

가상현실을 위한 다중 접촉 실시간 햅틱 렌더링

Real-Time Haptic Rendering for Multi-contact Interaction with Virtual Environment

이 경 노, 이 두 용*
(Kyungno Lee and Doo Yong Lee)

Abstract : This paper presents a real-time haptic rendering method for multi-contact interaction with virtual environments. Haptic systems often employ physics-based deformation models such as finite-element models and mass-spring models which demand heavy computational overhead. The haptic system can be designed to have two sampling times, T and JT , for the haptic loop and the graphic loop, respectively. A multi-rate output-estimation with an exponential forgetting factor is proposed to implement real-time haptic rendering for the haptic systems with two sampling rates. The computational burden of the output-estimation increases rapidly as the number of contact points increases. To reduce the computation of the estimation, the multi-rate output-estimation with reduced parameters is developed in this paper. Performance of the new output-estimation with reduced parameters is compared with the original output-estimation with full parameters and an exponential forgetting factor. Estimated outputs are computed from the estimated input-output model at a high rate, and trace the analytical outputs computed from the deformation model. The performance is demonstrated by simulation with a linear tensor-mass model.

Keywords : virtual reality, virtual environment, haptic rendering, output estimation

I. 서론

시각 및 햅틱 인터페이스를 포함하여 현실감이 한층 증강된 가상현실[1,2]은 최소침습수술[3], 복강경수술[4], 내시경시술[5]등과 같은 의료 시뮬레이션 분야에 적용되고 있다. 사용자의 몰입감을 최대한 증강시키기 위해서, 의료 시뮬레이션에서는 그래픽 모델의 외형뿐만 아니라 모델의 변형, 기하학적 변형 및 그에 따른 반력의 현실감이 중요하다. 따라서 유한요소법[6]이나 질량-스프링-댐퍼 모델[7]을 이용한 동역학적 모델이 널리 사용되고 있다. 이런 동역학적 모델들은 모델의 변형 및 그에 따른 반력의 계산과정이 복잡하고 계산량이 많아서 사용자 입력에 따른 변형과 햅틱 정보의 계산을 실시간으로 하기 어렵다. 시각 정보의 갱신율이 25Hz 이상이면 동적인 변형을 현실감있게 구현할 수 있다. 그러나 시스템의 안정성과 높은 몰입감을 위하여 햅틱 정보는 최소 300 Hz 이상, 보통 1kHz의 갱신율이 필요하다.

물리법칙에 근거한 동역학적 모델이면서 동시에 실시간으로 그래픽 및 햅틱 렌더링을 수행하기 위한 변형체 모델화 방법들이 연구되었다. LEM(Long Element Method)은 변형체를 긴 직사각기둥으로 세분화해서 모델화하는 방법으로 압력과 응력에 대한 파스칼의 원리에 근거한 물리적 모델이다[8]. 비균질(non-homogeneous) 재료나 복합재료 등의 변형체를 모델화 할 수도 있다. REM(Radial Element Method)은 LEM의 개선된 방법이다[9]. REM은 비압축성 액체로 가득 차 있는 물체의 탄성적 변형에 대한 정적인 해석에 근거를 두고 있으며

동역학적 해석을 조합하여 변형과 그에 따른 반력을 계산한다. 공간, 에너지, 그리고 중력에 대한 운동은 각각 분리되어 동역학 해석이 수행된다. 이 때문에 변형체의 급격한 큰 변형에 대해서도 빠른 계산이 가능하다. S-chain model(Shape-retaining Chain-Linked model)은 볼륨 변형의 구현을 위해 제안된 3차원 ChainMail 알고리즘을 이용한 방법으로 볼륨 요소들의 물리적 특성을 표현하기 위해 스프링 모델을 사용하였다[10]. 모델화 된 물체의 변형은 마치 체인들이 밀리거나 당겨지는 것처럼 계산된다. 그리고 변형을 계산한 후, 물체 안의 위치에너지를 계산하여 사용자가 받는 힘으로 변형하고 사용자에게 피드백 해 준다. 이 때, 사람은 S-chain 모델로부터 구현된 반력과 FEM 모델로부터 계산된 반력의 차이를 거의 구별할 수 없었다. 실제 물체의 변형과 그에 따른 실제 반력을 가장 잘 모델화 하는 방법은 FEM을 이용하여 직접 변형체의 거동을 모델화 하는 것이다. 본 논문은 FEM 모델 또는 mass-spring 모델과 같이 물체의 실제 거동을 잘 표현하지만, 계산이 복잡하고 계산량도 많은 동역학적 모델을 이용하는 경우를 위해서 실시간 햅틱 렌더링 방법을 제시한다. 즉, 낮은 갱신율을 갖는 동역학적 모델로부터 높은 갱신율의 햅틱 정보를 계산하기 위한 실시간 햅틱 렌더링 방법을 제시한다.

의료 시뮬레이션에서는 신체 장기나 조직의 절단 혹은 접합으로 인해 그래픽 모델의 기하학적 정보가 실시간으로 변할 수 있으며, 동역학적 모델의 많은 계산량 때문에 발생하는 계산시간 지연(computational time-delay)에 대한 보상이 필요하다. 특히, 여러 개의 시술도구를 이용하여 장기나 조직을 잡아 당길 때, 또는 동일 장기를 대상으로 협동 작업을 할 때 여러 개의 접점들 사이에서 발생하는 역감적인 상호작용을 구현해야 한다.

기하학적인 변화를 포함하는 동역학적 모델을 사용하는 실시간 햅틱 렌더링 방법은 보간법(interpolation)과 외삽법

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 10. 26., 채택확정 : 2008. 4. 28.

이경노, 이두용 : 한국과학기술원 기계공학전공

(lee.kyungno@gmail.com/lee.dooyong@kaist.ac.kr)

※ 이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단(No. R01-2007-000-11353-0)과 교육부 BK21 프로젝트의 지원을 받아 수행된 연구임.

(extrapolation)을 이용하는 추정법(estimation)이 널리 사용된다. Zhuang[11]은 사용자의 입력에 대한 동역학적 모델의 변형 및 햅틱 정보를 계산한 후, 보간법을 이용해서 반력을 구현해주는 방법을 제시했으며, 이 방법에서는 시각 및 햅틱 상호작용이 한 주기 시간만큼 지연된다. Picinobo[12]는 동역학 모델로부터 계산된, 낮은 갱신율의 접점 위치와 그에 따른 반력 정보를 이용해서 샘플링 사이의 반력을 계산하는 외삽법을 제시했으나 계산시간 지연 보상에 대한 고려가 부족하였다. Lee[13]는 실시간 햅틱 렌더링 방법으로 다중을 출력 추정법(multi-rate output-estimation)을 제안하였다. 계산시간 지연에 대한 보상은 물론, 기하학적인 변화가 포함된 동역학적 모델로부터의 실시간 햅틱 정보 계산이 가능하다. 다중을 출력 추정법[13]은 시스템의 다중을 샘플링, 변형체의 입출력 모델, 최소 자승법과 출력 오차 추정법에 근거하였다. 기존의 출력 추정법들[14-16]은 하나의 샘플링 주기를 이용해서 시스템의 동역학적 특성을 추정하는 방법이기 때문에 실제 출력 값을 알 수 없는 샘플링 사이의 출력에 대한 추정모델, 추정 오차와 수렴성에 대한 고찰이 부족하였다. Lee[13]가 제시한 다중을 출력 추정법은 변화하는 매개변수에 대한 추정성, 수렴성, 그리고 추정오차의 측면에서 뛰어나지만, 추정해야 할 매개변수가 증가함에 따라 계산량이 크게 증가하는 문제가 있었다. 따라서 다중 접점에서의 역감적 상호작용을 구현할 때는 추정 알고리즘의 계산량을 감소시키기 위한 방법이 필요하다. 또한 공분산(covariance) 행렬 초기화의 기준이 되는 Lreset의 값에 따라서 출력 추정기의 성능이 달라지는 데, 변형체 모델에 따라 추정오차를 최소화 시켜주는 Lreset를 경험적으로 결정해야 하는 단점이 있었다.

본 논문에서는 변화하는 매개변수를 실시간으로 추정하기 위해서 공분산 행렬의 초기화 알고리즘을 사용하지 않고, 망각인자(forgetting factor)를 이용하는 다중을 출력 추정법을 제안한다. 그리고 제안된 다중을 출력 추정법을 토대로 다중 접점들 사이의 역감적 상호작용을 구현할 수 있도록 확장된 방법론을 전개하며, 특히 실시간 계산을 위하여 다중을 출력 추정법의 계산량 증가율을 감소시키는 방법을 제시하고자 한다.

II. 실시간 햅틱 렌더링 방법

햅틱 시스템은 물리법칙에 기초한 동역학적 모델을 포함하는 시각적 상호작용 모듈과 역감을 구현해주는 햅틱 상호작용 모듈로 그림 1과 같이 구성된다. 시각적 상호작용 모듈은 낮은 샘플링 주파수(JT=25Hz)로 시각적 현실감을 충분히 구현할 수 있는 반면, 햅틱 상호작용 모듈은 현실적인 역감 구현을 위해서 높은 샘플링 주파수(T=1kHz)를 필요로 한다. 이러한 두 모듈의 샘플링 주파수 차이를 극복하고 실시간 햅틱 렌더링을 구현하기 위해서 공분산(covariance) 행렬의 초기화 알고리즘을 포함한 다중을 출력 추정법이 개발되었다[13]. 본 논문에서는 이미 개발된 다중을 출력 추정법의 단점을 보완하고, 다중 접점들의 역감적 상호작용 구현에 적합하도록 실시간 햅틱 렌더링 방법을 제안한다.

