

< 논문 >

원격조작을 위한 2 차원 영상정보에 기반한 저속 변형체의 실시간 햅틱 렌더링

김정식* · 김영진** · 김 정†

(2007년 1월 24일 접수, 2007년 7월 18일 심사완료)

Real-Time Haptic Rendering of Slowly Deformable Bodies Based on Two Dimensional Visual Information for Telemanipulation

Jungsik Kim, Youngjin Kim and Jung Kim

Key Words : Haptic Rendering(햅틱 렌더링), Image Processing(영상처리), Real-Time Force Feedback(실시간 힘 피드백), Deformable Object(변형체), Cellular Manipulation(세포조작)

Abstract

Haptic rendering is a process providing force feedback during interactions between a user and a virtual object. This paper presents a real-time haptic rendering technique for deformable objects based on visual information of intervention between a tool and a real object in a remote place. A user can feel the artificial reaction force through a haptic device in real-time when a slave system exerts manipulation tasks on a deformable object. The models of the deformable object and the manipulator are created from the captured image obtained with a CCD camera and the recognition of objects is achieved using image processing techniques. The force at a rate of 1 kHz for stable haptic interaction is deduced using extrapolation of forces at a low update rate. The rendering algorithm developed was tested and validated on a test platform consisting of a one-dimensional indentation device and an off-the shelf force feedback device. This software system can be used in a cellular manipulation system providing artificial force feedback to enhance a success rate of operations.

1. 서 론

햅틱 렌더링(haptic rendering)은 햅틱장치를 통해 힘 피드백을 제공하기 위한 사용자와 가상물체 사이의 상호작용이 야기하는 힘을 계산하는 과정으로 사용자가 물체에 접촉하였을 때 접촉하는 위치, 방향, 힘 등에 따라서 어떻게 반력이 주어져야 하는지, 접촉하는 면이 부드러운지 단단한지 등을

효과적으로 계산해야 한다.^(1,2) 이는 의료용 훈련기(medical simulator)나 햅틱 페인팅 등의 가상현실 응용뿐만 아니라 원격조작(telemanipulation)환경에서 힘 피드백을 구현하기 위해 사용되고 있다.⁽³⁻⁵⁾ 원격조작환경에서는 작업중에 발생한 힘을 사용자에게 전달해 슬레이브 시스템의 작업환경을 실제와 같이 느끼게 하여 조작편의성 및 정확성을 향상시킬 수 있다.

최근 세포 조작시스템을 이용하여 난자세포질내 정자주입(intracytoplasmic sperm injection, ICSI)이나 세포내의 유전자주입 같은 단일 세포에 대한 주입 기술이 많이 이루어지고 있다. 그러나 이 시스템들은 현미경과 모니터를 통한 시각정보만을 이용하기 때문에 조작기(manipulator)를 통하여 조작할

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : jungkim@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3231 FAX : (042)869-5230

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

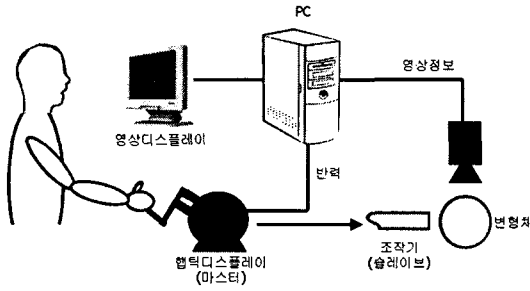


Fig.1 Conceptual diagram for manipulation system with haptic feedback based on visual information

