

역동적 변형 솔리드를 이용한 좌심실 내·외벽의 운동 가시화*

최수미^U 이유경 김명희
이화여자대학교 공과대학 컴퓨터학과
(choism, 992COG20, mhkim)@mm.ewha.ac.kr

Epicardial and endocardial wall motion visualization of the left ventricle with dynamic deformable solids

Soo-Mi Choi^U Yu-Kyoung Lee Myoung-Hee Kim
Dept. of Computer Science and Engineering, Ewha Womans University

요 약

본 논문에서는 단일광자방출 전산화단층촬영영상 (SPECT)을 이용하여 좌심실의 내·외벽의 운동을 분리하여 추적하는 방법을 제시한다. 좌심실의 운동은 크게 평행이동, 회전이동, 비강체 변형으로 나뉘어 분석된다. 운동 추적을 위해 사용된 역동적 변형 솔리드는 물체중심 변동 좌표계로써 특징점들의 모드형태벡터를 사용하고, 좌심실 역동성을 유한요소방법에 의해 시뮬레이션 한다. 또한, 변형 모델에 대해 묵시적으로 표준화된 parameterization을 하지 않고, 의료영상으로부터 얻은 자료값을 직접 이용하기 위해 노드간 보간함수로써 3차원 가우시안 함수를 사용한다. 그리하여 보다 자연스러운 방식으로 연속적으로 변화하는 좌심실의 운동을 추적할 수 있다. 이러한 분리된 내·외벽 운동 분석은 운동 기능에 이상이 있는 심질환 분석을 보다 효과적으로 도울 수 있다.

1. 서론

산업 국가에서 심장질환은 현대인의 가장 심각한 질환 중의 하나이다. 현재, 일반 병원의 심장질환 진단 및 치료에 있어 의료영상의 적용은 심장내과 및 방사선과 전문가들의 판단과 수작업에 의한 측정이 주를 이루고 있다. 고속·대용량 컴퓨터의 대중화로 의료영상과 같은 큰 자료처리가 가능해짐에 따라 컴퓨터를 이용한 진단의 중요성이 높아지고 있다.

지난 십여년 동안 의료영상을 사용하여 인체 내부 기관을 모델링하는 다양한 연구들이 이루어졌지만 주로 3차원 모델을 중심으로 진행되어왔다. 이렇게 된 이유에는 첫째, 인체 내부 기관이 대부분 정적이라는 점과 둘째, 사용할 수 있는 입력 영상들이 단면 형태로 제공된다는 점 셋째, 동적 기관에 대한 고속 촬영이 어려워 영상기기로부터 시간·공간상으로 고해상도의 영상을 획득하지 못했다는 점을 들 수 있다.

본 연구에서는 움직이는 인체 내부 기관의 모델링에 초점을 두고, 단일광자방출 전산화단층촬영영상(single

photon emission computed tomography, SPECT)을 이용하여 좌심실 내·외벽의 운동을 시뮬레이션하고자 한다. 박동하는 좌심실 내·외벽의 움직임을 동적 가시화함으로써, 허혈이나 심근경색증 처럼 운동 기능에 이상이 올 수 있는 심질환 진단을 돕는 것을 목적으로 한다.

2. SPECT 영상과 내·외벽 분리

SPECT는 인체 내 기관의 기능을 검사할 수 있는 의약품에 영상을 얻을 수 있는 동위원소를 표지한 방사성의약품에 영상을 이용하는 영상화 방법이다. 이를 인체 내에 주사한 후 검사 목적에 따라 주사 후 즉시 또는 일정 시간을 기다린 후 영상을 획득한다. 이 방법은 핵의학 검사로써 비교적 비침습적으로 혈액학적인 측정이 가능하며 이를 양적으로 표시할 수 있는 장점이 있으나 해상력이 떨어지는 단점이 있다. 그림 1은 심전도에 동기화하여 촬영한 gated SPECT 영상(64 × 64)으로 심장의 수축기 (systolic stage)에서부터 확장기 (diastolic stage)까지의 좌심실 근육 부위를 보여준다.

* 본 연구는 부분적으로 정보통신부 '99 대학 S/W 센터 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.



그림 1. 단일광자방출 전산화단층촬영영상

SPECT 영상으로부터 좌심실 내·외벽의 운동을 분리하여 추적하기 위해서 먼저, 내·외벽에 해당하는 윤곽점들을 각각 추출해야한다. 이를 위해, 좌심실 근육 부위를 임계값 방법과 히스토그램 평활화 방법을 사용하여 분할한 후, 라플라스 연산자를 적용하여 윤곽선을 검출하였다. 그리고 나서, 2차원 윤곽점들을 실제 촬영정보에 의해 3차원 실좌표계로 변환한 후, 내·외벽의 원형인 두 타원체와의 유클리디안 거리를 기반으로 fuzzy-k means 방법에 의해 윤곽점들을 내벽 또는 외벽으로 클러스터링 하였다. 윤곽선 검출 및 공간 클러스터링에 관한 자세한 사항은 본 연구진의 이전 발표 논문을 참조하도록 한다[4].

