

컨택트 작업 시 햅틱 인터랙션의 투명성 향상을 위한 Virtual Coupling 기법의 설계

Toward Transparent Virtual Coupling for Haptic Interaction during Contact Tasks

김 명 신¹, 이 동 준[†]

Kim Myungsin¹, Lee Dongjun[†]

Abstract Since its introduction (e.g., [4, 6]), virtual coupling technique has been de facto way to connect a haptic device with a virtual proxy for haptic rendering and control. However, because of the single dependence on spring-damper feedback action, this virtual coupling suffers from the degraded transparency particularly during contact tasks when large device/proxy-forces are involved. In this paper, we propose a novel virtual coupling technique, which, by utilizing passive decomposition, reduces device-proxy position deviation even during the contact tasks while also scaling down (or up) the apparent inertia of the coordinated device-proxy. By doing so, we can significantly improve transparency between multiple degree of freedom (possibly nonlinear) haptic device and virtual proxy. In other to use passive decomposition, disturbance observer of [3] is adopted to estimate human force with some dead-zone modification to avoid “winding-up” force estimation in the presence of device torque saturation. Some preliminary experimental results are also given to illustrate efficacy of the proposed technique.

Keywords: virtual coupling, passive decomposition, transparency, contact task, multi-link virtual proxy, passivity, disturbance observer

1. 서론

Virtual coupling^[1,4,6]은 그 구조가 간단하고 직관적으로 사용이 가능하기 때문에 햅틱장비와 가상공간의 프록시 사이의 제어를 위해 광범위하게 사용되는 기법이다. 이 기법과 관련된 적용과 보다 자세한 이론적 결과들은^[5,11-13,15,22]에서 찾아볼 수 있다. 그러나 그 사용의 광범위함과 햅틱 분야에서의 지배적인 존재감에도 불구하고, virtual coupling 기법은 가상물체와의 컨택트 작업 시에 투명성의

저하를 겪게 되는데, 이는 virtual coupling 기법이 전적으로 스프링-댐퍼의 피드백 작용으로 이루어져 있고 피드포워드 제어를 통한 사람의 작용힘과 가상 프록시에 작용하는 접촉힘의 상쇄가 이루어지지 않기 때문이다. 이상적인 투명성^[24]은 햅틱장비와 가상의 프록시 사이의 완벽한 위치정합제어와 위치정합이 이루어졌을 때의 겉보기 관성이 없을 때 얻어지는데, virtual coupling 기법은 가상공간의 접촉힘을 생성하기 위하여 항상 위치정합오차를 필요로 하게 된다.

이 논문은 햅틱 인터랙션에서 virtual coupling 기법의 투명성(transparency)을 향상시키는 데에 있다. 특별히 질점(point mass)의 가상 프록시^[1,5,6,15]에 비해 훨씬 다양한 햅틱인터랙션을 가능케 하는 비선형 라그랑지 동역학을 갖는 다자유도 가상 프록시^[17]를 통한 햅틱 인터랙션의 경우를 고려한다. 이러한 다자유도 라그랑지 프록시는 그의 끝점뿐 아니라 링크의 임의 위치에서의 접촉을 구현할 수 있

Received : May 30, 2013; Reviewed : Jun. 25, 2013; Accepted : Jul. 25, 2013

※ This work was supported by the Global Frontier R&D Program on <Human-centered Interaction for Coexistence> funded by the National Research Foundation of Korea grant funded by the Korean Government (MSIP) (NRF-2012M3A6A3055698)

¹ Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University (myungsinkim@snu.ac.kr)

[†] Corresponding author: Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Kwanak-Ro 566, Kwanak-Gu, Seoul, Korea (djlee@snu.ac.kr)

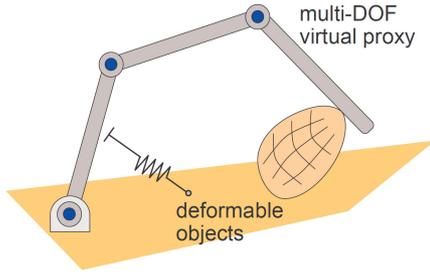


Fig. 1. Multi-DOF Lagrangian virtual proxy^[17]

다. (Fig. 1) 이와 같은 비선형 다자유도 프록시와 햅틱 디바이스의 위치정합제어를 위하여, 이 논문에서는 *passive decomposition*^[18,19] 기법을 도입하여 추가적인 피드포워드 제어를 설계하였다. 그렇게 함으로써 컨택트 시에 위치정합오차를 효과적으로 줄여주며, 동시에 위치정합을 이룬 디바이스와 프록시의 겹보기 관성을 감소시켜(경우에 따라서 증가) *virtual coupling*을 통한 햅틱 인터랙션의 투명성을 향상시켰다.

이를 위해, 먼저, *passive decomposition*^[18,19] 기법을 연속시간(continuous-time)의 햅틱 디바이스와 이산시간(discrete-time)의 가상 프록시 사이의 혼합시간(hybrid-time) 인터페이스 문제로 확장하여, 디바이스와 프록시의 동역학을 위치정합양상을 나타내는 *shape system*과 결합된 동역학을 나타내는 *locked system*으로 나눈다. 그 후, *shape system*에 대하여, 위치정합 오차를 발생시키는 사용자와 가상현실로부터 프록시가 받는 힘을 상쇄시키며 *shape system*의 configuration(마스터와 슬레이브의 위치정합양상)을 0으로 수렴시키는 제어를 설계하였다. 그와 함께 *locked system*에 대한 사용자와 가상현실의 힘을 적절히 증가(혹은 감소)시킴으로 정합제어된 *locked system*의 겹보기 관성을 조절하는 제어를 설계하였다.

그러나 상술한 바와 같이 고안된 제어기법은 사용자와 가상현실의 힘 정보를 필요로 한다. 가상현실의 컨택트힘은 언제나 측정할 수 있는 반면, 사용자의 힘 정보는 대부분의 상용 햅틱 디바이스(예를 들면, Force Dimension Omega3®, Geomagic Phantom Omni®, Novint Falcon®)에서 사용이 불가능하다. 이 문제를 해결하기 위하여, 참고 문헌 [9]에서와 같이, 외란관측기^[3]를 도입하였고, 이를 통해 제안된 제어기법을 위한 사용자의 힘 정보를 힘센서 없이 추정하여 사용하였다. 또한 디바이스의 포화(saturation)으로 인한 외란관측 정보의 “winding-up” 효과를 완화하기 위한 “dead zone” 기법^[23] 또한 사용되었다. 이와 함께, [7]

과 같이 임펄스 힘 발생기법을 도입하여 컨택트 시에 사용자의 역할을 향상시킬 수 있었다.

외란관측기법은 원격제어와 햅틱스를 다룬 많은 다른 연구들^[8,9,14,20]에서도 도입되었다. 그러나, 대부분의 연구에서 내부추간 연결에 의한 동적 효과나 마찰 등의 원치 않는 외력을 상쇄해주기 위해 사용되었고, 본 연구에서처럼 사용자의 힘을 측정하기 위한 사용은 많지 않았다. 한편, [9]에서 본 연구에서 사용된 것과 같은 형식의 외란관측기법^[3]이 사용자의 힘 추정을 위하여 도입되었으나 1자유도 질점형식 프록시와의 햅틱 인터랙션에 대해 사용되었고, 그러므로 본 연구에서 사용된 것과 같은 다자유도 비선형 프록시에 대한서의 확장 및 적용은 분명치 못한 면이 있었다.

