

안정적인 햅틱 상호작용을 위한 등가 물리적 댐핑 추정

Equivalent Physical Damping Parameter Estimation for Stable Haptic Interaction

김 종 필¹ · 서 창 훈² · 류 제 하³

Jong-Phil Kim¹ · Changhoon Seo² · Jeha Ryu³

Abstract This paper presents offline estimation of equivalent physical damping parameter in haptic interaction systems where damping is the most important parameter for stability. Based on the previous energy bounding algorithm, an offline procedure is developed in order to estimate the physical damping parameter of a haptic device by measuring energy flow-in to the haptic device. The proposed method does not use force/torque sensor at the handgrip. Numerical simulation and experiments verified effectiveness of the proposed method.

Keywords : Physical Damping, Stability, Haptic Interaction, Damping Estimation

1. 서 론

컴퓨터 그래픽스 기술의 발달로 빠른 연산이 가능하게 되고 그래픽 하드웨어의 가격이 저렴해지면서 가상 환경 기술에 대한 관심이 증대되고 또 이로 인해 엔터테인먼트, 군사 훈련, 수술 훈련, 교육, 생물 의학(Biomedical) 시뮬레이션, 공학 디자인 및 시뮬레이션 등 다양한 분야에 걸쳐 많은 유용한 가상환경 시스템이 구현되었다^[1]. 가상환경 기술에서 사용자가 보다 몰입할 수 있는 사실적인 가상환경을 만들어 현실감을 극대화 하는데 햅틱은 필수불가결한 연구분야 중의 하나이다. 사용자는 다양한 햅틱 장치^{[2][3][4]}를 이용하여 역감 및 촉감을 느끼고 이를 통해 가상환경과 상호작용할 수 있다.

햅틱 시뮬레이션을 통해 사용자에게 정확한 힘과 토크 정보를 전달하는데 있어서 안정성(stability)은 햅틱 연구 분야에서 매우 중요한 요소 중의 하나이다. 이러한 안정적인 햅틱 상호작용 시스템에 관한 연구로 Colgate와 Schenkel[5]은 안정적인 햅틱 디스플레이를 위하여 가상환경과 햅틱 장치 사이에 가상의 연결을 갖는

가상 커플링(virtual coupling) 알고리즘을 제안하였다. 또한 Colgate와 Brown[6]은 Z-Width에 영향을 주는 다양한 인자임을 실험을 통하여 밝혀냈다. 가상 커플링 알고리즘의 경우, 커플링 인수가 햅틱 장치의 물리적 댐핑에 의해 정해지므로 안전한 햅틱 상호작용을 위하여 햅틱 장치의 동역학적 특성이 아주 중요하다. [7][8][9]의 연구에서는 양자화, 샘플링 주기뿐만 아니라 비스코스 댐핑, 쿨롱 댐핑 등이 안정적인 햅틱 상호 작용에 영향을 미치는 중요한 요소들임을 확인하였다. 햅틱 장치의 물리적 댐핑이 안전한 햅틱 상호작용을 위한 필수요소임에도 불구하고 물리적 댐핑값을 추정하는 것에 대한 연구는 거의 없었다. 모달 테스트를 통하여 햅틱 장치의 동역학적 특성을 알아내고자 한 시도^{[10][11]}가 있었으나 이는 다차원의 작업공간에서 만들어낼 수 있는 모든 배치(posture)에 대해 정확한 물리적 댐핑값을 측정하기는 매우 힘들다.

Mehling 등^[12]은 햅틱 디스플레이의 성능을 향상시키기 위한 수단으로 전기적인 댐핑(electrical damping)을 제안하였다. 그러나 이 역시 댐핑값을 추정하는 것이 아니라 저항, 커패시터의 수동소자로 회로를 구성하여 댐핑을 증가 시켜줌으로써 이를 통해 안정하면서 큰 임피던스 범위의 가상 환경을 제공하는 것이다.

우리는 최근 수동성 이론을 기반으로 한 새로운 안정

* 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITA-2006-C1090-0603-0017).

