

# 복강경 수술 시뮬레이션을 위한 간 모델의 다중 모델구조 및 사상 기법 Multi-model Structure and Mapping Method of Liver Model for Laparoscopic Surgery Simulation

\*김영준<sup>1</sup>, 박세형<sup>1</sup>, 김래현<sup>1</sup>, 이득희<sup>1</sup>, 신상균<sup>1</sup>, 곽현수<sup>1</sup>, 김정식<sup>2</sup>

\*Y. J. Kim (junekim@kist.re.kr)<sup>1</sup>, S. H. Park<sup>1</sup>, L. H. Kim<sup>1</sup>, D. H. Lee<sup>1</sup>, S. K. Shin<sup>1</sup>, H. S. Kwak<sup>1</sup>, J. S. Kim<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> 한국과학기술연구원 지능인터랙션센터, <sup>2</sup> 한국과학기술원 기계공학과

Key words : multi-model, laparoscopic surgery, simulation, barycentric coordinate mapping

## 1. 서론

복강경을 이용한 수술은 회복 시간이나 통증을 획기적으로 줄일 수 있도록 수술 부위를 최소로 절개한 후 절개 부위를 통해 내시경과 수술 기구를 삽입하여 수술하는 방법이다. 하지만, 이 시술법은 좁은 시야, 원근감의 부재, 접촉감 전달 미흡, 수술 기구의 피벗 운동 등으로 인하여 전통적인 절개술에 비해 고난이도의 시술법으로서, 기술 습득이 매우 어렵다. 최근 들어 이러한 문제점을 해결하기 위하여 복강경 수술을 가상 공간 상에 사실적으로 재현함으로써 환자에 대한 위험 부담 없이 술기를 습득할 수 있는 가상 수술 훈련 시뮬레이션(simulation)이 시도되고 있다 [1-10]. 복강경 시뮬레이터는 실제 복강경 및 수술 도구와 동일한 장치를 사용자가 다루게 되고 가상 현실 기술을 통해 3 차원 그래픽으로 영상 정보를 제공하며 햅틱(haptic) 기술로 장치에 느껴지는 촉각 정보를 활용할 수 있게 한다. 가상 복강경 수술 시뮬레이션에 있어서 중요하게 고려되어야 할 요소는 실제감 있는 그래픽 정보와 충실한 촉각 정보를 실시간(real-time)으로 제공하는 것이다. 특히 사용자가 가상 수술에 몰입하기 위해서는 내장 기관의 성질이 실감나게 표현이 되어야 하며, 수술도구 또는 다른 내장 기관과의 상호작용이 잘 표현되어야 한다. 복강경 수술의 대상이 되는 내장 기관은 대부분 연조직(soft tissue)으로서 이에 대한 변형체 모델의 계산은 유한요소모델(Finite Element Model, FEM) 또는 질량-스프링(mass-spring) 모델 등이 주로 사용된다. 변형체 모델 계산 시 수많은 요소들로 표현된 내장 기관 모델에 대하여 물리기반(physics-based) 거동이 계산되는데, 이러한 많은 양의 계산을 실시간으로 처리하기 위하여 여러 가지 방법이 시도되고 있다. 더욱이 수술도구 및 다른 내장 기관과의 충돌 검사, 자체 충돌(self-collision) 검사, 그리고 햅틱 감각을 표현하기 위한 반력 계산 등도 실시간으로 함께 이루어져야 한다. 일반적으로 자연스러운 시뮬레이션을 위하여서는 그래픽 렌더링(rendering)의 경우 25 Hz 이상, 햅틱 렌더링의 경우 500 Hz 이상의 고속 계산이 요구된다 [3, 11]. 본 논문에서는 이를 해결하기 위하여 내장 기관에 대하여 다중 모델(multi-model)을 구성하고, 각 모델 사이의 사상(mapping)을 도입하여 서로 연동이 되게 하는 방법을 제안한다. 본 연구에서는 복강경 수술의 주된 대상인 간 모델에 대하여 다중모델 구조 및 사상 알고리즘을 적용하였다.

