

s-FEM 을 이용한 햅틱 시뮬레이션

전성기[†] · 조맹효^{*}

Haptic Simulation with *s*-FEM

Seongki Jun, Maenghyo Cho

Key Words : Deformable object(변형체), haptic feedback(햅틱 피드백) *s*-FEM(격자 중첩법)

Abstract

Accurate and fast haptic simulations of deformable objects are desired in many applications such as medical virtual reality. In haptic interactions with a coarse model, the number of nodes near the haptic interaction region is too few to generate detailed deformation. Thus, local refinement techniques need to be developed. Many approaches have employed purely geometric subdivision schemes, but they are not proper in describing the deformation behavior of deformable objects. This paper presents a continuum mechanics-based finite element adaptive method to perform haptic interaction with a deformable object. This method superimposes a local fine mesh upon a global coarse model, which consists of the entire deformable object. The local mesh and the global mesh are coupled by the *s*-version finite element method (*s*-FEM), which is generally used to enhance accurate solutions near the target points even more. The *s*-FEM can demonstrate a reliable deformation to users in real-time.

1. 서 론

PHANTOMTM 과 같은 햅틱 장치를 이용한 시뮬레이션은 가상 의료 시스템, 컴퓨터 그래픽스, CAD 등과 같은 분야의 가상현실 구현에 중요한 역할을 하고 있다. 특히 실제 세계의 많은 부분이 변형체로 이루어져 있기 변형체를 다룰 수 있는 햅틱 시뮬레이션 기술이 최근에 많은 관심을 끌고 있다. 그러나 변형체를 위한 햅틱 시뮬레이션에서는 사용자에게 시각 정보와 역감 정보가 각각 30 Hz, 1 kHz 의 갱신주기로 전달되어야 한다. 이와 동시에 사용자에게 사실적인 몰입감을 전달하기 위해서는 정확한 시각/역감 정보가 계산되어야 한다. 따라서 변형체 햅틱 시뮬레이션에서는 변형체의 변형과 반력의 계산이 실시간으로 그리고 정확하게 계산되어야 하는 이해상반 관계가 존재한다. 지난 20 여 년 동안 변형체 햅틱 시뮬레이션에 사용하

기 위한 다양한 변형체 모델링 방법들이 개발되어 왔다. 그 중 간단한 물리기반 변형체 모델링 방법으로 질량-스프링 시스템이 널리 사용되어 왔다. 질량-스프링 시스템은 햅틱 장치와의 빠른 응답성 때문에 널리 사용되는 방법 중 하나이나 질량, 스프링, 댐퍼만으로 변형체의 물리적 특성을 고려하는 데 한계가 있기 때문에 변형과 반력이 비교적 정확하게 계산되지 않는다. 다른 변형체 모델링 방법으로는 유한요소법과 같은 연속체 기반의 방법이 있다. 연속체 기반의 방법은 질량-스프링 시스템보다 더 적은 수의 절점으로 보다 정확한 시뮬레이션이 가능한 장점이 있으나 선행 해석 과정이 필요하고 비교적 큰 행렬을 다루어야 하는 단점이 있다. 이러한 단점에도 불구하고 연속체 기반의 모델링 방법은 정확한 변형/반력을 계산할 수 있기 때문에 현재 널리 사용되고 있다.

Bro-Nielsen 와 Cotin []은 가상 수술 햅틱 시뮬레이션을 위한 3 차원 탄성 유한요소 모델을 제안하였다. 이 방법에서는 변형체의 내부 절점들이 시각 정보 전달에 필요하지 않기 때문에 시뮬레이션 과정에서 제외하였으며 외부 절점들만을 고려한 응축법(condensation scheme)을 이용하여 실시간 햅틱 시뮬레이션을 구현하였다. 이 방법은 Cotin []등에 의하여 발전된 변형체 모델로 확장되었다. Cotin 등은 선행해석 과정에서 해

[†] 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : zenith74@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1645 FAX : (02)886-1645

^{*} 서울대학교 기계항공공학부

를 구한 후 시뮬레이션 과정에서 재사용하는 방법을 사용하여 헵틱 변형체 시뮬레이션을 구현하였다. 또한 질량-스프링 시스템과 유사한 텐서-질량 모델을 제안하여 동적 거동과 절단 시뮬레이션을 구현하였다. James 와 Pai[]는 보다 효율적인 변형체 모델을 제안하였다. 선행해석 과정에서 기준 경계치 문제의 해석 통하여 Green's function 을 계산 한 후 시뮬레이션 과정에서 경계조건이 변경되는 새로운 경계치 문제의 해를 capacitance matrix algorithm 에 의한 변형체 헵틱 시뮬레이션을 구현하였다.

