

카르노프 마찰모델과 탐촉구 개념을 이용한 햅틱 디스플레이 모델 개발

권혁조* · 김기호* · 오재윤**

(2004년 4월 3일 접수, 2004년 7월 7일 심사완료)

The Haptic Display Model Development with the Karnopp Friction Model and the Proxy Concept

HyokJo Kwon, Kiho Kim and ChaeYoun Oh

Key Words: Proxy(탐촉구), Karnopp Friction Model(카르노프 마찰모델), Haptic Display(햅틱 디스플레이), Virtual Environment(가상환경), Force Reflection(힘반향)

Abstract

This study develops a haptic display model which is an indispensable for the force generation in the virtual environment. In developing the haptic display model, a Proxy concept and a Karnopp friction model are utilized to generate the reaction force and the friction force. Also this study develops a 2 D.O.F. remote wiping system. This system is composed of a 2 D.O.F. master manipulator, a force sensor equipped 2 D.O.F. slave manipulator and a real time controller. With the developed remote wiping system, this study identifies the friction characteristic of the aluminum, acryl and rubber plate. The results are used as the dynamic friction coefficient of the haptic display model. This study shows the efficiency of the developed haptic display model by the comparison between the friction characteristic of the haptic display with the developed haptic display model and the friction characteristic of the real aluminum, acryl and rubber plate.

1. 서 론

가상환경을 이용한 햅틱 디스플레이에서 가상 환경으로부터의 사실적인 힘정보의 추출은 힘정보의 전달에 관한 노력 이전에 반드시 해결해야 할 중요한 선결 요소이다. 이를 위하여 현재 다양한 힘발생 알고리즘에 대한 연구가 수행되고

있다. 가장 단순한 형태의 힘발생 알고리즘으로는 조작자 작업 명령점이 가상물체 내부로 침입한 거리에 비례하는 힘을 생성하는 Hooke's 법칙을 이용한 스프링 접촉모델^(1,7)을 들 수 있다. 하지만 이 모델의 경우, 얇은 가상물체를 표현할 때 조작자 작업 명령점이 가상물체를 뚫고 지나가는 경우, 더 이상 힘발생이 불가능하게 되고, 가상물체 내부에 조작자 작업 명령점이 위치할 때 반발력 방향 결정에 어려움이 발생하게 된다. Salisbury 등⁽²⁾과 Ruspini 등⁽³⁾은 이와 같은 문제를 해결할 수 있는 탐촉구(Proxy) 개념의 접촉모델을 제안하였다. 가상물체인 탐촉구는 가상환경 내의 자유공간에서는 모든 운동이 가능하지만 다른 가상물체와 충돌하는 경우, 상대 가상물체의 내부에 침입하지 못하고 그 표면에 구속되어 운동하

† 책임저자, 회원, 한국원자력연구소 건식공정핵연료 기술개발부

E-mail : hyokjo@hotmail.com

TEL : (042)868-8842 FAX : (042)862-7313

* 한국원자력연구소 건식공정핵연료기술개발부

** 회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부

E-mail : ohcy@chonbuk.ac.kr

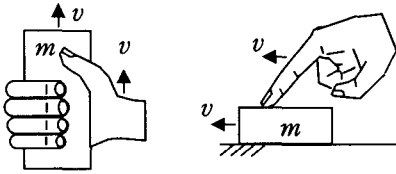


Fig. 1 Object handling using the friction force

게 되는데, 이때 발생하는 탐촉구 중심점과 조작자 작업 명령점 사이의 거리 및 방위 정보를 이용하여 반발력을 계산하게 된다. 탐촉구는 이와 같은 반발력에 대해서 위치에너지를 최소로 하는 지점(Local Minimum)으로 이동하게 된다. 탐촉구 접촉모델을 이용하면 조작자 작업 명령점이 얇은 가상물체를 뚫고 지나가더라도 탐촉구는 얇은 가상물체 표면에 잔류하여 두 점간의 위치 오차가 계속 발생하기 때문에 두 점 사이의 거리와 방위 정보를 이용하여 반발력의 크기와 방향을 계산할 수 있게 된다. 하지만 마찰을 고려하지 않는 단순한 탐촉구 개념만을 이용하는 경우에는 탐촉구는 항상 로컬미니멈 위치에 존재하기 때문에 조작자에게 가상물체의 표면에 수직인 반발력만을 반향한다. 따라서 조작자는 마찰력 성분을 느낄 수 없게 된다. 이런 이유로 단순한 탐촉구 개념만을 이용하는 경우에는 Fig. 1에 표현된 것과 같이, 물체를 미끄러지지 않도록 잡고 들어올린다거나, 누르면서 동시에 밀어서 물체를 움직이게 하는 것과 같은 마찰력이 포함되어야 하는 햅틱 디스플레이에 어려움이 따르게 된다.

