

일차홀드 방식과 가상 댐퍼가 가상 스프링의 안정성 영역에 미치는 영향

이경노

국립 한국교통대학교 기계자동차항공공학부

Effects of a First-order-hold Method and a Virtual Damper on the Stability Boundary of a Virtual Spring

Kyungno Lee

School of Mechanical, Automotive and Aeronautical Engineering, Korea National University of Transportation

요약 가상환경 속 가상 강체는 가상 스프링과 가상 댐퍼의 병렬구조로 모델링되며 가상 강체의 현실감을 증강시키기 위해서는 가상 모델로부터의 반력을 안정적으로 최대한 크게 제시해야 한다. 따라서 햅틱 인터페이스의 안정성을 유지시킬 수 있는 가상 스프링과 가상 댐퍼의 영역을 분석하여 가상 강체모델을 선정하는 것이 중요하다. 기존에는 영차홀드를 이용하는 시스템에 대해 안정성 영역이 분석되었으나, 본 논문에서는 일차홀드 방식과 가상 댐퍼를 이용하는 햅틱 시스템에 대한 안정성 영역을 분석한다. 안정적인 가상 댐퍼 영역의 경계값은 샘플링 주기와 반비례 관계를 가지며, 안정적인 가상 스프링 영역의 최대값은 샘플링 주기의 제곱에 반비례 관계를 갖는다. 그리고 그 최대값은 일차홀드 방식을 이용하여 기존의 영차홀드의 경우보다 약 110% 향상시킬 수 있다. 가상 댐퍼의 크기가, 일차홀드 방식에서의 안정적인 가상 댐퍼 경계값의 약 50% 보다 작다면, 일차홀드를 이용함으로써 기존의 영차홀드의 경우보다 안정적인 가상 스프링의 영역을 수 배 더 크게 할 수 있다.

Abstract A virtual rigid is modeled as the parallel structure of a virtual spring and a virtual damper. The reflective force from the virtual model is designed to be as large as possible to improve the realism of the virtual environment while maintaining the stable interaction. So, it is important to analyze the stability boundary of the virtual spring and damper. In the previous researches, the stability boundary is analyzed based on the zero-order-hold (ZOH) method, but it is analyzed based on the first-order-hold (FOH) method and the virtual damper in the paper. The boundary value of the stable virtual damper is inverse proportional to the sampling time and the maximum value of stable virtual stiffness is inverse proportional to the square of the sampling time. And the maximum value in the FOH method is increased to 110% of the value in the ZOH method. If the virtual damper is smaller than about 50% of the boundary value of the virtual damper in the FOH method, the stable virtual stiffness in the FOH method is several times larger than that in the ZOH method.

Keywords : First-Order-Hold Method(FOH), Haptic Interface, Stability Boundary, Virtual Damper, Virtual Reality

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

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

Received March 21, 2019

Revised May 2, 2019

Accepted June 7, 2019

Published June 30, 2019

1. 서론

사용자는 햅틱 인터페이스를 통해 가상환경 속 가상 물체와 역감적으로 상호작용을 수행한다. 이 때 가상의 물체가 강체라면 햅틱 인터페이스의 안정성이 보장되는 한도 내에서 최대한 큰 역감을 사용자에게 전달해줘야 현실감과 몰입감이 증가된다. 이에 안정적으로 큰 역감을 전달해주기 위한 연구가 진행되었다.