다중 접점들의 역감적 상호작용은 한 명의 사용자가 두 손을 이용해서 동시에 작업할 때, 혹은 여러 명의 사용자가 공

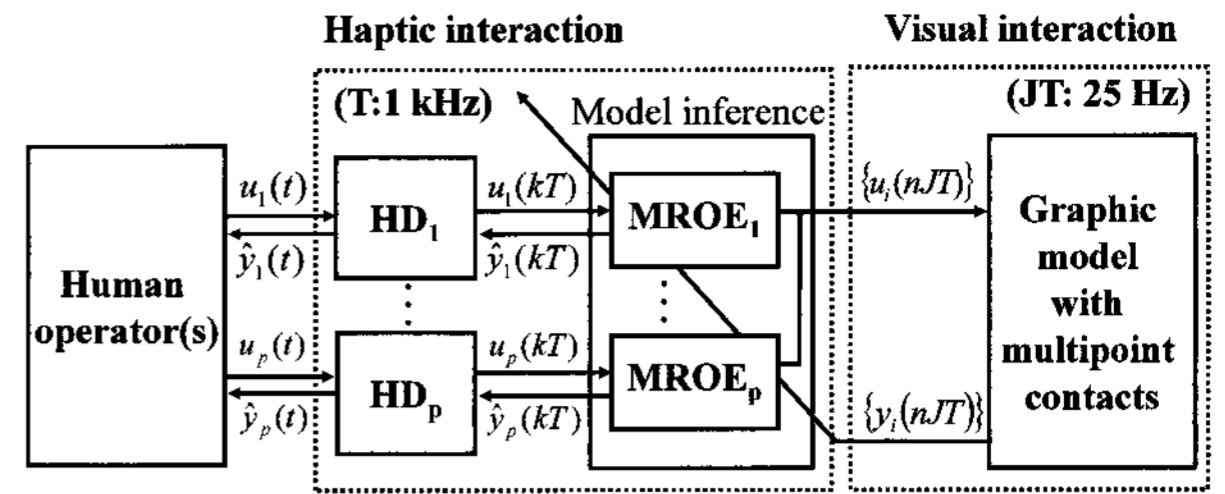


그림 1. 다중 접점의 상호작용을 포함한 햅틱 시스템의 구성도; HD=햅틱장치, MORE=다중을 출력 추정기.

Fig. 1. Haptic system with multipoint contact interaction; HD=Haptic device, MROE=Multi-Rate Output-Estimator.

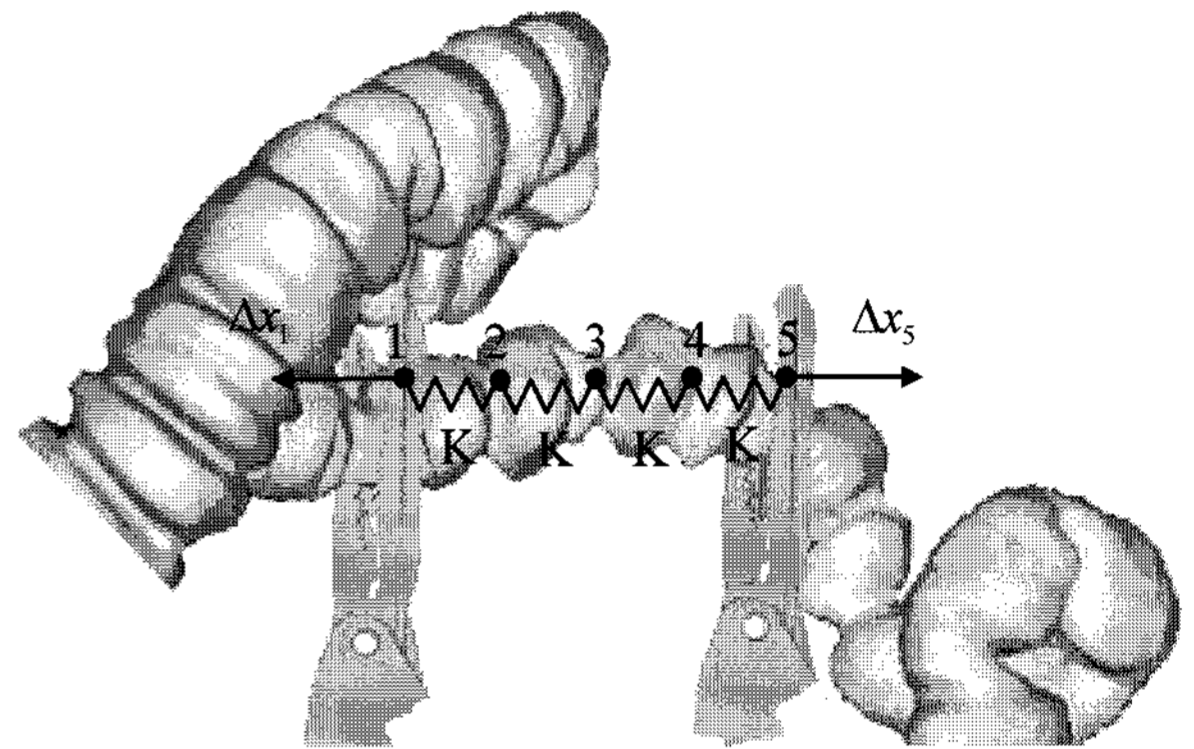


그림 2. 스프링 모델을 이용한 다중 접점들의 역감적 상호작용. Fig. 2. Multi-contact interaction using a spring model.

동 작업을 할 때 발생한다. 그림 1과 같이 각 접점 별로 각각의 햅틱 장치와 다중을 출력 추정기(Multi-Rate Output-Estimator; MROE)를 통해 역감이 제시된다. 다중을 출력 추정기에서는 25 Hz의 갱신율로 다중 접점의 입력들, $\{u_i(nJT)\}$ 과 상호작용에 의한 출력, $\{y_i(nJT)\}$ 을 이용하여 다중 접점들의 입출력 관계를 실시간으로 추정한다. 그리고 그 추정된 매개변수를 이용해서 실시간으로 역감을 계산하고 사용자에게 전달한다. 그림 1에서 $u_p(t)$ 는 입력이며, $\hat{y}_p(t)$ 는 추정 출력이다.

동역학적 모델에서 다중 접점들의 입력과 출력이 어떤 상관 관계를 갖는 지를 그림 2의 간단한 예제를 통해 살펴보자. 그림 2는 동역학적 모델과 2개의 접점이 발생한 경우이다. 그 접점들 사이의 역감적 상호작용은 1 자유도 스프링으로 모델화된다고 가정하자. 사용자는 절점 1과 5를 잡고 있으며 스프링을 수축 혹은 팽창시킬 수 있다. 이 때, 절점 1의 위치 변화량을 Δx_1 , 절점 5의 위치 변화량을 Δx_5 라고 가정하자. 절점 1에서 느껴지는 반력, F_1 은 수식 (1)과 같이 계산된다. 절점 1에서의 반력은 절점 1에서의 변화량에 대한 반력, $f(\Delta x_1) = K \cdot \Delta x_1 / 4$ 과 절점 5에서의 변화량에 대한 반력, $f(\Delta x_5) = K \cdot \Delta x_5 / 4$ 의 합이 된다. 수식 (1)에서 보듯이, 다중 접점들에서의 역감적 상호작용 모델은 각 절점에서의 출력이 모든 절점에서의 입력들에 대한 선형적인 다항식으로 표현된다. 이런 관계를 토대로 시스템 모델과 추정모델을 설계한다. 그리고 다중을 출력 추정기는 그 다항식의 실제 계수

값을 실시간으로 추정된 후 추정 출력을 계산한다.

$$F_1 = K \cdot (\Delta x_1 + \Delta x_5) / 4 = f(\Delta x_1) + f(\Delta x_5) \quad (1)$$

다중 접점들의 역감적 상호작용을 위한 다중출력 추정기 모델을 제시한다. 추정 모델을 설계하기 위해서 다중 접점들의 반력이나 상관관계는 미지수일지라도 접점들의 위치 변화는 실시간으로 알 수 있다고 가정한다.

S개의 다중 접점을 갖는, p개의 자유도를 가진 동역학적 시스템 모델의 출력은 수식 (2)와 같이 표현된다. 이것은 p개의 입력, 단일출력(multi-input-single-output) 모델에 대한 것이며, 출력 수만큼 동일한 방법으로 모델화된다. 여기서 $u_p^S(k)$ 는 S번째 접점에서의 p번째 입력, $y(k)$ 는 동역학 모델로부터 계산된 실제 출력, 매개변수들의 계수 a_i 와 b_{jk}^l 은 미지의 값이며 추정대상이다. θ_0 는 입출력 변수들의 계수에 대한 실제 값들의 집합이다. 그래픽 모델의 갱신율은 JT 이며 헵틱 정보의 갱신율은 T 이다. 다음의 수식들에서는 기본 샘플링 주기 T 를 1로 가정한다.

$$A(z^{-J})y(k) = B_1^1(z^{-J})u_1^1(k) + \dots + B_p^1(z^{-J})u_p^1(k) + \dots + B_1^S(z^{-J})u_1^S(k) + \dots + B_p^S(z^{-J})u_p^S(k) \quad (2)$$

$$\text{where } A(z^{-J}) = 1 + \sum_{i=1}^n a_i z^{-iJ}$$

$$B_j^l(z^{-J}) = \sum_{k=0}^{m-1} b_{jk}^l z^{-kJ} \quad (j=1, 2, \dots, p, \quad l=1, 2, \dots, S)$$