본 논문의 구조는 다음과 같다. 먼저 [17]에 기술된 다자유도 비선형 프록시와의 *virtual coupling* 기법의 소개와 그의 한계점을 2장에서 기술하였다. 또한 같은 장에서 *passive decomposition*을 간략히 요약하였다. 3장에서는 *passive decomposition*을 통한 새로운 *virtual coupling* 제어기법을 설계하고, 변수들의 불확실성이 고안된 제어기법에 미치는 영향을 분석하였다. 사용자의 힘 정보를 추정하기 위한 알고리즘과 디바이스의 포화로 인한 효과를 다루기 위한 기법 또한 3장에 기술되었다. 4장에서는 제안된 기법의 성능을 판별하기 위한 예비실험 및 결과를 제시하였고, 그에 따른 결론을 5장에 기술하였다.

2. 이론적 배경

2.1 virtual coupling 기법과 한계

일반적인 *virtual coupling* 기법은 소위 *virtual spring*과 *virtual damper*라고 불리는 운동학적 피드백으로만 구성된다. 이러한 *virtual coupling* 기법은 연속시간의 햅틱 디바이스(HD)와 이산시간의 가상 프록시(VP) 사이를 연결하는 혼합시간의 제어기법이다. 이 장에서는 [17]에서 운동학적으로 비슷한 다자유도 비선형 라그랑지 HD와 VP에 대해서 고안된 *virtual coupling* 기법을 살펴보도록 한다.

$T_k = t_{k+1} - t_k > 0$ 이라고 할 때, 시간 $t \in [t_k, t_{k+1})$ 에서 HD의 제어입력 $\tau(t) \in R^n$ 와 VP의 제어입력 $\tau_k \in R^n$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \tau(t) &:= -b_d \dot{y}(t) - B_{vc} \left(\frac{y_k - y_{k-1}}{T_{k-1}} - \hat{v}_{k-1} \right) - K_{vc} (y_k - x_k) \\ \tau_k &:= -b_v v_k - B_{vc} \left(\hat{v}_k - \frac{y_k - y_{k-1}}{T_{k-1}} \right) - K_{vc} (\hat{x}_k - y_k) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $x_k, v_k \in R^n$ 은 각각 VP의 configuration과 속도이고, $y(t) \in R^n$ 는 HD의 configuration이며 $y_k \in R^n$ 는 시간 t_k 에서 $y(t)$ 를 샘플 추출한 값이다. 한편 $B_{vc}, K_{vc} \in R^{n \times n}$ 는 각각 virtual coupling의 댐핑과 스프링 상수를 의미하며, $b_d, b_v \in R^{n \times n}$ 은 각각 HD의 물리적인 최소 댐핑과 가상 공간상에서의 VP의 댐핑을 나타낸다.

[17]에서는 VP의 안정적인 렌더링을 위하여 non-iterative passive mechanical integrator (NPMI^[16])를 사용하였다. NPMI는 VP 시뮬레이션의 이산시간 수동성 (discrete-time passivity)를 보장하여, 디바이스와 시뮬레이션 루프를 완벽히 분리시킨다^[2]. 다시 말하여, NPMI를 이용하여 디바이스 샘플링 속도나 댐핑에 상관없이 VP의 파라미터들을 결정할 수 있다. 이 적분기법은 암시적 적분기법이나 반복계산을 필요로 하지 않아 이산시간 수동성을 보장할 뿐 아니라 햅틱 인터랙션에 알맞게 빠르게 풀 수 있다. 한편, NPMI의 적분 방법과 “대표” 속도

$\hat{v}_k := \frac{v_{k+1} + v_k}{2}$ 와 함께 식 (1)의 b_v 항이 이산시간영역의 댐핑으로서 작용하게 된다. 비슷한 방법으로 NPMI의 “대표” configuration $\hat{x}_k := \frac{x_{k+1} + x_k}{2}$ 또한 식 (1)에서 수동성을 강화하게 된다. 이 수동적 적분기법인 NPMI에 관하여, 보다 자세한 설명은 [16,17]을 통하여 확인할 수 있다.

한편, 비록 NPMI^[17] 기법이 비선형 라그랑지안 VP의 이산시간 수동성을 보장하지만 (1)의 virtual coupling에서 HD와 VP사이의 몇몇 연결들에 시간지연이 존재하므로 다음과 같은 Colgate-like 수동성 조건을 얻을 수 있다^[17]:

$$\begin{aligned} b_d &\geq B_{vc} \left(1 + \frac{T_k}{T_{k-1}}\right) + K_{vc} T_k \\ b_v &\geq \frac{B_{vc}}{2} \left(\frac{T_k}{T_{k-1}} - 1\right) + \frac{K_{vc} T_k}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

이 조건은 햅틱 인터랙션의 투명성 향상을 위하여 (1)의 virtual coupling 이득 B_{vc}, K_{vc} 를 무한히 증가시킬 수 없음을 의미하며, 그 최대값 또한 디바이스 댐핑 b_d 와 VP의 댐핑 b_v 에 의해 제한됨을 뜻한다. 만약 외력이 없다면, 조건 (2)를 통하여, $x_k - y_k \rightarrow 0$ 의 수동적인 마스터와 슬레이브 사이의 위치정합제어를 얻을 수 있다.

이제, VP가 가상의 물체(예를 들어, 가상의 벽)와 접촉하고 있는 경우를 생각해 보자. 이 경우, 사용자는 VP와

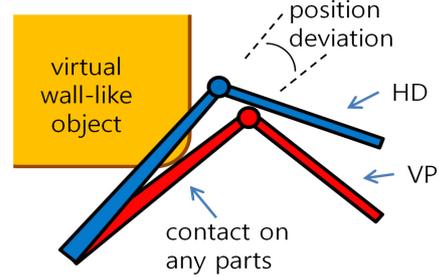


Fig. 2. Virtual coupling necessitates position-deviation to produce haptic feedback

가상 물체 사이의 컨택트힘을 그대로 느끼길 원할 것이다. 그러나 사용자에 대한 햅틱 피드백은 HD와 VP 사이의 스프링 변형과 댐핑에 의해서만 생성이 되므로, 속도가 작다면 주로 스프링 변형에 의해서 힘이 생성되게 된다. 대부분의 컨택트에서 HD와 VP의 속도차이는 작으므로 이는 햅틱 인터랙션의 투명성을 저하시키는 위치정합오차가 컨택트 상황에서 언제나 발생함을 의미하게 된다. (Fig. 2)

이러한 HD와 VP사이의 위치오차는 virtual coupling 기법의 햅틱 피드백 생성이 온전히 운동학적 관계에 의존하기 때문에 발생한다. 물론 보다 큰 스프링 이득 K_{vc} 를 통하여 투명성의 향상을 생각해 볼 수 있지만, 이는 수동성 조건 (2) 및 그 성질상 한계가 분명함을 알 수 있다. 그러므로 상기한 방법대신 본 논문에서는 passive decomposition^[18,19]를 이용하여, 다자유도 VP와 HD의 비선형 동역학을 고려한 적절한 피드포워드 제어를 설계하였다.

