

3차원 복원을 위하여 특정 투사각도에서 획득한 TEM 영상열의 정렬

*이준호, 이지호, 김동식
 한국의국어대학교 전자정보공학부
 e-mail : jhlee7942@hufs.ac.kr

Alignment of Tilted TEM Images for 3D Reconstruction

*Jun Ho Lee, Ji Ho Lee, Dong Sik Kim
 Hankuk University of Foreign Studies, Korea

Abstract

In this paper, the tilted image sequence, which is obtained the transmission electron microscopy (TEM) for a 3D reconstruction, is aligned based on the fiducial marker method. A direct correlation method is also conducted between adjacent tilted images for the performance comparison. Using real TEM tilted images, we can successfully perform the alignment.

I. 서론

세포의 구조, 여러 가지 세포기관, 바이러스의 구조 등을 밝히기 위하여 투과전자현미경(transmission electron microscopy, TEM)의 투사 영상을 이용하여 3차원 구조로 복원한다. 3차원 구조로 복원하기 위해서는 여러 각도에서 얻어진 2차원 투사 영상들로부터 복원을 하게 되는데, 이러한 2차원 투사 영상들을 얻기 위하여 표본을 정해진 각도로 기울여가며 투사 영상을 획득하게 된다. 이렇게 획득한 투사 영상의 정확한 영상 정렬은 고화질의 단층 사진 복원을 얻기 위해 매우 중요하다. 그래서 모든 영상들은 이미 알고 있는 투사각에서 동일한 물체의 투사로 각각 나타내기 위해서 정렬되어야 한다. 부적절하게 정렬되어진다면 영상 복원에서 blurring 또는 smearing의 결과가 나타난다. 또한 영상을 획득하는 동안 전자빔의 노출로 인하여 표본들에서 기하학적인 변화가 야기된다. 본 논문에서

는 세포기관의 구조를 밝히기 위하여 TEM으로부터 획득한 투사 영상들을 3D marker model을 이용하여 정렬하였다. 우선 투사 영상의 marker들의 위치를 측정하고 각 영상들의 marker쌍들을 규정하였다. 그리고 marker들 간의 위치 관계를 계산하여 투사 영상들을 정렬하였다. 본 실험에서 사용된 영상은 고려대학교 생명공학원 세포공학 및 생체3차구조연구실에서 colloidal 금 용액으로 fiducial marker를 넣은 표본의 TEM tilt 영상 열을 사용하였다.

II. Fiducial Marker를 사용한 정렬

본 장에서는 정렬을 위해 사용된 fiducial marker에 기초를 둔 Penczek 등[3]의 정렬알고리즘을 정리하였다. 3차원 공간에서 2차원 좌표평면으로 투사된 영상 모델은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_i & 0 & -\sin\theta_i \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^j \\ y^j \\ z^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_i & \sin\alpha_i \\ -\sin\alpha_i & \cos\alpha_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x^j \\ p_y^j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 θ_i 는 i 번째 영상의 tilt각도이고, x^j, y^j, z^j 는 j 번째 marker의 3차원 좌표이다. 식 (1)의 우측 항을 $\begin{bmatrix} p_x^j \\ p_y^j \end{bmatrix}$ 으로 치환하면, j 번째 marker의 3차원 좌표 x^j, y^j, z^j 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tilde{y}^j = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v p_y^j, \quad (2)$$

$$z^j(-\tan\theta_i) + x^j = \frac{p_{x_i}^j}{\cos\theta_i}, \quad (3)$$

즉 식 (2)에서 y^j 는 투사 영상의 j번째 marker의 y 좌표의 평균으로 구한다. 식 (3)은 $A^j X_i + B^j = Y_i^j$ 형식이므로 marker마다 각각 영상의 개수만큼 만들어지는 수식들을 linear regression을 이용하여 x^j, z^j 를 구한다. 이렇게 얻어진 x^j, y^j, z^j 를 '3D marker model'이라 한다. 식 (1)에 이러한 3D marker model을 대입하여 얻은 marker의 좌표인 p'' 를 구한다. 이렇게 얻은 p'' 과 p' 를 비교하여 다음 식들로부터 translation과 rotation을 각각 구한다.

$$\tilde{d}_i = \frac{1}{s} \left(\sum_{j=1}^s p''_{x_i}^j - \sum_{j=1}^s p'_{x_i}^j \right), \quad (4)$$

$$\tan\tilde{\alpha}_i = \frac{\sum_{j=1}^s (p''_{x_i}^j p'_{y_i}^j - p''_{y_i}^j p'_{x_i}^j)}{\sum_{j=1}^s (p''_{x_i}^j p'_{x_i}^j + p''_{y_i}^j p'_{y_i}^j)}, \quad (5)$$

이렇게 구해진 translation과 rotation 성분을 사용하여 각 투사 영상의 marker의 위치인 p' 을 갱신하고 다시 3D marker model을 만든다. 이러한 과정을 반복하여 각 translation과 rotation 성분의 변화가 어느 임계치보다 작아지면 알고리즘을 멈춘다. 3D marker model을 사용하여 정렬하는 방법을 정리하면 다음과 같다.