다른 표현방법으로,

$$y(k) = \phi[k-J]^T \theta_0 \quad (3)$$

$$\text{where } \phi[k-J]^T = [-y(k-J) \dots -y(k-nJ)$$

$$u_1^1(k) \dots u_1^1(k-(m-1)J) \dots \\ \dots u_p^S(k) \dots u_p^S(k-(m-1)J)]$$

$$\theta_0 = [a_1 \dots a_n \quad b_{10}^1 \dots b_{1(m-1)}^1 \quad \dots \quad b_{p0}^S \dots b_{p(m-1)}^S]^T$$

따라서, 수식 (2)와 (3)의 시스템 모델과 등가적으로 모델화되는 추정 모델은 수식 (4)와 (5)로 표현된다. 계수 \hat{a}_i 와 \hat{b}_{jk}^l 는 각각 계수 a_i 와 b_{jk}^l 를 추정하기 위한 변수이며, $\hat{y}(k)$ 는 선행 모델 출력(priori model output)이며, $\bar{y}(k)$ 는 후행 모델 출력(posterior model output)이다.

$$\hat{A}(z^{-J})\bar{y}(k) = \hat{B}_1^1(z^{-J})u_1^1(k) + \dots + \hat{B}_p^1(z^{-J})u_p^1(k) + \dots + \hat{B}_1^S(z^{-J})u_1^S(k) + \dots + \hat{B}_p^S(z^{-J})u_p^S(k) \quad (4)$$

$$\text{where } \hat{A}(z^{-J}) = 1 + \sum_{i=1}^n \hat{a}_i z^{-iJ}$$

$$\hat{B}_j^l(z^{-J}) = \sum_{k=0}^{m-1} \hat{b}_{jk}^l z^{-kJ} \quad (j=1, 2, \dots, p, \quad l=1, 2, \dots, S)$$

다른 표현방법으로,

$$\hat{y}(k) = \bar{\phi}[k-J]^T \hat{\theta}(k-1) \quad (5)$$

$$\text{where } \bar{y}(k) = \bar{\phi}[k-J]^T \hat{\theta}(k)$$

$$\bar{\phi}[k-J]^T = [-\bar{y}(k-J) \dots -\bar{y}(k-nJ) \\ u_1^1(k) \dots u_1^1(k-(m-1)J) \dots \\ \dots u_p^S(k) \dots u_p^S(k-(m-1)J)]$$

$$\hat{\theta}(k-1) = [\hat{a}_1(k-1) \dots \hat{a}_n(k-1) \\ \hat{b}_{10}^1(k-1) \dots \hat{b}_{1(m-1)}^1(k-1) \\ \dots \hat{b}_{p0}^S(k-1) \dots \hat{b}_{p(m-1)}^S(k-1)]^T$$

변형체의 동역학적 모델과 그에 따른 추정모델, 최소자승법(least-squares method)과 출력 오차 모델을 통해서 입출력 변수의 계수를 실시간으로 추정한다. 계산시간 지연의 크기는 JT 이며, JT 주기만큼 선행하는 출력 추정은 수식 (6)과 같고, 추정오차는 수식 (7)과 같이 정의된다. 추정 계수를 갱신하는 알고리즘은 수식 (8)과 같고, 공분산(covariance) 행렬(P)의 갱신 알고리즘은 수식 (9)와 같다. 공분산(covariance) 행렬은 입출력들의 상관관계를 나타내며, 접점이 추가되거나 제거될 때마다 초기화를 시켜준다. $P(-J) = k_0 I$ 이고, $\hat{\theta}(0) = \text{arbitrary}$, k_0 는 임의의 양수, I 는 적당한 차수를 갖는 단위행렬이다.

망각인자(forgetting factor)인 λ 가 포함되어 있으며, 일반적으로 0.95에서 0.98사이의 값을 갖는다[17]. 망각인자는 변화하는 매개변수를 실시간으로 추정하기 위한 것이다. 또한 경험적으로 최적의 Lreset을 결정해야 하는 공분산 행렬의 초기화 알고리즘의 단점을 보완하기 위함이다.

$$\hat{y}(kJ+i) = \begin{cases} (JT - \text{sample outputs}) : i=0 \\ \bar{\phi}((k-1)J)^T \hat{\theta}((k-1)J) \\ (\text{inter-sample outputs}) : i=1, \dots, J-1 \\ \bar{\phi}((k-1)J+i)^T \hat{\theta}((k-1)J+i) \end{cases} \quad (6)$$

$$e(kJ) = y(kJ) - \bar{\phi}((k-1)J)^T \hat{\theta}(kJ-1) = y(kJ) - \hat{y}(kJ) \quad (7)$$

$$\hat{\theta}(kJ+i) = \begin{cases} \hat{\theta}[(k-1)J] \\ + \frac{P[(k-2)J] \bar{\phi}((k-1)J)}{\lambda + \bar{\phi}((k-1)J)^T P[(k-2)J] \bar{\phi}((k-1)J)} e(kJ) & i=0 \\ \hat{\theta}(kJ) & i=1, \dots, J-1 \end{cases} \quad (8)$$

$$P[(k-1)J] = \left[\frac{P[(k-2)J] - \frac{P[(k-2)J] \bar{\phi}((k-1)J) \bar{\phi}((k-1)J)^T P[(k-2)J]}{\lambda + \bar{\phi}((k-1)J)^T P[(k-2)J] \bar{\phi}((k-1)J)}}{\lambda} \right] \quad (9)$$

공분산 행렬의 초기화 알고리즘을 포함한 다중출력 추정법[13]을 수식 (2)와 (4)를 이용하여 다중 접점을 위한 모델로 전개할 수 있다. 이 모델은 접점 수가 증가함에 따라 추정해야 할 매개변수의 개수가 크게 증가하고, 그 계산량도 함께 증가한다. P개의 자유도를 갖는 한 개 접점에 대한 다중출력 추정법의 계산량은 $\{9(n+m \cdot p)^2 + 9(n+m \cdot p) + 5\} \cdot p$ 이며, 여기서 n 과 m 은 추정하고자 하는 출력과 입력의 차수이다. 따라서, p개의 자유도를 갖는, S개의 접점이

동시에 발생할 경우를 고려하면, 기존의 다중출력 추정법 [13]의 계산량은 $\{9(n+m \cdot p \cdot S)^2 + 9(n+m \cdot p \cdot S) + 5\} \cdot p \cdot S$ 가 된다. 그리고, p 개의 자유도를 갖는, S 개의 접점이 동시에 발생할 때 망각인자를 포함한 다중출력 추정법의 계산량은 $\{10(n+m \cdot p \cdot S)^2 + 9(n+m \cdot p \cdot S) + 5\} \cdot p \cdot S$ 로 다소 증가한다.

유한요소법을 이용한 모델의 경우, 어떤 접점 A에서의 x, y, z 축 방향의 위치 변화량들과 접점 A에서의 각 축별 반력들은, 응력-변형률의 법칙에 의해서 직접적인 상관관계를 갖는다. 따라서 단일 접점일 경우에는 위치 변화량과 반력사이의 정확한 관계를 추정하기 위해서 수식 (2)와 같이 시스템을 모델화하고 수식 (4)와 같이 추정모델을 설계한다. 그렇지만, 다중 접점들사이의 역감적 상호작용을 고려할 때, 어떤 접점 A에서의 축별 위치 변화량과 또 다른 접점 B에서의 축별 반력과의 상관관계는 접점 A와 B 사이의 절점들을 거치면서 서서히 작아진다. 특히, 접점 A에서의 입력 방향과 접점 B에서의 출력 방향이 직각을 이룰 때, 그 상관관계는 현저히 작아진다. 이러한 성질을 이용하여 시스템 모델과 추정 모델을 수정하면 추정해야 할 매개변수의 개수를 감소시킬 수 있고, 또한 다중출력 추정법의 계산량을 줄일 수 있다.

다음의 수식 (10)-(13)은 출력 추정법의 계산량을 줄인 시스템 모델과 그 추정 모델이다. 이것은 p 개의 입력, 단일출력 (multi-input-single-output) 모델에 대한 것이며, 출력 수만큼 동일한 방법으로 모델화된다. 다음의 모델은 동일 자유도 방향에 대해서만 다른 접점들의 상호작용을 고려한 것이다. $y_1^l(k)$ 는 접점 1에서의 자유도 1번 방향으로의 출력이고, $u_1^s(k)$ 는 접점 S 에서의 자유도 1번 방향의 입력이다.

$$A(z^{-J})y_1^l(k) = B_1^l(z^{-J})u_1^l(k) + \dots + B_p^l(z^{-J})u_p^l(k) + B_1^s(z^{-J})u_1^s(k) + \dots + B_S^s(z^{-J})u_S^s(k) \quad (10)$$

$$\text{where } A(z^{-J}) = 1 + \sum_{i=1}^n a_i z^{-iJ}$$

$$B_j^l(z^{-J}) = \sum_{k=0}^{m-1} b_{jk}^l z^{-kJ} \quad (j=1, 2, \dots, p, l=1, 2, \dots, S)$$

다른 표현방법으로,

$$y_1^l(k) = \phi[k-J]^T \theta_0 \quad (11)$$

$$\text{where } \phi[k-J]^T = [-y_1^l(k-J) \dots -y_1^l(k-nJ) u_1^l(k) \dots u_1^l(k-(m-1)J) \dots \dots u_1^s(k) \dots u_1^s(k-(m-1)J)]$$

$$\theta_0 = [a_1 \dots a_n \quad b_{10}^1 \dots b_{1(m-1)}^1 \quad \dots \quad b_{10}^S \dots b_{1(m-1)}^S]^T$$

수식 (10)와 (11)의 시스템 모델과 등가적으로 모델화되는 추정 모델은 수식 (12)와 (13)이 설계된다.

