

# 안정된 햅틱 인터페이스를 위한 비선형가상커플링

## Nonlinear Virtual Coupling for Stable Haptic Interaction

이 문 환, 이 두 용\*

(Moon-Hwan Lee and Doo Yong Lee)

**Abstract :** This paper proposes a nonlinear virtual coupling for haptic interface, which offers better performance while maintaining stability of the system. The nonlinear virtual coupling is designed based on a human response model. This human response model exploits delay between the human intention and the actual change of arm impedance. The proposed approach provides with less conservative constraints for the design of stable haptic interface, compared with the traditional passivity condition. This allows increased performance that is verified through experiments.

**Keywords :** nonlinear virtual coupling, haptic interface, haptic stability, human response model

### I. 서론

햅틱 인터페이스는 사용자와 가상 환경간의 안정된 상호작용을 보장해야 한다. 최근에 들어 이러한 햅틱 안정성(stability)과 수동성(passivity)에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. Minsky 등[1]은 사람 팔의 임피던스를 2차 선형시불변 모델로 근사하여 시스템이 안정하기 위한 샘플링 주기, 가상 벽의 강성, 그리고 물리적인 땜평간의 관계를 제시하였다. Colgate와 Schenkel[2]은 연계된 시스템을 해석하기 위해 수동성의 개념을 사용하여 연속계와 이산계가 결합된 시스템이 수동성을 보장하기 위한 필요충분 조건을 유도하였고 Brown과 Colgate[3]는 햅틱 장치의 물리적인 땜평이 임피던스-폭(Z-width)을 증가시킬 수 있는 가장 주요한 인자임을 보였다. 수동성이 햅틱 인터페이스처럼 연속계와 이산계가 결합된 시스템, 혹은 사람 팔의 모델과 같이 미지의 요소가 많은 시스템을 해석하는데 있어 유용한 도구이지만 이는 시스템을 설계함에 있어 많은 제약조건을 제시하여 시스템의 성능을 저하시키게 된다.

Colgate 등[4]은 햅틱 장치와 가상 환경간의 가상의 연결을 갖는 선형가상커플링(linear virtual coupling)을 제안하여 시스템의 안정성을 보장하게 하는 가상 커플링의 조건을 밝혔다. Adams와 Hannaford[5]는 다양한 결합관계에서의 가상 커플링의 설계 방법을 더욱 발전시켜 사용자와 가상 환경이 수동적이라는 가정하에 사람이 느끼는 임피던스를 최대화시키면서 시스템의 안정성을 보장하기 위한 필요충분 조건을 유도했다. 이론적으로 가상 커플링의 도입이 임의의 가상 환경에 대한 안정적인 구현을 가능하게 하지만 무한의 강성을 갖는 가상 환경을 구현하는 경우 사용자는 가상 환경의 임피던스가 아니라 가상 커플링의 임피던스를 느끼는 되는 단점이 있다[6]. 따라서 시스템의 성능을 최대화시키기 위해서는 안정성을 유지하면서 가상 커플링의 임피던스를 최대화 시켜야 한다.

사람 팔은 상당히 비선형적이며 시변의 특성을 갖기

때문에 모델화의 작업이 매우 어려우며 이는 시스템의 해석을 어렵게 하는 요인이다. 실험을 통한 부분적인 사람 팔의 모델에 근거하여 시스템을 해석하고자 하는 연구들도 진행되어 왔다. Hogan[7]은 사람이 의식적으로 팔의 동적 특성을 변화시키는 위해서는 최소 1.2초의 시간이 요구됨을 주지하여, 1.2초 내에서는 사람 팔의 특성이 수동적이며 일정한 임피던스로 모델이 가능함을 제시하였다. Kazerooni와 Her[8]는 실험을 통해 얻어진 사람 팔의 선형 임피던스 모델을 이용하여 시스템의 안정성을 해석하였다.

