

힘 반향 원격제어 시스템의 투명성을 위한 네트워크 적응형 전송 기법

Network-adaptive Transport Scheme for Transparency of Force-reflecting Teleoperation

이석희, Seokhee Lee*, 서창훈, Changhoon Seo**, 류제하, Jeha Ryu**, 김종원, JongWon Kim***

요약 본 논문은 에너지 바운딩 알고리즘 (EBA: Energy Bounding Algorithm) 기반의 힘 반향 원격 제어 시스템의 투명성을 분석하고 이를 기반한 네트워크 적응형 전송기법을 제안한다. EBA 는 양방향 원격 조작의 안정성을 확보하는 알고리즘으로 시간지연의 크기와 변동 및 손실에 상관없이 양방향 원격 조작의 안정성을 보장한다. 하지만 네트워크 지연 및 손실에 의한 투명성 저하는 EBA 로 극복하기에는 한계가 있다. 따라서 효과적인 전송기법을 이용하여 투명성을 향상시킬 필요가 있다. 제안하는 투명성 분석은 네트워크 지연 및 손실에 따른 힘 피드백의 왜곡 현상을 수식화한다. 이를 기반으로 촉감 데이터 동기화 기법 및 전송률 제어 기법의 투명성을 향상시킨다. 조작자가 요구하는 투명성 요구 조건과 현재 네트워크 상황에 맞추어 투명한 촉감 상호작용을 위한 동기화 지연 시간과 전송되어야 하는 촉감데이터량을 결정한다. Matlab 시뮬레이션을 통해서 제안한 투명성 분석의 타당성을 검증하고 촉감데이터 동기화 기법 및 전송률 제어 기법의 투명성을 확인한다.

Abstract In this paper, a transparency analysis and network-adaptive transport scheme are proposed in order to improve transparency of EBA-based force-reflecting teleoperation. EBA guarantees stability of force-reflecting teleoperation over network delay and loss but has limitation that it cannot overcome transparency deterioration of haptic interactions. The proposed transparency analysis quantifies the force feedback distortion caused by network delay and loss. Based on the analysis, the proposed haptic data synchronization and transmission rate control schemes adapt synchronization delay and transmission rate to current network state for more transparent haptic interaction. Through Matlab/Simulink simulations, it is confirmed that the proposed analysis provides an acceptable quantification method about haptic interaction quality and that the proposed haptic data transport scheme effectively improves haptic interaction quality with respect to network delays and losses.

핵심어: *Force-reflecting teleoperation, haptic Interaction, stability, transparency, network-adaptive transport, synchronization, transmission control.*

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다 (계약번호 UD070018AD).

*주저자 : 광주과학기술원 정보통신공학과 박사과정 e-mail: shlee@nm.gist.ac.kr

**공동저자: 광주과학기술원 기전공학과 박사과정 e-mail: search@gist.ac.kr

**공동저자: 광주과학기술원 기전공학과 교수 e-mail: ryu@gist.ac.kr

***교신저자: 광주과학기술원 정보통신공학과 교수 e-mail: jongwon@nm.gist.ac.kr

1. 서론

촉각 및 로봇 기술의 발전과 네트워크의 급속한 보급으로 인해 힘 반향 원격 제어 시스템에 대한 관심이 증가하고 있다. 하지만 아직까지 최선형 방식의 인터넷상에서 현실감 있는 힘 반향 원격 제어 시스템을 구현하기 위해서는 안정성과 투명성 문제가 있다 [1]. 조작자가 사용하는 촉각 장비는 원격지에 있는 로봇과 폐회로를 형성한다. 따라서 네트워크 지연 및 손실이 존재하는 경우에 로봇 및 촉각 장비의 비정상적인 움직임이나 진동 형상과 같은 불안정성이 나타난다. 또한 사람의 촉각의 민감성에 의해 네트워크 상에 작은 변화(지연/손실/대역폭) 에도 조작자는 본래 느껴야 하는 촉감과 크게 다른 느낌을 받을 수 있다. [2]에서는 이를 투명성이 저하된다고 표현하고, 본래 느껴야 하는 촉감과 실제 사용자가 받는 촉감이 일치할 때 투명한 촉각 시스템이라 한다.

힘 반향 원격 제어 시스템의 안정성과 투명성을 향상 시키기 위해서 네트워크 상황에 강건한 제어 알고리즘에 관한 연구와 촉각 데이터(위치/속도/힘)를 효율적으로 전송하는 전송기법에 관한 연구가 병행되어왔다. Neimeyer 등은 웨이브 변수를 정의하고 속도 및 힘의 물리량 대신 웨이브 변수들을 전송하는 wave 변수를 제안하였다 [3]. Hannaford 등은 passivity observer 와 passivity controller 를 이용한 시간 도메인 수동성 알고리즘을 제안하였다 [4]. 하지만 정상상태 오차 및 고주파 진동 등의 단점들이 존재하고 안정성을 위해 투명성이 저해되는 문제점을 극복해야 한다. Lawrence 등은 투명성을 위해 속도와 힘을 모두 전송하는 4-채널 아키텍처를 제안하였다 [2]. Hirche 등은 wave 변수 기반의 힘 반향 원격 제어 시스템에서의 네트워크 지연과 사용자가 인지하는 힘과의 관계를 정립하여 투명성의 정도를 판단하는 기법을 제안하였다 [5].

