한국 *CAD/CAM* 학회 논문집
제 *4* 권 제 *1* 호 *1999*년 *3*월 *pp. 12-18*

학술논문

반발력을 생성하는 햅틱장비를 이용한 가상의 점토 모델링에 관한 연구

채 영 호*

On the Virtual Clay Modeling Using a Force Reflecting Haptic Manipulator

Young-Ho Chai*

ABSTRACT

A deformable Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS) based volume is programmed for the force reflecting exoskeleton haptic device. In this work, a direct free form deformation(DFFD) technique is applied for the realistic manipulation. In order to implement the real-time deformation, a nodal mapping technique is used to connect points on the virtual object with the NURBS volume. This geometric modeling technique is ideally incorporated with the force reflecting haptic device as a virtual interface. The results in this work introduce details for the complete set-up for the realistic virtual clay modeling task with force feedback. The force reflecting exoskeleton haptic manipulator, coupled with a supporting PUMA 560 manipulator and the virtual clay model are integrated with the graphics display, and results show that the force feedback from the realistic physically based virtual environment can greatly enhance the sense of immersion.

Key words : Haptic Interfaces, Virtual Reality, Synthetic Environments, Volume Visualization, Force Feedback, Free-Form Deformation, NURBS

1. 서 론

컴퓨터가 만들어낸 영상이나 연속된 화면은 대화형 설계나 시뮬레이션, 생산 뿐 아니라 의학분야 특히 수술응용분야에 널리 이용되고 있다. 가상환경의 시뮬레이션에서의 최근 특별한 관심은 컴퓨터에 의한 환경과 사용자가 좀더 정교하게 실제상황과 같은 상호작용을 하기 위한 환경으로부터의 힘의 피드백이다. 가상의 물체를 만지고 느끼는 감각은 가상환경과 사실적인 상호작용을 위해서 필수적인 요소이고 현재 가상현실 인터페이스를 위한 햅틱요소에 관한 많은 연구가 진행되고 있으며 이들 대부분이 사용자가 안전하고 안정적으로 상호작용을 할 수 있게 해주는 새로운 햅틱장비의 개발에 주안점이 두어지고 있다[1-10].

촉각요소를 포함한 가상현실 시뮬레이션의 또 다른 중요한 요소는 햅틱장비를 위한 힘의 생성이다. 햅틱장비의 구동은 전적으로 실시간 제어에 의한 컴퓨터의 입력신호에 의존하고 있으므로 힘을 계산하는데 근본이되는 가상물체의 실제적인 모델링이 무엇보다도 중요하다. 정확한 모델에 의한 적절한 힘의 계산이 없이는 아무리 정교한 촉각장비도 무용지물이 될 것이다[1].

일반적으로 모든 물체의 표면은 변형이 가능하므로 가상의 물체의 경우에도 사용자에 의해 잡혀질 경우 적용된 힘에 의해 조금이지만 그 표면의 변형을 예상해야한다. 변형이 잘 되지 않는 딱딱한 표면의 시뮬레이션은 상대적으로 어렵다고 할 수 있는데 햅틱장비의 고유의 에너지 소실율과 컴퓨터 인터페이스의 샘플링 간격의 조합에 근거한 한계를 가지고 있다[3-10]. 일상생활에서 접하는 환경의 대부분이 이와 같은 환경이고 구현하기가 쉽지 않기 때문에 딱

*정회원, 중앙대학교 기계설계학과

딱한 1차원 벽의 구현이 햅틱장비의 제어와 안정성을 확인하는 전형적인 실험 예로 사용되어 왔다[3-9].

