

(19)대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(51) Int. Cl. ⁷ G06F 19/00	(45) 공고일자 (11) 등록번호 (24) 등록일자	2005년12월21일 10-0538351 2005년12월15일
--	-------------------------------------	--

(21) 출원번호	10-2004-0026918	(65) 공개번호	10-2005-0101742
(22) 출원일자	2004년04월20일	(43) 공개일자	2005년10월25일

(73) 특허권자	광주과학기술원 광주 북구 오룡동 1번지
(72) 발명자	류재하 광주광역시북구오룡동1번지광주과학기술원기전공학과 김종필 광주광역시북구오룡동1번지광주과학기술원기전공학과
(74) 대리인	이재량

심사관 : 허영한

(54) 햅틱 인터페이스의 안정화 방법 및 이를 적용한 햅틱시스템

요약

본 발명은 햅틱 인터페이스의 안정화 방법 및 이를 적용한 햅틱시스템에 관한 것으로서 햅틱 인터페이스의 안정화 방법은 설정된 시간 간격 마다 햅틱장치에 있는 실제요소에 사용자의 작용에 의해 발생된 운동과 관련된 물리적 파라미터의 값을 검출하는 단계와, 물리적 파라미터의 값에 응답하여 가상환경에서 햅틱장치를 통해 사용자에게 역으로 응답해야 할 힘을 산출하는 단계와, 가상환경에서 응답해야할 힘과 사용자에게 인가된 물리적 파라미터의 값으로부터 샘플앤홀드과정에서 발생하는 에너지가 햅틱장치에서 소모될 제1안정조건과 가상현실을 포함하는 제어시스템에서 생성된 에너지가 패시브할 제2안정조건을 만족시킬 수 있는 바운딩 파라미터를 산출하는 단계와, 산출된 바운딩 파라미터가 설정된 바운딩 범위를 벗어나면 설정된 바운딩 범위내로 조정하는 단계와, 조정된 바운딩 파라미터에 의해 햅틱장치에 있는 실제 요소에 인가되어야 할 힘을 조정하는 단계와, 조정된 힘을 햅틱장치의 실제 요소에 인가하는 단계를 포함한다. 이러한 햅틱 인터페이스를 안정화하는 방법 및 햅틱 시스템에 의하면, 시스템이 추구하는 실감도에 대한 성능 저하를 억제시키면서도 시스템을 안정화시킬 수 있다.

대표도

도 5

명세서

도면의 간단한 설명

도 1은 일반적인 햅틱 시스템을 나타내 보인 블록도이고,

도 2a 내지 도 2(c)는 도 1의 햅틱 시스템의 요소 중 일부에 대해 분리하여 에너지 플로우 인 관점에서 관련 파라미터를 나타내 보인 도면이고,

도 3은 1차 자유도를 갖는 햅틱 인터페이스 모델을 도식적으로 나타내 보인 도면이고,

도 4는 본 발명에 따른 에너지 바운딩 처리부가 적용된 햅틱 시스템을 나타내 보인 블록도이고,

도 5는 본 발명에 따른 햅틱 인터페이스 안정화 방법에 따른 에너지 바운딩 처리과정을 나타내 보인 플로우도이고,

도 6a는 사용자가 사인과 궤적 운동을 추종할 때 가상 스프링 요소에 대해 가상커플링방식과 에너지 바운딩 방식을 각각 적용한 경우에 대해 시뮬레이션 한 결과를 비교해 나타내 보인 그래프이고,

도 6b는 사용자가 매우 작은 떨림운동을 하면서 사인과 궤적을 추종할 때 가상 스프링 요소에 대해 종래의 가상커플링방식과 본 발명에 따른 에너지 바운딩 방식을 각각 적용한 경우에 대해 시뮬레이션 한 결과를 비교해 나타내 보인 그래프이고,

도 7의 (a) 및 (b)는 햅틱 렌더링 레이트를 1KHz로 적용하고, 가상벽 탄성계수를 상호 다르게 적용한 가상벽들에 대해 위치와 엑추에이터 힘에 대한 실험결과를 나타내 보인 그래프이고,

도 8은 햅틱 렌더링 레이트를 1KHz로 적용하고, 가상벽 탄성계수를 30KN/m으로 적용하였을 때 본 발명에 따른 에너지 바운딩 처리방식이 적용된 가상벽에 대한 실험결과를 나타내 보인 그래프이고,

도 9는 햅틱 렌더링 레이트를 500Hz로 적용하고, 가상벽 탄성계수를 상호 다르게 적용한 가상벽들에 대해 위치와 엑추에이터 힘에 대한 실험결과를 나타내 보인 그래프이고,

도 10은 햅틱 렌더링 레이트를 500Hz로 적용하고, 가상벽 탄성계수를 30KN/m으로 적용하였을 때 본 발명에 따른 에너지 바운딩 처리방식이 적용된 가상벽에 대한 실험결과를 나타내 보인 그래프이고,

도 11은 햅틱 렌더링 레이트를 100Hz로 적용하고, 가상벽 탄성계수를 상호 다르게 적용한 가상벽에 대해 위치와 엑추에이터 힘에 대한 실험결과를 나타내 보인 그래프이고,

도 12는 햅틱 렌더링 레이트를 100Hz로 적용하고, 가상벽 탄성계수를 30KN/m으로 적용하였을 때 본 발명에 따른 에너지 바운딩 처리 방식이 적용된 가상벽에 대한 실험결과를 나타내 보인 그래프이다.

< 도면의 주요부분에 대한 부호의 설명 >

40: 햅틱 시스템 41: 햅틱장치

43: 샘플/홀드부 44: 제어시스템

45: 콘츰롤러 46: 메인 제어부

50: 에너지 바운딩 처리부

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

본 발명은 햅틱 인터페이스의 안정화 방법 및 이를 적용한 햅틱시스템에 관한 것으로서, 상세하게는 햅틱 인터페이스링 과정에서의 불안정한 에너지의 발생을 최소화시키면서 실감도를 높일 수 있게 처리하는 햅틱 인터페이스의 안정화 방법 및 이를 적용한 햅틱시스템에 관한 것이다.

햅틱(haptic)이란 용어는 촉각과 관련된 것으로 관성, 마찰, 충돌, 온도 및 거칠기와 같은 물리적 성질들에 관한 정보를 전달하는 것을 말한다.

햅틱 기술은 1990년 이후 포오스 피드백 기술(force feedback thchnology)의 사용과 함께 급격히 발전하였다.

이러한 햅틱 기술이 적용된 햅틱 시스템(haptic system)은 가상환경을 통해 구현되는 가상물체와 사용자의 조작과의 햅틱 상호작용에 대응하여 사용자가 근육 또는 관절을 통해 이동 또는 힘을 느낄 수 있는 운동감각을 제공한다.

햅틱 시스템의 일 예가 도 1에 도시되어 있다.

도면을 참조하면, 햅틱 시스템(10)은 햅틱장치(11), 샘플/홀드부(13), 콘츄롤러(15) 및 가상환경(17)으로 이루어져 있다.

여기서 햅틱장치(haptic device)(11)는 사용자(human operator)(20)가 직접 조작하는 조작기에 해당하며, 조작에 대응하여 가상환경으로부터 생성된 자극을 사용자(20)에게 역으로 전달하는 기능도 함께 한다.

샘플/홀드부(13)는 입출력장치로서 햅틱장치(11)에서 출력되는 연속신호(continous signal)인 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하여 콘츄롤러(15)에 제공하고, 콘츄롤러(15)에서 출력되는 이산신호(discrete signal)인 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환하여 햅틱장치(11)에 제공한다.

제어시스템은 콘츄롤러(15) 및 가상환경(17)으로 되어 있다.

제어시스템은 통상적으로 컴퓨터 및 응용 프로그램으로 구현된다. 여기서 응용 프로그램은 컴퓨터를 통해 가상환경을 구현할 수 있도록 구축된 것을 말한다.

이러한 햅틱 시스템(10)은 햅틱 장치(11)를 통해 사용자(human operator)(20)와 콘츄롤러(15)에 의해 실행되는 가상환경(17) 사이의 상호 작용이 이루어진다. 즉, 햅틱장치(11)에 대한 사용자(20)의 조작에 반응하여 가상환경(17)에서 응답할 자극이 제어시스템으로부터 햅틱장치(11)를 통해 역으로 사용자(20)에게 전달된다.

따라서, 햅틱 시스템(10)은 사용자(20)의 조작에 대응하여 가상환경(17)에서 생성된 힘과 감각(tactile)을 햅틱장치(11)를 통해 사용자(20)에게 역으로 제공함으로써 사용자(20)가 햅틱장치(11)를 통해 자극적이고 인상적으로 가상환경(17)과 상호 작용할 수 있게 해준다.

한편, 햅틱 시스템(10)은 여러가지 원인 예를 들면 샘플/홀드부(13)에서 연속시스템과 이산시스템의 정보를 상호 변환하기 위해 샘플링시 발생하는 정보의 손실 및 홀딩에 의한 시간지연, 제어시스템에서 수행되는 수치적 연산 등에 의해 원치 않는 에너지가 발생될 수 있다. 그런데 햅틱시스템(10)에서의 이러한 원치 않게 발생하는 에너지는 햅틱장치(11)를 통해 불안정한 운동을 발생시켜 사용자(20)에게 해를 줄 수 있기 때문에 사용자의 안전성을 확보하기 위해 제어시스템으로부터 햅틱장치(11)로 전달되는 에너지를 적절히 조절해 주어야 하고, 불안정한 거동을 유발하는 불필요한 에너지들을 제거해 주어야 한다.

그런데, 사용자(20)의 운동은 다양한 불확정성을 포함하고 있어 정확하게 모델링하기가 어렵고, 샘플/홀드부(13)에서 샘플링 및 홀딩하는 과정에서 에너지는 필수적으로 발생되며, 가상환경(17)은 통상적으로 비선형 시스템으로 구성되기 때문에 햅틱 시스템(10)을 안정화하기 위한 방법을 찾기가 매우 어렵다.

최근에 햅틱 시스템(10)을 안정화 하기 위한 방안이 다양하게 제안되고 있다.

햅틱 시스템(10)이 수동성을 갖도록 하는 패시버티 이론(passivity theorem)을 통해 도출한 가상 커플링(virtual coupling) 방식이 문헌1(J. Robot. Syst., vol. 14, no.1, pp.37-47,1997)을 통해 제안된 바 있다. 이러한 가상 커플링은 패시버티 조건을 만족하는 가상환경에 대해 가상환경이 요구하는 임피던스와는 독립적으로 햅틱 인터페이스가 만들어내는 임피던스를 안정적인 작동을 보장하는 범위 이내로 제한시키며 가상환경의 설계절차를 햅틱 인터페이스의 안정성 문제로부터 분리시킬 수 있도록 한다.

그런데, 가상 커플링은 패시버티 조건을 만족시키는 가상환경에 대해 안정성을 보장하기 때문에 가상환경 내의 수치연산 및 시간지연요소에 의해 불필요한 에너지가 발생할 경우 햅틱 인터페이스가 표현할 수 있는 임피던스 범위가 줄어들거나 안정성 자체를 잃어버릴 수 있다.

