파손성 강체 협조조작을 위한 촉각피드백 기반 다중사용자 햅틱 상호작용 시스템 구현

Multiuser Haptic Interaction System for Fragile Rigid-Body Collaborative Manipulation with Cutaneous Feedback

○김 명 신[1], 장 인 영, 이 용 석, 이 동 준[2*]
[1)] 서울대학교 기계항공공학부 (TEL: 02-8800-1690; E-mail: myungsinkim@snu.ac.kr)
[2)] 서울대학교 기계항공공학부 (TEL: 02-880-1724; E-mail: djlee@snu.ac.kr)

Abstract Haptic interaction with virtual objects based on finger motion, instead of 3DOF or 6 DOF stylus, recently receives much attention. Rendering finger motion in the virtual world can provide new user experience since many practical tasks in our daily life are carried out by finger motion, e.g., grasping or pushing. In this paper, we design finger motion based haptic interaction system for rigid-body collaborative manipulation by geographically-distributed multiple users. Peer-to-peer control architecture and passive consensus control are developed to provide instantaneous and consistent haptic experience for each user. Cutaneous haptic feedback is rendered through wearable haptic device to manipulate fragile rigid virtual object which motion space is SE(3) while preventing it from breaking down due to large grasping/pushing force. The preliminary experimental result is provided for the validation of the proposed multiuser haptic interaction system.

Keywords multiuser haptic interaction, peer-to-peer control architecture, cutaneous haptic feedback, rigid body collaborative manipulation

1. 서 론

지리적으로 분산된 원격 사용자들이 마치 한 공간에 있는 것과 같은 높은 수준의 공존감(copresence)을 느끼도록 하기 위해서는 시각, 청각뿐 아니라 물리력에 기반한, 즉 햅틱 피드백이 있는 상호작용이 가능해야 한다. 또한 강체의 조작은 일상에서 가장 빈번히 일어나는 물리적 상호작용으로 특별히 손의 움직임을 통한 자연스러운 강체 조작의 구현은 현실공간의 확장으로서의 가상공간 구현에 필수적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 인터넷을 통해 연결된 2인의 사용자간에 시간지연에도 안정한 피부촉각피드백(cutaneous haptic feedback) 기반 다중 원격 사용자 강체 협조조작 시스템을 구현하였고, 개발된 시스템의 유효성 검증을 위해 촉각 피드백이 중요한 파손성 강체의 조작 실험을 수행하였다.

2. 시각-촉각 피드백 시스템 구현

※ 본 연구는 2014 년도 BK21 플러스 사업, 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 <실감교류 인체감응 솔루션> 글로벌프론티어사업 (NRF-2013M3A6A3079227) 및 한국연구재단 연구과제 (2012-R1A2A2A0-1015797)의 지원으로 수행된 연구임.

본 연구에서 구현한 하드웨어 셋업은 그림 1과 같다. 먼저 촉각 햅틱장치(cutaneous haptic device, cHD)는 엄지와 검지 손끝에 착용하는 형태로 각각 피부에 국소적인 수직 및 수평방향의 접촉력을 전달해주며[4], 두 손가락을 이용한 강체 집기시 사용자에게 햅틱 피드백을 전달해 준다. 시각 정보 전달을 위한 장치로는 넓은 화각을 갖는 Oculus Rift® 헤드 마운트 디스플레이(HMD)를 사용하여 몰입감 있는 가상현실의 시각정보를 구현하였다. 사용자 손의 움직임 측정을 위해서는 Vicon Motion Caption System을 사용하여, 손바닥의 위치/자세 및 엄지/검지 손끝의 위치를 측정하여 손/손가락의 움직임 및 자세를 추정하였다.

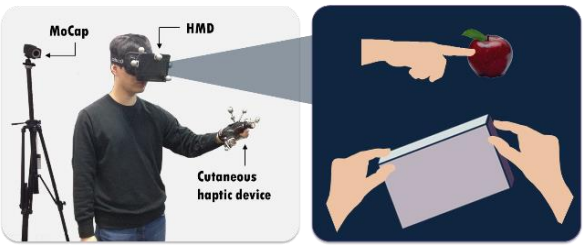

그림 1. MoCap, HMD, cHD 기반 시각-촉각 피드백 시스템.

3. 강체협조조작 P2P 제어구조 및 안정한 일치 제어기법설계

지리적으로 분산된 원격사용자들 사이에는 필연적으로 통신시간지연이 발생하게 된다. 이 시간지연은 시스템을 불안정하게 만드는 요인을 뿐 아니라, 시각 및 촉각 피드백의 지연을 일으켜 사용자의 강체 집기조작 혹은 사용자들 사이의 강체 협조조작을 어렵게 하는 요소가 된다. 본 연구에서는 통신 시간지연에 상관없이 각 로컬사용자에게 즉각적인 시각 및 촉각 피드백이 가능한[5] 그림 2와 같은 P2P (peer to peer) 제어구조를 설계하였다.

