

## 듀얼 가변형 모델 동기화를 위한

### 적응성 질량-스프링 기법

조재환          박진아<sup>0</sup>

한국과학기술원

zerodin85@kaist.ac.kr    jinah@cs.kaist.ac.kr

### Adaptive Mass-Spring Method

### for the Synchronization of Dual Deformable Model

Jaehwan Cho          Jinah Park<sup>0</sup>

KAIST

### 요 약

최근 역감, 촉감 피드백을 생성 할 수 있고 3 차원 상호작용이 가능한 컴퓨터 인터페이스 기술이 발전하면서 기존의 입출력 장치에 의존하던 컴퓨터 시뮬레이션의 한계가 줄어들어 그 종류가 다양해지고 있다. 특히, 가상현실 기반 수술 시뮬레이터의 수요가 증가 하면서 사실적인 가상 환경을 제공하는 방법에 관련된 연구가 활발히 진행 되고 있으며 그 중에서 가상 장기 모델의 사실적인 표현 기술은 사용자의 몰입감을 높여주는데 중요한 역할을 하기 때문에 반드시 필요한 분야이다. 가상 장기모델의 사실성을 높이기 위해서는 사용자의 상호작용에 따라 변형되는 시각적 피드백과 알맞은 햅틱 피드백을 전달해야 한다. 본 연구에서는 이 두 가지 피드백은 사람이 인지하는 방법과 시스템의 요구 사항이 다르기 때문에 보다 효과적인 시뮬레이션을 하기 위하여 서로 다른 두 모델을 구현하고 두 모델간의 동기화를 위한 기술로써 적응성 질량-스프링 모델 기법을 제안 한다. 또한, 유연체 변형에 대하여 표면의 세부 형태를 보여주는 시각모델과 사용자의 상호작용에 따른 햅틱 피드백을 전달하는 햅틱 모델, 그리고 이 두개의 모델을 연동시키는 동기화 모델을 통하여 유연체의 거동을 실시간, 사실적으로 제공할 수 있는 가변형 모델 시뮬레이션 프레임워크를 설계 한다.

### Abstract

Traditional computer simulation uses only traditional input and output devices. With the recent emergence of haptic techniques, which can give users kinetic and tactile feedback, the field of computer simulation is diversifying. In particular, as the virtual-reality-based surgical simulation has been recognized as an effective training tool in medical education, the practical virtual simulation of surgery becomes a stimulating new research area. The surgical simulation framework should represent the realistic properties of human organ for the high immersion of a user interaction with a virtual object. The framework should make proper both haptic and visual feedback for high immersed virtual environment. However, one model may not be suitable to simulate both haptic and visual feedback because the perceptive channels of two feedbacks

are different from each other and the system requirements are also different. Therefore, we separated two models to simulate haptic and visual feedback independently but at the same time. We propose an adaptive mass-spring method as a multi-modal simulation technique to synchronize those two separated models and present a framework for a dual model of simulation that can realistically simulate the behavior of the soft, pliable human body, along with haptic feedback from the user's interaction.

키워드: 수술 시뮬레이션, 유연체 시뮬레이션, 가변형 모델, 햅틱스

**Keywords:** Surgical Simulation, Soft body Simulation, Deformable Model, Haptics

## 1. 서론

1987년 Philippe Mouret 에 의해 내시경을 이용한 담낭절제술이 최초로 시술되었다. 내시경 수술은 기존의 개복 수술에 비해 출혈량이 적고 환자의 회복이 빠른 장점이 있어 내시경 수술 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되었다. 현재는 복강 내 장기에 대한 시술이 시행되고 있으며 차후에는 인체의 모든 장기에 적용이 가능할 것이라 전망되고 있다. 하지만, 시술자는 내시경 카메라 영상에 의존하여 시술을 해야 되고 긴 내시경 도구를 조작하기가 익숙하지 않기 때문에 처음 시술하는 시술자들에게는 적절한 훈련이 필요하다. 현재 레지던트 들은 전문의의 시술을 보조하고 관찰하면서 내시경 시술 기술을 익히고 있다. 이런 기존의 방법은 의료사고의 위험이 있으며 훈련의 기회가 적기 때문에 문제점을 가지고 있다. 가상현실 기반 수술 시뮬레이션은 보다 안전하고 포괄적인 경험을 할 수 있는 훈련을 제공한다.

가상현실 기반 수술 시뮬레이션의 주요 이슈는 가상 장치와 수술장비 사이의 상호작용을 현실감 있게 제공하는 것이다. 이를 위해 가상 장치의 사실적인 물리적 움직임, 수술도구와 가상 장치 사이의 상호작용의 메커니즘, 사실적인 렌더링, 수술도구의 피드백을 전달하는 햅틱 등 많은 분야를 포함하고 있다. 본 논문에서는 가상 장치의 물리적 성질을 물리 기반 모델링을 통해 정의하고 그것의 움직임을 시뮬레이션 하고 사용자의 상호작용에 따른 적절한 햅틱 피드백을 생성하는 방법을 다루고 있다. 가상 장치의 사실성을 위해 이중 물성을 고려할 수 있는 모델로 시뮬레이션 되어야 한다. 하지만, 기존의 표면 데이터 기반 모델링의 경우 구조상 물체 내부의 성질을 반영 할 수가 없다. 또한, 햅틱 피드백은 시각 피드백과 다른 채널로 사용자에게 전달 되기 때문에 햅틱 모델의 요구 조건이 다르다. 따라서, 모델 하나로 시각적 변형과 햅틱 피드백을 모두 계산 하는 것은 한계가 있다.