가상의 물체가 쉽게 변형이 된다고 하면 딱딱한 표면의 시뮬레이션에 비해 제어는 쉬울 수 있지만 표면의 변화를 허용하기 위해 좀더 복잡한 표면의 모델이 필요하게 된다. 매개변수를 이용한 표면의 모델은 그래픽 표현을 위해서는 유용하게 사용될 수 있지만 표면과의 상호작용측면에서는 어려움을 더해준다. 햅틱장비와의 결합을 생각하지 않고 동적인 변형만을 고려한 표면의 일반적인 모델[11-14]이나 여러 가지 입력도구를 이용한 표면의 변형 등이 연구되어 왔다[6]. 본 논문에서는 체적의 자유형태변형과 더불어 햅틱장비와의 결합에 필요한 반발력의 계산모델을 포함한 가상의 점토 모델링을 구현하였다.

2. NURBS를 이용한 체적의 직접적인 자유형태변환

최근 형상모델링의 추세는 표면모델링 보다는 솔리드모델링을 중요시하고 일반적인 형상기본요소에 자유형태의 물체를 포함하고 그래픽에 물리적인 법칙과 원리를 적용할 뿐만 아니라 상호작용 능력까지를 고려한다[11]. 매개변수를 이용한 부품모델링은 몇 개의 매개변수만을 이용한 일련의 의미 있는 데이터를 이용하여 전체구조를 설명할 수 있고 NURBS는 코닉 섹션(Conic Sections)과 같은 분석적 형태의 모델뿐 아니라 자동차 몸체나 선박의 헐(hull)과 같은 자유곡면 형태까지를 표현하는 일관된 형태의 수학적 근간을 제공한다. 이러한 유연성과 다양성 덕택에 NURBS는 CAD/CAM과 컴퓨터 그래픽스부문에서 광범위하게 이용되고 있다. 각 방향의 자유도 p, q, r과 매개변수값 u, v, w를 갖는 3차원 NURBS 체적은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S(u,v,w)=\frac{\sum_{i=1}^{nu}\sum_{j=1}^{nv}\sum_{k=1}^{nw}N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)N_{k,r}(w)W_{i,j,k}P_{i,j,k}}{\sum_{i=1}^{nu}\sum_{j=1}^{nv}\sum_{k=1}^{nw}N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)N_{k,r}(w)W_{i,j,k}} \quad (1)$$

위 공식은 아래의 일반적인 식으로 간략화 될 수 있다.

$$S=\frac{(N\otimes W)P^T}{NW^T} \quad (2)$$

여기서 N은 각 매개변수 방향으로 일정하지 않고 비 주기적인 절점벡터(Knot Vector)로 정의된 기저함수의 텐서곱(Tensor Product)이고, 기호 ⊗는 n 차원 벡터 각 원소끼리의 스칼라 곱이다.

$$A\otimes B=[A_xB_x],\ x\in[1,n] \quad (3)$$

그러므로, N⊗W=

$$[N_{1,1,1}W_{1,1,1}, N_{1,1,2}W_{1,1,2}, \cdots, N_{nu,nv,nw}W_{nu,nv,nw}] \quad (4)$$

$N_{i,j,k}$로 표시된 N 벡터의 각 원소는 u, v, w의 매개변수 값을 갖는 기저함수의 스칼라 곱이다. 따라서,

$$N_{i,j,k}=N_{i,p}(u)\,N_{j,q}(v)\,N_{k,r}(w) \quad (5)$$

P는 제어점의 열 벡터이고 W는 제어점 가중치의 열 벡터이다. NURBS 체적의 경우 설계자는 먼저 직교좌표계 에서 제어점의 좌표위치와 절점벡터를 정의하면 식 (2)의 블랜딩함수를 이용한 매개변수공간에서 직교좌표계로의 사상을 통하여 정의하게된다. NURBS를 이용한 체적설계는 간단하게 정의될 수 있어 알고리즘을 빠르게 구현할 수 있고 수치적으로도 안정되어있다. 또한 일반적인 형상변환인 평행이동, 회전 그리고 평행투영, 원근투영등에 독립적으로 정의될 수 있다.