또한, 가상 커플링의 설계는 햅틱인터페이스에 존재하는 댐핑 요소 예를 들면 조인트에 존재하는 마찰이나 전기액추에이터에서의 역기전력 등을 포함하는 에너지 소모요소에 기초하기 때문에 최적화된 가상 커플링의 파라미터 값을 찾기 위해서는 햅틱 인터페이스의 매우 복잡한 동역학적 특성 규명이 요구된다.

더욱이 다자유도 햅틱 인터페이스의 경우에는 댐핑 요소의 영향이 작업공간내의 말단부 예를 들면 조이스틱의 손잡이의 위치 및 자세에 의존한다. 그런데 가상 커플링은 고정된 파라미터를 가지기 때문에 전체 작업공간내에서의 안정성을 보장하기 위해서는 최악의 조건에 반하는 선택이 되어야 하고 그에 따른 과도하게 신중한 설계가 필수적인 단점이 있다.

또한, 하나포드 및 류 (Hanaford and Ryu et al.)등에 의해 제안된 미국 공개특허 제 2002-0062177에는 패시버티 이론에 근거한 에너지 소비 알고리즘인 타임도메인 패시버티 제어방법이 개시되어 있다. 상기 방법은 가상 커플링의 경우와 달리 햅틱 인터페이스에 존재하는 에너지 소모 요소에 기초하여 설계되지 않기 때문에 인터페이스의 복잡한 동적 특성 규명 작업이나 최악조건에 대비한 설계등을 필요로 하지 않는 장점이 있다. 그런데 타임도메인 패시버티 제어 방법은 전체 햅틱 시스템을 이산 시스템(discrete system)으로 전제하고 도출되었기 때문에 샘플앤 홀드에 의한 영향은 반영되지 않았다. 따라서 타임도메인 패시버티 제어방법은 샘플&홀드부(13)에 의해 생성되는 에너지를 보상할 수 없는 단점이 있다.

더욱 최근에 하나포드 및 류 (Hanaford and Ryu et al.)등에 의해 IEEE 국제회의에서 발표된 문헌2(Robotics and Automation 2003, taipei,taiwan,sept.2003)에는 샘플 앤 홀드에 의해 발생하는 에너지를 보상하기 위한 연속적인 타임도메인 패시버티 방법이 제안된 바 있다. 이 방법에서는 조정된 패시버티 관찰기(PO; passivity observer) 및 패시버티 제어기(PC: passivity controller)에서 단순한 속도 예측 방법을 적용하였다. 그러나, 속도의 부호가 바뀌게 되면 가상댐퍼와 마찬가지로 조정된 패시버티 제어기가 에너지를 생성한다. 그러므로 이 방법이 안정적으로 적용되기 위해서는 샘플링레이트가 시스템 모드 보다 충분히 커야하는 조건으로 제한되는 단점이 있다. 또한, 상기 방법은 사용자(20)의 운동이 다양한 불확정성을 포함하고 있어 정확하게 속도를 예측하기가 어렵기 때문에 적절한 에너지 보상이 어려운 문제점이 있다.

이하에서는 햅틱 시스템을 안정화 시키기 위해 언급된 종래의 방식들에 의한 문제점을 보다 상세하게 살펴본다.

패시버티(passivity)는 에너지 소모(dissipation)와 관련된 추상적 표현으로, 입출력 관점에서 선형 및 비선형 시스템에 대해 규정된 안정화 문제를 다루기 위해 사용된다. 패시버티 조건을 만족하는 시스템은 그 자신이 에너지를 발생시키지 못하므로 안정적인 동작을 보장한다.

패시브 시스템은 엔지니어링 분야에서 일반적으로 찾아볼 수 있다. 일 예로서 커패시터 및 인덕터로 이루어진 시스템은 전기 엔지니어링 분야에서의 패시브 시스템의 일 예이고, 질량, 스프링 및 완충기를 갖는 시스템은 기계니컬 엔지니어링 분야에서의 또 다른 패시브 시스템의 예이다.

패시버티 이론에 따르면 하나의 패시브 시스템과 또 하나의 엄격한 패시브 시스템이 피드백으로 연결되었을 경우 시스템은 안정하다. 이러한 패시버티 이론은 여러 시스템이 복합적으로 연결된 로보틱스, 텔리오퍼레이션 및 햅틱 시스템 안정성 문제를 해결하는데 큰 장점을 제공한다.

이러한 패시버티 이론에 기초하여, 도 1에 도시된 햅틱 시스템(10)에서 사용자(20)가 관심 주파수에서 수동성이라고 가정하면 안정화 문제는 나머지 결합요소의 패시버티로 압축되고 이를 아래 수학적 식 1로 표현할 수 있다.

수학적 식 1

$$\int_0^t F_h(\tau)v_h(\tau)d\tau + \epsilon_0 \geq 0, t > 0$$

여기서, $F_h(\tau)v_h(\tau)$ 는 사용자(20)의 연속적인 작동 및 진행과 관련된 변수이고, ϵ_0 는 햅틱시스템(10)의 초기에너지이다.

햅틱시스템(10)이 수학식 1로 표현된 패시버티 조건을 만족하는 경우 햅틱 시스템(10)은 에너지를 소비하고, 햅틱 장치(11), 샘플/홀드부(13), 콘츰롤러(13) 및 가상환경(17) 각각의 에너지 플로우 인(flow-in)의 합은 결코 음(-)의 값이 될 수 없다.

그러면, 각각의 에너지 플로우 인 관계를 도 2 내지 도 3을 함께 참조하면서 살펴본다.

도 2(a)의 햅틱 장치(11)는 연속적인 서브시스템이고, 따라서 $0 \leq t \leq nT$ 인 시간(t) 동안에 대한 에너지 플로우-인($P_H(n)$)은 아래의 수학식2와 같이 표현할 수 있다.

수학식 2

$$P_H(n) = \int_0^{nT} [(F_h(t) \cdot v_h(t) - F_d^h(t) \cdot v_d(t))] dt$$

한편, 햅틱 장치(11)는 수동성 요소로 구성되기 때문에 자체적으로는 에너지를 생성하지 않는다. 실질적으로, 모든 기계적인 햅틱 장치(11)는 전기적 액츄에이터에서의 역전기력, 히스테릭 물질 특성, 마찰과 같은 에너지 소비요소를 갖기 때문에 패시브 조건을 만족시킨다. 예를 들면 도 3에 도시된 1차 자유도를 갖는 햅틱장치를 고려할 때 수학식 2의 햅틱장치(11)의 에너지 플로우-인(energy flow-in)은 아래의 수학식 3으로 표현될 수 있다.

수학식 3

$$P_H(n) = \int_0^{nT} (m v_d a_d + b v_d^2) dt \geq \int_0^{nT} b v_d^2 dt \geq T \sum_{k=0}^{n-1} b v_{d,k+1}^2$$

위 수학식 3을 통해 알 수 있듯이 햅틱장치(11)의 에너지 플로우-인 값은 비음부호(nonnegative) 댐핑 상수에 대해서는 비음값(nonnegative value)을 갖고, 더 낮은 바운드 값을 햅틱장치(11)에 있는 에너지 소비 댐핑 성분과 유한하게 관련된다.

햅틱 장치(11)에 있는 에너지 소비 요소는 다른 성분에 있는 에너지 발생의 약간의 허락을 제공한다. 특히, 햅틱장치(11)에 있는 에너지 소비요소는 본질적으로 위상지연(phase lag)을 갖는 샘플/홀드부(13)에서 필연적으로 에너지가 발생되기 때문에 안정된 햅틱 상호작용을 보장하기 위해서는 매우 중요하다.

콘츰롤러(15)와 가상환경(17)으로 이루어진 제어시스템(14)(도 2의 (c))은 이산 서브시스템이고, 에너지 플로우-인($P_{CV}(n)$)은 아래의 수학식 4로 표현할 수 있다.

수학식 4

$$P_{CV}(n) = T \sum_{k=0}^{n-1} F_d(k) v_{d,k}$$

제어시스템(14)에서는 몇가지 에너지 생성요소 즉, 가상환경 시뮬레이팅에서는 명확한 산술적 적산 알고리즘, 위치 또는 속도 필터에서의 위상 지연, 햅틱장치(11)가 가상환경(17)과 네트워크에 의해 연결되었을 때 통신 지연, 중력 또는 마찰 보상 알고리즘 등이 있다.

앞서 설명된 타임도메인 패시버티 방식과 같은 에너지 소비 알고리즘은 효과적으로 이산 제어시스템(14)에서 생성된 에너지를 소진시킬 수 있다.

샘플/홀드부(13)(도 2의 (b))는 샘플된 데이터 시스템이고, 에너지 플로우-인($P_s(n)$)은 아래의 수학식 5와 같이 표현할 수 있다.

수학식 5

$$P_s(n) = \int_0^{nT} (F_d^h(t) v_d(t) dt - T \sum_{k=0}^{n-1} F_d(k) v_{d,k}$$

또한, 0차 홀드(zero order hold)의 경우, 샘플/홀드부(13)의 에너지 플로우-인은 아래의 수학적식 6과 같이 표현된다.

수학적식 6

$$P_s(n) = \sum_{k=0}^{n-1} \left(\int_{kT}^{(k+1)T} (F_d^h(t)v_d(t)dt) \cdot T \sum_{k=0}^{n-1} F_d(k)v_{d,k} = \sum_{k=0}^{n-1} (F_d(k) \int_{kT}^{(k+1)T} v_d(t)dt) \cdot T \sum_{k=0}^{n-1} F_d(k)v_{d,k} = \sum_{k=0}^{n-1} F_d(k)(x_{d,k+1} - x_{d,k}) \cdot T \sum_{k=0}^{n-1} F_d(k)v_{d,k}$$

위 수학적식 6은 샘플/홀드부(13)가 제어시스템(14) 즉, 콘츰롤러(15)와 가상환경(17)을 패시브하게 만들지라도 에너지 발생이 야기될 수 있음은 보여준다.

한편, 샘플/홀드부(13)와 제어시스템(14)을 결합한 시스템에서 에너지 플로우-인($P_{SCV}(n)$)은 아래의 수학적식 7로 간단히 도출될 수 있다.

수학적식 7

$$P_{scv}(n) = P_s(n) + P_{cv}(n) = \sum_{k=0}^{n-1} F_d(k)(x_{d,k+1} - x_{d,k})$$

햅틱시스템(10)이 안정화되기 위해서는 햅틱 시스템(10) 전체의 에너지 플로우인($P_{HSCV}(n)$)이 비음부호값을 갖어야 하며, 이를 고려할 때 수학적식1의 안정적 햅틱 상호작용에 대한 패시버티 조건을 아래의 수학적식 8과 같이 다시 쓸수 있다.

수학적식 8

$$P_H(n) + \sum_{k=0}^{n-1} F_d(k)(x_{d,k+1} - x_{d,k}) \geq 0$$

또한, 1차 자유도를 갖는 햅틱 장치(11)에 대해서는 수학적식 8을 아래의 수학적식 9로 표현할 수 있다.

수학적식 9

$$T \sum_{k=0}^{n-1} b v_{d,k+1}^2 + \sum_{k=0}^{n-1} F_d(k)(x_{d,k+1} - x_{d,k}) \geq 0$$

한편, 가상벽 시뮬레이션은 안정된 햅틱 상호작용에 대해 많은 기본적인 문제들을 파악하기 위해 널리 사용된다. 1차 자유도(1-dof)를 갖는 햅틱장치에 대한 가상벽 시뮬레이션에 대한 연구의 경우 댐핑과 탄성계수(stiffness)와 같은 기본적인 가상 요소를 갖는 각 서브시스템의 에너지 관계를 보다 용이하게 이해시켜 준다.

