

인간 팔의 임피던스 및 특성을 고려한 새로운 수동성 조건을 위한 시간영역 제어기법

Time-Domain Control Scheme for a New Passivity Condition Including the Human Arm Impedance

*#우현수¹, 이두용²

*#H. S. Woo(woohs@kimm.re.kr)¹, D. Y. Lee²

¹ 한국기계연구원 대구융합기술연구센터, ²KAIST 기계공학과

Key words : Haptics, Human arm impedance, Passivity, Time-domain control

1. 서론

보다 사실적인 역감을 전달하기 위해 햅틱 시스템이 사람에게 전달할 수 있는 임피던스를 최대화하면서 동시에 안정성을 보장하기 위한 연구들이 많이 수행되어 왔다. 이를 통해 AD(analog-to-digital)와 DA(digital-to-analog) 변환 과정에서 발생하는 실제 값과의 오차가 시스템을 불안정하게 하는 주요한 요인이라는 것이 밝혀졌다. 최근에는 사람과 햅틱 인터페이스 사이에서 교환되는 에너지를 수동성에 기반하여 분석한 연구들이 활발히 발표되고 있다. 그 결과로 햅틱 시스템의 안정성을 보장하기 위한 샘플링 주기, 햅틱장치와 점성 마찰계수, 엔코더 분해능, 쿨롱 마찰계수, 최대 강성계수 간의 조건식이 제안되었다. 또한 햅틱 시스템의 에너지 흐름을 시간영역에서 모니터링하고 시스템의 수동성을 깨는 초과 에너지를 디지털 댐퍼를 이용하여 상쇄하는 방법으로 안정성을 보장하면서 시스템 성능을 극대화 할 수 있는 시간영역 기반 제어기법이 제안되었다. 하지만 햅틱 시스템이 사람을 포함한 시스템임에도 불구하고 기존의 연구들에서는 모델링이 어렵다는 이유로 사람이라는 요인을 배제한 상태에서 시스템의 안정성을 분석해왔다[1-5].

본 논문에서는 인간 팔 임피던스가 크게 변할 때 햅틱 시스템의 성능을 보다 향상시키기 위하여 인간 팔의 특성과 새로운 수동성 조건[6]에 기반한 새로운 제어기법을 제안하고자 한다.

2. 수동성 조건 리뷰

그림 1은 인간 팔의 2차 임피던스 모델을 포함한 1자유도 햅틱 시스템의 임피던스 모델을 보여준다.

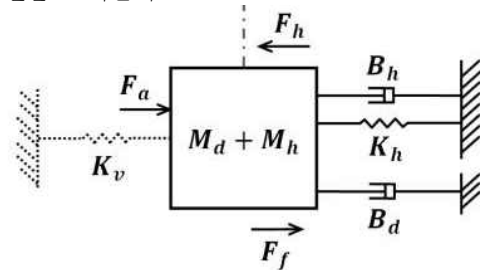


Fig. 1 Impedance model of the haptic system including the human impedance

수동성 마진(Passivity Margin)은 사람이 가한 에너지와 운동에너지 변화 사이의 차이로 정의되며, 모든 샘플링 구간에서 햅틱 시스템의 수동성 마진이 대응되는 이상적인 질량-스프링 시스템의 수동성 마진보다 크거나 같으면 햅틱 시스템의 수동성이 보장된다. 이를 통해 유도된 새로운 수동성 조건은 다음과 같다.

정리 1: 시간구간 $[0, nT]$ 에서 그림 1의 햅틱 시스템의 수동성을 위한 필요충분 조건은 식 (1)과 같다.

$$K_v \leq \frac{2(B_h^m + B_d)}{T} \text{ and } K_v \leq \frac{2F_c}{\Delta}, \quad (k-1)T \leq t \leq kT, \quad \forall k \leq n, \quad (1)$$

