

일차홀드 방식을 포함한 햅틱 시스템의 안정성 영역에 대한 통신시간지연과 햅틱장치 물성치의 영향 분석

이경노

국립 한국교통대학교 에너지시스템공학과

Impact Analysis of Communication Time Delay and Properties of a Haptic Device on Stability Boundary for a Haptic System with a First-Order Hold

Kyungno Lee

Department of Energy System Engineering, Korea National University of Transportation

요약 사용자가 원격으로 가상환경에 접속하여 가상물체를 조작할 때 현실감을 증강시키기 위해서 햅틱 시스템이 사용된다. 그러나 원격 시스템 환경에는 통신시간지연이 발생하며, 발생된 통신시간지연은 햅틱 시스템을 불안정하게 만들 수 있다. 본 논문에서는 종래의 샘플-홀드 방식인 영차홀드 (ZOH; Zero-Order-Hold)가 아닌 일차홀드 (FOH; First-Order-Hold)를 포함하는 햅틱 시스템에서 시뮬레이션을 통해 통신시간지연과 햅틱 장치의 물성치 변화에 따른 가상 스프링상수의 안정성 영역을 분석하고 이를 통해 안정적인 햅틱 시스템을 구현하고자 한다. 통신시간지연이 없으면 일차홀드 (FOH) 방식이 영차홀드 (ZOH) 방식보다 가상 스프링상수의 안정성 영역을 증가시킬 수 있었다. 그러나 통신시간지연이 증가하면, 샘플-홀드 방식보다 통신시간지연이 시스템 안정성에 더 큰 영향을 끼치므로, 샘플-홀드 방식에 따른 가상 스프링상수의 안정성 영역 크기에 차이가 없어진다. 또한 통신시간지연과 일차홀드 방식이 포함되면 가상 스프링상수의 안정성 영역은 통신시간지연 크기에 반비례하고, 햅틱 장치의 댐핑상수 (B_i)에 정비례하여 증가하지만, 햅틱 장치의 질량 (M_i)에는 영향받지 않음을 알 수 있었다.

Abstract Haptic systems help users feel a realistic sensation when they manipulate virtual objects in the remote virtual environment. However, there are communication time delays that may make the haptic system unstable. This paper shows the relationship between communication time delay, properties of a haptic device, and the stability of the haptic system with the first-order hold method in a simulation. The maximum available stiffness of a virtual spring with the first-order hold method is larger than in the zero-order hold method when there is no time delay. However, when the communication time delay is much larger than the sampling time, the maximum available stiffness to guarantee the stability becomes the same, irrespective of the sample-hold methods. Besides, the maximum available stiffness increases in inverse proportion to the communication time delay and in proportional to the damping coefficient of the haptic device.

Keywords : Communication Time Delay, First-Order-Hold, Haptic Device, Haptics, Stability

1. 서론

햅틱 시스템은 사용자와 가상환경과의 상호작용을 위

한 시스템이며, 사용자는 햅틱 장치를 통해 가상환경 속 물체들의 위치를 조작하고 이 때 발생하는 반력을 전달 받게 된다. 특히 통신 네트워크를 이용하여 원격지의 물

본 논문은 농림수산식품기술기획평가원의 첨단생산기술개발사업의 연구결과로 수행되었음. (115062022HD020)

*Corresponding Author : Kyungno Lee (Korea National University of Transportation)

Tel: +82-43-841-5285 email: klee@ut.ac.kr

Received December 5, 2016

Revised (1st December 21, 2016, 2nd December 29, 2016)

Accepted January 6, 2017

Published January 31, 2017

체를 조작하거나, 원격지 서버 속의 가상 환경에 접속하여 상호작용하는 경우에도 햅틱 시스템은 폭넓게 사용된다.

가상 환경에서 발생하는 반력과 사용자사이의 상호작용 때문에 햅틱 시스템이 불안정하게 되기도 하며, 불안정한 반력의 생성은 사용자의 안전을 위협할 수 있으므로 햅틱 시스템의 안정적인 제어는 매우 중요하다.