설명의 단순화를 위해 완벽한 콘츰롤러(15)($F_d(k) = F_e(k) \equiv F(k)$, $x_{d,k} = x_{e,k} \equiv x_k$), 홀드작동에 대한 0차 홀드(ZOH) 및 속도평가에 대해 백워드 렉팅궤러를 가정하고, 햅틱장치(11)의 물리적인 댐핑과 가상벽 파라미터 사이의 관계를 도출하기 위해 아래의 수학적식 10으로 표현되는 가상벽을 고려해보자.

수학적식 10

$$F(k) = Kx_k + Bv_k$$

수학적식 4로부터 가상벽에 대한 제어시스템(14)의 에너지 플로우-인은 아래의 수학적식 11로 표현되고 이것은 패시버티 조건을 만족시킨다.

수학적식 11

$$P_{CV}(n) = K \sum_{k=0}^{n-1} x_k(x_k - x_{k-1}) + TB \sum_{k=0}^{n-1} v_k^2 = \frac{1}{2}K \sum_{k=0}^{n-1} (x_k^2 - x_{k-1}^2) + \frac{1}{2}K \sum_{k=0}^{n-1} (x_k - x_{k-1})^2 + TB \sum_{k=0}^{n-1} v_k^2 \geq \frac{1}{2}T^2K \sum_{k=0}^{n-1} v_k^2 + TB \sum_{k=0}^{n-1} v_k^2$$

위 수학적식 11은 가상 스프링과 댐퍼요소는 제어시스템(14)에서 에너지를 발생시키지 않고, 수학적식 4에 의해 패시버티 관찰자는 언제나 양의 값을 제공할 수 있음을 보여준다.

샘플/홀드부(13) 및 제어시스템(14)을 결합한 서브 시스템의 에너지 플로우-인은 아래의 수학적식 12와 같이 표현될 수 있다.

수학적식 12

$$P_{SCV}(n) = P_S(n) + P_{CV}(n) = K \sum_{k=0}^{n-1} x_k(x_{k+1} - x_k) + TB \sum_{k=0}^{n-1} v_k v_{k+1} = \frac{1}{2} K \sum_{k=0}^{n-1} (x_{k+1}^2 - x_k^2) - \frac{1}{2} K \sum_{k=0}^{n-1} (x_{k+1} - x_k)^2 + TB \sum_{k=0}^{n-1} v_k v_{k+1} \geq \frac{1}{2} T^2 K \sum_{k=0}^{n-1} v_{k+1}^2 - TB \sum_{k=0}^{n-1} v_{k+1}^2$$

그런데, 샘플/홀드부(13) 및 제어시스템(14)을 결합한 서브 시스템은 위 수학적식 12를 통해 알 수 있는 바와 같이 샘플/홀드부(13) 때문에 더이상 패시버티 조건을 만족시키기 못한다.

또한, 샘플/홀드부(13) 및 제어시스템(14)을 결합한 서브 시스템의 더 낮은 바운드는 수학적식 12를 통해 알 수 있듯이 가상 스프링과 댐퍼가 생성할 수 있는 최대 에너지를 의미한다.

1차원 자유도를 갖는 햅틱장치(11)의 경우 햅틱시스템(10)의 에너지 플로우-인($P_{HSCV}(n)$)은 아래의 수학적식 13으로 표현된다.

수학적식 13

$$P_{HSCV}(n) = P_H(n) + P_{SCV}(n) \geq T \sum_{k=0}^{n-1} b v_{k+1}^2 - \frac{1}{2} T^2 K \sum_{k=0}^{n-1} v_{k+1}^2 - TB \sum_{k=0}^{n-1} v_{k+1}^2$$

한정된 햅틱 상호작용을 만들기 위해서는 햅틱시스템(10)의 에너지 플로우-인 (P_{HSCV})은 비네가티브 값을 갖어야 함을 고려할 때 가상 댐핑 및 탄성계수는 아래의 수학적식 14의 조건을 만족하여야 한다.

수학적식 14

$$b \geq \frac{KT}{2} + B$$

이것은 앞서 설명된 문헌1에 의해 연구된 가상커플링의 가상벽 시뮬레이션에 대해 매우 잘 알려진 안정 조건이다. 이러한 안정조건은 앞서 지적된 바와 같이 에너지 관점에서 가상 스프링 및 댐핑 파라미터 값에 의해 생성된 에너지가 햅틱 장치(11)에 의해 소비될 수 있는 에너지 범위내로 제한되어야 함을 의미한다.

햅틱시스템(10)의 불안정한 거동은 햅틱시스템(10)을 구성하는 샘플/홀드부(13)와 햅틱 랜더링 알고리즘과 제어알고리즘을 포함하는 콘트롤러(15) 및 가상환경에서 발생하는 불필요한 에너지에 기인한다. 예를 들면, 햅틱 랜더링 알고리즘에 포함되는 수치적 양적분(explicit numerical integration), 제어알고리즘에 포함되는 필터 및 중력 보상기 등은 이러한 에너지 발생요인으로 널리 알려져 있다. 또한 샘플/홀드부(13)에 반드시 포함되는 위상지연(phase lag)에 의한 에너지 발생은 햅틱 시스템(10)이 가지는 구조적인 문제로 인식되어진다. 그러나 기존의 가상커플링 방식의 경우 가상환경에서 발생하는 에너지들을 보상할 수 없기 때문에 가상환경을 패시버티 조건을 만족하도록 설계해야 하며, 또한 기존의 타임 도메인 패시버티 알고리즘의 경우 샘플링 및 홀드에 의해 발생하는 에너지들을 보상할 수 없기 때문에 아주 빠른 샘플링을 통해 위상 지연에 의한 에너지 발생을 최소화 시켜야 한다.

이상에서 살펴본 바와 같이 햅틱 장치(11)는 에너지를 생성하지 않지만 샘플/홀드부(13)와 제어시스템(14)은 에너지를 생성하고, 앞서 언급된 종래기술들은 햅틱 시스템의 안정화를 위해 요구되는 설계적 제약이 많고, 안정화를 위한 조정 과정에 의해 실감도를 떨어뜨리는 문제점이 있다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

본 발명은 상기와 같은 문제점을 개선하기 위하여 창안된 것으로서 샘플링 및 홀드 과정에서 발생하는 불필요한 에너지를 보상하여 안정적인 햅틱 시스템을 구현할 수 있는 햅틱 인터페이스의 안정화 방법 및 이를 적용한 햅틱시스템을 제공하는데 그 목적이 있다.

본 발명의 또 다른 목적은 시스템을 안정화하기 위한 샘플링 레이트에 대한 제약을 완화시키면서 실감도를 높일 수 있는 햅틱 인터페이스의 안정화 방법 및 이를 적용한 햅틱시스템을 제공하는 것이다.

발명의 구성 및 작용

상기의 목적을 달성하기 위하여 본 발명에 따른 햅틱 인터페이스의 안정화 방법은 가상환경을 포함하는 제어시스템과 햅틱장치 사이의 상호 작용을 지원할 수 있도록 된 햅틱 시스템의 햅틱 인터페이스를 안정화하는 방법에 있어서, 가. 설정된 시간 간격 마다 상기 햅틱장치에 있는 실제요소에 사용자의 작용에 의해 발생된 운동과 관련된 물리적 파라미터의 값을 검출하는 단계와; 나. 상기 물리적 파라미터의 값에 응답하여 상기 가상환경에서 상기 햅틱장치를 통해 상기 사용자에게 역으로 응답해야 할 힘을 산출하는 단계와; 다. 상기 나 단계에서 산출된 힘과 상기 가 단계에서 산출된 물리적 파라미터의 값으로부터 샘플앤 홀드과정에서 발생하는 에너지가 상기 햅틱장치에서 소모될 제1안정조건과 상기 제어시스템에서 생성된 에너지가 패시브할 제2안정조건을 만족시킬 수 있는 바운딩 파라미터를 산출하는 단계와; 라. 상기 다단계에서 산출된 바운딩 파라미터가 설정된 바운딩 범위를 벗어나면 설정된 바운딩 범위내로 조정하는 단계와; 바. 상기 라 단계에서 조정된 상기 바운딩 파라미터에 의해 상기 햅틱장치에 있는 실제요소에 인가되어야 할 힘을 조정하는 단계와; 사. 상기 바 단계에서 조정된 힘을 상기 햅틱장치의 실제 요소에 인가하는 단계; 및 아. 상기 가 단계 내지 사 단계를 상기 시간 간격 마다 반복하는 단계;를 포함한다.

바람직하게는 상기 가단계에서의 상기 물리적 파라미터는 위치 또는 속도이다.

또한, 상기 바운딩 파라미터($\beta(k)$)는

$$\beta(k) = \frac{F_e(k) - F_d(k-1)}{v_{d,k}} \quad \text{또는} \quad \beta(k) = T \frac{F_e(k) - F_d(k-1)}{x_d(k) - x_d(k-1)} \quad \text{이고,}$$

여기서, T는 상기 시간 간격이고, $F_e(k)$ 는 k번째 시간 간격에 해당하는 시간에서 상기 물리적 파라미터에 대응하여 상기 가상환경에서 응답해야할 힘이고, $F_d(k-1)$ 은 k-1번째에 상기 햅틱 장치의 실제요소에 인가한 힘이고, $v_{d,k}$, 및 $x_{d,k}$, 는 사용자의 조작에 의해 상기 햅틱장치에서 검출된 속도 또는 위치이다.

또한, 상기 라단계에서 상기 바운딩 파라미터($\beta(k)$)가 설정된 최대값(β_{max}) 보다 크면 상기 바운딩 파라미터($\beta(k)$)를 상기 최대값(β_{max})으로 조정하고, 상기 바운딩 파라미터($\beta(k)$)가 설정된 최소값(β_{min}) 보다 작으면 상기 바운딩 파라미터($\beta(k)$)를 상기 최소값(β_{min})으로 조정하며 상기 바운딩 파라미터($\beta(k)$)가 상기 최대값(β_{max})과 최소값(β_{min}) 사이의 값을 갖으면 그대로 적용한다.

또한, 상기의 목적을 달성하기 위하여 본 발명에 따른 햅틱 시스템은 가상환경을 포함하는 제어시스템과 햅틱장치 사이의 상호 작용을 지원할 수 있도록 된 햅틱 시스템에 있어서, 사용자의 작용에 의해 상기 햅틱장치에서 발생된 운동과 관련된 물리적 파라미터를 검출하는 센서와; 상기 제어시스템에 설치되며, 설정된 시간 간격 마다 상기 센서로부터 측정된 물리적 파라미터에 응답하여 상기 가상환경에서 상기 햅틱장치를 통해 상기 사용자에게 역으로 응답해야 할 힘과 상기 물리적 파라미터로부터 샘플/홀드 과정에서 발생하는 에너지가 상기 햅틱장치에서 소모될 제1안정조건과 상기 제어시스템에서 생성된 에너지가 패시브할 제2안정조건을 만족시킬 수 있는 바운딩 파라미터를 산출하고, 산출된 바운딩 파라미터가 설정된 바운딩 범위를 벗어나면 설정된 바운딩 값 범위내로 조정하며, 조정과정을 거쳐 결정된 상기 바운딩 파라미터에 의해 상기 햅틱장치에 있는 실제요소에 인가되어야 할 힘을 산출하여 상기 햅틱 장치의 실제 요소에 인가하는 에너지 바운딩 처리부;를 더 구비한다.

