

인간 모델과 1차 샘플-홀드 방식이 가상 스프링 모델 시스템의 안정성에 미치는 영향 분석

이 경 노 *

한국교통대학교 에너지시스템공학과

Effects of a Human Impedance and a First-Order-Hold Method on Stability of a Haptic System with a Virtual Spring Model

Kyungno Lee *

Department of Energy System Engineering, Korea National University of Transportation,

50 Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk 380-702, Korea

(Received 2013. 10. 18 / Accepted 2013. 11. 13)

Abstract : When a human operator interacts with a virtual wall that is modeled as a virtual spring model, the larger the stiffness of the virtual spring is, the more realistic the operator feels that the virtual wall is. In the previous studies, it is shown that the maximum available stiffness of a virtual spring to guarantee the stability can be increased when the first-order-hold method is applied, however the effects of a human impedance on the stability are not considered. This paper presents the effects of a human impedance on stability of haptic system with a virtual spring and a first-order-hold (FOH) method. The human impedance model is modeled as a linear second-order system model. The relations between the maximum available stiffness of a virtual spring and the human impedance such as a mass, a damping and a stiffness are analyzed through the MATLAB simulation. It is shown that the maximum available stiffness is proportional to the square root of the human mass or damping respectively.

Key words : Haptic system (햅틱시스템), stability (안정성), virtual spring model (가상스프링모델), first-order-hold method (일차홀드 방식), human impedance (인간모델)

1. 서론

가상환경 속에서 강체를 조작할 때, 사용자의 가상 강체에 대한 몰입감 또는 현실감을 증강시키기 위해서는 가상 강체 모델의 스프링 상수를 최대한 크게 설계해야 한다. 그러나 스프링 상수를 지나치게 증가시키면 햅틱 시스템이 불안정해진다. 따라서 햅틱 시스템의 안정성을 보장하면서 가상 스프링 상수를 증가시키기 위한 연구가 진행 중이며, 이를 위해 햅틱 시스템 구성 요소들에 의한 안정성 영향을 분석하고 있다.

Colgate¹⁾는 가상 강체의 스프링 상수에 관계없이 시

스템을 안정화시키기 위해서 가상 커플링을 도입하였으며, 수동성 (passivity)의 측면에서 샘플링주기, 햅틱 장치의 댐핑 상수와 가상 스프링 상수와의 관계를 유도했다. Adams와 Hannaford²⁾³⁾는 가상 커플링을 2-포트 네트워크로 모델화한 후 절대 안정성 (absolute stability) 해석법을 이용하여 안정성 조건을 제시하였고, Abbott와 Okamura⁴⁾는 햅틱 시스템의 구성 요소인 샘플링 주기, 햅틱 장치의 쿨롱 마찰력, 그리고 엔코더의 분해능이 시스템의 안정성에 미치는 영향을 수동성(passivity) 측면에서 분석하고 안정성 조건을 제시하였으며 Diolaiti⁵⁾는 샘플링 주기, 쿨롱 마찰력의 영향은 물론, 시간지연, 양자화 (quantization) 요소가 시

*Corresponding author. E-mail: klee@ut.ac.kr

시스템 안정성에 미치는 영향을 분석하였다. Gil⁶⁾은 안정성 (stability) 측면에서 햅틱 장치의 댐핑 상수, 인간 모델, 샘플링주기, 가상 스프링 상수, 가상 댐핑 상수들 사이의 관계를 루드-후르비츠(Routh-Hurwitz) 판별법으로 분석했다. 또한 Gil^{7,8)}은 쿨롱 마찰력, 양자화(quantization), 시간 지연이 햅틱 시스템의 안정성에 미치는 영향을 안정성 (stability) 측면에서 분석했다. 그러나 기존 연구에서는 시스템의 안정성을 해석함에 있어 영차홀드 (Zero-Order-Hold, ZOH) 의 데이터 홀드 방식을 이용하였다.

