

# 가변적인 통신지연시간을 갖는 원격 작업 환경을 위한 실시간 햅틱 렌더링

## Real-Time Haptic Rendering for Tele-operation with Varying Communication Time Delay

이경노 · 정성엽  
K. Lee and S. Y. Chung

(접수일 : 2009년 2월 24일, 수정일 : 2009년 4월 9일, 채택확정 : 2009년 4월 18일)

**Key Words** : Tele-Operation(원격 제어), Virtual Environment(가상 환경), Haptic Rendering(햅틱 렌더링), Output Estimation(출력추정), Varying Time-Delay(가변 시간지연)

**Abstract** : This paper presents a real-time haptic rendering method for a realistic force feedback in a remote environment with varying communication time-delay. The remote environment is assumed as a virtual environment based on a computer graphics, for example, on-line shopping mall, internet game and cyber-education. The properties of a virtual object such as stiffness and viscosity are assumed to be unknown because they are changed according to the contact position and/or a penetrated depth into the object. The DARMAX model based output estimator is proposed to trace the correct impedance of the virtual object in real-time. The output estimator is developed on the input-output relationship. It can trace the varying impedance in real-time by virtue of P-matrix resetting algorithm. And the estimator can trace the correct impedance by using a white noise that prevents the biased input-output information. Realistic output forces are generated in real-time, by using the inputs and the estimated impedance, even though the communication time delay and the impedance of the virtual object are unknown and changed. The generated forces trace the analytical forces computed from the virtual model of the remote environment. Performance is demonstrated by experiments with a 1-dof haptic device and a spring-damper-based virtual model.

### 1. 서 론

시각 및 햅틱 인터페이스를 포함하여 현실감이 한층 증강된 가상현실 기술은 게임, 의료 시뮬레이션 등에 많이 활용되고 있다. 특히, 최근에는 통신 기술의 발달로 원격 공동 작업<sup>1,2)</sup>이 가능해졌으며, 원격지와의 역감적인 상호작용을 가능하게 하는 햅틱 인터페이스 기술은 원격 작업의 증강된 현실감과 몰입감을 구현하기 위한 필수 요소가 되었다. 원격 작업에서는 불규칙하고, 때로는 매우 큰 통신 지연시간이 발생한다. 비교적 큰 통신지연시간은 원격지 환경과의 실시간 상호작용을 어렵게 만들고, 현

실감 높은 실시간 햅틱 렌더링도 불가능하게 만든다. 현실감 높은 햅틱 렌더링을 구현하기 위해서는 입력에 대한 출력이 300 Hz 이상의 샘플링으로 갱신되어야 하지만, 불규칙한 통신지연시간 때문에 원격지 작업 환경에 근거한 햅틱 렌더링의 샘플링을 높이는 것은 매우 어렵다. 본 논문에서는 비교적 큰 통신지연시간이 실시간으로 변하고, 또한 가상환경 속 물체의 임피던스를 알 수 없는 환경에 대한 실시간 햅틱 렌더링 방법을 제시하고자 하며, 이는 원격지 환경 속 물체의 강성, 점성과 같은 물성치를 사용자가 실시간으로 느끼게 해주기 위함이다.

시간 지연이 있는 경우라도 만일 가상환경 속 물체의 임피던스를 알고 있다고 하면, 이 임피던스를 이용하여 사용자에게 전달해야 할 출력 값을 사전에 구할 수 있기 때문에, 사용자가 시간 지연을 느끼지 못하도록 보상해 줄 수 있다. 따라서, 가상환

---

정성엽(책임저자) : 충주대학교 기계공학과  
E-mail : sychung@cjnu.ac.kr, Tel : 043-841-5124  
이경노 : 삼성전기 중앙연구소

경 속 물체의 임피던스를 알아내는 것은 원격 시술 등과 같은 분야의 햅틱 인터페이스에서는 반드시 필요하다. Heredia et al.<sup>3)</sup>는 원격 제어 환경에서 표준 추정 알고리즘인 LMS (Least Mean Square) 또는 RLS (Recursive Least Square)을 통해서 작업환경의 임피던스를 추정하였다. 임피던스 모델은 센서 정보를 통해 관찰한 힘과 위치에 기초하여 ARMA (Auto Regressive Moving Average) 프로세스로 모델링 하였으며, 시간 지연은 고려하지 않았다. Diolaiti et al.<sup>4)</sup>는 로봇이 미지 환경과 접촉할 경우, 물체의 임피던스를 추정하기 위하여 비선형 모델을 도입하였으며 시간 지연이 없는 경우에 대해 RLS를 사용한 추정 알고리즘을 제안하였다. 이 방법은 로봇이 유연한 물체와 접촉하는 경우에 임피던스를 모델링하는 데 유용하게 사용될 수 있다. 그러나, 두 방법은 모두 시간 지연이 있는 경우의 임피던스 추정에 대해서는 고려하지 않았다. Dupont et al.<sup>5)</sup>는 비구성 환경이나 큰 시간지연이 존재하는 경우에 대하여 물리적인 모델 기반의 가상 시뮬레이션 방법을 제안하였다. 그는 센서 정보를 수집하여 작업의 상태에 따라 정보를 분류하고 각 상태에 따라 핸들링 하는 블록의 무게, 크기, 블록 간의 마찰 계수 등의 물리적인 특성을 자동으로 인지할 수 있는 방법을 제안하였다. 이러한 방법은 원격지의 물리적인 특성이 변화할 때 유용한 방법이지만, 오프라인에서 인지 작업을 수행해야 하기 때문에 사용자에게 원격지 환경 변화를 실시간으로 전달해야 하는 경우에는 적용하기 어렵다.

그래픽 모델의 정확한 임피던스 값을 알 수 없고, 때로는 임피던스 값이 변하는 경우, 보간법 (interpolation)과 외삽법 (extrapolation)을 이용하는 실시간 햅틱 렌더링 방법이 사용된다. Zhuang과 Canny<sup>6)</sup>는 사용자의 입력에 대한 동역학적 모델의 변형 및 햅틱 정보를 계산한 후, 보간법을 이용해서 반력을 구현해주는 방법을 제시했다. 이 방법에서는 시각 및 햅틱 상호작용이 한 주기 시간만큼 지연되고, 시간 지연을 보상하기 위한 고려가 부족하였다. Picinobo et al.<sup>7)</sup>는 동역학 모델로부터 계산된, 낮은 갱신율의 점점 위치와 그에 따른 반력 정보를 이용해서 샘플링 사이의 반력을 계산하는 외삽법을 제시했으나, 변화하는 시간지연을 보상할 수 있는 방법에 대한 고찰이 부족하였다. Lee와 Lee<sup>8)</sup>는 실시간 햅틱 렌더링 방법으로 다중율 출력 추정법 (multi-rate output estimation)을 제안하였다. 이

방법은 계산시간 지연에 대한 보상은 물론, 기하학적인 변화가 포함된 동역학적 모델로부터의 실시간 햅틱 정보 계산이 가능하다. 다중율 출력 추정법은 시스템의 다중율 샘플링, 변형체의 입출력 모델, 최소 자승법과 출력 오차 추정법에 근거하였다. 그러나 변하는 시간지연을 고려하지 못했고, 입출력 정보의 편향에 따른 출력 추정 오차에 대한 고려가 부족하였다.