이하, 첨부된 도면을 참조하면서 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 햅틱 인터페이스의 안정화 방법 및 이를 적용한 햅틱 시스템을 보다 상세하게 설명한다.

도 4는 본 발명에 따른 햅틱 시스템이 도시되어 있다.

도면을 참조하면, 햅틱 시스템(40)은 햅틱장치(41), 샘플/홀드부(43), 에너지 바운딩 처리부(50)를 갖는 제어시스템(47)을 구비한다.

햅틱장치(41)는 사용자가 직접 조작하는 조작기에 해당하며, 조작에 대응하여 가상환경(47)으로부터 생성된 자극을 사용자에게 역으로 전달하는 기능도 함께 한다.

햅틱 장치(41)는 통상적으로 햅틱 메카니즘, 액츄에이터, 센서 등으로 이루어져 있다.

바람직하게는 햅틱장치(41)는 햅틱장치(41)의 사용자의 조작에 의한 위치 또는 속도를 측정하는 센서를 구비한다.

샘플/홀드부(43)는 햅틱장치(41)에서 출력되는 연속신호(continuous signal)인 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하여 제어시스템(47)으로 제공하고, 제어시스템(47)에서 출력되는 이산신호(discrete signal)인 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환하여 햅틱장치(43)에 제공한다.

제어시스템(44)은 에너지 바운딩처리부(50), 메인 제어부(46) 및 가상환경(47)을 구비한다.

제어시스템(47)은 통상적으로 컴퓨터로 구현된다.

가상환경(47)은 개발목적에 따라 다양한 방식으로 구축된다.

콘트롤러(45)는 메인 제어부(46) 및 에너지 바운딩 처리부(50)를 구비한다.

메인 제어부(45)는 가상환경(47)의 수행 및 햅틱 장치(47)의 제어를 수행한다.

메인제어부(45)는 정방향 운동역학, 역방향 운동역학, 야코비안 및 역 운동학을 산출하는 운동산출기 및 중력 및 마찰력 보상 프로그램을 포함할 수 있다.

에너지 바운딩 처리부(50)는 이하에서 설명되는 제어규칙과 바운딩 규칙에 따라 가상환경(47)에서 발생시켜야 할 힘을 조정하여 샘플/홀드부(43)를 통해 햅틱장치(41)에 출력하는 기능을 한다.

본 발명에 따른 햅틱 인터페이스의 안정화 방법을 도 4를 참조하여 설명한다.

먼저, 초기화 과정에서는 $K=0$, $F_d(K)=0$ 으로 설정되고, 초기화 과정 이후에는

설정된 시간 간격 마다 햅틱 장치(41)에 있는 실제요소(30)에 사용자(30)의 작용에 의해 발생된 운동(motion)과 관련된 물리적 파라미터의 값을 판독한다(단계 110).

여기서 물리적 파라미터는 위치($x_d(k)$) 또는 속도($v_d(k)$)가 이용될 수 있다.

다음에는 판독된 물리적 파라미터 즉, 속도 또는 위치값을 가상환경(47)의 속도 또는 위치값으로 설정한다(단계 120).

이후, 단계 120에서 설정된 속도 또는 위치로부터 가상환경(47)에서 햅틱장치(41)를 통해 사용자에게 역으로 응답해야할 힘($F_e(k)$)을 산출한다(단계 130).

그리고 나서, 산출된 힘($F_e(k)$)과 단계 110에서 산출된 물리적 파라미터의 값으로부터 바운딩 파라미터($\beta(k)$)를 산출한다(단계 140).

여기서, 바운딩 파라미터($\beta(k)$)는

$$\text{속도에 대해서는 } \beta(k) = \frac{F_e(k) - F_d(k-1)}{v_{d,k}} \quad \text{또는 위치에 대해서는 } \beta(k) = T \frac{F_e(k) - F_d(k-1)}{x_d(k) - x_d(k-1)} \text{ 로 산출된다.}$$

여기서, T는 설정된 시간간격이고, $F_e(k)$ 는 k번째 시간 간격에 해당하는 시간에서 센서에 의해 검출된 물리적 파라미터에 대응하여 가상환경에서 응답해야할 힘이고, $F_d(k-1)$ 은 k-1번째에 햅틱 장치(41)의 실제요소(30)에 인가한 힘이다.

다음으로는 산출된 바운딩 파라미터($\beta(k)$)가 설정된 바운딩 범위내에 있는 지를 판단하고 바운딩 범위를 벗어날 경우 바운딩 파라미터를 조정된 후 햅틱장치(41)에 있는 실제요소에 인가되어야할 힘을 산출한다.

여기서 바운딩 파라미터의 조정은 바운딩 파라미터($\beta(k)$)가 설정된 최대값(β_{max}) 이상이면 $\beta(k)$ 를 β_{max} 로 조정하고, $\beta(k)$ 가 설정된 최소값(β_{min}) 이하이면 $\beta(k)$ 를 β_{min} 값으로 조정하며 바운딩 파라미터가 상기 최대값과 최소값 사이의 값을 갖으면 그대로 적용하는 것을 말한다.

이러한 조정과정에 따라 힘을 산출하는 과정을 보다 상세하게 설명하면, 단계 140에서 산출된 바운딩 파라미터($\beta(k)$)가 설정된 바운딩 범위내에 있는 지를 판단한다(단계 150).

단계 150에서 바운딩 파라미터($\beta(k)$)가 설정된 바운딩 범위내에 있다고 판단되면, 산출된 바운딩 파라미터를 이용하여 햅틱장치(41)에 있는 실제요소에 인가되어야할 힘을 산출한다(단계 170).

또한, 단계 150에서 바운딩 파라미터($\beta(k)$)가 설정된 바운딩 범위를 벗어났다고 판단되면 바운딩 파라미터가 설정된 최대값(β_{max}) 이상인지를 판단한다(단계 160).

단계 160에서 바운딩 파라미터($\beta(k)$)가 설정된 최대값 이상이라고 판단되면 바운딩 파라미터를 설정된 최대값으로 적용하여 햅틱장치(41)에 있는 실제요소에 인가되어야할 힘을 산출한다(단계 180).

이와는 다르게 단계 160에서 바운딩 파라미터($\beta(k)$)가 설정된 최소값 이하라고 판단되면 바운딩 파라미터를 설정된 최소값으로 적용하여 햅틱장치(41)에 있는 실제요소에 인가되어야할 힘을 산출한다(단계 190).

마지막으로 산출된 힘($F_d(k)$)을 샘플/홀드부(43)를 통해 햅틱장치(41)의 실제 요소에 인가한다.

이러한 과정은 설정된 시간 간격(T) 마다 반복한다.

이하에서는 이러한 햅틱 인터페이스 안정화 방법(이하에서는 에너지 바운딩 처리 방식이라 한다)에 의해 햅틱 시스템(40)이 안정화 될 수 있음을 보다 상세하게 설명한다.

에너지 바운딩 처리부(50)는 메인제어부 및 가상환경을 포함하는 제어시스템(44)을 패시브하게 만들어주고, 샘플/홀드부(43)에서 발생된 에너지를 실제 햅틱장치(41)에서 존재하는 에너지 소모요소에 의해 전부 소모될 수 있도록 제한시킨다. 이러한 에너지 바운딩 처리부(50)는 햅틱시스템(40)이 안정되게 햅틱상호작용을 수행하는 것을 언제나 보장한다.

에너지 바운딩 처리부(50)는 샘플/홀드부(43)와 제어시스템(44)의 에너지 관계를 분리해서 다룬다. 왜냐하면 제어시스템(44)에서의 에너지 발생은 정확히 보상가능하기 때문에 이 에너지까지 햅틱장치(41)에 있는 실제요소의 물리적 댐핑을 이용해 소모시킬 필요가 없기 때문이다. 이렇게 함으로써 샘플/홀드부(43)에서 발생하는 더 많은 에너지를 햅틱장치(41)의 실제요소의 물리적 댐핑에 의해 소모시킬 수 있다.

이를 위해 에너지 바운딩 처리 방식에서는 아래의 수학식 15와 수학식 16으로 각각 표현된 두개의 제1 및 제2 안정조건을 적용한다.

수학식 15

$$P_H(n) + T \sum_{k=1}^n F_d(k-1)v_{d,k} - T \sum_{k=1}^n F_d(k)v_{d,k} \geq 0$$

수학식 16

$$T \sum_{k=1}^n F_d(k)v_{d,k} \geq 0$$

여기서 수학식 15는 샘플/홀드부(43)에서 발생하는 에너지가 햅틱장치(41)에서 완전히 소모될 조건을 의미하고, 수학식 16은 메인제어부(46) 및 가상환경(47)이 패시브할 조건을 의미한다. 이 두 조건을 만족시키기 위해 에너지 바운딩 처리부(50)는 아래의 수학식 17로 표현된 제어규칙(control law)과 바운딩 규칙(boundinglaw)을 사용한다.

수학식 17

$$F_d(k) = F_d(k-1) + \beta(k)v_{d,k}$$

여기서 $v_{d,k} = v_{b,k}$ 이다.

또한, 바운딩 규칙은 앞서 설명된 바와 같이 $\beta(k) > \beta_{max}$ 이면 $\beta(k) = \beta_{max}$ (maximum bounding law)이고, $\beta(k) < \beta_{min}$ 이면, $\beta(k) = \beta_{min}$ (minimum bounding law)을 적용한다.

여기서 $\beta(k)$ 는 햅틱장치(41) 인가된 사용자의 운동을 검출하는 물리적 파라미터를 속도로 적용할 때 아래의 수학식 18로 표현된다.

수학식 18

$$\beta(k) = \begin{pmatrix} \frac{F_b(k)-F_d(k-1)}{v_{d,k}} & , \quad \text{if } v_{d,k} \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{pmatrix}$$

상기 수학식 17로 표현된 제어규칙 및 바운딩 규칙은 햅틱장치(41)에 있는 실제요소 예를 들면, 액츄에이터에서 발생시켜 주어야 할 힘(force)이 목적하는 제어힘($F_b(k)$)을 추종하도록 만들어 준다. 여기서 수학식 17과 같은 제어규칙을 사용한 이유는 수학식 15를 만족시키는 바운딩 규칙을 쉽게 찾기 위해서이다.

만약 바운딩규칙이 없게 되면 제어규칙은 액츄에이터 힘($F_d(k)$)이 제어힘($F_b(k)$)과 같게 만들어 버리고, 이 경우 제1안정조건과 제2안정조건을 만족시킴을 보장할 수 없다. 따라서 앞서 설명된 바운딩 규칙을 이용하여 시스템이 안정화 되도록 해야 한다. 즉, 제어규칙을 사용하여 실제 액츄에이터에서 발생시키는 힘이 가상환경(47) 및 메인 제어부(46)에서 발생시켜 주기 원하는 힘을 따라 가도록 하되 바운딩 규칙을 이용하여 전체 시스템(40)의 패시버티를 보장하게 하는 제1안정조건과 제2안정조건을 만족시키도록 만들어 주는 것이다.