*Fiducial Marker*를 사용한 정렬 알고리즘

- 0) 투사 영상에서 marker 좌표 p' 를 정한다.
- 1) 투사영상의 marker 좌표를 가지고 식 (2)와 (3)을 이용하여 3D marker model을 구한다.
- 2) 3D marker model에서 식 (1)의 좌편을 이용하여 p'' 를 구하고 식 (4)와 (5)를 이용하여 translation과 rotation을 각각 구한다.
- 3) 단계 2)에서 구한 결과로 투사 영상의 marker 좌표인 p' 를 새로 구한다.
- 4) $\tilde{d}_i, \tilde{\alpha}_i$ 가 일정한 값 이하로 될 때까지 단계 1) - 3)을 반복한다.

III. 실험 결과

Fiducial marker를 이용한 tilt 영상의 정렬을 위하여 colloid 금 용액에 의해 marker를 만든 미토콘드리아 표본을 -30° 에 30° 까지 2° 씩 tilt시켜 TEM으로 얻은 영상 31장을 실험에 사용하였다. 이때 각 영상마다 17개의 marker를 이용하였다. Tilt 영상 열의 정렬된 결과를 확인하기 위하여 그림 2와 같이 인접한 영상을 각각 구해진 translation과 rotation 성분으로 보정한 후 서로 겹쳐서 도시하였다. 그림 2는 그림 1의 왼쪽 영

상과 오른쪽 영상을 각각 -2.679° 와 -3.334° 씩 rotate시키고 $[-6.1323, 57.6846]$ 과 $[-76.2288, 57.1882]$ 만큼 translation시켜 정렬하였다. 그림 2에서 보듯이 중첩한 결과를 보면 거의 일치하는 것을 확인하였다. 또한 correlation 방법에 의해 입법한 두 영상만을 정렬한 경우와 비교하여 비슷한 결과가 나옴을 확인할 수 있었다.

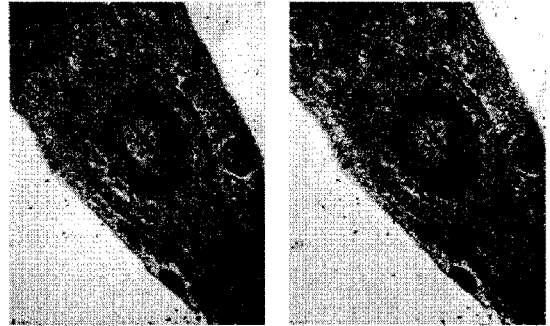


그림 1. 14와 16filt된 미토콘드리아의 영상(2485 x 2000, 고려대학교 생명공학원 세포공학 및 생체3차구조연구실).

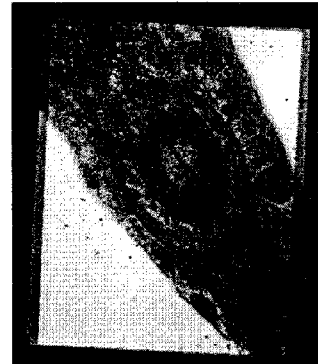


그림 2. 정렬된 영상을 중첩시킨 영상.

IV. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 fiducial marker를 이용한 정렬 방법으로 TEM의 tilt 영상 열의 정렬을 시도하였다. 나아가서 marker를 사용하지 않는 correlation 정렬 방법도 구현, 성능을 비교하여 tilt 영상 정렬의 목적에 최적의 정렬 알고리즘의 연구 수행이 이루어 질 것이다.

참고문헌

- [1] J. Frank, *Three-Dimensional Electron Microscopy of Macromolecular Assemblies*. NY: Academic Press, 1996
- [2] J. Frank, *Electron Tomography*, 2nd. ed. NY: Springer, 2006.
- [3] P. Penczek, M. Marko, K. Buttle, and J. Frank, "Double-tilt electron tomography," *Ultramicroscopy* 60:393-410, 1995.