¹ 광주과학기술원 정보기전공학부 박사과정

² 광주과학기술원 정보기전공학부 박사과정

³ 광주과학기술원 정보기전공학부 교수

한 햅틱 상호작용 제어 알고리즘인 에너지 바운딩 알고리즘(Energy Bounding Algorithm)^{[13][14]}을 제안하였다. 이 알고리즘은 느린 샘플링 주기에서도 0차 유지기에서 발생하는 에너지를 효율적으로 소모시켜 줄 수 있다. 에너지 바운딩 알고리즘은 0차 유지기에서 발생하는 에너지를 햅틱 장치의 물리적 댐핑값에 의해 소모 가능한 에너지의 범위 이내로 제한함으로써 전체 시스템의 수동성 조건을 만족시키는 것이다. 따라서 햅틱 장치의 물리적 댐핑값은 안정한 햅틱 상호작용에 있어 아주 중요한 요소로 가능한 한 정확하게 측정되어야만 한다.

본 논문에서는 안정한 햅틱 상호작용을 위한 햅틱 장치의 물리적 댐핑값을 추정하는 방법을 제안하였다. 또한 등가 물리적 댐핑값을 정의하고 특성을 조사하였다. 본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 안정한 상호작용을 위한 안정성 조건 및 햅틱 장치의 물리적 댐핑값의 역할에 대해서 논하고 3장에서 물리적 댐핑값을 추정하는 알고리즘을 제안하고 이 알고리즘에 대해 기술하였다. 4장에서 실험 결과를 나타내고 마지막으로 5장에서 결론 및 향후 연구과제에 대해 기술하였다.

2. 연구배경

2.1 안정한 햅틱 상호작용을 위한 수동성 조건

일반적으로 햅틱 시뮬레이션 시스템은 그림 1과 같이 사용자(Human Operator), 햅틱 장치(Haptic Device), 샘플 앤드 홀드(Sample and hold), 제어기(Controller), 가상환경(Virtual Environment)으로 구성된다. 햅틱 장치는 기구부, 액츄에이터, 센서 등으로 구성되고 제어기는 순기구학, 역기구학, 자코비안, 역동역학 계산뿐만 아니라 중력 및 마찰 보상 알고리즘이 포함된다. 또한 가상 키펀칭 알고리즘[5]이나 에너지 바운딩 알고리즘[13][14]과 같은 안정화 제어 알고리즘도 포함될 수 있다. 가상환경은 정적 또는 동적, 선형 또는 비선형으로 구성된다. 0차 유지기로 대변되는 샘플 앤드 홀드는 이산 시스템과 연속 시스템을 이어주는 역할을 한다. 햅틱 샘플링 주기가 충분히 빠르지 않을 경우, 햅틱 시뮬레이션 시

스템은 샘플드 데이터 시스템 (Sampled-data system)으로 간주된다.

사용자가 관심 있는 주파수 영역에서 수동적이라고 가정하고^[15], 나머지 구성요소 (H: 햅틱 장치, S: 샘플 앤드 홀드, C: 제어기, V: 가상환경)가 수동적이면, 전체 햅틱 시뮬레이션 시스템은 안정해진다. 그러므로 전체 HSCV 시스템이 다음의 조건을 만족한다면, 햅틱 시뮬레이션 시스템은 수동 시스템이 될 것이다.

$$\int_0^t F_h(\tau)v_h(\tau)d\tau + \epsilon_0 \geq 0 (t > 0 \text{ 이고 가용한 } F_h(t)) \quad (1)$$

여기서 ϵ_0 는 시스템의 초기 에너지를 나타낸다.

위의 수동성 조건은 전체 HSCV 시스템이 에너지를 발생시키지 않으며 사용자는 시스템으로부터 힘을 추출할 수 없음을 나타낸다. 그러므로 안정한 햅틱 상호작용을 위해서는 전체 HSCV 시스템으로 유입되는 에너지는 절대로 음의 값이 되어서는 안 된다.

식 (1)의 수동성 조건은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.(상세한 수식 유도는 [14] 참조)

$$P_H(n) + T \sum_{k=0}^{n-1} F_d(k)v_d(k+1) + \epsilon_0 \geq 0 \quad (2)$$

여기서,

$$P_H(n) = \int_0^{nT} \{F_h(t)v_h(t) - F_d^h(t)v_d(t)\} dt \quad (3)$$

이다.

식 (2)는 SCV 시스템이 능동적(active)이 될 경우 SCV 시스템에서 발생하는 에너지가 햅틱 장치에 의해 완전히 소모될 수 있음을 의미한다. 따라서 식 (2)의 수동성 조건은 0차 유지기를 사용할 경우 안정성을 위한 충분 조건이 된다.