$$\hat{A}(z^{-J})\bar{y}_1^l(k) = \hat{B}_1^l(z^{-J})u_1^l(k) + \dots + \hat{B}_p^l(z^{-J})u_p^l(k) + \hat{B}_1^s(z^{-J})u_1^s(k) + \dots + \hat{B}_S^s(z^{-J})u_S^s(k) \quad (12)$$

$$\text{where } \hat{A}(z^{-J}) = 1 + \sum_{i=1}^n \hat{a}_i z^{-iJ}$$

$$\hat{B}_j^l(z^{-J}) = \sum_{k=0}^{m-1} \hat{b}_{jk}^l z^{-kJ} \quad (j=1, 2, \dots, p, l=1, 2, \dots, S)$$

다른 표현방법으로,

$$\hat{y}_1^l(k) = \bar{\phi}[k-J]^T \hat{\theta}(k-1) \quad (13)$$

$$\text{where } \bar{y}_1^l(k) = \bar{\phi}[k-J]^T \hat{\theta}(k)$$

$$\bar{\phi}[k-J]^T = [-\bar{y}_1^l(k-J) \dots -\bar{y}_1^l(k-nJ)$$

$$u_1^l(k) \dots u_1^l(k-(m-1)J) \dots$$

$$\dots u_1^s(k) \dots u_1^s(k-(m-1)J)]$$

$$\hat{\theta}(k-1) = [\hat{a}_1(k-1) \dots \hat{a}_n(k-1)$$

$$\hat{b}_{10}^1(k-1) \dots \hat{b}_{1(m-1)}^1(k-1) \dots$$

$$\dots \hat{b}_{10}^S(k-1) \dots \hat{b}_{1(m-1)}^S(k-1)]^T$$

출력 추정법의 계산량을 감소시키기 위해서 제시된 수식 (10)의 시스템 모델과 수식 (12)의 추정 모델을 수식 (6)-(9)의 알고리즘에 적용한다. 출력 추정법의 계산량은 수식 (12)의 추정 모델을 기준으로 $\{10(n+m \cdot p + m \cdot (S-1))^2 + 9(n+m \cdot p + m \cdot (S-1)) + 5\} \cdot p \cdot S$ 이 된다. 접점 수의 증가에 따라 출력 추정법의 계산량이 얼마나 감소되는 지가 표 1에서 제시된다. 표 1에서의 값은 실수형 변수를 기준으로 모든 접점들의, 모든 자유도의 추정 출력들을 계산하기 위해 필요한 연산회수를 의미한다. 여기서 동역학 모델의 자유도, p 는 3, 추정 매개변수 n 은 0, m 은 2로 가정하며, 이것은 실제 시뮬레이션에서 사용한 추정 매개변수의 개수이다.

출력 추정법 (A)는 Lee[13]가 개발한 공분산 행렬의 초기화 알고리즘을 포함한 다중출력 추정법으로 다중 접점들의 상호작용을 위해 수식 (2)와 (4)를 이용하여 전개된 모델이다. 출력 추정법 (B)는 수식 (2)-(5)를 이용한, 망각인자를

표 1. 접점 수 증가에 따른 출력 추정법의 계산량 증가.

Table 1. Relation between computational load and the number of contact points.

추정모델 접점수	공분산 초기화를 통한 출력 추정법 (A) [13]	망각인자를 이용한 출력 추정법 (B)	축소된 계산량의 출력 추정법 (C)
1	1149	1257	1257
2	8454	9318	4302
3	27747	30663	9855
4	64860	71772	18636
5	125625	139125	31365
6	215874	239202	48762
7	341439	378483	71547
8	508152	563448	100440
9	721845	800577	136161
10	966350	1096350	179430

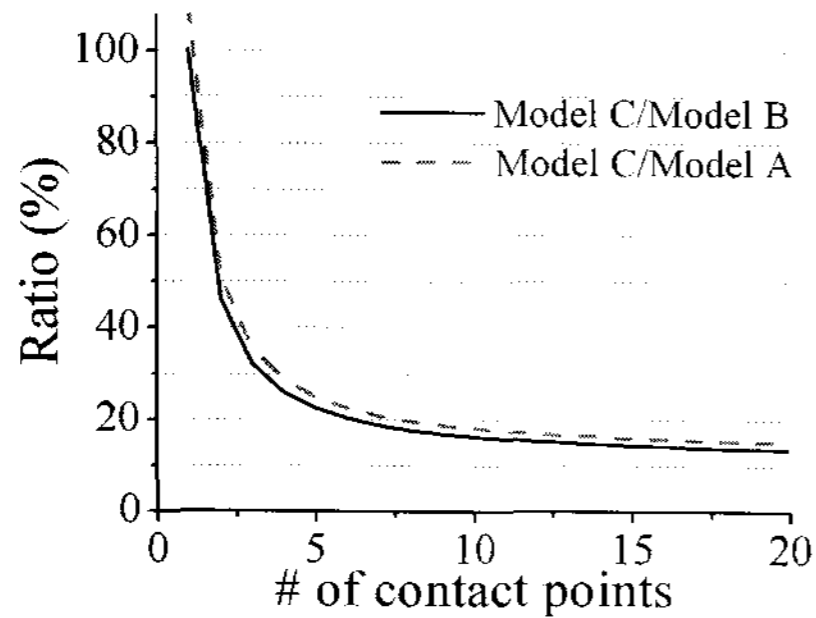


그림 3. 접점 수 증가에 따른 출력 추정법들의 계산량 비교.
Fig. 3. Comparison of the computational load of output estimators.

포함한 다중을 출력 추정법이고, 출력 추정법 (C)는 수식 (10)-(13)을 이용하고, 감소된 매개변수와 망각인자를 포함한 다중을 출력 추정법이다. 그림 3은 다중을 출력 추정법 (C)와 다른 2개 출력 추정법들 사이의 접점 수 증가에 따른 계산량의 상대적 비율을 나타낸 것이다. 실선은 출력 추정법 (B)와 출력 추정법 (C)의 계산량을 비교한 것이고, 점선은 출력 추정법 (A)와 출력 추정법 (C)의 계산량을 비교한 것이다. 접점 수가 증가함에 따라 계산량의 감소율은 점점 커진다. 접점 수가 10개일 때, 축소된 매개변수를 가진 출력 추정법의 계산량은 출력 추정법 (A)의 계산량의 18%, 출력 추정법 (B)의 계산량의 16% 크기로 줄어든다.

III. 시뮬레이션 및 성능 비교

축소된 매개변수와 망각인자를 이용한 다중을 출력 추정법의 성능을 평가한다. 그 성능은 공분산 행렬의 초기화 알고리즘을 이용하는 다중을 출력 추정법[13]과 비교된다. 시뮬레이션에 사용된 유한요소법을 이용한 변형체 모델은 그림 4와 같으며, 3차원의 3자유도를 갖는 텐서-질량 모델이다. 이 모델은 125개의 절점과 384개의 사면체로 구성된 직육면체 형태의 연속체모델이다. 하나의 입방체는 6개의 사면체로 구성되어 있으며, 바닥 면의 최외곽 10개점이 고정점이다. 모델에서 사용된 영률은 25300N/m^2 이고, 푸아송(Poisson)의 비율은 0.3이다. 그림 4(b)와 같이 변형체 모델은 변형이 일어나는 도중에 절단으로 인한 기하학적인 변화가 발생한다. 그래픽 렌더링은 25Hz 로, 햅틱 렌더링은 1kHz 이다. 그리고 계산 시간 지연은 40ms 로 가정한다. 접점 수는 그림 4(a)와 같이 2개이다. 햅틱 장치인 PHANTOM 1.5와 제시된 텐서-질량 모델을 이용해서 접점 contact-pt2에서의 무작위 운동(random motion)에 대한 데이터를 기록한다. 두 접점 사이의 역감적 상호작용을 구현하기 위해서 contact-pt2는 기록된 운동 데이터를 통해 실시간으로 움직이고, 동시에 contact-pt1은 PHANTOM 1.5를 통해 사용자가 무작위 운동한다. 다중을 출력 추정법을 통해 1kHz 의 입력에 대한 역감을 실시간으로 계산하고, PHANTOM을 통해 사용자에게 역감을 전달한다. 시뮬레이션 결과를 통해 contact-pt1에서의 실제 반력과 추정 반력을 비교하며, 다중을 출력 추정법의 성능을 비교 분석한다.

시뮬레이션을 통해서 상호작용적 다중 접점의 고려 여부에 따른 성능 비교, 공분산 행렬의 초기화 알고리즘과 망각인자 사용에 따른 성능 비교, 그리고 모든 입출력을 고려한 모델과 감소된 입출력만을 고려한 모델 사용에 따른 성능 비

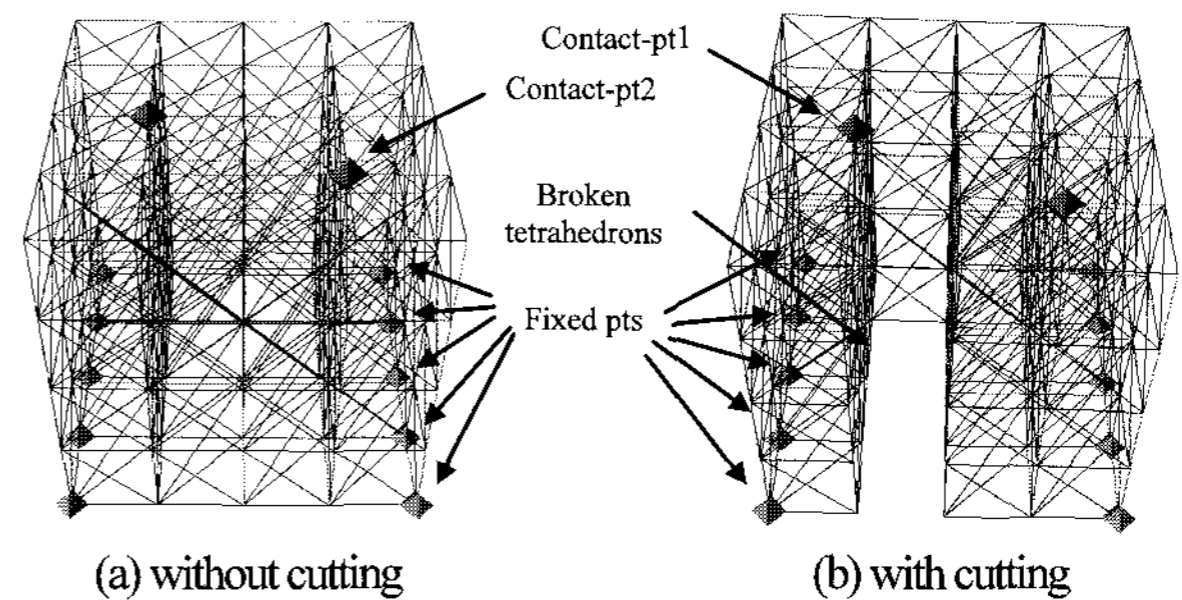


그림 4. 접점 2개를 가진 텐서-질량 모델.