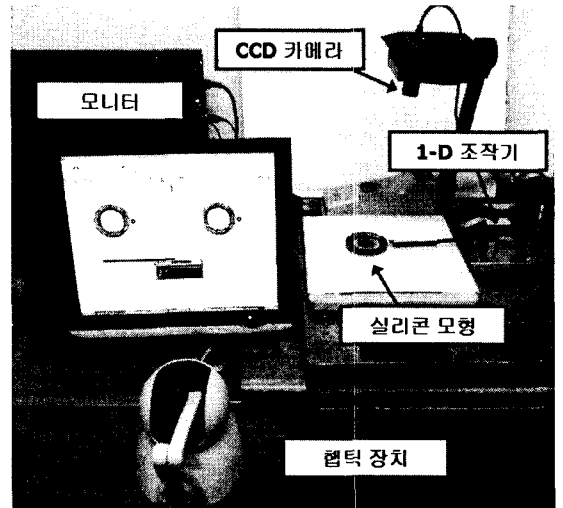


Fig. 3 Experimental setup

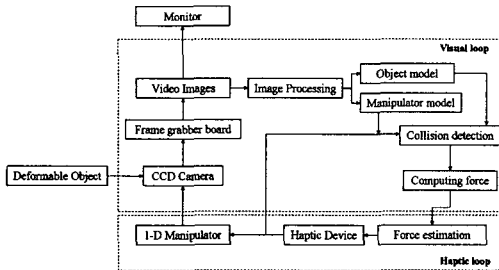


Fig. 2 Blockdiagram of the entire system

때 세포의 접촉이나 변형에 따른 힘의 방향을 시술자가 느낄 수 없어, 과도한 힘의 작용으로 인한 세포의 손상으로 낮은 수율(success rate, 약 15%)의 문제점이 있다.⁽⁶⁾ 이와 같은 문제를 해결하기 위해 햅틱장치를 통해 세포 조작시 발생하는 힘을 작업자에게 느끼게 하여 정밀하고 안정적인 작업을 구현하기 위한 연구들이 진행되고 있다.⁽⁶⁻¹⁰⁾ 미세 조작환경에서 햅틱 피드백을 제공하기 위해서는 센서를 통해 측정된 힘을 증폭시키는 방법이 있으나 센서 부작으로 인한 시스템의 복잡성 증가, 낮은 S/N 비, 실시간 신호처리 등의 문제들이 있다.

본 논문은 힘 피드백을 제공하는 미세 세포조작 시스템 연구의 일환으로 변형체의 영상정보를 이용한 실시간 햅틱 렌더링기술에 관해 제안한다. 이는 물체의 변형에 대해 카메라를 통한 실시간 영상정보로부터 윤곽검출 등의 영상처리 과정을 통해 변형체의 위치 및 형상정보를 얻은 후, 그에 따라 구현된 변형체모델을 기반으로 햅틱 렌더링을 재현함으로써 이루어진다(Fig. 1).

2. 전체 시스템 구성

햅틱렌더링 알고리즘 개발을 위하여 1 자유도 마스터-슬레이브 시스템을 제작하였다. 시스템은 영상처리(image processing), 충돌검사 및 반력계산을 다루는 부분(visual loop)과, 실시간 힘 피드백 구현부(haptic loop)로 구성되며(Fig. 2), 실험시스템은 Fig. 3 와 같다. 조작기는 DC 모터(Maxon RE25 10W DC motor)와 제어기(Sensoray Model626 board)를 이용하여 개발되었고,⁽¹¹⁾ 모터의 회전운동이 와이어를 통해 단축운동으로 바뀌며 약 50 mm의 작업공간(work space)을 가진다. 변형하는 물체와 조작기의 영상정보는 CCD 카메라(HR70C, SONY)와 그와 연결된 프레임 그래버 보드(frame grabber board, Meteor II MC, Matrox)를 통하여 컴퓨터(Pentium4 dual core 2.0, ATI Radeon X550)로 전송되고, 변형체와 조작기의 형상과 위치정보를 제공하기 위하여 영상처리과정을 거친다. 영상처리는 OpenCV Library⁽¹²⁾를 사용하여 구현하였고, 힘 피드백을 구현하는 햅틱장치로 6 자유도의 위치 입력과 3 자유도의 힘 출력이 가능한 SenSable사의 PHANTom Omni를 사용하였다. 햅틱 렌더링을 위한 변형체는 약 8cm의 지름을 갖는 원형의 형태로써 실리콘(TSE3062, GE)을 사용하여 제작하였다.

3. 영상처리

실시간 2 차원 영상처리를 통해 변형체의 최대 변형량 및 조작기의 위치를 얻는다. 영상처리 과정은 조작기 위치 추출, 변형체 이외의 노이즈 및 조작기 제거, 변형체 형상 추출의 단계로 나뉜다 (Fig. 4). 변형체의 변형정보를 얻기 위하여 액티브 컨투어(active contour)를 사용하고, 조작기의 위치를 얻기 위하여 상관계수를 이용한 템플릿 매칭(template matching) 방법을 사용한다. 또한 변형체 윤곽 검출의 정확성을 높이기 위하여 주변 노이즈 및 조작기는 영상에서 제거되고 변형체에 대해서만 액티브 컨투어 알고리즘을 적용한다.