3. 역동적 변형 솔리드를 이용한 운동 추적

본 논문에서는 본 연구진이 개발한 역동적 변형 솔리드[3]를 이용하여 좌심실의 내·외벽 운동을 비강체(non-rigid) 운동과 강체(rigid) 운동으로 분리하여 추적한다. 역동적 변형 솔리드는 운동주식에 적합하도록 다음과 같은 접근방법으로 설계되었다. 첫째, 운동 추적을 위해 물체중심 변동좌표계(body-centered moving coordinate system)를 생성하여 사용한다. 즉, 매 시각마다 윤곽점들의 모드형태벡터(고유벡터)를 사용하여 물체중심의 표준, 직교 좌표계를 생성한다. 둘째, 연속 역학(continuum mechanics)에 기반을 둔 연속체로서, 좌심실의 운동을 외부의 힘과 물질 특성간의 연속함수로 보고 이를 유한요소방법을 사용하여 근사화 한다. 셋째, 유한요소 안에서의 노드들의 위치를 목시적으로 고정하지 않고, 노드 간의 보간함수로서 3차원 가우시안 함수를 사용함으로써 보다 자연스러운 방식으로 연속적으로 변화하는 좌심실의 운동을 추적해 나가도록 한다.

본 연구에서는 위와 같은 특징을 갖은 역동적 변형 솔리드를 이용하여 좌심실의 운동을 크게 평행이동, 회전이동, 비강체 변형으로 나누어 분석하였다. 좌심실의 전역 운동으로서 평행이동은 심장 박동주기 각 단계에서

얻은 윤곽점들의 무게중심으로부터 추정할 수 있다. 즉, 무게중심은 물체중심 변동좌표계의 원점을 위한 적절한 근사치가 될 수 있다.

또 다른 좌심실의 전역 운동에는 회전이동이 있다. 본 연구에서는 좌심실 벽에서 추출한 윤곽점들 간의 공분산(covariance)을 사용하여 좌심실의 주축(principal axes)을 결정하고, 연속되는 운동에서 주축들의 상대적인 방향 변화로부터 회전 정도를 추정하였다. 모든 축에 대한 상관관계를 나타내는 공분산행렬 Cov 는 (식 1)에 의해 계산된다. 공분산행렬 Cov 는 대칭행렬로서 주대각선의 원소는 x, y, z 축에 대한 분산(variance)을 의미한다. 모든 대칭행렬이 그러하듯이 공분산행렬 또한 대각화될 수 있다. 이러한 절차를 주축변환(principal axes transform)이라 부른다. 주축변환을 통해 모든 윤곽점들이 무상관(uncorrelated)된 새로운 좌표계를 얻을 수 있다. 즉, 새로운 좌표축은 변환된 공분산행렬 Cov' 의 고유벡터에 해당하고, 고유값들은 분산에 해당한다.

$$Cov = \begin{bmatrix} cov(x, x) & cov(x, y) & cov(x, z) \\ cov(y, x) & cov(y, y) & cov(y, z) \\ cov(z, x) & cov(z, y) & cov(z, z) \end{bmatrix} \quad (식 1)$$

$$cov(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - c_x)(y_i - c_y)$$

$$Cov' = \begin{bmatrix} cov'(x, x) & 0 & 0 \\ 0 & cov'(y, y) & 0 \\ 0 & 0 & cov'(z, z) \end{bmatrix} \quad (식 2)$$

비강체 변형을 알기 위해서는 (식 3)과 같은 유한요소방법(Finite Element Method)의 동적평형방정식을 이용한다.

$$MU' + DU + KU = F \quad (식 3)$$

(식 3)은 모드분석을 통해 계산량을 줄이고, 자유도(degree of freedom)를 비결합시킴으로써 계산식을 closed-form으로 변환시킬 수 있다[1]. 즉, 변환행렬 Φ 에 의해 노드변위벡터 U 를 모드변위벡터 \tilde{U} 로 변환 ($U = \Phi \tilde{U}$)하고, M, D, K 행렬을 대각행렬 $\tilde{M}, \tilde{D}, \tilde{K}$ 로 변환하여 (식 4)를 얻는다.

$$\tilde{M}\tilde{U}' + \tilde{D}\tilde{U} + \tilde{K}\tilde{U} = \tilde{F} \quad (식 4)$$

$$\tilde{M} = \Phi^T M \Phi, \quad \tilde{D} = \Phi^T D \Phi, \quad \tilde{K} = \Phi^T K \Phi, \quad \tilde{F} = \Phi^T F$$

변환행렬 Φ 의 열들은 모드형태벡터(mode shape vector)라고 불리는 M 과 K 의 고유벡터(eigenvector) ϕ_i 로 구성된다.

$$\Phi = [\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_n] \quad (식 5)$$

이러한 모드형태벡터는 모델이 어떠한 형태로 변형되는가를 잘 설명해줄 뿐만 아니라 물체의 일반화된 대칭

축에 해당하기 때문에 형태 및 운동 묘사를 위해 매우 직관적으로 사용될 수 있다.