그러나 물리기반 변형체 모델을 사용한 헵틱 시뮬레이션에서는 헵틱 장치와 접촉이 발생하는 부위의 변형이 자연스럽게 못한 경우가 발생한다. 이를 방지하기 위해서는 비교적 많은 절점을 사용하는 방법이 있으나 절점의 수가 증가할수록 선행해석 시간은 급격히 증가하고 시뮬레이션 과정에 필요한 행렬의 크기 또한 급격히 증가하는 단점이 발생한다. 따라서 현재까지는 접촉이 발생하는 국소 영역에 subdivision 과 같은 기하학적 방법을 이용하여 국소 절점을 추가하여 변형을 자연스럽게 묘사하는 방법들이 제시되었다. 그러나 단순한 기하학적 접근 방법은 정확한 변형을 제공하지 못한다.

Zhang 등은 Loop subdivision 방법을, Choi 등은 modified-butterfly subdivision 방법을 질량-스프링 시스템에 적용하여 변형체 헵틱 시뮬레이션을 구현하였다. 이 방법들은 전체 변형과 반력에는 변화가 없게 하기 위하여 국소 영역의 질량과 스프링 상수를 조절하였으므로 변형과 반력의 정확성을 높이기 보다 단순히 국소 영역의 변형을 자연스럽게 하고자 하였다. 연속체 기반의 변형체 모델링 방법에도 적응적 방법이 적용되었으나 국소 영역의 물리적 특성을 전체 영역의 물리적 특성과 일치시키기 매우 어렵기 때문에 단순한 기하학 기반의 적응적 방법을 통하여 변형만을 자연스럽게 묘사하는 시도가 대부분이었다.

변형체 헵틱 시뮬레이션에서 적응적 국소 영역을 추가하는 방법은 변형체의 물리적 특성을 고려해야 하며 보다 정확한 변형과 반력의 계산이 실시간으로 이루어져야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 Fish 가 제안한 s-FEM 을 헵틱 시뮬레이션에 적용하였다. s-FEM 은 가장 널리 쓰이는 적응적 유한요소법의 하나로서 두 개의 독립적인 격자(전역 격자와 국소 격자)가 사용된다. 본 연구에서 제안한 s-FEM 을 이용한 변형체 헵틱 시뮬레이션은 단순한 기하학적 방법을 통하여 접촉 부위에서의 변형을 자연스럽게 제공하는 것이 아니라 물리기반의 적응적 방법으로서 국소 영역의 변형을 정확하게 제공할 수 있을 뿐만 아니라 반력의 정확성도 향상시키는 방법이다.

2. s-FEM 정식화

Fig. 1 은 3 차원 변형체의 경계조건과 하중조건을 나타내고 있으며 Ω 와 Ω_L 는 각각 변형체의 영역과 경

계를 나타내고 있다. 변형체는 변위가 기술되어 있는

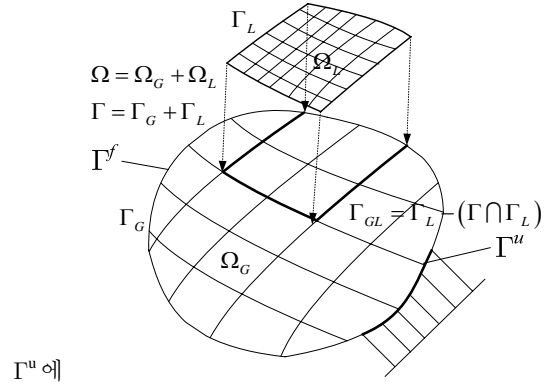


Fig. 1 A schematic of the global and the local mesh

계로 지정되어 있으며 외부 하중이 Γ^f 에 작용하고 있다. 또한 Fig. 1 은 전역 격자의 국소 영역에 격자가 중첩된 탄성 변형체를 나타내고 있다. 하첨자 G 와 L 은 각각 전역 격자와 국소 격자에 관련된 항을 의미한다. 국소 영역 $\Omega_L \subset \Omega$ 는 일반적으로 해의 변화가 급격한 영역에 위치시킴으로써 해의 정확성을 높이기 때문에 본 연구에서는 헵틱 장치와 접촉이 발생하는 주변에 국소 격자를 위치시킨다.