힘 반향 원격 제어 시스템을 위한 네트워크 적응형 전송기법은 관련 네트워크 QoS 인수에 따라 세가지로 분류된다: 지연 및 지터 보상, 손실 제어, 그리고 전송률 제어 기법. 지연 관련 전송 기법은 주로 전송지연을 최소화하는 방향으로 연구되었다 [6-7]. Wongwirat 등은 촉각데이터의 네트워크 지터를 완화 하기 위해서 촉각 데이터 버퍼링 방법을 연구하였다 [8]. 하지만 버퍼링에 의한 불안정성 및 투명성 저하는 고려되지 않았다. 손실 조정 기법은 그 처리 지연을 최소화 하는 방향으로 연구가 진행되어왔다. LaMarche 등은 [7] 원격조작을 위한 손실 요구조건을 충족시키기 위한 TCP 기반의 원격 제어 계층을 제안하였다. STRON (supermedia transport over overlay networks) [6]은 ARQ 방식이 큰 종단간 지연을 유발하는 문제점을 해결하기 위해서 FEC 를 사용한다. 하지만 사용된 Reed-Solomon 코드 역시 큰 처리 지연을 유발하기 때문에 더 엄격한 QoS 요구조건을 가지는 응용을 위해서는 촉각 데이터에 특화된 손실 조정 방법이 필요하다. 또한 손실된 데이터에 의해 초래되는 불안정화

현상을 보상할 수 있는 데이터 복원 방법이 필요하다. 전송률 조절 기법은 크게 전송률을 감소 시키는 연구와 네트워크 혼잡을 제어하는 방법으로 나뉜다. Liu 등은 [9] 원격조작에 특화된 전송률 제어 기법을 제안하였다. 촉각데이터의 전송률 감소를 위한 방법으로 Hirche 등은 [5] wave 변수를 사용하는 원격 제어 시스템에서 dead-band 기반의 필터링 기법을 제안하였다. 하지만 필터링된 데이터는 네트워크 손실에 민감하므로 손실이 존재하는 네트워크 상에서는 별도의 손실 보상기법과 연동되어야 한다.

본 논문은 에너지 바운딩 알고리즘 (EBA: Energy Bounding Algorithm) [10]을 사용하는 힘 반향 원격 제어 시스템을 가정하고 네트워크 지연 및 손실에 대한 투명성 저하 정도를 분석한다. 또한 이를 기반으로 보다 현실감 있는 촉각 상호작용을 지원하기 위한 네트워크 적응형 전송기법을 제안한다. 제안하는 네트워크 적응형 전송기법은 다음과 같은 두 가지 특징을 가진다.

-투명성이 고려된 네트워크 적응형 촉각데이터 동기화 기법: 투명성 분석에 기반하여 허용 가능 손실 시간 및 최대 지연을 예측한다. 이를 기반으로 현재 네트워크 지연 변동 상황에서 보다 현실감 있는 촉각 상호작용을 위한 동기화 지연을 결정한다.

-네트워크 손실에 투명한 촉각 데이터 감소 기법: 데이터 예측 기법을 사용하여 보다 효율적으로 촉각 데이터의 전송률을 감소시킨다. 또한 실시간으로 네트워크 손실률을 모니터링하여 손실을 보상할 수 있는 부가 데이터를 보냄으로써 손실에 의한 투명성 저하를 완화한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 EBA 기반의 힘 반향 원격 제어 시스템에 대해서 소개한다. 3 절에서는 제안하는 투명성 분석 및 촉각 데이터 전송 기법을 설명한다. 4 장에서는 시뮬레이션 결과를 통해서 제안한 분석방법의 타당성 및 전송 기법의 투명성을 검증한다. 5 장에서는 본 논문의 결론 및 추후 과제에 대해서 논한다.

2. EBA 기반의 힘 반향 원격 제어 시스템

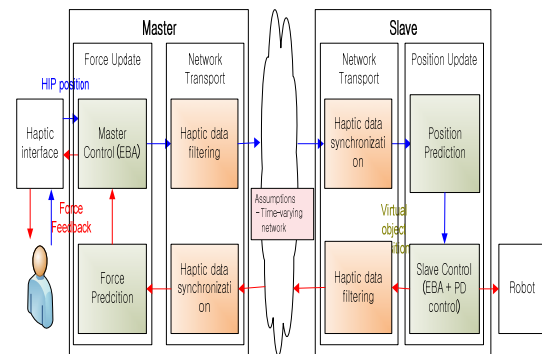


그림 1. EBA 기반의 힘 반향 원격 제어 시스템.