이하에서는 에너지 바운딩 방식이 안정한 햅틱 상호작용을 위한 제1안정조건과 제2안정조건을 만족하는지, 만족하기 위해서는 어떤 최대 바운딩 값과 최소 바운딩 값을 가져야 하는지 알아보자.

$$T \sum_{k=1}^n F_d(k-1) \cdot v_{d,k} - T \sum_{k=1}^n F_d(k) v_{d,k}$$

먼저, 조건 1의 경우

부분이 샘플/홀드부(43)의 패시버티와 관련

되어 있고, $F_d(k) = F_d(k-1) + \beta_{max}(k)v_{d,k}$ 일 때 최대값을 갖는다. 왜냐하면,

$$F_d(k-1)v_{d,k} - F_d(k)v_{d,k} = -\beta(k) v_{d,k}^2 \geq -\beta_{max} v_{d,k}^2 \text{ 이고,}$$

$$\min(T \sum_{k=1}^n F_d(k-1) \cdot v_{d,k} - T \sum_{k=1}^n F_d(k) v_{d,k}) = -T \sum_{k=0}^n \beta_{max} v_{d,k}^2$$

이기 때문이다.

따라서 제1안정조건은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

수학식 19

$$P_{H(n)} + T \sum_{k=1}^n F_d(k-1)v_{d,k} - T \sum_{k=1}^n F_d(k)v_{d,k} \geq P_{H(n)} - T \sum_{k=1}^n \beta_{\max} v_{d,k}^2 \geq 0$$

따라서, 제1안정조건은 아래의 수학식 20으로 표현되는 관계식에 의해 만족될 수 있다.

수학식 20

$$\frac{P_{H(n)}}{T \sum_{k=1}^n v_{d,k}^2} \geq \beta_{\max}$$

위 수학식 20으로부터 샘플/홀드부(43)에 의해 발생된 에너지는 수학식 20을 만족시키는 β_{\max} 를 선택함에 의해 햅틱장치(41)에 있는 물리적인 댐핑요소에 의해 소비가능한 에너지범위내로 제한시킬 수 있다.

일 예로서 1차원 자유도를 갖는 햅틱장치(41)에 대해서 살펴보면, $P_{H(n)} \geq T \sum_{k=1}^n b v_{d,k}^2$ 이므로, 제1안정조건은 아래의 수학식 21이 될 때 만족된다.

수학식 21

$$b \geq \beta_{\max}$$

또한, 제2안정조건에 대해서는

$T \sum_{k=1}^n F_d(k)v_{d,k}$ 이 가상환경(47)과 메인 제어부(46)의 패시버티와 관련있고, $F_d(k) = F_d(k-1) + \beta_{\min} v_{d,k}$ 일때 최소값을 갖는다.

여기서 최소값은 아래의 수학식 22로 표현된다.

수학식 22

$$\min \left(\sum_{k=1}^n F_d(k)v_{d,k} \right) = \frac{1}{2} \beta_{\min} \left(\sum_{k=1}^n v_{d,k}^2 \right) + \frac{1}{2} \beta_{\min} \sum_{k=0}^n v_{d,k}^2$$

또한, 조건 2는 아래의 수학식 23과 같이 다시 쓸수 있다.

수학식 23

$$T \sum_{k=1}^n F_d(k)v_{d,k} \geq \frac{1}{2} T \beta_{\min} \left(\sum_{k=1}^n v_{d,k}^2 \right) + \frac{1}{2} T \beta_{\min} \sum_{k=0}^n v_{d,k}^2 \geq 0$$

따라서, 제2안정조건은 아래의 수학식 24의 조건을 만족할때 만족된다.

수학식 24

$$\beta_{\min} \geq 0$$

따라서, 수학식 24를 만족하는 β_{\min} 을 선택함에 의해 가상환경(47)과 메인제어부(46)를 패시브하게 만들수 있다.

앞에서 살펴본 바와 같이 본 발명에 따른 에너지 바운딩 처리방식은 최대 바운딩 규칙에 의해 샘플/홀드부(43)에서 발생되는 에너지를 제한시켜 줄 수 있으며 수학식 20에서와 같이 물리적인 댐핑 값 보다 작은 최대 바운딩 값을 통해 샘플/홀드부

(43)에서 발생하는 에너지를 물리적인 햅틱장치(41)에서 소모될 수 있는 에너지 이내로 제한시켜줄 수 있다. 또한, 에너지 바운딩 처리부(50)는 최소 바운딩 규칙에 의해 가상환경(47)과 메인제어기(46)로 이루어진 서브시스템을 패시브하게 만들어 줄 수 있다.

안정된 햅틱 상호작용에 있어서, 1차원 자유도를 갖는 햅틱 장치(41)에 대해서는 $\beta_{max} = b$, $\beta_{min}=0$ 을 선택하는 것이 바람직하다.

한편, 가상환경(47)이 개발자의 의도에 의해 네가티브 댐퍼와 같은 능동요소를 포함할 때 또는 가상스프링과 같은 에너지 저장요소로부터 저장된 에너지가 이완(released)될 때, 네가티브 $\beta(k)$ 가 요구된다. 이 경우 β_{min} 은 아래의 수학적 식 25로 표현된 조정된 제2안정 조건에 의해 결정하면 된다.

수학적 식 25

$$T \sum_{k=1}^n F_d(k)v_{d,k} - P_{ref}(n) \geq 0$$

여기서, $P_{ref}(n)$ 은 가상환경(47)의 참조에너지이다. 만약 모델정보가 특정되지 않을 경우,

$P_{ref}(n) = T \sum_{k=1}^n F_e(k)v_{e,k}$ 를 사용하면 된다. 이것은 에너지 바운딩 처리부(50)가 가상환경(47)의 패시버티에 관해서 고려하지 않아도 됨을 의미한다.

이상에서 살펴본 바와 같이 본 발명에 따른 에너지 바운딩 처리방식은 샘플/홀드부(43)에서 발생된 에너지를 소비가능한 에너지 범위 이내로 제한시키고, 제어시스템(44)을 패시브하게 만든다.

또한, 앞서 수학적식23에서 도출된 것과 유사하게 조정된 제2안정조건은 아래의 수학적 식 26과 같이 다시 쓸수 있다.

수학적 식 26

$$T \sum_{k=1}^n F_d(k)v_{d,k} - P_{ref}(n) \geq \frac{1}{2} T \beta_{min} \left(\sum_{k=1}^n v_{d,k}^2 \right) + \frac{1}{2} T \beta_{min} \sum_{k=0}^n v_{d,k}^2 - P_{ref}(n) \geq 0$$

따라서, 참조에너지의 행동과 관련된 에너지 바운딩 방식에서 β_{min} 은 아래의 수학적 식 27과 같이 도출된다.

수학적 식 27

$$\beta_{min} = \frac{2P_{ref}(n)}{T \left(\sum_{k=1}^n v_{d,k} \right)^2 + T \sum_{k=1}^n v_{d,k}^2}$$

이상에서 설명된 본 발명에 따른 에너지 바운딩 방식과 종래의 가상 커플링방식을 비교하면 다음과 같은 차이점이 있다. 먼저 가상 커플링은 수동성을 만족시키는 콘츰롤러 및 가상환경에 대해 안정성을 보장하기 때문에 이 부분에서 발생된 에너지들을 능동적으로 소모시켜주지 못한다. 또한 가상 커플링은 앞서 수학적식13으로 표현된 안정성조건을 만족하는 경우라도 햅틱인터페이스가 생성시켜주어야 할 힘(F_d)을 변형시키기 때문에 사용자에게 불필요하게 왜곡된 힘을 전달하게 된다. 반면에 에너지바운딩 방식의 경우 제2안정조건에서 도출된 최소 바운딩값(β_{min}) 의해 제어시스템(44)의 수동성 조건을 항상 만족시켜줄 수 있다. 또한 에너지 바운딩 방식에서는 수학적 식 13으로 표현된 안정성 조건을 만족하는 경우에는 햅틱장치(41)가 생성시켜주어야 할 힘(F_d)을 변형시키지 않기 때문에 사실감을 높여줄 수 있다.

사실 가상 커플링 방식과 에너지 바운딩 방식은 제1안정조건을 만족시키는 부분에 있어서는 일정부분 유사한 점이 있다. 즉, 샘플/홀드부(43)에서 발생된 에너지를 실제적인 물리적 댐핑을 통해 소모시킨다는 점에서는 일부 유사하지만 두 방식은 다음과 같은 차이가 있다.

가상 커플링 방식은 통과 깊이(penetration depth)와 관련된 액추에이터 힘을 제한시키고, 결국에는 생성된 에너지를 제한시킨다. 이와는 달리 본 발명에 따른 에너지 바운딩 방식은 액추에이터 힘의 변화를 최대와 최소 바운딩값 이내로 제한하여 결국 발생하는 에너지를 제한시킨다. 즉, 에너지 바운딩 방식은 통과 깊이에 따라 직접적으로 액추에이터 힘을 제한하지는 않는다. 다시말하면, 가상커플링 방식은 위치에 따른 액추에이터 힘의 슬로프를 제한시키는 반면, 에너지 바운딩 알고리즘은 시간에 따른 액추에이터 힘의 슬로프를 제한시키는 방법이다. 양자간의 이러한 차이는 햅틱 시뮬레이션의 가능한 임피던스에 대한 성능의 차이를 야기시킨다.

에너지 바운딩 처리방식을 가상 커플링 방식과 직접적으로 비교하기 위해 다음과 같은 상황을 고려해보자. 먼저, 설명의 단순화를 위해 햅틱 인터페이스를 구동하기 위한 제어요소 예를 들면 속도필터 또는 중력보상 알고리즘은 무시한다. 이때 $F_b(k)=F_e(k)$ 가 된다. 만일 사용자가 햅틱 장치(41)를 이용하여 매우 경직된(stiff) 가상 스프링을 압축 시킨다고 가정하면, 사용자의 움직임에 따라 가상환경(47)에서 만들어내는 힘은 매우 크게 변화한다. 이 경우, 에너지 바운딩 처리방식은 최대 바운딩 규칙을 적용하여 다음의 수학적 식 28과 같이 힘의 변화를 제한한다.

수학적 식 28

$$F_d(k) = F_d(k-1) + \beta_{\max} v_{d,k}$$

위 수학적 식 28은 가상 커플링 방식과의 비교를 위해 다음과 같이 위치(position)와 힘(force)의 관계로 아래의 수학적 식 29과 같이 표시할 수 있다.

수학적 식 29

$$F_d(k) \cdot \frac{\beta_{\max}}{T} x_{d,k} = F_d(k-1) \cdot \frac{\beta_{\max}}{T} x_{d,k-1}$$

만일 위 수학적 식 29의 양쪽 항목 각각이 0(zero)이면, 이것은 스프링요소만을 가지는 가상커플링 방식과 같은 식이 된다. 하지만 에너지 바운딩 방식에서 양쪽 항목이 0이 될 필요는 없다. 이러한 사실은 에너지 바운딩 방식이 스프링요소만을 가지는 가상커플링 방식 보다 적응성이 향상됨을 의미한다.