Γ_L 은 Ω_L 의 경계로 정의된다. 여기서 Ω 는 $\Omega_G (= \Omega - \Omega_L)$ 와 Ω_L 로 나뉘게 되며 $\Gamma_{GL} = \Gamma_L - (\Gamma \cap \Gamma_L)$ 은 Ω_G 와 Ω_L 의 공통된 경계로 정의된다. 변형체 내의 임의의 점의 변위는 전역 변위 \mathbf{u}_G 와 국소 변위 \mathbf{u}_L 의 선형조합으로 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{u} = \begin{cases} \mathbf{u}_G & \text{on } \Omega_G \\ \mathbf{u}_G + \mathbf{0} & \text{on } \Gamma_{GL} \\ \mathbf{u}_G + \mathbf{u}_L & \text{on } \Omega_L \end{cases} \quad (1)$$

여기서 변위의 연속성을 보장하기 위하여 다음과 같은 C^0 연속조건이 사용된다.

$$\mathbf{u}_L = \mathbf{0} \quad \text{on } \Gamma_{GL} \quad (2)$$

또한 변형률은 변형률-변위 행렬 관계에 의하여 다음과 같이 표현 된다.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}_G = \mathbf{B}_G \mathbf{U}_G & \text{on } \Omega_G \\ \boldsymbol{\varepsilon}_L = \mathbf{B}_G \mathbf{U}_G + \mathbf{B}_L \mathbf{U}_L & \text{on } \Omega_L \end{cases} \quad (3)$$

따라서 전역 격자와 국소 격자의 구성방정식은 다음과 같이 구성된다.

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{cases} \boldsymbol{\sigma}_G = \mathbf{D}_G \boldsymbol{\varepsilon}_G = \mathbf{D}_G \mathbf{B}_G \mathbf{U}_G & \text{on } \Omega_G \\ \boldsymbol{\sigma}_L = \mathbf{D}_L \boldsymbol{\varepsilon}_L = \mathbf{D}_L (\mathbf{B}_G \mathbf{U}_G + \mathbf{B}_L \mathbf{U}_L) & \text{on } \Omega_L \end{cases} \quad (4)$$

여기서 \mathbf{D}_G 와 \mathbf{D}_L 은 각각 전역 격자와 국소 격자의 탄성 계수 행렬을 의미한다. 이는 격자 중첩법이 전역 격자와 국소 격자의 물리적 특성이 상이한 경우에도 사용할 수 있음을 의미하나 본 연구에서 사용될 헵틱 시뮬레이션의 경우 전역 격자와 국소 격자가 같은 물

리적 특성을 가져야 하므로 $\mathbf{D}_G=\mathbf{D}_L=\mathbf{D}$ 와 같이 탄성 계수 행렬 표현한다. 격자 중첩법에 대한 강성행렬은 식 (3)과 (4)에 의하여 다음과 같은 강성행렬을 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_G & (\mathbf{K}_{LG})^T \\ \mathbf{K}_{LG} & \mathbf{K}_L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_G \\ \mathbf{U}_L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_G \\ \mathbf{F}_L \end{Bmatrix} \quad (5)$$

여기서 \mathbf{K}_G 와 \mathbf{K}_L 은 전역 격자와 국소 격자의 강성행렬을 각각 의미하고 \mathbf{K}_{GL} 과 \mathbf{K}_{LG} 는 전역 격자와 국소 격자의 상호작용 관계 효과를 반영한다. 각각의 강성행렬은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{K}_G = \int_{\Omega} \mathbf{B}_G^T \mathbf{D} \mathbf{B}_G d\Omega \quad (6)$$

$$\mathbf{K}_{LG} = \int_{\Omega_L} \mathbf{B}_L^T \mathbf{D} \mathbf{B}_G d\Omega_L \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_L = \int_{\Omega_L} \mathbf{B}_L^T \mathbf{D} \mathbf{B}_L d\Omega_L \quad (8)$$