가상 벽을 가상 스프링 (virtual spring)과 가상 댐퍼 (virtual damper)의 병렬구조로 모델화하고 수동성 (passivity)의 측면에서 시스템 안정성에 대해 해석하였다[1,2]. 또는 루드-후리비쯔 판별법 (Routh-Hurwitz criterion)을 이용하여 가상 스프링과 가상 댐퍼의 병렬 구조로 구성된 가상 커플링에 대한 안정성 영역을 해석하였다[3]. 그리고 안정적으로 보다 큰 역감 전달을 위해서 가상 스프링과 가상 댐퍼에 대한 반력 계산 주기를 이원화하는 연구[4]와 속도 필터의 이상적인 차단 주파수 설계 방법[5] 등의 연구가 진행되었으며 최근에는 외삽법과 고주파 영차홀드를 이용하여 가상 스프링의 안정성을 향상시키는 연구가 진행되었다[6]. 이러한 기존 연구들은 샘플-홀드 방식 중 영차홀드 방식에 근거한 연구들이었으며, 햅틱 인터페이스의 안정성 영역을 향상시키기 위해서 일차홀드 방식을 이용하는 연구도 진행되고 있다[7]. 일차홀드를 이용하는 기존 연구에서는 가상환경을 가상 스프링으로만 모델링하여 안정성 영역을 분석하였으나, 가상 강체에 대한 동역학적 역감을 표현하기 위해서는 가상 스프링은 물론 가상 댐퍼가 포함된 가상 환경에 대한 안정성 분석이 필요하다.

본 논문에서는 일차홀드 방식과 가상 댐퍼 변화에 따른 가상 스프링의 안정성 영역을 분석하고, 영차홀드를 사용하는 기존 연구 결과와 비교, 분석하고자 한다.

2. 가상 댐퍼가 포함된 햅틱 시스템

햅틱 시스템은 Fig. 1과 같이 크게 햅틱 장치 모델, 샘플러, 가상 모델, 그리고 샘플-홀드 모델로 구성된다. 햅틱 장치 모델은 일반적으로 질량(M_d)과 댐퍼(B_d)로 구성된 2차 시스템으로 모델화된다. 샘플러의 주기는 T 로 가정하고, 가상 모델은 일반적인 가상 강체 모델로서 가상 스프링 (K_w)과 가상 댐퍼 (B_w)가 병렬로 연결된 모델이다. 그리고 샘플-홀드 모델은 영차홀드 (ZOH: Zero-Order-Hold,

이하 ZOH)[4]와 일차홀드 (FOH: First-Order-Hold, 이하 FOH)[7]의 2가지 모델을 이용하며, 샘플-홀드 모델에 따른 안정성 영역을 비교한다. 또한 기존의 영차홀드 대신에 일차홀드를 이용할 때 가상 댐퍼 변화에 따른 햅틱 시스템의 안정성 영역 변화를 분석한다.

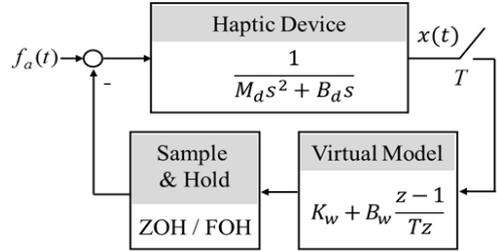


Fig. 1. Block diagram for a haptic interface

3. 시뮬레이션 및 안정성 분석

시뮬레이션 환경은 Fig. 1에서 제시된 햅틱 시스템의 블록선도와 동등하게 제어블록이 설계되고 구현된다. 사용자 입력 $f_a(t)$ 는 계단형입력 (step input)으로 가정하며, 시스템이 안정하다고 판단하는 기준은 시뮬레이션에서 변위 $x(t)$ 가 시간의 흐름에 따라 점차 감소하는 경우이며, 이 조건을 만족시키는 가장 큰 가상 스프링 값이 안정적인 가상 스프링의 경계값이 된다. 시뮬레이션에서는 가상 스프링을 1의 크기 단위로 조절하면서 경계값을 결정한다. 햅틱 장치의 질량(M_d)는 0.5 kg, 댐퍼(B_d)는 0.1 Ns/m로 가정한다. 이에 샘플-홀드 방법별로 샘플링 주기(T), 가상 댐퍼(B_w) 변화에 따른 안정적인 가상 스프링의 경계값($K_{w, TH}$)을 시뮬레이션을 통해 분석한다.