다음으로 사용자가 압축시켰던 스프링을 이완 시킬 때를 생각해보자. 가상커플링 방식은 통과깊이가 줄어들며 따라 감소된 액추에이터 힘을 만들어 낸다. 이에 반해 에너지 바운딩 처리방식은 가상환경(47)에서 요구하는 힘(F_e)이 액추에이터 힘(F_d)보다 작아지지 않을 때까지는 액추에이터 힘을 감소시키지 않는다. 왜냐하면 수학적 식 18에서 알 수 있듯이 $\beta(k)$ 가 $F_e(k)-F_d(k-1)$ 값을 토대로 계산되기 때문이다. 가상스프링이 이완 될 때 $F_e(k)-F_d(k-1)$ 과 $v_{d,k}$ 가 서로 다른 방향을 가지므로 $\beta(k)$ 는 음의 값을 가지며 에너지 바운딩 처리방식의 경우 음의 $\beta(k)$ 를 허용하지 않으므로 액추에이터 힘을 홀딩하게 한다. 또한 참조 에너지를 갖는 에너지 바운딩 처리방식의 경우 저장된 에너지에 대한 음의 $\beta(k)$ 를 허용하지 않으므로 액추에이터 힘을 증가시킨다. 가상스프링이 이완되다 다시 압축되면 에너지 바운딩 처리방식은 홀딩하고 있던 액추에이터 힘을 다시 증가시킨다. 가상커플링방식과 에너지 바운딩 방식의 이러한 차이는 시뮬레이션 할 수 있는 가상환경의 임피던스 차이를 가져온다.

도 6은 가상 스프링에 대한 에너지 바운딩 처리방식과 가상커플링 방식의 시뮬레이션 결과를 비교할 수 있도록 사용자가 사인과 궤적으로 햅틱장치(41)를 이동시키고, 가상환경(47)은 사인과 힘(F_e)을 발생시키도록 시뮬레이션에 한 결과이다.

가상스프링이 압축되면, 가상 커플링방식과 에너지 바운딩 처리방식은 도 6(a)에 도시된 바와 같이 F_e 가 0부터 시작하기 때문에 동일한 액추에이터 힘(f_d)을 제공한다. 그러나, 앞에서 설명한 바와 같이 가상스프링이 이완되기 시작할 때 양 방식은 상호 다른 액추에이터 힘을 제공한다. 즉, 에너지 바운딩 처리방식은 가상커플링방식에 비해 목적하는 힘에 더욱 근접되게 추종된다.

한편, 실제상황을 고려하면, 사용자는 미세한 손떨림 운동으로 움직인다. 이러한 손 떨림에 의해 압축과 이완이 국소적으로 계속 발생하게 되고, 이것은 이완할 때 발생했던 두 방식의 차이가 지속적으로 적산됨을 의미한다. 이 경우 두 방식의

성능차이는 도 6b를 통해 알 수 있는 바와 같이 보다 확대되어 나타난다. 본 시뮬레이션에서, 에너지 바운딩 처리방식은 압축기간 동안에도 가상커플링 방식 보다 더 큰 임피던스 범위를 제공한다. 이 것 이외에도, 에너지 바운딩 처리 방식은 추가적인 계산없이 Fe가 정의된 어떠한 가상환경에도 사용될 수 있다.

< 실험예 >

본 실험에서는 프로토타입 햅틱 인터페이스를 개발하는 동안 불안정 요소(factor)가 있는지를 예측하기 위해 널리 이용되는 임펄스 엔진 2000(impulse engine 200)을 사용하였다.

임펄스 엔진 2000은 고성능의 역감제시(tactile force-feedback) 장치이고, 이머전 코퍼레이션(immersion corporation)에서 군사용, 로보틱, 메디컬 및 다른 다양한 연구분야용으로 개발된 것이다.

임펄스 엔진 2000은 짐발(gimbal) 구조를 사용하여 2자유도 회전운동을 가지며, 기어대신에 캡스틴 메카니즘(capstan mechanism)을 사용하여 향상된 구동능력을 지닌다. 작업공간은 x, y 축을 따라 6"×6"(±45°에 대해서)이고, 핸들의 최대 출력힘은 2lbs.(8.9N)이며, 엔코더 분해능은 0.0008" 이다. 따라서, 임펄스 엔진 2000에 의한 햅틱 인터페이스에서 생성할 수 있는 최대 탄성계수는 약 35KN/m이다.

이러한 임펄스 엔진 2000을 사용한 가상벽 실험결과를 도 7 내지 도 12를 참조하여 설명한다.

도 7은 햅틱렌더링 레이트를 1KHz로 적용하였을 때 가상벽에 대한 실험결과를 보여준다. 이 실험에서는 어떤 제어알고리즘도 적용하지 않았고, 그 결과 샘플/홀드부(43)에 의해 발생된 에너지에 의해 원치않는 진동이 야기됨을 볼 수 있다. 즉, 가상벽의 탄성계수가 20KN/m보다 커지면, 원치않는 진동이 시작된다.

도 8은 가상벽의 탄성계수를 30KN/m으로 적용하고, 햅틱렌더링 레이트를 1KHz로 적용하였을 때 에너지 바운딩 처리방식을 적용한 가상벽에 대한 실험결과를 나타내 보인 것이다. 도 8을 통해 알 수 있는 바와 같이 도 6에서보다 높은 탄성계수를 갖는 가상벽을 적용하였음에도 에너지 바운딩 처리에 의해 햅틱장치의 안정적 행동을 제공함을 알 수 있다.

도 9은 햅틱렌더링 레이트를 500KHz로 적용한 가상벽에 대한 실험결과이다. 햅틱렌더링 레이트가 감소하면, 안정성의 손실이 없어도 표시되는 임피던스 범위가 감소된다. 가상벽의 탄성계수가 10KN/m이상으로 증가하면 원치않는 진동이 발생된다.

도 10은 가상벽의 탄성계수를 30KN/m으로 적용하고 햅틱렌더링 레이트를 500Hz로 적용하였을 때 에너지 바운딩 처리방식을 적용한 가상벽에 대한 실험결과를 나타내 보인 것이다.

도 10을 통해 알 수 있는 바와 같이 에너지 바운딩 처리방식에 의해 매우 안정된 행동을 제공함을 알 수 있다.

도 11은 햅틱렌더링 레이트를 100Hz로 적용하였을 때 가상벽에 대한 실험결과를 나타내 보인 것이다. 햅틱렌더링 레이트가 매우 낮아지면, 매우 안좋은 결과를 볼수 있다. 5KN/m의 탄성계수를 갖는 가상벽은 거대한 진동을 야기시킨다.

도 12는 가상벽의 탄성계수를 30KN/m으로 적용하고 햅틱렌더링 레이트를 100Hz로 적용하였을 때 에너지 바운딩 처리방식을 적용하여 가상벽에 대한 실험결과를 나타내 보인 것이다. 에너지 바운딩 처리방식은 햅틱장치(41)의 보다 향상된 행동을 제공한다. 비록 충실도는 부분적으로 저하되지만 에너지 바운딩 처리방식은 햅틱 렌더링 레이트에 관계없이 안정도를 저하시키지 않음을 알 수 있다.

이상에서 설명된 바와 같이 본 발명에 따른 에너지 바운딩 처리방식은 햅틱장치(41)에서 에너지 소비요소가 되는 물리적인 댐핑에 의해 소비될 수 있는 에너지 범위내로 샘플/홀딩 과정에서의 0차 오더홀드(zero order hold)에 의해 생성된 에너지를 제한시키고, 메인 제어부(46)와 가상환경(47)을 패시브하게 만든다. 패시버티 조건은 에너지 바운딩 처리 방식에 의해 언제나 보장된다. 가상커플링 방식은 통과깊이와 관련된 액추에이터 힘을 제한시키고, 생성된 에너지를 제한시킨다. 이와는 반대로 에너지 바운딩 처리방식은 액추에이터 힘의 변화를 제한시키고, 0차 오더 홀드에 의해 생성된 에너지를 제한시킨다. 따라서, 에너지 바운딩 처리방식을 적용하게 되면 보다 높은 탄성계수를 갖는 시뮬레이션의 수행(implemented)이 가능해진다. 또한, 에너지 바운딩 처리방식은 부하에 대한 계산이 요구되지 않기 때문에 연산이 간단한 장점을 제공한다.

발명의 효과

지금까지 설명된 바와 같이 본 발명에 따른 햅틱 인터페이스의 안정화 방법 및 이를 적용한 햅틱시스템에 의하면, 시스템이 추구하는 실감도에 대한 성능 저하를 억제시키면서도 시스템을 안정화 시킬 수 있다.

(57) 청구의 범위

청구항 1.

가상환경을 포함하는 제어시스템과 햅틱장치 사이의 상호 작용을 지원할 수 있도록 된 햅틱 시스템의 햅틱 인터페이스를 안정화하는 방법에 있어서,

가. 설정된 시간 간격 마다 상기 햅틱장치에 있는 실제요소에 사용자의 작용에 의해 발생된 운동과 관련된 물리적 파라미터의 값을 검출하는 단계와;

나. 상기 물리적 파라미터의 값에 응답하여 상기 가상환경에서 상기 햅틱장치를 통해 상기 사용자에게 역으로 응답해야 할 힘을 산출하는 단계와;

다. 상기 나 단계에서 산출된 힘과 상기 가 단계에서 산출된 물리적 파라미터의 값으로부터 샘플앤 홀드과정에서 발생하는 에너지가 상기 햅틱장치에서 소모될 제1안정조건과 상기 제어시스템에서 생성된 에너지가 패시브할 제2안정조건을 만족시킬 수 있는 바운딩 파라미터를 산출하는 단계와;

라. 상기 다단계에서 산출된 바운딩 파라미터가 설정된 바운딩 범위를 벗어나면 설정된 바운딩 범위내로 조정하는 단계와;

마. 상기 라 단계에서 조정된 상기 바운딩 파라미터에 의해 상기 햅틱장치에 있는 실제요소에 인가되어야 할 힘을 조정하는 단계와;

사. 상기 마 단계에서 조정된 힘을 상기 햅틱장치의 실제 요소에 인가하는 단계; 및

아. 상기 가 단계 내지 사 단계를 상기 시간 간격 마다 반복하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 햅틱 시스템의 햅틱 인터페이스를 안정화하는 방법.

청구항 2.

제1항에 있어서, 상기 가단계에서의 상기 물리적 파라미터는 위치 또는 속도인 것을 특징으로 하는 햅틱시스템의 햅틱 인터페이스를 안정화 하는 방법.

청구항 3.

제2항에 있어서,

상기 바운딩 파라미터($\beta(k)$)는

$$\beta(k) = \frac{F_e(k) - F_d(k-1)}{v_{d,k}} \quad \text{또는} \quad \beta(k) = T \frac{F_e(k) - F_d(k-1)}{x_d(k) - x_d(k-1)} \quad \text{이고,}$$

여기서, T는 상기 시간 간격이고, $F_e(k)$ 는 k번째 시간 간격에 해당하는 시간에서 상기 물리적 파라미터에 대응하여 상기 가상환경에서 응답해야할 힘이고, $F_d(k-1)$ 은 k-1번째에 상기 햅틱 장치의 실제요소에 인가한 힘이고, $v_{d,k}$, 및 $x_{d,k}$, 는 사용자의 조작에 의해 상기 햅틱장치에서 검출된 속도 또는 위치인 것을 특징으로 하는 햅틱 시스템의 햅틱 인터페이스를 안정화하는 방법.

청구항 4.