햅틱 시스템의 안정적인 제어를 위하여 햅틱 시스템 구성요소들에 대한 시스템 안정성에 대한 영향을 분석하였다. 가상 스프링과 가상 댐퍼로 구성된 가상 커플링을 이용하여 수동성 (passivity)을 기준으로 샘플링 주기와 햅틱 장치의 댐퍼가 시스템 안정성에 미치는 영향에 대한 조건[1]을 유도하거나 또는 루드-후르비쯔 (Routh-Hurwitz) 안정성 판별법을 이용하여 시스템의 안정성 조건을 제시했다[2]. 또는 햅틱 장치의 쿨롱 마찰력, 엔코더 분해능, 샘플-홀드, 시간지연, 양자화 등의 구성요소가 시스템의 안정성에 미치는 영향을 제시하였다[3-4]. 그렇지만 이러한 선행 연구들은 영차홀드(ZOH; Zero-Order-Hold)인 샘플-홀드에만 한정하여 햅틱 시스템의 구성요소가 시스템의 안정성에 미치는 영향을 분석했다.

최근에는 햅틱 시스템의 안정성 향상을 위하여 영차홀드 방식 대신 일차홀드 (FOH; First-Order-Hold) 방식을 이용하는 방법이 제시되었다.[5-9]

일차홀드 방식을 이용한 햅틱 시스템에서 샘플링주기와 가상 스프링모델의 안정성 영역에 대한 조건[5]을 유도하고, 햅틱장치의 물성치인 질량과 댐퍼의 안정성 영향을 분석하고[6], 인간모델에 의한 안정성 영역의 변화를 분석하였다[7]. 그리고 계산시간지연에 의한 시스템의 안정성 영향을 시뮬레이션을 통해 제시하였다[8-9]. 그렇지만, 원격지 환경을 고려한 통신시간지연에 대한 영향 및 시스템 안정성 확보를 위한 가상환경 속 물체의 임피던스 설계에 대한 고찰은 부족했다.

본 논문에서는 일차홀드 방식을 이용하고, 통신시간지연이 발생하는 경우에 대한 시스템의 안정성 영향을 시뮬레이션을 통해 분석하고자 한다.

시간지연이 없고 일차홀드를 포함한 햅틱 시스템의 안정성 영역은 햅틱장치의 질량과 댐퍼의 제공근에 비례하고[6], 동일한 조건에서 영차홀드를 포함한 햅틱 시스템의 안정성 영역보다 수십 배 더 증가된다[5-6]. 이러한 경향이 통신시간지연이 포함된 경우에는 어떻게 변화되

는지 살펴보고자 한다. 따라서 햅틱 시스템의 안정성 영역에 대한 통신시간지연의 영향과 통신시간지연이 포함된 환경에서 햅틱 장치의 물성치인 질량과 댐퍼 크기 변화에 따른 영향을 분석하였다.

2. 통신시간지연과 일차홀드 모델을 포함한 햅틱 시스템

인터넷 게임과 같이 네트워크를 이용하여 가상환경에 접근하는 경우, 사용자에게 의해 조작되는 햅틱 장치의 위치 정보는 통신 네트워크를 통해 가상환경에 전달되고, 전달된 햅틱 장치의 위치 정보와 가상환경의 임피던스 모델로부터 계산된 반력은 다시 통신 네트워크를 통해 사용자에게 전달된다. 이 과정에서 통신 네트워크에 의한 시간지연이 발생할 수 있으며, 이를 모델화한 것이 Fig. 1이다. 사용자의 힘 $f_a(t)$ 에 의해 햅틱장치가 움직이며, 햅틱 장치는 질량 (M_d)와 댐퍼 (B_d)로 구성된 2차 시스템으로 모델화되며, 햅틱 장치의 위치정보 $x(t)$ 는 샘플링 주기 T 마다 취득되고 송신된다. 송신시 발생하는 송신시간지연은 T_s 이며, 수신된 위치정보와 가상 임피던스 모델로부터 사용자에게 전달될 반력이 계산된다. 다시 사용자에게 전달될 때 발생하는 수신시간지연은 T_r 이다. 수신된 반력은 샘플-홀드를 통해 사용자에게 전달된다.

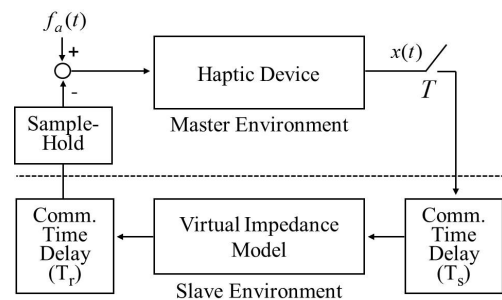


Fig. 1. Block diagram of haptic system with communication time delay and first-order hold.