Fig. 4. Tensor-mass model with two contact points.

교를 수행한다. 따라서 다음의 5가지 종류의 다중을 출력 추정법들이 설계되고, 그 성능들을 서로 비교한다. 그리고 접점 자체의 운동 여부와 동역학적 모델의 절단 여부를 조합하여 시뮬레이션 환경이 정해진다.

1. MSCP(Model for Single Contact Point) [13]

다중 접점의 역감적 상호작용을 고려하지 않고, 자신의 입력 변화에 대한 출력관계만을 고려한 경우로, 공분산 행렬의 초기화 알고리즘을 포함한 모델이다. x축 방향의 반력에 대한 추정 모델, $\bar{F}_x(k)_{cp1}$ 은 수식 (14)와 같이 정의된다. 나머지 y축과 z축 방향의 반력에 대한 추정모델도 동등한 방식으로 모델화된다. 여기서 $\Delta x(k)_{cp1}$, $\Delta y(k)_{cp1}$, $\Delta z(k)_{cp1}$ 은 각각 contact-pt1에서의 x, y, z축 방향의 위치 변화량을 의미한다.

$$\bar{F}_x(k)_{cp1} = (\hat{b}_{10} + \hat{b}_{11}z^{-JT})\Delta x(k)_{cp1} + (\hat{b}_{20} + \hat{b}_{21}z^{-JT})\Delta y(k)_{cp1} + (\hat{b}_{30} + \hat{b}_{31}z^{-JT})\Delta z(k)_{cp1} \quad (14)$$

2. MMCP(PR)(Model for Multiple Contact Points, with P-matrix Resetting)

접점들의 역감적 상호작용과 모든 입력들을 고려한 모델이다. 수식 (2)-(5)의 모델을 이용하고 공분산 행렬의 초기화 알고리즘을 포함한 모델이다. 다중 접점들의 상호작용 구현을 위해 Lee[13]가 제시한 출력 추정법에서 추정 모델만 수식 (2)-(5)로 수정한 모델이다. x축 방향의 반력에 대한 추정모델, $\bar{F}_x(k)_{cp1}$ 은 수식 (15)와 같이 정의된다. 여기서 $\Delta x(k)_{cp2}$, $\Delta y(k)_{cp2}$, $\Delta z(k)_{cp2}$ 은 각각 contact-pt2에서의 x, y, z축 방향의 위치 변화량을 의미한다. 제시된 텐서-질량 모델에 대해서는 Lreset이 0.8일 때 최소 오차를 가진다.

$$\bar{F}_x(k)_{cp1} = (\hat{b}_{10} + \hat{b}_{11}z^{-JT})\Delta x(k)_{cp1} + (\hat{b}_{20} + \hat{b}_{21}z^{-JT})\Delta y(k)_{cp1} + (\hat{b}_{30} + \hat{b}_{31}z^{-JT})\Delta z(k)_{cp1} + (\hat{b}_{40} + \hat{b}_{41}z^{-JT})\Delta x(k)_{cp2} + (\hat{b}_{50} + \hat{b}_{51}z^{-JT})\Delta y(k)_{cp2} + (\hat{b}_{60} + \hat{b}_{61}z^{-JT})\Delta z(k)_{cp2} \quad (15)$$

3. MMCP(FF)(Model for Multiple Contact Points, with Forgetting Factor)

수식 (2)-(5)의 모델을 이용하고, 망각인자(forgetting factor)를 포함한 모델이며 수식 (6)-(9)의 추정 알고리즘을 이용한다. 추정모델은 MMCP(PR)과 동일하다. 망각인자(forgetting factor)인 λ 는 0.95이다.

4. RMMCP(PR)(Reduced Model for Multiple Contact Points, with P-matrix Resetting)

수식 (10)~(13)의 모델을 이용하여 접점들의 역감적 상호작용을 고려한 추정 모델이다. 공분산 행렬의 초기화 알고리즘을 포함한 모델이며, Lee[13]가 제시한 출력 추정법에서 추정 모델만 수식 (10)~(13)로 개선한 모델이다. 실시간 추정 출력 계산을 위해 감소된 매개변수를 이용하는 모델이다. X축 방향의 반력에 대한 추정모델, $\bar{F}_x(k)_{cp1}$ 은 수식 (16)와 같이 정의된다. 나머지 y축과 z축 방향의 반력에 대한 추정모델도 수식 (16)과 동등한 방식으로 모델화된다. Lreset은 0.8이다.

$$\bar{F}_x(k)_{cp1} = (\hat{b}_{10} + \hat{b}_{11}z^{-JT})\Delta x(k)_{cp1} + (\hat{b}_{20} + \hat{b}_{21}z^{-JT})\Delta y(k)_{cp1} + (\hat{b}_{30} + \hat{b}_{31}z^{-JT})\Delta z(k)_{cp1} + (\hat{b}_{40} + \hat{b}_{41}z^{-JT})\Delta x(k)_{cp2} \quad (16)$$

5. RMMCP(FF)(Reduced Model for Multiple Contact Points, with Forgetting Factor)

수식 (10)~(13)의 모델을 이용하여 접점들의 역감적 상호작용을 고려한 추정 모델이며, 수식 (6)~(9)의 추정 알고리즘을 이용한다. 감소된 매개변수와 망각인자를 이용한다. 망각인자인 λ 는 0.95이다. 추정 모델은 RMMCP(PR)과 동일하다.

표 2는 그림 4(a)와 같이 제시된 텐서-질량 모델의 기하학적 변화가 없을 때, 즉 절단이 없을 때 접점 contact-pt2로부터 생성된 반력이 접점 contact-pt1에 전달될 때의 다중을 출력 추정 모델별 추정오차를 나타낸 것이다. 표 2에서 접점 contact-pt1의 위치는 거의 변하지 않는다. 따라서 자신의 위치 변화량에 의해 생성된 반력은 매우 작으며, 접점 contact-pt2의 위치 변화량에 의해 생성되어 contact-pt1에 전달된 반력을 느끼게 된다. 그림 5는 이 때의 contact-pt1에서 느껴지는 x, y, z축에 대한 반력들이다. 표 2의 결과를 살펴보면, 모든 접점들의 입력들을 고려한 추정 모델들, MMCP(PR)과 MMCP(FF)은 MSCP 모델보다 약 1/50배만큼 추정오차가 감소된다. 그리고 계산량을 축소한 모델들, RMMCP(PR)과 RMMCP(FF)은 MSCP 모델보다 약 1/8배~1/2배만큼 추정오차가 감소된다. 망각인자를 사용한 모델들은 공분산 행렬의 초기화 알고리즘을 사용한 모델보다 약 1/3~6/5배만큼 평균 추정오차가 감소 혹은 증가한다. 그러나 평균 추정오차들의 최대 차이가 0.02 N보다 작다. 따라서 그 성능 차이는 없다. 감

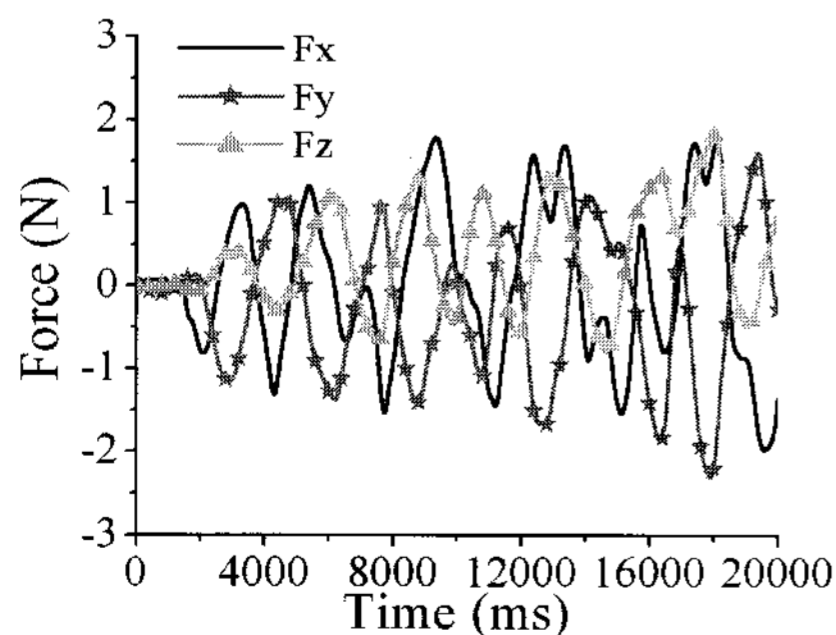


그림 5. 접점 contact-pt2로부터 전달된 contact-pt1에 전달되는 반력들.