컴퓨터를 근간으로 하는 형상모델링이 시작된 이후로 설계자들은 점토를 이용하여 조각을 하는 과정을 시뮬레이션 하기 위한 점토의 모델링과 변형방법에 대해 연구하여왔다. 자유형태변형(Free-Form Deformation)[15]은 CAD/CAM이나 그래픽응용분야에서 아주 강력한 설계도구이며 사용자는 물체를 아주 유연한 가상의 솔리드와 개념적으로 일치시킨 후 이의 변형을 통하여 원하는 물체를 만드는 과정을 의미한다. 일반적으로 자유형태변형을 구현하는데 다음과 같은 4단계로 나눌 수 있다[7].

1. 매개변수를 이용한 솔리드를 구성한다.
2. 대상물체를 위의 솔리드에 개념적으로 일치시킨다.
3. 솔리드를 변형시킨다.
4. 이 솔리드변형에 비례하는 대상물체의 변형을 평가한다.

임의의 체적을 정의한 후 이 체적 내에서 국소좌표를 계산하는 것은 보다 일반적인 자유형태변형 이라 한다[4,5]. NURBS를 기반으로 하는 자유형태변형은 이전의 구현에서 얻을 수 없었던 유연성과 용이함을 제공하는 대신 복잡한 변형을 동반하는 물체를 제어하기 힘든 면이 있다[8]. 이는 물체의 표면을 변형시키기 위해서는 이를 정의하고 있는 제어점의 변

화를 필요로 하기 때문이다. 실제 설계에서 제어점을 움직여서 물체의 변형을 유도하기보다는 모델의 표면을 직접적으로 변형할 수 있게 하는 것이 설계자로 하여금 변형되는 표면을 정확하게 조절할 수 있게 하므로 보다 직관적이고 바람직하다고 할 수 있다. 또한 직접 모델을 조작하기 때문에 상호작용 측면에서도 쉽게 응용이 가능하다. 사용자는 변형하고자하는 물체의 표면을 직접 변형시키고 이를 정의하는 제어점은 자동적으로 역산된다. 식 (2)에서 데이터 점의 변위 ΔS는 제어점의 변위인 ΔP에 관한 함수로 나타낼 수 있다.

$$\Delta S = \frac{(N \otimes W)}{NW^T}(\Delta P)^T = B(\Delta P)^T \tag{6}$$

B가 직교행열이 아니기 때문에 위 식을 만족하는 제어점의 변위는 얼마든지 구할 수 있지만 최소 자승법의 논리를 이용하여 제어점의 변위를 최소화하는 하나의 해를 생각할 수 있다. 무어-펜로우스 의 역행열을 이용해 위 식을 풀면

$$\Delta P = (B^T B)^{-1} B^T \Delta S \tag{7}$$

이 식에서$(B^T B)$는 특이해 혹은 수치적으로 특이해에 근접할 수 있다. 이 경우 가우시안(Gaussian) 소거나 LU 재배치는 만족할만한 결과를 얻을 수 없으므로 문제를 진단하고 풀 수 있는 특이값 재배치(SVD)를 통해서 해를 구한다[13]. 본 논문의 직접적인 자유형태변환은 위의 식을 이용해 NURBS 체적 위의 임의의 점을 새로운 위치로 직접 변환할 수 있게끔 하였다. Fig. 1은 NURBS 체적의 직접적인 자유형태변형의 예를 보여준다.

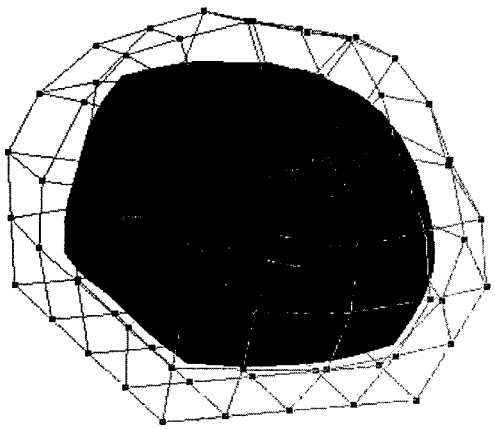

Fig. 1. Direct free-form deformation.