본 논문에서는 기본적인 탐촉구 개념에 가상물체들 사이의 마찰력을 고려하여 조작자에게 마찰력을 표현할 수 있는 햅틱 디스플레이 모델을 개발한다. 또한 개발된 햅틱 디스플레이 모델을 이용하여 가상물체의 표면 마찰계수의 변화에 따른 반발력 및 마찰력 생성에 관한 실험을 실시하여 모델을 검증한다.

2. 햅틱 디스플레이 모델

조작자 작업 명령점이 가상물체 내부에 위치하여 탐촉구 중심점의 위치와 달라지는 경우, 두 지점간의 위치오차와 위치오차의 변화율, 가상물체의 특성값을 이용하여 반발력을 계산할 수 있다. Fig. 2는 이와 같은 정보를 이용하여 반발력을 계산하는 개념을 보여준다.

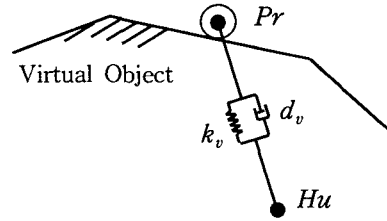


Fig. 2 Reaction force generation with the proxy concept

다음 식 (1)은 Fig. 2의 개념을 이용하여 반발력을 계산하는 식이다.

$$-F_e = (Hu - Pr) \times k_v + \frac{d(Hu - Pr)}{dt} \times d_v \quad (1)$$

여기서 $-F_e$ 는 반발력, Hu 는 조작자 작업 명령점 위치, Pr 는 탐촉구 중심점 위치, k_v 는 가상물체의 강성값, d_v 는 가상물체의 댐핑값을 의미한다.

반발력과 크기는 같지만 방향이 반대인 힘을 가상 중력항으로 가정하였을 때, 임의의 가상 질량을 갖는 탐촉구가 가상 중력항에 대하여 위치 에너지를 최소로 하는 지점으로 이동하려는 성질을 갖는다는 기본 개념을 적용하여 매 단계에서 탐촉구 위치를 계산하게 된다. 이때 접촉하고 있는 탐촉구와 가상물체 사이에 마찰 및 댐핑효과에 의한 탐촉구 이동속도에 제한이 없다면 다음 스텝에서 탐촉구는 가상 중력장에서의 최소 위치 에너지를 갖는 지점에 위치하게 될 것이다. 그러나 탐촉구와 접촉면 사이의 마찰, 댐핑효과 등을 고려한다면 탐촉구의 속도에 제한이 있어 무제한의 속도로 탐촉구가 곧바로 가상 중력장하의 최소 위치 에너지를 갖는 지점으로 이동할 수 없게 된다. 이 경우는 탐촉구 이동 속도의 제한을 고려하여, 다음 스텝의 탐촉구 위치를 계산하여야 한다. 이런 속도의 제한에 의해 탐촉구의 위치가 제한되고, 이는 탐촉구 중심점과 조작자 작업 명령점 사이의 거리 및 방위에 영향을 미친다. 이와 같은 정보는 마찰력과 반발력의 형태로 조작자에게 반향된다.

본 논문에서는 탐촉구와 가상물체 사이에서의 스틱-슬립 마찰을 표현하기 위하여 접촉물체간의 상대속도가 0에 가까워짐에 따라 어떤 작은 범위를

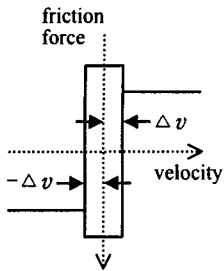


Fig. 3 Karnopp friction model

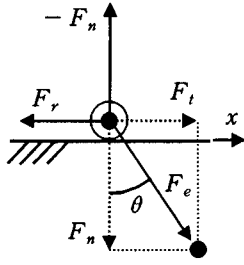


Fig. 4 Forces acting on the proxy

($\pm \Delta v$)에 포함되는 상대속도를 정확히 0으로 인식하여 마찰력을 계산하는 Fig. 3과 같은 카르노프 마찰모델⁽⁴⁾을 고려하였다. 카르노프 마찰모델은 기존의 고전적인 스틱-슬립 마찰모델에서 발생하던 속도 0 부근에서의 강한 비선형성으로 인한 수치해석적 어려움을 극복할 수 있다는 장점을 갖는다. 속도를 0으로 간주할 수 있는 속도 범위에서 카르노프 마찰력은 상대속도를 0인 상태로 유지하기 위해 필요한 힘과 움직임이 막 발생하려는 순간의 마찰력 즉, 정마찰력의 크기 중에서 작은 값으로 결정되고, 속도를 0으로 간주할 수 없는 범위에서는 동마찰력이 그 때의 카르노프 마찰력이 된다.