3. Capacitance Matrix Algorithm(CMA)

Sherman-Morrison-Woodbury 식을 기반으로 하는 CMA 는 정적 선형 시스템의 재해석에 많이 사용되는 선형 대수 알고리즘이다. James 와 Pai (9, 10)는 경계요소법을 이용한 변형체 햅틱 시뮬레이션에 CMA 를 적용하였으나 본 연구에서는 s-FEM 에 확장 적용하였다. 본 장에서는 s-FEM 과 함께 연동하여 사용하게 될 CMA 의 방법과 그 특성에 대하여 알아보려 한다.

유한요소해석을 통하여 변형체의 경계조건(변형체는 Γ^u 에 지지되어 있고 Γ^f 에 어떠한 하중도 가해지지 않은 경계조건)을 고려한 강성행렬을 \mathbf{A}_0 라고 정의하면 \mathbf{A}_0 의 역행렬을 다음과 같이 Green Function 으로 정의한다.

$$\Xi = \mathbf{A}_0^{-1} \quad (10)$$

여기서 하첨자 0 은 선형 해석 과정에서 계산된 양을 의미한다. 만약 햅틱 장치의 끝점이 변형체의 p 번째 절점과 접촉하였다면 p 번째 절점의 변위는 햅틱 장치의 변위에 의하여 부여된다. 그리고 선형 해석 과정에서 p 번째 절점의 경계조건은 하중 경계조건이었지만 시뮬레이션 과정에서는 변위가 기술된 경계조건으로 변경된다. 새롭게 변경된 경계조건을 고려한 선형 시스템은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{v} = \bar{\mathbf{A}} \cdot \bar{\mathbf{v}} \quad (11)$$

여기서 \mathbf{A} 와 $\bar{\mathbf{A}}$ 는 다음과 같이 \mathbf{A}_0 에 의하여 표현될 수 있다.

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_0 + (\mathbf{I} - \mathbf{A}_0) \mathbf{E} \mathbf{E}^T \quad (12)$$

$$\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{I} + (\mathbf{A}_0 - \mathbf{I}) \mathbf{E} \mathbf{E}^T \quad (13)$$

여기서 \mathbf{E} 는 단위 블록 행렬 \mathbf{I} 에서 p 번째 블록 열을 추려낸 블록 행렬이다. 식 (12)의 역행렬을 Sherman-Morrison-Woodbury 식에 적용하면

$$\mathbf{A}^{-1} = \Xi + (\mathbf{I} - \Xi) \mathbf{E} \mathbf{C}^{-1} \mathbf{E}^T \Xi \quad (14)$$

여기서 $\mathbf{C} (= \mathbf{E}^T \Xi \mathbf{E})$ 는 capacitance matrix 로 불린다. 식 (13)과 (14)를 새로운 선형 시스템의 해를 구하기 위하여 식 (11)에 대입한 후 \mathbf{v} 에 대하여 정리하면 식 (15)을 얻게 된다.

$$\mathbf{v} = \bar{\mathbf{v}} + (\mathbf{I} - \Xi) \mathbf{E} \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{E}^T \bar{\mathbf{v}}) \quad (15)$$