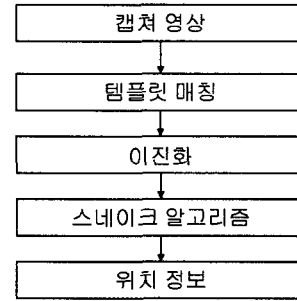
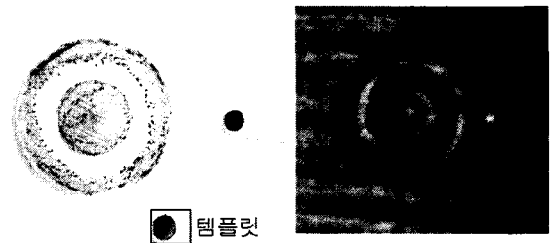


Fig. 4 Image processing

3.1 위치정보추출

조작기의 위치정보를 얻기 위하여 템플릿 매칭 방법⁽¹³⁾을 사용한다. Fig. 5(a)에서처럼 조작기에 대한 템플릿(template)을 미리 구현해 놓고 입력되는 영상의 각각의 프레임 내에서 템플릿과 가장 유사성이 높은 부분을 찾아내 조작기의 위치를 얻는다. 조작기의 경우 물체의 변형에 독립적으로 항상 같은 형상을 가지며, 회전 없이 위치만 변하기 때문에 적합하게 사용될 수 있다. 다음은 $w \times h$ 크기의 템플릿과 전체영상에서의 픽셀간에 상관계수를 계산하기 위한 식을 나타낸다.



(a) original image (b) correlation image

Fig. 5 Template matching method

$$C(x, y) = \frac{\sum_{y'}^{h-1} \sum_{x'}^{w-1} T(x', y') I(x+x', y+y')}{\sqrt{\sum_{y'}^{h-1} \sum_{x'}^{w-1} T(x', y')^2 \sum_{y'}^{h-1} \sum_{x'}^{w-1} I(x+x', y+y')^2}} \quad (1)$$

여기서 $I(x, y)$ 는 (x, y) 에서의 영상 픽셀값, $T(x, y)$ 는 (x, y) 에서의 템플릿의 픽셀값을 의미하며 상관계수가 최대치를 갖는 지점이 매칭 위치이고, Fig. 5(b)에서 가장 밝은 부분이 이를 나타낸다. 또한 계산시간단축을 위해 조작기 전체를 템플릿으로 저장하지 않고, 조작기의 끝단에 마커를 부착하여 템플릿의 크기를 줄인 후 조작기의 위치정보를 얻는다.

변형체의 경계(boundary)를 인식하기 위해 액티브 컨투어 모델인 스네이크 알고리즘(snakes algorithm)을 사용한다. 스네이크 알고리즘은 Kass 등⁽¹⁴⁾이

처음 제안한, 폐곡선을 사용하여 물체의 윤곽을 찾아내는 방법이다. 폐곡선을 구성하는 노드(node) 혹은 컨트롤 포인트(control point) 주변 픽셀정보로부터 에너지가 계산되며, 최소 에너지를 갖는 위치에 컨트롤 포인트가 놓여 물체의 윤곽을 얻는다. 본 논문에서는 속도와 안정성이 개선된 스네이크 알고리즘인 greedy algorithm⁽¹⁵⁾을 사용한다. 이는 최소 에너지를 가지는 점 근처의 픽셀 역시 대부분 작은 에너지의 값을 가진다는 점을 이용하여, Fig. 6와 같이 컨트롤 포인트 주변의 픽셀에 대한 에너지를 컨트롤 포인트에서의 에너지와 비교하여 낮은 값을 갖는 위치에 컨트롤 포인트를 옮긴다. 컨투어 호의 길이 s 를 파라미터로서 $V(s) = (x(s), y(s))$ 에 의해 표현되는 폐곡선 에너지에 관한 식은 다음과 같다.