탐촉구의 움직임을 유발하려는 외력 성분이 그 움직임을 저지하려는 마찰력보다 큰 경우 즉, Fig. 4에서 $F_t > F_r$ 의 조건을 만족하는 경우, 탐촉구는 F_t 방향 즉, 가상 중력장에서의 위치 에너지를 최소화 하는 지점을 향하여 이동하기 시작한다. 여기서 F_e 는 탐촉구에 작용하는 외력, F_n 은 접촉면 법선방향의 외력성분, F_t 는 접촉면 접선방향의 외력성분 그리고 F_r 는 탐촉구와 가상물체 사이의 카르노프 마찰력을 의미한다.

탐촉구와 가상물체 사이의 댐핑 계수를 c_v 라 하고 탐촉구의 질량이 매우 작아서 무시할 수 있다면, 탐촉구 속도 \dot{x} 는 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = \frac{F_e - F_n + F_r}{c_v} \quad (2)$$

$F_t > F_r$ 의 조건을 만족하여 탐촉구가 움직이는 경우, 탐촉구의 운동방향은 F_t 방향이고 탐

촉구의 다음 단계의 새로운 위치(Pr_{new})는 현재 탐촉구 속도의 적분을 통하여 식 (3)과 같이 간단히 구할 수 있다.

$$Pr_{new} = \int \dot{x} dt + Pr \quad (3)$$

다음은 본 논문에서 개발한 카르노프 마찰모델과 탐촉구 개념을 포함하는 햅틱 디스플레이 모델을 단계별로 설명한다.

Step 1. 조작자 작업 명령점(Hu) 파악

1. 가상물체와 비접촉시, Step 2로 이동
2. 가상물체와 접촉시, Step 3.으로 이동

Step 2. 비접촉시 탐촉구 위치는 조작자 작업 명령점 위치와 일치($Pr = Hu$), Flag = 0 (0: 비접촉, 1: 접촉)으로 설정, Step 8.로 이동

Step 3. Flag가 0이라면 ($Pr = local\ minimum$, Flag = 1, $Pr_{old} = Pr$)로 설정. Flag가 1이라면 ($Pr_{old} = Pr$, $Pr = Pr_{new}$)로 설정

Step 4. 식 (1)을 이용한 반발력계산

Step 5. 현재 및 직전 단계의 탐촉구 위치(Pr , Pr_{old})와 샘플링타임 등을 이용하여 현재의 탐촉구의 이동 속도를 계산한다.

Step 6. 탐촉구의 속도를 0으로 간주할 수 있는 속도범위 ($\pm \Delta v$)에서 카르노프 마찰력(F_r)은 상대속도를 0인 상태로 유지하기 위한 힘과 정마찰력 중에서 작은 값으로 결정하고 그 외의 속도 구간에서는 동마찰력을 그 때의 카르노프 마찰력(F_r)으로 고려한다.

Step 7. 외력의 접선방향 분력(F_t)이 카르노프 마찰력(F_r)보다 크다면, 다음 단계에서의 탐촉구의 속도를 식 (2)와 같이 계산하고 그 속도의 적분식 (3)을 이용하여 다음 단계에서의 새로운 탐촉구의 위치를 계산한다.

만약, 외력의 접선방향 분력(F_t)이 카르노프 마찰력(F_r)보다 작다면, 다음 단계에서의 탐촉구의 속도는 0이고, 다음 단계에서의 탐촉구의 위치는 현재 탐촉구의 위치와 같다. ($Pr_{new} = Pr$)

Step 8. 작업을 계속 수행하고자 할때는 Step 1.으로 이동하고 그 이외의 경우는 작업 중지

3. 실험장치

개발된 햅틱 디스플레이 모델에 적용될 물체의 마찰특성을 파악하고, 햅틱 디스플레이 실험을 실시하기 위하여 주조작기 및 종조작기, 실시간 제어기 등으로 구성되는 힘반향 원격조작시스템을 개발하였다. Fig. 5는 개발된 주조작기와 종조작기를 보여준다. 주조작기는 DC 서보모터, 드림, 풀리, 링크구조부 등으로 구성되는 2자유도 조인트 좌표계형으로 제작하였고, 종조작기는 DC 서보모터, 선형이송장치, 힘/토크 센서 등으로 구성되는 2자유도 직각 좌표계형으로 구성하였다.