식 (15)에서 볼 수 있듯이 햅틱 장치의 접촉에 의하여

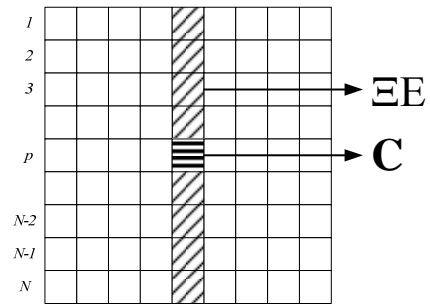


Fig. 2 Update parts of Green Function matrix during a haptic simulation

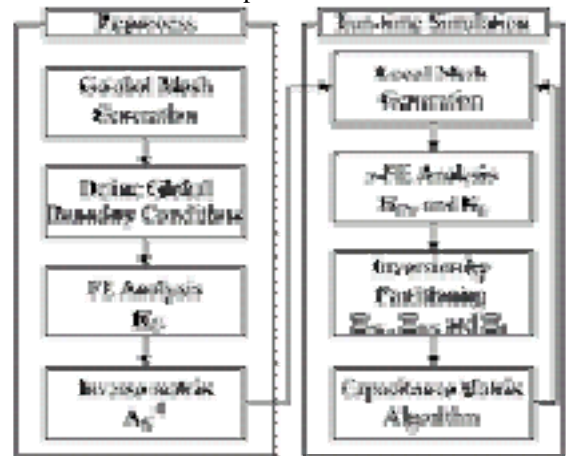


Fig. 3 The Procedures of the s-adaptive simulation

경계조건이 변경된 새로운 선형 시스템의 해는 선형 해석 과정에서 정의된 \mathbf{E} 와 \mathbf{C}^{-1} 으로 구할 수 있다. 여기서 \mathbf{C} 는 3 차원 변형체의 경우 3×3 의 크기가 되므로 실시간으로 계산이 가능하다. 또한 식 (15)에서 다음과 같은 두 가지 특성을 알아낼 수 있다.

첫째, 식 (15)에서 \mathbf{E} 와 관련된 항($\Xi \mathbf{E}$ 와 $\mathbf{C} = \mathbf{E}^T \Xi \mathbf{E}$)의 연산은 행렬 곱셈 연산에 의하여 계산할 필요가 없다. 예를 들어, 만약 햅틱 장치가 변형체의 p 번째 절점과 접촉한다면 $\Xi \mathbf{E}$ 의 계산 결과는 Ξ 에서 p 번째 블록 열에 해당된다. 마찬가지로 $\mathbf{C} (= \mathbf{E}^T \Xi \mathbf{E})$ 의 계산 결과는 p 번째 블록 열과 p 번째 블록 행이 교차하는 부분에 해당한다. 이 결과들은 Fig. 2 에 나타나 있다.

둘째, CMA 를 이용한 햅틱 시뮬레이션에서 반력의 계산은 식 (15)에 의한 계산보다 다음과 같은 특성을 이용하면 효율적이다. 햅틱 장치의 변위에 의하여 부여된 p 번째 절점의 변위는 $\mathbf{u}^p = \mathbf{E}^T \bar{\mathbf{v}}$ 로 표현할 수 있으며 이에 상응하는 반력은 $\mathbf{f}^p = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{u}^p$ 에 의하여 계산된다. 이는 햅틱 장치의 역감은 1 kHz 내로 계산된 후 전달되어야 하는 요구 조건을 충족시킬 수 있는 CMA 의 특성이다.

4. s-FEM 을 이용한 햅틱 시뮬레이션

4.1 선행 해석 과정

그림 3 은 본 연구에서 제안한 격자 중첩법에 의한 햅틱 시뮬레이션의 순서도를 나타내고 있다. 본 연구에 선 제안한 s-FEM 의 강성행렬 (식 (5))은 선행 해석 과정에서 계산되는 것이 아니라 시뮬레이션 과정에서 구성된다. 그러나 식 (6)에서 볼 수 있듯이 \mathbf{K}_G 는 전체 영역 Ω 에 대한 적분을 통하여 계산되므로 햅틱 장치가 변형체의 어느 절점과 접촉하여도 일정하므로 선행 해석 과정에서 \mathbf{K}_G 의 역행렬 \mathbf{A}_G^{-1} 을 계산하여 저장한다.

4.2 국소 격자 생성과 경계 조건

햅틱 장치가 변형체와 접촉이 일어나면 국소 격자를 생성하고 경계조건을 부여한다. 일반적으로 s-FEM 에서는 국소 격자와 전역 격자의 경계가 일치할 필요는 없지만 식 (7)의 국소 영역에서 \mathbf{B}_G 의 계산이 쉽지 않기 때문에 본 연구에서는 그림 4-(a)에서와 같이 국소 격자와 전역 격자의 경계조건을 일치 시켰다. 그림 1 에 의하여 정의된 국소 격자의 경계조건에 따라 중첩된 국소 격자 의 경계조건을 그림 4-(a)에 표현 하였다. 속이 빈 사각형과 원은 각각 전역 격자와 국소 격자의 하중 경계 조건을 의미하며 속이 찬 사각형과 원은 각각 전역 격자와 국소 격자의 변위 경계 조건을 의미한다.