$$E_{snake} = \int (\alpha(s)E_{cont} + \beta(s)E_{curv} + \gamma(s)E_{image}) ds \quad (2)$$

$$E_{continuity} = \left| \vec{d} - |V_i - V_{i-1}| \right| \quad (3)$$

$$E_{curvature} = \left| V_{i-1} - 2V_i + V_{i+1} \right|^2 \quad (4)$$

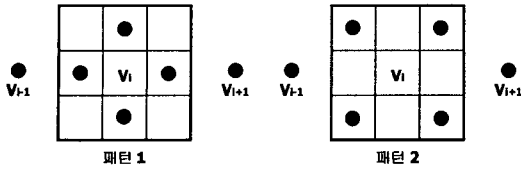


Fig. 6 Greedy algorithm

$$E_{image} = \frac{min - mag}{max - min} \quad (5)$$

스네이크 알고리즘은 각 컨트롤포인트의 초기 위치를 직접 지정해줘야 하며, 폐곡선이 물체를 감싸도록 위치를 결정한다. 에너지식은 연속에너지(E_{cont})와 곡률에너지(E_{curv}), 영상에너지(E_{image})의 합으로서, 연속에너지는 컨트롤 포인트간의 거리에 관계되며 폐곡선의 형상이 줄어드는 것에 영향을 미친다. 인접 컨트롤 포인트간의 평균 거리 \bar{d} 와 $i, i+1$ 번째 컨트롤 포인트 사이의 거리차이를 이용하여 컨트롤 포인트들이 한곳에 수렴하게 되는 현상을 막으며 연속에너지를 최소화 한다. 새로운 \bar{d} 값은 각 컨트롤 포인트에 대한 에너지 계산이 끝난 후에 계산된다. 곡률에너지는 식 (4)와 같이 계산되며 폐곡선의 곡률을 결정한다. 영상에너지는 컨트롤 포인트 주변 픽셀의 그레이레벨(gray level)에 의해 결정되며, mag 는 컨트롤 포인트에서의 픽셀값, min, max 는 각각 픽셀 주변부의 최소, 최대 픽셀값이다. 영상 에너지가 최소화되기 위해 컨트롤 포인트에 작용하는 힘의 방향은 그레이레벨의 구배(gradient)방향과 같다.

α, β, γ 계수는 각각 전체 에너지에서 각 에너지 항들의 가중치를 의미하며, 변형체에 대한 정확한 형상정보를 얻기 위하여 각 계수의 값을 결정해야 한다. 세 계수의 크기는 실험적으로 결정하며 계수간의 상대적 크기가 에너지식에 영향을 준다. 스네이크 알고리즘을 사용한 결과는 Fig. 7과 같다.

일반적으로 영상 내에는 스네이크 알고리즘을 사용하여 검출하기 원하는 물체 이외에 조작기를 포함한 노이즈들이 존재하여, 이러한 요소들에 의해 발생한 픽셀 에너지가 스네이크 알고리즘에 영향을 미친다. 이를 위해 템플릿 매칭 수행시 조작

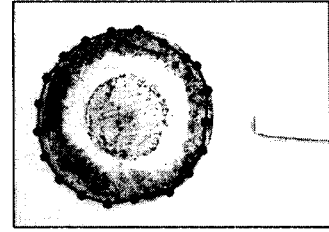


Fig. 7 Snakes contour

기 마커의 픽셀이 영상으로부터 추출되며, 물체 주변의 노이즈를 제거하기 위해 이진화(threshold-based segmentation)를 거친 후에 스네이크 알고리즘을 수행한다.

템플릿 매칭은 조작기 이미지 제거를 통해 스네이크 알고리즘의 정확성을 높이지만, 매 프레임마다 전체 이미지에 대하여 템플릿이 탐색되므로 긴 계산 시간이 소요되어 실시간으로 정보를 얻는데 문제를 야기한다. 본 연구에서는 매 프레임마다 템플릿 매칭을 수행하는 것이 아닌, 최초 한 프레임에서만 사용하는 방법으로 최적화를 하였다. 이는 조작기 위치에 대한 초기값을 제공하여 햅틱장치의 좌표를 영상좌표로 변환하고 조작 동안에는 햅틱장치의 좌표를 통해 조작기의 위치를 얻는다. 이를 통해 매 프레임마다 템플릿 매칭을 적용한 경우의 약 7 Hz 의 매우 낮은 프레임속도(visual loop)에서 약 40 Hz 로 향상된 결과를 얻을 수 있다.