본 논문에서는 가상 물체 내부의 성질을 표현 할 수 있는 복셀 기반 볼륨 데이터를 이용한 물리 기반 모델과 기존 S-Chain 알

고리즘[6]을 이용한 햅틱 피드백을 계산할 수 있는 햅틱 모델을 구현하고 볼륨 데이터로 인한 계산 량을 줄일 수 있고 서로 구조가 다른 가변형 모델과 햅틱 모델 사이의 동기화를 할 수 있는 적응성 질량-스프링 기법을 제안한다.

## 2. 관련 연구

최근 사용자의 상호작용에 따른 가상 물체의 적절한 변형과 햅틱 피드백을 동시에 제공하는 수술 시뮬레이션 프레임워크에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이런 연구들의 목표 중 하나는 변형과 햅틱 시뮬레이션을 동시에 할 때 생기는 큰 계산 복잡도를 줄이는 데 있다. Suzuki 등[1]은 가상 모델을 구형 파티클을 이용하여 모델링 함으로써 모델의 구조를 간략하게 만드는 방법으로 시뮬레이션을 하였으며, Choi 등[2]은 여러 단계의 계층 구조를 가진 모델을 이용하여 사용자가 상호작용으로 생성한 힘의 크기에 따라 단계별로 모델을 제공하였다. 이와 같은 모델은 인간이 햅틱 피드백과 시각 피드백을 인지하는 채널이 다름에도 불구하고 한 개의 모델로 두 개의 피드백 모두를 계산하고 있기 때문에 모델의 자유도, 구조, 지배 방정식 등을 간략하게 하는 방법으로 계산 복잡도를 줄이고 있으며 결과적으로 시뮬레이션 결과의 질이 떨어질 수 밖에 없다. Galoppo 등[3]이 제안한 모델은 충돌모델, 변형모델로 구분하여 시뮬레이션 함으로써 시뮬레이션 결과의 질을 악화시키지 않고 시뮬레이션 할 수 있도록 하였다. 또한, Kim 등[4]이 제안한 듀얼 모델도 햅틱 모델, 변형모델을 나누어서 시뮬레이션을 하고 있다. 하지만, 한 개의 물체를 두 개 이상의 모델로 나눌 경우 두 모델 간의 동기화가 제대로 이루어지지 않는다면 사용자는 괴리감을 느낄 수 밖에 없다.

### 3. 개요

본 논문에서 구현한 수술 시물레이션 프레임워크는 시각적 피드백을 생성하는 시각모델과 햅틱 피드백을 생성하는 햅틱 모델을 포함하고 있다. 시각 모델은 일반적인 표면 메쉬 모델이고 햅틱 모델은 볼륨 모델이기 때문에 구조적인 차이로 인한 괴리감을 줄이기 위해 두 모델의 구조를 일치 시킬 필요가 있다. 우리는 표면 시각모델을 복셀화하여 볼륨 구조를 가지도록 가변형 모델을 생성하였다. 4 장은 볼륨 가변형 모델, 5 장은 햅틱 모델, 6 장은 두 모델을 동기화 하는 적응성 질량-스프링 기법에 대한 설명을 기술 한다

### 4. 시각 모델과 가변형 모델

볼륨 데이터를 반영한 변형을 시물레이션 하기 위해 표면 데이터 기반 시각 모델을 볼륨 데이터를 반영할 수 있는 구조를 가진 모델로 만드는 것이 반드시 필요하다. 우리는 볼륨 데이터를 반영할 수 있는 가변형 모델을 시각 모델을 복셀화(voxelization) 하여 만들었다. 시각 모델의 표면 삼각형 점의 위치를 기반으로 표면 복셀(voxel)을 생성하고 모델의 내부는 3 차원 플러드 필(flood fill) 알고리즘[8]을 이용하여 생성 하였다. 이 방법은 표면 삼각형이 복셀의 크기보다 클 경우에 복셀화 결과의 정확성이 떨어진다. 하지만, 복셀화 기법은 본 논문의 범위를 벗어나므로 심도 있게 다루지는 않겠다. 아래 그림 1 과 같은 3 차원 질량-스프링 요소를 이용하여 볼륨 데이터의 기본 요소인 복셀(voxel)을 표현 하였다.