최근 연구⁹⁾에는 영차홀드 (ZOH) 대신 일차홀드 (First-Order-Hold, FOH) 방식을 도입하여 햅틱 시스템의 안정성을 유지하면서 가상 스프링 상수를 증가시키는 방법이 제시되었으나, 시스템의 안정성을 분석할 때 인간 모델의 영향이 고려되지 않았다.

본 논문에서는 1-자유도 햅틱 장치와 스프링으로 구성된 가상 스프링 모델 환경에서 일차홀드 (FOH) 방식을 사용할 때 인간의 임피던스 모델이 시스템 안정성에 미치는 영향을 분석하고, 시스템 안정화를 위한 가상 스프링 상수의 한계 범위를 시뮬레이션을 통해 제시하고자 한다.

2. 인간 모델과 시스템 블록선도

햅틱 시스템은 햅틱 장치 모델, 인간모델, 가상 강체 모델, 그리고 샘플-홀드 모델로 구성되며, 샘플-홀드를 통해서 가상 환경에서 계산된 반력이 사용자에게 전달된다.

햅틱 장치는 질량 (M_d)과 댐퍼 (B_d)로 구성된 2차 시스템으로 모델화되며, 본 논문에서 다루고자 하는 가상환경은 가상 강체로서 가상 스프링 상수(K_w)로 구성된 모델이다.

햅틱 장치를 조작하는 인간의 팔 또는 손 자세, 또는 햅틱 장치를 쥐는 힘의 크기에 따라서 인간의 임피던스가 변하므로 인간 모델을 정확하게 모델화하기는 어렵다. 그렇지만 기존 연구들은 인간 모델을 선형 2차 시스템으로 모델화하여 시스템의 안정성 해석 및 손의 힘과 임피던스의 변화 관계를 연구하고 있으며, 단순화된 선형 2차 시스템 모델이 실제 인간의 임피던스 특징을 잘 표현할 수 있음을 보이고 있다.¹⁰⁻¹³⁾ Kuchenbecker¹¹⁾는 질량-스프링-댐퍼로 모델화한 선형 2차 임피던스 모델이 비교적 정확하게 인간 손목에 대

한 동적 특성을 잘 표현할 수 있음을 실험을 통해 제시한다. Gil⁶⁾ 인간 임피던스 모델을 선형 2차 시스템으로 단순화하여 시스템의 안정성을 해석한다. Tsuji¹²⁾도 손의 악력과 손의 임피던스 변화를 연구하고자 손을 선형 2차 시스템으로 모델화한다. 따라서 본 연구에서도 인간 모델을 (1)과 같이 질량 (M_h), 댐핑 (B_h), 그리고 스프링상수 (K_h)로 구성된 선형 2차 시스템으로 모델화한다. 여기서 $x(t)$ 는 변위이고, $F(t)$ 는 힘이다.

인간의 임피던스 모델

$$F(t) = M_h \ddot{x}(t) + B_h \dot{x}(t) + K_h x(t) \quad (1)$$

인간 모델 임피던스의 크기는 햅틱 장치를 조작하는 자세와 힘에 따라 달라진다. Table 1은 기존 연구^{11,13)}에서 계산된 선형 2차 인간 모델의 임피던스 값이다.

기존 연구들에서는 샘플-홀드 방식 중 영차홀드 (Zero-Order-Hold; ZOH)를 이용하여 인간 모델과 가상 스프링 상수와의 관계^{6,10)}를 분석했지만, 본 연구에서는 일차홀드 (First-Order-Hold; FOH) 방식을 이용할 때 인간 모델과 가상 스프링 상수와의 관계를 시뮬레이션을 통해 분석하고자 한다. 일차홀드의 라플라스 전달함수는 (2)와 같다. 여기서 T는 샘플링 주기이다.

$$\text{FOH Model: } G_{h1}(s) = \left(\frac{1 - e^{-Ts}}{s} \right)^2 \frac{Ts + 1}{T} \quad (2)$$

햅틱 시스템의 햅틱 장치 모델, 가상 환경, 인간 모델, 샘플러 그리고 샘플-홀드 모델을 고려한 시스템 블록선도는 Fig. 1과 같다. 여기서 $f_a(t)$ 는 인간이 햅틱 장치에 작용하는 힘이며, $f_e(t)$ 는 가상 스프링으로부터 계산된 반력이다. 샘플링 주기는 T이다.