제3항에 있어서,

상기 라단계에서 상기 바운딩 파라미터($\beta(k)$)가 설정된 최대값(β_{max}) 보다 크면 상기 바운딩 파라미터($\beta(k)$)를 상기 최대값(β_{max})으로 조정하고, 상기 바운딩 파라미터($\beta(k)$)가 설정된 최소값(β_{min}) 보다 작으면 상기 바운딩 파라미터($\beta(k)$)를 상기 최소값(β_{min})으로 조정하며 상기 바운딩 파라미터($\beta(k)$)가 상기 최대값(β_{max})과 최소값(β_{min}) 사이의 값을 갖으면 그대로 적용하는 것을 특징으로 하는 햅틱 시스템의 햅틱 인터페이스를 안정화하는 방법.

청구항 5.

가상환경을 포함하는 제어시스템과 햅틱장치 사이의 상호 작용을 지원할 수 있도록 된 햅틱 시스템에 있어서,

사용자의 작용에 의해 상기 햅틱장치에서 발생된 운동과 관련된 물리적 파라미터를 검출하는 센서와;

상기 제어시스템에 설치되며, 설정된 시간 간격 마다 상기 센서로부터 측정된 물리적 파라미터에 응답하여 상기 가상환경에서 상기 햅틱장치를 통해 상기 사용자에게 역으로 응답해야 할 힘과 상기 물리적 파라미터로부터 샘플/홀드 과정에서 발생하는 에너지가 상기 햅틱장치에서 소모될 제1안정조건과 상기 제어시스템에서 생성된 에너지가 패시브할 제2안정조건을 만족시킬 수 있는 바운딩 파라미터를 산출하고, 산출된 바운딩 파라미터가 설정된 바운딩 범위를 벗어나면 설정된 바운딩 값 범위내로 조정하며, 조정과정을 거쳐 결정된 상기 바운딩 파라미터에 의해 상기 햅틱장치에 있는 실제요소에 인가되어야 할 힘을 산출하여 상기 햅틱 장치의 실제 요소에 인가하는 에너지 바운딩 처리부;를 더 구비하는 것을 특징으로 하는 햅틱 시스템.

청구항 6.

제5항에 있어서, 상기 물리적 파라미터는 위치 또는 속도인 것을 특징으로 하는 햅틱시스템.

청구항 7.

제6항에 있어서, 상기 바운딩 파라미터($\beta(k)$)는

$$\beta(k) = \frac{F_e(k) - F_d(k-1)}{v_{d,k}} \quad \text{또는} \quad \beta(k) = T \frac{F_e(k) - F_d(k-1)}{x_d(k) - x_d(k-1)} \quad \text{이고,}$$

여기서, T는 상기 시간 간격이고, $F_e(k)$ 는 k번째 시간 간격에 해당하는 시간에서 상기 물리적 파라미터에 대응하여 상기 가상환경에서 응답해야할 힘이고, $F_d(k-1)$ 은 k-1번째에 상기 햅틱 장치의 실제요소에 인가한 힘이고, $v_{d,k}$, 및 $x_{d,k}$, 는 사용자의 조작에 의해 상기 햅틱장치에서 검출된 속도 또는 위치인 것을 특징으로 하는 햅틱 시스템.

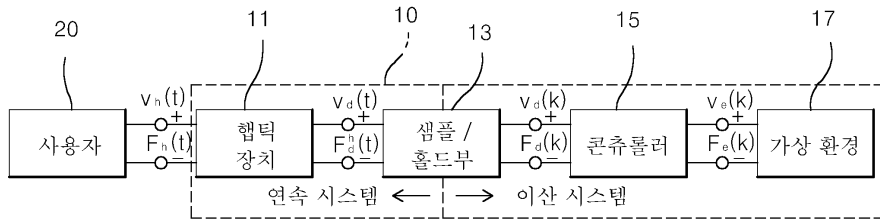
청구항 8.

제7항에 있어서,

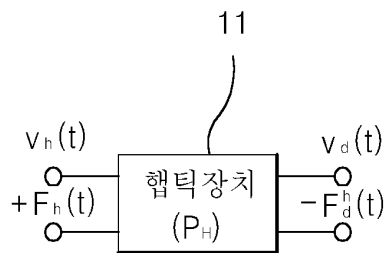
상기 바운딩 처리부는 상기 바운딩 파라미터($\beta(k)$)가 설정된 최대값(β_{max}) 보다 크면 상기 바운딩 파라미터($\beta(k)$)를 상기 최대값(β_{max})으로 조정하고, 상기 바운딩 파라미터($\beta(k)$)가 설정된 최소값(β_{min}) 보다 작으면 상기 바운딩 파라미터($\beta(k)$)를 상기 최소값(β_{min})으로 조정하며, 상기 바운딩 파라미터($\beta(k)$)가 상기 최대값(β_{max})과 최소값(β_{min}) 사이의 값을 갖으면 그대로 적용하는 것을 특징으로 하는 햅틱 시스템.

도면

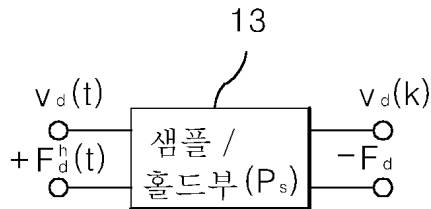
도면1



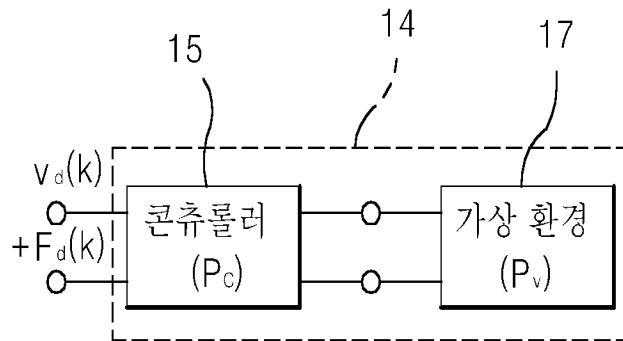
도면2a



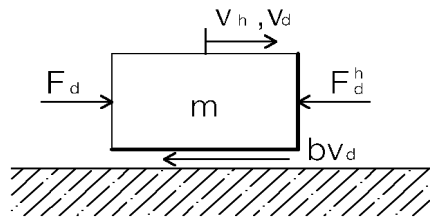
도면2b



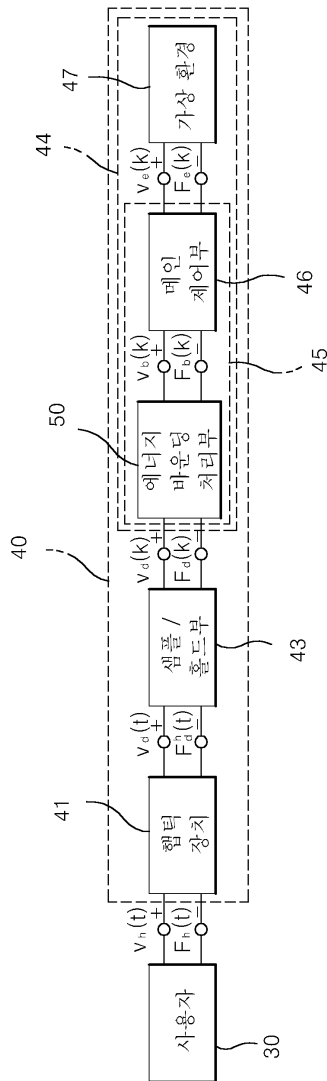
도면2c



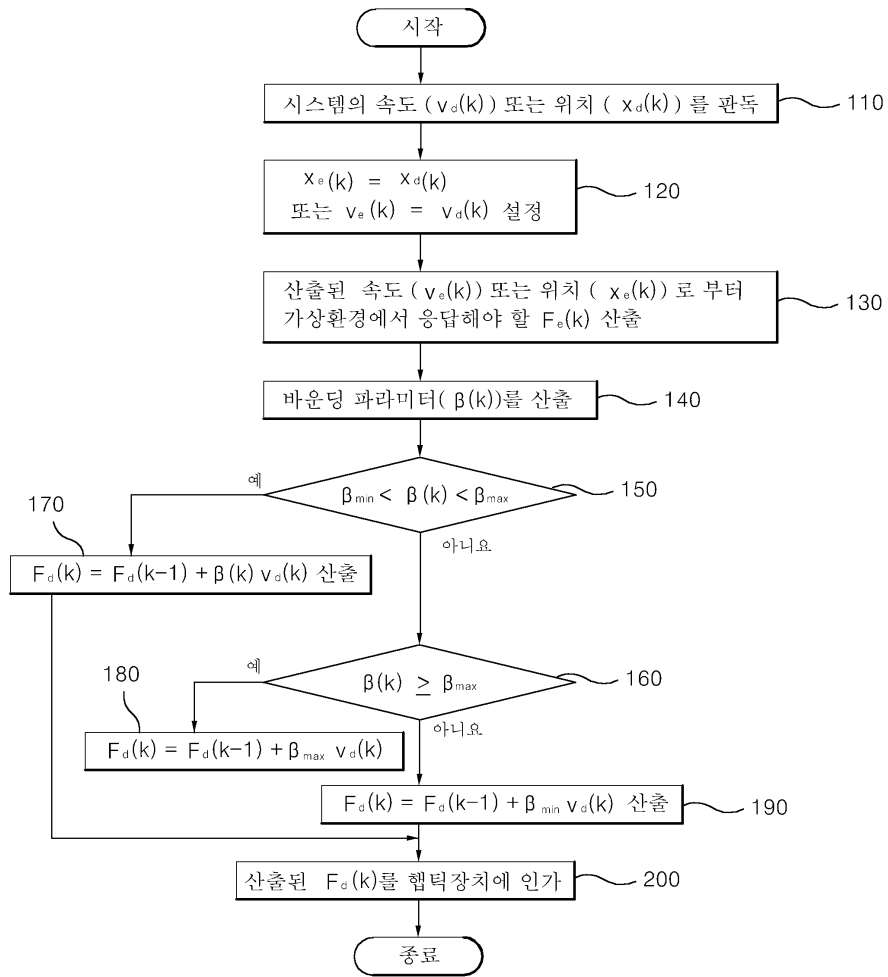
도면3



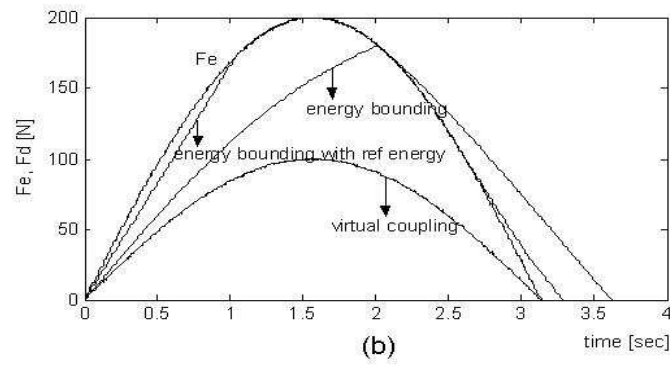
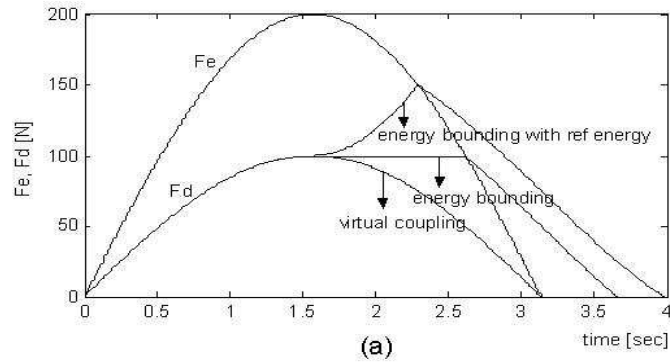
도면4