햅틱 시스템의 수동성 조건을 만족시키기 위해서는 SCV 시스템에서 발생하는 에너지를 햅틱 장치가 소모할 수 있는 범위 이내로 제한해야만 한다. 에너지 바운딩 알고리즘은 제어기와 가상환경을 수동적으로 만들고 샘플 앤드 홀드에서 발생하는 에너지를 햅틱 장치가 소모할 수 있는 범위 이내로 제한한다.

이를 위하여 에너지 바운딩 알고리즘은 아래와 같은 제어 법칙을 가진다. (자세한 수식 유도 및 증명은 [14]

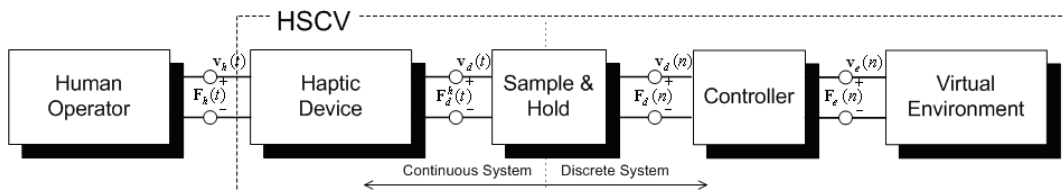


그림 1. 햅틱 시뮬레이션 시스템의 전체적인 구성 (샘플드 데이터 시스템)

참조)

$$\begin{aligned} F_d(n) &= F_d(n-1) + \beta(n)v_d(n) \\ v_e(n) &= v_d(n) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

$$\beta(n) = \frac{F_e(n) - F_d(n-1)}{v_d(n)} \quad \text{for } v_d(n) \neq 0 \quad (5)$$

또한, 에너지 바운딩 알고리즘은 아래의 바운딩 법칙을 사용한다.

$$\begin{aligned} \text{if } \beta(n) > c \text{ then } \beta(n) &= c \\ \text{if } \beta(n) < \gamma_{\min}(n) \text{ then } \beta(n) &= \gamma_{\min}(n) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,

$$\frac{P_H(n) + \varepsilon_{H,0}}{T \sum_{k=0}^{n-1} v_d^2(k+1)} \geq c \quad (7)$$

$$\gamma_{\min}(n) = c - \sqrt{c^2 + \left(\frac{F_d(n-1)}{v_d(n)} \right)^2} \quad (8)$$

3. 등가 물리적 댐핑 인수 추정

3.1 등가 물리적 댐핑 인수

에너지 바운딩 알고리즘의 경우에는 식 (7)에서 알 수 있듯이 햅틱 장치로 유입되는 에너지 $P_H(n)$ 에 의해 c 가 결정된다.

아래와 같이 등가 물리적 댐핑을 정의하면,

$$b_{eq}(n) \equiv \frac{P_H(n) + \varepsilon_{H,0}}{T \sum_{k=0}^{n-1} v_d^2(k+1)} \quad (9)$$

식 (2)의 수동성 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$b_{eq}(n) \sum_{k=0}^{n-1} v_d^2(k+1) + \sum_{k=1}^n F_d(k-1)v_d(k) \geq 0 \quad (10)$$

따라서 등가 물리적 댐핑은 안정한 햅틱 상호작용을 위한 아주 중요한 인수이며 가능한 한 정확하게 추정되어야 한다. 상수 c 가 $b_{eq}(n) \geq c$ 인 조건을 만족하면 에너지 바운딩 알고리즘은 식 (10)의 수동성 조건을 만족한다.

등가 물리적 댐핑의 물리적 의미를 알아보기 위하여 다음과 같은 1자유도 햅틱 장치의 경우를 살펴 보면,

$$\begin{aligned} F_h(t) &= m\dot{v}_h(t) + bv_h(t) + F_d^h(t) \\ v_h(t) &= v_d(t) \end{aligned} \quad (11)$$

식 (3)에 의해 햅틱 장치로 유입되는 에너지는

$$P_H(n) \geq \frac{1}{2}mv_d^2(n) + T \sum_{k=0}^{n-1} bv_d^2(k+1) - \varepsilon_{H,0} \quad (12)$$