본 논문은 시스템의 안정성을 유지하면서 기존의 연구들보다 향상된 성능을 보여주는 비선형가상 커플링을 제안한다. 사람 팔의 특성을 2차 선형시불변 임피던스 모델과 가상 환경으로부터 모사되는 힘에 대한 응답 모델로 표현하며 사람의 응답 모델에 근거하여 비선형가상커플링을 설계한다. 비선형가상 커플링을 포함한 시스템에 대한 안정성 조건을 유도하며 이를 기존의 수동성 조건 및 선형가상커플링의 결과와 비교한다.

### II. 비선형가상커플링

.제안된 비선형가상커플링은 일정한 크기의 선형화 구간  $\Delta x$ , 즉  $x_i$  와  $x_{i+1}$  사이의 구간에서 일정한 강성  $k_i$  을 갖는 부분구간 선형 모델이다.  $x_d^*$  는 햅틱 장치 끝단의 샘플된 위치를 나타내며, 가상 환경은 스프링( $k_e$ )과 댐퍼( $b_e$ )로 모델 한다.

그림 1 은 제안된 비선형가상커플링이다.

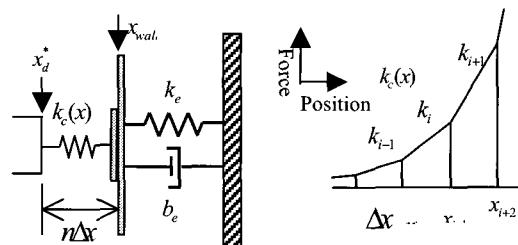


그림 1. 비선형가상커플링.

Fig. 1. Nonlinear virtual coupling.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 4. 9., 채택확정 : 2003. 6. 25.

이문환, 이두용 : 한국과학기술원 기계공학과  
(mlshlee@mail.kaist.ac.kr/lee.doyong@kaist.ac.kr)

사람이 느끼는 전체 임피던스  $Z_o$  는

$$Z_o = \frac{Z_c \cdot Z_e}{Z_c + Z_e} \quad (1)$$

여기서 가상 커플링의 임피던스  $Z_c$  와 가상 환경의 임피던스  $Z_e$  는 각각 다음과 같다.

$$Z_c = \frac{k_c}{s}, \quad Z_e = b_e + \frac{k_e}{s} \quad (2)$$

전체 임피던스  $Z_o$  는 강성이 큰 가상 환경을 구현하는 경우  $Z_c$  에 가까워지며 자유 운동을 하는 경우에는  $Z_e$  에 근접한다. 따라서 우리는 가상커플링의 임피던스를 최대화하고자 한다.

### III. 사람 팔의 동적 특성

사용자에 의해 햅틱 장치에 가해지는 힘  $f_i$  는

$$f_i(t) = f_{eff}(t) - F(v, H(t)) \quad (3)$$

여기서  $F( , )$  는 사용자와 장치간의 힘, 속도, 그리고 임피던스간의 비선형관계를 나타낸다. 일반적으로 사람은 유효력  $f_{eff}$  와 임피던스  $H$  를 자발적으로 변화시킬 수 있다[8]. 하지만 사람이 임피던스를 변화시키기 위해서는 1.2초 이상의 시간이 요구되며[7] 본 논문에서는 가상 벽면을 통과할 때 발생하는 불안정성에 주목한다. 따라서 본 논문에서는 이순간 동안 사람의 임피던스를 수동적이고 시불변인 모델로 가정할 수 있다. 임피던스를 선형화하여 (3)을 주파수 영역에서 표현하면 [1][8],

$$f_i(s) = f_{eff}(s) - H v \quad (4)$$

여기서 사람 팔의 임피던스는 유효질량  $M_h$ , 댐핑  $B_h$ , 그리고 강성  $K_h$  을 갖는 2차 선형모델로 표현된다 [1][7][8].

$$H(s) = \frac{F_h(s)}{V_h(s)} = M_h s + B_h + \frac{K_h}{s}. \quad (5)$$

본 논문에서는  $f_{eff}$  를 두가지 요소, 즉 잔여력  $f_{res}$  와 응답력  $f_{react}$  로 분리한다.  $f_{react}$  는 가상 환경에서 발생하는 반력  $\bar{f}_a$  에 대해 사용자가 대응하는 힘을 나타내며  $f_{res}$  는  $f_{react}$  를 제외한 모든 힘을 의미한다.  $f_{res}$  는 초기에 햅틱 장치를 움직이는 역할을 하며 사용자의 의도 하에 임의로 변할 수 있다.