그림 1 은 EBA 기반의 힘 반향 원격 제어 시스템의 구조이다. EBA 는 시간지연 및 데이터 손실이 발생하는 양방향 원격 조작의 안정성을 확보하는 알고리즘이다. 수동성 이론을 기반으로 하여 샘플앤드홀더 (sample and holder)에서 발생하는 에너지를 촉감 장치의 에너지 소모 요소, 즉 댐핑 (damping)이 소모할 수 있는 에너지의 범위 이내로 제한하고 가상 환경 또는 통신 채널이 수동성을 만족하도록 한다.

마스터 측에서는 촉감 장비의 위치 (HIP: haptic interaction pointer) 정보 (x_m)를 슬레이브 측에 전송한다. 슬레이브 측에서는 PD 제어를 이용하여 슬레이브 로봇의 위치 (x_s)가 수신된 마스터의 위치 (x_{sd})를 추종하도록 하고 힘 정보 (F_s)를 마스터 측으로 전송한다. 네트워크 지연 및 손실은 촉감 장비 및 로봇의 의도되지 않은 불안정한 움직임 (i.e., 진동)을 유발한다. 따라서 마스터와 슬레이브 측에 각각 EBA 를 적용하여 네트워크 지연 및 손실에 상관없이 전체 시스템의 안정성을 확보한다 [10].

마스터와 슬레이브 측에서 사용되는 EBA 는 각각 제어 법칙과 제한 법칙으로 나누어 진다. 마스터 측은 수신된 슬레이브 측의 힘 정보 (F_{md})를 사용하여 조작자에게 다음과 같은 제어 법칙에 따라 힘 피드백 (F_{mEBA})을 제공한다.

$$F_{mEBA}(n) = F_{mEBA}(n-1) + \beta_m(n)\Delta x_m(n)$$

where

$$\beta_m(n) = \frac{F_{md}(n) - F_{mEBA}(n)}{\Delta x_m(n)} \quad \text{for } \Delta x_m(n) \neq 0$$

$$\Delta x_m(n) = x_m(n) - x_m(n-1)$$

조작자에게 제공되는 힘 피드백은 다음과 같은 제한 법칙에 따라서 안정성이 보장된다.

$$\text{if } \beta_m(n) > \beta_{m,\max}(n) \quad \text{then } \beta_m(n) = \beta_{m,\max}(n)$$

$$\text{if } \beta_m(n) < \beta_{m,\min}(n) \quad \text{then } \beta_m(n) = \beta_{m,\min}(n)$$

where

$$\beta_{m,\max}(n) = \min(c_{1m}, \gamma_{m,\max}(n)),$$

$$\beta_{m,\min}(n) = \gamma_{m,\min}(n),$$

$$c_{1m} = \frac{P_{MD}(n) + \varepsilon_{MD,0}}{\sum_{k=0}^{n-1} \Delta x_m^2(k+1)},$$

$$\gamma_{m,\max}(n) = c_{2m} - \frac{F_m(n-1)}{\Delta x_m(n)} + \sqrt{c_{2m}^2 + \left(\frac{F_m(n-1)}{\Delta x_m(n)}\right)^2},$$

$$\gamma_{m,\min}(n) = c_{2m} - \frac{F_m(n-1)}{\Delta x_m(n)} - \sqrt{c_{2m}^2 + \left(\frac{F_m(n-1)}{\Delta x_m(n)}\right)^2},$$

where c_{2m} is a positive constant.

슬레이브 측에서 사용되는 EBA 는 마스터 측에서 사용되는 EBA 와 유사하게 수행된다. 하지만 다음과 같이 x_m 대신에 로봇과 HIP 와의 위치 차이를 의미하는 e_s 를 사용한다 [10].

$$F_{sEBA}(n) = F_{sEBA}(n-1) + \beta_s(n)\Delta e_s(n)$$

where

$$\beta_s(n) = \frac{F_s(n) - F_{sEBA}(n)}{\Delta e_s(n)} \quad \text{for } \Delta e_s(n) \neq 0$$

$$\Delta e_s(n) = e_s(n) - e_s(n-1),$$

$$e_s(n) = x_{sd}(n) - x_s(n),$$

with the following bounding laws:

$$\text{if } \beta_s(n) > \beta_{s,\max}(n) \quad \text{then } \beta_s(n) = \beta_{s,\max}(n)$$

$$\text{if } \beta_s(n) < \beta_{s,\min}(n) \quad \text{then } \beta_s(n) = \beta_{s,\min}(n)$$

where

$$\beta_{s,\max}(n) = \min(c_{1s}, \gamma_{s,\max}(n)),$$

$$\beta_{s,\min}(n) = \gamma_{s,\min}(n),$$

$$c_{1s} = \frac{P_{SD}(n) + \varepsilon_{SD,0}}{\sum_{k=0}^{n-1} \Delta e_s^2(k+1)},$$

$$\gamma_{s,\max}(n) = c_{2s} - \frac{F_s(n-1)}{\Delta e_s(n)} + \sqrt{c_{2s}^2 + \left(\frac{F_s(n-1)}{\Delta e_s(n)}\right)^2},$$

$$\gamma_{s,\min}(n) = c_{2s} - \frac{F_s(n-1)}{\Delta e_s(n)} - \sqrt{c_{2s}^2 + \left(\frac{F_s(n-1)}{\Delta e_s(n)}\right)^2},$$

where c_{2s} is a positive constant.