그러므로 등가 물리적 댐핑값은 식 (9)에 의해 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$b_{eq}(n) \geq b + \frac{mv_d^2(n)}{2T \sum_{k=0}^{n-1} v_d^2(k+1)} \quad (13)$$

식 (13)에서 첫 번째 항 b 는 실제 물리적 댐핑에 의한 에너지 소모 요소를 나타낸다. 또 두 번째 항 $mv_d^2(n)/(2T \sum_{k=0}^{n-1} v_d^2(k+1))$ 는 햅틱 장치의 관성모멘트 (Inertia)에 의한 에너지 저장 요소를 나타낸다. 따라서 식 (10)의 수동성 조건은 만약 SCV 시스템에서 발생하는 에너지가 햅틱 장치에서 소모되거나 저장되면, 발생된 에너지가 사용자에게 전달되지 않음으로써 햅틱 상호작용이 안정화됨을 나타낸다. n 이 증가할수록 식 (13)의 두 번째 항 분모가 점점 커짐으로 등가 물리적 댐핑값은 실제 물리적 댐핑값에 수렴함을 알 수 있다.

3.2 등가 물리적 댐핑 인수 추정

등가 물리적 댐핑은 안정적인 햅틱 상호 작용을 위해서 아주 중요한 요소임으로 가능한 한 정확히 추정되어야 한다. 따라서 식 (9)에 정의된 등가 물리적 댐핑 인수를 추정하기 위해서는 햅틱 장치로 유입되는 에너지 $P_H(n)$ 를 알아야 한다. 만약 햅틱 장치를 쥐었을 때, 사용자가 가하는 힘과 속도를 측정할 수 있다면 식 (3)에 의해 $P_H(n)$ 은 계산할 수 있다. 하지만 이를 위해서는 햅틱 장치에 비싼 힘/토크 센서 또는 속도 센서를 부착하여 사용자가 가하는 힘과 속도를 측정해야 하는 단점이 있다. 추가적인 센서 없이 $P_H(n)$ 을 측정하기 위해서 사용자를 배제하는 방법을 고려해볼 수 있다. 식 (3)에서 사용자가 직접 가하는 힘, 즉 $F_h(n)$ 이 0이면, 물리적 댐핑 인수는 식 (9)는 아래와 같이 단순화될 수 있다.

$$b_{eq}(n) = \frac{-T \sum_{k=0}^{n-1} F_d(k)v_d(k+1)}{T \sum_{k=0}^{n-1} v_d^2(k+1)} \quad (14)$$

여기서 $\varepsilon_{H,0} = 0$ 이다.

이 경우, 등가 물리적 댐핑 인수는 다음과 같은 오프라인 추정 방법으로 구할 수 있다.

- 1) 모든 주파수 범위에 걸쳐 힘 입력을 랜덤으로 하여 햅틱 장치를 구동한다.
- 2) 사용자가 햅틱 장치를 쥐지 않은 상태에서 식 (3)의 $P_H(n)$ 를 측정한다.
- 3) 식 (14)의 등가 물리적 댐핑값 $b_{eq}(n)$ 을 추정한다.

식 (14)에서 보듯이 등가 물리적 댐핑값에서 에너지 소모 요소는 햅틱 장치의 속도의 상태에 따라 변화될 수 있다. 그림 3을 보면, 등가 물리적 댐핑값이 충분한 시간에 걸쳐 추정될 경우, 에너지 저장요소는 소거되고 등가 물리적 댐핑값은 실제 물리적 댐핑값에 수렴하게 됨을 알 수 있다.

3.3 모의실험

그림 2는 $m=0.1, b=1$ 인 1자유도 햅틱 장치의 오프라인 추정 방법에 의한 모의실험 결과를 나타낸다. 햅틱 장치의 동역학은 식 (11)의 2차식을 Runge-Kutta 방법으로 계산하였고 매 1msec마다 오프라인 추정 알고리즘을 수행하였다.

그림 2 (a)는 햅틱 장치에 인가되는 랜덤 힘을 나타낸다. (b)는 햅틱 장치의 속도, (c)는 식 (14)의 분자, (d)는 식 (14)의 분모, (e)는 추정된 등가 물리적 댐핑값의 변화를 각각 나타낸다. 그림 2에서 볼 수 있듯이, 에너지 저장 요소 항은 0에 수렴함으로써 등가 물리적 댐핑값은 실제 물리적 댐핑값인 1 Nsec/m에 수렴한다.