2.2 passive decomposition 기법^[18,19]

Passive decomposition의 핵심내용은 오픈 루프의 수동성을 보존하면서 2n자유도의 비선형 라그랑지안 다이나믹스를 두개의 n자유도 shape system과 locked system으로 분리하는 데에 있다. 마스터와 슬레이브의 관계에 있어서 shape system은 위치정합양상을 나타내며, locked system은 위치정합된 마스터와 슬레이브의 전반적인 움직임을 나타낸다. 이 passive decomposition기법은 [18]에서 성공적으로 비선형 원격제어 문제에 적용되었다. 본 장에서는 [18]에서 소개된 원격제어에 적용된 passive decomposition을 간략히 살펴봄과 3장에서는 이 결과를 다자유도 비선형 HD와 VP의 혼합시간 햅틱 인터랙션으로 확장하도록 한다.

우선, 다음의 두개의 n자유도 비선형 라그랑지안 마스

터 및 슬레이브의 원격조작장치를 고려해보자:

$$M_1(q_1)\ddot{q}_1 + C_1(q_1, \dot{q}_1)\dot{q}_1 = T_1 + F_1 \quad (3)$$

$$M_2(q_2)\ddot{q}_2 + C_2(q_2, \dot{q}_2)\dot{q}_2 = T_2 + F_2 \quad (4)$$

$q_i, T_i, F_i \in R^n$ 은 각각 마스터($i=1$)와 슬레이브($i=2$)의 configuration, 제어 입력, 그리고 사용자/환경과의 상호작용 힘을 나타낸다. $M_i(q_i) \in R^{n \times n}$ 은 대칭(symmetric)이고 양으로 정의(positive definite)되는 관성행렬이고 $C_i(q_i, \dot{q}_i) \in R^{n \times n}$ 은 코리올리 행렬로서 $M_i(q_i) - 2C_i(q_i, \dot{q}_i)$ 가 반대칭(skew symmetric)임이 잘 알려져 있다. 위의 행렬들의 성질들로부터 다음의 수동성을 갖게 되는데, 모든 시간 $T \geq 0$ 에 대해,

$$\int_0^T [F_i + T_i]^T \dot{q}_i dt = \kappa_i(T) - \kappa_i(0) \geq -\kappa_i(0)$$

을 만족한다. 여기서 $\kappa_i(t) = \frac{1}{2} \dot{q}_i^T M_i(q_i) \dot{q}_i$ 로 에너지의 저장량을 나타내며, $i = [1, 2]$ 로 각각 마스터와 슬레이브를 나타낸다.

식 (3)-(4)의 마스터 슬레이브 원격제어장치에 대한 passive decomposition은 $q_E := q_1 - q_2, v_E := \dot{q}_E$ 라 할 때, [18]에서 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{pmatrix} v_L \\ v_E \end{pmatrix} = S(q) \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} I - \phi(q) & \phi(q) \\ I & -I \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서 $v_L, v_E \in R^n$ 은 각각 shape system과 locked system의 속도이며, $S(q) \in R^{2n \times 2n}$ 은 비특이(nonsingular) 분해 행렬이며, $\phi(q) := [M_1(q_1) + M_2(q_2)]^{-1} M_2(q_2)$ 이다. 식 (5)와 함께 성립되는 제어입력(T_i)과 사용자/환경 힘(F_i)에 대한 변환이 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} T_L \\ T_E \end{pmatrix} = S^{-T} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} F_L \\ F_E \end{pmatrix} = S^{-T} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

T_L, T_E, F_L, F_E 는 각각 locked system과 shape system에 대한 제어입력 및 외력을 나타낸다.

식 (5)와 (6)의 정의를 이용하여 식 (3)과 (4)의 2n자유도 마스터-슬레이브 동역학을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M_L \dot{v}_L + C_L v_L + C_{LE} v_E = T_L + F_L \quad (7)$$

$$M_E \dot{v}_E + C_E v_E + C_{EL} v_L = T_E + F_E \quad (8)$$

식 (7)과 (8)은 각각 locked system과 shape system의 동역학을 정의하며, 여기서 $M_L(q) := M_1(q_1) + M_2(q_2)$ 로, $M_E(q) := \phi^T M_1 \phi + [\phi^T - I] M_2 [\phi - I]$ 로 각각 정의되는 관성행렬이다. 각각의 M_L, M_E 는 대칭 및 양의 행렬이며, $\dot{M}_L - 2C_L, \dot{M}_E - 2C_E$ 가 반대칭의 성질을 갖는다(즉, locked system과 shape system이 각각 수동성을 만족한다). 또한 $C_{LE} v_E, C_{EL} v_L$ 이 반대칭으로 locked-shape 커플링 또한 수동성을 만족한다(즉, $C_{EL} + C_{LE}^T = 0$). 이와 관련된 보다 자세한 사항은 [18,19]을 참고하라.

[18]에서 위의 식 (7)과 (8)의 locked system과 shape system에 대한 제어가 다음과 같이 설계되었다.

$$T_L := C_{LE} v_E + \frac{1-\eta}{\eta} F_L \quad (9)$$

$$T_E := C_{EL} v_L - K_v v_E - K_p q_E - F_E \quad (10)$$

제어입력 (9)와 (10)의 첫 번째 항은 식 (7)과 (8)의 locked-shape 커플링을 제거하기 위한 제어입력이고, $K_v, K_p \in R^{n \times n}$ 은 대칭성을 갖는 양의 행렬로서 위치정합오차를 일으키는 외력을 상쇄하기 위한 F_E 와 함께 shape system을 원점 $q_E = q_1 - q_2 \rightarrow 0$ 로 안정화시키는 템핑과 스프링 이득이다. 그리고 $\eta > 0$ 은 위치정합된 마스터-슬레이브 시스템의 걸보기 관성 M_L 을 조절하는 항으로써 T_L 을 이용한 locked system을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta \cdot [M_L(q) \dot{v}_L + C_L(q, \dot{q}) v_L] = F_L \quad (11)$$

만약 $\eta < 1$ 이라면 전체 걸보기 관성은 실제보다 작아지게 된다. 다음 3장에서는 위의 passive decomposition에 기반한 제어 (9)-(10)을 확장하여 연속시간의 햅틱 디바이스와 이산시간의 가상 프록시 사이의 virtual coupling 기법의 투명성을 향상시키기 위한 방법을 제시하였다.