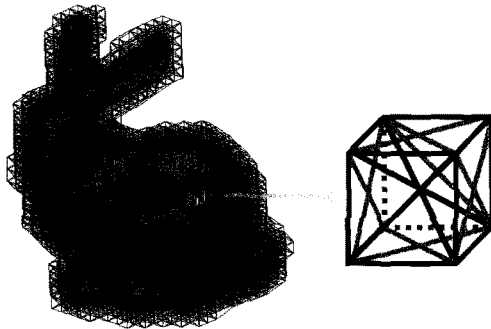


그림 1: 질량-스프링 모델의 기본요소

질량-스프링 요소는 형태 스프링과 휘어짐 스프링 2 종류의 스프링 요소를 가지고 있다. 질량의 3 차원 위치를  $p(x, y, z)$ 로 표현하자. 그림 1 에서 붉은색 스프링은 형태 스프링으로  $p(x, y,$

$z)$ 와  $p(x+1, y, z), p(x, y+1, z), p(x, y, z+1)$  사이를 연결한다. 물체에 작용하는 힘이 압축이나 팽창을 유발 할 경우 형태 스프링이 작용한다. 그림 1 에서 푸른색 스프링은  $p(x, y, z)$ 와  $p(x+1, y+1, z), p(x+1, y, z+1), p(x, y+1, z+1), p(x+1, y+1, z+1)$  사이를 연결하는 스프링을 휘어짐 스프링이라 하며 물체에 작용하는 힘이 물체의 휘어짐을 유발할때 작용한다.

질량-스프링 모델은 빠르고 효과적으로 물리 기반 변형체 시물레이션을 할 수 있는 방법으로 우리는 일반적인 질량-스프링 해석의 방법을 이 모델을 해석하는데 적용하였다. 식 (1)은 일반적으로 사용되는 질량-스프링 방정식이다. 여기서  $M$  은 질량 행렬  $K$  는 스프링상수 행렬  $\Delta$  는 변위  $b$  는 제동(damping)상수 이다.

$$M\ddot{\Delta} + K\Delta + b\dot{\Delta} = F \quad (1)$$

식 (1)은 2 차 미분 방정식으로 실시간으로 해를 찾는 것은 불가능 하다. 우리는 실시간으로 해를 찾기 위해 식(1)의  $M$  행렬을 집중질량(lumped mass) 행렬을 통해 대각행렬로 변환하고 역행렬을 취하면 식(2)와 같이 정리 할 수 있다.

$$\ddot{\Delta} = M^{-1}(F - K\Delta - b\dot{\Delta}) \quad (2)$$

Taylor 급수 전개를 이용하여 식 (3)과 같이 가속도를 변위의 식으로 표현할 수 있다.

$$\ddot{\Delta}_t = \frac{\Delta_{t+1} - 2\Delta_t + \Delta_{t-1}}{(time\ step)^2} \quad (3)$$

$$\Delta_{t+1} = 2\Delta_t - \Delta_{t-1} + \ddot{\Delta}_t (time\ step)^2$$

따라서,  $\Delta_{t+1}$  는  $\Delta_{t-1}, \Delta_t$  의 값과 식(2)에서 구할 수 있는  $\ddot{\Delta}_t$  값 을 통해 구할 수 있게 된다.

변형 모델은 복셀을 기본 요소로 변형을 시물레이션 하기 때문에 물체의 움직임은 요소의 변위로 표현 된다. 그림 2 와 같이 실제 시각 모델 임의의 점에서 거동은 이웃하는 질량-스프링 요소 절점의 값을 보간 하여 정해진다. 평균값 좌표는 닫힌 3 차원 도형의 보간 값을 찾는 좋은 방법이라고 알려져 있다[5]. 평균값 좌표를 통해 시각 모델의 모든 점에서 이웃하는 질량-스프링 요소 절점들에 대해 정규화된 고유 가중치( $\lambda$ )를 미리 계산하고 식(4)를 이용하여 미리 계산한 가중치와 이웃하는 질량-스프링 요소 절점의 값을 이용하여 보간 값을 손쉽게 계산할 수 있다.

$$\sum_{i=0}^n \lambda_i v_i = v \quad (4)$$

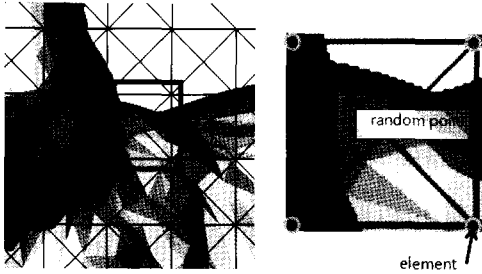


그림 2: 임의의 점에서 보간

데이터가 그림 3 과 같이 이종 물질을 포함 할 경우, 각각의 육면체 요소가 표현할 물질의 성질을 육면체 요소의 스프링 계수를 이용하여 미리 정의 한다. 그림 2 에서 푸른 부분과 붉은 부분의 사면체 요소의 스프링 계수를 표현할 물질의 탄성에 따라 각각 다른 값을 넣는다.