Fig. 6은 작업대상물의 마찰특성 파악 실험을 수행하기 위해 개발한 위치-힘 제어기의 개념을 보여주고 있다. 작업자에 의해 주조작기가 구동될 때, 주조작기의 조인트 각도 변화를 측정하고 정기구학 해석을 통해 주조작기 취수부 중심점의 직각좌표계상의 위치를 구한다. 주조작기 취수부 중심점과 종조작기 끝단의 위치를 비교하여 그 오차를 줄이는 방향으로 종조작기를 제어한다. 종조작기가 이와 같이 조작자의 위치제어 명령을 추종하며 운동하다가 작업대상물과 접촉하는 경우, 발생하는 접촉력은 종조작기 끝단에 장착된 힘/토크 센서에 의하여 측정된다. 측정된 힘은 힘스케일링을 통하여 주조작기 취수부 중심점의 힘으로 변환된다. 전치된 주조작기 자코비안 행렬을 이 힘에 곱하여 주조작기의 조인트 토크를 구하고 주조작기 액츄에이터들이 그 토크를 발휘하도록 제어한다. 주조작기의 액츄에이터들이 발휘하는 토크는 주조작기 기구부를 통하여 직각좌표계 상의 힘으로 조작자에게 반향된다. 본 논문에서 개발한 힘반향 원격조작 시스템의 기구적 특성상, 무부하 상태에서 주조작기의 급격한 움직임을 종조작기가 제 때 추종하지 못하여, 위치 추종에 시간 지연이 발생할 수 있다. 이런 시간 지연은 시스템의 안정성을 극단적으로 악화시키는 주된 원인이 된다. 주조작기와 종조작기간의 이런 운동 성능의 차이에서 발생하는 시스템 안정성의 저하를 방지하기 위해서 두 가지 가능한 해결 방법을 고려할 수 있다. 첫 번째 방법은, 작업공간 매핑을 통하여 운동성능이 떨어지는 조작기의 작업공간을 줄여서 위치 추종의 부하를 줄이는 방법이다. 그리고 두 번째 방법은, 운동성능이 좋은 조작기의 빠른 움직임에 제약을 가하여

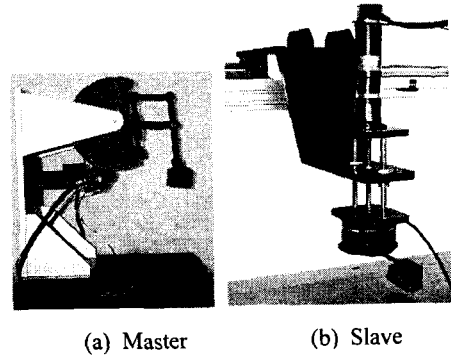


Fig. 5 Master and slave manipulator

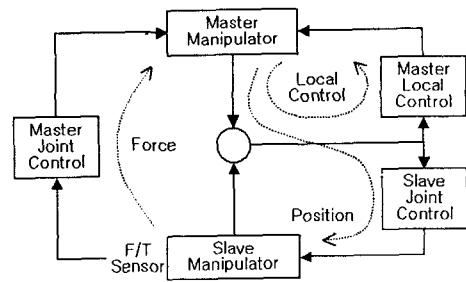


Fig. 6 Schematic diagram of the PFC(Position-Force Control) algorithm

위치 추종의 시간지연 가능성을 감소시키는 방법이다. 본 논문에서는 작업대상물 마찰특성 파악 실험과 관련된 닦기작업의 특성상, 조작자의 빠른 움직임보다는, 느리더라도 일정한 닦기작업 공간을 보장하면서 정교한 닦기 작업을 수행할 수 있는 주조작기의 움직임을 제한하는 방식을 택하였다. Fig. 6의 주조작기 지역제어기(Master Local Control) 부분이 조작기들의 운동 성능 차이에 기인한 제어 안정성의 저하를 방지하기 위한 제어 루프이다. 주조작기가 종조작기에 비해 빠른 움직임을 보여 주조작기의 취수부 중심점 위치값이 종조작기의 끝단의 위치값과 달라져 오차가 발생하게 되면 그 오차에 비례하는 반발력을 주조작기가 조작자에게 가하게 된다. 그 결과로 주조작기 움직임은 종조작기와의 위치 오차를 줄이려는 경향을 보이게 된다. 본 논문에서는 이같은 위치-힘 제어기법을 실현하기 위해 Matlab/Simulink 환경에서 제어 알고리즘과 하드웨어 인터페이스 환경을 구축하고, 이를 C-code 기반의 실행파일로 변환하여 시스템의 실시간 제어가 가능하도록 해주는 Matlab/xPC Target 툴박스를 이

용하였다. 개발된 위치-힘 제어기는 펜티엄4 1.7GHz CPU, 256M DRAM 사양의 PC에서 1KHz의 샘플율로 동작한다.

4. 마찰특성 파악실험

개발된 햅틱 디스플레이 모델은 가상물체의 마찰에 관한 정보를 포함한다. 실제 작업대상물의 마찰정보를 파악하여 햅틱 디스플레이 모델에 적용하였을 때 모델이 정확하다면 실제 작업대상물의 마찰특성과 햅틱 디스플레이로 표현되는 마찰특성이 일치할 것이다. 본 논문에서는 두 경우의 마찰특성의 유사성을 비교하여 개발된 햅틱 디스플레이 모델을 검증하기로 한다.