본 논문에서는 외적변수를 포함한 결정론적 자기회귀이동평균모델 (DARMAX, Deterministic Auto Regressive Moving Average model with eXogenous variable)에 근거한 출력 추정법을 제시하고, 이를 이용하여 시시각각 변하는 통신지연시간 환경에서의 실시간 햅틱 렌더링 방법을 제시한다. 출력 추정법은 입출력 관계 모델에 근거하며 규칙적인 샘플링 간격을 요구하기 때문에, 변화하는 통신지연시간의 최대치를 이용하여 규칙적인 시간지연이 포함된 입출력관계를 모델화한다. 공분산 (P-matrix) 초기화 알고리즘을 이용하여 원격지 환경 속 가상물체의 변하는 임피던스를 실시간으로 추정한다. 사용자의 입력정보가 편향되면, 출력 추정기가 가상물체의 실제 임피던스를 추정하지 못하는 경우가 종종 발생하기 때문에, 백색잡음 (white noise)이 추가된 사용자의 입력정보를 이용한다. 백색잡음에 의한 출력은 시각적인 떨림과 고주파 진동을 유발하기 때문에, 몰입감을 방해할 수 있다. 이를 해결하기 위한 햅틱 렌더링 방법이 제시된다. 제안된 방법은 힘 센서를 부착한 1자유도 햅틱 장치와 스프링-댐퍼 모델을 이용한 동역학 그래픽 모델을 이용하여 실험적으로 검증한다. 비록 통신시간 지연이 크고, 가상물체의 임피던스가 변하더라도, 제시된 출력 추정기를 통해 가상물체의 임피던스는 실시간으로 정확한 값으로 추정된다. 그리고, 이를 통해 계산된 출력 값이 가상 물체의 임피던스를 통해 계산된 출력 값을 실시간으로 추정할 수 있음을 검증하였다. 1자유도 장치를 통해 얻은 입력정보를 이용하여 다 자유도 시스템 환경에 대해서도 제시된 햅틱 렌더링 방법이 효과적임을 검증한다.

## 2. 가변적 통신 지연시간을 가진 원격 작업 환경을 위한 실시간 햅틱 렌더링

### 2.1 원격 작업 환경

사용자가 원격지의 가상환경과 상호작용할 때의

일반적인 통신 환경은 그림 1과 같다. 원격 시스템에서 실시간 작업이 어려운 이유는 비교적 큰 통신 지연시간 때문에 원격지의 상황을 실시간으로 파악할 수 없고, 통신지연시간이 실시간으로 변하기 때문이다.

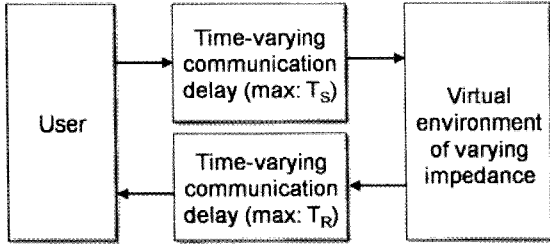


Fig. 1 Communication environment for tele-operation

원격지의 물체와의 상호작용에 대한 현실감을 증강시키기 위해서 햅틱적인 상호작용은 반드시 필요하다. 햅틱적으로 원격지와 상호작용하는 경우에도 통신지연시간 때문에 실시간 햅틱 렌더링은 어려운 문제이다. 현실감 높은 햅틱 렌더링을 구현하기 위해서는 300 Hz 이상의 샘플링이 필요하다. 그러나 통신시간지연때문에 햅틱 렌더링 루프의 샘플링을 높이기가 어렵다. 본 논문에서는 비교적 큰 통신지연시간이 발생하면서, 동시에 통신지연시간이 실시간으로 변할 때 변화하는 임피던스를 갖는 가상환경과의 실시간 햅틱 렌더링 방법을 제시하고자 한다.

2.2 가상 환경 속 물체의 동역학적 모델

가상 환경 속 물체에 대한 햅틱적인 현실감을 증강시키기 위해서는 강성, 점성 등과 같은 물체의 물성치가 실제와 같아야 한다. 또한 작용 입력에 대한 물체의 거동이 실제와 같아야 충분한 현실감을 재현할 수 있다. 그래서 가상 환경 속 물체는 그 동역학적 특성을 고려해야 한다. 물체의 대표적인 동역학적 모델화 방법이 질량-스프링-댐퍼 모델과 유한요소모델이다. 그림 2는 스프링과 댐퍼의 연결구조에 따른 모델화 방법을 나타낸 것이며, 특히 대표적인 점탄성 모델인 Maxwell 과 Kelvin-vight 모델의 구조를 보여준다. 강체의 경우에는 물체의 변형이 발생하지는 않지만 스프링-댐퍼 모델을 이용하여 햅틱 모델을 구성한다.

Maxwell 모델, Kelvin-vight 모델, 질량-스프링-댐퍼 모델과 유한요소모델의 일반적인 동역학 모델은 수식 (1)과 같다. 여기서  $\{y(t)\}$ ,  $\{u(t)\}$ ,  $[K]$ ,  $[B]$  과  $[M]$ 은 각각 출력, 입력, 강성계수, 점성계수, 관

성계수이고, 속도  $\{\dot{u}(t)\}$ 과 가속도  $\{\ddot{u}(t)\}$ 은 각각  $\dot{u}(t) = \{u(t) - u(t-1)\} / \Delta t$ 과  $\ddot{u}(t) = \{u(t) - 2u(t-1) + u(t-2)\} / (\Delta t)^2$ 으로 모델화된다. 여기서  $\Delta t$ 는 시간 간격이다. 이 식을 이산시간 모델로 변환하면 수식 (2)와 같다.<sup>8)</sup> T는 샘플링 시간, 즉  $\Delta t$ 이다. 그리고  $[P]$ ,  $[Q]$ 와  $[R]$  행렬은 각각  $[K] + [B] / \Delta t + [M] / (\Delta t)^2$ ,  $[B] / \Delta t + 2[M] / (\Delta t)^2$ 과  $[M] / (\Delta t)^2$ 에 해당한다. 사용자의 입력은 실시간으로 추정할 수 있다. 만약  $[P]$ ,  $[Q]$ 와  $[R]$  행렬의 값, 다시 말해서 가상 환경 속 물체의 물성치인  $[K]$ ,  $[B]$ 과  $[M]$ 을 실시간으로 추정할 수 있다면, 사용자 입력에 대한 출력을 통신 지연시간에 관계없이 실시간으로 계산할 수 있다. 따라서 실시간 햅틱 렌더링이 가능해지며 사용자는 실시간으로 가상 환경 속 물체의 임피던스를 느낄 수 있게 된다. 이를 위해서 입출력 정보를 이용해서  $[P]$ ,  $[Q]$ 와  $[R]$  행렬의 값을 추정하는, 즉 매개변수의 값을 추정하는 알고리즘이 개발되었다.

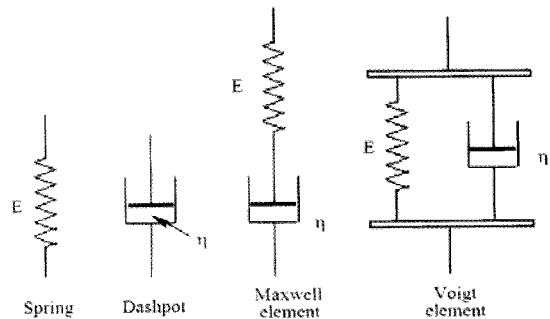


Fig. 2 Visco-elastic model

$$\{y(t)\} = [K]\{u(t)\} + [B]\{\dot{u}(t)\} + [M]\{\ddot{u}(t)\} \quad (1)$$

$$\{y(k)\} = \{[P] + [Q]z^{-T} + [R]z^{-2T}\}\{u(k)\} \quad (2)$$

수식 (2)을 살펴보면, 일정 시간 간격을 바탕으로 동역학적 특성이 모델화되어 있다. 따라서 추정 알고리즘을 모델화하기 위해서는 우선 일정시간 간격을 갖는 시스템 구조가 필요하다.