3. 햅틱 시스템 안정성에 대한 인간모델의 영향 분석

선형 2차 시스템으로 모델화된 인간 모델과 일차

Table 1 Values used for human impedance model.

Human impedance	Kuchenbecker ¹¹⁾	Lawrence ¹³⁾
Mass (kg)	0.13 ~ 0.16	17.51
Damping (Ns/m)	4.3 ~ 6.0	175.12
Stiffness (N/m)	440 ~ 750	175.12

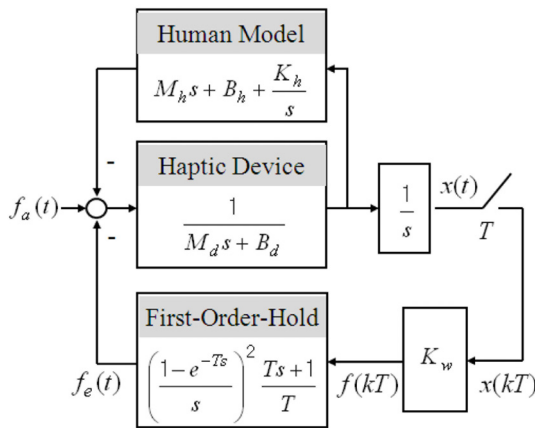


Fig. 1 Control block diagram of haptic system with FOH

홀드 (FOH) 방식이 포함된 햅틱 시스템의 안정성을 보장해 줄 수 있는 가상 스프링상수 (K_w)의 범위를 시뮬레이션을 통해 분석하고자 한다.

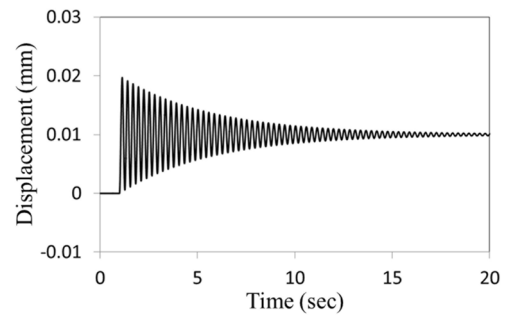
시뮬레이션에서 사용자 입력 $f_a(t)$ 는 단계 입력형 (step input)으로 가정한다. 그리고 인간 모델과 가상 스프링상수와의 상관관계를 분석하기 위하여 인간 모델 임피던스의 범위를 질량 (M_h)은 0 ~ 20 kg, 댐핑 (B_h)은 0 ~ 20 Ns/m, 스프링 상수 (K_h)는 0 ~ 200 N/m의 범위로 선정한다. 이 범위는 Table 1의 결과를 고려한 것이다.

사용하는 햅틱 장치의 임피던스 모델은 범용 햅틱 장치인 PHANTOM 1.0, Omega, Impulse engine를 대상으로 하며, 각각의 햅틱 장치의 질량 (M_d), 댐핑상수 (B_d), 그리고 샘플링 주기는 Table 2와 같다.⁴⁾

시뮬레이션은 MATLAB Simulink를 이용하며, 시뮬레이션 모델은 Fig. 1의 제어 블록선도를 토대로 설계된다. 시뮬레이션에서 시스템이 안정화되어 있다고 판단하는 기준은 Fig. 2와 같이 시간이 흐름에 따라 진폭이 감소하는 경우이다.