3. Passive Decomposition을 이용한 투명한 Virtual Coupling 기법의 설계

앞서의 2.2장과는 다르게 햅틱 시스템은 연속시간의 햅틱 디바이스(HD)와 이산시간의 가상 프록시(VP)로 이루어

어진 혼합시간의 시스템이다. 본 연구에서는 HD를 n 자유도의 비선형 라그랑지안 동역학 (3)으로 모델링하였고, (Fig. 1) 마찬가지로 n 자유도 라그랑지안 VP를 NPMI기법을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 상술하자면, n 자유도 동역학 식 (4) 를 모사하기 위한 VP의 NPMI 표현식이 [17]에 의해 다음과 같이 주어진다. 시간 $T_k := [t_k, t_{k+1})$ 동안,

$$I \frac{\nu_{2,k+1} - \nu_{2,k}}{T_k} + Q_{2,k} \frac{\nu_{2,k+1} + \nu_{2,k}}{2} = u_k + \delta_k \quad (12)$$

$$\frac{q_{2,k+1} - q_{2,k}}{T_k} = M_{2,k}^{-\frac{1}{2}} \frac{\nu_{2,k+1} + \nu_{2,k}}{2} \quad (13)$$

여기서 $q_{2,k} \in R^n$ 은 VP의 configuration이고, $M_{2,k} := M_2(q_2(t_k))$ 이다. $\nu_{2,k} \in R^n$ 은 변환된 속도로서 configuration $q_{2,k}$ 와 식 (13)의 운동학적인 관계를 갖는다. $u_k := M_{2,k}^{-1/2} T_{2,k}$, $\delta_{2,k} := M_{2,k}^{-1/2} F_{2,k} \in R^n$ 는 식 (4)의 제어 입력 $T_{2,k}$ 와 외력 $F_{2,k}$ 의 변환이고, $Q_{2,k} \in R^{n \times n}$ 는 변환된 코리올리 행렬로서 다음과 같이 정의된다.

$$Q_{2,k} := M_{2,k}^{-\frac{1}{2}} C_{2,k} M_{2,k}^{-\frac{1}{2}} - \dot{M}_{2,k} M_{2,k}^{-\frac{1}{2}} \quad (14)$$

위의 식은 $C_{2,k} := C_2(q_2(t_k), \dot{q}_2(t_k))$ 와 함께, 반대칭성을 갖는다. 이를 통하여, 식 (12)-(13)의 NPMI 적분은 다음의 이산시간 수동성을 만족한다.

$$\sum_{k=0}^N \hat{\nu}_{2,k}^T [u_k + \delta_k] T_k = \kappa_{2,k} - \kappa_{2,0} \quad (15)$$

여기서 $\hat{\nu}_k := (\nu_{k+1} + \nu_k)/2$ 이고 $\kappa_{2,k}$ 는 VP의 운동에너지로 $\kappa_{2,k} := \frac{1}{2} \nu_{2,k}^T I \nu_{2,k} = \frac{1}{2} v_{2,k}^T M_{2,k} v_{2,k}$ 이다. 이 이산시간 적분기법의 수동성은 매우 “가벼운” VP를 렌더링 할 수 있도록 해준다. NPM 기법과 그 성질에 관한 보다 자세한 사항은 [16,17]을 참고하라.

본 논문에서는 (3)의 n 자유도 (비선형) HD와 (12)의 n 자유도 (비선형) VP 사이의 투명한 결합(coupling)을 위하여 식 (9)-(10)을 이용하였다. 식 (10)을 이용하여 HD-VP의 위치정합제어를 강화하고, 식 (9)을 이용하여 위치 정합된 HD-VP의 겹보기 관성을 줄여주었다. 이 겹보기 관성의 스케일링은 locked system의 동역학을 통하여 이루어지는 것으로 VP뿐 만 아니라 HD와 연관되어 HD의 실

제 겹보기 관성보다 가벼운 햅틱 인터랙션이 가능함을 의미한다. 이를 위하여 먼저는 식 (9)-(10)을 각각의 제어입력 T_1 과 T_2 로 분해하였다.

$$T_1 = \left(\frac{1-\eta}{\eta} - \frac{1}{\eta} \phi^T \right) (F_1 + F_2) + F_2 + (1-\phi^T) C_{LE} v_E + C_{EL} v_L - K_v v_E - K_p q_E \quad (16)$$

$$T_2 = \frac{1}{\eta} \phi^T (F_1 + F_2) - F_2 + \phi^T C_{LE} v_E - C_{EL} v_L + K_v v_E + K_p q_E \quad (17)$$

위의 제어 입력 (16)-(17)은 연속시간의 마스터와 슬레이브 (3)-(4)를 위한 입력으로 이산시간 VP와 연속시간 HD에 맞게 (16)-(17)을 다음과 같이 변경하였다. 시간 $t \in [t_k, t_{k+1})$ 과 $T_k = t_{k+1} - t_k$ 에 대하여,

$$T_1(t) = -b_d \dot{q}_1(t) + \left(\frac{1-\eta}{\eta} I - \frac{1}{\eta} \phi_k^T \right) (F_{1,k} + F_{2,k}) + F_{2,k} + ((I - \phi_k^T) C_{LE,k} + C_{EL,k} (I - \phi_k) - B_{vc}) \left(\frac{q_{1,k} - q_{1,k-1}}{T_{k-1}} \right) + ((I - \phi_k^T) C_{LE,k} + C_{EL,k} \phi_k + B_{vc}) \hat{v}_{2,k-1} - K_{vc} (q_{1,k} - q_{2,k}) \quad (18)$$

$$T_{2,k} = -b_v \hat{v}_{2,k} + \frac{1}{\eta} \phi_k^T (F_{1,k} + F_{2,k}) - F_{2,k} + (\phi_k^T C_{LE,k} - C_{EL,k} (I - \phi_k) + B_{vc}) \left(\frac{q_{1,k} - q_{1,k-1}}{T_{k-1}} \right) + (\phi_k^T C_{LE,k} - C_{EL,k} \phi_k - B_{vc}) \hat{v}_{2,k} - K_{vc} (\hat{q}_{2,k} - q_{1,k}) \quad (19)$$

여기서 $\hat{v}_{2,k} = \frac{q_{2,k+1} - q_{2,k}}{T_k}$ 이고 $\hat{q}_{2,k} = \frac{q_{2,k+1} + q_{2,k}}{2}$ 로 NPMI^[17] 임플리멘테이션을 나타낸다. ϕ_k , C_{LB} , C_{EL} 은 이산시간에 대응하는 2.2장의 항들로 정의되며, $F_{i,k} := F_i(t_k)$ 이다.

식 (18)-(19)의 b_d, b_v, B_{vc}, K_{vc} 는 식 (1)에 주어진 표준 virtual coupling 항들로서 조건 (2)를 통하여 혼합시간의 수동성을 만족하게 된다. 반면에, 식 (18)-(19)의 나머지 항들은 일반적으로 수동성을 보장하지 않는다. 이들의 수동성을 보장하기 위한 기법, 예컨대 가상의 에너지 저장 장치인 fictitious flywheel 기법^[18]이나 PO/PC 기법^[10]등의 도입은 이후 수행될 연구에서 논의될 것이다. 비록 앞서의 이유로 (18)-(19)의 수동성이 보장되지 않고, 결과적으로 VP의 파라미터 선택에 약간의 제한이 있음에도 불구하고, (16)-(17)의 passive decomposition을 통해 설계된 추가적인 “피드포워드” 제어입력을 통하여 비선형 다자유도

HD-VP의 기존 virtual coupling (1)의 투명성을 매우 향상시킬 수 있었고, 관련한 실험결과를 4장에 나타내었다.