실시간으로 불규칙하게 변하는 통신지연시간을 예측하는 것은 불가능하다. 이러한 통신지연시간의 문제를 해결하기 위해서 그림 3과 같이 통신과정 중에 버퍼를 설치한다. 통신 버퍼를 설치함으로써 불규칙한 통신지연시간을 고정된 크기를 가진 통신지연시간 모델로 변환할 수 있다. 사용자가 데이터를 송신할 때의 통신지연시간의 최대값과 수신할 때의 통신지연시간의 최대값은 몇 번의 통신실험을 통해 추정 또는 가정할 수 있다. 그림 3에서  $T_s$ 는

송신할 때의 최대 통신지연시간을,  $T_R$ 은 수신할 때의 최대 통신지연시간을 의미한다. 기본적인 샘플링 시간을  $T$ 라고 하면,  $T_S=N_{TS}*T$ ,  $T_R=N_{TR}*T$ 로 표현할 수 있다. 여기서  $N_{TS}$ 와  $N_{TR}$ 은 자연수이다. 따라서 데이터 송신할 때의 불규칙한 통신지연시간은  $N_{TS}$  만큼의 개수를 가진 데이터 버퍼를 설치하면 일정한 통신지연시간 간격으로 가상환경에 데이터를 전송해줄 수 있다. 사용자가 가상환경으로부터 데이터를 수신하는 경우도 마찬가지이다. 이러한 과정을 거쳐 통신지연시간을 상수화할 수 있다. 그림 3에서는 송수신할 때 데이터를 임시로 저장해두는 버퍼와 데이터의 흐름관계를 보여주고 있다. 사용자의 입력은 실시간으로 측정되고, 원격지 가상 환경에 전달된다. 추정 알고리즘 (estimation algorithm)은 가상환경 속 물체의 물성치를 추정하기 위한 것으로 입력과 그에 대응하는 출력 값을 이용해서 매개변수 값을 추정한다. 출력 값이 통신지연시간만큼 지연되어서 추정 알고리즘에 전달되기 때문에 입력 값도 그 만큼의 시간지연이 필요하다. 그래서 데이터 버퍼(I)를  $N_{TS}$ 와  $N_{TR}$ 의 합 크기만큼 설정해두고, 입력과 출력을 동기화한다.

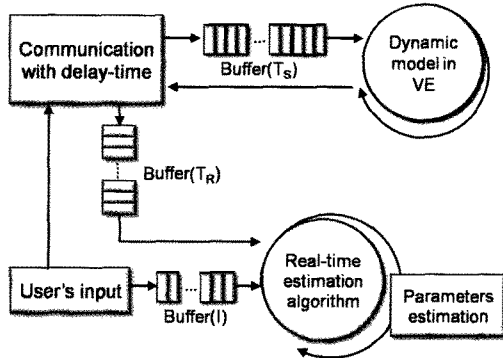


Fig. 3 Buffer model and data flow to regularize an irregular communication time delay

### 2.3 실시간 매개변수 추정 알고리즘

추정 알고리즘을 통해서 가상 환경 속 물체의 물성치 값을 실시간으로 추정한다. 이를 바탕으로 그림 4와 같이 현재 측정된 입력에 대한 출력을 실시간으로 계산하고 사용자에게 전달한다. 따라서 통신지연시간은 보상된다. 추정 알고리즘은 가상환경으로부터 통신 지연되어 전달된 출력과 그 출력에 대응하는 입력 정보를 이용해서 실시간으로 매개변수를 추정할 수 있어야 한다. 매개변수 값을 추정할 때 최소자승법을 이용하는 ARMA (Auto Regressive

Moving Average) 모델<sup>8)</sup>을 이용할 수도 있다. 그러나 ARMA 모델을 이용하면, 사용자의 입력이 편향성을 갖는 경우, 예를 들면 일정 주기를 갖는 일정 패턴의 입력이라면 가상 환경 속 물체의 물성치를 정확하게 추정할 수 없다. 백색잡음을 사용자 입력과 혼합함으로써 사용자 입력의 편향성을 사전에 방지할 수 있고, 또한 가상 환경 속 물체의 물성치를 비교적 빠른 시간 내에 정확히 추정할 수 있다. DARMAX (Deterministic Auto Regressive Moving Average model with eXogenous variable) 모델은 ARMA 모델을 토대로 개발된 추정 모델로서, 그림 5와 같이 사용자의 입력에 백색잡음 (white noise,  $\omega(t)$ )을 포함시킨 입력을 이용한다. 따라서 사용자 입력의 편향성에 따른 매개변수 추정오차를 줄일 수 있다.

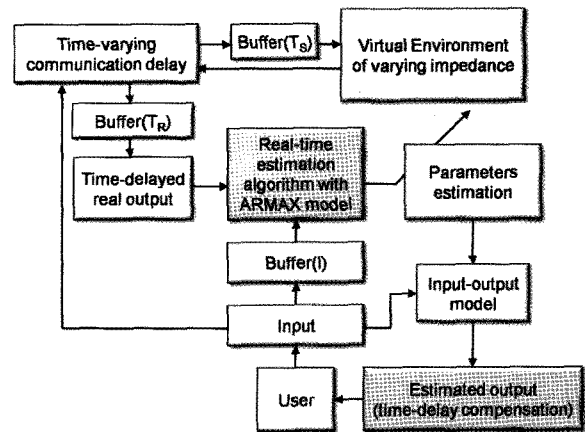


Fig. 4 Flowchart for real-time output estimation

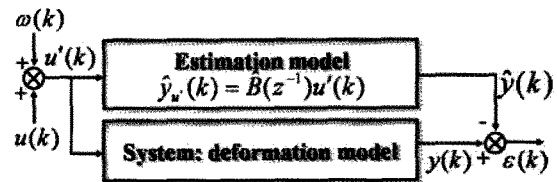


Fig. 5 DARMAX model

실시간으로 출력 추정을 하기 위한 DARMAX 모델 기반의 추정기 모델을 제시한다. 기본 샘플링 시간은  $T$ 를 1로 가정한다. 불규칙한 송수신 지연시간을 데이터 버퍼를 이용해서 상수화된 지연시간으로 변환하였다. 최대 송수신 통신 지연시간의 합은  $K_{d,max}*T = (N_{TS}+N_{TR})*T$ 이며 입력에 대한 출력 값은 그 시간만큼 지연된 후에 다시 사용자에게 전달된다. 출력 추정 모델은 물체의 동역학 모델에 등가적으로 설계된다. 수식 (2)를 확장한,  $p$ 개의 자유도를

가진 동역학적 시스템 모델의 출력은 수식 (3) 또는 (4)와 같이 표현된다. 이것은 p개의 입력, 단일출력 (multi-input-single-output) 모델에 대한 것이며, 출력 수만큼 동일한 방법으로 모델화된다. 여기서  $u'_p(k)$ 는 사용자 입력에 백색잡음이 포함된 p번째 입력,  $y(k)$ 는 원격지의 가상 환경 속 동역학 모델로부터 계산된 실제 출력, 매개변수들의 계수  $b_{jk}$ 는 미지의 값이며 추정대상이다.  $\theta_0$ 는 입출력 변수들의 계수에 대한 실제 값들의 집합이다.

$$y(k+k_{d,max}) = B_1(z^{-1})u'_1(k) + \dots + B_p(z^{-1})u'_p(k),$$

$$B_j(z^{-1}) = \sum_{k=0}^{m-1} b_{jk}z^{-k} \quad (j=1,2,\dots,p) \quad (3)$$

다른 표현방법으로,

$$y(k+k_{d,max}) = \phi'(k)^T \theta_0,$$

$$\phi'(k)^T = [u'_1(k), \dots, u'_1(k-(m-1)), \dots, u'_p(k), \dots, u'_p(k-(m-1))]$$

$$\theta_0 = [b_{10}, \dots, b_{1(m-1)}, \dots, b_{p0}, \dots, b_{p(m-1)}]^T \quad (4)$$