이를 위하여 개발된 힘반향 원격조작시스템을 이용하여 5mm 두께의 아크릴, 알루미늄, 고무판 등에 대한 마찰특성 파악실험을 수행하였다. 황동 봉을 Fig. 5(b)와 같이 장착한 종조작기의 말단효과장치가 임의의 힘으로 작업대상물을 누르면서 한 방향으로 이동할 때 종조작기 단에서 발생하는 수직 반발력과 재질의 마찰특성에 따라 발생하는 수평방향의 마찰력을 측정하였다. 3가지 재질에 대하여 각각 3회씩, 총 9회의 힘측정 실험을 실시하였다.

Fig. 7은 9회의 힘측정 실험 중에서 한 예로 아크릴판을 닦는 경우의 실험결과이다. Fig. 7(a)는 닦기 작업중에 측정된 수직 반발력(F_v : vertical reaction force)과 종조작기 말단효과장치의 진행 방향과 반대 방향으로 작용하는 수평 마찰력(F_h : horizontal friction force)의 형상을 보여주고 있다. 종조작기단의 이 힘들을 1/5로 축소하여 주조작기를 통해 조작자에게 반향하였고 조작자는 원격지 작업대상물과의 접촉을 느끼면서 마찰특성 파악실험을 실시하였다. 수직 반발력보다 작은 값으로 나타나는 수평방향 마찰력이 수직 반발력을 축소한 형상으로 추종하는 모습을 볼 수 있다. 종조작기의 말단효과장치와 작업 대상물 사이에서 0.02초 동안 수직 반발력의 평균값이 2.5N을 초과하는 경우를 접촉의 시작으로 보았고 반대로 0.02초 동안 수직 반발력의 평균이 2.5N 보다 작아지는 시점을 접촉이 끝나는 시점으로 보았다. 이 접촉 시간 동안 종조작기에서 발생하는 수직 반발력에 대한 수평방향의 마찰력 비를 조사하여 보았다. Fig. 7(b)는 본 논문에서 제시한

접촉 판단 기준에 근거한 접촉이 시작되는 순간에서부터 접촉이 끝나는 순간까지의 수직 반발력(F_v)에 대한 수평 마찰력(F_h)의 비(F_h/F_v)의 변화를 보여준다. Fig. 7(b)에서 F_h/F_v 값이 초기 접촉 과정과 접촉 후 닦기 작업이 시작되는 시점에서는 급격히 변화하였다. 그러나 어느 정도 시간이 지난 후에는 작용하는 수직 반발력의 크기가 변한다 하더라도 일정한 값으로 유지되었다. Fig. 7(b) 데이터의 평균값을 기준으로 하였을 때 처음으로 그 평균값 보다 크게 되는 시점을 정상상태가 시작되는 시점으로 간주하였다. 이 같은 기준으로 파악한 정상상태 시작시점을 Fig. 7(b)의 4초 근방에 선으로 표시하였다. 이 시점 이후의 정상상태에서 F_h/F_v 값의 평균을 구하여 재질에 따라 그 값들의 변화를 비교하였다. Fig. 7(b) 뒷부분 데이터의 분산이 커지는 이유는 접촉이 끝나가는 시점에서 수직 반발력(F_v)과 수평 마찰력(F_h)의 값들이 작아지고, 따라서 상대적으로 잡음의 영향이 크게 나타나기 때문이다. Table 1은 이런 과정을 통하여 얻어진

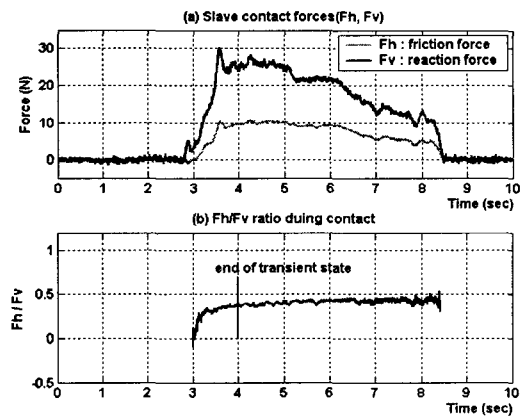


Fig. 7 The slave manipulator contact forces profile and the ratio of the two forces(F_h/F_v) during the acryl plate wiping operation

Table 1 Friction characteristic identification results (Mean of F_h/F_v)

	acryl	aluminum	rubber
#1	0.42	0.20	0.89
#2	0.39	0.18	0.86
#3	0.39	0.22	0.94

아크릴, 알루미늄, 고무판 각각에 대하여 3회씩, 총 9회 실시한 실험에서 구한 F_h/F_v 값의 평균값들을 보여준다. 재질에 따른 F_h/F_v 값의 평균값들이 실험 횟수와 큰 관계없이 일정하게 유지되었다.

5. 햅틱 디스플레이

본 논문에서 개발한 햅틱 디스플레이 모델의 성능을 평가하기 위하여 1) 반발력 및 마찰력의 영향에 의한 탐촉구 움직임 경향을 파악하기 위한 가상물체 접촉 시뮬레이션과 2) 마찰특성값의 영향을 고려한 힘반향 접촉 실험을 실시하였다.