Table 2 Properties of common haptic devices.⁴⁾

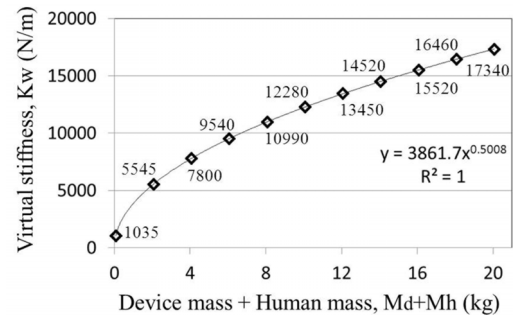
	Mass (kg)	Damping (Ns/m)	Sampling time (ms)
Phantom 1.0	0.072	0.005	1
Omega	0.220	0.01	0.33
Impulse Engine	0.032	0.02	0.2

Fig. 2 An example of stable behavior where $T=0.01$ sec, $M_d=0.2$ Kg, $B_d=0.1$ Ns/m, $K_w=100$ N, data hold type=FOH.

3.1 인간 모델의 질량 (M_h)과 가상 스프링 상수 (K_w)와의 관계 분석

인간 모델에서 질량(M_h)과 가상 스프링 상수 (K_w)의 관계를 분석하기 위해서 인간 모델에서 댐핑 상수 (B_h)와 스프링 상수 (K_h)를 제외하고 시뮬레이션을 수행하며, 햅틱 장치 PHANTOM 1.0의 물성치를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과가 Fig. 3이다. Figs. 3에서 표식(\diamond) 옆의 수치는 시뮬레이션을 통해 분석된, 시스템을 안정화시키는 가상 스프링 상수의 최대 값이다.

Fig. 3의 시뮬레이션 데이터를 추세선 분석을 이용해서 가상 스프링상수 (K_w)와 인간 모델의 질량 (M_h)와의 상관관계를 구하면 (3)과 같다. 여기서 0.072는 햅틱 장치의 질량 (M_d)이다. 여기서 R은 상관계수로써, 1에 가까울수록 측정 데이터와 근사식 사이의 오차가 작다는 것을 의미한다.

Fig. 3 Relation between human mass and virtual stiffness where $T=0.001$ sec, $M_d=0.072$ kg, $B_d=0.005$ Ns/m, $B_h=0$ Ns/m, $K_h=0$ N/m, data hold type=FOH.

$$K_w \leq 3861.7 (M_h + 0.072)^{0.5008} \quad (R^2 = 1) \quad (3)$$

Phantom 1.0으로 수행했던 시뮬레이션을 햅틱 장치인 Omega와 Impulse Engine의 물성치를 이용하여 반복 수행한다. Table 3은 인간 모델의 질량(M_h)과 안정성 확보를 위한 가상 스프링 상수(K_w)의 최대값이다.

Table 3의 데이터를 이용하여 오차를 최소화시키는 추세선을 계산하면 햅틱 장치 Omega의 경우에는 (4)로, Impulse Engine의 경우에는 (5)로 계산된다. 식 (4)에서 0.22는 Omega의 질량이고, (5)의 0.032는 Impulse Engine의 질량이다.

Omega:

$$K_w \leq 28877 (M_h + 0.22)^{0.5001} \quad (R^2 = 1) \quad (4)$$

Impulse Engine:

$$K_w \leq 86509 (M_h + 0.032)^{0.5004} \quad (R^2 = 1) \quad (5)$$

식 (3)~(5)의 공통적인 사항을 분석해보면, 햅틱 시스템을 안정화시킬 수 있는 가상 스프링 상수(K_w)의 최대값은 인간 모델 질량(M_h)의 제곱근에 비례함을 알 수 있으며, (6)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 c_1 은 비례상수이다.

$$K_w \leq c_1 (M_h + M_d)^{0.5} \quad (6)$$

Table 3 Maximum available stiffness (K_w) in haptic devices; omega and impulse engine, according to a human mass.