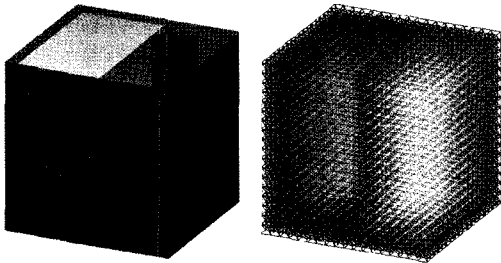


그림 3: 이종 물질의 표현

## 5. 햅틱 모델

4 절에서 설명한 질량-스프링 해석은 가상 물체의 거동을 빠르게 계산 할 수 있지만, 햅틱 렌더링에는 적절하지 않다. 그 이유는 햅틱 렌더링은 최소 1,000hz 이상의 초고속 리프레쉬를 요구하며 질량-스프링 해석과정을 이를 만족시킬 수 없기 때문이다. 따라서, 앞 절에서 설명한 질량-스프링 모델 이외에 햅틱 렌더링만 계산 할 수 있는 별도의 모델이 필요하다. Shape retaining chain linked (S-Chain) 모델은 햅틱 렌더링에 적합한 모델임이 증명된 바 있다. [6][7] S-Chain 모델도 질량-스프링 모델과 마찬가지로 물체를 작은 요소인 체인으로 분할하여 모델링 한다. 질량-스프링 모델의 육면체 요소와 같이 S-Chain 은 기본

요소는 체인이다. 그림 4 은 체인 요소의 개념도이다.

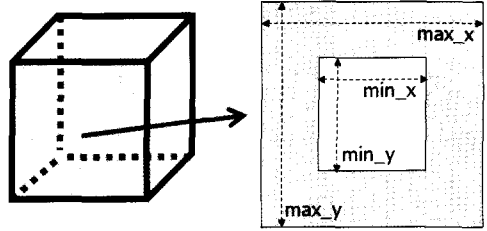


그림 4: S-Chain 모델의 기본요소

$x_{max}$  는 체인이  $x$  축 위에서 이완 될 수 있는 최대 거리이며  $x_{min}$  은 체인이 압축될 수 있는 최대 거리이다.  $y_{max}$  와  $y_{min}$  은  $y$  축 위에서  $z_{max}$  와  $z_{min}$  은  $z$  축 위에서 체인의 움직임을 제한한다. 이들 6 가지 변수는 체인이 이완되거나 압축될 수 있는 경계조건이며 물체의 성질을 표현 할 수 있다. 움직일 수 있는 면적이 작은 체인은 딱딱한 물질을 움직일 수 있는 면적이 넓은 체인은 부드러운 물질을 나타낸다. S-Chain 모델은 그림 5 과 같이 외력(external force)으로 인해 물체가 변형 될 때, S-Chain 모델도 상응하는 거동을 계산한다. S-Chain 모델은 아래의 절차를 통해 모든 체인이 경계조건을 만족하도록 체인의 위치를 이동한다.

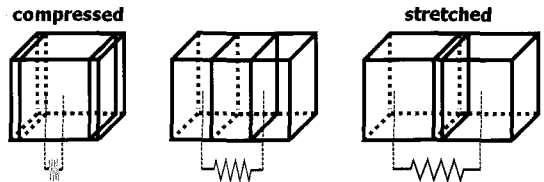


그림 5: 체인 요소의 경계 조건

S-Chain 모델은 힘 피드백을 식(5)와 같이 움직인 체인의 개수에 비례하게 계산하고 있다.

$$F_{net} = \sum_{i=1}^{\text{\# of activated chain}} k_i \Delta_i \quad (5)$$

## 6. 적응성 질량-스프링 기법

질량-스프링 모델에서 목표하는 모델의 해상도가 높아지면 분할된 요소의 개수가 늘어나게 되고 시뮬레이션의 복잡도가 증가하여 실시간 시뮬레이션에 큰 방해가 된다. 더욱이, S-Chain 모델의 고속 리프레쉬 요구에 맞춰 질량-스프링 모델과

S-Chain 두 모델을 동시에 실시간으로 시물레이션 하는 것은 힘들다. 이 절에서는 앞서 설명한 두 모델을 실시간으로 시물레이션 하기 위한 방법을 제시 한다. 요소의 숫자를 줄이고 지배 방정식의 차수를 줄이는 방법으로 모델의 해석 시간을 줄이는 시도는 많이 되어 왔지만 해석의 결과의 질이 다소 떨어지기 때문에 본 연구에서는 적응성 알고리즘을 사용하여 해석 결과의 질을 보존하고 해석시간을 줄일 수 있는 적응성 알고리즘을 이용하였다. 시물레이션의 매 타임 스텝마다 한정된 컴퓨터의 자원을 이용해서 모델을 해석한다. 일반적으로 이 자원은 모든 요소에 균등하게 분배되고 있다. 적응성 알고리즘은 해석 시간과 관련된 시물레이션의 성능을 올리기 위해서 주어진 자원을 필요한 요소에 많이 배치하고 필요 없는 요소에는 적게 배치하여 효율적으로 자원을 분배하는 알고리즘이다.

제안한 적응성 알고리즘의 자원 분배 정책은 S-Chain 을 이용한다. S-Chain 은 5 절에서 설명하였듯 힘 피드백을 계산하는 햅틱 모델이다. S-Chain 은 국부적인 변형을 계산하고 변형된 체인요소의 숫자에 비례해서 힘을 생성하고 있다. S-Chain 모델은 변형을 아래 절차에 따라 국부적으로 계산한다.

1. 사용자와 상호작용 할 체인 요소를 찾는다.
2. 1에서 찾은 체인요소를 사용자의 상호작용을 반영하여 위치를 갱신한다.
3. 갱신된 체인요소의 주변 체인이 각각 경계조건을 만족하는지 판단한다.
4. 주변 체인이 경계조건을 만족하도록 위치를 갱신하고 위치가 갱신된 체인에 대해서 3 번을 반복적으로 수행한다.