4.3 국소 격자의 유한요소 해석

국소 격자의 생성과 경계 조건이 부여된 후 국소 격자에 대한 강성행렬 \mathbf{K}_{GL} 와 \mathbf{K}_L 을 구성한다. 앞에서 언급한 바와 같이 \mathbf{K}_G 는 선행 해석과정에서 이미 계산 되었으므로 이 과정에서 구성할 필요가 없다. 국소 격자에 대한 강성행렬과 경계조건을 고려한 선행 시스템은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_G & \mathbf{A}_{GL} \\ \mathbf{A}_{LG} & \mathbf{A}_L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{v}_G \\ \mathbf{v}_L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{\mathbf{v}}_G \\ \bar{\mathbf{v}}_L \end{Bmatrix}$$

그리고 식 (16)의 역행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\Xi_{\alpha} = \begin{bmatrix} \Xi_G & \Xi_{GL} \\ \Xi_{LG} & \Xi_L \end{bmatrix}$$

여기서 식 (17)의 각 성분은 inversion by partitioning 방법에 의하여 다음과 같이 계산된다.

Fig. 1 The Comparison of Deformations

$$\Xi_L = [\mathbf{A}_L - \Psi_{LG} \mathbf{A}_{GL}]^{-1}$$

$$\Xi_{LG} = -\Xi_L \Psi_{LG}$$

$$\Xi_G = \mathbf{A}_G^{-1} - \Xi_{LG}^T \Psi_{LG}$$

여기서 $\Psi_G = \mathbf{A}_{LG} \mathbf{A}_G^{-1}$ 이며 \mathbf{A}_G^{-1} 은 선행 해석 과정에서 이미 계산된 \mathbf{K}_G 의 역행렬이다.

4.4 효율적인 inversion by partitioning

비록 선행 해석 과정에서 \mathbf{A}_G^{-1} 은 계산되어 있지만 일반적인 행렬 연산 방법으로 식 (18)~(20)을 실시간으로

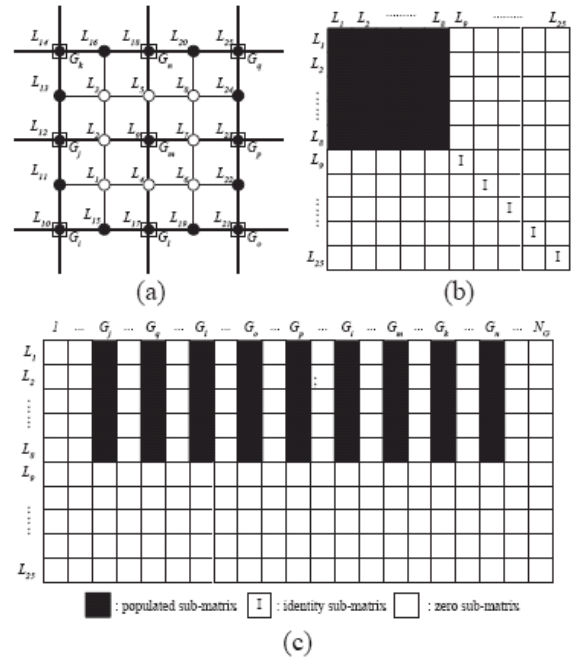


Fig. 4 An example of local mesh configurations and its boundary condition

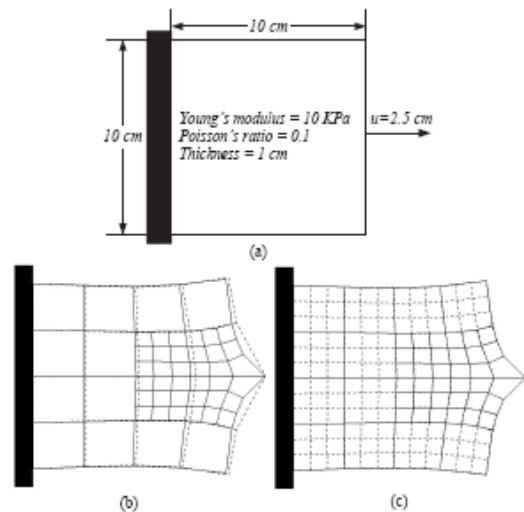


Fig. 5 The Comparison of Deformations

계산할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 국소 격자의 절점을 경계 조건에 따라 절점을 부여하는 방법을 사용하