한편, (18)과 (19)를 사용하기 위해서는, HD와 VP의 관성 파라미터들을 알아야 한다. VP의 관성 파라미터들은 시뮬레이션을 통하여 항상 정확하게 사용할 수 있는 반면, HD의 관성 파라미터들은 정확하게 알 수 없다. 그러므로 각 파라미터에 포함된 불확실성이 제어기의 성능에 영향을 미치게 되는데, 이런 불확실성의 영향을 파악하기 위해서 식 (3)과 (4)를 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} M_1(q_1)\ddot{q}_1 + C_1(q_1, \dot{q}_1)\dot{q}_1 \\ M_2(q_2)\ddot{q}_2 + C_2(q_2, \dot{q}_2)\dot{q}_2 \end{pmatrix} = \hat{S}^T \begin{pmatrix} T_L \\ T_E \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} \quad (20)$$

여기서 \hat{S}^T 는 사용된 파라미터의 불확실성을 포함한 항이다. 식 (20)은 정확한 파라미터로 구성된 실제 S^{-T} 를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} M_L^v \dot{v}_L + C_L^v v_L + C_{LE}^v v_E \\ M_E^v \dot{v}_E + C_E^v v_E + C_{EL}^v v_L \end{pmatrix} = S^{-T} \hat{S}^T \begin{pmatrix} T_L \\ T_E \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_L \\ F_E \end{pmatrix} \quad (21)$$

여기서 T_L 과 T_E 는 (9)와 (10)을 통해 주어진다.

컨택트가 일어나는 동안의 속도는 주로 작으므로 속도의 제곱에 비례하는 locked-shape 커플링 항인 C_{LE} , C_{EL} 을 무시할 수 있다고 가정하면, (8)의 shape system의 동역학은 다음과 같이 바뀌게 된다.

$$M_{EE}^v \ddot{q}_E + C_{EE}^v \dot{q}_E = \frac{1}{\eta} (\phi^T - \hat{\phi}^T) F_L - K_v \dot{q}_E - K_p q_E \quad (22)$$

여기서 $\hat{\phi}$ 은 추정된 관성 파라미터를 포함한 항이다. 만약 $\hat{\phi} = \phi$ 이라면 (22)는 (8)과 같아지나 실제의 상황에서는 $\hat{\phi} \neq \phi$ 인 경우는 일어나기 어렵다. 그러나 정적(static)인 컨택트의 경우 $\dot{q}_i, \ddot{q}_i = 0$ 이기 때문에 식 (11)의 F_L 이 0이 된다. 이는 (6)에서 F_L 이 HD의 관성 파라미터와 무관하게 $F_1 + F_2$ 로 정의되기 때문에 가능하다. 이는 (22)가 정적인 컨택트의 경우 (8)과 같은 평형점을 가짐을 의미하고, 즉, 파라미터들의 불확실성에도 불구하고 제안된 (18)-(19)의 제어기가 컨택트 상황의 투명성을 크게 향상시킴을 보여준다.

한편, 새로운 virtual coupling (18)-(19)를 실제로 사용하기 위해서는 사용자의 힘 F_1 과 VP에 작용하는 힘 F_2 를 측정해야 한다. VP에 작용하는 힘 F_2 는 (12)-(13)의 시뮬레이션을 통하여 언제나 사용이 가능하다. 그러나 사용자

의 힘 F_1 의 측정은 힘센서를 필요로 하며, 대부분의 상용 햅틱 장비(예를 들면, Force Dimension Omega3®, Geomagic Phantom Omni®, Novint Falcon®)에서는 사용이 불가능하다. 그러므로 본 연구에서는 힘센서의 사용을 피하고자 [3]에 제시된 외란관측기를 도입하여 사용자의 작용힘을 추정하는 기법을 다음 장에서 다루도록 한다.

3.1 사용자의 작용힘 추정과 장비포화

사람이 햅틱 장비 (3)에 작용하는 힘을 추정하기 위해, 본 연구에서는 [3]의 비선형 외란관측기를 이용하였다. 이를 위하여, 사람의 힘 F_1 을 외란 d 로서 고려하자. 즉, $d := F_1$ 이고, 식 (3)을 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$d = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} - T \quad (23)$$

이 장에서는 간결함을 위해 첨자는 생략하였다. 이제 추정된 외란 d 는 [3]에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{d}(t) := z(t) + p(q, \dot{q}) \quad (24)$$

여기서 $z \in R^n$ 은 가상의 변수로서 다음의 식을 통하여 업데이트 된다.

$$\dot{z} = -L(q, \dot{q})z + L(q, \dot{q})[C(q, \dot{q})\dot{q} - T - p(q, \dot{q})] \quad (25)$$

제어입력 T 는 (18)을 통하여 계산되는 값으로 경우에 따라서는 실제 제어입력 $T(t)$ 와 다를 수 있다. 여기서 $L(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 과 $p \in R^n$ 은 다음과 같이 정해진다.

$$L(q, \dot{q})M(q)\ddot{q} = \left[\frac{\partial p(q, \dot{q})}{\partial q} \quad \frac{\partial p(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] \begin{bmatrix} \dot{q} \\ q \end{bmatrix} = \dot{p}$$

외란 d 가 고정된 값 혹은 변화가 작다고 가정하면 외란 추정 오차 $e := d - \hat{d}$ 의 동역학은 다음과 같다.

$$\dot{e} = -L(q, \dot{q})e \quad (26)$$

그러므로 위 식 (26)의 L 을 점근적으로 안정하게 정해 주면, 추정된 외란 \hat{d} 은 실제 외란 d 로 수렴하게 된다^[3].

이 논문 4장의 실험에서 사용된 2축의 회전형 로봇 매니퓰레이터($q = [q_1, q_2]^T$)에 대한 p 와 L 은 관성행렬

$$M(q) = \begin{bmatrix} Y_1 + 2X\cos(q_2) & Y_2 + X\cos(q_2) \\ Y_2 + X\cos(q_2) & Y_3 \end{bmatrix}$$

에 대하여 다음과 같이 주어진다.

$$p(q, \dot{q}) = c \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 \end{pmatrix}, L(q, \dot{q}) = c \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} M^{-1}(q)$$

위 관측기에 대해, 관측기 상수 $c \geq X\dot{q}_{2,max}$ 로 정해진다^[3].

외란 관측기 (25)의 설계에 있어서 p 와 L 의 설정은 중요한 부분이다. 적절한 p 와 L 의 구조를 찾는 일은 일반적으로 쉬운 일은 아니다. 그러나 간단한 설계방법이 [9]에 제시되었고, 선형 매트릭스 부등식(linear matrix inequality)을 사용한 설계방법이 [21]에서 개발되었다. 이 방법들을 사용하여, 2자유도보다 복잡한 장비에 대한 적절한 p 를 찾을 수 있다. 이와 관련된 보다 자세한 사항은 [21]을 통해 확인할 수 있다.