햅틱 인터페이스에서 사람은 일반적으로 가상 환경에서

모사되는 반력에 대응한다. 하지만 기존의 연구들은 이러한 현상에 착안하지 않았으며 단순히 대응력을 시스템을 해석함에 있어 고려되지 않는 외부인자중의 하나로 간주하였다. 그럼 2에 표현된 가상 벽을 고려하자. 접촉 불안정 즉 고주파 떨림 현상은 일반적으로 가상 벽의 표면에서 발생한다. 큰 강성을 갖는 가상 환경은 가상 벽 표면 주위에서 동역학적 특성이 급변하는데 사람 팔은 고유한 응답 지연을 갖기 때문에 이 갑작스러운 변화에 대응하지 못하며 이는 가상 벽 주위에서 고주파의 진동현상을 발생시킨다. 하지만 매우 큰 강성을 갖는 가상 벽에 대해서도 일단 벽의 표면을 통과하여 내부로 진입한 이후에는 떨림 현상이 거의 발생하지 않는다. 이는 벽의 내부에 진입한 이후에는  $f_{react}$  와  $\bar{f}_a$  가 균형을 이루기 때문이다.

그림 3에서  $x_{k-1}^*$  와  $x_k^*$  는 각각 (k-1)과 k 순간에 샘플된 햅틱 장치 끝 단위의 위치를 의미한다. 햅틱 장치가 부분구간 선형 모델의 i 번째 구간에 들어가는 순간 액츄에이터는  $\bar{f}_a$  를 발생하는 반면 사람의 응답력은  $f_{react}$  가 된다.

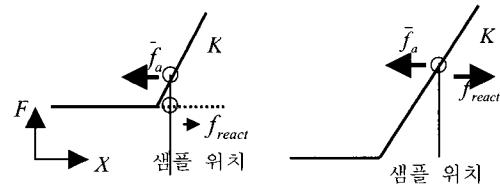


그림 2. 위치에 따른 사람의 응답 특성.

Fig. 2. Human response at different positions.

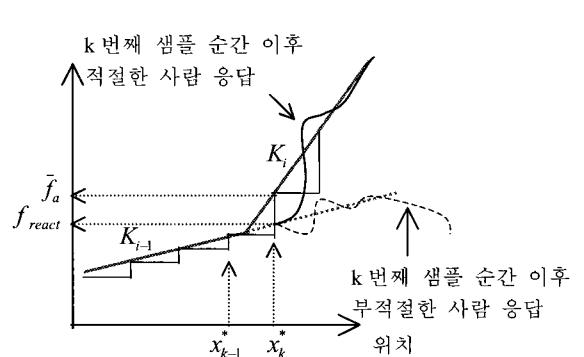


그림 3. 부분구간 선형모델에서의 사람 응답.

Fig. 3. Human response in nonlinear virtual model.

사람이 적절한 응답을 한다는 가정하에 이 순간 이후 액츄에이터에서 발생하는 힘과 사람의 응답력 차이는 초기의 최대차이  $\max \| \bar{f}_a - f_{react} \|$  보다 항상 작게 된다. 따라서  $x_d^*$  가 i 번째 구간에 있을 때 즉,  $X_i \leq x_d^* < X_{i+1}$  에서 응답력은 다음과 같이 모델 할 수 있다.

$$F_{react}(s) = ZOH \cdot E_{i-1}(z) \cdot SAMPLE \cdot V_d(s) \quad (6)$$

ZOH와 SAMPLE은 각각 zero-order hold와 sampler의 등가 전달함수를 의미하며,  $E_{i-1}(z)$ 는 부분구간 선형 가상 모델의 (i-1) 번째 구간에서의 이산전달함수를 의미한다.  $V_d(s)$ 는 장치의 속도다.