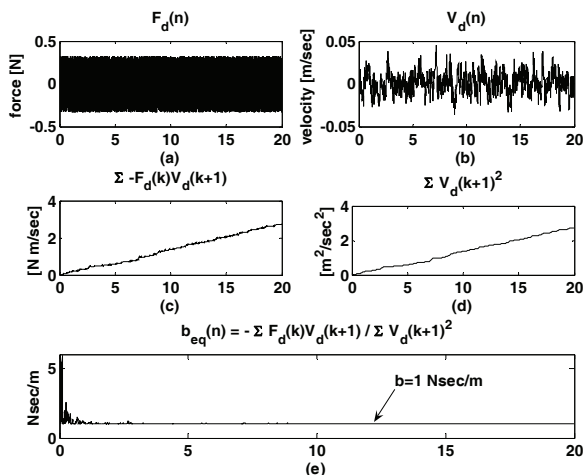


그림 2. $m=0.1\text{Kg}, b=1\text{Nsec/m}$ 인 1자유도 햅틱 장치에 대한 오프라인 추정 모의실험 결과

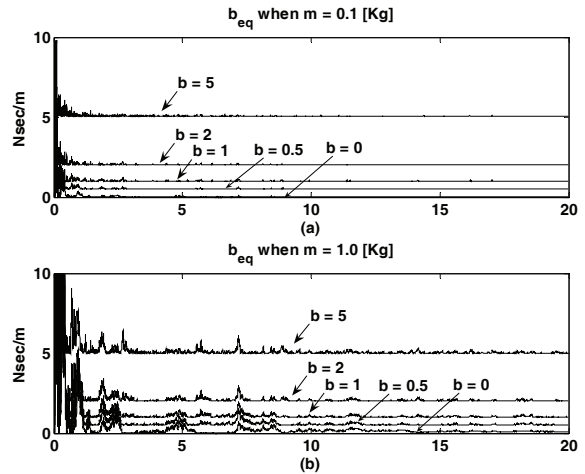


그림 3. b값에 따른 1자유도 햅틱 장치에 대한 등가 물리적 댐핑추정 (a) $m=0.1\text{Kg}$ 일 때 (b) $m=1\text{Kg}$ 일 때

그림 3은 햅틱 장치의 질량과 댐핑값을 변화시키면서 수행한 모의 실험 결과이다. 무거운 햅틱 장치에 대해서는 시간에 따라 변하는 에너지 저장요소를 제거하는데 많은 시간이 소요됨에도 불구하고 등가 물리적 댐핑값은 실제 물리적 댐핑값에 수렴함을 확인할 수 있다.

4. 실험결과

이번 장에서는 제안한 물리적 댐핑 추정 방법에 대한 실험결과를 나타내었다. 실험은 2자유도 햅틱 장치인 Impulse Engine 2000으로 수행하였다. Impulse Engine 2000은 짐벌(gimbal) 구조로 되어 있어 2자유도 회전 운동이 가능하며 기어 대신 와이어 증폭 방식인 캡스턴 메커니즘 (capstan mechanism)을 사용하여 역구동성(back-drivability)을 강화하였다.

작업공간은 x, y축으로 약 150x150 mm 정도이며 최대 8.9N까지 힘을 발생시킬 수 있다. 그리고 엔코더 분해능은 핸들 부분에서 0.02032 mm이다.

그림 4는 햅틱 장치의 핸들이 $x=0, y=0$ 의 위치에 있을 때의 제안한 추정 알고리즘에 대한 실험 결과이다. 추정된 값은 약 11이다. 표 1은 햅틱 장치의 위치를 바꾸어 가면서 추정한 등가 물리적 댐핑값을 나타내었다.

그림 5는 1kHz 햅틱 렌더링 레이트에서 안정화 제어 알고리즘을 적용하지 않고 수행한 가상벽 실험 결과를 나타낸다. 가상벽의 위치는 0.04m이며 가상벽의 강성(stiffness)이 약 25kN/m를 넘어서면서부터 진동이 발생한다. 힘의 작은 변화는 사용자 손의 떨림에 의해 나타나는 현상이다.