3. 가상의 점토 모델링

가상의 점토를 변형시키기 위해서는 변형의 원인이자 기준이 되는 손과의 접촉을 감지하는 것과 접촉에 따른 점토의 적절한 반응을 나타내는 프로그램이 필요하다. 일반적으로 충돌감지는 가상의 환경하에서 물체끼리의 비현실적인 중복을 피하기 위해서 사용되어져왔다. 본 논문에서는 점토의 변형뿐 아니라 변형에 필요한 힘을 계산하여 이를 햅틱장비를 이용하여 구현함으로써 사실적인 점토모델링을 실현하였다. 점토표면의 위치와 변형에 따른 반발력의 상관관계에 의해 사용자는 가상의 점토를 누르고 점토의 표면의 질감과 반발력을 느끼면서 변형을 진행한다. 이를 위해 점토표면의 직접변형에 따른 체적 제어점의 역산뿐 아니라 이들 계산을 시작하게될 정확한 접촉지점을 찾아내는 것도 중요하다.

접촉이 예상되는 표면 위에서 접촉점 혹은 표면위로의 투영점의 계산은 매개변수 값의 현명한 초기가정을 포함한 뉴튼-랩슨 탐색을 이용하거나 표면의 접선 전환방법을 사용하여 접면 위에서의 매개변수 값의 변위를 통해 구한다[10]. 이와 같은 방법들은 접촉점에서의 표면의 도함수를 필요로 하게되는데 체적을 이용한 3차원 물체의 표현에서는 적절하지 않다. 체적을 정의하는 표면의 조각은 표면상의 제어점 뿐만 아니라 각 매개변수방향의 일련의 내부제어점과 조합에 의해서 정의되기 때문에 표면변환을 이용하는 접촉점의 계산은 이들을 고려한 중간 계산용 임시표면의 정의가 필요하게 된다. 또한 자유형태변형이 햅틱장비와 같이 사용될 때 실시간 제어에 적절하도록 빠르게 접촉지점을 찾는 것이 필요하므로 표면을 정의할 때 이미 계산되어 있는 기존의 매개변수 값을 1차원 보간법인 노달 매핑(Nodal Mapping)을 사용하여 실시간으로 직접적인 자유형태변형을 가능케 하였다[16].

접촉 후에는 사용자의 접촉부위와 가상의 점토사이의 상호작용에 의한 힘이 발생하고 이에 따라 점토의 변형이 일어난다. 일반적인 동영상을 위해서는 초당 24 프레임정도의 속도만을 필요로 하므로 힘을 이 제어루프에서 계산하고 햅틱장비를 제어하는 컴퓨터와 같이 묶어 하나의 제어체계를 사용할 경우 지연시간의 효과에 의해 힘의 안정적인 상호작용을 구현하기 힘들다[2,10].

본 논문의 가상점토 모델링에서, 그래픽 렌더링 컴퓨터는 가상물체의 변형에 따른 표면의 손가락에 대한 상대적인 위치를 햅틱제어 컴퓨터에 넘겨준다.

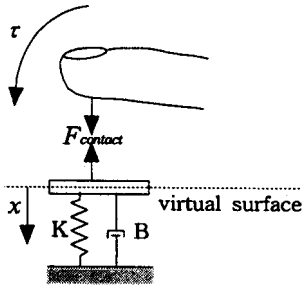

Fig. 2. Virtual contacting environment.

햅틱제어 컴퓨터 내에서 Fig. 2에서와 같은 스프링-감쇠기 모델과 그래픽 렌더링 컴퓨터로부터의 움직이는 가상의 표면위치정보를 이용해 힘을 계산하고 이를 햅틱장비를 통해 사용자에게 전달한다.