그림 6에서 위치가 갱신된 체인요소(그림 6의 붉은색 선)를 활성 체인이라 하자. 이 활성 체인은 상호작용이 일어나는 요소 주변에 분포해 있음을 알 수 있다.

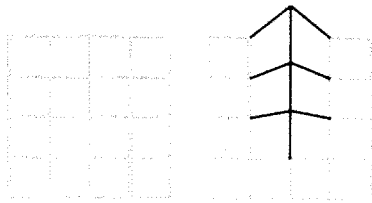


그림 6: 활성 체인

각 체인 요소에서 계산되는 힘 피드백은 각 체인 요소가 변형된 정도에 비례하며, 요소의 탄성 에너지는 식(6)과 같이 변위의 대한 2 차 함수가 된다. 만약, 질량-스프링 모델의 요소와 체인의 요소의 해상도가 일치 하다면, S-Chain 모델에서의 활성 체인은 질량-스프링 모델에서 변형이 일어날 부분의 예측이라고 가정했다.

$$U_{elastic} = \frac{1}{2} k \Delta^2 \quad (6)$$

우리는 이 활성체인 요소를 질량-스프링 모델의 요소에 반영하였다. 그림 7과 같이 질량-스프링 해석을 요소 전체에 걸쳐 하지 않고 활성화된 요소만 반영함으로써 시물레이션의 스케일을 줄일 수 있고, 시간복잡도도 줄일 수 있다.

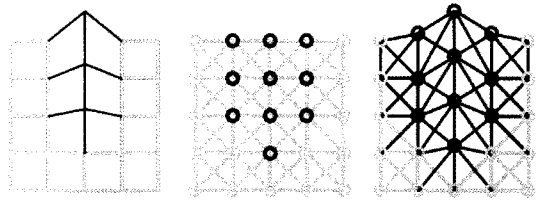


그림 7: 적응성 질량-스프링 기법

이 적응성 알고리즘은 상호작용이 일어나는 부분만 변형을 계산하기 때문에 전체적인 작은 변형을 반영할 수 없다. 논문에서 제안하는 유연체 시물레이션은 내시경 수술을 위한 기반 기술이다. 내시경 수술에서는 상호작용이 일어나는 부분만 카메라를 통해 보여지기 때문에 전체적인 작은 변형은 무시될 수 있다. 또한, 가상 물체 자체를 크게 변화 시키는 경우, 이 적응성 알고리즘의 이점이 거의 없다. 따라서, 시물레이션 중에도 변형의 정도에 따라 시물레이션의 성능이 계속 변하게 된다.

## 7. 수술 시물레이션 프레임 워크

이 장에서는 이전 장에서 설명한 각각의 모델의 관계를 정의하고 전체적인 프레임워크에 대해서 서술한다. 전체적인 프레임워크를 설명하기에 앞서 각각의 모듈간의 관계에 대해서 정의한다.

그림 8에서 햅틱 모델은 S-Chain 모델로 체인요소의 강성, 위치 정보를 담고 있다. 햅틱 장비는 3 차원 입력장치로 햅틱 모델에 커서의 입력 정보를 전달 한다. 햅틱 모델은 햅틱 장비의 3 차원 입력을 계산하여 힘 피드백을 햅틱 장비에 전달 한다.

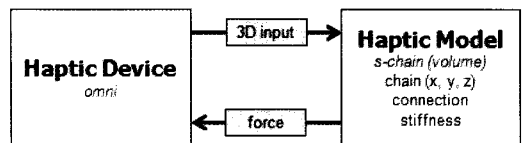


그림 8: 햅틱 모델

그림 9에서 햅틱 모델은 활성 체인요소를 행동 모델로 전달한

다. 행동 모델은 질량-스프링 모델로 활성화된 질량을 중심으로 변형을 계산하게 된다.

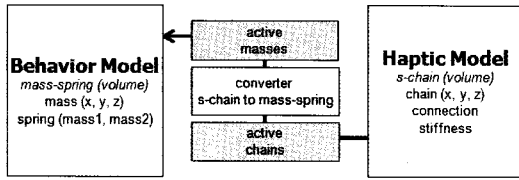


그림 9: 햅틱 모델과 행동 모델 간의 관계

행동 모델 요소에서의 변형이 계산 되면 실제 모델의 임의 점에서 값을 보간 해야 한다. 그림 10 은 행동 모델의 변형의 정보를 바탕으로 보간을 통해 시각 모델의 변형을 생성하였다. 시각 모델은 표면 모델이지만, 행동 모델의 변형 정보를 기반으로 보간을 하였기 때문에 볼륨 변형을 반영 할 수 있다.

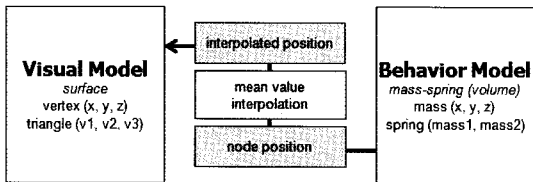


그림 10: 행동 모델과 시각 모델 간의 관계

실시간 시뮬레이션을 위한 모델들의 요구 조건은 다르다. 햅틱 모델은 1초에 1,000 번 업데이트 되어야 하지만 행동, 시각 모델은 1초에 30 번만 업데이트 되면 된다. 따라서, 붉은 색의 화살표로 표현된 햅틱 알고리즘과 관련된 부분은 1,000Hz 를 만족하도록 하고 푸른 색으로 표현된 변형과 시각 알고리즘과 관련된 부분은 30Hz 만 만족하도록 디자인 하였다.