기존 연구에서는 영차홀드가 포함된 햅틱 시스템 안정성에 대한 가상 댐퍼의 영향을 안정성 (stability) 측면에서 해석하였으며[3], Table 1은 햅틱 장치의 질량(M_d)은 0.5 kg, 댐퍼(B_d)는 0.1 Ns/m, 샘플링 주기(T)는 1 ms의 조건일 때 기존의 연구결과[3]와 본 논문에서 구현된 시뮬레이션에서의 결과를 비교한 것이다. 가상 댐퍼 변화에 따라 계산된, 또는 시뮬레이션을 통해 분석된 안정적인 가상 스프링 영역이 상대오차가 거의 0.0%일 정도로 일치하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 구현된 시뮬레이션 환경을 통한 결과가 타당함을 알 수 있다.

샘플링 주기별로 가상 댐퍼의 크기 변화에 따른 안정적인 가상 스프링의 경계값 ($K_{w, TH}$)을 시뮬레이션을 통

해 분석한 결과가 Fig. 2이다. 따라서 경계값보다 작은 가상 스프링을 이용할 때 햅틱 시스템은 안정하다. Fig. 2(a)는 샘플링 주기가 1 ms, Fig. 2(b)는 샘플링 주기가 10 ms인 경우이다.

Table 1. Comparison between the simulation results and the previous results according to virtual damper.

B_w (Ns/m)	Simulation	Previous Results [3]	Error(%)
	$K_{w,TH}$ (N/m)	$K_{w,TH}$ (N/m)	
0	200	200	0.000
100	163808	163809	0.001
200	266820	266821	0.000
300	323218	323219	0.000
400	342991	342991	0.000
500	333462	333463	0.000
600	300127	300128	0.000
700	247186	247186	0.000
800	177906	177906	0.000
900	94867	94867	0.000
1000	133	133	0.000

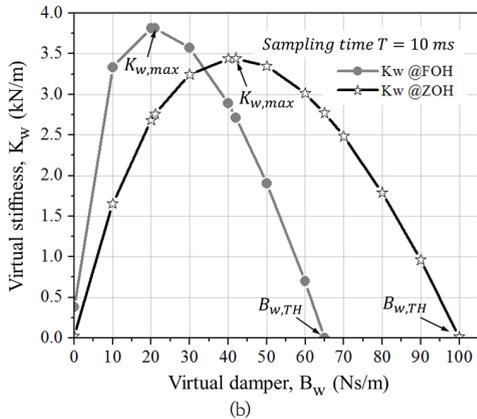
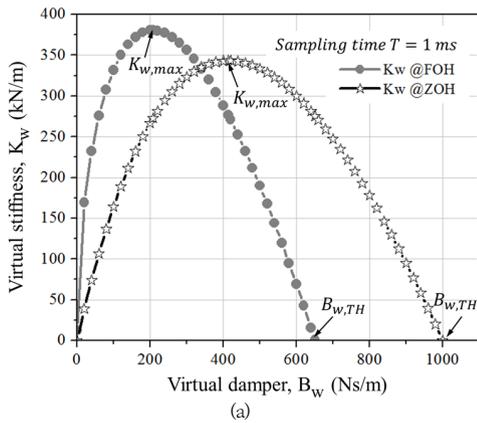


Fig. 2. Boundary values of stable stiffness according to the virtual damper (a) sampling time = 1 ms (b) sampling time = 10 ms.

햅틱 시스템의 안정성은 입력하는 힘 $f_a(t)$ 와 가상모 델로부터 계산된 힘과의 상호작용으로 결정되며, 가상모 델로부터 계산되는 힘은 가상 스프링의 힘과 가상 댐퍼 힘의 합으로 사용자에게 전달된다. 이 과정에서 가상 댐 퍼의 반력계산을 위해 후진차분법으로 속도가 계산되며, 이때 시간지연이 발생하고, 발생된 시간지연은 시스템의 불안정성을 초래할 수 있다. 가상 댐퍼가 에너지를 소모 시켜 시스템의 안정성을 높여줄 수 있으므로 가상 댐퍼 가 커짐에 따라 안정적인 가상 스프링의 경계값이 커질 수는 있으나, 가상 댐퍼의 값이 일정수준이상 커지거나 샘플링 시간이 커져서 시간지연이 커지면 안정적인 가상 스프링의 경계값은 작아지게 되는 것으로 보인다.