비록 EBA 가 시간지연의 크기와 변동, 손실에 상관없이 양방향 원격 조작의 안정성을 보장한다고 하더라도 네트워크 변동으로 인한 투명성 저하 (i.e., 강성도 (stiffness)의 저하)를 극복하기에는 한계가 있다. 네트워크 지연으로 인한 촉감 데이터의 비순서화, 지연으로 인한 힘의 왜곡, 버스트 패킷 손실에 인한 점핑 현상 등을 해결하기 위해서 네트워크 전송 측면에서의 도움이 필요하다 (그림 1 참조). 특히 매 1ms 마다 발생하는 촉감 데이터를 효율적으로 전송하기 위해서는 촉감 데이터의 중요도를 구분하여 선택적으로 전송하는 필터링 기법이 필요하다.

3. 투명성을 고려한 네트워크 전송 기법

3.1. EBA 기반의 힘 반향 원격 제어 시스템의 투명성 분석

촉감데이터를 보다 투명성있게 전송 하기 위해서 네트워크 지연 및 손실과 투명성간의 관계를 분석한다. 본 논문에서 투명성은 슬레이브 측에서 로봇을 조정하기 위해 생성하는 힘 (F_{sEBA})과 마스터 측에서 조작자에게 제공하는 힘 피드백 (F_{mEBA})간의 유사성으로 정의된다. 투명성 분석을 단순화하기 위해 슬레이브 측의 로봇은 벽과 접촉되어 있고 조작자가 촉감 디바이스를 속도 (v_m)로 일정 거리만큼 벽을 향하여 움직여서 힘 피드백을 전달 받는 상황을 고려한다. 또한 네트워크 지연 및 손실은

슬레이브에서 마스터로 촉감 데이터가 전송될 때에만 적용된다고 가정한다.

네트워크 지연의 증가는 F_{mEBA} 의 감소를 유발한다. EBA 제어 법칙의 특징상 마스터는 슬레이브로부터 최초 힘 피드백 정보 ($F_{md}(1)$)를 받은 이후부터 F_{mEBA} 을 증가시키고 조작자가 촉감 디바이스를 움직이지 않는 시점부터는 F_{mEBA} 는 증가 하지 않는다. 시간 (T) 동안 증가하는 F_{mEBA} 의 증가분을 F_{in} 이라 정의하고 $c_{1m} \geq 2c_{2m}$ 이라 가정하면 F_{in} 은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} F_{in} &= \beta_m(n)Tv_m \\ &\approx \beta_{m,max}(n)Tv_m \\ &\approx \gamma_{m,max}(n)Tv_m \end{aligned}$$

$\gamma_{m,max}(n)$ 는 $F_m(n-1)$ 이 단조 증가 할 때 그림 2와 같이 c_{2m} 에 수렴한다. 따라서 네트워크 지연 (T_{delay})에 상응하는 F_{mEBA} 의 감소를 $F_{de, delay}$ 라 할 때 $F_{de, delay}$ 는 다음과 같이 근사화 된다.

$$F_{de, delay} = c_{2m}T_{delay}v_m.$$

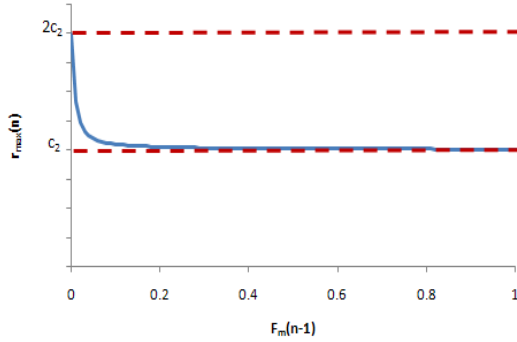


그림 2. $F_m(n-1)$ 의 증가에 따른 $r_{m,max}(n)$ 의 변화.

같은 방법으로 네트워크 손실에 대한 투명성 저하 정도를 살펴보면 다음과 같다. 네트워크 손실이 존재하는 시간을 T_{loss} 라 하면 해당 시간만큼 $F_{md}(n)$ 이 고정 값 (F_{loss})을 갖는다. 하지만 $F_{loss} - F_{mEBA}(n) = 0$ 이 되는 시간을 허용 가능 손실 시간 ($T_{al, loss}$)으로 정의하면, $F_{mEBA}(n)$ 는 $T_{al, loss}$ 동안 F_{in} 과 같이 증가한다. $T_{al, loss}$ 이후부터는 네트워크 지연이 존재 하는 경우와 같이 $F_{mEBA}(n)$ 의 변화가 없기 때문에 $T_{loss} - T_{al, loss}$ 시간 만큼 힘 피드백의 감소가 발생한다. 손실이 발생한 시점의 $F_{mEBA}(n)$ 을 $F_{mEBA, loss}$ 라 하면 T_{loss} 와 손실에 의한 힘 피드백의 저하 ($F_{de, loss}$)는 다음과 같다.