Table 2는 실험을 위해 필요한 햅틱 디스플레이 모델의 파라미터 설정값들을 보여주고 있다. 마찰특성 파악실험의 결과인 아크릴, 알루미늄, 고무판에 대한 마찰특성값을 모델의 동마찰 계수 (f_c)로 이용하였고, 통상적으로 동마찰 계수보다 큰 값으로 표현되는 정마찰 계수(f_s)는 동마찰 계수보다 10% 큰 값으로 설정하였다. 또 카르노프 마찰모델에서 접촉물체간의 상대속도를 정확히 0으로 인식하는 작은 속도 범위 Δv 는 0.1 mm/sec로, 탐촉구가 접촉하는 가상물체의 강성값(k_v)으로는 43.2N/mm로 가정하였다.

또 탐촉구 이동 속도를 계산하기 위한 식 (2)에 필요한 가상물체 표면과 탐촉구 사이의 댐핑값 (c_v)을 본 논문에서는 0.06(N·sec/mm)으로 고려하였다. 실제 재질에 대한 댐핑값(c_v)을 정확히 측정하여 접촉모델에 적용하는 것이 바람직하겠지만, 이산적인 위치센서인 증분형 엔코더 출력을 미분하여 속도정보를 구할 때 발생하는 불연속적인 미분특성이라든지 본 논문에서 개발한 힘반향 원격조작시스템 자체의 구조적 강성의 제한 등으로 인하여 정확한 댐핑값(c_v)을 측정하는 것이 용이하지 않았다. 따라서 본 논문에서는 댐핑값을 결정할 목적으로, 카르노프 마찰모델내의 정마찰 계수(f_s)를 동마찰 계수(f_c)와 같도록 임시로 수정하고, 댐핑값(c_v)을 변화시켜 가면서 접촉모델로부터 수직 반발력과 수평 마찰력을 구하여 보았다. 이렇게 접촉모델을 이용하여 구한 수직 반발력에 대한 수평 마찰력의 비가

Table 2 Parameters of the developed haptic display model

	acryl	aluminum	rubber
f_c	0.42	0.20	0.89
f_s	0.42×1.1	0.20×1.1	0.89×1.1
c_v	0.06 (N· sec /mm)		
k_v	43.2 (N/mm)		
Δv	0.1 (mm/sec)		

원래 카르노프 마찰모델에 고려하였던 실제 실험으로부터 구한 동마찰 계수(f_c)와 같아지는 경우의 c_v 값이었던 0.06(N·sec/mm)을 댐핑값으로 선정하였다. 댐핑값을 결정하기 위하여 본 논문에서는 알루미늄 판의 마찰특성이었던 0.20을 동마찰 계수로 사용하였다.

본 논문에서 개발한 햅틱 디스플레이 모델을 이용한 가상물체 접촉 시뮬레이션을 실시하였다. 먼저 실험의 반복성 보장을 위하여 주조작기를 통한 위치제어 명령 즉, 시간에 대한 조작자 작업 명령점의 좌표 값들을 데이터 파일로 저장한 후, 매 실험마다 동일한 입력으로 사용하였다. Fig. 8은 Y축 105mm 지점에 위치한 무한 넓이의 가상평면에 대한 접촉 시뮬레이션을 실시한 결과이다. 주조작기를 움직이는 도중 탐촉구가 가상물체와 접촉하면 탐촉구는 가상물체의 표면에 구속되지만, 조작자 작업 명령점은 조작자의 작업 의지에 따라 계속 운동하여 가상물체의 내부에 그림과 같은 궤적을 그리면서 움직였다. 이때 발생하는 탐촉구 중심점과 조작자 작업 명령점 사이의 거리 및 방위정보를 이용하여 힘의 크기 및 방향을 계산하게 된다. 즉 반발력은 조작자 작업 명령점에서 시작하여 탐촉구 중심점을 향하는 방향으로 작용하며, 반발력의 크기는 두 점간의 거리를 참고로 생성된다. Fig. 8에 보이는 직선의 사선들은 매 100번째 샘플링마다 탐촉구 중심점과 조작자 작업 명령점을 잇는 선으로 반향될 힘의 크기와 방향을 쉽게 이해할 수 있도록 나타낸 것이다. 이 사선이 수평방향으로 많이 기울어질수록 마찰력 성분도 커짐을 의미한다. Fig. 8의 (a)에서 (d)로 갈수록 이 직선이 수평방향으로 더 많이 기울어지고 있음을 알 수 있다. 이는 동마찰 계수가 0(마찰이 없는 경우), 0.20(알루미늄), 0.42(아크릴), 0.89(고무)인 경우를 고려하였을 때,