여 계산 시간을 줄이고자 하였다. Fig. 4-(a)는 국소 격자의 형태와 경계조건에 따른 절점의 번호를 부여하는 예를 나타내고 있다. 하중 경계조건이 부여된 국소 격자의 절점(속이 빈 원)은 $L_1 \sim L_8$ 의 절점 번호를 부여하고 변위 경계조건이 부여된 절점(속이 찬 원)은 $L_9 \sim L_{25}$ 의 번호를 부여한다. 이러한 절점 번호 부여는 그림 4-(b)와 (c)와 같은 K_L 과 K_{GL} 의 행렬 형태를 갖게 함으로써 inversion by partitioning의 계산 시간을 줄일 수 있다. 즉 그림 4-(b)와 (c)의 영행렬 부분은 계산과정에서 고려하지 않고 populated 부분만 고려하기 때문에 계산 시간을 크게 줄일 수 있으며 s-FEM에 의해 증가되는 메모리의 양을 줄일 수 있다. 이와 더불어 본 연구에서는 경계조건에 따른 절점 번호 부여 방법과 함께 최적화된 행렬 연산 함수인 BLAS를 이용하여 식 (18)의 $\Psi_{LG} \mathbf{A}_{GL}$ 와 식 (19)의 $\mathbf{\epsilon}_L \Psi_{LG}$ 곱셈 연산 시간을 줄일 수 있으며 LAPACK을 이용하여 식 (18)의 역행렬 연산 시간을 크게 줄일 수 있었다.

5. 결과 및 검토

본 논문에서는 유한요소 해석을 통하여 미리 계산된 Green function을 이용하여 점 접촉 변형 시뮬레이션 시스템에 국소 격자를 중첩하여 보다 자연스러운 변형을 렌더링 할 수 있는 방법을 제시하였다. 그림 5는 격자 중첩법을 이용한 햅틱 시뮬레이션에서 생성된 변형과 반력의 정확성을 나타내기 위한 예이다. 그림 5-(a)는 시뮬레이션에 사용된 평판의 크기와 물리적 특성을 나타내고 있다. 그림 5-(b)는 16개의 전역 격자만을 사용하여 시뮬레이션 한 결과와 16개의 전역 격자와 32개의 국소 격자를 사용하여 시뮬레이션한 결과를 동시에 나타내고 있다. 그림 5-(b)에서 보는 바와 같이 햅틱 장치의 끝점이 접촉된 부위에 보다 자연스러운 변형 형상을 나타내고 있다. 또한 그림 5-(c)의 144개의 전역 격자만을 사용하여 시뮬레이션한 결과와 16개의 전역 격자와 36개의 국소 격자를 사용하여 시뮬레이션한 결과에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 사용한 격자 중첩법은 햅틱 장치의 끝점이 접촉된 부분의 변형을 자연스럽게 할 뿐만 아니라 전체 격자의 변형 정확성도 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 표 1은 격자 중첩법에 의한 시뮬레이션에서 생성된 반력의 정확성이 향상됨을 알 수 있다.

위의 시뮬레이션은 Pentium 4 2.66 GHz, 1.0GB RAM 개인용 컴퓨터를 사용하였으며 계산된 반력을 이용하여 PHANTOM 햅틱 장치와 연동을 수행하였다. 또한 GHOST SDK를 이용하여 햅틱 scene graph 구성을 통해서 햅틱 환경을 생성 후 햅틱 시뮬레이션 프로세스를 시작하며 프로그램의 그래픽처리를 비롯한 프로그램의 핵심 기능을 수행 하였다.