응답 모델의 전달함수  $R(s)$ 는

$$R(s) = \frac{F_{react}(s)}{V_d(s)} = ZOH \cdot \left( \frac{K_{i-1}}{s} \right) \Big|_{s \rightarrow \left( \frac{z-1}{T_z} \right)} \cdot SAMPLE \quad (7)$$

(5)와 (6)을 (4)에 대입하여 다음의 관계를 얻는다.

$$F_i(s) = F_{res}(s) + R(s) \cdot V_d(s) - (M_h s + B_h + \frac{K_h}{s}) V_d(s) \quad (8)$$

#### IV. 강성 증가량과 선형화 구간

그림 4는 제안된 모델의 구조다.

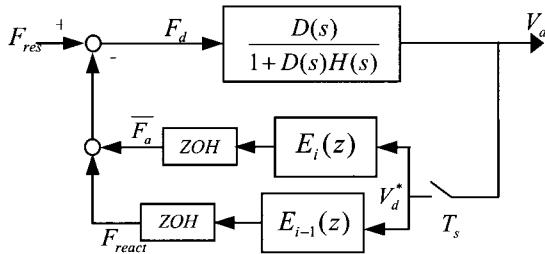


그림 4. 제안된 모델의 블록 다이어그램.

Fig. 4. Block diagram of the proposed model.

$D(s)$ 는 질량  $M_d$ 과 댐핑  $B_d$ 로 표현되는 햅틱 장치의 전달함수를 의미한다. 해석을 간단히 하기 위해 가상 벽은 무한의 강성을 갖는다고 가정한다. 따라서 가상 환경과 가상 커플링을 포함하는 전체 강성은 가상 커플링의 강성으로 근사된다. 각 전달함수는 다음과 같다.

햅틱 인터페이스에서 일반적인 멀림 주파수는 10 – 50 Hz 이므로 수 백 Hertz 이상의 샘플 주파수에서는 aliasing 현상이 발생하지 않음을 가정할 수 있다.

$$\frac{D(s)}{1+D(s)H(s)} = \frac{1}{(M_h + M_d)s + (B_h + B_d) + \frac{K_h}{s}} \quad (9)$$

$$E_i(z) = \frac{TK_i z}{z-1} \quad (X_i \leq x_d^* < X_{i+1}) \quad (10)$$

따라서 샘플러는 정적 이득  $\frac{1}{T}$ 를 갖는 전달함수로 근사하며 zero-order hold 역시 Nyquist 주파수에서 이득  $T$ 와  $180^\circ$  위상지연을 갖는 저역통과 필터로 근사한다[5]. 가상 커플링, 샘플러, zero-order hold가 포함된 일반적인 전달함수는

$$E_i(z) \cdot ZOH(z) \cdot SAMPLE(z) = \frac{K_i T (1+z^{-1})}{2(1-z^{-1})} \quad (11)$$

$z$ 에  $e^{sT}$ 를 대입하여 테일러 급수 전개로 근사하면 전체 시스템의 전달함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{V_d(s)}{F_{res}(s)} &= G_{system}(s) \\ &= \frac{s}{(M_h + M_d)s^2 + \left( B_h + B_d - \frac{T}{2}(K_i - K_{i-1}) \right)s + (K_h + K_i - K_{i-1})} \end{aligned} \quad (12)$$

따라서 전체 시스템은 다음의 조건을 만족시킬 때 안정성을 보장한다.

$$B_h + B_d - \frac{T}{2}(K_i - K_{i-1}) > 0 \quad (13)$$

응답 모델과 (13)의 유도는 연속된 샘플 위치가 부분구간 선형 모델의 두 선형구간 이상을 넘지 않는다는 가정하에 이루어졌다. 본 연구의 경우 일반적인 햅틱 작업의 속도는 0.2m/s를 넘지 않았으며 이러한 경우 1KHz의 샘플 주파수에 대해 연속된 샘플 위치의 차이는 0.2mm를 넘지 않는다. 매우 큰 강성을 갖는 가상 벽을 구현하는 경우의 멀림 현상에 있어 햅틱 장치 끝단의 속도는 0.2m/s를 넘지 않으므로 본 논문에서는 선형화 구간을 0.4mm로 둔다.