위의 외란관측기 (25)를 사용할 때 발생하는 또 다른 문제는 장비의 포화현상으로 인한 “winding-up” 효과이다. 이 현상을 보다 잘 이해하기 위해서 정적 컨택트 상황을 고려해 볼 수 있다. 또한 설명을 간결하게 하기 위해서 햅틱 디바이스 (3)의 하나의 축만 고려하도록 한다. 햅틱 디바이스의 최대 제어토크를 T_m 으로 표시하고 디바이스에 전달된 제어입력을 T_c 로 표현할 때 실제 디바이스의 제어 토크 T 는 다음과 같다.

$$T = \begin{cases} T_m & \text{if } T_c \geq T_m \\ T_c & \text{if } T_c \leq T_m \end{cases} \quad (27)$$

이제 디바이스 토크의 포화가 발생하고 이 포화현상이 힘 추정 (25)에는 반영되지 않았다고 가정하자. 이는 힘 추정 과정 (25)에서 실제 $T = T_m$ 대신에 $T = T_c$ 가 사용됨을 의미한다. 즉, (23)으로부터 실제 외란 $d = -T_m$ 이지만 (24)-(25)로부터 얻어지는 \hat{d} 은 $\dot{z} = 0$ 일 때, $\hat{d} = -T_c$ 임을 의미한다. 위의 두식으로부터 $d = F_1$ 일 때, 다음의 결과를 얻게 된다.

$$\hat{d} = F_1 + (T_m - T_c)$$

이는 관측기가 장비포화에 의한 효과를 ‘외란’으로 인식함을 보여주고, 결과적으로 (25)로부터 $T_m - T_c$ 만큼 d 가 과다하게 추정됨을 의미한다. 여기서 정적인 컨택트일

때 F_1 의 부호와 T 의 부호가 서로 반대임을 기억하라(예를 들어, F_1 과 $T_m - T_c$ 가 둘 다 음수).

그러므로 디바이스의 제어토크의 포화가 발생하였을 때, (25)를 통해 사용자의 힘은 과다 추정되고 이는 (18)-(19)의 T_1, T_2 에서 피드포워드 항의 증가를 야기한다. 이 피드포워드 항은 완벽한 위치정합제어를 위한 항이기 때문에 만약 장비포화가 발생하면, HD는 가만히 있음에도 VP가 점차로 HD의 위치로 움직이게 된다. 이는 정적인 컨택트 상황에서 VP가 비사실적으로 Fig. 2와 같은 가상의 벽 안으로 침입함을 의미하며, 이러한 과정 동안 추정된 힘 \hat{d} 은 매우 큰 값으로 누적된다. 이로 인해 사용자가 HD를 가상의 벽 바깥쪽으로 움직일 때, 추정된 \hat{d} 이 큰 값으로 남아있어 실제 가상의 벽이 햅틱 디바이스를 밀어내는 것보다 큰 힘을 생성하게 된다.

이와 같은 “winding-up” 현상을 방지하기 위해, 우리는 장비의 포화 정보를 힘 추정기 (25)에 포함하는 방법을 사용하였다. 즉, 이러한 현상의 원인이 (25)에서 T_m 대신 T_c 가 사용되는 것이므로 만약 $T_c \geq T_m$ 이면 (25)에 T_m 을 사용하도록 하였다. 이 방법을 사용하여, 우리는 디바이스 토크 포화 상황에서의 힘 추정 시 발생하는 winding-up 현상을 효과적으로 줄여줄 수 있었다. 이러한 장비포화로 인한 문제는 \hat{d} 을 T_m 보다 작게 직접 투영하는 방식으로 [9]에서도 고려가 되었다.

4. 예비실험 결과

본 연구의 실험을 위하여 Phantom Omni®가 햅틱 디바이스로 사용되었다. 실험을 위해 1자유도의 구동축을 고정하고 나머지 2자유도만을 이용하였다. 2자유도의 비선형 라그랑지안 가상 프록시의 임플리멘테이션에 사용된 파라미터들은 다음과 같다: $(m_{v1}, m_{v2}) = (0.00167, 0.001)[kg]$, $(I_{v1}, I_{v2}) = (2.5589 \times 10^{-4}, 6.4094 \times 10^{-5})[kgm^2]$, $(l_{v1}, l_{v2}) = (1.356, 0.877)[m]$. m_*, I_*, l_* 는 각각 가까운 쪽 관절과 먼 쪽 관절의 질량, 관성 모멘트, 그리고 길이를 의미한다. 햅틱 디바이스의 파라미터 추정을 위해서는 최소제곱추정 기법(least square estimation)이 사용되었다. 사용된 햅틱 장비의 질량은 $(m_{h1}, m_{h2}) = (0.05352, 0.03277)[kg]$, 관성 모멘트는 $(I_{h1}, I_{h2}) = (8.2 \times 10^{-5}, 2.1 \times 10^{-5})[kgm^2]$, 그리고 관절의 길이는 $(l_{h1}, l_{h2}) = (0.1356, 0.0877)[m]$ 이다. 덧붙여, (18)-(19)의 제어기를 위해서 $B_{vc} = diag[0.001, 0.0008][Nms]$, $K_{vc} = diag[0.14, 0.12][Nm]$, 및 $b_v = diag$

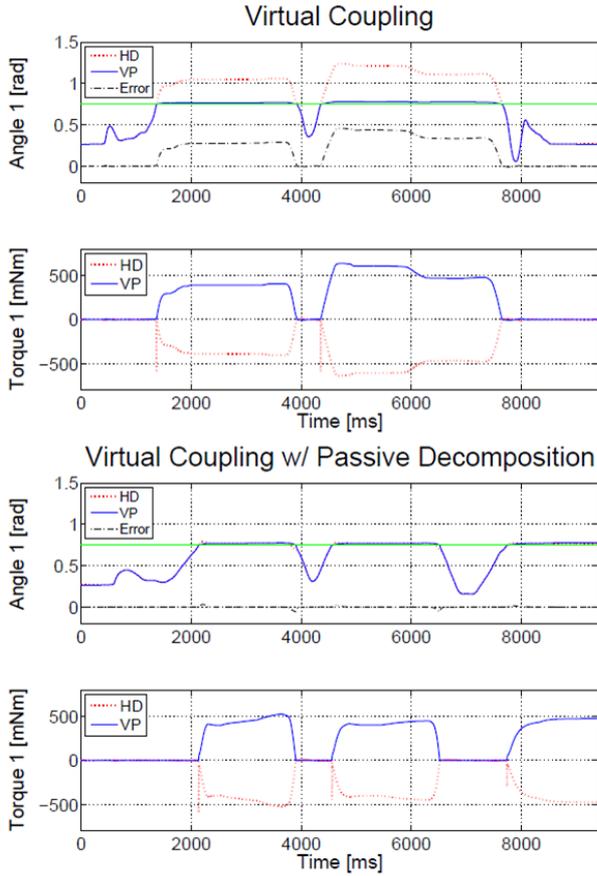


Fig. 3. Contact task with standard virtual coupling and our proposed framework

[0.0015, 0.0013][Nm.s]가 사용되었다. 또한, 컨택트 작업을 위한 가상 물체로서 가상 프록시의 첫 번째 링크 $q_{v1} > 0.75$ [rad]에서 접촉할 수 있는 벽과 비슷한 물체를 만들었다 (Fig. 2). 가상 물체는 $B_o = 0.03$ [Nm.s], $K_o = 20$ [Nm]로 렌더링되었다. 외란관측기를 통한 힘 추정을 위해서는 3.1장에 기술된 조건에 따라 관측기 상수를 $c = 0.035$ 로 설정하였다. 한편, 제시된 제어기 (18)-(19)의 $C_{LE,k}$ 와 $C_{EL,k}$ 를 생략하였는데, 이것이 가능한 이유는 첫째로, NPMI의 임플리멘테이션을 통하여 매우 가벼운 VP를 렌더링할 수 있기 때문에 관성항으로 인한 커플링 효과가 충분히 작기 때문이고, 둘째로, 컨택트 작업을 수행하는 동안은 속도가 작기 때문에 속도에 이차 비례하는 (7)-(8)의 커플링 항이 작아지기 때문이다.