3.2 충돌검사

모델간의 충돌위치와 시점의 결정은 매우 중요한 요소이다. 변형체에 대한 조작을 하기 전 혹은 조작이 끝난 후의 상태에서는 반력계산이나 변형에 대한 고려를 할 필요가 없으므로, 조작기와 물체간의 충돌에 대한 정보를 제공하여 충돌이 일어난 후에만 반력을 제공한다. 실제 환경에서 조작기와 변형체간의 접촉하는 순간을 정확히 검출하기 위해, 앞의 영상처리과정으로부터 얻어진 위치 정보를 사용하여 충돌검사(collision detection)를 실행한다.

변형체 모델은 스네이크 알고리즘에서 각 컨트롤 포인트들의 위치값으로부터 변형체의 형상을 근사하는 식 (6)의 2 차 곡선으로 접합(fitting)하고, 최소자승법(least square method)을 통해 A 부터 E 까지 각 계수값을 얻는다.

$$Ax^2 + By^2 + Cx + Dy + E = 0 \quad (6)$$

조작기 끝단의 좌표가 타원 모델 내에 위치하게 되면 충돌을 알리게 되며 반력계산이 수행된다.

4. 햅틱 렌더링

4.1 반력 계산

2 차원으로 모델링 되어있는 물체와 조작기 끝단의 충돌이 일어나면 반력이 계산되며, 작업자는 햅틱장치를 통해 물체를 만지거나 조작하고 있음을 느낄 수 있다. 영상으로부터 얻은 정보를 통해 구현된 변형체에 대한 모델은 변형체에 대한 내부 데이터는 가지지 않고 컨투어를 따르는 경계 데이터만을 가지므로, 반력은 변형체의 경계로부터 조작기가 삽입된 깊이에 비례하여 계산한다.

$$\vec{F} = -k\vec{x} \quad (7)$$

여기서 \vec{x} 는 삽입깊이, k 는 탄성계수(elastic modulus)이며, 최대 변형시 햅틱장치(PHANToM Omni)의 최대 힘 피드백값(약 3.3 N)을 넘지 않는 범위 내에서 결정되었다(0.2 N/mm). 이와 같이 계산된 힘은 실제 같은 햅틱 피드백을 제공하지는 못하나 실제 물성치 기반이 아닌 영상으로부터의 모델링이 이루어지므로 물체와의 상호작용에 대한 정보를 제공하기에는 충분히 사용될 수 있다. 조작기를 통한 찌르기 작업은 단축 선형운동이므로 힘 벡터의 방향은 조작기의 삽입 방향에 따라 간단하게 정의될 수 있으며, 조작자는 1-D 방향으로 반력을 느낄 수 있다.

그러나 햅틱장치는 안정적인 실시간 힘 피드백을 위하여 약 1 kHz 의 주파수로 갱신되어야 하나, CCD 카메라를 통한 제한된 전송율과 영상처리를 위한 계산시간으로 인한 낮은 데이터 처리속도로는 높은 갱신율(update rate)로 힘을 계산할 수 없다. 이는 작업자가 힘을 불연속적으로 느끼거나 큰 진동을 느끼게 하므로 실시간 햅틱 렌더링의 구현시 고려할 사항이다.

본 논문에서는 영상부분(visual loop)의 낮은 전송율로부터 높은 주파수로 힘 피드백을 구현하기 위하여, 보간법(interpolation)⁽¹⁶⁾과 보외법(extrapolation)⁽¹⁷⁾을 적용하여 불연속적으로 계산된 힘들 사이의 힘값들을 추정하고 결과를 비교하였다.

4.2 Force interpolation

영상처리에서 소요되는 시간을 개선하더라도 최대 전송율은 CCD 카메라의 전송율로 제한되므로, 낮은 속도의 영상루프(visual loop)로부터 빠른속도로 힘 피드백을 구현하는 방법을 고려해야 한다. 새로운 값을 산출하기 위한 방법으로 두 값 사이의 중간값들을 직선으로 근사하는 선형보간법이 적용된다. 그러나 임의의 시간 t ($t_n \leq t < t_{n+1}$)에서의 힘을 얻기 위해서는 F_{n+1} 값을 알아야 하나 현재시간에서 알 수 없는 값이므로, F_{n-1} 과 F_n 값을 이용해 중간값들을 산출한 후에 $t_n - t_{n-1}$ 만큼 시간 지연(time delay)을 주어 높은 주파수의 실시간 힘 피드백을 구현한다.

$$\vec{F} = \frac{\vec{F}_n - \vec{F}_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}(t - t_n) + \vec{F}_{n-1} \quad (t_n \leq t < t_{n+1}) \quad (8)$$

그러나 이 방법은 시간지연의 크기가 커지는 경우 힘 피드백의 충실도(fidelity)에 문제가 생긴다.