Fig. 2의 모델을 이용한 표면에 수직방향으로 작용하는 가상변형에 따른 반발력은 다음 식과 같이 사용자의 손가락이 가상의 표면을 침범한 깊이에 비례한다.

$$F_{contact} = K\,(x_{finger} - x_{wall}) - B\,\dot{x}_{finger},\ \text{if } x_{finger} \geq x_{wall}$$
$$F_{contact} = 0, \qquad x_{finger} < x_{wall} \tag{8}$$

사용자가 햅틱장비를 착용한 손을 가상의 점토에 접근시키면 처음에 점토모델의 탄성계수와 감쇠계수에 의한 가상의 표면을 느끼게 되고 힘의 어느 한계값 이상을 적용하면 체적은 변형을 시작하게된다. 표면의 위치는 적용된 힘과 손가락의 위치에 의해 다시 계산이 되고 체적이 변형을 하는 속도와 같이 손을 움직이면 사용자는 일정한 변위차에 의한 동일한 힘을 느끼게 된다. 움직임을 멈춰 변형을 종결할 때 손이 완전히 가상표면을 벗어날 때까지는 모델의 특성에 따른 반발력을 느끼게된다. 이 경우 체적은 그 모양을 다시 복구하지 않는 소성변형의 형태를 이용하였다. 이 변형의 제어가 Fig. 3 에 설명되어있다.

H(s)는 동역학적인 특성을 포함하고 시간에 따라

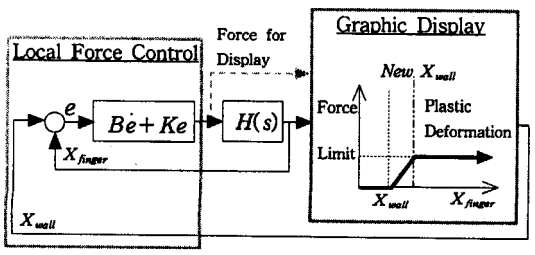

Fig. 3. Block diagram of the deformation.

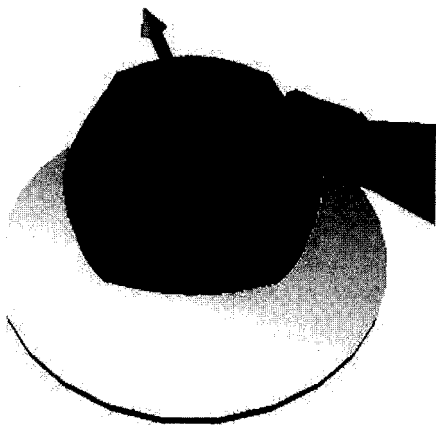

Fig. 4. Direct FFD by the virtual hand.

변하는 손가락의 전달함수이고 가상의 물체와의 접촉에서 생기는 힘과 현재 손의 위치는 햅틱제어 컴퓨터의 제어루프(Local Force Control)를 통해 계산되고 네트워크를 통해 그래픽 컴퓨터로 이동해서 가상의 손과 힘을 표시하는데 사용된다. 점토의 표면위치인 X_{wall}은 각각의 변형단계에서 계산되어 햅틱제어 컴퓨터로 보내져 움직이는 표면을 구성하는데 사용된다.

그래픽 수정 루프와 같은 속도로 수정되는 가상점토 표면의 위치는 햅틱제어 루프에 비해 상대적으로 느린 속도이기 때문에 표면의 운동이 연속적이지 못한 결과를 낳는다. 공유기억장소를 통한 표면의 위치저장으로 그래픽 컴퓨터에서의 느린 수정에 관계없이 햅틱제어 컴퓨터에서는 제어루프에 필요한 가상점토 표면의 값을 공유기억장소를 통해 얻을 수 있기 때문에 안정적인 힘의 제어를 실현할 수 있다. Fig. 4에서 가상의 점토를 변형하는 과정을 표면에 수직성분 반발력을 나타내는 힘의 화살표와 함께 보여준다.