수동성 조건(passivity condition)은 사람의 동적 특성을 고려하지 않고 시스템의 안정성을 보장하기 위한 관계를 제시한다. Colgate[2]는 물리적 댐핑  $B_d$ 와 가상 환경 전달함수  $H(e^{j\omega T})$ 를 갖는 햅틱 시스템의 안정성을 보장하는 조건을 다음과 같이 제시한다.

$$B_d > \frac{T}{2} \frac{1}{1 - \cos \omega T} \operatorname{Re} \{(1 - e^{-j\omega T}) H(e^{j\omega T})\}, \quad 0 \leq \omega \leq \omega_N \quad (14)$$

가상 환경을 스프링(K)만으로 모델하면 수동성 조건은 다음과 같다.

$$\frac{2B_d}{T} > K \quad (15)$$

(13)에서  $K_{i-1}$ 과  $K_i$ 에 각각 0과  $K$ 를 대입하여 간단히 선형가상커플링에 대한 안정성 조건을 얻는다. 본 논문에서 제시하는 안정성 조건에 의하면 선형가상커플링을 사용하는 경우 최대 강성은

$$\frac{2}{T} (B_h + B_d) > K \quad (16)$$

또한 비선형가상커플링을 사용하는 경우

$$\frac{2}{T} (B_h + B_d) + K_{i-1} > K_i \quad (17)$$

제안된 안정성 조건에는 사람 팔의 댐핑이 포함되는데 이 값은 사람마다 다르며 동일인에 대해서도 팔의 자세에 따라 달라 수 있다. 극단적인 경우 사람의 댐핑을 0 으로 두면 (16)은 수동성 조건과 일치하게 된다. 하지만 이는 사용자가 햅틱 장치를 전혀 잡지 않은 상황을 의미한다. 따라서 제안된 안정성 조건에 사람 팔의 최소 댐핑을 대입함으로써 수동성 조건보다 덜 제약적이면서 강건한 안정성을 보장할 수 있다.

선형가상커플링을 사용하는 경우 주어진 샘플 주기에 대해 사람과 햅틱 장치의 댐핑에 의해 결정되어 안정하게 구현 가능한 최대 강성량이 존재한다. 그러나 그림 5에서 보듯 비선형가상 커플링을 사용하면 강성의 최대치를 더욱 증가시킬 수 있다.

선형화 구간  $\Delta X$  를 갖는 일반적인 n-구간 선형 모델의 경우 등가 강성은 다음과 같다.

$$K_{equivalent} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i \cdot \Delta X_i}{\sum_{i=1}^n \Delta X_i} \gg K_1 \quad (18)$$

마지막 구간에서의 강성은 다음과 같다.

$$\frac{2}{T} (B_h + B_d) \cdot N > K_n \quad (19)$$

그림 5를 통해 수동성 조건과 본 논문에서 제안하는 안정성 조건, 그리고 비선형가상커플링을 사용하는 경우에 대한 비교를 도식적으로 볼 수 있다.

## V. 실험 결과

그림 6의 햅틱 장치를 이용해 제안된 이론을 실험적으로 검증하였다.

본 역감 제시 장치는 DC서보 모터에 의해 구동되며 넓은 범위에 걸쳐 데이터를 측정할 수 있도록 개발되었다. 표 I은 장치의 사양을 나타낸다.