4.3 Force extrapolation

모델에 대한 반력 계산시 선형탄성을 갖는 정적 모델로 근사하였으므로 힘값은 위치의 영향을 많이 받는다. 햅틱장치의 좌표계에서 영상좌표계로 좌표변환을 통하여 조작기 끝단의 위치정보를 실시간으로 알 수 있으므로 시간에 대한 추정이 아닌 위치에 대해 힘 값을 추정할 수 있다. 계산된 알려진 두 힘값 F_{n-1} 과 F_n 사이의 중간값들을 보외법을 사용하여 현재위치 P 에서의 힘을 산출한다.

$$\vec{F} = \frac{\vec{F}_n - \vec{F}_{n-1}}{\|P_n - P_{n-1}\|} \|P - P_{n-1}\| + \vec{F}_{n-1} \quad (t_n \leq t < t_{n+1}) \quad (9)$$

보간법과 보외법을 시스템에 적용하기 전에 실험을 통하여 그 결과를 평가하였다. 컴퓨터에 미리 구현된 가상의 변형체에 대해 식 (7)로 표현되는 스프링 모델을 사용하여 반력을 계산하였으며 1kHz 로 계산되는 힘값과 10 Hz 로 샘플링된 힘값에 대해 보간법과 보외법을 사용하여 추정된 중간값들을 비교하였다. 실험중 조작기의 평균조작속도는 약 21mm/s 이다. Fig. 8 의 결과를 보면 Original 은 1 kHz 로 계산된 힘 값을 의미하며,

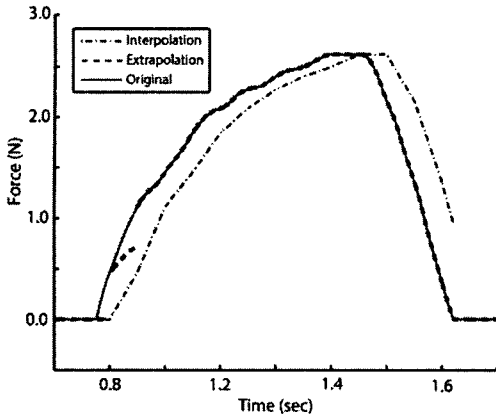


Fig. 8 Force interpolation and extrapolation

보간법의 경우 낮은 샘플링 주파수로 인하여 시간 지연 값이 커져, 실제 반력값과 근사한 값은 나타내지만 충실도(fidelity)가 떨어지는 결과가 나온 것을 볼 수 있으며, 보외법의 경우는 실제값과 거의 일치하는 결과를 보여 더 좋은 성능을 보인다. 실제 미세조작시스템의 경우 외란의 가능성이 없는 저속의 단순한 움직임을 가지는 조작기가 이용되므로 힘의 보외법을 적용하여 실시간 햅틱 렌더링을 구현할 수 있다.

5. 결론

본 논문은 힘 피드백을 제공하는 미세세포조작시스템을 위한 햅틱 렌더링 알고리즘의 구현을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 물체의 변형에 대한 정보를 영상으로부터 얻어 모델링하고 햅틱 렌더링을 구현하는 과정에 대해 서술하였다. 영상으로부터의 모델링을 위해 스네이크 컨투어 및 템플릿 매칭의 영상처리 알고리즘을 이용하였고, 실시간 힘 피드백을 구현하기 위하여 높은 주파수로 힘 정보를 전송하였다.

영상정보를 이용하여 힘 값을 계산하였으므로 미세한 단위의 움직임을 요하는 실제 세포조작에서의 응용시, 반향하기 어려운 마이크로 스케일의 반력을 원격조작자에게 적절히 느끼게 하여 거시적인 작업공간(workspace)에서 신뢰성있는 작업을 할 수 있으며, 힘 측정을 위한 별도의 측정장치들의 설계를 고려할 필요 없이 이미 사용되고 있는 영상장비들을 이용할 수 있는 장점이 있다. 또한 시스템에 사용된 로봇팔(robot arm)형식의 조작기

(master)는 기존의 다이얼식이나 조이스틱형태의 조작기보다 직관적인 조작을 제공할 것으로 기대된다.