3. 시간영역 제어기법

매 샘플링 구간에서의 정확한 수동성 마진은 인과성(causality)으로 인해 알 수 없지만, 다음 샘플링 시간 때 이전 구간의 수동성 마진을 정확히 계산해내는 것은 가능하다. 따라서 햅틱 시스템의 수동성 마진의 합을 추적할 수 있는 수동성 마진 트래커(Passivity Margin Tracker)를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$PMT^n = \sum_{k=1}^n Q_5^k = \sum_{k=0}^n \left\{ \frac{\min(B_h^k, B_h^{k-1}) + B_d}{T} - \frac{K_v^{k-1}}{2} \right\} (x_k - x_{k-1})^2$$

여기서 Q_5 는 수동성 마진의 하계이며, 수동성 마진 트래커는 시스템의 수동성을 보수적으로 추적한다는 것을 알 수 있다. Q_5 가 모두 샘플링 구간에서 0 보다 크다면 물론 햅틱 시스템이 수동적이지만, 어느 순간 0 보다 작다고 해서 시스템 전체의 수동성이 깨지는 것은 아니다. 다음 식을 만족하면 여전히 kT 라는 샘플링 시간 때 햅틱 시스템이 수동적이라는 것을 보장할 수 있다.

$$Q_5^k + \sum_{i=1}^{k-1} Q_5^i = \sum_{i=1}^k Q_5^i \geq 0$$

따라서 $(k-1)T$ 까지 수동성 마진 트래커가 최악의 경우인 $-Q_{worst}$ 보다 크거나 같도록 제어할 수 있다면 시스템의 수동성을 항상 보장할 수 있게 된다.

$$Q_{worst} = -\frac{\max(\Delta B_h)}{T} \left(\frac{1.1}{1000} \right)^2$$

상기의 시간영역 제어기법을 설계하기 위한 알고리즘은 다음과 같다.

- 1) 처음 가상 벽의 강성계수는 인간 팔 임피던스의 최소값을 이용 설계. 이때 수동성 마진 트래커의 값은 0.
- 2) 입력은 햅틱장치의 위치와 인간 팔의 임피던스 값.
- 3) 수동성 마진 트래커의 값을 업데이트.
- 4) 수동성 마진 트래커의 값이 $-Q_{worst}$ 보다 크거나 같으면 인간 팔 임피던스 값을 이용.
- 5) 반대의 경우, 인간 팔 임피던스의 최소 임피던스 값 이용.

4. 결론

인간 팔의 임피던스를 고려한 새로운 수동성 조건에 기반하여 실시간은 아니지만 바로 다음 샘플링 시간에 이전 샘플링 구간까지의 수동성 마진 합을 추적 계산할 수 있는 수동성 마진 트래커를 정의하였고, 이를 이용하여 인간 팔의 임피던스가 크게 변화할 때 햅틱 시스템의 성능을 극대화 할 수 있는 새로운 시간영역 제어기법을 제안하였다. 향후 연구로 이에 대한 실험적 검증을 수행하고자 한다.

참고문헌

1. Miller, B. E., Colgate, J. E., and Freeman, R. A., "On the role of dissipation in haptic systems," IEEE Trans. Robotics, vol. 20, no. 4, pp. 768-771, 2004.
2. Adams, R. J. and Hannaford, B., "Stable Haptic Interaction with Virtual Environments," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 15, no. 3, pp. 465-474, 1999.
3. Hannaford, B. and Jee-Hwan Ryu, "Time-Domain Passivity Control of Haptic Interfaces," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 18, no. 1, pp. 1-10, 2002.
4. Lee, K. and Lee, D. Y., "Adjusting output-limiter for stable haptic interaction with deformable objects," Proc. Mediterranean Conf. Control and Automation, Athens, Greece, pp. 1-6, 2007.
5. Abbott, J. J. and Okamura, A. M., "Effects of position quantization and sampling rate on virtual-wall passivity," IEEE Trans. Robotics, vol. 21, no. 5, pp. 952-964, 2005.
6. Woo, H. S. and Lee, D. Y., "Exploitation of the Impedance and Characteristics of the Human Arm in the Design of Haptic Interfaces," IEEE Trans. Industrial Electronics, in press.