Fig. 5. Reflective forces at contact-pt1 that are transferred from contact-pt2.

소된 매개변수를 사용한 모델은 모든 입출력 변수를 고려한 모델보다 약 4-20배만큼 평균 추정오차가 증가한다. 그렇지만, 이 경우 평균 추정오차들의 최대 차이가 0.08N보다 작다. 따라서 그 성능에는 큰 차이가 없으며, 제안된 추정기들은 동역학적 모델로부터 반력을 계산한 것처럼 실시간으로 반력을 재현한다.

표 3과 표 4는 그림 4(b)와 같이 시뮬레이션 도중 절단이 일어나는 경우이다. 그리고 표 3의 시뮬레이션 환경은 절단이 발생한다는 점을 제외하고는 표 2의 경우와 동일하다. 표 3은 접점 contact-pt2의 위치 변화량에 의해 생성되어 contact-pt1에 전달된 반력에 대한 다중을 출력 추정법의 추정오차이다. 이 때, 접점 contact-pt1에서의 움직임은 거의 없으며, 그

표 2. 변형체의 절단이 없을 때, 접점 contact-pt2로부터 접점 Contact-pt1에 전달된 반력에 대한 추정오차.

Table 2. Estimation errors for the reflective force at the Contact-pt1 that is transferred from the Contact-pt2 when there are no cuts.

추정모델들	$\frac{1}{N} \sum_i e_i $ (Newton); N=10000		
	Fx	Fy	Fz
(1) MSCP [13]	0.317	0.183	0.145
(2) MMCP(PR)	0.011	0.007	0.009
(3) MMCP(FF)	0.004	0.004	0.004
(4) RMMCP(PR)	0.043	0.067	0.059
(5) RMMCP(FF)	0.045	0.083	0.079

표 3. 접점 contact-pt2로부터 접점 contact-pt1에 전달된 반력에 대한 추정오차.

Table 3. Estimation errors for the reflective force at the contact-pt1 that is transferred from the contact-pt2.

추정모델들	$\frac{1}{N} \sum_i e_i $ (Newton); N=10000		
	Fx	Fy	Fz
(1) MSCP [13]	0.317	0.271	0.205
(2) MMCP(PR)	0.012	0.009	0.008
(3) MMCP(FF)	0.028	0.017	0.015
(4) RMMCP(PR)	0.044	0.068	0.064
(5) RMMCP(FF)	0.059	0.077	0.076

표 4. 두 접점들이 무작위 운동할 경우의 추정오차 비교.

Table 4. Comparison of estimation errors when two contact points move randomly.

추정모델들	$\frac{1}{N} \sum_i e_i $ (Newton); N=10000		
	Fx	Fy	Fz
(1) MSCP [13]	0.125	0.133	0.076
(2) MMCP(PR)	0.058	0.046	0.040
(3) MMCP(FF)	0.086	0.048	0.042
(4) RMMCP(PR)	0.047	0.060	0.049
(5) RMMCP(FF)	0.126	0.086	0.108

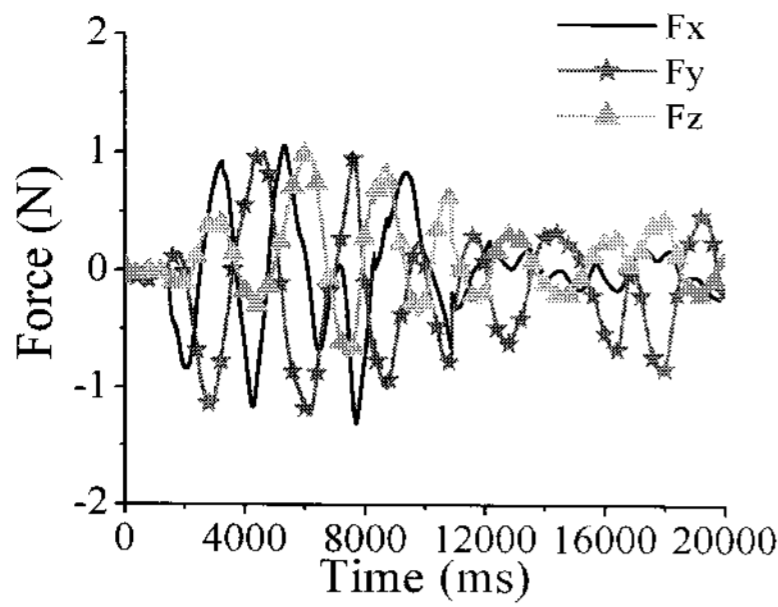


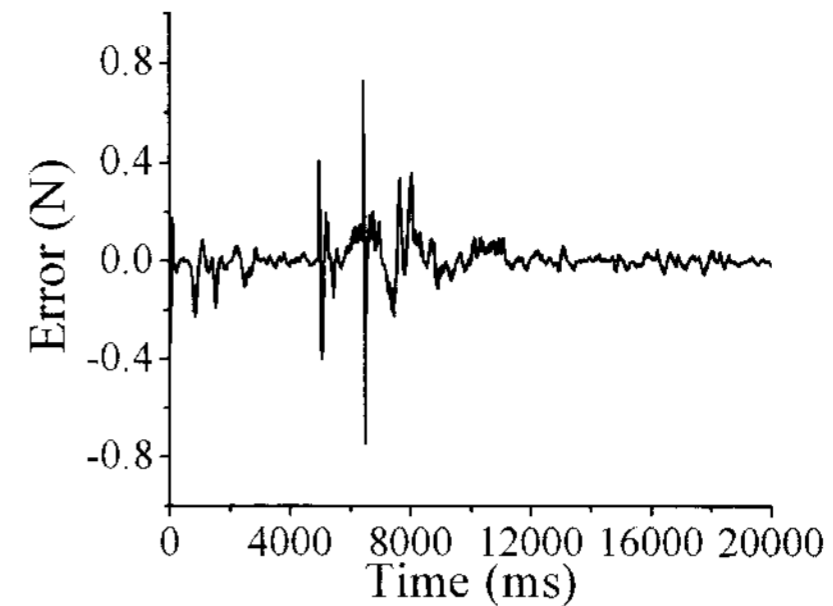
그림 6. 접점 contact-pt2로부터 전달된 contact-pt1에 전달되는 반력들.

Fig. 6. Reflective forces at contact-pt1 that are transferred from contact-pt2.

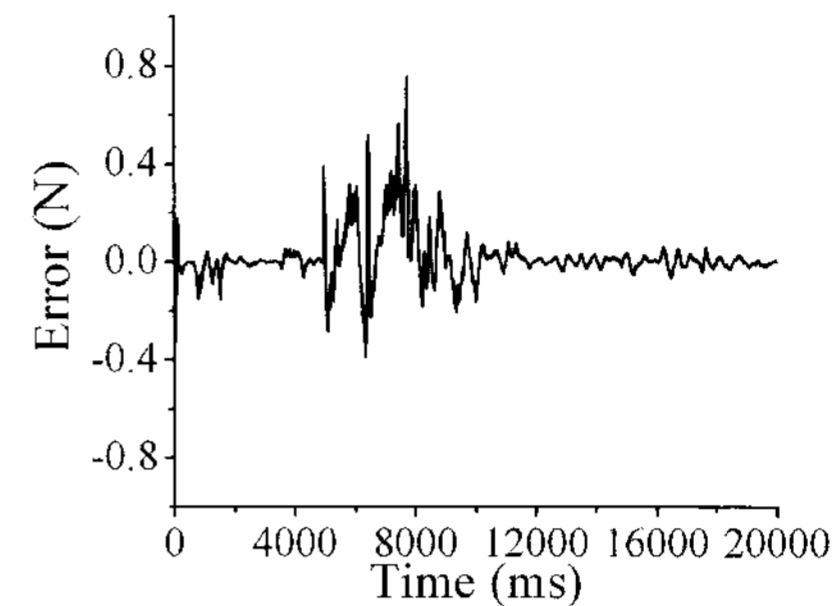
반력의 크기는 그림 6과 같다. 그림 5와는 달리 약 10초 이후부터 반력의 크기가 줄어든다. 그 이유는 텐서-질량 모델의 절단으로 인하여 두 접점 사이의 상호작용이 약화되었기 때문이다. 표 4의 시뮬레이션 환경은 두 개 접점들이 동시에 무작위 운동을 하면서 절단이 발생하는 경우이다. 따라서 접점 contact-pt1에서 느껴지는 반력은 자신의 변형에 따른 반력과 접점 contact-pt2로부터 전달되어온 반력의 합이 된다.

표 3의 결과를 살펴보면, 모든 접점들의 입력들을 고려한 추정 모델들, MMCP(PR)과 MMCP(FF)은 MSCP 모델보다 약 1/11배~1/30배만큼 추정오차가 감소한다. 그리고 이 모델들은 계산량을 축소한 모델들, RMMCP(PR)과 RMMCP(FF)보다 약 1/9배~2/3배만큼 추정오차가 감소한다. 표 3에서 보는 바와 같이 접점들의 역감적 상호작용을 고려하지 않은 추정 모델 MSCP의 경우에는 자신의 입력 변화가 거의 없을 때 다른 접점들로부터의 역감적 상호작용을 제대로 추정하지 못한다. 그렇지만, 표 4에서 보는 바와 같이 자신의 입력에 대한 출력과 다른 접점들의 상호작용이 혼합된 경우에는 표 3의 결과보다 약 2/5배만큼 추정오차가 감소한다. 그 이유는 입력과 출력의 상관관계가 더욱 분명해지고, 추정오차를 최소화하도록 추정 매개변수를 유연하게 결정할 수 있기 때문이다.