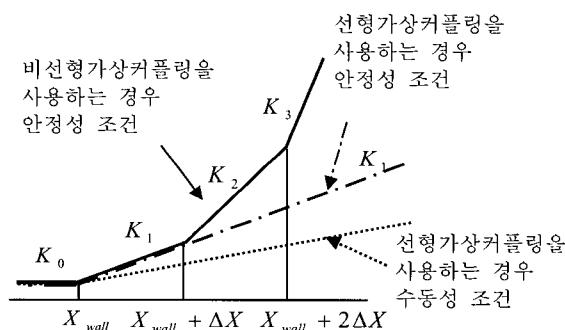


그림 5. 선형가상커플링과 비선형가상커플링, 수동성 조건과 안정성 조건에 대한 비교.

Fig. 5. Comparison linear with nonlinear virtual model and passivity with stability condition.

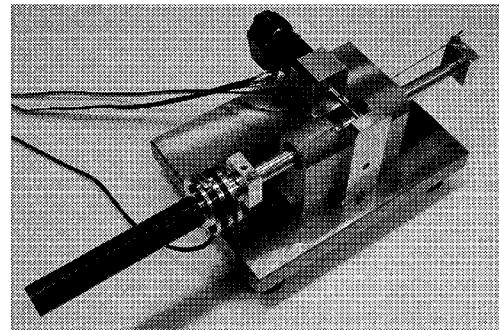


그림 6. 1 자유도 역감 제시 장치

Fig. 6. The one degree of freedom haptic device

표 1. 햅틱 장치의 사양

Table 1. Specifications of the 1-DOF haptic device

동작 영역	92 mm
분해능	7.23 $\mu$ m/pulse
최대 힘	186.8 N
유효 질량	0.876 kg
유효 댐핑	2.936 N-s/m

4명의 피실험자를 대상으로 팔의 임피던스를 측정하였다. 전혀 힘을 가하지 않고 자유 진동하는 햅틱 장치를 잡고 있는 것은 모순이 될 수 있으므로 사람의 팔을 실험장치에 고정하였다. 임피던스는 반경 방향운동(전-후)시 측정되었으며 각 대상자가 3번의 실험을 수행하며 1회 실험당 5가지의 다른 강성 조건이 주어진다. 따라서 총 60회의 실험을 수행하였다. 전체 대상자에 대한 평균적인 임피던스 값은 다음과 같다.

$$\begin{cases} M_h \approx 3.362067 \text{ kg } (SD = 0.350052) \\ B_h \approx 5.2246 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m } (SD = 0.3328) \\ K_h \approx 343.441 \text{ N} / \text{m } (SD = 33.1221) \end{cases}$$

실험에서 가상 벽은 강체(100000N/m)로 모델한다. 그림 7은 어떠한 가상 커플링도 사용하지 않고 가상 벽을 구현하는 경우 역감 제시 장치의 위치와 액추에이터에 의해 구동되는 힘의 시간에 대한 응답을 보인다.

그림 7(b)는 힘 측정 센서에서 측정된 값이 아니라 제어 프로그램상에서의 출력 값을 나타낸다. 위의 응답에서

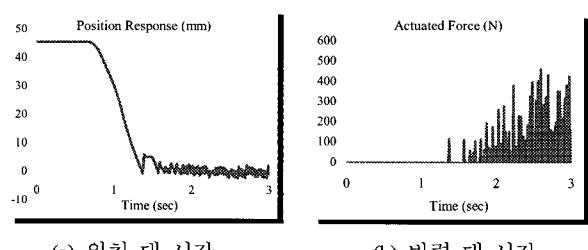


그림 7(a) 위치 대 시간

그림 7. 가상 커플링을 사용하지 않은 경우 응답.

Fig. 7. Response without any virtual coupling.

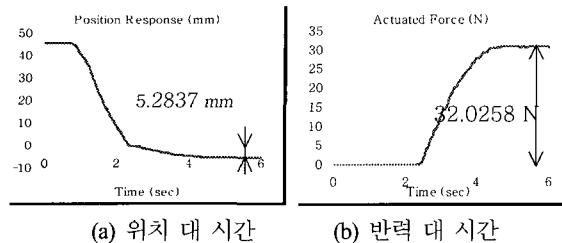


그림 8. 수동성 조건에 근거한 선형가상커플링을 사용한 경우 응답.