Human mass (Kg)	Omega	Impulse engine
	Max. K_w (N/m)	Max. K_w (N/m)
0	13540	15450
2	43035	123410
4	59340	173855
6	72045	212655
8	82820	245395
10	92350	274255
12	100975	300350
14	108920	324365
16	116345	346710
18	123305	367700
20	129895	387560

3.2 인간 모델의 댐핑 (M_d)과 가상 스프링 상수 (K_w)와의 관계 분석

인간 모델의 질량(M_h)과 가상 스프링 상수(K_w)의 관계 분석법과 동일한 방법으로 인간 모델의 댐핑 상수(B_h)과 가상 스프링 상수(K_w)의 관계를 분석한 시뮬레이션 결과가 Fig. 4이다. 여기서 햅틱 장치는 Phantom 1.0의 물성치를 사용하였으며, 인간모델의 질량과 스프링 상수는 제외된다.

Fig. 4의 시뮬레이션 데이터 분석을 통해 가상 스프링 상수(K_w)와 인간 모델의 댐핑 상수(B_h)와의 상관 관계를 구하면 (7)과 같다. 여기서 0.005는 햅틱 장치 Phantom 1.0의 댐핑 상수(B_d)이다.

$$K_w \leq 14337 (B_h + 0.005)^{0.4967} \quad (R^2 = 1) \quad (7)$$

햅틱 장치 Omega와 Impulse Engine의 물성치를 이용하는 경우, 인간 모델의 댐핑(B_h)과 시스템 안정화를 위한 가상 스프링 상수(K_w) 최대값은 Table 4와 같다. 그리고 인간 모델의 댐핑과 가상 스프링 상수와의 관계식은 햅틱 장치 Omega의 경우에는 (8)로, Impulse Engine의 경우에는 (9)로 계산된다. 식 (8)에서 0.01은 Omega의 댐핑이고, (9)의 0.02는 Impulse Engine의 댐핑이다.

Omega:

$$K_w \leq 133592 (B_h + 0.01)^{0.4964} \quad (R^2 = 1) \quad (8)$$

Impulse Engine:

$$K_w \leq 107178 (B_h + 0.02)^{0.4947} \quad (R^2 = 1) \quad (9)$$

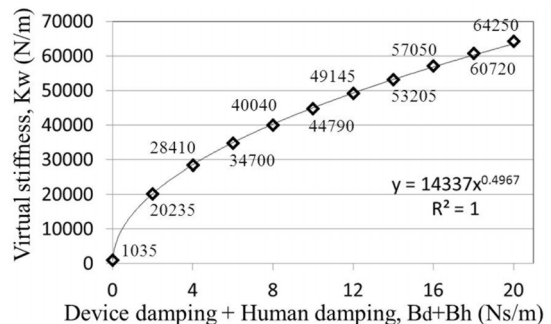


Fig. 4 Relation between human damping and virtual stiffness where $T=0.001$ sec, $M_d=0.072$ kg, $B_d=0.005$ Ns/m, $M_h=0$ kg, $K_h=0$ N/m, data hold type=FOH.

Table 4 Maximum available stiffness (K_w) in haptic devices; omega and impulse engine, according to a human damping.

Human damping (Ns/m)	Omega	Impulse engine
	Max. K_w (N/m)	Max. K_w (N/m)
0	13540	15450
2	190020	152495
4	267305	213775
6	326295	260585
8	375830	299985
10	419330	334705
12	458560	366150
14	494560	395145
16	528010	422230
18	559385	447780
20	589025	472065

식 (7)~(9)을 분석해보면, 햅틱 시스템의 안정성을 보장하는 가상 스프링 상수 (K_w)의 최대값은 인간 모델 질량 (M_h)의 제곱근에 비례하며, (10)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 c_2 는 비례상수이다.

$$K_w \leq c_2 (B_h + B_d)^{0.5} \quad (10)$$

3.3 인간 모델의 스프링 상수 (K_h)과 가상 스프링 상수 (K_w)와의 관계 분석

인간 모델의 스프링 상수(M_h)과 가상 스프링 상수 (K_w)의 관계를 분석한 방법과 동일한 절차로 인간 모델의 스프링 상수(K_h)과 가상 스프링 상수 (K_w)의 관계를 분석하며, 햅틱장치 Phantom 1.0의 물성치를 이용한 시뮬레이션 결과가 Fig. 5이다. 여기서 인간모델의 질량과 댐핑 상수의 영향은 제외된다.