## 2. 방법론

간 모델의 시뮬레이션 시, 실시간의 빠른 계산 처리와 사실적인 시각화를 위하여 다중 모델의 계산 구조를 선정하였다. 가능한 다중 모델의 구성으로는, 1) 인체 장기의 거동에 대한 계산을 담당하는 거동 모델(behavior model)과 2) 실제 장기처럼 보여주기 위하여 높은 화질로 가시화하는 가시화 모델(visual model), 그리고 3) 충돌 검사를 담당하는 충돌 모델(collision model)이 있다. 다중 모델 계산 구조를 이용하면, 변형체의 거동과 모델의 가시화를 담당하는 모델을 이원화함으로써, 빠른 변형 계산과 사실적인 가시화를 동시에 이룰 수 있다. 일반적으로, 거동 모델과 충돌 모

델은 저해상도의 거친(coarse) 메쉬(mesh)로, 가시화 모델은 고해상도의 세밀한(fine) 메쉬로 모델링한다 (Fig.1 참조). 이들 간의 자연스러운 사상 또는 보간(interpolation)은 어느 모델의 변형이 다른 모델의 형상 변화를 얼마나 자연스럽게 잘 반영시킬 수 있는냐를 결정한다. 또한 이러한 모델들 사이의 사상은 매우 빠른 속도로 계산이 처리되어야 한다. 예를 들어, 거동 모델이 수술 도구나 중력 등의 외부의 힘에 의해 변형되었을 때, 변형된 거동 모델을 기준으로 다른 모델들의 형상도 추가적인 시간 지연 없이 변형이 이루어져야 한다.

본 연구에서는 이를 해결하기 위하여 무게중심 좌표계(barycentric coordinates)를 이용하여 다중 모델의 사상에 적용하였다. 무게중심 좌표계는 사면체의 유한요소 메쉬 모델 사이의 보간에 매우 적합하며, 무게중심 좌표계를 이용한 보간은 다음 식과 같이 사면체의 네 꼭지점(vertices)의 함수 값의 가중 합(weighted sum)으로 보간 함수를 표현한다.

$$f(\vec{x}) = f\left(\sum_{k=1}^4 \lambda_k \vec{v}_k\right) = \sum_{k=1}^4 \lambda_k f(\vec{v}_k) \quad (1)$$

$\forall \vec{x} \in \text{the tetrahedral volume with vertices } \vec{v}_1 \cdots \vec{v}_4$

한편, 좌표계의 선형성(linearity)을 가정할 때, 무게중심 좌표계로부터 직각 좌표계(Cartesian coordinates)로의 변환 행렬  $A$ , 즉  $A \cdot \vec{\lambda} = \vec{x}$  를 만족하는 변환 행렬이 반드시 존재한다. 한편, 사면체의 꼭지점들에 대한 사상에 대하여 다음의 식을 얻는다.

$$A \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \vec{v}_1, \quad A \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \vec{v}_2, \quad A \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \vec{v}_3, \quad A \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \vec{v}_4, \quad (2)$$

$$\text{thus } AI = A = \begin{pmatrix} v_{1x} & v_{2x} & v_{3x} & v_{4x} \\ v_{1y} & v_{2y} & v_{3y} & v_{4y} \\ v_{1z} & v_{2z} & v_{3z} & v_{4z} \end{pmatrix}$$

또한,  $\sum_{k=1}^4 \lambda_k = 1$  이므로 이를  $A$  와 결합하면 다음과 같다.

$$T\vec{\lambda} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \text{ where } T = \begin{pmatrix} v_{1x} & v_{2x} & v_{3x} & v_{4x} \\ v_{1y} & v_{2y} & v_{3y} & v_{4y} \\ v_{1z} & v_{2z} & v_{3z} & v_{4z} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\text{and thus } \vec{\lambda} = T^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