시뮬레이션 결과를 살펴보면 시스템의 안정성을 유지 하면서 변화시킬 수 있는 가상 댐퍼의 경계값 ($B_{w,TH}$)은 일차홀드를 이용하는 경우보다 영차홀드를 이용할 때 더 크며, 샘플링 주기가 커짐에 따라 그 범위가 점차 작아진 다. 안정적인 가상 스프링의 최대값 ($K_{w,max}$)은 일차홀드 를 이용할 때 더 크게 나타나며, 그 값은 샘플링 주기가 커짐에 따라 점차 작아진다. 이에 본 논문에서는 샘플-홀드 방식, 샘플링 주기, 가상 댐퍼 변화와 가상 스프링의 안정성 영역 변화와의 관계를 분석하고자 한다.

첫째, 안정적인 가상 댐퍼의 경계값 ($B_{w,TH}$)과 샘플링 주기 (T)와의 관계를 분석한다. Table 2는 샘플-홀드 방식과 샘플링 주기별 안정적인 가상 댐퍼의 경계값 ($B_{w,TH}$)을 나타낸 것이다. 샘플링 주기별로, 영차홀드를 이용할 때와 일차홀드를 이용할 때의 안정적인 가상 댐 퍼의 경계값 비율은 약 0.65배로서 샘플링 주기에 상관 없이 일정하게 유지된다. Fig. 3은 안정적인 가상 댐퍼 경계값과 샘플링 주기와와의 관계를 나타낸 것으로 추세선 분석결과를 보면 샘플-홀드 방식에 상관없이 안정적인 가상 댐퍼의 크기는 샘플링 주기에 반비례 관계이다. 즉, 안정적인 가상 댐퍼의 경계값 ($B_{w,TH}$)은 샘플링 주기와 반비례 관계이며, 그 관계를 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다. 가상 댐퍼로부터의 반력계산을 위해 후진차분법으로 속도를 계산할 때 발생하는 시간지연은 샘플링 주기가 커짐에 따라 커지게 되고, 이것이 시스템의 불안정성을 유발시킬 수 있다. 따라서 Eq. (1)과 같이 안정적인 가상 댐퍼의 경계값이 샘플링 주기와 반비례 관계를 갖게 되는 것으로 추정된다.

$$B_{w,TH} \propto \frac{1}{T} \quad (1)$$

Where, $B_{w,TH}$ denotes boundary value of a virtual

damper, T denotes sampling time

Table 2. Boundary values of stable virtual damper and the ratio of the boundary value in the FOH method to that in ZOH method.

T (ms)	ZOH	FOH	$\frac{B_{w,TH}@FOH}{B_{w,TH}@ZOH}$
	$B_{w,TH}$ (Ns/m)	$B_{w,TH}$ (Ns/m)	
1.0	1001	652	0.651
1.25	801	522	0.652
2.0	501	326	0.651
2.5	401	261	0.651
5.0	201	131	0.652
10.0	101	66	0.653
20.0	51	33	0.647
40.0	26	17	0.654

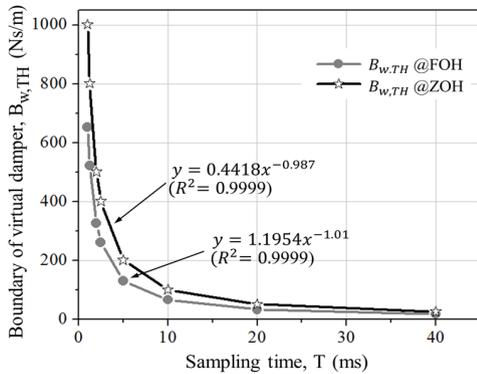


Fig. 3. The relation between boundary value of virtual damper and the sampling time according to sample- and-hold methods, respectively.