가상 임피던스 모델은 유한요소법과 같이 동역학적 모델에 근거하여 모델화될 수도 있지만, 본 논문에서는 가상 스프링상수(K_w)로 단순화된 가상벽 (virtual wall) 모델을 이용하여 반력을 계산한다.

샘플-홀드 방식에서 영차홀드의 라플라스 변환식 ($G_{h0}(s)$)과 일차홀드의 라플라스 변환식 ($G_{h1}(s)$)은 각각 식(1) ~ (2)와 같다[6]. 여기서 T 는 샘플링 주기이다.

$$\text{영차홀드: } G_{h0}(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \quad (1)[6]$$

$$\text{일차홀드: } G_{h1}(s) = \left(\frac{1 - e^{-Ts}}{s} \right)^2 \frac{Ts + 1}{T} \quad (2)[6]$$

3. 통신시간지연에 따른 햅틱 시스템의 안정성 분석

본 논문에서는 통신시간지연 크기에 따라 햅틱 시스템의 안정성을 유지할 수 있는 가상 스프링상수 (K_w)의 최대값 범위를 시뮬레이션을 통해 산출하고 그 관계를 분석한다. 시뮬레이션에서 햅틱 시스템의 안정성여부는 햅틱 장치 위치정보의 시간에 대한 수렴여부로 판단한다.

영차홀드를 포함한 햅틱 시스템에서 가상 스프링상수 K_w 의 안정성 영역과 샘플링 주기 T , 햅틱장치의 댐퍼 b , 시간지연 t_d 과의 관계는 식(3)과 같다.[10]

$$K_w < \frac{b}{\frac{T}{2} + t_d} \quad (3)[10]$$

송신시간지연 (T_s)와 수신시간지연 (T_r)의 크기는 같고, 샘플링 주기를 1 ms, 햅틱 장치의 질량을 0.5 kg, 댐퍼를 1.0 Ns/m로 가정하고 샘플-홀드 방식을 영차홀드 (ZOH)로 설정하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 가상 스프링상수의 안정성 영역 (K_w)의 최대값은 Table 1과 같다. 그리고 식 (3)을 이용하여 계산된 안정성 영역과 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 여기서 식(3)의 시간지연 (t_d)은 송신시간지연 (T_s)와 수신시간지연 (T_r)의 합이다. 식(3)의 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하면 안정성 영역 값이 거의 같다. 따라서 시뮬레이션 결과가 타당함을 알 수 있다.

Table 1의 시뮬레이션 환경과 동일한 조건에서 샘플-홀드 방식만을 일차홀드 (FOH)으로 변경하고 가상 스프링상수의 안정성 영역의 최대값(K_w)을 시뮬레이션을 통해 산출한 결과가 Table 2이다.

Table 1. Stable maximum stiffness, K_w according to communication time delay. (Mass $M_d=0.5$ kg, Damper $B_d=1.0$ Ns/m, Sampling time $T=1$ ms)

Comm. time delay (T_s , sec)	Comm. time delay (T_r , sec)	K_w (N/m) @Eq.(3)	K_w (N/m) @ZOH	Error (%)
0.001	0.001	400	400	0.0
0.002	0.002	222	222	0.0
0.003	0.003	154	154	0.0
0.004	0.004	118	117	0.0
0.005	0.005	95	95	0.0
0.006	0.006	80	80	0.0
0.007	0.007	69	69	0.0
0.008	0.008	61	60	0.0
0.009	0.009	54	54	0.0
0.010	0.010	49	49	0.0

Table 2. Comparison of FOH and ZOH effect on the stable maximum stiffness, K_w . (Mass $M_d=0.5$ kg, Damper $B_d=1.0$ Ns/m, Sampling time $T=1$ ms)

Comm. time delay ($T_s + T_r$, sec)	K_w (N/m) @ZOH	K_w (N/m) @FOH	$\frac{K_w \text{ @FOH}}{K_w \text{ @ZOH}}$
0.002	400	500	1.25
0.004	222	250	1.13
0.006	154	166	1.08
0.008	117	125	1.07
0.010	95	100	1.05
0.012	80	83	1.04
0.014	69	71	1.03
0.016	60	62	1.03
0.018	54	55	1.02
0.020	49	50	1.02
0.022	44	45	1.02
0.024	41	41	1.00
0.026	38	38	1.00
0.028	35	36	1.03
0.030	33	33	1.00

