

다관절 시스템에 대한 동적 모델링과 입력성형 제어 Dynamic Modeling and Input Shaping Control of Flexible Multi-Link System

*박상원¹, #홍성욱², 배규현³, 유태규³

*S. W. Park¹, #S. W. Hong(swhong@kumoh.ac.kr)², G. H. Bae³, T. G. Yu³

¹ 금오공과대학교 기전공학과, ² 금오공과대학교 기계공학부, ³ 금오공과대학교 기전공학과

Key words : Flexible Multi-Link System, Input Shaping Method

1. 서론

다관절 시스템(Multi-Link System)은 자동차 조립라인 등에서 흔히 볼 수 있는 용접로봇처럼 산업전반에서 널리 사용되고 있으며, 그 요구가 점차적으로 증가하고 있다.

다관절 측정 시스템은 다관절 용접로봇 보다 다관절 유연 시스템(Flexible Multi-Link System)에 더 가까우며, 시변 비선형(Time-varying Non-linear)인 복잡한 동특성(Dynamic Characteristics)을 가지고 있다.⁽¹⁾

많은 경우 다관절 시스템 같은 시변 비선형 시스템의 효과적인 제어를 위해 선형화(Linearization) 방법이 유용하게 사용된다.⁽²⁾

구동계를 포함하고 있는 대부분의 시스템은 구동계의 운동으로 인해 잔류진동(Residual Vibration)이 발생하게 되고, 시스템의 성능에도 영향을 미친다. 잔류진동은 다관절 로봇에서 보다 다관절 측정 시스템의 측정 신뢰도 등에서 더욱 치명적인 영향을 끼치게 된다. 잔류진동을 효과적으로 제거할 수 있는 방법으로 입력성형기법(Input Shaping Method)이 잘 알려져 있다.⁽³⁾ 특히, 다관절 측정 시스템은 두개 이상의 진동 모드를 가지는 다모드 시스템(Multi-mode System)이다. 입력성형기법은 다모드 시스템에도 유용하게 사용할 수 있다.⁽³⁻⁶⁾ 잔류진동을 제거하기 위해 입력성형기법을 사용할 경우 잔류진동은 효과적으로 제거할 수 있지만, 시스템의 상승시간(Rise Time)이 증가하게 되는 단점이 있다. 특히, 다모드 시스템에서 기존의 입력성형기법을 사용할 경우 상승시간이 현저히 증가하게 된다. 입력성형기법을 사용함으로써 발생하게 되는 이와 같은 상승시간의 증가를 개선하기 위해 새로운 입력성형기(Input Shaper) 설계 방법이 제안되었다.⁽⁵⁻⁶⁾ 이 방법은 단일 진동모드는 물론 다모드 시스템에도 효과적으로 적용할 수 있다.

본 논문에서는 구동계를 포함한 다관절 측정 시스템에 대한 동적 모델링과 실험을 통해 입력성형기법을 적용하기 위한 입력성형기 설계 방법에 대해 연구하였다.

2. 동적 모델링 및 입력성형기 설계

Fig. 1 은 구동계를 포함한 다관절 측정 시스템에 대한 실험장치를 나타낸 것이다. 3 개의 조인트(Joint)와 2 개의 관절(Link)로 구성이 되어 있으며 3 자유도(Degree of Freedom) 시스템으로써 각 조인트에는 서보 모터가 장착되어 있다. 여기에서 첫번째 관절은 PVC 파이프, 두번째 관절은 알루미늄 봉으로 구성되어 있다. 또한, 측정 프로브가 장착되는 두번째 관절의 끝부분에는 측정 프로브(Measuring Probe)와 동일한 블럭을 장착을 하여 유사한 동특성을 나타내도록 하였다.

Fig. 2 는 Fig. 1 과 같은 실험장치에 대해 상업용 유한요소해석도구인 SAMCEF[®]을 이용하여 모델링한 후 해석한 결과를 나타낸 것이다. 측정시 사용되는 측정 프로브의 장착 위치는 두번째 관절의 끝부분으로 두번째와 세번째 조인트의 동작으로 인해 발생하는 진동모드는 Fig. 2 의 세번째 모드와 동일하다. 이런 이유로 본 논문에서는 세번째 진동모드의 동특성에 국한하였다. Fig. 2 의 네번째 진동모드에서는 비틀림 진동으로 인해 두번째 관절의 끝부분 진동에 영향을 주지만 세번째에 비해 고유진동수(Natural

Frequency)가 높아 고려하지 않아도 된다.