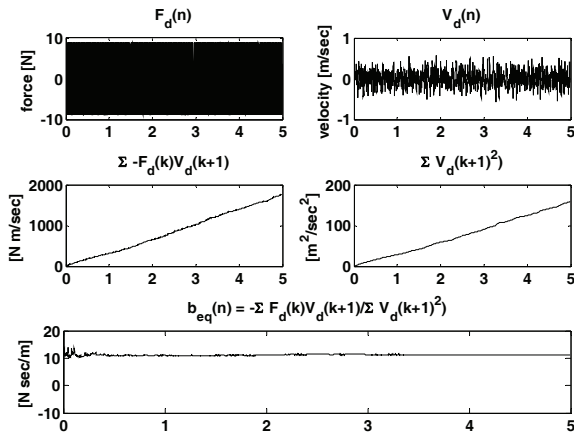


그림 4. 물리적 댐핑값 추정 실험 결과 (x=0, y=0일 때)

표 1. 햅틱 장치의 위치에 대한 등가 물리적 댐핑값

(x, y)	x=-0.04 m	x=0.00 m	x=0.04m
y=0.04 m	10.5 Nsec/m	10.4 Nsec/m	11.5 Nsec/m
y=0.00 m	10.6 Nsec/m	11.1 Nsec/m	10.5 Nsec/m
y=-0.04 m	11.8 Nsec/m	10.7 Nsec/m	10.2 Nsec/m

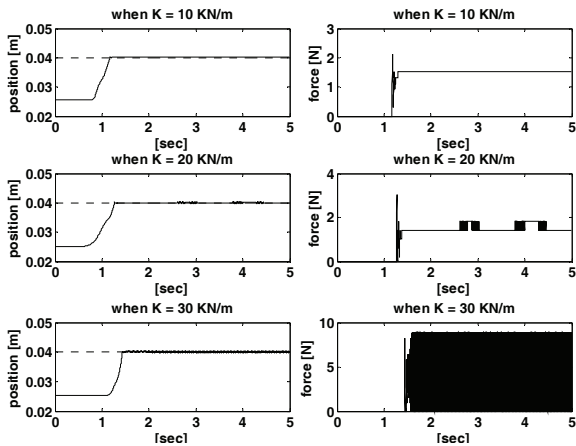


그림 5. 에너지 바운딩 알고리즘 적용하지 않았을 때의 가상력 실험 결과 (햅틱 렌더링 레이트 : 1kHz)

햅틱 장치의 배치뿐만 아니라 구동되는 주파수에 영향을 받는 물리적 댐핑값을 정확히 아는 것은 매우 어렵기 때문에 댐핑값을 제대로 추정했는지 바로 확인할 수는 없지만 가상력 실험 결과를 통해 물리적 댐핑값을 대략적으로 계산할 수 있다. 그림 5를 통해 1kHz 햅틱 렌더링 레이트에서 최대로 표현할 수 있는 강성이 약 25kN/m라 하면 잘 알려진 수동성을 만족하는 관계식인 $b \geq \frac{KT}{2} + |B| (B=0)^{[5]}$ 로부터 물리적 댐핑이 약 12~13

Nsec/m임을 알 수 있다. 수동성 조건은 보존적인 (conservative) 조건이므로 정확한 물리적 댐핑은 12~13Nsec/m보다는 적을 것이다. 이를 바탕으로 표 1의 추정된 물리적 댐핑값은 유효하다 할 수 있다.

그림 6, 7은 등가 물리적 댐핑이 과대평가(overestimation), 과소평가(underestimation) 되었을 경우, 그림 8은 등가 물리적 댐핑이 잘 추정되었을 경우의 가상력 실험 결과를 나타낸다. 등가 물리적 댐핑이 과대평가 되었을 경우에는 그림 6과 같이 햅틱 시스템의 안정성이 보장되지 않으며 과소평가 될 경우에는 그림 7에서 볼 수 있듯이 나타낼 수 있는 임피던스의 범위가 크게 감소하게 된다. 따라서, 햅틱 상호 작용의 안정성 뿐만 아니라 성능을 보장하기 위해서는 햅틱 장치의 등가 물리적 댐핑이 정확히 추정될 필요가 있다.