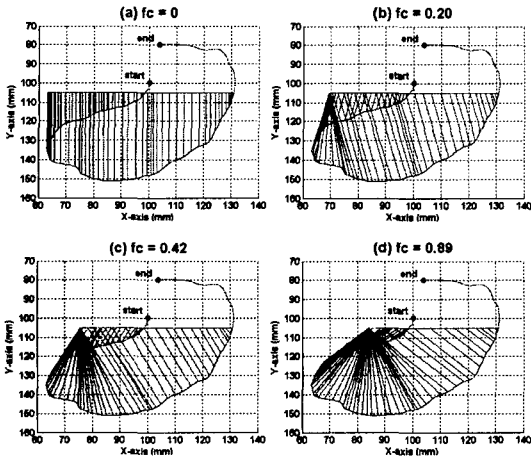


Fig. 8 Contact simulation with the developed haptic display model

마찰계수가 커질수록 마찰력도 커지고 따라서 사선도 수평방향으로 점점 더 기울어져야 한다는 사실을 고려하면, 바람직한 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 8(b)~(d)에서 조작자 작업 명령점의 X축 진행방향이 반대로 변하면 마찰력 방향도 반대로 변함을 확인할 수 있다.

다음으로 마찰의 영향을 고려한 힘반향 접촉 실험을 햅틱 디스플레이 모델이 적용된 가상환경 및 실시간 제어시스템과 주조작기를 이용하여 실시하였다. 앞서의 가상물체 접촉 시뮬레이션과는 달리, 이 실험에서는 탐촉구 중심점 위치와 조작자 작업 명령점 사이의 거리 정보를 참고하여 조작자에게 힘을 실제로 반향하면서 실험을 수행하였다. 힘을 반향하였다는 점 이외에 모든 조건은 앞선 가상물체 접촉 시뮬레이션과 동일하다. Fig. 9~11(a) 그림들에서 볼 수 있듯이 반발력이 조작자에게 반향되는 관계로, Y축 105mm 지점에 있는 가상평면의 탐색시, 조작자 작업 명령점과 탐촉구 중심점 사이의 거리가 불과 수 mm 이내로 발생하였다. Fig. 9~11(b) 그림들은 이 때의 수평 마찰력과 수직 반발력 형상을 보여주고 있는 그림이다. 그림의 데이터로부터 계산한 접촉이 일어나는 도중의 수직 반발력(F_v)에 대한 수평 마찰력(F_h)의 비(F_h/F_v)는 각각 0.22, 0.45, 0.93으로, 햅틱 디스플레이 모델에 고려되었던 실제 알루미늄(0.20), 아크릴(0.42), 고무판(0.89)의 마찰 특성 값들과 유사함을 확인할 수 있었다. 두 값들 사이에 존재하는 오차는 본 논문에서 개발한

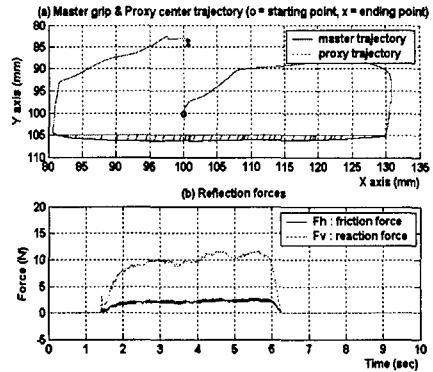


Fig. 9 H_u , P_r trajectory and reflection forces (scaled down by 1/5), $f_c = 0.20$

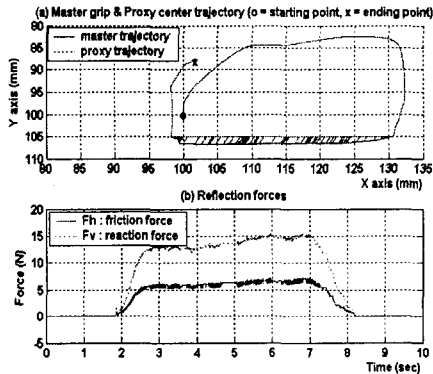


Fig. 10 H_u , P_r trajectory and reflection forces (scaled down by 1/5), $f_c = 0.42$

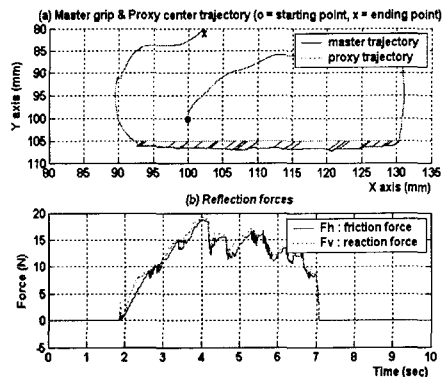


Fig. 11 H_u , P_r trajectory and reflection forces (scaled down by 1/5), $f_c = 0.89$

햅틱 디스플레이 모델의 여러 변수들 중에서 동 마찰 계수를 제외한 나머지 변수들을 실제 측정 한 값이 아닌 추정치로 가정하였기에 발생한 오

차이고 동마찰력보다 큰 정마찰력까지 고려하였기 때문에 대체적으로 값들이 약간씩 크게 나타나고 있다. 궁극적으로는 정확한 햅틱 디스플레이 모델의 개발을 위하여 별도의 실험을 통한 파라미터 파악의 과정이 필요할 것이다. 실제 작업 대상물에 대한 각종 파라미터들을 실험을 통하여 좀 더 정확히 파악하여 사용한다면 햅틱 디스플레이 모델의 정확성을 개선할 수 있을 것이다.