4. 햅틱장비와 결합된 점토모델링

가상의 점토모델링은 햅틱장비와의 결합에 의해서 촉각을 포함하는 사실적인 가상 점토 변형작업으로 구현될 수 있게된다. Fig. 5는 이를 실현시킨 엑소스켈톤 (Exoskelcton) 형태의 햅틱장비이다. 햅틱장비는 자석을 운반하고 사용자는 손가락에 골무형태의 코일을 착용하여 원하는 위치에서 코일에 전류를 흘려서 발생시킨 전자기력에 의해 변형에 필요한 힘을 구현하였다[2-9]. 퓨마 로봇의 종단에 힘센서와 함께 햅틱장비를 부착시켜 넓은 작업공간을 실현하였

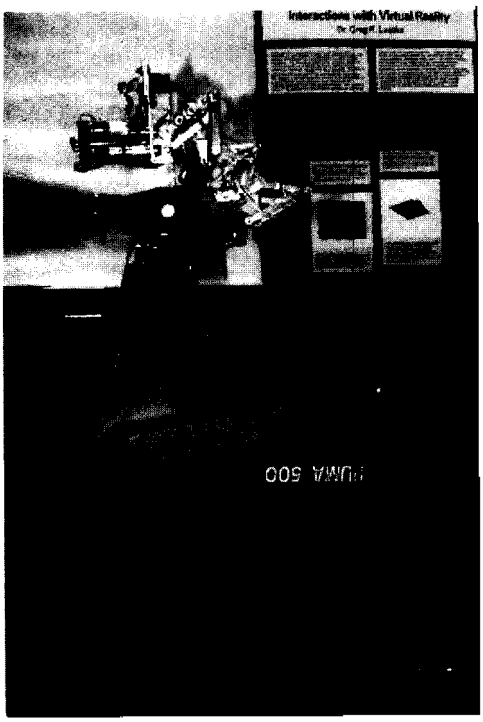

Fig. 5. The Exoskeleton with a PUMA 560.

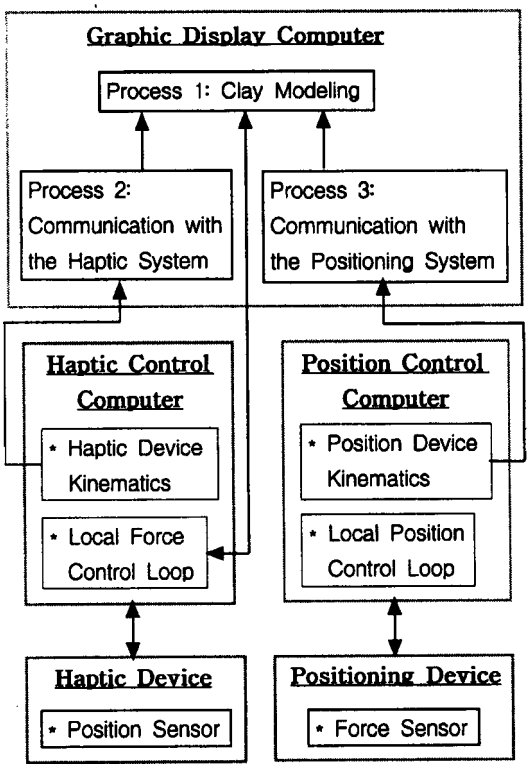

Fig. 6. A system for the virtual clay modeling.

으며 사용자가 Fig. 5의 핸들을 통하여 입력시킨 힘과 토크를 이용하여 로봇종단의 위치를 계산하여 햅틱장비의 기저위치로 사용하였다.