6. 결론

본 연구에서는 햅틱 장치와 변형체의 상호작용 시뮬레이션을 구현하기 위하여 변형체의 변형 및 반력을 실시간으로 계산하고 사용자에게 전달할 수 있는 햅틱 시스템을 구축하였으며 접촉이 발생하는 국소 영역에 격자를 중첩하여 보다 자연스러운 변형을 표현하는 방법을 제시하였다. s-FEM을 이용한 햅틱 시뮬레이션은 단순히 기하학적으로 자연스러운 변형을 표현하는 subdivision 방법이 아닌 물리 기반의 격자 중첩법으로서 햅틱 시뮬레이션 과정에서 변형과 반력의 정확성을 높일 수 있었다. 국소 격자를 고려한 강성행렬의 역행렬은 inversion by partitioning 법과 capacitance matrix algorithm의 특성, 그리고 국소 격자의 경계 조건에 따라 나열하는 방법에 의하여 실시간으로 계산할 수 있었다. 국소 격자의 경계 조건에 따라 나열하는 방법은 국소 격자에 의하여 증가하는 메모리의 소요량을 최소화 할 수 있었다.

본 논문에서 제안한 방법은 변형뿐만 아니라 반력의 정확성도 높일 수 있었으나 반력 갱신 주기를 만족하지 못 하는 경우가 있었다. 이러한 단점은 앞으로 GPU 프로그래밍(8, 12)과 같은 병렬 계산에 의하여 개선될 수 있을 것으로 사려 된다. 본 연구는 국소 영역의 비선형 거동을 시뮬레이션을 위한 기초 작업으로 국소 영역의 변형과 반력이 중요한 가상 침 삽입 시뮬레이션에 사용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2007년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Astley, O. R. and Hayward, V., 1998, "Multirate Haptic Simulation Achieved by Coupling Finite Element Meshes through Norton Equivalents," *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 989-994.
- (2) Barker, V. A., Blackford, S., Dongarra, J. J., Corz, J. D., Mammaring, S., Marinova, M., Wasniewski, J.m, and Yalamov, P., 2001, "LAPACK95 Users' Guide," SIAM, Philadelphia.
- (3) Bro-Nielsen, M. and Cotin, S., 1996, "Real-time Volumetric Deformable Models for Surgery Simulation using Finite Elements and Condensation," *Computer Graphics Forum*, 15(3), pp.57-66.
- (4) Choi, Y-J., Hong, M., Choi, M-H, and Kim, M-H., 2005, "Adaptive Surface-deformable Model with Shape-preserving Spring," *Computer Animation and*

- Virtual Worlds*, 16, pp.69~83.
- (5) Cotin, S., Delingette, H., and Ayache, N., 2000, "A Hybrid Elastic Model for Real-time Cutting, Deformations, and Force Feedback for Surgery Training and Simulation," *The Visual Computer*, 16, pp.437~452.
- (6) Debunne, G., Desbrun, M., Cani, M-P., and Barr, A., 2001, "Dynamic Real-time Deformations using Sapce and Time Adaptive Sampling," *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp.31~36.
- (7) Fish, J., 1992, "The s-Version of the Finite Element Method," *Computers & Structures*, 43(3), pp.539~547.
- Harris, M.J., Coombe, G., Scheuermann, T., and Lastra, A.,
- (8) Harris, M. J., Coombe, G., Scheuermann, T., and Lastra, A., 2002, "Physically-based Visual Simulation on Graphics Hardware," *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS conference on Graphics hardware*, pp.1~10.
- (9) James, D. L. and Pai, D. K., 1999, "Artdefo: Accurate Real Time Deformable Objects," *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp.66~72.
- (10) James, D. L. and Pai, D. K., 2001, "A Unified Treatment of Elastostatic Contact Simulation for Real Time Haptics," *The Electronic Journal of Haptics Research* (<http://www.haptic-e.org>), 2(1).
- (11) Kim, J., De, S., and Srinivasan, M. A., 2003, "An Integral Equation Based Multiresolution Modeling Scheme for Multimodal Medical Simulations," *Proceedings of the 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS03)*, pp.221~228.
- (12) Kruger, J. and Westermann, R., 2003, "Linear Algebra Operator for GPU Implementation of Numerical Algorithm," *ACM Transactions on Graphics*, 22(3), pp.908~916.
- (13) Zhang, J., Payandeh, S., and Dill, J., 2002, "Haptic Subdivision: An Approach to Defining Level-of-detail in Haptic Rendering," *Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces For Virtual Environment & Teleoperator Systems (HAPTICS'02)*, pp.201~208.