6. 결론

본 논문에서는 카르노프 마찰모델과 탐촉구 개념을 조합하여 마찰력 표현이 가능한 햅틱 디스플레이 모델을 개발하였다. 또한 개발된 모델을 이용한 햅틱 디스플레이를 실시하기 위하여 주조작기 및 힘/토크 센서가 장착된 종조작기, 실시간 제어시스템으로 구성되는 2자유도 힘반향 원격조작시스템을 개발하였다. 힘반향 원격조작시스템을 이용한 마찰특성 파악실험을 통하여 실제 작업대상물의 마찰특성을 파악하고, 이 값들을 햅틱 디스플레이 모델에 적용하여 개발된 모델의 효율성을 살펴보았다. 반발력, 마찰력 등의 영향에 의한 탐촉구 움직임 경향을 파악하기 위한 가상물체 접촉 시뮬레이션에서는 탐촉구가 가상물체와 접촉하는 경우 발생하는 탐촉구 중심점과 조작자 작업 명령점 사이의 거리 및 방위정보를 이용하여 조작자에게 반향할 힘정보를 생성할 수 있음을 보였다. 탐촉구 중심점과 조작자 작업명령점을 연결한 직선의 수평방향 기울기를 살펴봄으로써 가상물체의 마찰 계수가 커질수록 수평방향 기울기가 커지고 있어 조작자에게 반향할 힘의 마찰력 성분이 커지고 있음을 알 수 있었다. 또한 개발된 햅틱 디스플레이 모델과 주조작기 및 실시간 제어시스템을 이용한 가상평면에 대한 힘반향 접촉 실험에서는 햅틱 디스플레이 모델이 아크릴, 알루미늄, 고무판 등의 마찰특성을 표현하도록 하였는데, 실험에서 파악된 가상평면에 대한 마찰특성과 실제 작업대상물의 마찰특성이 유사함을 확인하여 개발된 햅틱 디스플레이 모델이 실제 작업대상물의 마찰특성을 잘 표현하고 있음을 확인할 수 있었다.

햅틱 디스플레이 모델이 포함된 가상환경을 이용하여 조작자에게 반향할 힘을 생성하는 경우와 이와 같이 마찰력을 고려함으로써 Fig. 1과 같이

물체를 미끄러짐 없이 들어올린다는가 물체를 누르면서 밀어내는 상황과 같은 햅틱 디스플레이가 가능해진다. 또한 이런 방법을 적용함으로써 가상환경 내에서 물체의 제한된 미끄러짐 등과 같은 상황의 햅틱 디스플레이도 가능할 것이다.

참고문헌

- (1) Burdea G., Gomez D., Langrana N. and Roskos E., 1995, "Virtual Reality Graphics Simulation with Force Feedback," *International Journal in Computer Simulation*, Vol. 5, pp. 287~303.
- (2) Zilles C. B. and Salisbury J. K., 1995, "A Constraint-Based God-Object Method for Haptic Display," *Proceedings IEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Human Robot Interaction, and Cooperative Robots*, Vol. 3, pp. 146~151.
- (3) Ruspini D. C., Kolarov K. and Khatib O., 1997, "The Haptic Display of Complex Graphical Environments," *Proceedings SIGGRAPH 97*, pp. 345~352.
- (4) Karnopp D., 1985, "Computer Simulation of Stick-Slip Friction in Mechanical Dynamic Systems," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 107, pp. 100~103.
- (5) Richard C., 2000, "On the Identification and Haptic Display of Friction," *Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy, The Department of Mechanical Engineering, Stanford Univ.*
- (6) Ruspini D. C., Kolarov K. and Khatib O., 1997, "Haptic Interaction in Virtual Environments," *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, Grenoble France*, pp. 128~133.
- (7) Kwon H. J., Kim K. H. and Oh C. Y., 2001, "A Study on a Virtual Object Exploration Using a Force Reflection Virtual Teleoperation System," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 25, No. 5, pp. 891~898.
- (8) Kwon H. J., Kim K. H., Park J. J. and Oh C. Y., 2002, "A Study on Workpiece Characteristic Identification in a Force Feedback Teleoperation," *International Conference on Control, Automation and Systems, ICCAS 2002*, pp. 2273~2278.