실험 결과를 분석하면, 가상 스프링 상수 (K_w)와 인간 모델의 스프링 상수 (K_h)와의 상관관계는 (11)과 같다.

$$K_w \leq 1033.6 - 0.4727 K_h \quad (R^2 = 0.9978) \quad (11)$$

Tables 5는 햅틱 장치 Omega와 Impulse Engine에 대한 인간 모델의 스프링 상수 (K_h)와 시스템 안정화를 위한

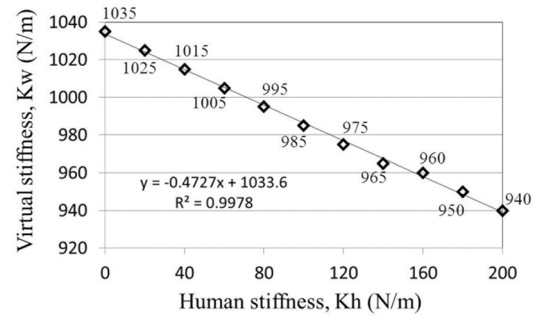


Fig. 5 Relation between human stiffness and virtual stiffness where $T=0.001$ sec, $M_d=0.072$ kg, $B_d=0.005$ Ns/m, $M_h=0$ kg, $B_h=0$ Ns/m, data hold type=FOH.

가상 스프링 상수 (K_w)의 최대값이다. 그 상관관계를 분석하면 햅틱 장치 Omega의 경우에는 (12)으로, Impulse Engine의 경우에는 (13)로 계산된다.

Omega:

$$K_w \leq 13540 - 0.5 K_h \quad (R^2 = 1) \quad (12)$$

Impulse Engine:

$$K_w \leq 15451 - 0.4727 K_h \quad (R^2 = 0.9978) \quad (13)$$

식 (11)~(13)를 보면, 인간 모델의 스프링 상수의 일정 비율만큼 가상 스프링 상수의 최대값이 작아진다.

Table 5 Maximum available stiffness (K_w) in haptic devices; omega and impulse engine, according to a human stiffness.

Human stiffness (N/m)	Omega	Impulse engine
	Max. K_w (N/m)	Max. K_w (N/m)
0	13540	15450
20	13530	15440
40	13520	15430
60	13510	15425
80	13500	15415
100	13490	15405
120	13480	15395
140	13470	15385
160	13460	15375
180	13450	15365
200	13440	15355

따라서 인간 모델의 스프링상수(K_h)와 가상 스프링 상수(K_w)와의 관계를 (14)와 같이 정리할 수 있다. 여기서 c_3 는 인간 모델의 스프링 상수가 '0'일 때 가상 스프링 상수의 최대값이며, 이 값은 샘플링주기, 햅틱 장치의 질량(M_d)과 댐핑상수(B_d) 값에 따라 달라진다. 값 0.48은 햅틱 장치별 시뮬레이션 결과에서 K_h 계수의 평균이다.

$$K_w \leq c_3 - 0.48K_h \quad (14)$$

4. 결 론

일차홀드 방식으로 반력이 구현되는 햅틱시스템에서 인간 모델이 시스템의 안정성이 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 분석한다.