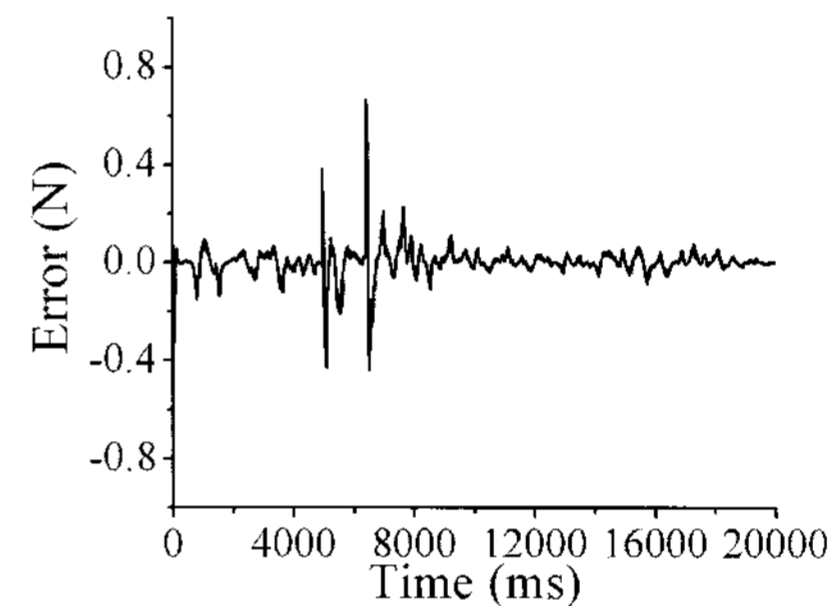
공분산 행렬의 초기화 알고리즘을 포함한 추정 모델은 망각인자를 포함한 추정 모델과 비슷한 성능을 보인다. 다중 접점들의 역감적 상호작용을 고려한 모델들이, 표 3의 경우보다 표 4의 경우에서 그 추정오차가 더 커지는데, 그 이유는 시뮬레이션 도중 텐서-질량 모델이 그림 4(b)와 같이 변형체가 절단되면서 입출력 관계가 급격히 변하기 때문이다. 텐서-질량 모델은 시뮬레이션 시작 후 5.8초부터 10.0초까지 단계적으로 그림 4(b)와 같이 잘려나간다. 표 3의 경우에는 contact-pt1의 입력 변화가 거의 없기 때문에 입출력 관계 변화가 단순하지만, 표 4의 경우는 텐서-질량 모델의 절단 때문에 잘려나가는 순간마다 contact-pt1의 입출력 관계도 변하고 동시에 contact-pt2에 의한 contact-pt1의 역감적 상관 관계도 변하게 된다. 변하는 입출력 관계를 추정하는 과정에서 일시적으로 추정오차가 커지게 되고, 그 때문에 전체적인 평균 오차가 커진 것이다. 감소된 매개변수와 망각인자를 포함한 경우, 절단이 진행 중인 짧은 시간 동안 평균 추정오차가 약 0.18N 정도로 커지지만, 절단이 끝난 후에는 평균 추정오차



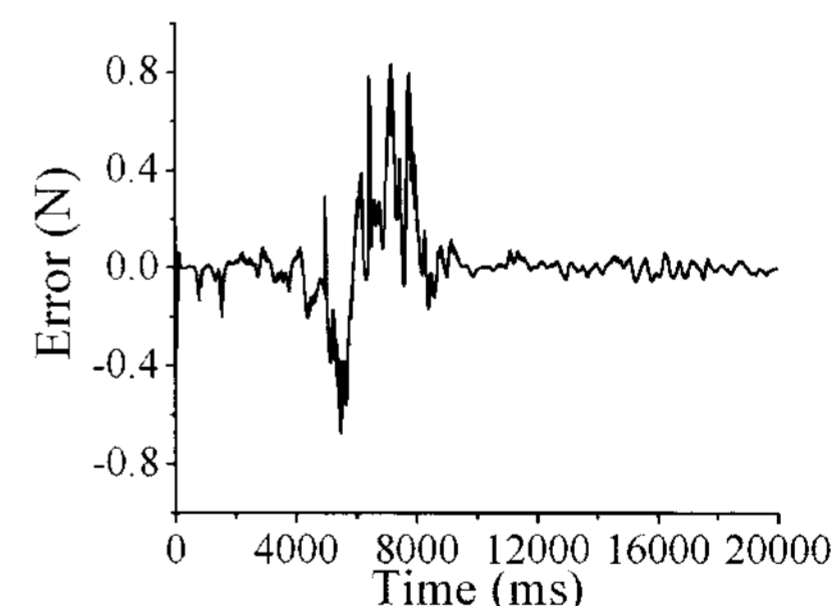
(a) MMCP(PR)



(b) MMCP(FF)



(c) RMMCP(PR)



(d) RMMCP(FF)

그림 7. 표 4에서 반력 Fx에 대한 추정오차.

Fig. 7. Estimation error over time for the reflective force Fx in TABLE 4.

가 약 0.018N 정도로 빠르게 줄어든다. 감소된 매개변수와 최적의 Lreset을 포함한 추정법의 경우, 평균 추정오차가 절단이 진행 중에는 약 0.06N, 절단 후에는 약 0.016N이다.

그림 7은 표 4의 4개의 추정모델들, MMCP(PR), MMCP(FF), RMMCP(PR), RMMCP(FF)을 이용할 때 x축 방향의 반력에 대한 추정오차를 비교한 것이다. 절단이 발생하기 전에는 추정오차가 작고, 절단이 진행되는 도중에 오차가 크게 발생하다가 다시 추정오차가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림 7을

살펴보면, 최적의 L_{reset} 을 가진 MMCP(PR) 또는 RMMCP(PR)이 모델 절단과정에서 발생하는 입출력 관계 변화에 비교적 빠르게 적응하고, 실제 출력도 작은 오차로 추정하는 것을 알 수 있다.

힘 크기의 변화를 구별할 수 있는 사람의 능력은 사람에 의해서 생성되는 힘 또는 햅틱 장치를 통해서 피드백 되는 힘과 함수 관계를 갖는다. 다시 말해서, 0.5N~200N 사이에서 사람이 힘 크기의 차이를 구별할 수 있는 임계값(differential threshold)은 평균 7~10%이며[18], 움직임 경우에는 평균 14%이다[19]. 힘의 크기가 0.5N보다 작은 경우, 힘 크기의 차이에 대한 사람의 구별 능력은 저하되어 평균 15~27%의 임계값을 보여준다[18]. 햅틱 렌더링은 사람의 감각적인 측면도 중요하기 때문에 이러한 JND(Just Noticeable Difference)의 측면에서 추정기의 성능을 검토하였다.

표 4의 실험 결과에 따르면, 두 개의 접점들이 무작위 운동을 하면서 절단이 발생하는 경우에 대해 사람이 FEM 모델로부터 계산된 힘과 추정모델로부터 계산된 힘의 차이를 구별할 수 있는지를 JND측면에서 분석했다. 힘의 크기 0.5N~200N 사이에서는 10%의 임계값을, 0.5N보다 작은 힘의 경우에는 25%의 임계값을 사용했다. 실험 데이터 전체의 개수에 대해서 힘 차이를 구별할 수 없는 데이터 개수의 비율로 분석 결과를 제시했다. 표 5는 절단과정을 포함한 실험 전체 데이터에 대한 결과이고, 표 6은 절단이 끝난 이후의 실험 데이터에 대한 결과다.

표 5의 결과를 보면, 추정기 모델에 따라서 사람은 전체 데이터 중에서 8~37% 정도의 데이터에 대해 힘의 차이를 구별할 수 있는 것으로 나타났다. 이것은 절단이 진행 중일 때 FEM 모델특성이 변하게 되고, 따라서 추정 오차가 다소 크게 발생하기 때문이다. 따라서 사람도 FEM 모델로부터 계산된 힘과 추정기로부터 계산된 힘의 차이를 구별할 수 있게

표 5. 두 접점들이 무작위 운동하는 경우: 전체 데이터에 대한 JND 분석결과.

Table 5. JND analysis for force when two contact points move randomly.

	Fx	Fy	Fz
(1)MSCP [13]	77.3 %	62.0 %	81.6 %
(2)MMCP(PR)	86.1 %	91.9 %	90.0 %
(3)MMCP(FF)	79.3 %	91.0 %	88.6 %
(4)RMMCP(PR)	88.7 %	85.7 %	86.1 %
(5)RMMCP(FF)	80.5 %	68.7 %	63.0 %

표 6. 두 접점들이 무작위 운동하는 경우: 절단이후 데이터에 대한 JND 분석결과.

Table 6. JND analysis for force when two contact points move randomly after cutting.

	Fx	Fy	Fz
(1)MSCP [13]	92.0 %	75.4 %	97.6 %
(2)MMCP(PR)	97.6 %	99.7 %	100.0 %
(3)MMCP(FF)	95.1 %	100.0 %	100.0 %
(4)RMMCP(PR)	96.3 %	95.6 %	98.5 %
(5)RMMCP(FF)	94.7 %	75.6 %	82.3 %

된 것이다. 그렇지만, 표 6과 같이 절단이 끝난 이후에는 추정기가 FEM 모델로부터 계산된 값을 비교적 작은 오차범위에서 추적한다. 따라서 추정기 모델에 따라 사람이 그 힘의 차이를 전혀 구별할 수 없는 것으로 분석되었다. 특히 L_{reset} 을 포함한 계산량 축소 모델의 경우에는 전체 데이터의 95% 이상에 대해서 사람이 FEM 모델로부터 계산된 힘처럼 느낄 수 있는 것으로 분석되었다.