통신시간지연이 매우 작을 때에는 안정성 영역의 범위가 다소 차이가 나지만, 송수신시간지연의 합이 10 ms 이상, 즉 샘플링주기보다 10배 이상이 되면 상대오차가 5%미만이 되며, 그 값에는 차이가 거의 없다. Fig. 2는 통신시간지연에 대한 햅틱 시스템의 안정성 영역 변화에 대한 그래프이며, 추세선 분석을 통해 그 관계를 살펴보면 식 (4)와 같다. 식 (4)에서 K_w 는 가상 스프링상수의 안정성 영역의 최대값, T_{Delay} 는 통신시간지연의 합이다.

$$K_w = 0.9808 T_{Delay}^{-1.003} \quad (R^2 = 0.9999) \quad (4)$$

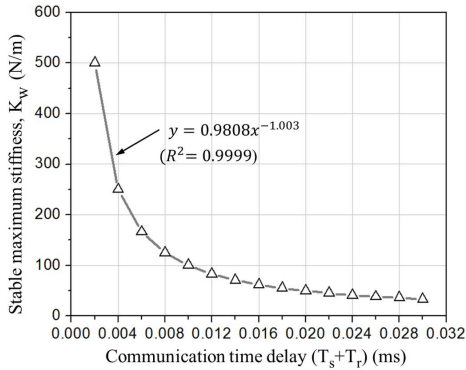


Fig. 2. Relation between communication time delay and stable maximum stiffness (K_w) where mass $M_d=0.5$ kg, damper $B_d=1.0$ Ns/m and FOH are used.

Fig. 2의 추세선 결과를 통해 가상 스프링상수의 안정성 영역의 최대값 K_w 은 통신시간지연 T_{Delay} 과 반비례 관계임을 알 수 있다. 그 관계를 식 (5)와 같이 표현할 수 있으며, 여기서 C_1 은 상수이다.

$$K_w \propto C_1 \cdot T_{Delay}^{-1} \quad (5)$$

통신시간지연은 햅틱 장치 위치정보를 송신할 때와 반력 정보를 수신할 때 발생한다. 각 통신시간지연의 크기가 햅틱 시스템 안정성에 미치는 영향을 살펴보기 위해서, 송수신 시간지연의 비율을 변화시키면서 시뮬레이션을 수행한 결과가 Table 3이다.

Table 3. Stable maximum stiffness, K_w according to the ratio between sending communication time delay and receiving communication time delay. (Mass $M_d=0.5$ kg, Damper $B_d=1.0$ Ns/m, Sampling time $T=1$ ms)

Comm. time delay (T_s , sec)	Comm. time delay (T_r , sec)	Comm. time delay (T_s+T_r , sec)	K_w (N/m) @ZOH	K_w (N/m) @FOH
0.002	0.008	0.01	95	100
0.004	0.006	0.01	95	100
0.006	0.004	0.01	95	100
0.008	0.002	0.01	95	100
0.002	0.018	0.02	49	50
0.004	0.016	0.02	49	50
0.006	0.014	0.02	49	50
0.008	0.012	0.02	49	50

Table 3의 결과를 살펴보면, 송수신 통신시간지연의 합이 일정하면 가상 스프링상수의 안정성 영역도 동일한

것을 알 수 있다. 따라서 송신시간지연(T_s)과 수신시간지연(T_r)의 비율이 중요한 요소가 아니라 시간지연의 총합이 시스템의 안정성에 영향을 미친다. 따라서 식 (4)에서 송신시간지연과 수신시간지연의 합인 T_{Delay} 를 이용하여 가상 스프링상수의 안정성 영역 최대값과의 관계를 유추한 것은 타당하다.

샘플-홀드 방식 차이에 의한 성능 차이는 샘플링주기 (T)와 비슷할 때 발생함을 Table 2에서 알 수 있었다. 따라서 샘플링 주기와 비슷한 크기의 통신시간지연이 포함된 가상 스프링상수의 안정성영역(K_w)에 대한 일차홀드 (FOH) 방식과 영차홀드(ZOH) 방식의 성능을 비교하였고, 그 결과가 Table 4이다.