원격지의 가상환경 속 그래픽 모델의 갱신율은 송신 지연시간의 영향을 받는다. 따라서 데이터 송신할 때 최대지연시간이 그래픽 모델의 샘플링시간이 된다. 햅틱 정보의 샘플링시간은 현실감을 높이기 위해서 최대한 짧아야한다. 일반적으로 햅틱적인 현실감을 높이기 위해서는 300 Hz 이상은 되어야한다. 햅틱 정보의 샘플링 시간도 통신지연시간의 영향을 받게 된다. 따라서 통신지연시간의 보상이 필요하며, 본 논문에서 지연시간 보상을 위한 방법을 제시한다. 수식 (3)과 (4)의 시스템 모델과 등가적으로 모델화되는 추정 모델은 수식 (5)와 (6)으로 표현된다. 계수  $\hat{b}_{jk}$ 는 각각 계수  $b_{jk}$ 를 추정하기 위한 변수이며,  $\hat{y}(k)$ 는 선행 모델 출력 (p priori model output)이다.

$$\hat{y}(k+k_{d,max}) = \hat{B}_1(z^{-1})u'_1(k) + \dots + \hat{B}_p(z^{-1})u'_p(k),$$

$$\hat{B}_j(z^{-1}) = \sum_{k=0}^{m-1} \hat{b}_{jk}z^{-k} \quad (j=1,2,\dots,p) \quad (5)$$

다른 표현방법으로,

$$\hat{y}(k+k_{d,max}) = \phi'(k)^T \hat{\theta}(k) \quad (6)$$

$$\phi'(k)^T = [u'_1(k), \dots, u'_1(k-(m-1)), \dots, u'_p(k), \dots, u'_p(k-(m-1))]$$

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

현실감 높은 실시간 햅틱 렌더링을 구현하기 위해서 통신지연시간의 보상은 필수적이다. 그리고 사용자 입력의 편향성을 방지하기 위해서 추가된 백색잡음의 영향을 제거하는 것도 필요하다. 통신지연시간의 보상은 물론 백색잡음의 영향을 없애기 위한 시스템 구조는 그림 6과 같다. 또한 제시된 시스템 구조는 입출력정보에서만 지연시간에 대한 영향을 받을 뿐이고, 출력 추정기의 내부 알고리즘에서 통신지연에 대한 영향력을 없애기 위한 구조이다.

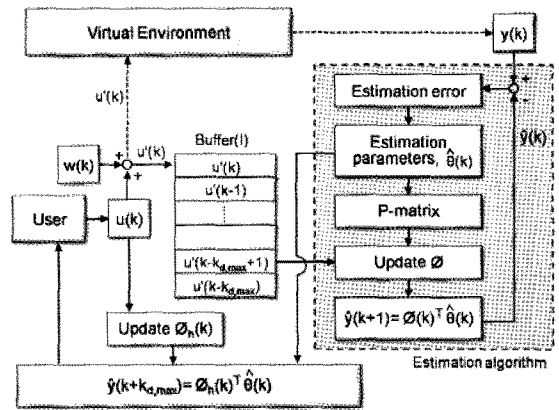


Fig. 6 Flowchart for output prediction and parameter estimation algorithm

제시된 구조에서는 물체의 물성치를 추정할 때 매 순간 저장된 과거의 입력 정보와 통신지연시간 만큼 늦게 전달되는 출력을 이용해서 원격지 가상 환경 속의 물체의 물성치를 실시간으로 추정한다. 그리고 매 순간 계산된 매개변수 값과 백색잡음이 포함되지 않은 사용자 입력만을 이용해서  $K_{d,max}T$ 만큼 빨리 출력을 추정하고 사용자에게 전달한다.  $O_n(k)$ 는 수식 (6)의 입출력관계와 등가를 이루는, 현재 사용자 입력의 집합체이다. 가상 환경 속 물체의 물성치가 정확하게 추정된다면 입력에 대한 출력관계가 명확하기 때문에 통신지연시간에 상관없이 정확한 출력값을 계산할 수 있다. 따라서 원격지의 가상 환경 속 물체의 임피던스를 똑같이 느낄 수 있게 된다. 이러한 구조가 가능한 이유는 변형체의 임피던스가 실시간으로 변하기는 하지만, 통신지연시간과는 무관하기 때문이다.

가상 환경 속 물체의 동역학적 모델과 그에 따른 추정모델, 최소자승법 (least squares method)과 출력 오차 모델을 통해서 입출력 변수의 계수를 실시간으로 추정하는 매개변수 추정 알고리즘이 제시

된다. 제시된 알고리즘은 다중을 출력 추정 알고리즘<sup>7)</sup>을 토대로 설계되었으며 실시간 매개변수 추정 방법에 따라 공분산 행렬 초기화 알고리즘을 포함한 추정기 모델이 제시된다. T 주기만큼 실행하는 출력 추정은 수식 (7)과 같고, 추정오차는 수식 (8)과 같이 정의된다. 추정 계수를 갱신하는 알고리즘은 수식 (9)와 같고, 공분산 (covariance) 행렬(P)의 갱신 알고리즘은 수식 (10)과 같다.

$$\hat{y}(k+1) = \phi'(q)^T \hat{\theta}(k) \quad (7)$$

$$e(k) = y(k) - \phi'(q-1)^T \hat{\theta}(k-1) = y(k) - \hat{y}(k) \quad (8)$$

추정기 모델: 공분산 초기화가 포함된 추정 알고리즘

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P[k-2]\phi'(q-1)}{1 + \phi'(q-1)^T P[k-2]\phi'(q-1)} e(k) \quad (9)$$

$$P[k-1] = P[k-2] - \frac{P[k-2]\phi'(q-1)\phi'(q-1)^T P[k-2]}{1 + \phi'(q-1)^T P[k-2]\phi'(q-1)} \quad (10)$$

$$\phi'(q-1)^T P[k-2]\phi'(q-1) < L_{reset} \quad (11)$$

공분산 (covariance) 행렬은 입출력들의 상관관계를 나타내며, 접점이 추가되거나 제거될 때마다 초기화를 시켜준다.  $P(-1) = k_0 I$ 이고,  $\hat{\theta}(0) = arbitrary$ ,  $k_0$ 는 임의의 양수, I는 적당한 차수를 갖는 단위행렬이다. 실시간으로 변하는 물체의 임피던스를 추정하기 위해서 공분산 초기화 알고리즘이 제시된다. 공분산 초기화 알고리즘은 식(11)의 조건,  $\phi'(k-1)^T P[k-2]\phi'(k-1) < L_{reset}$ 을 만족시킬 때마다 P 행렬을 초기화하는 알고리즘으로 매개변수에 대한 계속적인 추정이 가능하다. 수식 (7)-(11)에서의 변수 q는  $(K - K_{d,max} + 1)$ 이다. 따라서  $\phi'(q)^T$ 는 현재를 KT라고 할 때  $(K_{d,max} + 1)T$ 만큼 이전의 입력 값들의 집합체이다.

P개의 자유도를 갖는 한 개 접점에 대한, 공분산 행렬의 초기화를 포함한 출력 추정법의 계산량은  $9(mp)^2 + 9(mp) + 5p$ 이며, 여기서 m은 추정하고자 하는 입력의 차수, p는 자유도이다. 수식 (2)에서 살펴본 바와 같이 스프링-댐퍼 기반의 모델은 m이 2이고 만약 3자유도 모델이라면, 즉 p가 3이라면 공분산 초기화 행렬을 포함한 추정법에서 추정된 출력 계산을 위한 계산량, 즉 더하거나 곱하는 횟수는 1149이다. 이것은 실시간으로 계산하기에 충분히 작은 값이다.