이처럼 좌심실의 비강체 변형은 모드변위벡터로써 표현될 수 있다. 변형된 모델에서 유한요소 노드들이 이동된 위치를 알기 위해서는 모드변위벡터를 노드변위벡터로 변환한다. 매 시각에서의 좌심실 모델의 비강체 변형을 알기 위해서는, 이동된 유한요소 노드들의 위치에 따라 질량 및 경직행렬, 모드형태벡터들을 새로이 구해야만 한다. 시각 t 에서의 모델은 시각 $t+1$ 의 윤곽점들의 무게중심으로 평행이동하고, 주축의 상대적인 방향 변화에 따라 회전하게 된다. 그리고 나서는 윤곽점들로부터 추정된 가상적인 힘에 의해 비강체 변형을 일으켜 시각 $t+1$ 의 모델이 된다. 같은 방법으로 시각 $t+1$ 에서의 모델은 시각 $t+2$ 의 윤곽점들로부터 무게중심, 주축, 가상 힘에 대한 정보를 받아 평행이동, 회전이동, 비강체 변형을 하게된다.

4. 실험 결과

그림 2는 역동적 변형 솔리드를 이용하여 SPECT 영상으로부터 심장 박동 전체 주기에서의 좌심실 내·외벽의 운동을 추적한 결과이다. (a)는 외벽의 움직임을 동적으로 보여주고 있고, (b)는 내벽의 움직임을 동적으로 보여준다. 그림 3은 수축기와 확장기 때의 좌심실의 내·외벽을 동시에 보여줌으로써 심근의 두께를 쉽게 관찰할 수 있도록 하였다.

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 좌심실의 내·외벽의 움직임을 분리하여 추적함으로써, 심실 벽운동 기능에 이상이 있는 질환 진단을 보다 효과적으로 도울 수 있는 가능성을 제시하였다. 향후 연구로는 심질환 진단을 위한 유용한 정보로써 좌심실의 볼륨을 측정한다. 또한 측정된 볼륨을 바탕으로 좌심실 수축기 기능을 평가하기 위한 심실박출계수를 구함으로써 심실 기능 평가를 위한 좋은 지표를 제공하도록 연구를 진행하고 있다.

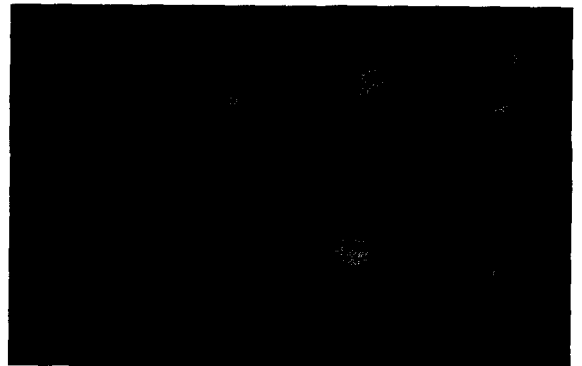
6. 참고 문헌

[1] A. Pentland and B. Horowitz, "Recovery of Nonrigid Motion and Structure", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, No. 7, pp.730-742,1991.
 [2] C. W. Chen, T. S. Huang and M. Arrott, "Modelling, Analysis, and Visualization of Left Ventricle Shape and Motion by Hierarchical Decomposition", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 16, No. 4, pp. 342-356, 1994.
 [3] S. M. Choi and M. H. Kim, "Modelling of the Left Ventricle with a Dynamic Gaussian Blob Model", International Conference on Visual Computing

(ICVC99), pp. 289-294, Feb. 1999.
 [4] 최수미,이유경,김명희, "윤곽선검출과 공간클러스터링을 이용한 좌심실 내외벽의 이중 모델링", HCI 학술대회, pp. 145-150, 2000.



(a) 외벽 운동 가시화



(b) 내벽 운동 가시화

그림 2. 좌심실 내·외벽의 운동 가시화

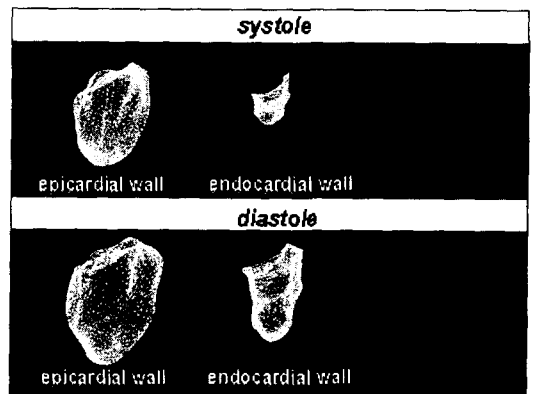


그림 3. 수축기 및 확장기에서의 좌심실