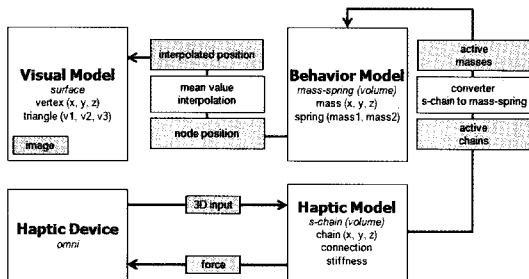


그림 11: 프레임 워크 개요도

## 8. 실험 결과 및 분석

### 8.1 구현 결과

우리는 설명한 방법으로 수술 시뮬레이션을 할 수 있는 프레임워크를 개발 하였다. 이 절에서는 개발한 프레임의 결과와 분석을 보여준다. 실험에 사용된 데이터는 3 차원 박스형태의 데이터와 간 모델 데이터 2 가지로 3 차원 박스형태의 데이터는 실험의 결과를 잘 보여 줄 것이고, 간 모델 데이터는 우리 프레임워크가 일반적인 상황에도 잘 적용이 됨을 증명 할 것이다.

### 8.2 변형

그림 12 는 가상물체를 복셀로 표현한 결과 이다. 그림의 첫 번째와 두 번째 그림은 복셀의 크기가 서로 다르다. 복셀의 크기를 작게 할수록 높은 해상도로 물체를 표현 하기 때문에 정확한 시뮬레이션이 가능하지만 요소의 숫자가 늘어나게 되어 시뮬레이션의 시간이 오래 걸리게 된다.



그림 12: 간 모델의 복셀화

표 1 은 복셀의 숫자에 따른 햅틱 모델과 시각 모델의 성능을 측정한 결과 이다. 햅틱 모델은 로컬 알고리즘인 S-Chain 모델을 이용하기 때문에 복셀 숫자가 늘어나도 큰 성능 저하가 없지만 시각 모델은 복셀의 숫자가 증가함에 따라 계산 복잡도가 증가 하기 때문에 성능의 감소를 보인다.

# of voxels	Haptic (fps)	Visual (fps)
1,000	1,000	60
3,375	1,000	60
8,000	1,000	60
15,625	1,000	60
27,000	1,000	60
42,875	1,000	42
64,000	1,000	35

표 1: 복셀 숫자에 따른 성능

그림 13 은 박스형태의 가상 물체를 변형하는 것을 보여주고 있다. 왼쪽 그림은 S-Chain 모델, 가운데 그림은 질량-스프링 모

델, 오른쪽 그림은 시각 모델을 보여주고 있다.

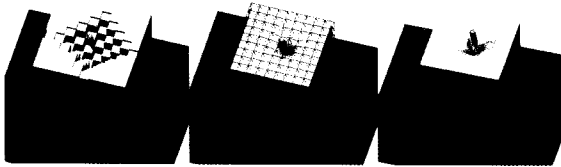


그림 13: 변형 시뮬레이션 과정

그림 14는 적응성 질량-스프링 기법으로 변형이 될 부분을 S-Chain 모델을 이용하여 예측하고 활성 요소를 결정하는 모습을 보여준다.

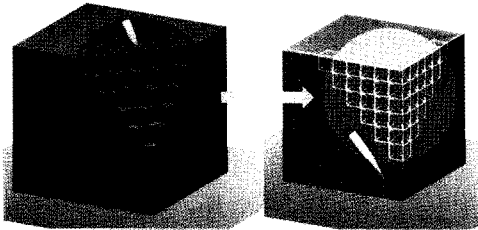


그림 14: 적응성 질량-스프링 기법

우리는 적응성 질량-스프링 기법이 변형이 될 부분을 맞게 예측하는지 실험을 통해 검증한다. 실험을 통해 적응성 질량-스프링 기법을 통한 변형 시뮬레이션의 오차를 계산하고 이 오차가 무시할 정도로 작음을 보인다. 변형 결과의 오차는 식(7)을 이용하여 적응성 질량-스프링 기법으로 계산한 변형 결과와 기존의 질량-스프링 알고리즘으로 계산한 결과의 부피의 차이를 계산한다.

$$error = \frac{\# \text{ of activated element}}{\sum_i} \left[ Volume_{original}^{(i)} - Volume_{our}^{(i)} \right] \quad (7)$$

표 2는 활성화된 체인의 숫자와 예측 레벨에 따른 오차를 보여준다. 예측 레벨은 예측된 범위를 초과하는 요소의 범위를 나타낸다. 예를 들어, 1 레벨 예측은 예측된 범위에서 1 개의 요소를 더 활성화시킨다.