물체의 입출력 관계의 매개변수를 정확히 추정한

후에는, 그림 6과 같이 백색잡음이 포함되지 않은 사용자 입력에 대해서 출력을 예측하는 과정이 필요하다. 물체의 임피던스가 실시간으로 변하기는 하지만, 통신지연시간과는 무관하기 때문에 수식 (12)를 통해 선행적으로 출력을 계산할 수 있다.

$$\hat{y}_h(k + k_{d,max}) = \phi_h(k)^T \hat{\theta}(k) \quad (12)$$

$$\phi_h(k)^T = [u_1(k), \dots, u_1(k-(m-1)), \dots, u_p(k), \dots, u_p(k-(m-1))]$$

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

### 3. 실험 및 성능비교

#### 3.1 실험 환경

통신 지연시간 보상을 통한 실시간 햅틱 렌더링 방법론의 성능을 평가하고자 한다. 통신지연시간의 변화에 따른 영향과 가상환경 속 물체의 비선형적 임피던스 모델에 대한 성능을 평가한다.

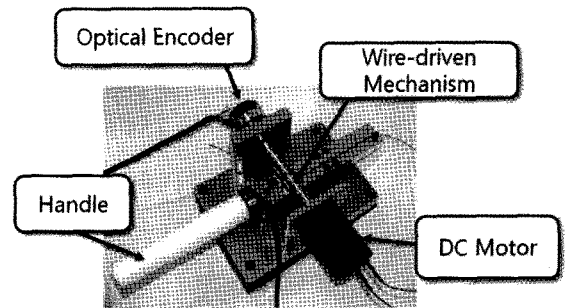


Fig. 7 Haptic Device (1-dof)

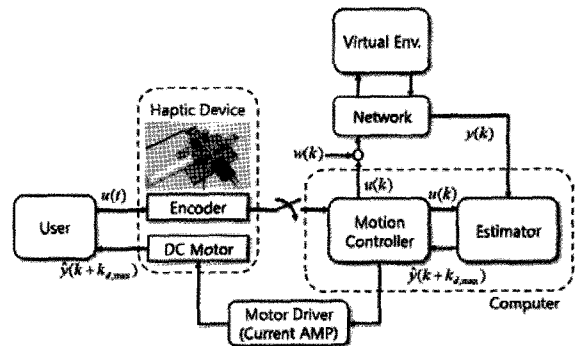


Fig. 8 Schematic for system structure

Table 1 Properties of Haptic Device

Stroke	Continuous Force	Maximum Force
± 45 mm	12.7 N	65.5 N

실험에 사용된 햅틱장치는 그림 7과 같이 1개의 DC모터와 1개의 엔코더로 이루어진 1 자유도 직선 운동을 하는 햅틱장치이다. 표 1과 같이 햅틱 장치의 운동범위는 90 mm이고 최대 힘은 65.5 N이다. 실험을 위한 시스템 구성은 그림 8과 같다. 햅틱 장치의 엔코더를 통해 사용자의 입력이 실시간으로 측정된 후 그 입력은 네트워크를 통해 가상환경에 전달되면서, 동시에 추정기에 전달된다. 추정기는 이미 추정한 가상 환경 속 물체의 임피던스 매개변수를 이용해서 실시간으로 입력에 대한 출력을 추정한 후 햅틱장치를 통해 사용자에게 전달한다. 한편, 측정된 입력은 임의의 통신지연시간을 가진 네트워크를 통해 가상환경에 전달된다. 가상환경에서 입력에 대한 실제 출력을 계산한 후 네트워크를 통해 다시 추정기에 전달된다. 그리고 그림 6과 같은 절차를 통해서 추정기에서는 가상 환경 속 물체의 임피던스를 실시간 추정하게 된다.

### 3.2 실험결과

실험에 사용된 추정기 모델은 수식 (7)-(11)의 공분산 초기화 알고리즘을 포함한 추정기이다. Lreset은 경험적으로 0.8로 설정되었으며 사용자에게 전달해주는 반력은 수식 (12)에 의해 계산된다. 실험에서 사용된 백색잡음의 분산은 0.01이다. 가상환경 속 물체는 수식 (13)와 같이 일반적인 구조의 스프링-댐퍼 모델이 사용된다. 가상환경 속 물체의 임피던스 값이 일정하고 최대 송수신 통신 지연시간의 합인  $Kd_{max} * T = (NTS + NTR) * T$ 이 비교적 클 때, 햅틱 렌더링 알고리즘의 성능을 살펴본다.

모델 I: 상수 매개변수를 가진 선형 임피던스 모델

$$y(k+k_{d,max}) = Ku(k) + B \frac{u(k) - u(k-1)}{T_s} \quad (13)$$

$$y(k+k_{d,max}) = 4.250u(k) - 4.0u(k-1) \quad (N/mm) \quad (14)$$

모델 I에서 스프링 상수(K) 및 댐핑 상수 (B)는 각각 250 N/m와 4 Ns/m 이다. 따라서 수식 (14)과 같이 추정해야 할 실제 임피던스 매개변수  $b_{10}, b_{11}$ 의 값은 각각 4.25 와 4.0 이다. 샘플링시간  $T_s$ 는 1 msec이고 송수신할 때와 수신할 때 발생하는 통신 지연시간의 합인 최대 통신 지연시간은 200 msec로 가정한다. 실험으로 얻은 1자유도 햅틱장치의 입력은 그림 9(a)와 같다. 그 입력에 대한 임피던스 모델로부터 계산된 실제 출력과 추정된 출력은 그림

9(b)와 같다. 여기서 점선은 추정 출력 값이고 실선은 실제 출력 값이다. 그림 10(a)에서 보는 바와 같이 두 출력 값의 차이는 0.00003보다 작다. 그래서 그림 9(b)에서는 마치 실제 출력 값만 나타나는 것처럼 보인다. 30000 개 데이터의 평균 추정 오차는 0.0000022 N 이며, 사용자는 추정기를 이용하여 계산한 반력을 통해서 실제 임피던스를 느끼게 된다.

그림 10(b)를 보면, 200 msec 통신 시간지연이 존재하기 때문에 추정 파라미터들  $\hat{b}_{10}(k), \hat{b}_{11}(k)$ 은 각각 4.25와 4.0으로 200 msec 이후부터 매개변수 추정을 시작한다. 그림 9(a)의 입력 그래프를 보면, 처음 10초 동안에는 입력 값이 거의 0이다.

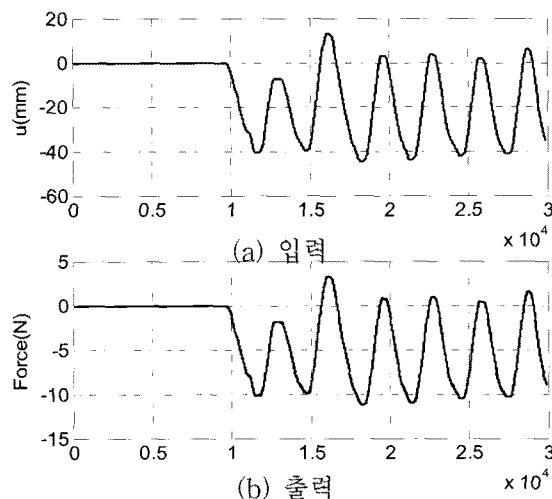


Fig. 9 Inputs and outputs for model I when communication delay=200 ms (dotted line : estimated y, solid line : real y(computed))