$$T_{al, loss} = \frac{F_{loss} - F_{mEBA, loss}}{c_{2m}v_m},$$

$$F_{de, loss} = c_{2m}(T_{loss} - T_{al, loss})v_m.$$

3.2. 투명성 분석에 기반한 네트워크 전송기법

본 논문에서는 투명성 분석을 통해서 촉감 데이터 동기화 기법 및 전송량 감소 기법의 성능을 증가시킨다. 투명성 분석을 통해 살펴본 바와 같이 촉감 데이터의 지연 및 손실은 힘 피드백의 저하를 유발한다. 기존의 네트워크 전송 기법은 네트워크 지연 및 손실을 완화하고 효율적인 전송을 지원하지만 큰 처리 지연으로 인한 힘 피드백의 저하를 유발한다. 따라서 조작자가 원하는 힘 피드백 정도 (F_{al})를 유지하면서 촉감 데이터의 지연 및 손실 정도를 조절하는 기법이 필요하다.

네트워크 지터를 보다 투명성있게 완화하기 위해서 동기화 지연 (버퍼링 시간)을 동적으로 적용 시키는 촉감 데이터 동기화 기법을 제안한다. 투명성 분석에 따르면 촉감 데이터 손실에 대한 허용 가능한 시간 범위 ($T_{al, loss}$)가 존재한다. 따라서 초기 동기화 지연은 최소로 설정하고 네트워크 지연의 증가에 따른 촉감 데이터 손실이 발생하는 경우 $T_{al, loss}$ 동안 동기화 지연을 현재 네트워크 지연만큼 증가시킨다. 큰 동기화 지연은 힘 피드백의 감소를 유발하므로 네트워크 지연이 감소하는 시점에서 동기화 지연을 점차적으로 줄여준다. 결과적으로 동기화 지연이 허용 가능한 중단간 지연 ($T_{al, delay}$)내로 수렴할 수 있도록 한다. 네트워크 지연 및 손실이 없을 때 조작자가 느낄 수 있는 최대 힘 피드백 (F_{max})가 계산 되면 $T_{al, delay}$ 는 다음과 같다.

$$T_{al, delay} = \frac{F_{max} - F_{al}}{c_{2m}v_m},$$

작은 처리 지연으로 네트워크 손실에 강건하게 촉감 데이터를 감소하기 위해서 우선순위 기반에 촉감 데이터 필터링 기법을 제안한다. HLI (haptic loss index)를 정의하고 각각의 촉감 데이터를 3 단계로 구분한다. 예측 가능하여 전송될 필요 없는 촉감 데이터는 $HLI=0$ 를 부여하고 예측 불가능 촉감데이터는 $HLI=2$ 를 부여하여 전송한다. 만약 네트워크 손실이 존재한다면 $HLI=2$ 인 촉감 데이터의 다음 k 개의 데이터들에 $HLI=1$ 를 부여하여 전송함으로써 손실된 $HLI=2$ 촉감 데이터를 복원할 수 있도록 한다. k 는 현재 네트워크 손실률과 허용 가능한 손실률 (α)에 따라서 다음과 같이 계산된다.

$$k = \operatorname{argmin}_{i \in \mathbb{N}} (P_i - \alpha)^2 (u(P_i) - \delta(P_i)),$$

$$P_i = \frac{(p \cdot (1 - q)^i)}{(p + q)},$$

$u(\cdot)$: unit step function,

$\delta(\cdot)$: unit impulse function,

P_i 는 $HLI=2$ 인 촉감 데이터와 i 개의 $HLI=1$ 촉감데이터가 모두 손실될 확률을 나타내고 p, q 는 각각 현재 패킷이 손실되지 않았을 때 다음 패킷이 손실될 확률과 현재

패킷이 손실되었을 때 다음 패킷이 손실되지 않을 확률을 나타낸다.

허용 가능한 네트워크 대역폭이 현재 네트워크 전송률을 수용하지 못하는 경우 추가적으로 HLI=1 촉감 데이터를 필터링한다. 네트워크 손실이 베르누이 모델 ($p+q=1$)을 따른다고 가정 하면 HDI=1 인 촉감 데이터를 j 개 필터링하는 경우 전체 데이터의 손실률 $P_{i,j}$ 는 다음과 같다.