이제 역함수  $T^{-1}$  은 직각 좌표계(Cartesian coordinates)로부터 무게중심 좌표계(barycentric coordinates)로의 변환 행렬

이 된다. 따라서, 한 점  $\vec{x}$  에서의 보간 함수는 단순히 각 꼭지점의 함수값을  $\lambda$  만큼 가중시킨 합이 된다.

$$f_{\text{interp}}(\vec{x}) = \sum_{k=1}^4 \lambda_k f(\vec{v}_k) \quad (4)$$

사면체 메쉬 모델인 경우 위의 방법을 바로 적용하면 되고, 삼각형 메쉬 모델인 경우 각 삼각형들을 임의의 한 점(예를 들면, 모델의 중심점)과 연결하여 사면체를 임의로 구성하여 위의 방법을 적용한다.

### 3. 결과

Fig. 1 과 Fig. 2 는 다중 모델 및 무게중심 좌표계를 이용한 다중 모델 사이의 사상을 적용한 예시이다. 실험에 사용한 가시화 모델(visual model)은 20,892 개의 삼각형 요소로 구성되었으며, 거동 모델(behavior model)은 이를 단순화(decimation)한 데이터로서 824 개의 삼각형 요소를 가진다. 메쉬 단순화 작업에는 Rapidform™[12]이 사용되었다. 임의로 거동 모델의 형상을 변형시킨 후, 가시화 모델이 이를 따라서 변형하도록 무게중심 좌표계를 이용한 사상을 적용하여 보았다. 실험 결과, 실시간으로 모델간의 자연스러운 사상을 얻을 수 있었으며, 평균적으로 1200 fps 이상의 고속으로 사상 계산을 수행하였다. 다음으로, Fig. 3 에 본 연구에서 구성한 다중 모델 및 사상 기법을 적용하여 간과 수술 도구의 상호작용 시뮬레이션을 구현하여본 결과를 보였다. 간과 수술 도구의 충돌 검사 후 간 모델의 형상 변형 및 반력이 계산된다 [13]. 변형체 모델의 물리 기반 시뮬레이션은 경계요소법(Boundary Element Method, BEM)[14]을 사용하였으며, 변형 및 상호작용에 필요한 모든 계산은 200 fps 이상의 속도로 실시간 시뮬레이션이 구현되었다. 실험에는 Intel Core 2 Duo 3.0 GHz, 2 GB RAM 의 PC 가 사용되었다.

### 4. 결론

복강경 수술 시뮬레이션을 위한 간 모델의 다중 모델구조 및 사상에 대한 방법을 제안하였다. 모델 사이의 사상을 위하여 무게중심 좌표계를 이용한 사상 기법을 사용하였으며, 실험에서 확인한 사상에 대한 계산 속도는 1200 fps의 고속으로서, 실시간 복강경 시뮬레이션에의 적용 가능성을 입증하였다.

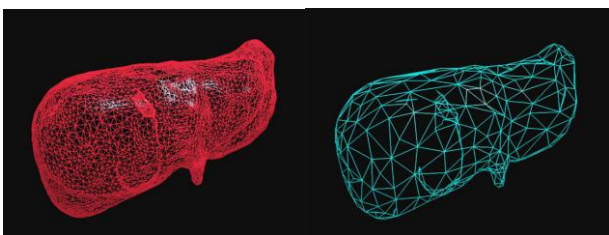


Fig. 1 Multi-model structure for a liver: visual model (left) and behavior/collision model (right).