	0 ~250	250 ~500	500 ~750	750 ~1000	1000 ~1250	1250 ~1500	1500 ~1750	1750 ~2000
0 level	6.1%	5.8	5.6	5.2	5.1	4.9	4.2	4.0
1	4.9	5.0	4.8	4.7	4.5	4.0	3.8	3.7
2	4.2	4.1	4.0	4.1	3.9	3.9	3.6	3.6
3	3.8	3.7	3.6	3.8	3.7	3.7	3.5	3.3
4	3.0	2.7	2.8	2.9	2.8	2.8	2.7	2.7
5	2.4	2.3	2.0	2.3	2.4	2.4	2.5	2.5

표 2: 예측 레벨에 따른 오차

활성화된 요소의 개수가 많을수록 오차는 감소한다. 왜냐하면, 활성화된 요소의 개수가 늘어날수록 질량-스프링의 구조가 실제 모델과 점점 가까워지기 때문이다. 아래 그림 15는 높은 레벨일수록 오차가 작으며 1 레벨 예측부터 오차가 5%이하인 것을 알 수 있다. 또한, 2 레벨 예측부터 감소되는 오차의 양이 1% 이하인 것을 볼 수 있다. 본 프레임워크는 1 레벨 예측을 이용하여 시뮬레이션을 한다.

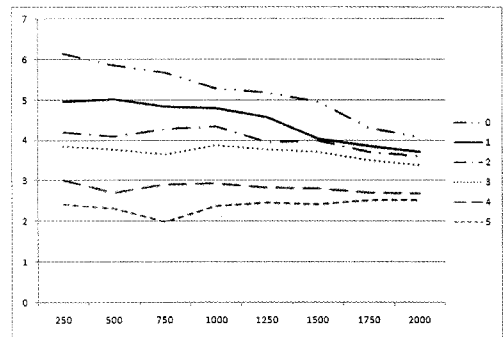


그림 15: 표 2의 그래프

표 3은 세가지 다른 알고리즘을 이용하여 여러 가지 모델에 적용시켰을 때 성능을 보여준다. 적응성-질량 스프링 기법을 이용한 모델일 경우 시각 모델의 요소의 숫자가 늘어나도 성능 저하가 매우 미미한 것을 볼 수 있다.

Model	# of elements (Face)	Mass-Spring Model	Linear FEM	Our Method
Liver	7,366	60 fps	60 fps	60 fps
Box	10,800	40	40	60
Bunny	15,192	15	20	52
Armadillo	32,392	10	10	50

표 3: 시각 모델의 성능 실험

하지만, 사용자의 상호작용이 큰 변형을 유발하게 되면 적응성 질량-스프링 기법을 통해 얻는 이득은 거의 없게 된다. 왜냐

하면, 변형이 될 것이라고 예측된 요소의 숫자가 매우 많거나 거의 모든 요소를 포함하기 때문이다. 만약 상호작용이 적절한 수준의 변형만 유발한다면 표 4와 같이 오차가 5% 이내의 변형을 계산할 수 있다.

	Pull (%)	Push (%)
Box	2.4	-2.8
Liver	1.8	-1.2
Bunny	1.4	-2.3
Armadillo	2.1	-1.9

표 4

표 4의 결과에 따르면 기존의 질량-스프링 알고리즘이 적응성 질량-스프링 기법에 비해 좀 더 큰 변형을 유발하는 것을 알 수 있다. 그림 16은 이 두 알고리즘간의 차이를 보여준다.

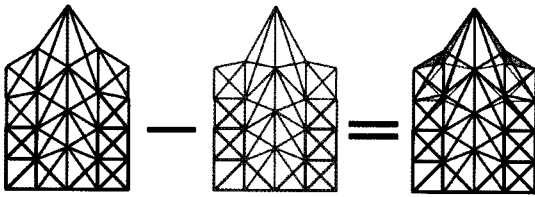


그림 16: 기존 알고리즘과 적응성 알고리즘의 오차

### 8.3 이중 물질 표현

그림 17은 붉은색 박스형태의 가상 물체 안에 푸른색의 가상 물체가 있는 볼륨데이터를 보여준다. 푸른색의 가상 물체는 붉은 색보다 더 딱딱한 물성을 가진다. 왼쪽 그림의 녹색 부분에 하중을 주었을 때, 오른쪽 그림은 변형을 시뮬레이션한 결과이다. 내부에 물체가 있는 쪽이 더 딱딱한 물체이므로 변형이 덜 됨을 볼 수 있다.

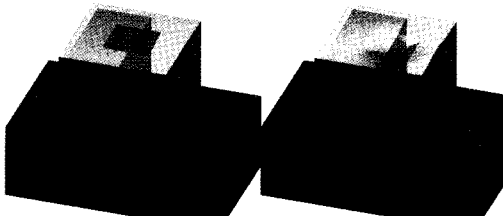


그림 17: 이중 물질 표현 (붉은 박스, 푸른 박스)

그림 18은 간 모델 안에 푸른색의 암 조직이 있는 시나리오이

다. 프레임워크는 변형을 계산할 때, 간 모델뿐만 아니라 내부의 암 조직도 알맞게 변형이 됨을 볼 수 있다.