둘째, 안정적인 가상 스프링의 최대값 ($K_{w,max}$)과 그때의 가상 댐퍼 값과 샘플링 주기, 샘플-홀드 방식과의 관계를 분석한다. 샘플링 주기, 샘플-홀드 방식별 시뮬레이션 결과가 Table 3이다. 샘플링 주기가 커짐에 따라 안정적인 가상 스프링의 최대값 ($K_{w,max}$)은 점차 감소한다. 그리고 샘플링 주기에 관계없이 일차홀드 방식을 이용하면 영차홀드 방식을 이용할 때보다 안정적인 가상 스프링의 최대값 ($K_{w,max}$)을 약 110% 정도 향상시킬 수 있다. Table 2~3를 살펴보면 샘플링 주기별로 안정적인 가상 스프링의 최대값이 나타나는 댐퍼 값은, 일차홀드를 이용할 때에는 안정적인 가상 댐퍼의 경계값 ($B_{w,TH}$)에 대해 약 0.32배의 크기이다. 따라서 안정적인 가상 댐퍼의 경계값을 분석해내면 안정적인 가상 스프링을 가장 크게 할 수 있는 가상 댐퍼 값을 유추할 수 있다.

Table 3. The stable maximum stiffness, the virtual damper at the maximum stiffness, and the ratio of the stable maximum stiffness, according to the sample-and-hold methods, respectively.

T (ms)	ZOH		FOH		$K_{w,max}$
	$B_{w,TH}@K_{w,max}$ (Ns/m)	$K_{w,max}$ (N/m)	$B_{w,TH}@K_{w,max}$ (Ns/m)	$K_{w,max}$ (N/m)	
1.0	414	343279	208	380556	1.109
1.25	332	219719	166	243570	1.109
2.0	207	85853	104	95162	1.108
2.5	166	54956	83	60911	1.108
5.0	83	13752	42	15236	1.108
10.0	42	3444	21	3813	1.107
20.0	21	864	10	955	1.105
40.0	11	217	5	240	1.106

안정적인 가상 스프링 최대값 ($K_{w,max}$)과 샘플링 주기 (T)와의 관계를 샘플-홀드 방식별로 분석한 것이 Fig. 4이다. 추세선 분석결과를 보면, 샘플-홀드 방식에 상관없이 안정적인 가상 스프링의 최대값은 샘플링 주기의 제곱에 반비례관계이며, Eq. (2)와 같이 표현할 수 있다.

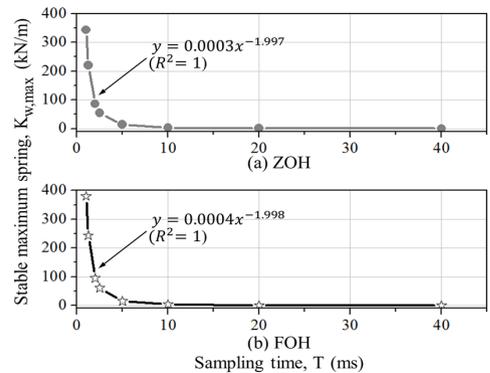


Fig. 4. Relation between stable maximum stiffness and sampling time

$$K_{w,max} \propto \frac{1}{T^2} \quad (2)$$

Where, $K_{w,max}$ denotes maximum boundary value of a virtual stiffness, T denotes sampling time

셋째, 일차홀드 방식이 영차홀드 방식보다 우수한 성능이 나타나는 가상 댐퍼의 범위에 대해 분석한다. Fig. 2를 살펴보면, 가상 댐퍼의 어느 값까지는 일차홀드를 이용할 때 안정적인 가상 스프링의 경계값이 영차홀드를 이용할 때보다 더 커지고, 그 값 이후에는 영차홀드를 이