Table 4. Comparison of FOH and ZOH effect on the stable maximum stiffness, K_w . (Mass $M_d=0.5$ kg, Damper $B_d=1.0$ Ns/m)

Sampling time (T , sec)	Comm. time delay (T_s+T_r , sec)	K_w (N/m) @ZOH	K_w (N/m) @FOH	$\frac{K_w @FOH}{K_w @ZOH}$
0.001	0.0	2000	38370	19.19
	0.001	667	998	1.50
	0.002	400	500	1.25
0.002	0.0	1000	13521	13.05
	0.002	333	498	1.50
	0.004	200	250	1.25
0.004	0.0	500	4759	9.52
	0.004	167	248	1.50
	0.008	100	125	1.25

Table 4의 결과를 보면, 일차홀드 방식이 샘플링 주기만큼의 통신시간지연(T_s+T_r)이 있을 경우에는 영차홀드 방식에 비해 150%, 샘플링 주기의 2배만큼 통신시간지연이 있을 경우에는 영차홀드 방식에 비해 125% 성능이 향상시킴을 알 수 있다.

일차홀드 방식은 샘플-홀드 방식에서 발생하는 시간지연을 영차홀드 방식보다 더 많이 보상해주므로 가상 스프링상수의 안정성 영역을 증가시킬 수 있다. 따라서 샘플링 주기와 비슷한 크기의 통신시간지연에 대해서는 일차홀드 방식의 시간지연 보상효과로 인하여 영차홀드 방식보다 안정성영역이 증가하게 되고, 통신시간지연이 샘플링 주기보다 매우 커진 경우에는 샘플-홀드 방식에 의한 시간지연보다 통신시간지연이 시스템의 안정성에 더 큰 영향을 주게 됨으로 일차홀드 방식과 영차홀드 방식의 안정성영역이 유사해지는 결과를 보인다.

4. 햅틱 장치의 질량 및 댐퍼에 의한 가상 스프링모델의 안정성 분석

시간지연이 없고 일차홀드를 포함한 햅틱 시스템의 안정성 영역은 햅틱장치의 질량과 댐퍼의 제공근에 비례하는데[6], 이러한 경향이 통신시간지연이 존재할 때에는 어떻게 변화되는지 살펴보고자 한다. 따라서 통신시간지연이 존재할 때 햅틱장치의 물성치인 질량(M_d)과 댐퍼(B_d)의 크기에 따른 햅틱 시스템의 안정성 영역 변화를 분석하였다.

Table 5는 햅틱 장치의 질량에 대한 햅틱 시스템의 안정성 영역 변화에 대한 시뮬레이션 결과이다. Table 5는 햅틱 장치의 질량(M_d)을 Table 1의 경우보다 2배 크게 설정하여 통신시간지연에 대한 가상 스프링상수의 안정성 영역(K_w)을 분석한 결과인데, Table 1의 결과처럼 햅틱 장치의 질량이 변해도 통신시간지연과 가상 스프링상수의 안정성 영역관계는 반비례관계를 유지한다. 또한, Table 5를 보면 샘플링 주기보다 통신시간지연이 커질수록, 즉 샘플링 주기인 1 ms보다 약 20배 더 큰 통신시간지연이 발생할 경우에는 샘플-홀드 방식에 무관하게 가상 스프링상수의 안정성영역이 비슷해짐을 알 수 있다.

Table 5. Stable maximum stiffness, K_w , according to the communication time delay (Mass $M_d=1.0$ kg, Damper $B_d=1.0$ Ns/m, Sampling time $T=1$ ms)

M_d (kg)	Comm. time delay ($T_s + T_r$, sec)	Ⓐ	Ⓑ	Ⓑ - Ⓐ (N/m)
		K_w (N/m) @ZOH	K_w (N/m) @FOH	
1.0	0.002	400	500	100
	0.004	222	250	28
	0.006	154	166	12
	0.008	117	125	8
	0.010	95	100	5
	0.012	80	83	3
	0.014	69	71	2
	0.016	60	62	2
	0.018	54	55	1
	0.020	48	50	2
	0.022	44	45	1
	0.024	40	41	1
	0.026	37	38	1
	0.028	35	35	0
	0.030	32	33	1

또한 통신시간지연이 샘플링 주기보다 상대적으로 큰 상태에서 햅틱 장치의 질량만을 증가시킨 경우에는 질량 변화가 햅틱 시스템의 안정성 영역에 영향을 주지 않음을 Fig. 3을 통해 알 수 있으며, 그 관계는 식 (6)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 K_w 는 안정적인 가상 스프링상수의 최대값이고, M_d 는 햅틱 장치의 질량이다.