기존의 virtual coupling 기법을 이용한 결과와 본 논문에서 제안된 passive decomposition 기반의 제어기를 사용한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 결과를 통해 피드포워드 항을 추가한 제시된 제어기법이 컨택트 중에도 위

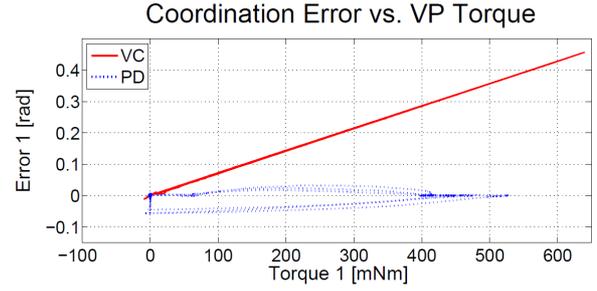


Fig. 4. Coordination performance of standard virtual coupling and our proposed framework

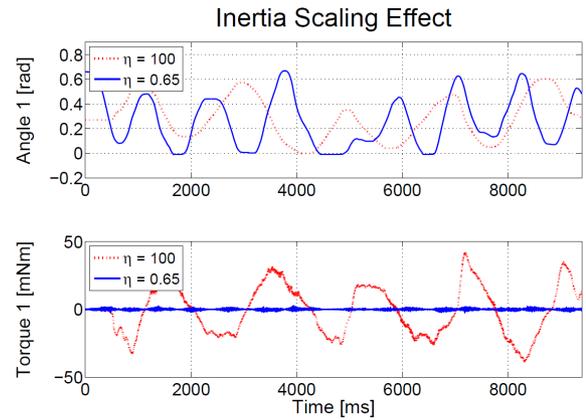


Fig. 5. Effect of different inertia scaling factor η

치정합을 훨씬 정확하게 유지하여 햅틱 인터랙션의 투명도를 향상시킬 수 있었다. 또한 컨택트가 일어나는 순간에 충돌힘^[7]을 사용하여 사용자의 역감을 향상시킬 수 있었다. Fig. 4의 그래프는 햅틱 디바이스의 제어토크의 크기 대비 위치정합오차의 크기를 나타낸 것으로 여러 번의 컨택트(벽에 다가가는 과정과 나오는 과정 포함) 행위를 통하여 얻은 결과이다. 그래프에서 볼 수 있듯이, 기존의 virtual coupling 기법은 제어토크의 크기에 선형적으로 비례하여 위치정합오차가 증가하는데 반해, 제안된 passive decomposition에 기반한 제어기법의 경우 작용 힘과 상관없이 위치정합오차를 작게 유지할 수 있어서 제안된 기법의 성능을 확인할 수 있었다. 한편, Fig. 4에 보이는 제안된 기법의 작은 오차들은 주로 관측기의 수렴시간으로 인해 발생하는 것으로, 예를 들어, 가상물체로부터 벗어난 직후에 약간의 위치정합오차가 있음에도 불구하고 남아있는 추정힘과 스프링힘의 상쇄로 인하여 제어토크 T_1 은 0이 된다. 그러나 Fig. 4의 $T_1 > 400$ 의 영역에서 볼 수 있듯이, 정적 컨택트와 유사한 상황에서는 제어토크 대비 위치정합오차가 0으로 수렴하게 된다.

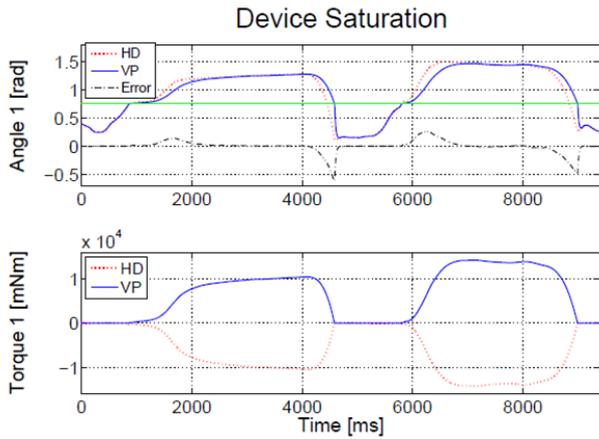


Fig. 6. Device saturation effect without projection strategy

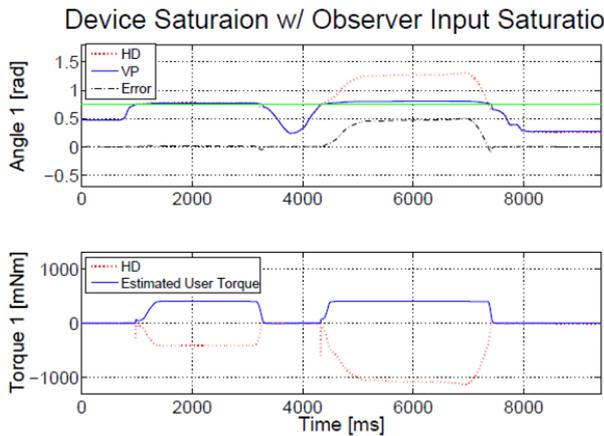


Fig. 7. Device saturation effect with projection strategy

비록 NPMI 기법 (12)를 통하여 매우 가벼운 프록시를 렌더링 할 수 있지만, 경우에 따라서 위치 정합된 햅틱 디바이스와 가상의 프록시의 전체 무게가 햅틱 디바이스보다 가벼워야 할 수 있다. 이러한 상황에서는 (18)-(19)의 η 를 조절함으로써 VP와 HD의 결합된 겉보기 관성을 조절할 수 있다. Fig. 5는 이와 관련하여 햅틱 디바이스를 자유롭게 흔드는(shaking) 실험을 수행한 결과이다. $\eta < 1$ 인 경우, 사용자는 더 작은 힘을 피드백 받으므로 결합된 HD와 VP를 더 가볍게 느끼는 반면, $\eta > 1$ 인 경우 사용자는 더 큰 힘을 받으므로 결합된 HD와 VP를 더 무겁게 느낌을 확인할 수 있었다. 이러한 겉보기 관성의 조절은 재활 등의 목적에 사용될 수 있다.

