S+w_d)^n} \quad (18)$$

강인성을 부여하기 위하여 다른 방법과 같이 최종임펄스 수를 5로 할 수 있도록 n 을 3으로하였다. 이 경우의 이산시간 전달함수는 다음과 같다.

$$G_d(Z) = (1-Z^{-1})Z \left(\frac{G_d(S)}{S} \right) = \frac{Z^2 C + ZD + E}{(Z - e^{-\alpha_s T})^3} \quad (19)$$

여기서

$$C = 1 - e^{-\alpha_s T} (1 + w_d T + 0.5w_d^2 T^2)$$

$$D = e^{-\alpha_s T} (-2 + w_d T + 0.5w_d^2 T^2)$$

$$+ e^{-2\alpha_s T} (2 + w_d T - 0.5w_d^2 T^2)$$

$$E = e^{-2\alpha_s T} (1 - w_d T + 0.5w_d^2 T^2) - e^{-3\alpha_s T}$$

이다. 그러므로 원하는 전달함수를 만들기 위한 입력성형기 $F(Z)$ 는 다음과 같다.

$$F(Z) = \frac{G_d(Z)}{G(Z)} \quad (20)$$

$$= \frac{(Z^2 C + ZD + E)(Z^2 - 2e^{-\alpha T} \cos(\beta T)Z + e^{-2\alpha T})}{(AZ+B)(Z - e^{-\alpha_s T})^3}$$

입력성형기의 극점 $(AZ+B)$ 에서 $B/A=1$ 이라면 이 극점은 Z -평면 상의 단위 원주위에 위치하게 되므로 매 샘플마다 부호가 바뀌게 된다. 이를 방지하기 위하여 극점을 0으로 보내고 계인이 단 위값을 갖도록 $(AZ+B)$ 를 Z 로 치환하였다. 따라서 식(20)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F(Z) = \frac{b_0 + b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2} + b_3 Z^{-3} + b_4 Z^{-4}}{1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2} + a_3 Z^{-3}} \quad (21)$$

식(21)를 역 Z 변환하면 다음과 같은 IIR 필터를 얻을 수 있다.

$$y(k) = -a_1y(k-1) - a_2y(k-2) - a_3y(k-3) + b_0u(k) + b_1u(k-1) + b_2u(k-2) + b_3u(k-3) + b_4u(k-4) \quad (22)$$

2.4 Zuo 방법 [5]

지금까지의 입력성형기법은 기준입력만을 조정하는 개회로 제어기법이기에 때문에 모터에 작용하는 외란에 대해서 아무런 작용을 하지 못하는 단점이 있다. 이를 극복하기 위하여 Zuo는 외란에도 강인한 폐회로 입력성형기법을 도입하였다. Zuo의 방법은 Singer 방법을 기본으로 하여 폐회로 전방에 위치해있던 입력성형기를 그림 2과 같이 단순히 폐회로안으로 넣으로써 구성된다.

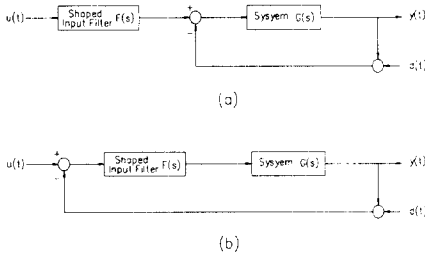


그림 2 개회로와 폐회로 입력성형기

Fig. 2 Open loop & Closed-loop input-shaped filter

그림 2 (a)에서 시스템의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{G(S)}{1+G(S)} \quad (23)$$

여기서 입력성형기는 $1+G(S)=0$ 을 만족하는 시스템의 극점을 상쇄하도록 설계된다.

그림 2 (b)에서 시스템의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{F(S)G(S)}{1+F(S)G(S)} \quad (24)$$

만약 $1+F(S)G(S)$ 의 영점이 $1+G(S)$ 의 영점과 비슷하면 폐회로시스템의 극점은 $F(S)$ 의 영점에 의해 상쇄될 수 있다. 강인성을 부여하기 위하여서는 Singer방법에서 적용된 임펄스를 그대로 적용하면 된다.