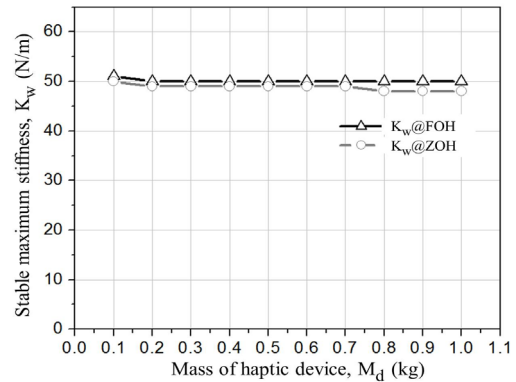


Fig. 3. Relation between the mass of a haptic device and stable maximum stiffness (K_w) where damper $B_d=1.0$ Ns/m, data hold type=FOH and ZOH.

$$K_w \neq f(M_d) \tag{6}$$

통신시간지연이 없을 때 일차홀드 방식을 사용하면 햅틱 장치 질량의 제공근에 비례하여 햅틱 시스템의 안정성 영역이 커졌지만[6], 통신시간지연이 존재하면 햅틱 장치의 질량이 안정성 영역에 영향을 주지 않는다.

Table 6은 햅틱 장치의 댐퍼에 대한 햅틱 시스템의 안정성 영역 변화에 대한 시뮬레이션 결과이다. 햅틱 장치의 댐퍼(B_d)를 Table 1의 경우보다 절반의 크기로 설정하여 통신시간지연에 따른 햅틱 시스템의 안정성 영역을 구한 결과이다. Table 1의 결과와 비교해보면, 영차홀드 방식과 일차홀드 방식 모두에서 안정성 영역이 절반으로 줄어들었으며, 특히 통신시간지연이 커질수록 샘플-홀드 방식에 상관없이 가상 스프링상수의 안정성 영역이 비슷해진다.

또한 송수신 통신시간지연을 20 ms로 고정하고 햅틱 장치의 댐퍼를 0.1 Ns/m에서 1.0 Ns/m 까지 증가시키면 샘플-홀드 방식에 상관없이 안정성 영역이 모두 정비례하여 증가하는 것을 Fig. 4에서 볼 수 있다. 그리고 그 관계를 식 (7)과 같이 표현할 수 있으며, 여기서 C_2 는

상수, K_w 는 안정적인 가상 스프링상수의 최대값, B_d 는 햅틱 장치의 댐퍼이다. 그리고 샘플링 주기보다 통신시간지연이 상대적으로 큰 경우, 즉 샘플링 주기 1 ms, 통신시간지연 20 ms 이상인 경우에는 샘플-홀드 방식에 따른 가상 스프링상수의 안정성영역에 차이가 없음을 알 수 있다.

Table 6. Stable maximum stiffness, K_w according to the communication time delay (Mass $M_d=0.5$ kg, Damper $B_d=0.5$ Ns/m, Sampling time $T=1$ ms)

B_d (Ns/m)	Comm. time delay ($T_s + T_r$) (sec)	(A)	(B)	(B) - (A) (N/m)
		K_w (N/m) @ZOH	K_w (N/m) @FOH	
0.5	0.002	200	250	50
	0.004	111	125	14
	0.006	77	83	6
	0.008	58	62	4
	0.010	47	50	3
	0.012	40	41	1
	0.014	34	35	1
	0.016	30	31	1
	0.018	27	27	0
	0.020	24	25	1
	0.022	22	22	0
	0.024	20	20	0
	0.026	18	19	1
	0.028	17	17	0
	0.030	16	16	0

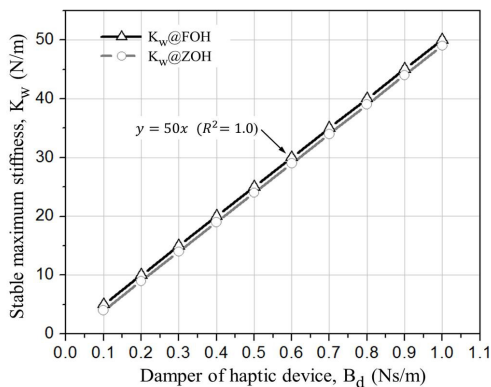


Fig. 4. Relation between the damper of a haptic device and stable maximum stiffness (K_w) where mass $M_d=0.5$ kg, data hold type=FOH and ZOH.

$$K_w \propto C_2 \cdot B_d \quad (7)$$

일차홀드방식이 포함된 가상 스프링상수의 안정성 영역은, 시간지연이 없을 때에는 햅틱 장치의 질량과 댐퍼의 제공근에 비례했지만[6], 샘플링 주기보다 상대적으로 큰 시간지연이 포함되면 햅틱 질량에는 영향을 받지 않으며, 햅틱 댐퍼에는 영차홀드방식의 경우처럼 정비례 관계를 갖는다.