용할 때 안정적인 가상 스프링의 경계값이 더 커진다. Table 4는 안정적인 가상 스프링의 경계값이 영차홀드를 이용할 때보다 일차홀드를 이용할 때 더 커지는, 즉 Eq. (3)을 만족하는 가상 댐퍼의 최대값 ($B_{w,max} @ Eq.(3)$)을 샘플링 주기별로 분석한 것이다. 이 값은 샘플링 주기에 상관없이, 일차홀드를 이용할 때의 안정적인 가상 댐퍼의 경계값 ($B_{w,TH} @ Eq.(3)$)에 대해 약 50% 정도의 크기가 된다. 즉 샘플링 주기가 1 ms일 때에는 338 Ns/m까지의 가상 댐퍼에 대해서는 영차홀드보다 일차홀드를 이용하는 것이 안정적인 가상 스프링을 더 크게 구현할 수 있다는 것을 의미한다.

$$K_{w,TH} @ FOH > K_{w,TH} @ ZOH \quad (3)$$

Where, $K_{w,TH} @ FOH$ and $K_{w,TH} @ ZOH$ denote boundary value of a virtual stiffness when FOH and ZOH is applied, respectively.

Table 4. Maximum virtual damper that satisfying (3) and the ratio of the maximum value to the boundary value of the stable damper.

T (ms)	$B_{w,max} @ Eq.(3)$ (Ns/m)	$\frac{B_{w,max} @ Eq.(3)}{B_{w,TH} @ FOH}$
1.0	338	0.518
1.25	270	0.517
2.0	169	0.518
2.5	135	0.517
5.0	67	0.511
10.0	33	0.500
20.0	16	0.485
40.0	8	0.471

넷째, 영차홀드 방식 대신에 일차홀드 방식을 이용할 때 향상시킬 수 있는 안정적인 가상 스프링의 경계값 ($K_{w,TH}$)의 비율을 분석한다. 동일한 가상 댐퍼, 샘플링 주기에 대해서, Eq. (4)를 이용하여 샘플-홀드 방식에 대한 안정적인 가상 스프링 경계값 ($K_{w,TH}$)의 비율을 나타낸 것이 Fig. 5이다. 그래프를 살펴보면, 가상 댐퍼가 0일 때에는 영차홀드를 이용하는 것보다 일차홀드를 이용할 때 안정적인 가상 스프링의 경계값을 수십 배 더 크게 할 수 있다. 그러나 가상 댐퍼가 조그만 커져도 그 비율은 급격히 줄어든다. 예를 들어 샘플링 주기가 1 ms이고, 가상 댐퍼 크기가 0일 때에는 약 61배 더 크게 할 수 있으며, 가상 댐퍼 5 Ns/m가 되면 그 비율은 약 8.6배 정도로 작아진다.

$$Ratio = \frac{K_{w,TH} @ FOH}{K_{w,TH} @ ZOH} \quad (4)$$

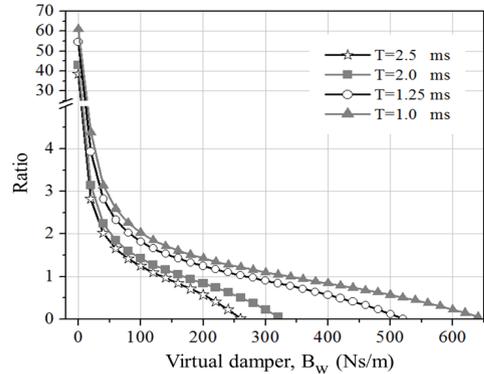


Fig. 5. The ratio of the boundary values of stable stiffness in the FOH method to that in the ZOH method.

그리고 샘플-홀드방식에 따른 안정적인 가상 스프링 경계값의 비율과 샘플링 주기와 관계를 나타낸 것이 Fig. 6이다.

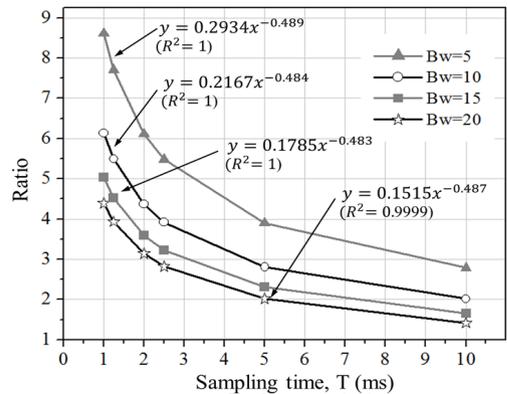


Fig. 6. The relation between the ratio of the boundary values of stable stiffness in the FOH method to that in the ZOH method and the sampling time.