3. 실험 장치

모터, 유연보, 스트레인 측정센서 및 PC로 구성된 실험장치의 개략도는 그림 3와 같다.

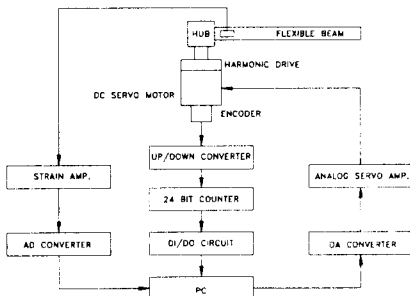


그림 3 유연한 조작기의 제어 시스템 개략도

Fig. 3 Layout of flexible manipulator control system

사역대(deadzone)가 거의 없는 다이렉트 드라이브(Direct Drive) 방식의 DC서보모터를 사용하였고 속도제어모드로 설정하였다. 모터의 전달함수를 실험적으로 구하면 다음과 같다.

$$\frac{\theta(S)}{U(S)} = \frac{241.9}{S(S+241.9)} \quad (25)$$

모터 축을 원하는 각도로 정확히 제어하기 위해서 P제어 기법을 사용하였다.

본 연구에 사용된 유연조작기의 특성은 표. 1과 같다. 유연조작기에서 제어하고자 하는 진동모드의 주파수는 표. 2에서 보는 바와 같이 각각 2.5Hz, 15.67Hz이다. 샘플링을 100Hz로 하면 2차모드의 주기보다는 샘플링주기가 6배 이상 크므로 디지털실험을 수행하는데 큰 어려움은 없었다.

표. 1 유연한 조작기의 특성

Table. 1 Properties of the flexible manipulator

빔의 길이	: L	1.0 m
빔의 두께	: δ	0.003 m
빔의 폭	: t	0.020 m
빔의 단위질량	: ρ	0.167 Kg/m
빔의 관성모멘트	: I_B	0.0524 Kg · m ²
허브의 관성모멘트	: I_H	1.70 Kg/m
강성계수	: EI	3.15 N · m ²

표. 2 조작기의 진동모드

Table. 2 Vibration mode of manipulator

mode #	ω_i (rad/sec), (Hz)	ζ_i
1	15.7141 (2.5Hz)	0.03
2	98.4787 (15.6733Hz)	0.1

4. 실험 결과

위의 4가지 입력성형기법을 3 임펄스를 이용한 1차모드의 진동 제어에 적용한 결과를 시간에 대한 스트레인 변화로 나타낸 것은 그림 4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 Singer 방법과 Zuo 방법이 좋은 응답을 나타내었다.

유연조작기의 끝에 10g의 질량을 달아 시스템의 고유주파수를 변동시킨후 입력성형기법에 강인성을 주기위하여 5 임펄스를 가하였을 경우 실험결과가 그림 5와 같다. 이 경우에는 Zuo 방법이 좋은 응답을 나타내었다. 그러므로 두가지 경우에 모두 좋은 방법은 Zuo방법이다.

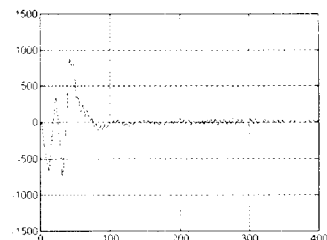


그림 4 (a) Singer 방법에 의한 진동제어 (3펄스)

Fig. 4 (a) Vibration control by Singer's method

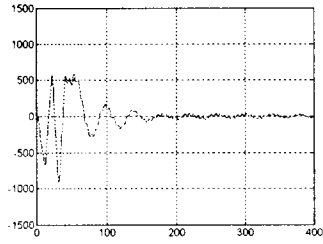


그림. 4 (b) Tuttle 방법에 의한 진동제어 (3펄스)
Fig. 4 (b) Vibration control by Tuttle's method

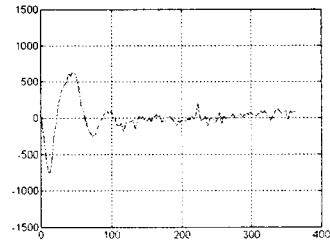


그림. 5 (c) Feddema방법에 의한 진동제어(5펄스)
Fig. 5 (c) Vibration control by Feddema's method