Fig. 8. Response with linear virtual coupling based on passivity.

두드러진 떨림 현상을 볼 수 있으며 이는 가상 커플링을 사용하여 해결할 수 있다.

그림 8과 그림 9에서 사용된 선형가상커플링은 각각 수동성 조건과 본 논문에서 제안된 안정성 조건을 바탕으로 설계되었다.

그림 8의 선형가상커플링은 강성 5872N/m를 가지며 이는 본 햅틱 장치의 물리적 댐핑값 (2.936N·s/m)에 대한 최대치이다. 그림 9의 선형가상커플링은 강성치 16322N/m를 가지며 이 역시 본 장치의 댐핑값 (2.936N·s/m)과 실험에 의해 얻어진 사람의 평균적인 댐핑값 (5.225N·s/m)을 고려한 최대치이다.

그림 8과 9의 응답은 모두 떨림 현상을 보이진 않지만 가상의 벽과 접촉하는 순간 그림 8이 그림 9보다 더 비현실적으로 가상 벽을 구현하고 있음을 볼 수 있다. 이는 사람 임피던스의 불확실성에 대해 수동성 조건이 더 큰 제약을 수반하며 강건 안정성을 보장하기 때문이다.

그림 10은 비선형가상커플링을 사용한 경우의 응답이다. 비선형 모델은 0.4mm의 5개의 선형화 구간으로 이루어져 있으며 각 구간에서의 강성치는 15000N/m 부터 15000N/m 씩

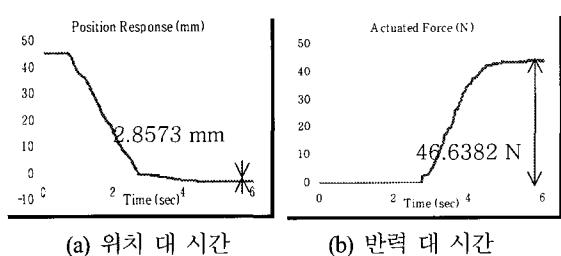


그림 9. 안정성 조건에 근거한 선형가상커플링을 사용한 경우 응답.

Fig. 9. Response with linear virtual coupling based on stability.

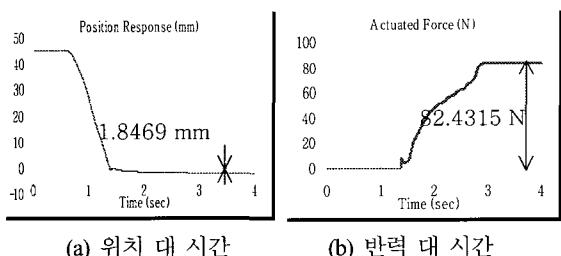


그림 10. 비선형가상커플링을 사용하는 경우 응답.

Fig. 10. Response with nonlinear virtual coupling.

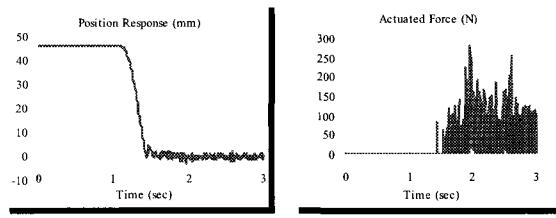


그림 11. 선형가상커플링(강성치 45000N/m)을 사용하는 경우 응답.

Fig. 11. Response with linear virtual coupling for stiffness of 45000N/m.

증가하여 최종적으로 75000N/m의 강성치를 가지며 (18)에 의해 등가 강성치 45000N/m를 갖는다.

응답으로부터 실험적 등가 강성치는 44632.4N/m (82.4315N / 1.8469mm)이며 이는 이론치와 매우 근사한 결과이며 기존의 연구에서 제시하는 최대 강성치 3500N/m보다 10배 이상 증가한 값이다[9].