$$P_{i,j} = jP_i^{\text{single}} + u(j-2)\frac{p^{(j+1)}q^j(1-q)^{(i-2j)}}{p+q},$$

$$P_i^{\text{single}} = \frac{p^2q(1-q)^{(i-2)}}{p+q} \quad (i \geq 2)$$

4. 시뮬레이션 결과

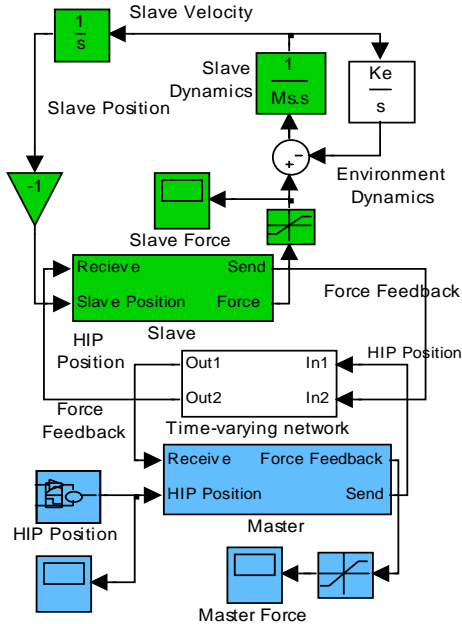


그림 3. EBA 기반의 힘 반향 원격 제어 시뮬레이션.

제한한 투명성 분석의 타당성과 촉감데이터 전송 기법의 유용성을 확인하기 위해서 Matlab/Simulink 기반의 시뮬레이션 환경을 구축하였다 (그림 3 참조). 슬레이브 측의 로봇과 벽은 각각 질량 ($M_s=0.5\text{Kg}$)과 스프링 ($K_e=20000\text{N/m}$)으로 단순화 되었고 PD 제어기는 비례이득만 200N/m 로 설정하였다. EBA 를 위해 필요한 변수 $c_{1m}, c_{2m}, c_{1s}, c_{2s}$ 는 각각 $1000\text{N/m}, 200\text{N/m}, 1000\text{N/m}, 200\text{N/m}$ 으로 설정되었다. 슬레이브 측 로봇은 벽에 접촉되어있는 것을 가정하고 마스터 측의 HIP 움직임에 따른 각각의 힘 피드백 (F_{sEBA}, F_{mEBA})을 비교 하였다.

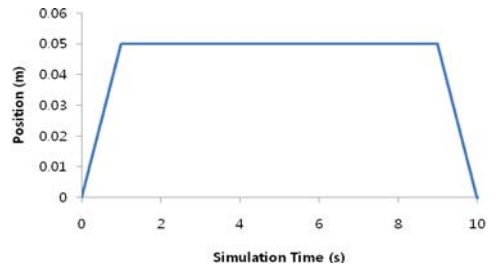


그림 4. HIP 위치 변화.

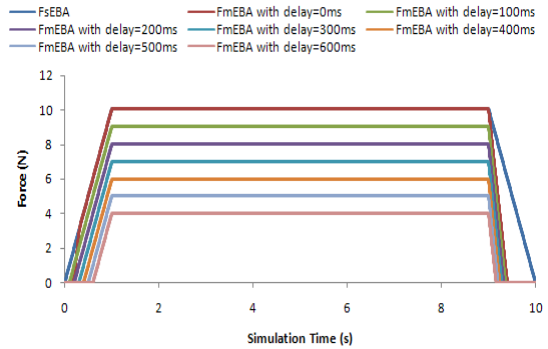


그림 5. 지연에 따른 F_{mEBA} 의 변화.

그림 5 는 지연관한 투명성 분석의 타당성을 검증한다. 그림 4 와 같은 마스터의 움직임을 생성하였을 때 위치가 증가할수록 로봇과 조작자에게 제공되는 힘 피드백 (F_{sEBA}, F_{mEBA})이 증가하고 마스터의 움직임이 없는 구간에서는 힘이 일정하게 유지된다. 제안된 투명성 분석을 통해 힘 피드백 감소를 예측하면 다음과 같다: $F_{de, \text{delay}} = 200(\text{N/m}) \cdot T_{\text{delay}}(\text{s}) \cdot 0.05(\text{m/s}) = 10 \cdot T_{\text{delay}}(\text{N})$. 즉, 지연이 100ms 증가할 수록 1N 의 힘 피드백 감소가 발생한다. 시뮬레이션을 통해 네트워크 지연을 100ms 씩 600ms 까지 증가 시켰다. 그림 5 를 통해 각각의 지연에서 F_{mEBA} 가 예측 값과 유사함을 알 수 있고, 이는 제안된 투명성 분석의 타당성을 입증한다.

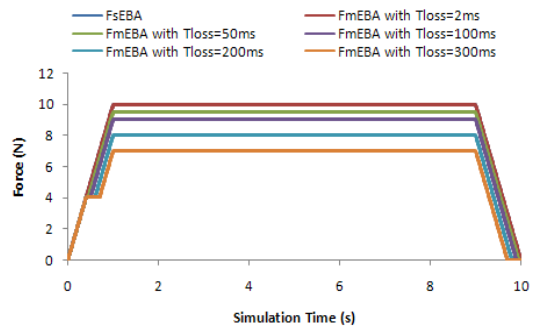


그림 6. 손실에 따른 F_{mEBA} 의 변화.