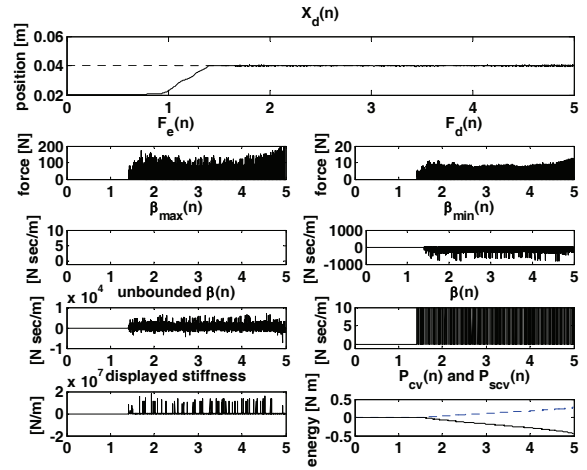


그림 6. 등가 물리적 댐핑이 과대평가(overestimation) 되었을 경우의 가상력 실험

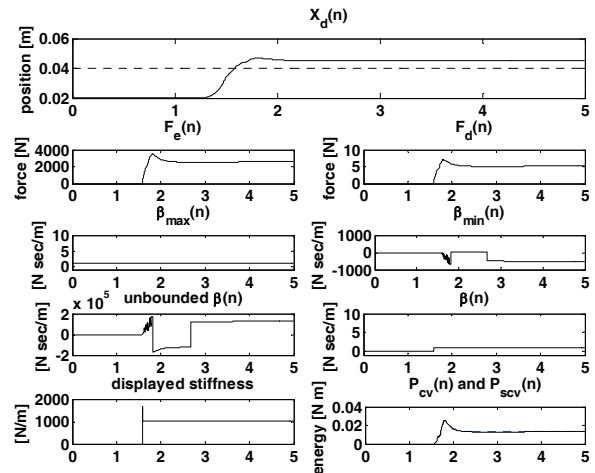


그림 7 등가 물리적 댐핑이 과소평가(underestimation) 되었을 경우의 가상력 실험

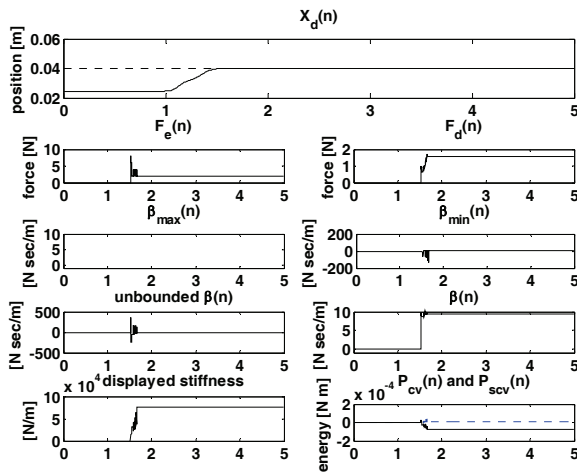


그림 8 등가 물리적 댐핑이 적절히 추정(proper-estimation) 되었을 경우 가상벽 실험.

5. 결론 및 향후 연구 과제

본 논문에서는 안정적인 햅틱 상호 작용을 위한 물리적 댐핑 추정 알고리즘을 제안하였다. 모의 실험 및 2 자유도 햅틱 장치를 이용한 실험을 통하여 제안한 알고리즘의 유용성을 확인하였다. 표 1에서 볼 수 있듯이, 추정된 물리적 댐핑값은 햅틱 장치의 위치에 따라 달라진다. 햅틱 장치의 물리적 댐핑값은 햅틱 장치의 배치(configuration)에 따라 달라짐으로 특정한 값이 전체 작업 공간의 안정성을 보장할 수는 없다. 따라서 전체 작업 공간 내에서 햅틱 장치의 배치를 바꾸어 가면서 등가 물리적 댐핑값을 추정하여야 한다. 또한 이렇게 추정한 값들을 표(lookup table)로 구성하여 사용하면 햅틱 시뮬레이션에서 더 넓은 임피던스 범위를 제공할 수 있다. 그러나 제안한 알고리즘을 다자유도 햅틱 장치에 적용할 경우, 각 축과 배치에 따라 댐핑을 측정하는 것은 쉽지 않다. 그러므로 다양한 위치 또는 배치에 따라 자동으로 등가 물리적 댐핑값을 추정할 수 있는 자동화 기법이 필요할 것이다. 또한 시간 소모적인 오프라인 방법이 아닌 사용자의 동역학적 인수를 포함하여 상호 작용하면서 실시간으로 추정가능한 온라인 추정 방법도 필요할 것이다.