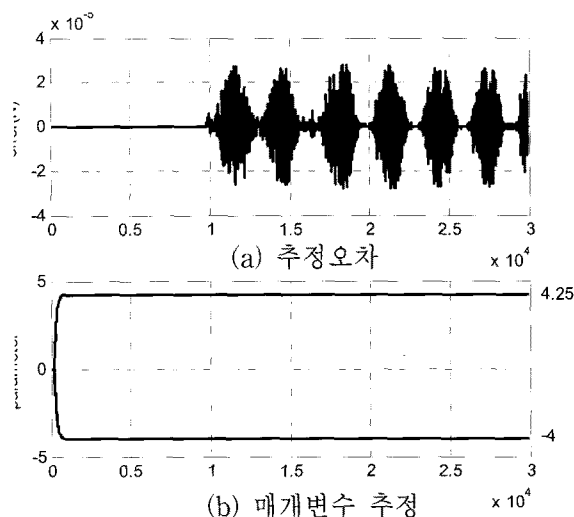


Fig. 10 Estimation error and parameters for model I when communication delay=200 ms

그렇지만 그림 10(b)의 매개변수 추정 그래프를

보면, 0.89초 후부터는 추정된 매개변수의 값과 실제 매개변수 값의 오차범위가 0.01 이내로 수렴된 것을 알 수 있다. 충분한 입력정보가 없었음에도 매개변수를 추정할 수 있었던 것은 백색잡음을 포함시킨 덕분이다. 비록 사용자의 입력 값은 편향되고 일정하더라도 가상 물체의 임피던스로부터 계산된 출력 값은 백색잡음 덕분에 랜덤하게 변하게 된다. 그래서 추정기는 편향되지 않고 정확하게 매개변수를 추정할 수 있다. 비록 200 msec만큼 큰 통신지연시간이 존재하지만, 가상환경 속 물체의 임피던스를 빠른 시간 내에 정확하게 추정해냄으로써 추정 오차를 없앨 수 있다. 그리고 사용자는 0.89초 후부터는 마치 가상환경 속 물체를 실시간으로 만지는 느낌을 받을 수 있게 된다.

가상환경 물체의 임피던스가 입력 위치에 따라서 달라지는 한편, 동시에 최대 통신지연시간이 증가하는 경우에 대해서 제시된 실시간 햅틱 렌더링 방법의 성능을 비교한다. 모델 II의 가상 물체의 임피던스는 수식 (15) 또는 (16)과 같다. 모델 속으로 깊이 삽입될수록 강성계수는 커지고 점성계수는 작아지는 모델이다. 최대 통신지연시간의 증가에 따른 추정기의 성능 변화를 분석하기 위해서 동일 입력에 대한 추정 출력, 실제 출력, 추정오차, 그리고 매개변수 값들의 변화를 비교한다. 실험에서 사용된 입력 정보는 그림 11과 같다. 삽입 위치에 따른 실제 임피던스 매개변수  $b_{10}$ ,  $b_{11}$ 의 값은 수식 (16)과 같다. 이 실험에서 사용된 추정기 모델은 공분산 초기화 알고리즘을 포함한 추정기 모델이다.  $I_{reset}$ 은 경험적으로 0.8로 설정되었다.

모델 II: 삽입 깊이에 따라 임피던스가 변할 때

$$y(k+k_{d,max}) = Ku(k) + B \frac{u(k) - u(k-1)}{T_s} \quad (15)$$

$$\begin{cases} |u(k)| < 10, & K=250N/m, B=10Nsec/m \\ -25 < u(k) \leq -10 \text{ AND } 10 < u(k) \leq 25, & K=750N/m, B=5Nsec/m \\ u(k) \leq -25 \text{ AND } u(k) > 25, & K=1250N/m, B=1Nsec/m \end{cases}$$

$$y(k+k_{d,max}) = b_{10}u(k) + b_{11}u(k-1) \quad (16)$$

$$\begin{cases} |u(k)| < 10, & b_{10} = 10.25, b_{11} = -10.0 \\ -25 < u(k) \leq -10 \text{ AND } 10 < u(k) \leq 25, & b_{10} = 5.75, b_{11} = -5.0 \\ u(k) \leq -25 \text{ AND } u(k) > 25, & b_{10} = 2.25, b_{11} = -1.0 \end{cases}$$

그림 11은 1자유도 햅틱 장치를 이용한 실험을 통해 얻은 입력 그래프이다. 그림 12에서 14는 그림 11의 입력에 대한 모델 II의 추정 결과로서, 각각 최대 통신지연시간이 10 msec, 50 msec, 그리고 200 msec일 때의 실험결과이다.

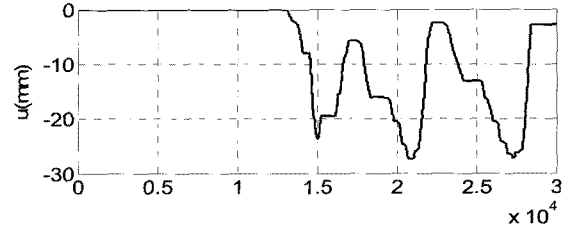
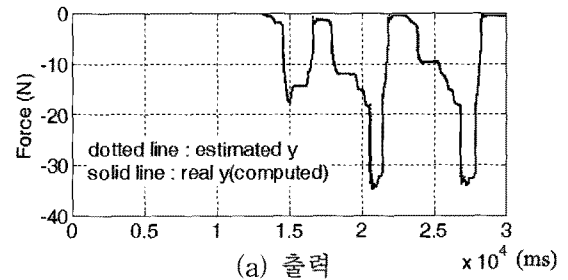
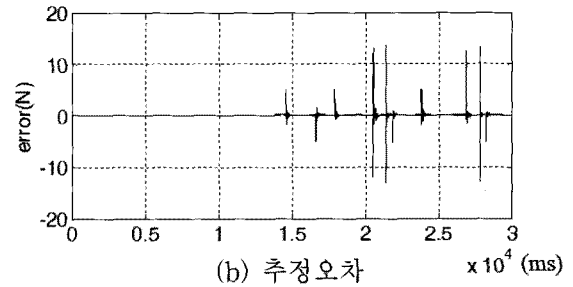


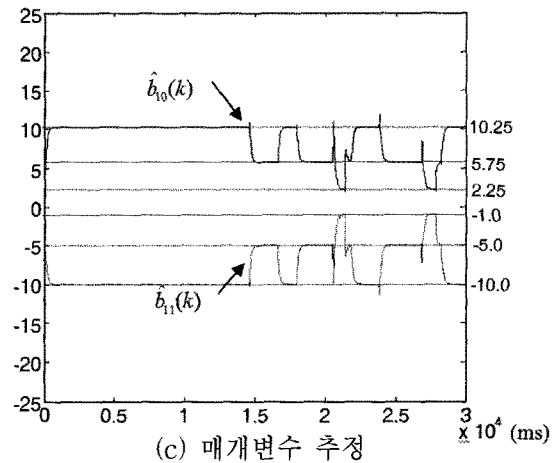
Fig. 11 Inputs for time



(a) 출력



(b) 추정오차



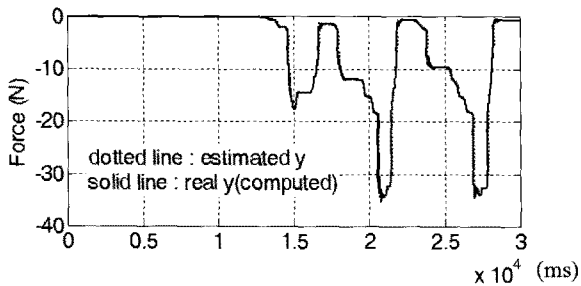
(c) 매개변수 추정

Fig. 12 Output estimation for model II when communication delay = 10msec

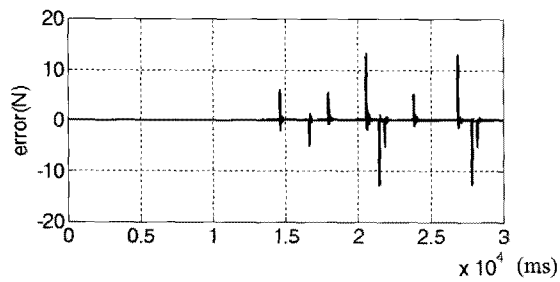


최대 통신지연시간에 상관없이 추정 매개변수들은 실제 매개변수 값에 수렴한다. 다만 임피던스 값이 달라지는 그 순간에서는 최대 통신지연시간 만큼 비교적 큰 추정오차가 발생한다. 추정기가 실제 매개변수를 추정하기 위해서는 입력에 대한 실제 출력 값을 알아야 한다. 그러나 최대 통신지연시간 만큼 실제 출력 값이 지연되어 전달된다. 따라서 최대 통신지연시간만큼 이전 매개변수 값을 이용해서 출력을 추정할 수 밖에 없고, 비교적 큰 추정 오차가 발생할 수밖에 없다. 그러나 입력에 대한 실제 출력 값을 알게 된 순간부터 0.8초 시간 내에 실제 매개변수 값들을 정확하게 추정한다. 임피던스가 일정한 구역에서는 실제 매개변수 값들을 빠른 시간