그 관계는 샘플링 주기의 제곱근에 반비례 관계이며, Eq. (5)와 같이 표현할 수 있다. 또한 동일한 샘플링주기에 대해서는 가상 댐퍼의 크기가 커질수록 그 비율이 줄어드는 경향을 보인다.

$$Ratio = \frac{K_{w,TH} @ FOH}{K_{w,TH} @ ZOH} \propto \frac{1}{\sqrt{T}} \quad (5)$$

4. 결론

가상 환경 속에서 가상 강체에 대한 현실감을 증강시키기 위해서 기존의 영차홀드 대신에 일차홀드를 이용하는 방식이 제안되었고, 가상 댐퍼 추가에 따른 가상 스프링의 안정성 영역 변화에 대해 분석했다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 안정적인 가상 댐퍼의 경계값 ($B_{w,TH}$)은 샘플링 주기 (T)와 반비례 관계를 갖는다. 일차홀드 방식을 이용하면 안정적인 가상 댐퍼의 경계값이 영차홀드를 이용할 때에 비해 약 65% 정도로 감소된다.

둘째, 안정적인 가상 스프링의 최대값 ($K_{w,max}$)은 샘플링 주기 (T)의 제곱에 반비례 관계이며, 그 값은 일차홀드 방식을 이용할 때 기존의 영차홀드 방식을 이용할 때보다 약 110% 정도 향상시킬 수 있다.

셋째, 일차홀드 방식을 이용할 때, 영차홀드의 경우보다 가상 스프링의 안정성 영역이 향상되는 가상 댐퍼의 최대값은 일차홀드 방식에서의 안정적인 가상 댐퍼 경계값 ($B_{w,TH}@FOH$)의 약 50% 부근까지이다. 이 영역에서는 가상 댐퍼의 크기에 따라 일차홀드를 이용할 때, 기존의 영차홀드의 경우보다 안정적인 가상 스프링의 영역을 수 배 ~ 수십 배 더 크게 할 수 있다. 예를 들어 샘플링 주기가 1 ms이고, 가상 댐퍼 크기가 0 Ns/m일 때에는 약 61배 더 크게 할 수 있으며, 가상 댐퍼 크기가 5 Ns/m일 때에는 약 8.6배 크게 할 수 있다.

본 연구는 안정적인 가상 강체의 현실감 증강을 위한 가상 스프링과 가상 댐퍼의 설계와 안정적인 가상 커플링 설계에 활용 가능할 것으로 기대된다.

References

[1] J. E. Cogate 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: [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4563\(199701\)14:1%3C37::AID-ROB4%3E3.0.CO;2-V](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1097-4563(199701)14:1%3C37::AID-ROB4%3E3.0.CO;2-V)

[2] J. E. Colgate and J. M. Brown, "Factors affecting the Z-width of a haptic display," *Proceedings of 1994 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, CA, USA, pp.3205-3210, May 1994.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.1994.351077>

[3] 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>

[4] M. Koul, M. Manivannan, S.K. Saha, "Effect of dual-rate sampling on the stability of a haptic interface," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 91, No.3-4, pp. 479-491, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-017-0691-6>

[5] V. Chawda, O. Celik, and M. K. O'Malley, "A method for selecting velocity filter cut-off frequency for maximizing impedance width performance in haptic interface," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 137, Issue 2, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4028526>

[6] K. Lee, "Stability analysis for a virtual spring model with an extrapolation and high-frequency ZOH," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 19, no. 1, pp. 12-17, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2014.13.1970>

[7] 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/10.1007/s00163-010-0086-1>

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 자동차공학전공 부교수

<관심분야>

가상현실, 햅틱 인터페이스, 원격제어