참고문헌

[1] G. C. Burdea and P. Coiffet, Virtual Reality Technology second edition, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
 [2] J. W. Yoon and Jeha Ryu, "Design, Fabrication, and

Evaluation of a New Haptic Device Using a Parallel Mechanism," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 6, no. 3., 2001.
 [3] Y. Tsumaki, M. Kinami, M. Uchiyama, "Realization of a high-fidelity virtual world with a 6 d.o.f. haptic interface", Advanced Robotics (VSP), vol.14, no.5, pp.367-369., 2000.
 [4] Y. Adachi, T. Kumano, A. Ikemoto, N. Suzuki, A. Hattori, A. Takatsu, "A haptic device system for multi-fingers on both hands for a surgical simulator", Advanced Robotics (VSP), vol.14, no.5, pp.431-433., 2000.
 [5] J. E. Colgate and G. G. Schenkel, "Passivity of a class of sampled-data systems: Application to haptic interfaces," Journal of Robotic Systems, vol. 14, no. 1, pp. 37-47., 1997.
 [6] J. E. Colgate and J. M. Brown, "Factors affecting the Z-width of a haptic display," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3205-3210, 1994.
 [7] J. J. Abbott and A. M. Okamura, "Effects of position quantization and sampling rate on virtual-wall passivity," IEEE Transactions on Robotics, vol. 21, No 5, pp. 952-964, 2005.
 [8] N. Diolaiti, G. Niemeyer, F. Barbagli and J. K. Salisbury, "A Criterion for the Passivity of Haptic Devices," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2452-2457, 2005.
 [9] N. Diolaiti, G. Niemeyer, F. Barbagli, J. K. Salisbury and C. Melchiorri, "The effect of quantization and Coulomb friction on the stability of haptic rendering," First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator systems(WHC 2005), 237-246, 2005.
 [10] M. Moreyra, B. Hannaford, "A Practical Measurement of Dynamic Response of Haptic Devices," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 369-374, 1998.
 [11] R. J. Adams, D. Klowden, B. Hannaford, "Stable Haptic Interaction using the Excalibur Force Display," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 770-775, 2000.
 [12] Mehling Joshua, J. Edward Colgate, Michael A. Peshkin, "Increasing the Impedance Range of a Haptic Display by Adding Electrical Damping," WHC 2005, 257-262, 2005.

- [13] J. P. Kim and Jeha Ryu, "Stable Haptic Interaction Control Using Energy Bounding Algorithm," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems, vol. 2, pp. 1210-1217, 2004.
- [14] J. P. Kim and Jeha Ryu, "Stable Haptic Interaction Control Using Energy Bounding Algorithm," IEEE Transactions on Robotics, 2005. (in review)
- [15] N. Hogan, "Controlling Impedance at the Man/Machine Interface," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1626-1631, 1989.



김 종 필

1998 한국과학기술원 기계공학과(공학사)
 2000 광주과학기술원 기전공학과(공학석사)
 2000 ~ 현재 광주과학기술원 정보기전공학부(기전공학과) 박사과정

관심분야: Stable Haptic Interaction Control, 3DOF / 6DOF Haptic Rendering Algorithm, Kinematic / Dynamic Analysis and Control of Parallel Robots



서 창 훈

2003 부산대학교 전자전기통신공학부(공학사)
 2005 광주과학기술원 기전공학과(공학석사)
 2005 ~ 현재 광주과학기술원 정보기전공학부(기전공학과) 박사과정

관심분야: 햅틱 인터페이스, 햅틱 상호작용 안정화 제어



류 제 하

1982 서울대학교 기계공학과(공학사)
 1984 한국과학기술원 기계공학과(공학석사)
 1991 The University of Iowa, PhD, 기계공학박사

1994 ~ 현재 광주과학기술원 정보기전공학부(기전공학과) 교수

관심분야: Parallel Manipulator Kinematics / Dynamics / Control / Optimal Design, Haptic Device for VR Interface, Computer Haptics/VR Dynamic Simulation, Vehicle Dynamics / Control, Hardware-In-the-Loop Simulation 등