3.1장에 제시된 장비 제어토크의 포화를 다루기 위한 투영(projection)기법에 대한 실험 결과는 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 실험의 결과로부터, 투영기법을 사용하지

않은 경우 프록시가 가상의 벽 안으로 침입할 뿐만 아니라 사용자의 힘이 크게 추정되어 가상의 물체 밖으로 나올 때 축적된 힘의 영향으로 원치 않는 힘과 위치오차가 발생함을 확인할 수 있었다(Fig. 6). 그러나 투영기법을 사용한 경우 어느 정도의 위치오차는 발생하지만, 이러한 “winding-up” 문제를 해결할 수 있었고 굉장히 선명한 역감을 사용자에게 전달할 수 있었다. 만약 장비의 포화현상이 발생하지 않는다면, Fig. 3에서처럼 선명한 역감의 생성과 완벽한 위치정합을 얻을 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 다자유도 연속시간의 햅틱 디바이스와 이산시간 가상 프록시 사이의 투명한 virtual coupling의 설계 기법을 소개하였다. 제시된 기법은 적절한 피드포워드 항을 통하여 정확한 위치정합제어와 결합된 햅틱 디바이스와 가상 프록시의 겉보기 관성의 조절이 가능하고, 이를 통하여 컨택트 작업 중에도 기존 virtual coupling 기법의 투명성을 눈에 띄게 향상시킬 수 있었다. 위의 혼합시간의 제어를 위하여서 passive decomposition이 사용되었으며, 사용자의 힘 추정을 위한 비선형 외관관측기법이 사용되었다. 또한 외관 추정 시에 장비포화 현상을 다루기 위한 투영기법을 제시하였고, 제시된 기법의 성능을 검증하기 위한 실험들과 그 결과를 제시하였다.

References

- [1] R. J. Adams and B. Hannaford, “Stable haptic interaction with virtual environments”, IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 15, no.3, pp. 465- 474, 1999
- [2] J. M. Brown and J. E. Colgate, “Passive implementation of multibody simulations for haptic display”, In Proc. of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, pp. 85-92, 1997.
- [3] W. H. Chen, D. J. Ballance, P. J. Gawthrop, and J. O’Reilly, “A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators”, IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 47, no.4, pp. 932-938, 2000.
- [4] J. E. Colgate and J. M. Brown, “Factors affecting the z-width of a haptic display”, In

- Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics & Automation, pp. 3205–3210, 1994.
- [5] J. E. Colgate and G. G. Schenkel, “Passivity of a class of sampled-data systems: Application to haptic interfaces”, *Journal of Robotic Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 37–47, 1997.
- [6] J. E. Colgate, M. C. Stanley, and J. M. Brown, “Issues in the haptic display of tool use”, In Proc. of IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots & Systems, vol. 3, pp. 140–145, 1995.
- [7] D. Constantinescu, S. E. Salcudean, and E. A. Croft, “Haptic rendering of rigid contacts using impulsive and penalty forces”, *IEEE Trans. Robotics*, vol. 21, no.3, pp. 309–323, 2005.
- [8] K. Eom, I. Suh, and B.-J. Yi, “A design method of a haptic interface controller considering transparency and robust stability”, In Proc. of IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots & Systems, vol. 2, pp. 961–966, 2000.
- [9] A. Gupta and M. K. O’Malley, “Disturbance-observer-based force estimation for haptic feedback”, *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, vol. 133, no.1, pp. 14505, 2011.
- [10] B. Hannaford and J.-H. Ryu, “Time-domain passivity control of haptic interfaces”, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 18, no.1, pp. 1–10, 2002.
- [11] K. Huang and D. J. Lee, “Hybrid pd-based control framework for passive bilateral teleoperation over the internet”, In Proc. of IFAC World Congress, pp. 1064–1069, 2011.
- [12] K. Huang and D. J. Lee, “Hybrid virtual-proxy based control framework for passive bilateral teleoperation over the internet”, In Proc. of IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots & Systems, pp. 149–156, 2011.
- [13] K. Huang and D. J. Lee, “Consensus-based peer-to-peer control architecture for multiuser haptic interaction over the internet”, *IEEE Trans. Robotics*, vol. 29, no.2, pp.417–431, 2013.
- [14] D.-S. Kwon, K.-Y. Woo, and H.-S. Cho, “Haptic control of the master hand controller for a micro- surgical telerobot system”, In Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics & Automation, vol. 3, pp. 1722–1727, 1999.
- [15] D. J. Lee, “Extension of colgate’s passivity condition for variable-rate haptics”, In Proc. of IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots & Systems, pp. 1761–1766, 2009.
- [16] D. J. Lee and K. Huang, “On passive non-iterative varying-step numerical integration of mechanical systems for haptic rendering”, In Proc. of ASME Dynamic Systems & Control Conference, 2008.
- [17] D. J. Lee, M. Kim, and T. Qiu, “Passive haptic rendering and control of Lagrangian virtual proxy”, In Proc. of IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots & Systems, pp. 64–69, 2012.
- [18] D. J. Lee and P. Y. Li, “Passive bilateral control and tool dynamics rendering for nonlinear mechanical teleoperators”, *IEEE Trans. Robotics*, vol. 21, no.5, pp. 936–951, 2005.
- [19] D. J. Lee and P. Y. Li, “Passive decomposition of mechanical systems with coordination requirement”, *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 58, no.1, pp. 230–235, 2013.
- [20] A. Mohammadi, M. Tavakoli, and H. Marquez, “Disturbance observer based control of non-linear haptic teleoperation systems”, *IET Control Theory & Applications*, vol. 5, no.18, pp. 2063–2074, 2011.
- [21] A. Mohammadi, M. Tavakoli, H. Marquez, and F. Hashemzadeh, “Nonlinear disturbance observer design for robotic manipulators”, *Control Engineering Practice*, vol. 21, no.3, pp. 253–267, 2013.
- [22] G. Sankaranarayanan and B. Hannaford, “Experimental internet haptic collaboration using virtual coupling schemes”, In Proc. of the IEEE Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environments & Teleoperator Systems, pp. 259–266, 2008.
- [23] J. J. E. Slotine and W. Li, *Applied nonlinear control*, Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [24] Y. Yokokohji and T. Yoshikawa, “Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic

coupling-formulation and experiment”, IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 10, no.5, pp. 605- 620, 1994.



김 명 신

2011 서울대학교 기계항공공학부(공학사)
2012~현재 서울대학교 기계공학과 석박사 통합 과정
관심분야: 햅틱 렌더링 및 제어, 원격제어, 로봇 제어 및 동역학



이 동 준

1995 한국과학기술원 기계공학과(공학사)
1997 한국과학기술원 자동화 및 설계공학(석사)
1999 기아자동차 중앙연구소 연구원

1999~2004 University of Minnesota 기계공학(박사)
2004~2006 University of Illinois, Urbana-Champaign 박사 후 연구원
2006~2011 University of Tennessee 기계공학 조교수
2011~현재 서울대학교 기계공학 조교수
관심분야: 원격제어 및 햅틱스, 로봇 역학 및 제어, 비행 및 이동로봇 제어, 다중로봇의 협업, 인간-로봇 상호작용