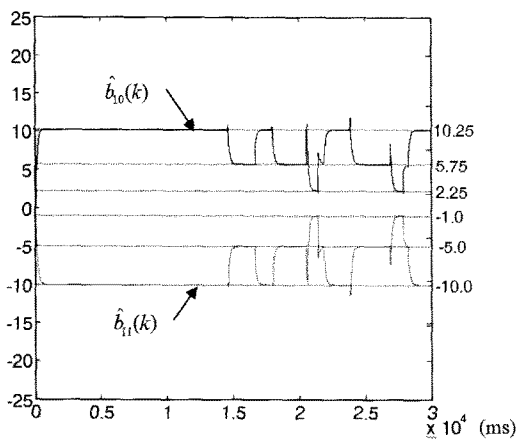
내에 정확히 추정하기 때문에 모델 I에서의 결과와 마찬가지로 추정된 출력과 실제 출력 값이 거의 일치한다. 따라서 사용자는 최대 통신지연시간에 상관없이 실제와 같은 임피던스를 느낄 수 있다. 그리고 임피던스 값이 변할 때 추정 오차가 비교적 크게 발생하여 큰 반력이 순간적으로 사용자에게 전달되게 된다. 그렇지만 일시적이고 순간적인 반력의 재현이기 때문에 별도의 제어기 없이 사람의 임피던스만으로도 임펄스적 반력에 대한 불안정한 거동을 충분히 완화시킬 수 있다. 최대 통신지연시간은 제시된 추정기의 수렴성에는 영향을 주지 않는다. 그래서  $Kd_{max} \cdot T$  만큼 선행되어 추정된 출력 값은 정확히 실제 출력값을 추정하고 계산지연시간은 완벽하게 보상된다.



(a) 출력

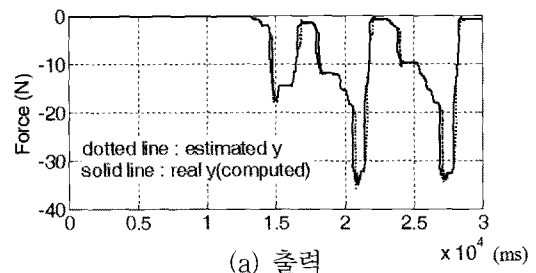


(b) 추정오차

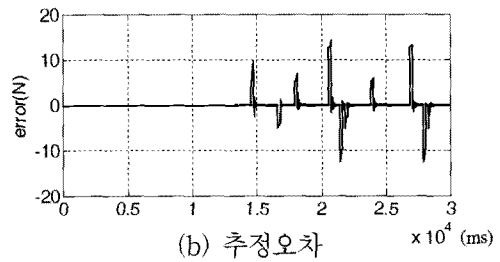


(c) 매개변수 추정

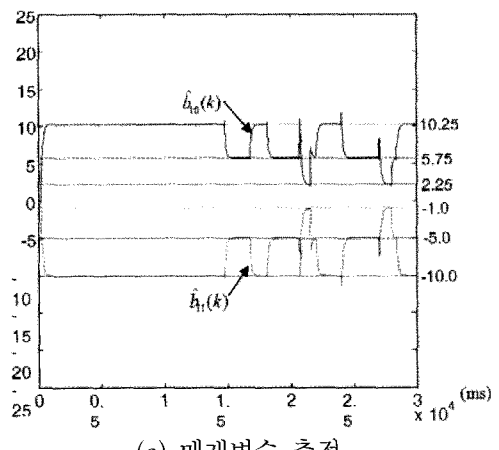
Fig. 13 Output estimation for model II when communication delay = 50msec



(a) 출력



(b) 추정오차



(c) 매개변수 추정

Fig. 14 Output estimation for model II when communication delay = 200msec

표 2는 통신지연시간에 따른 추정오차 및 매개변수 수렴성이다. 평균추정 오차는 30000 개의 데이터에 대한 평균값이고 매개변수의 평균 수렴시간은 입력이 새로운 임피던스 영역에 속하게 될 때부터 매개 변수값이 실제 값으로 수렴될 때까지 소요된 시간들의 평균을 의미한다. 평균 추정오차가 비교적 큰 이유는 통신지연시간의 영향으로 가상물체의 임피던스가 변하더라도 통신지연시간 동안에는 추정이 불가능하기 때문이다. 그러나 그림 12(b), 13(b), 14(b)에서 보는 된 실제 출력값이 전달되면 추정오차는 급격히 감소바와 같이 가상 물체의 새로운 임피던스를 통해 계산하게 된다. 통신지연시간 10 msec, 50 msec, 200 msec일 때 매개변수의 평균적인 수렴시간은 각각 0.73, 0.725, 0.740 초로 매우 작고 비슷하다. 수렴 후 추정 오차와 수렴시간이 매우 작기 때문에 사용자는 통신지연시간에 상관없이 원격지의 가상 물체에 대한 임피던스를 실시간으로 실감나게 느낄 수 있다.

햅틱 장치가 1 자유도인 관계로 제시된 햅틱 렌더링방법이 1 자유도 환경에 대해서 실험적으로 검증되었다. 그렇지만 제시된 방법은 다자유도 시스템에도 동일한 방법으로 적용 가능하다. 이를 시뮬레이션을 통해 검증한다. 그림 15와 같이 2번의 실험을 통해 1 자유도 햅틱 장치로부터 입력 정보를 얻은 후, 가상 물체 모델을 수식 (17), (18)과 같이 설계하여 적용하였다. 즉 2개 입력이 커플되어 하나의 출력 값을 결정하는 모델이다. TS는 샘플링 시간이며 1 msec로 가정한다. 최대 통신지연시간은 200 msec로 가정하였으며, 공분산 초기화 알고리즘을 포함한 추정기 모델이다. Lreset은 경험적으로 0.8로 설정되었다.