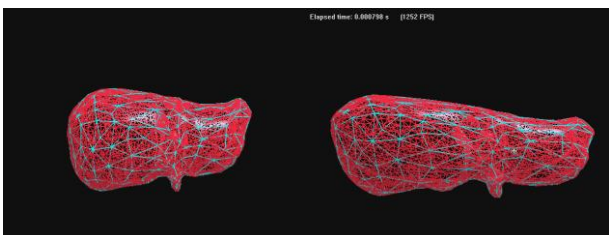


Fig. 2 Example of mapping between the models while an arbitrary deformation: before (left) and after the deformation (right). The deformed shape of the behavior model is smoothly transferred to the visual model with the speed of 1200 fps.

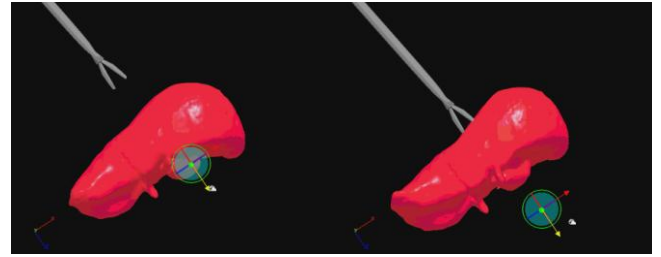


Fig. 3 Example of surgical simulation with deformable models. The liver model deforms while the user interactively manipulates the surgical instrument.

### 후기

본 연구는 문화체육관광부 및 한국문화콘텐츠진흥원의 2009년도 문화콘텐츠산업기술지원사업의 연구결과로 수행되었음

### 참고문헌

1. 박세형, 김래현, 이득희, 곽현수, 송수생, "최소침습 수술 훈련을 위한 시뮬레이션 시스템 개발," 제 2 차 대한의료로봇학회 학술대회, 30-31, 2009.
2. Lee, D.H., Kim, L.H., Kim, Y.J., and Park, S.H., "Hybrid Simulation for Laparoscopic Surgery," 2009 ICMIT, 2009.
3. 박진아, "의료시뮬레이션: 가상수술," 정보과학회지 특집 의료영상시스템, **23(10)**, 49-52, 2005.
4. Westebring, E.P, Putten, V.D. Goossens, R.H.M, Jakimowicz, J.J, and Dankelman, J., "Haptics in minimally invasive surgery - a review," *Minimally Invasive Therapy*, **17(1)**, 3-16, 2008.
5. Schijven, M. and Jakimowicz, J., "Virtual Reality Surgical Laparoscopic Simulators: how to choose," *Surgical Endoscopy*, **17(12)**, 1943-1950, 2003.
6. Basafa, E., Farahmand, F., and Vossoughi, G., "A Non-Linear Mass-Spring Model for More Realistic and Efficient Simulation of Soft Tissues Surgery," *Studies in Health Technology and Informatics*, **132**, 23-25, 2008.
7. Allard, J., Cotin, S., Faure, F., Bensoussan, P.J., Polyer, F., and Duriez, C., "SOFA: an Open Source Framework for Medical Simulation," *MMVR'15*, 13-18, 2007.
8. Montgomery, K., Bruyns, C, Brown, J., Sorkin, S., and Mazzella, F., "SPRING: A General Framework for Collaborative, Real-time Surgical Simulation," *MMVR'10*, 23-26, 2002.
9. Immersion co., <http://www.immersion.com/>
10. Symbionix co., <http://www.etrinsic.com/>
11. Jesper Mosegaard, "Cardiac Surgery Simulation - Graphics Hardware meets Congenital Heart Disease," PhD thesis, University of Aarhus, Denmark, 2006.
12. INUS Technology co., Rapidform, <http://www.rapidform.com/>
13. Kim, Y.J., Lee, D.H., Kim, L.H., and Park, S.H., "Mesh-to-Mesh Collision Detection by Ray Tracing for Medical Simulation with Deformable Bodies," 2010 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling, in review.
14. James, D.L. and Pai, D.K. "A Unified Treatment of Elastostatic Contact Simulation for Real Time Haptics," *Haptics-e: The Electronic Journal of Haptics Research*, ACM SIGGRAPH 2005 Courses, 2005.