그러나 본 시스템이 실제 미세조작시스템에 사용되기에는 해결해야 할 문제들이 남아있다. 물체와 조작기가 같은 평면내에 정렬되어 있다는 전제로 2 차원 시스템을 구성하였으며, 실제 작업환경에 대한 영상에는 관심대상 이외의 노이즈 요인이 다수 존재하므로 더 강인한 영상처리 알고리즘을 필요로 한다. 이와 같은 문제들을 해결하고 실제 시스템에 햅틱 렌더링 알고리즘을 적용하면 시술자에게 조작의 편의성을 제공하여 보다 높은 수율의 세포조작을 할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 과학기술선도기초연구 과제 사업의 일환으로 수행하였음. [햅틱인터페이스를 포함한 세포조작기]

참고문헌

- (1) Salisbury, K., Brocki, D., Massiet, T., Swarupf, N. and Zillest, C., 1995, "Haptic Rendering: Programming: Touch Interaction with Virtual Objects," *Proc. of Symp. Interactive 3D Graphics*, ACM Press, pp. 123~130.
- (2) Kyung, K. U. and Park, J. S., 2006, "The State of the Art and R&D Perceptives on Haptics," *Electronics and Telecommunications Trends*, ETRI, Vol. 21, No.5, pp.93~108.
- (3) Kim, L., Sukhatme, G. S. and Desbrun, M., 2004, "A Haptic-Rendering Technique Based on Hybrid Surface Representation," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 24, pp. 66~75.
- (4) Basdogan, C., De, S., Kim, J., Muniyandi, M., Kim, H. and Srinivasan, M. A., 2004, "Haptics in Minimally Invasive Surgical Simulation and Training," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 24, pp. 56~64.
- (5) Park, J. and Khatib, O., 2006, "A Haptic Teleoperation Approach Based on Contact Force Control," *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 25, pp. 575~591.
- (6) Pillarisetti, A., Anjum, W., Desai, J. P., Friedman, G. and Brooks, A. D., 2005, "Force Feedback Interface for Cell Injection," *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'05)*, pp. 391~400.

- (7) Ammi, M., Ferreira, A., 2006, "Biological Cell Injection Visual and Haptic Interface," *Advanced Robotics*, Vol. 20, No.3, pp. 283~304.
- (8) Shim, J. H., Cho, S. Y., Cha, D. H., 2004, "Vision-Guided Micromanipulation System for Biomedical Application," *Proc. of SPIE*, Vol. 5604, pp. 98~107.
- (9) Kim, D. H., Kim, B., Yun, S., Kang, H., 2003, "Cellular Force Sensing for Force Feedback-Based Biological Cell Injection," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 27, No. 12, pp. 2079~2084.
- (10) Sun, Y., Nelson, B. J., 2002, "Biological Cell Injection Using an Autonomous MicroRobotic System," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 21, No. 10~11, pp. 861~868.
- (11) Lee, M. H., 2002, "Nonlinear Virtual Coupling for Stable Haptic Interface," KAIST, Master Thesis.
- (12) <http://www.intel.com/technology/computing/opencv>
- (13) Lewis, J. P., 1995, "Fast Normalized Cross-correlation," *Vision Interface*, pp 120~123.
- (14) Kass, M., Witkin, A. and Terzopoulos, D., 1988, "Snakes: Active Contour Models," *International Journal of Computer Vision*, Vol. 1, No. 4, pp. 321-331.
- (15) Williams, D. J. and Shah, M., 1992, "A Fast Algorithm for Active Contours and Curvature Estimation," *CVGIP: Image Understanding*, Vol. 55, No. 1, pp. 14~26.
- (16) Zhuang, Y. and Canny, J., 2000, "Haptic Interaction with Global Deformation," *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, Vol. 3, pp. 2428~2433.
- (17) Picinbono, G., Lombardo, J. C., Delingette, H. and Ayache, N., 2002, "Improving Realism of a Surgery Simulator: Linear Anisotropic Elasticity, Complex Interactions and Force Extrapolation," *Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol. 13, pp. 147~167.