그림 6 은 손실에 관한 투명성 분석의 타당성을 검증한다. 마스터의 움직임은 그림 4 와 같고 손실 시간

(T_{loss})을 300ms 까지 증가 시켜 주었다. 손실이 시작된 시점은 마스터가 슬레이브로부터 $F_{md}(n)=4.016N$ 를 전송 받고 조작자에게 $F_{mEBA}(n)=3.993N$ 을 제공하였을 때로 고정하였다. 투명성 분석에 따르면 허용 가능한 손실 시간은 2ms ($T_{al,loss}=(4.016-3.993)/(200-0.05)=0.0023$ s) 이다. 손실에 따른 투명성 저하 $F_{de,loss}$ 는 다음과 같다: $F_{de,loss} = 200-0.05 \cdot (T_{loss} - T_{al,loss}) = 10 \cdot (T_{loss} - 0.002)$. 즉, 손실이 50ms 지속 됐을 때 0.48N 의 힘 저하를 유발한다. 이 예측 값은 그림 6 의 시뮬레이션 값을 통해 그 타당성이 검증될 수 있다.

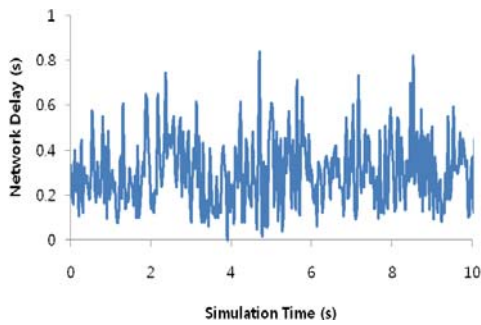


그림 7. 네트워크 지연 변동.

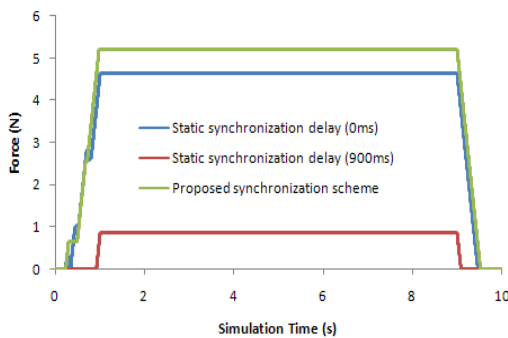


그림 8. 동기화 기법에 따른 F_{mEBA} 의 비교.

제한한 동기화 기법의 유용성을 살펴보기 위해서 다음과 같은 경우에서의 F_{mEBA} 를 비교하였다: 지연을 최소화 하기 위해서 동기화 지연을 사용하지 않는 경우 (늦게 도착한 데이터는 모두 손실로 간주), 손실을 최소화 하기 위해 최대 지연만큼의 고정 동기화 지연을 사용하는 경우, 그리고 제안된 동기화 기법을 사용하는 경우. 마스터의 움직임은 그림 4 와 같고 그림 7 과 같은 네트워크 지연 변동이 존재한다. 그림 8 의 시뮬레이션 결과에 따르면 데이터 손실을 감수하면서 지연을 최소화하는 것이 데이터의 손실을 막기 위해 동기화 지연을 크게 설정하는 것보다 더 투명한 힘 피드백을 지원하는 것을 알 수 있다. 제안된 동기화 기법은 조작자가 원하는 투명성 기준에 맞추어 지연과 손실간의 적절한 타협점을 찾음으로써 가장 투명한 힘 피드백을 제공할 수 있다.

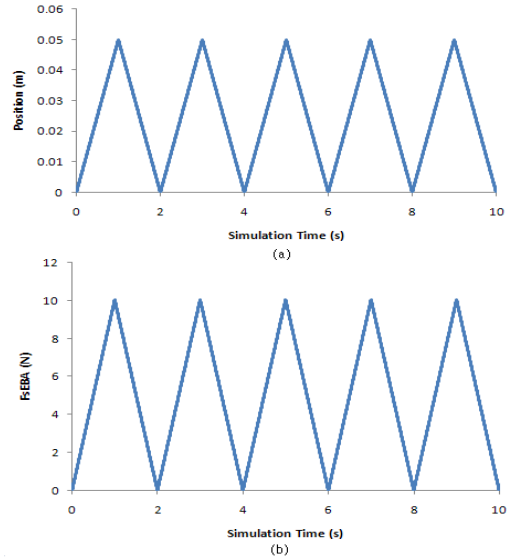


그림 9. 전송량 감소기법의 유용성을 확인하기 위한 (a) HIP 위치 변화 및 (b) 이에 따른 F_{sEBA} 변화.

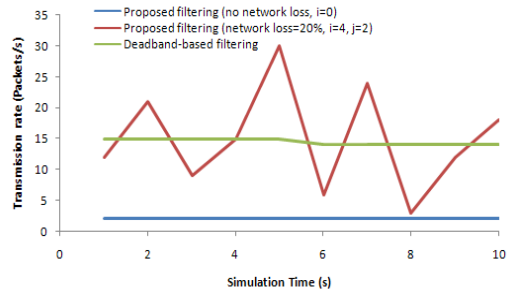


그림 10. 촉감 데이터 전송량 비교.