Table 2 Average estimation error and convergence of the estimator according to communication time delay

	통신지연시간		
	10 ms	50 ms	200 ms
최대 추정오차 (N)	13.559	13.191	14.302
평균 추정오차 (N)	0.048	0.147	0.531
매개변수의 평균 수렴시간 (sec)	0.730	0.725	0.740

$$y(k+k_{d,max}) = K_1 u_1(k) + B_1 \frac{u_1(k) - u_1(k-1)}{T_s} + K_2 u_2(k) + B_2 \frac{u_2(k) - u_2(k-1)}{T_s}$$

where  $K_1 = 450N/m$   $B_1 = 11Nsec/m$   
 $K_2 = 1050N/m$   $B_2 = 3Nsec/m$  (17)

$$y(k+k_{d,max}) = 11.450u_1(k) - 11.0u_1(k-1) + 4.050u_2(k) - 3.0u_2(k-1) \quad (N/mm)$$
 (18)

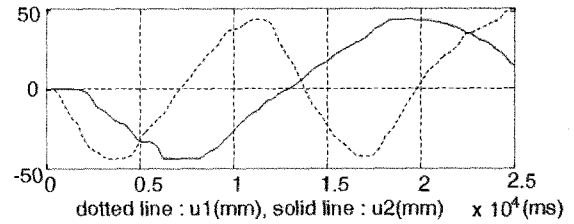
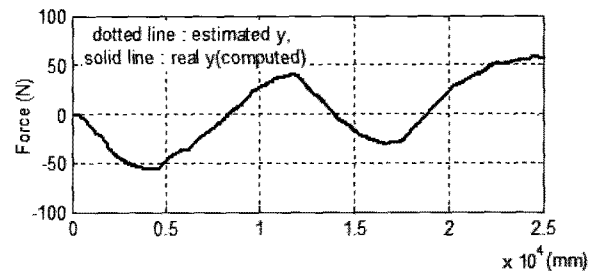
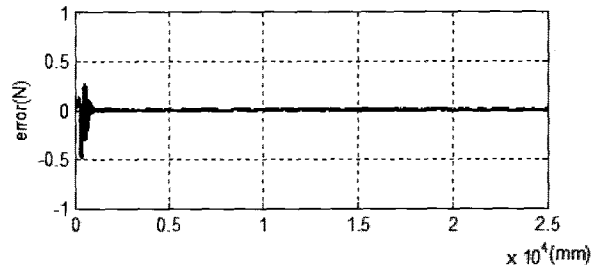


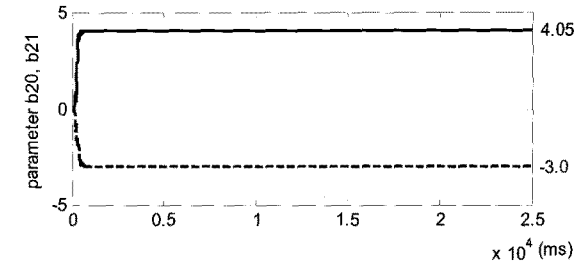
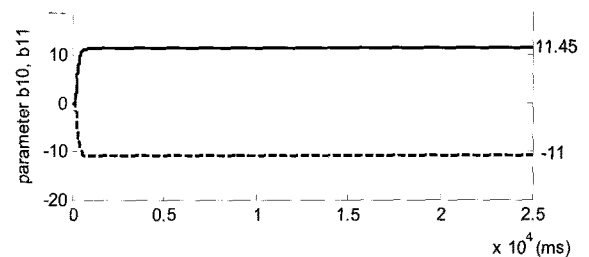
Fig. 15 Inputs for time



(a) 출력



(b) 추정오차



(c) 매개변수 추정

Fig. 16 Estimation efficacy of estimator model for model II with 2-dof when communication delay=200msec

그림 16(b)에서의 평균 추정 오차는 0.0040 N이다. 추정된 매개변수들은 그림 16(c)에서 보는 바와 같이 수식 (18)의 매개변수 값으로 정확히 수렴한다.

시뮬레이션을 시작한 시각부터 1.217 초 이후에는 추정된 매개변수 값과 실제 매개변수 값의 오차범위는 0.01이내가 된다. 매개변수를 정확히 추정하게 된 이후에는 최대 통신지연시간이 보상되며, 사용자는 실시간으로 가상물체와 직접 상호작용하는 것처럼 느끼게 된다. 제시된 추정기를 이용하면 다자유도의 경우에도 가상환경 속 물체의 임피던스를 실시간으로 정확히 추정할 수 있다. 따라서 통신지연 시간에 상관없이 현실감 높은 햅틱 렌더링이 가능하다.

#### 4. 결 론

변화하는 통신 지연시간 환경 속에서 원격지 가상물체와의 실시간 햅틱 렌더링 방법을 제시한다. 가상물체의 임피던스를 실시간으로 정확히 추정하고, 이 값을 이용함으로써 통신시간 지연을 보상하며 사용자에게 가상물체의 임피던스를 실시간으로 느끼게 해준다. 원격지에서의 가상 물체의 임피던스가 접촉 위치 또는 삽입 깊이에 따라 달라지더라도, 가상 물체의 임피던스를 실시간으로 정확히 추정하여 현실감 높은 역감을 사용자에게 전달해준다.

가상물체의 임피던스가 상수로 고정된 경우에는 200 msec의 비교적 큰 통신지연이 존재하더라도, 비교적 정확한 임피던스 값을 추정하는 데 소요되는 시간이 통신지연시간을 포함하여 0.9초미만이다. 그리고 입력에 따라 가상 물체의 임피던스가 실시간으로 변하는 경우에도, 임피던스를 정확히 추정하는데 소요되는 시간은 평균적으로 0.8초미만이다. 이때 최대통신지연의 영향은 거의 없다. 가상 물체의 임피던스를 정확히 추정하는 데 소요되는 시간이 매우 작기 때문에, 사용자는 통신지연에 의한 영향을 받지 않고 실시간으로 가상물체와 역감적으로 상호작용할 수 있다. 그리고 추정오차가 0.15 N 미만이기 때문에 사용자는 추정기를 통하더라도 가상물체의 임피던스를 실시간으로 느낄 수 있다. 특히, 입력에 백색잡음을 포함시킴으로써 매개변수 추정을 효과적이고 빠르게 수행할 수 있다.

다 자유도의 경우에는 추정해야하는 매개변수의 개수가 자유도만큼 증가하기 때문에 모든 매개변수들이 실제 임피던스의 매개변수 값으로 수렴하는

데는 그 만큼 많은 시간이 소요된다. 2자유도의 경우에는 200 ms의 최대 통신지연시간을 포함하여 약 1.2초의 시간이 소요되었다. 이는 1 자유도일 때에 비해 수렴이 필요한 소요시간이 1.5배 증가한 값이다. 그렇지만, 1.2초도 매우 작은 값이기 때문에 사용자가 실시간으로 가상물체의 임피던스를 느끼는데에는 영향이 거의 없다. 따라서 제시된 방법을 이용하면, 가상환경 속 물체의 임피던스를 알 수 없고 통신지연이 비교적 크게 발생하는 환경일지라도 사용자로 하여금 원격지 환경 속 물체의 강성, 점성과 같은 물성치를 실시간으로 느끼게 해줄 수 있다.

#### 참고문헌

1. C. R. Carignan and P. A. Olsson, 2007, "Cooperative Control of Virtual Objects over the Internet Using Force Reflecting Master Arms", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, New Orleans, LA, USA, pp. 1221~1226.
2. M. Clencross et al., 2007, "Effective Cooperative Haptic Interaction over the Internet", IEEE Int. Conf. on Virtual Reality, pp. 115~122.
3. E. A. Heredia, V. Kumar and T. Rahman, 1996, "Adaptive Teleoperation Transparency Based on Impedance Modeling", SPIE, Vol. 2901, pp. 2~12.
4. N. Diolaiti, C. Melchiorri and S. Stramigioli, 2004, "Contact Impedance Estimation for Robotic Systems", IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, pp. 2538~2543.
5. P. E. Dupont et al., 1999, "Automatic Identification of Environment Haptic Properties", Presence Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 8, No. 4, pp. 394~411.
6. Y. Zhuang and J. Canny, 2000, "Haptic Interaction with Global Deformation", IEEE Int. Conf. Robot. Autom., Vol. 3, April 24 - 28, pp. 2428~2433.
7. G. Picinbono, J. C. Lombardo, H. Delingette and N. Ayache, 2002, "Improving Realism of a Surgery Simulator: Linear Anisotropic Elasticity, Complex Interactions and Force

- Extrapolation", *Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol. 13, No. 3, pp. 147~167.
8. K. Lee and D. Y. Lee, 2007, "MIMO Output Estimation with Reduced Multirate Sampling for Real time Haptic Rendering", *IEEE Trans. Robotics*, Vol. 23, No. 3, pp. 481~493.