Fig. 3 은 두번째 관절 끝부분에 장착된 블럭에 가속도계(Accelerometer)를 장착하여 첫번째 관절의 회전운동에 의해 발생하는 진동을 오실로스코프(Oscilloscope)를 이용하여 측정된 결과이다. 이때 두번째 관절은 0° 에 고정되어 있으며, 첫번째 관절을 반시계 방향으로 10° 씩 이동하여 90° 까지 측정하였다. Fig. 3 에서 나타난 결과로부터 본 논문에 사용된 실험장치는 비선형 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

첫번째 관절의 회전운동으로 인해 두번째 관절의 끝부분에서 발생하는 진동은 2 개의 진동모드의 영향을 받는다. Fig. 3 에서 보여지는 결과는 2 개의 진동모드중 두번째 진동모드를 나타낸 것으로, 첫번째 관절의 회전 각도중 0° 에서 60° 구간을 선형회귀분석(Linear Regression Analysis)을 이용하여 선형화한 결과 식(1)을 얻을 수 있었다.



Fig. 1 Experimental apparatus

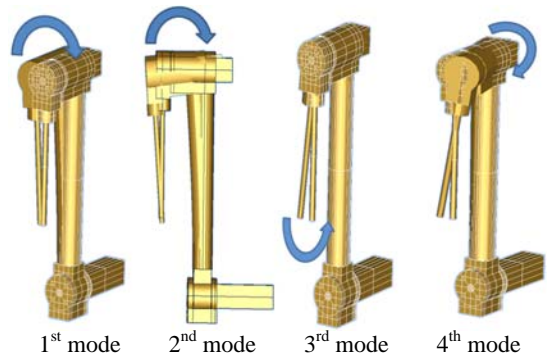


Fig. 2 Four different modes

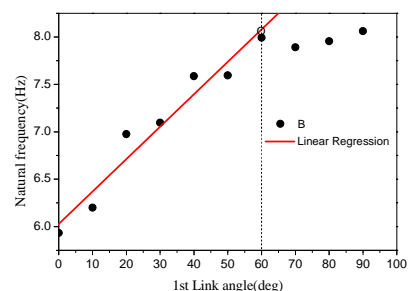


Fig. 3 Natural frequency of 2nd link with 1st link angle varied

$$f_{NF} = 6.02777 + 0.0342 * d_{1st} \quad (1)$$

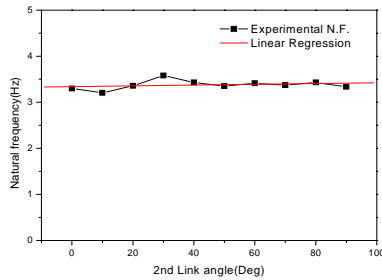


Fig. 4 Natural frequency of 2nd link with 2nd link angle varied

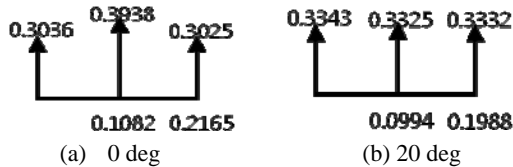


Fig. 5 Two-mode input shaper with 1st link varied

여기에서 f_{NF} 는 첫번째 관절의 회전각도에 따른 두번째 관절 끝부분의 고유진동수이며, d_{1st} 는 첫번째 관절의 회전 각도이다. 이때 실제 측정값과 선형화로부터 얻은 값의 차가 가장 큰 부분은 30° 지점이며, 이 값은 기존성형기 중 고유진동수 오차에 가장 민감한 ZV(Zero Vibration) 성형기에서 5% 이내 진동률을 만족하기 위한 허용 고유진동수 오차 범위내에 존재하게 된다. 첫번째 관절의 회전 각도가 60° 이상인 경우에는 측정결과값의 차가 ZV(Zero Vibration) 성형기의 5% 이내 진동률을 벗어나지 않아 평균값으로 대체할 수 있다.

첫번째 관절의 회전운동으로 인해 두번째 관절의 끝부분에서 발생하는 첫번째 진동모드의 형태는 Fig. 4와 동일한 결과를 나타내고 있다. 앞의 결과를 바탕으로 첫번째 관절의 회전운동으로 인해 두번째 관절 끝부분에 나타나는 진동은 두개의 진동모드를 가지는 다모드 진동임을 알 수 있었다.