IV. 결론

다중 접점들의 역감적 상호작용을 실시간으로 구현하기 위해서 감소된 매개변수와 망각인자(forgetting factor)를 이용하는 다중출력 추정법에 기초한 실시간 햅틱 렌더링 방법을 제안한다.

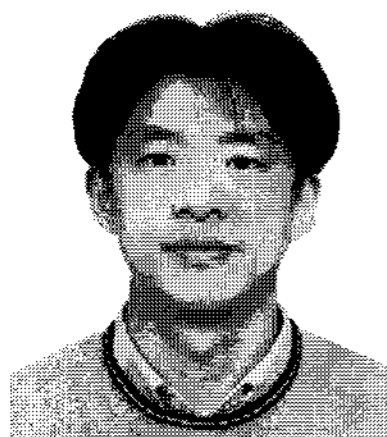
동역학적 모델의 기하학적 변화가 없을 경우, 감소된 계산량을 가진 다중 접점을 위한 다중출력 추정법은 기존의 접점별 독립 모델(MSCP)보다 약 1/7배-1/2배만큼 추정오차가 줄어들었다. 그리고 망각인자를 이용한 추정법은 공분산(covariance) 행렬의 초기화 알고리즘을 이용한 추정법보다 약 1/3배-6/5배만큼 추정오차가 발생하였다. 그러나, 두 추정법의 평균오차의 차이가 0.02N보다 작다는 점을 감안하면 그 성능에는 큰 차이가 없다. 또한 동역학적 모델의 기하학적 변화가 생길 때에도 망각인자를 사용한 모델과 공분산 행렬의 초기화 알고리즘을 사용한 모델의 성능은 거의 같았다. 따라서 최적의 L_{reset} 를 경험적으로 결정해야 하는 단점을 망각인자를 이용하여 보완할 수 있다. 망각인자를 포함한 다중출력 추정법은 변형체 모델의 급격한 절단과정에서 발생하는 접점 자체의 입출력 관계 변화, 그리고 다중 접점들 사이의 상관관계 변화 때문에 추정 매개변수의 변화 폭이 커지면서 추정오차가 순간적으로 커지기도 한다. 감소된 매개변수와 망각인자를 포함한 경우, 절단이 진행 중인 짧은 시간 동안 평균 추정오차가 약 0.18N 정도로 커지지만, 절단이 끝난 후에는 평균 추정오차가 약 0.018N 정도로 빠르게 줄어들었다. 감소된 매개변수와 최적의 L_{reset} 을 포함한 추정법의 경우, 평균 추정오차가 절단이 진행 중에는 약 0.06N, 절단 이후에는 약 0.016N이었다. JMD의 측면에서 볼 때, 감소된 매개변수와 최적의 L_{reset} 을 포함한 추정법을 이용하면, 모델 절단 이후 힘 정보의 95% 이상에 대해서 사람은 FEM 모델로부터 계산된 반력과 추정기로부터 계산된 반력을 구별하지 못하는 것으로 분석되었다. 다시 말해서 감소된 매개변수와 최적의 L_{reset} 을 포함한 추정법을 통해 사람은 마치 FEM 모델로부터 계산된 반력을 실시간으로 피드백받는 것처럼 느낀다는 것이다.

모든 접점들의 입력을 고려한 다중출력 추정법의 추정오차는 변형체 모델의 기하학적 변화가 있음에도 불구하고 약 0.09N보다 작았다. 그렇지만, 접점 수가 증가함에 따라 출력의 계산량이 급격히 커지게 된다. 이에 실시간 계산을 위해서 계산량을 감소시킬 수 있는, 감소된 매개변수를 가진 다중출력 추정 모델이 제시되었다. 계산량의 감소율은 접점 수가 증가함에 따라서 점차 커지며, 접점이 10개일 경우에는 계산량 축소 전 모델의 약 17% 크기로 계산량을 줄일 수 있었다. 그러나 동역학적 모델의 기하학적 변화가 생길 때 추정오차가 계산량 축소 전 모델보다 약 1.5배~9배만큼

증가하였다. 그렇지만 감소된 계산량을 가진 출력 추정기의 평균 추정오차의 크기가 0.1N보다 작다는 점을 고려하면, 1kHz로 물리적 법칙에 근거한 동역학적 모델로부터 반력을 계산한 것처럼 현실적인 반력을 사용자에게 전달해줄 수 있다. 변형체 모델의 기하학적 변형이 생기더라도 제시된 방법은, 마치 변형체 모델을 통해 계산된 것처럼 다중 접점들의 역감적 상호작용을 사용자에게 실시간으로 제공한다.

참고문헌

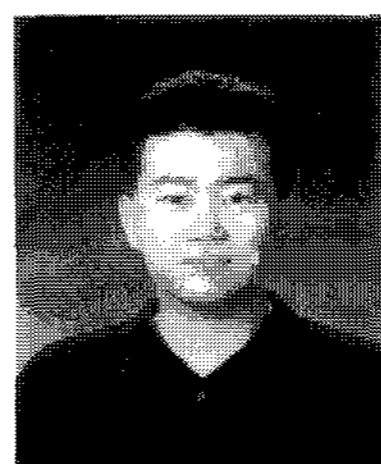
- [1] 이경노, 이두용, "자전거 시뮬레이터에서 블록 시간을 최소화하기 위한 통신 프로토콜의 설계," 제어 자동화 시스템공학 논문지, vol. 6, no. 12, pp. 1099-1105, 2000.
- [2] 이문환, 이두용, "안정된 햅틱 인터페이스를 위한 비선형 가상커플링," 제어 자동화 시스템공학 논문지, vol. 9, no. 8, pp. 610-615, 2003.
- [3] W. Chou and T. Wang, "Human-computer interactive simulation for the training of minimally invasive neurosurgery," in *Proc. IEEE Int. Conf. SMC*, vol. 2, 5-8 Oct. 2003, pp. 1110-1115.
- [4] C. Basdogan, C.-H. Ho, and M. A. Srinivasan, "Virtual environments for medical training: graphical and haptic simulation of laparoscopic common bile duct exploration," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 6, issue 3, pp. 269-285, Sept. 2001.
- [5] S. Y. Yi, H. S. Woo, W. J. Ahn, J. Y. Kwon, and D. Y. Lee, "New colonoscopy simulator with improved haptic fidelity," *Advanced Robotics*, vol. 20, no. 3, pp. 349-365, 2006.
- [6] H. Delingette, "Toward realistic soft-tissue modeling in medical simulation," *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, issue 3, pp. 512-523, March 1998.
- [7] H. Çakmak, U. Kühnapfel, "Animation and simulation techniques for VR-training systems in endoscopic surgery," *Proc. EGCAS 2000*, pp. 173-185.
- [8] R. Balaniuk and K. Salisbury, "Dynamic simulation of deformable objects using the Long Elements Method," *IEEE Proc. the 10th Symp. On Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 58-65, 2002.
- [9] R. Balaniuk and K. Salisbury, "Soft-tissue simulation using the radial elements method," *Int. Symp. on Surgery Simulation and Soft Tissue Modeling (IS4TM)*, Juan-Les-Pins, France, pp. 48-58, 2003.
- [10] S.-Y. Kim, Real-time volume haptic rendering with S-chain model, Ph.D. thesis. 2004.
- [11] Y. Zhuang and J. Canny, "Haptic interaction with global deformation," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, vol. 3, pp. 2428-2433, April 24-28, 2000.
- [12] G. Picinbono, J.-C. Lombardo, H. Delingette, and N. Ayache "Improving realism of a surgery simulator: linear anisotropic elasticity, complex interactions and force extrapolation," *The Journal of Visualization and Computer Animation*, vol. 13, issue 3, pp. 147-167, 2002.
- [13] K. Lee and D. Y. Lee, "MIMO output estimation with reduced multirate sampling for real-time haptic rendering," *IEEE Trans. Robotics*, vol. 23, no. 3, pp. 481-493, June 2007.
- [14] L. J. Love and W. J. Book, "Force reflecting teleoperation with adaptive impedance control," *IEEE Trans. SMC-B*, vol. 34, no. 1, pp. 159-165, 2004.
- [15] P. Dupont, T. Schulties, P. Millman, and R. D. Howe, "Automatic identification of environment haptic properties," *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, vol. 8, no. 4, pp. 392-409, Aug. 1999.
- [16] N. Diolaiti, C. Melchiorri, and S. Stramigioli, "Contact impedance estimation for robotic systems," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 21, no. 5, pp. 925-935, 2005.
- [17] G. C. Goodwin and K. S. Sin, *Adaptive Filtering, Prediction and Control*, Englewood Cliffs, NJ:Prentice Hall, 1984.
- [18] L. A. Jones, "Kinesthetic Sensing," Human and Machine Haptics, MIT Press, 2000.
- [19] H. Z. Tan, N. I. Durlach, Y. Shao, and M. Wei, "Manual resolution of compliance when work and force cues are minimized," DSC-Vol. 49, *Advances in Robotics, Mechatronics and Haptic Interfaces*, pp. 99-104, 1993.



이 경 노

1996년 연세대학교 기계공학과 학사.
1998년 KAIST 기계공학과 공학석사.
2007년 KAIST 기계공학과 공학박사.
2007년~2008년 KAIST 가치제조기계사업단 박사후연구원. 2008년~현재 삼성전자 책임연구원. 관심분야는 가상현실

인터페이스, 의료시뮬레이션, 햅틱 인터페이스, 햅틱 제어 및 렌더링.



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) 기계항공시스템학부 교수. 관심

분야는 로봇공학, 의료 시뮬레이션.