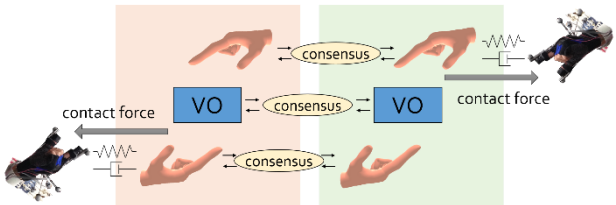

그림 2. 2 인 사용자간 강체협조조작 제어구조.

그림 2의 제어구조에서 각 사용자는 자신의 손 및 원격사용자의 손을 나타내는 가상 프록시와 공유하는 강체로 이루어진 가상공간을 시뮬레이션 하며, 가상공간의 복사 강체들 사이의 정합을 위해 위치 $\boldsymbol{x}_k^i$ 와 SO(3) 회전행렬 $\boldsymbol{R}_k^i$에 대해서 다음의 P형식의 일치제어기(consensus control)를 설계하였다.

$$\boldsymbol{\tau}_k^i = \begin{bmatrix} -\boldsymbol{b}_t \hat{\boldsymbol{v}}_k^i - \boldsymbol{K}_t \left(\hat{\boldsymbol{x}}_k^i - \hat{\boldsymbol{x}}_{k-N_j}^j \right) \\ -\boldsymbol{b}_r \hat{\boldsymbol{\omega}}_k^i + \boldsymbol{K}_r \log\left(\boldsymbol{R}_k^i \boldsymbol{R}_{k-N_j}^{j,T} \right) \end{bmatrix} \qquad (1)$$

여기서 $\hat{\star}$는 수동적 적분기법[2]의 표현법이고, log는 so(3) exponential의 inverse이다. 또한, $\mathbf{b_t}, \mathbf{b_r}$은 강체의 병진 및 회전운동의 댐핑, $\mathbf{K_t}, \mathbf{K_r}$의 병진 및 회전운동의 P제어이득이다. $\mathbf{N_j}$는 j 사용자로부터 오는 신호의 인덱스 된 시간지연을 나타내는 것으로 PSPM[1] 알고리즘을 SE(3) 강체로 확장 적용하여 통신 시간지연에도 안정성을 확보하였다.

그림 3. 파손성 강체 조작작업 개념도 및 실험모델

4. 예비실험: 파손성 강체 조작

제안된 촉각 피드백 기반 다중 원격사용자 강체 협조조작시스템의 유효성을 확인하기 의해, 그림 3과 같은 파손성 강체(컵)의 조작 실험을 실시하였다. 피실험자 5인의 시간지연에 따른 10회 시도 중 작업 성공률(%) 및 작업완료시간(s)을 측정하였고, 그림 4와 같이 통신시간이 20ms에서 500ms로 증가함에 따라 작업성공률이 감소하고 작업에 소요되는 시간이 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 다양한 통신 시간지연에도 안정한 집기조작이 가능함을 확인할 수 있었다.

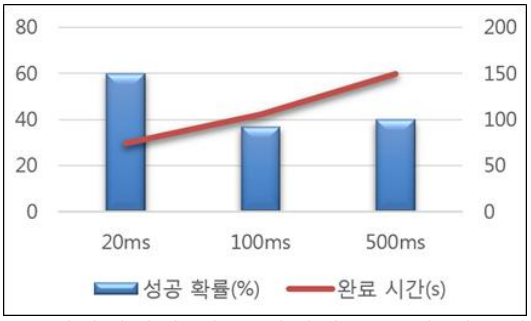

그림 4. 시간지연에 따른 작업성공률 및 완료시간.

5. 결 론

본 연구에서는 다중 원격 사용자간 강체 협조조작을 위한 피부촉각 피드백에 기반한 햅틱 상호작용 시스템을 구현하고, 통신 시간지연에도 안정한 일치제어기법을 개발하였다. 또한 개발된 시스템의 유효성을 검증하기 위한 파손성 강체 집기조작실험을 수행하였다. 향후 연구는 시간지연에도 작업성공률을 높이기 위한 P2P제어구조의 성능해석 및 최적화와 2인사용자간의 협조조작의 성능평가를 수행할 계획이다.

참고문헌

[1] D. J. Lee and K. Huang, “Passive-Set-Position-Modulation Framework for Interactive Robotic Systems,” IEEE Transactions on Robotics, vol. 26, no. 2, pp. 354–369, 2010.

[2] D. J. Lee, M. Kim and T. Qiu, “Passive Haptic Rendering and Control of Lagrangian Virtual Proxy,” In Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 64-69, 2012.

[3] I. Jang and D. J. Lee, “On Utilizing Pseudo-Haptics for Cutaneous Fingertip Haptic Device,” In Proc. of Haptics Symposium, pp. 635-639, 2014.

[4] J. Marsh, M. Glencross, S. Pettifer, and R. Hubbold, “A network architecture supporting consistent rich behavior in collaborative interactive applications,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 12, no. 3, pp. 405–416, May 2006.