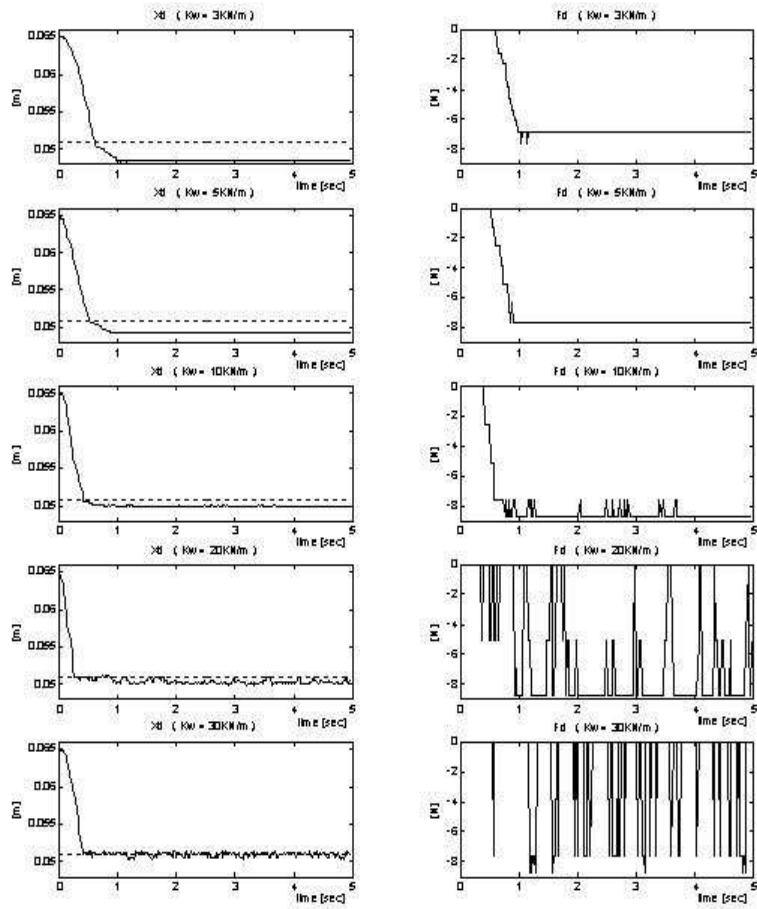
도면5



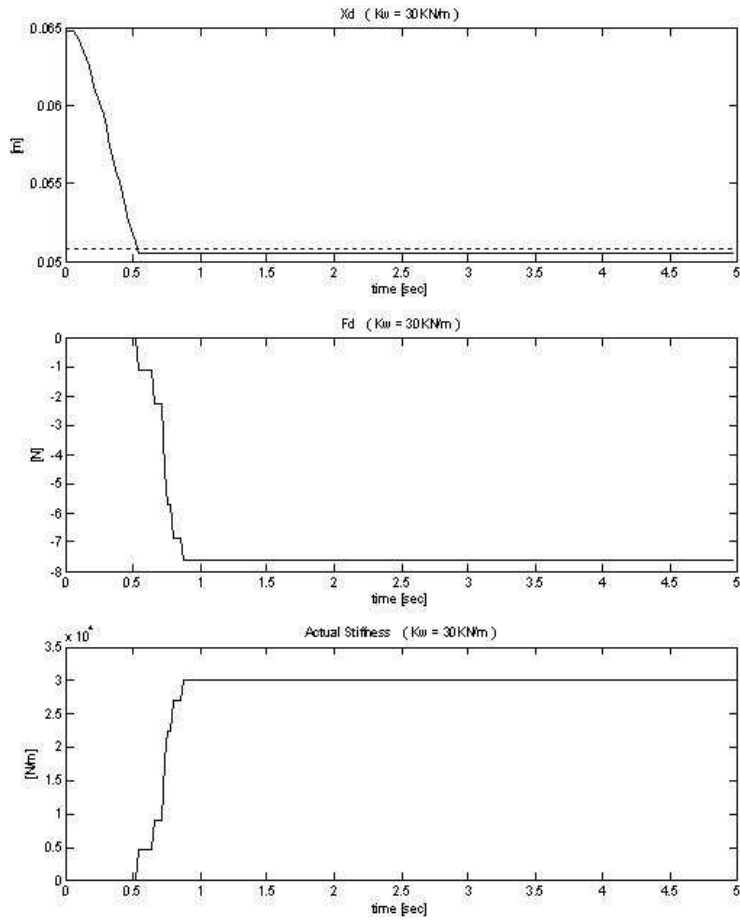
도면6



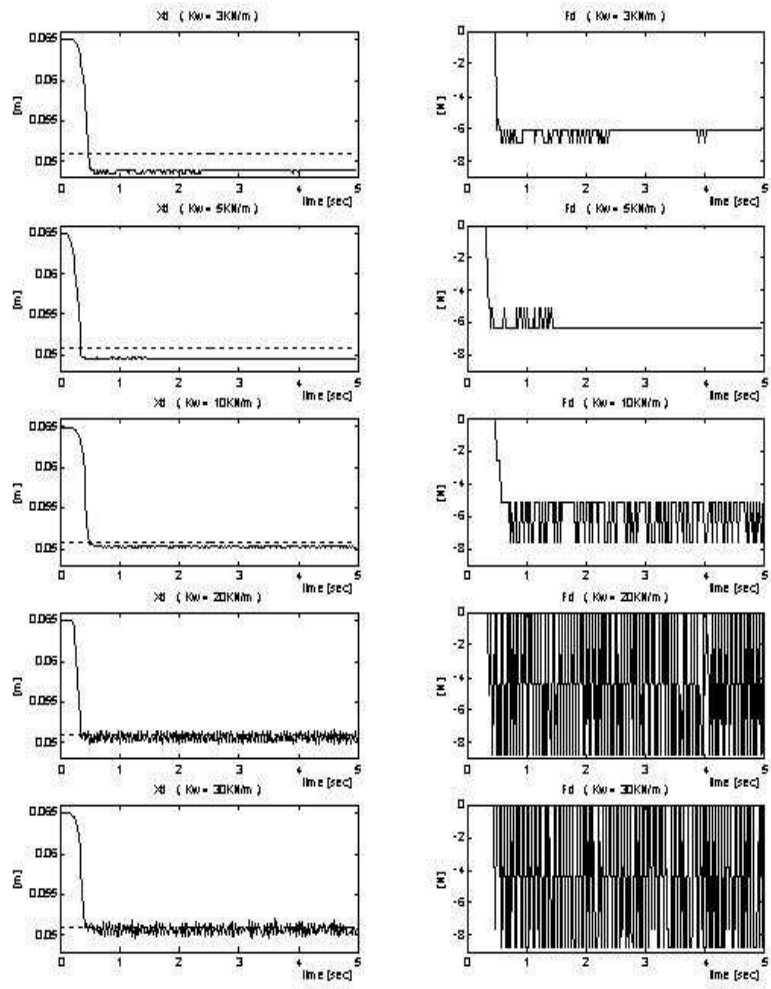
도면7



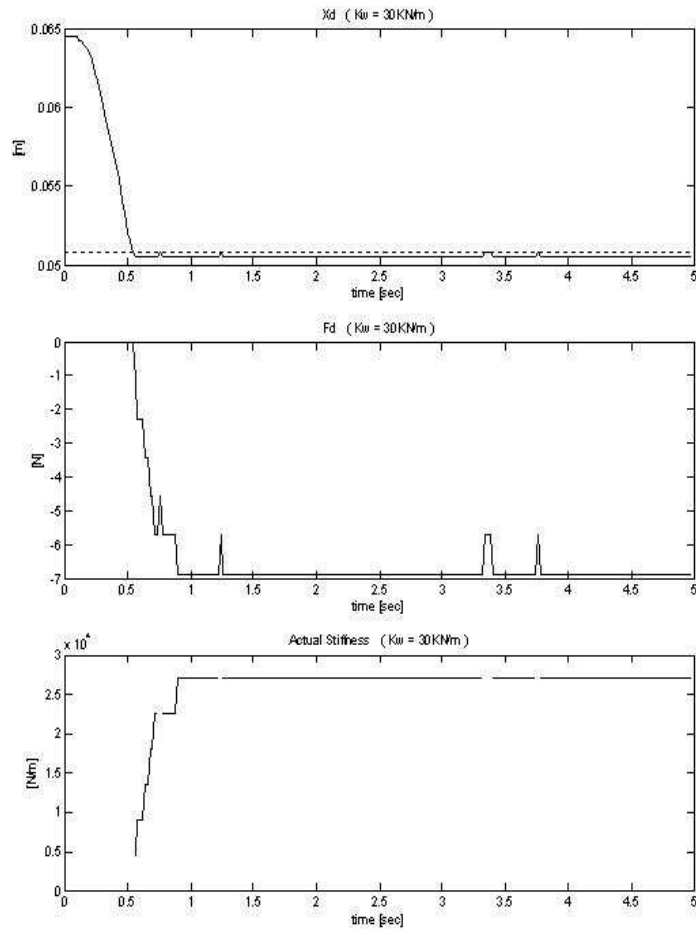
도면8



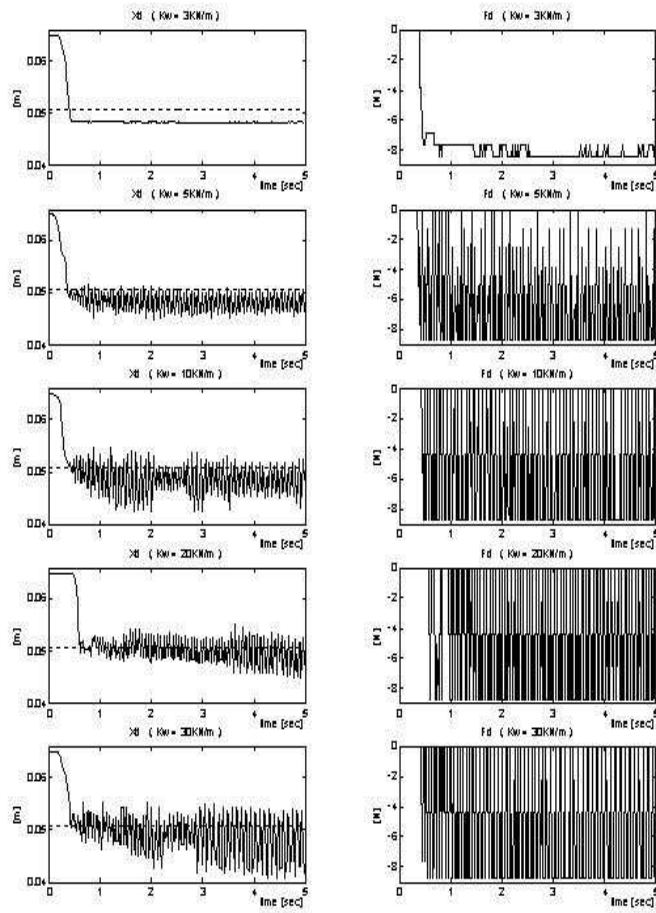
도면9



도면10



도면11



도면12