Fig. 6은 3개의 컴퓨터와 5개의 프로세서를 이용한 가상 점토 모델링의 전체 시스템 개략도 이다. 그래픽을 구현하는 유닉스 컴퓨터에서 실시간 제어를 하는 PC와의 원활한 통신을 위해 별도의 프로세서를 두어 이들 햅틱장비와 위치추적장비로 부터의 위치 입력을 통해 사용자의 손과 손가락의 정확한 좌표를 계산할 수 있게 하였다. 움직이는 사용자의 손의 좌표를 이용해서 점토의 변형을 계산하고 변형에 따른 표면의 위치를 햅틱제어 컴퓨터에 보내서 적용할 힘을 계산한다. 계산된 힘은 다시 유닉스 컴퓨터에 보내져 힘을 표시하는데 사용된다. 전체시스템은 Fig. 5에서와 같은 햅틱장비와 위치추적 및 햅틱요소 운반장비 그리고 가상의 점토모델링을 소켓 커뮤니케이션으로 연결하였다.

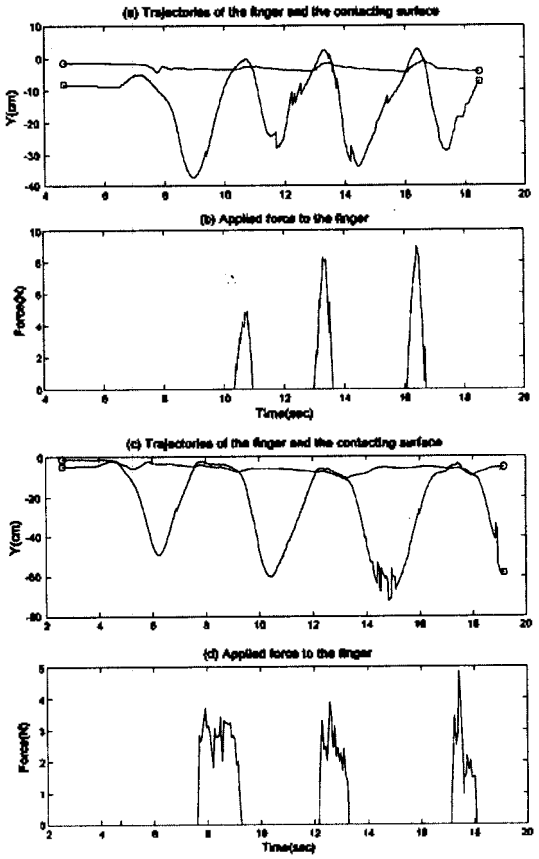

Fig. 7. The trajectory of the finger and the applied force in the virtual clay modeling task.

가상 점토변형에 적용된 힘의 프로파일인 Fig. 7(b), (d)가 Fig. 7(a), (c)에서 원으로 시작되는 실선인 가상의 손의 위치와 사각형으로 시작되는 실선인 상대적인 점토표면의 위치와 함께 나타나있다. Fig. 7(a), (b)는 표면이 변형하지 않을 경우이며 접촉의 중앙에서 손가락이 가장 많이 표면을 침범하였고 이때 최대의 반발력을 느끼고 있다. 반면 Fig. 7(c), (d)에서는 표면이 변형을 허용할 경우이며 변형기간중 상대적인 위치차이 및 반발력이 대체로 일정하게 유지되고 있는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문의 목적은 실제적인 햅틱 상호작용을 위한 일련의 과정을 종합하여 가상의 점토모델링을 구현해 봄으로써 이를 기반으로 향후 촉각요소를 포함한 가상시작(Virtual Prototyping)을 실현하기 위함이다.

NURBS를 이용한 체적을 대상으로 자유형태변형을 시도하였으며 제어점이 아닌 체적표면을 직접 변형하고 제어점은 주어진 구속조건을 만족시키게끔 자동 역산시킴으로 설계자가 설계과정에 대하여 좀 더 광범위한 통제력과 유연성을 갖게 하였다.

간단한 동적 모델을 이용하여 가상점토의 표면을 정의하였고 제어루프는 변형과 상호작용을 분리하여 안정적인 상호작용과 체적의 변형을 동시에 만족시켰다. 노달 매핑을 이용하여 체적표면 접촉부위의 매개변수 값에 근접한 1차 추정치를 실시간으로 찾을 수 있게끔 하여 동적인 표면위치가 빠르게 수정될 수 있고 안정적인 힘제어를 통한 상호작용을 가능케 하였다.