5. 결론

일차홀드 방식이 포함된 햅틱 시스템에서 통신시간지연, 햅틱 장치의 물성치가 가상 스프링상수의 안정성 영역에 미치는 영향을 분석했으며 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 통신시간지연이 존재할 때 안정적인 가상 스프링상수의 최대값, K_w 은 식(8)과 같이 통신시간지연의 총합 T_{Delay} 에 반비례하고, 햅틱 장치의 질량 M_d 와는 무관하며, 햅틱 장치의 댐퍼 B_d 에는 정비례관계를 갖는다. 여기서 C_3 은 상수이다.

$$K_w \propto C_3 \cdot \frac{B_d}{T_{Delay}} \quad (8)$$

둘째, 일차홀드 방식을 활용하면 영차홀드 방식을 이용할 때보다, 샘플링 주기와 통신시간지연이 비슷한 경우에는 150%, 통신시간지연이 2배 큰 경우에는 125% 정도 가상 스프링상수의 안정성 영역을 더 크게 할 수 있다.

셋째, 샘플링 주기보다 통신시간지연이 상대적으로 큰 경우에는 시스템의 안정성에 통신시간지연의 영향이 더 크게 작용함으로써 일차홀드 방식을 포함한 시스템과 영차 홀드 방식을 포함한 시스템의 안정성 영역이 비슷해진다.

가상환경을 구현할 때 가상 스프링상수를 안정적으로 증가시킬 수 있다면 보다 현실감높은 강체를 구현할 수 있다. 따라서 통신시간지연이 존재할 때 가상 스프링상수의 안정성에 대한 샘플-홀드 방식 및 햅틱 장치 물성치의 영향 분석 결과는 안정적인 원격 가상 환경 구현을 위한 설계지침으로 활용가능하다. 또한 통신시간지연이 크지 않다면 일차홀드 방식을 활용함으로써 종래보다 단단한 강체를 안정적으로 구현할 수도 있을 것이다.

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.
DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4563\(199701\)14:1<37::AID-ROB4>3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4563(199701)14:1<37::AID-ROB4>3.0.CO;2-V)
- [2] 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.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TCST.2004.825134>
- [3] 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.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2005.862487>
- [4] 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.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2005.851377>
- [5] K. Lee, "Stability analysis of a haptic system with a first-order-hold method," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 389-394, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2014.13.1970>
- [6] K. Lee, "Stability of haptic system with consideration for sample-and-hold methods and properties of haptic device," *Journal of the Korea Academic Industrial cooperation Society*, vol. 14, no. 11, pp. 5338-5343, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.11.5338>
- [7] K. Lee, "Stability analysis of a haptic system with a human impedance model using the Routh-Hurwitz criterion," *Journal of the Korea Academic Industrial cooperation Society*, vol. 15, no. 4, pp. 1813-1818, 2014.
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.4.1813>
- [8] K. Lee, "Effect on the time delay on the stability of a virtual wall model with a first-order-hold method," *Journal of Institute of Convergence Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 17-21, 2014.
- [9] K. Lee, "Analysis for the stability of a haptic system with the computational time-varying delay," *Journal of Institute of Convergence Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 37-42, 2015.
- [10] J.J. Gil, E. Sanchez, T. Hulin, C. Preusche, and G. Hirzinger, "Stability boundary for haptic rendering: influence of damping and delay," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, 10-14 April 2007, pp. 124-129, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1109/robot.2007.363775>

이 경 노(Kyungno Lee)

[정회원]



- 1996년 2월 : 연세대학교 기계공학과 졸업 (학사)
- 1998년 2월 : KAIST 기계공학과 졸업 (석사)
- 2007년 2월 : KAIST 기계공학과 졸업 (박사)
- 2014년 10월 ~ 현재 : 한국교통대학교 부교수

<관심분야>

가상현실, 햅틱 인터페이스, 원격제어