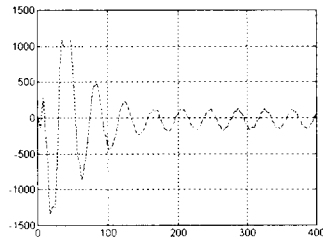


그림. 4 (c) Feddema방법에 의한 진동제어(3펄스)
Fig. 4 (c) Vibration control by Feddema's method

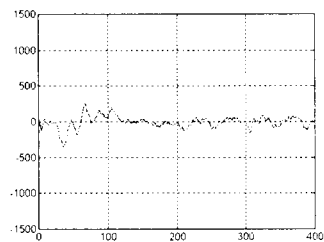


그림. 5 (d) Zuo 방법에 의한 진동제어(5펄스)
Fig. 5 (d) Vibration control by Zuo's method

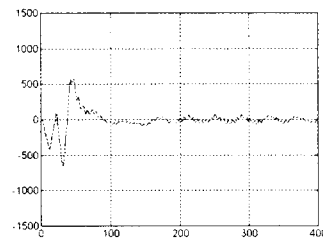


그림. 4 (d) Zuo 방법에 의한 진동제어(3펄스)
Fig. 4 (d) Vibration control by Zuo's method

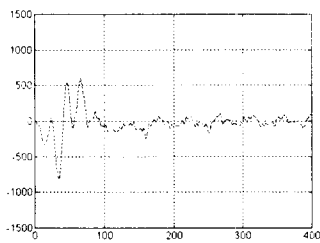


그림. 5 (a) Singer 방법에 의한 진동제어(5펄스)
Fig. 5 (a) Vibration control by Singer's method

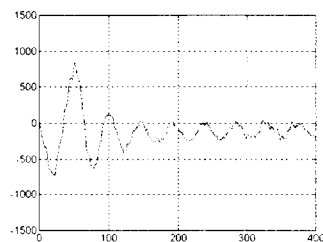


그림. 5 (b) Tuttle 방법에 의한 진동제어(5펄스)
Fig. 5 (b) Vibration control by Tuttle's method

5. 결론

본 연구는 유연조작기의 진동을 줄이기 위한 방법으로 많이 연구되고 있는 여러형태의 입력성형기법의 이론들을 살펴보고, 실험을 통하여 이들의 진동감쇠 특성을 비교하였다.

유연조작기의 진동주파수를 정확히 알고 있을 경우 Singer방법과 Zuo 방법이 양호한 응답을 나타내었다. Tuttle방법은 정착 시간이 다소 느리게 나타났고 Feddema 방법은 적절한 진동감쇠가 이루어지지 않았다.

또한, 유연조작기에 질량이 추가되어 진동주파수가 달라졌을 경우 Zuo 방법이 가장 좋은 응답을 나타내었고, Tuttle방법이 가장 나쁜 결과를 나타내었다. 그러므로 전반적인 경우에 Zuo 방법이 가장 우수하다고 할 수 있다.

6. 참고 문헌

- [1] Feddema, F.T. "Digital Filter Control of Remotely Operated Flexible Robotic Structures", *ACC*, pp 2710-2715, 1993.
- [2] Singer, N.C. and Seering, W.P. "Preshaping- Command Inputs to Reduce System Vibration", *ASME Journal of DSMC*, Vol.112, pp.76-82, 1990
- [3] Tallman, Smith, "Analog Study of Dead-Beat Postcast Control", *IRE Transitions on AC*, Vol. AC-3, PP.14-23, 1958.
- [4] Tuttle, T.D. and Seering, W.P. "A Zero-placement Technique for Designing Shaped Input to Suppress Multiple-mode Vibration", *ACC*, pp2533-2537, 1994
- [5] Zuo. k. & David W. "Closed Loop Shaped-Input Strategies for Flexible Robots", *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 14. No.5. pp.510-529, 1995
- [6] 신찬배, "가속도 센서를 이용한 유연한 조작기의 끝점제어", 석사학위논문, 기계공학부, 영남대학교, 1994