이와 같은 가상의 점토모델링은 그 자유도와 복잡도를 증가시키고 여러 체적에 대한 상관관계가 정의될 경우 기존의 시작을 저렴하고 빠른 시간에 실제와 좀더 근접된 형태로 완성시킬 수 있는 가상시작으로 용이하게 확장되어 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Burdea, G.C., *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*, John Wiley & Sons, New York, 1996.
2. Chai, Y.H., "Force Reflecting Haptic Interactions in a Synthetic Environment", Ph.D. Dissertation, Dept. of Mechanical Engineering, Iowa State University, 1997.
3. Colgate, J.E., Grafing, P.E., Stanley, M.C. and Schenkel, G., "Implementation of Stiff Virtual Walls in Force-Reflecting Interfaces", IEEE VRAIS '93, pp. 202-208, 1993.
4. Coquillart, S., "Extended Free-Form Deformation: A Sculpturing Tool for 3D Geometric Modeling", *Computer Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 187-196, August 1990.
5. Coquillart, S. and Jancene, P., "Animated Free-Form Deformation: An Interactive Animation Technique", *Computer Graphics*, Vol. 25, No. 4, pp. 23-26, July 1991.
6. Galyean, T.A. and Hughs, J.F., "Sculpting: An Interactive Modeling Technique", *Computer Graphics*, Vol. 25, No. 4, pp. 267-274, July 1991.
7. Hsu, W.M., Hughs, J.F. and Kaufman, H., "Direct Manipulation of Free-Form Deformations", *Computer Graphics*, Vol. 26, No. 2, pp. 177-184, July 1992.
8. Lamousin, H.J. and Waggenspack Jr., W.N., "NURBS-Based Free-Form Deformations", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 14, No. 6, pp. 59-65, November 1994.
9. Luecke, G.R., Chai, Y.H. and Edwards, J.C., "Force Interactions in hc Synthetic Environment using the ISU Force Reflecting Exoskeleton", *Computer & Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 431-442, July/August 1997.
10. Luecke, G.R. and Chai, Y.H., "Stability and Performance Comparison of the Force Reflecting Haptic manipulator", Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics, pp. 637-642, Monterey, CA, July 7-9, 1997.
11. Piegl, L. and Tiller, W., *The NURBS Book*, 2nd Ed., Springer, Berlin, 1997.
12. Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. and Flannery, B.P., Numerical Recipes in C, 2nd Ed., Cambridge University Press, 1992.
13. Rappoport, A., Sheffer, A. and Bercovier, M., "Volume-Preserving Free-Form Solids", pp. 361-372, ACM 1995.
14. Rogers, D.F. and Adlum, L.A., "Dynamic Rational B-Spline Surfaces", *Computer Aided Design*, Vol. 22, No. 9, pp. 609-616, November 1990.
15. Sederberg, T.W. and Parry, S.R., "Free Form Deformation of Solid Geometric Models", *Computer Graphics*, Vol. 20, No. 4, pp. 151-160, August 1986.
16. Thompson, T.V II, Johnson, D.E. and Cohen, E., "Direct Haptic Rendering of Sculptured Models", Proceedings Symposium on Interactive 3D Graphics, Providence, RI, April 27-30, 1997.

채 영 호

1989년 중앙대학교 기계공학과 학사
1994년 SUNY at Buffalo 기계공학과 공학석사
1997년 Iowa State University 기계공학과 공학박사
1989년 ~ 1992년 삼성전기(주) 연구소 CAD/CAM실 연구원
1994년 ~ 1997년 미국 ICEMT 연구원
1998년 CASE Tech. Center Virtual Prototyping Lab. Consultant
1998년 ~ 현재 중앙대학교 기계설계학과 조교수
관심분야 : Haptics, Tele-immersion, Synthetic Environment, Virtual Prototyping.