Fig. 4는 두번째 관절의 회전각 변화에 따른 두번째 관절 끝부분의 고유진동수 변화를 나타낸 것이다. Fig. 4의 결과처럼 두번째 관절의 회전운동에 의한 고유진동수는 평균값을 대표 고유진동수로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

동적 모델링 및 실험으로 얻은 결과를 바탕으로 본 논문에서 사용된 실험장치의 잔류진동을 제거하기 위한 입력성형기(Input Shaper) 설계를 위해서는 단일모드 입력성형기는 물론 다모드 입력성형기도 필요하다. 본 논문에서는 단일모드 입력성형기를 위해서는 기존의 ZV 성형기를 사용하였으며, 다모드 입력성형기 설계를 위해 새로운 다모드 입력성형기법을 사용하였다.⁽⁵⁻⁶⁾

단일모드 입력성형기 설계를 위해 사용된 ZV 성형기 설계 방법은 널리 알려져 있어 생략하였으며, 새로운 다모드 입력성형기 설계를 위해 우선 본 논문에서 사용된 실험장치는 두개의 진동모드를 가지므로 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{-t_2 s_2} & e^{-t_3 s_2} \\ 1 & e^{-t_2 s_3} & e^{-t_3 s_3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기에서 s_1 과 s_2 는 각각 첫번째와 두번째 진동모드의 고유치(Eigenvalue)이며, 미지수는 입력 임펄스(Impulse)인 A_1, A_2, A_3 와 임펄스 입력시간(Time Location)인 t_2, t_3 이다. 또한 식 (2)는 비선형 복소행렬식(Non-linear Complex Matrix Equation)으로 주어진 조건에 따라 많은 해를 가질수 있다. 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있는 많은 해중에서 최적화된

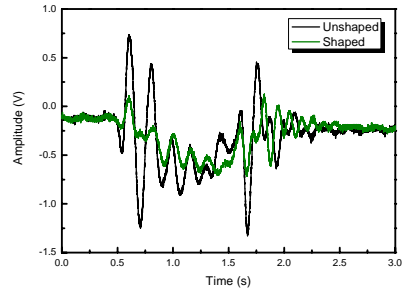


Fig. 6 Natural frequency of 2nd link with 2nd link angle varied

입력성형기를 Fig. 5와 같이 설계할 수 있다. Fig. 5(a)는 첫번째 관절이 0° 일 때 설계된 입력성형기로서 이때 사용된 첫번째 고유진동수 ω_1 은 3.35Hz 이고 두번째 고유진동수 ω_2 는 5.9Hz 이다. Fig. 5(b)는 20° 일 때이다.

3. 실험 및 결과 토의

Fig. 6은 Fig. 5와 같이 설계된 입력성형기를 본 논문에서 사용된 실험장치에 적용한 결과를 나타낸 것이다. 잔류진동을 측정하기 위해 가속도계를 이용하였으며, Figs. 3, 4의 결과를 획득할 때와 동일한 위치, 측정 방법으로 수행하였다. 첫번째 관절이 0°에서 20°까지 회전운동시의 가속도계를 이용한 응답을 나타내었으며, 사용된 입력성형기는 Fig. 5와 같다. Fig. 6에서 보여지는 결과로부터 다모드 설계방법으로 설계된 입력성형기가 다관절 시스템의 잔류진동 제거에 효과적임을 알 수 있었다.

Fig. 6의 결과에서 가장 특이한 점은 것은 가속구간과 감속구간에서 입력성형으로 인한 잔류진동 감소효과에 차이를 보인다는 것이다. 이것은 본 연구에 사용된 상업용 모션컨트롤러가 감속구간에 가지는 특성으로 추정된다.

4. 결론

본 논문에서는 다관절 시스템에 대한 동적 모델링과 입력성형 제어를 위한 입력성형기 설계에 대해 연구하였다. 이를 위해 3 자유도를 가지는 다관절 시스템을 설계 제작하였으며, 제작된 실험장치에 대해 유한요소해석도구를 이용한 모델링 통해 동특성을 계산하였다. 계산된 동특성 결과와 실험 결과를 바탕으로 다모드 입력성형기를 설계하였으며, 설계된 입력성형기를 실험적으로 적용한 결과, 다모드 비선형 시스템에도 다모드 입력성형기법이 효과적임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Tokhi, M. O., Mohamed, Z., and Shaheed, M. H., "Dynamic characterisation of a flexible manipulator system," *Robotica*, 19, 571-580, 2001,
2. Chang, P. H., and Park, H. S., "Time-varying input shaping technique applied to vibration reduction of an industrial robot," *Control Engineering Practice*, 13, 121-130, 2005.
3. Singhose, W. E., and Seering, W., "Command generation for dynamic systems," Lulu.com, 2007.
4. Singhose, W. E., Crain, E. A., and Seering, W. P., "Convolved and simultaneous two-mode input shapers," *IEEE Control Theory and Applications*, 144, 515-520, 1997.
5. Hong, S. W., Park, S. W., and Danielson, J., "Study on design of new input shaper for multi-mode system," *KSPE Autumn Conference*, Gwangju, 23-24, 2007,
6. Hong, S. W., Park, S. W., and Danielson, J., "A new design method of multi-mode input shaper to eliminate residual vibration in dynamic systems," submitted to journal of *KSPE*, 2008.