선형가상커플링을 사용하는 경우, 수동성 조건이나 안정성 조건 모두 강성치 45000N/m를 아무런 떨림 현상 없이 구현 할 수 없으며 이는 주어진 물리적 댐핑과 임피던스에 대해 안정성을 보장할 수 없는 값이다. 그림 10의 결과는 비선형가상커플링을 사용하는 경우 이러한 강성치는 물론 최종 강성치 75000N/m까지 떨림 현상 없이 구현 가능함을 보인다. 비교를 위해 그림 11에서는 강성치 45000N/m를 갖는 선형가상커플링을 사용했을 경우의 응답을 보였다.

그림 10의 등가 강성치와 동일한 값을 갖지만 그림 10과는 달리 가상 벽의 표면에서 두드러진 떨림 현상을 보여 안정성을 보장하지 못함을 알 수 있다.

## VI. 결론

본 논문에서는 사람의 응답모델에 착안하여 비선형 가상커플링을 제안한다. 시스템의 해석을 위해 적절한 가정하에 사람 팔의 동역학적 모델을 2차 선형시 불변 임피던스 모델과 가상 환경으로부터 모사되는 힘에 대한 응답 모델로 표현한다. 비선형 가상커플링을 이용하여 제안된 안정성 조건은 수동성 조건이나 선형가상커플링보다 덜 제약적인 조건으로 시스템의 안정성을 보장하면서도 성능을 향상시킬 수 있으며, 이를 실험을 통해 검증하였다.

## 참고문헌

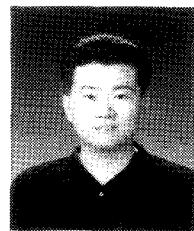
- [1] M. Minsky, et. al., "Feeling and seeing issues in force display," *Computer Graphics*, vol. 24, no. 2, pp. 235-243, 1990.
- [2] J. E. Colgate, and G. Schenkel, "Passivity of a class of sampled-data systems: application to haptic interfaces," *Proc. American Control Conference*, Baltimore, pp. 3236-3240, 1994.
- [3] J. M. Brown, and J. E. Colgate, "Factors affecting the Z-width of a haptic display" *Proc. IEEE Int. Conf. R&A*, Los Alamitos, CA, pp. 3205-3210, 1994.
- [4] J. E. Colgate, M. C. Stanley, and J. M. Brown, "Issues in the haptic display of tool use," *Proc. the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent*

- Robots and Systems*, Pittsburgh, PA, pp. 140-145, 1995.
- [5] R. J. Adams, and B. Hannaford, "Stable haptic interaction with virtual environments," *IEEE Trans. R&A*, vol. 15, no. 3, pp. 465-474, 1999.
- [6] R. J. Adams, and B. Hannaford, "Control law design for haptic interfaces to virtual reality," *IEEE Trans. Cont. Syst.*, vol. 11, no. 3, pp. 3-13, 2002.
- [7] N. Hogan, "Controlling impedance at the man/machine," *Proc. IEEE Int. Conf. R&A*. Scottsdale, AZ, pp. 1626-1631, 1989.
- [8] H. Kazerooni, and M. G.. Her, "The dynamics and control of a haptic interface device," *IEEE Trans. R&A*. vol. 10, no. 4, pp. 453-464, 1994.
- [9] 윤정원, 류제하, "병렬구조를 이용한 새로운 6자유도 역감제시 장치의 제어 및 평가," *제어자동화시스템 공학 논문지*, 제7권, 제2호, pp. 160-167, 2001.



### 이 문 환

2001년 인하대학교 기계항공우주자동화공학부 졸업. 2003년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 석사. 관심분야는 가상 현실, 강인 제어.



### 이 두 용

1985년 서울대학교 제어계측공학과, 공학사. 1987년 Rensselaer Polytechnic Institute, M.S. 1993년 동 대학교, Ph.D. 1993년 - 1994년 동 대학교, Postdoctoral Research Associate. 1994년 - 현재 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 교수. 연구 분야는 로봇공학, 생산시스템 제어.