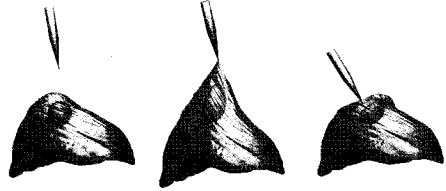


그림 18: 이중 물질 표현 (간 모델, 암 조직)

## 9. 결론

이 논문에서 우리는 가상 수술 시뮬레이션의 기반 기술이 될 수 있는 유연체 시뮬레이션 프레임워크를 설계하고 구현하였다. 이 프레임워크는 가상 환경에서 시뮬레이션 할 가상 물체에 대한 모델을 제공하고 사용자가 햅틱장비를 통해 가상 물체와 상호작용 할 수 있는 환경을 제공한다.

역감을 생성할 수 있는 햅틱 모델과 시각적 변형을 표현하는 가변형 모델을 동시에 시뮬레이션 함으로써 시각, 촉각 피드백의 요구 조건을 동시에 만족 가능한 프레임워크이다. 햅틱 모델은 S-Chain 모델로 사용자의 상호작용에 따라 실시간에 역감을 전달하고 있고 가변형 모델은 물리 기반 변형체 알고리즘을 이용하여 상호작용에 알맞은 사실적인 변형을 계산하고 있다.

제안한 적응성 질량-스프링 기법은 햅틱 모델의 정보를 가변형 모델에 전달함으로써 두 모델을 동기화 시키며 이를 통해 사용자가 느낄 수 있는 괴리감을 최소화 시킬 수 있었고 변형될 부분을 미리 예측함으로써 볼륨데이터를 사용함으로써 생기는 계산 복잡도를 낮추고 시뮬레이션을 실시간으로 할 수 있었다. 또한, 보간을 통해 시각 모델에도 물체 변형의 정보를 반영함으로써 시각모델의 해상도를 유지하면서 변형 시뮬레이션을 가능하게 하였다.

차 후에 진행될 연구에서 물성을 표현하기 위해 사용된 여러 가지 변수를 보다 사실적인 시뮬레이션을 위해서 실제 물성을 측정하는 방법을 통해 정할 필요가 있다. 본 수술 시뮬레이션 프레임워크에서는 위상변이를 전혀 고려하지 않았지만 절개, 봉합 등 위상변이를 동반한 시뮬레이션을 지원할 수 있도록 변형 모델을 발전 시킬 예정이다.

## 감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (KRF-2006-311-D00803)



## 참고 문헌

- [1] N. Suzuki and S. Suzuki, "Surgery simulation system with haptic sensation and modeling of elastic organ that reflect the patient's anatomy," *Lecture Notes in Computer Science (International Symposium Surgery Simulation and Soft Tissue Modeling 2003)*, vol. 2673, pp. 155-164, 2003.
- [2] Kup-Sze Choi, Hanqiu Sun, and Pheng-Ann Heng, "Interactive deformation of soft tissues with haptic feedback for medical learning," *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 7, no. 4, pp. 358-363, 2003.
- [3] Stephane Redon, Nico Galoppo, and Ming C. Lin, "Adaptive dynamics of articulated bodies," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 24, no. 3, 2005.
- [4] Sangyoun Kim, Sekil Park, DS Kwon, and Jinah Park, "A Hybrid Approach for Real-time Haptic and Graphic Simulator in Virtual Environment," *IEEE ROMAN 2007*, 2007.
- [5] Michael S. Floater, Géza Kós, and Martin Reimers, "Mean value coordinates in 3D," *Computer Aided Geometric Design*, vol. 22, no. 7, pp. 623-631, 2005.
- [6] Jinah Park, Sang-Youn Kim, and Dong-Soo Kwon, "Mechanical Representation of Shape-retaining Chain Linked Model for Real-time Haptic Rendering," *Lecture Notes in Computer Science (Medical Simulation 2004)*, pp.144-152, 2004.
- [7] Jinah Park, Sang-Youn Kim, Seung-Woo Son, and Dong-Soo Kwon, "Shape Retaining Chain Linked Model for Real-time Volume Haptic Rendering," in *Proc. of IEEE/Siggraph Symposium on Volume Visualization and Graphics*, 2002.
- [8] D. Haumont and N. Warzee, "Complete polygonal scene voxelization," *ACM Journal of Graphics Tools*, vol. 7, no. 3, pp. 27-41, 2002.

## 〈저자소개〉

### 조재환

- 2006년 8월 한국정보통신대학교 컴퓨터공학 (학사)
- 2009년 8월 한국과학기술원 정보통신공학 (석사)



### 박진아

- 1988년 5월 Columbia University 전자공학 (학사)
- 1991년 5월 University of Pennsylvania 컴퓨터비전 (석사)
- 1996년 8월 University of Pennsylvania 컴퓨터그래픽스 (박사)
- 1996년 6월 ~ 1998년 11월 University of Pennsylvania 박사후 연구원
- 1999년 3월 ~ 1999년 8월 충남대학교 시간강사
- 1999년 9월 ~ 2002년 9월 한국과학기술원 연구교수/초빙교수
- 2002년 9월 ~ 2007년 2월 한국정보통신대학교 조교수
- 2007년 3월 ~ 2009년 2월 한국정보통신대학교 부교수
- 2009년 3월 ~ 현재 한국과학기술원 부교수