영차홀드 방식을 사용하는 기존 연구 결과들을 보면, (15)와 같이 시스템 안정성을 보장하는 가상 스프링 상수(K_w)의 범위는 인간 모델의 질량(M_h)과 무관하고, 댐핑 상수(B_h)에는 비례한다.^{6,10)}

$$B_d + B_h \geq \frac{(K_w + K_h) T}{2} \quad (15)$$

그러나 일차홀드 방식을 이용할 경우에는 가상 스프링 상수(K_w)의 범위가 인간 모델의 질량(M_h)과 댐핑 상수(B_h)의 제곱근에 비례하여 증가한다. 이 결과는 햅틱 장치를 조작할 때, 상대적으로 질량이 작은 손가락으로 조작할 때 보다는 질량이 큰 팔로 조작할 때 더 큰 가상 스프링 상수를 안정적으로 구현할 수 있다는 것을 의미하며, 그 덕분에 가상 벽을 구현할 때 보다 몰입감 및 현실감을 증강시킬 수 있음을 의미한다.

그리고 일차홀드 방식을 이용할 때 인간 모델의 스프링 상수가 증가하면, 가상 스프링 상수의 범위가 줄어드는 경향을 보인다. 인간 모델의 스프링 상수가 0 N/m에서 200 N/m로 증가할 때, 햅틱 장치 Phantom 1.0의 경우는 가상 스프링 상수의 최대값은 9.17 % 감소하지만, Omega는 0.74 %, Impulse Engine은 0.61 % 감소한다. 즉, 햅틱 장치 물성치와 샘플링 주기에 따라 인간 모델의 스프링 상수의 영향은 달라지며, 샘플링 주기가 작을수록, 햅틱 장치의 질량과 댐핑 상수가 클수록 그 영향이 작아진다.

Acknowledgement

이 논문은 2013년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

References

- 1) J. E. Colgate and 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.
- 2) R. J. Adams and B. Hannaford, "Stable haptic interaction with virtual environments," IEEE Trans. Robot. Autom., vol. 15, no. 3, pp. 465-474, 1999.
- 3) R. J. Adams and B. Hannaford, "Control law design for haptic interfaces to virtual reality," IEEE Trans. Control Systems Technology, vol. 10, no. 1, pp. 3-13, 2002.
- 4) N. Diolaiti, G. Niemeyer, F. Barbagli, and J. K. Salisbury, "Stability of haptic rendering: discretization, quantization, time delay, and coulomb effects," IEEE Trans. on Robotics, vol. 22, no. 2, pp. 256-268, Apr. 2006.
- 5) J. J. Abbott and A. M. Okamura, "Effects of position quantization and sampling rate on virtual-wall passivity," IEEE Trans. Robotics, vol. 21, no. 5, pp. 952-964, Oct. 2005.
- 6) J. J. Gil, A. Avello, A. Rubio, and J. Florez, "Stability analysis of a 1 DOF haptic interface using the Routh-Hurwitz criterion," IEEE Trans. on Control Systems Technology, vol. 12, no. 4, pp. 583-588, July 2004.
- 7) J. J. Gil, E. Sanchez, T. Hulin, C. Preusche and G. Hirzinger, "Stability boundary for haptic rendering: influence of damping and delay," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Roma, Italy, pp. 124-129, 10-14 April 2007.
- 8) T. Hulin, C. Preusche, and G. Hirzinger, "Stability boundary for haptic rendering: influence of physical damping," IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1570-1575, Beijing, China, 9-15 Oct. 2006.
- 9) K. Lee, "Effect on data-hold methods on stability of haptic system," Journal of Institute of Convergence Technology, vol. 2, no. 2, pp. 35-39, 2012.
- 10) M. Minsky, M. Ouh-young, O. Steele, F.P. Brooks Jr., and M. Behensky, "Feeling and seeing: Issues in force display," Comput. Graph., vol. 24, no. 2, 1990.

- 11) K. J. Kuchenbecker, J. G. Park, and G. Niemeyer, "Characterizing the human wrist for improved haptic interaction," Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition, pp. 1-7, Washington D.C, USA, Nov. 16-21 2003.
- 12) T. Tsuji, K. K. Goto, M. Moritani, M. Kaneko, and P. Morasso, "Spatial characteristics of human hand impedance in multi-joint arm movement," IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 423-430, Munich, Germany, 12-16 Sept. 1994.
- 13) D. A. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 9, no. 5, pp. 624-637, 1993.