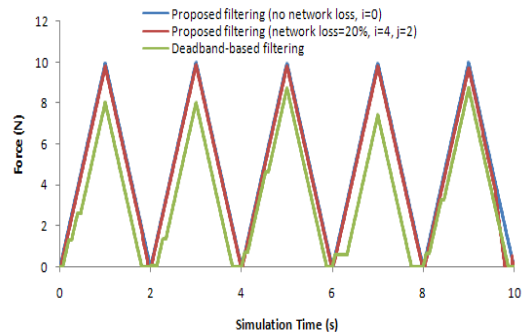


그림 11. 필터링 기법에 따른 F_{mEBA} 의 비교.

그림 11 은 제한한 우선순위 기반 필터링의 효율성 및 네트워크 손실에 대한 투명성을 보여준다. 마스터가 그림 9(a)와 같이 HIP 를 움직이고 필터링 기법을 사용하지 않는 경우 촉감 데이터의 전송률은 1000packets/s 라 가정한다. 우선순위 기반 필터링 기법은 네트워크 손실이 없을 때 단 2packets/s 의 전송률 만으로 그림 9(b)의 F_{sEBA} 변화와 유사한 F_{mEBA} 를 제공한다 (그림 11 참조). 네트워크 손실이

20% 존재하고 허용가능한 데이터 손실률이 1%라고 가정하면 우선순위 기반 필터링 기법은 한 개의 HLI=2 촉감 데이터 당 두 개의 HLI=1 촉감 데이터를 전송함으로써 그림 10 과 같이 평균 15 packets/s 의 전송률을 보인다. 네트워크 손실률의 증가로 인해 전송률이 증가하지만 그림 11 과 같이 네트워크 손실이 존재하더라도 그림 9(b)의 F_{sEBA} 변화와 유사한 투명한 F_{mEBA} 를 제공한다. 기존의 deadband 기반 필터링 기법을 사용하는 경우 임계값을 0.65N 으로 설정하면 그림 10 과 같이 우선 순위 기반 필터링과 유사한 15 packets/s 의 전송률을 제공할 수 있다. 하지만 deadband 기반 필터링 기법은 그림 11 과 같이 네트워크 손실에 민감하게 반응하고 심한 힘 왜곡 현상을 유발한다.

5. 결론 및 추후 과제

본 논문에서는 EBA 기반의 힘 반향 원격 제어 시스템의 네트워크 지연 및 손실에 관한 투명성을 분석하고 이를 기반으로 촉감 데이터 전송기법의 투명성을 향상 시키는 방법을 제안한다. 시뮬레이션을 통해서 제안한 투명성 분석의 타당성을 검증하고 촉감데이터 동기화 기법 및 우선 순위기반 필터링 기법의 유용성 및 투명성을 확인하였다. 추후 과제로 보다 다양한 촉감 상호작용에 적용하여 투명성 분석 및 전송 기법의 일반성 및 정확성을 높일 것 이다. 또한 실제 힘 반향 원격 제어 시스템에 적용하여 그 실용성을 검증할 것 이다.

참고문헌

- [1] P.F. Hokayem and M.W. Spong, "Bilateral teleoperation: An historical survey," *Automatica*, vol. 49, no. 12, 2006.
- [2] D.A. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, pp. 624-637, 1993.
- [3] G. Niemeyer and J.-J.E. Slotine, "Stable adaptive teleoperation," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, pp. 152-162, 1991.
- [4] B. Hannaford and J. H. Ryu, "Time domain passivity control of haptic interfaces," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 1, pp. 1-10, 2002.
- [5] S. Hirche, "Haptic telepresence in packet switched communication networks," Ph.D thesis, Technical University of Munich, 2005.
- [6] Z. Cen, M. W. Mutka, D. Zhu, and N. Xi, "Supermedia transport for teleoperations over overlay networks," in *Proc. of NETWORKING*, 2005

- [7] B. L. LaMarche, D. F. Hopkins, C. O. Hughes, T. McKenna, and E. W. Fulp, "A network layer for teleoperations in high speed environments," *INFOCOM High-Speed Networks Workshop*, May 11, 2007.
- [8] O. Wongwirat and S. Ohara, "Haptic media synchronization using time adjustment algorithm for noncollaborative telehaptics," in *Proc of IEEE International Conference on Mechatronics*, 2005
- [9] P. X. Liu, Q. M. Q.-H. Meng, P. R. Liu, and S. X. Yang, "An end-to-end transmission architecture for the remote control of robots over IP networks," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2005.
- [10] C. Seo, J. Kim, J.-P. Kim, J. H. Yoon, and J. Ryu, "Stable bilateral teleoperation using the energy-bounding algorithm: Basic idea and feasibility tests," *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2008)*, pp. 335-340, 2008.