다시점 X선 영상을 이용한 3차원 좌표 획득

3D Coordinates Acquisition by using Multi-view X-ray Images

이 수 영*, 이 재 영, 김 순 철, 이 정 규

(Sooyeong Yi¹, Jaeyoung Rhi², Soonchul Kim¹, and Jeonggyu Lee³)

¹Dept. of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology

²Dept. of Multimedia System Engineering, Sungkonghoe University

³Research Division, BNSoft

Abstract: In this paper, a 3D coordinates acquisition method for a mechanical assembly is developed by using multiview X-ray images. The multi-view X-ray images of an object are obtained by a rotary table. From the rotation transformation, it is possible to obtain the 3D coordinates of corresponding edge points on multi-view X-ray images by triangulation. The edge detection algorithm in this paper is based on the attenuation characteristic of the X-ray. The 3D coordinates of the object points are represented on a graphic display, which is used for the inspection of a mechanical assembly.

Keywords: X-ray image, feature detection, laplacian of Gaussian filter, multiview image, 3D acquisition

I. 서론

카메라 영상을 이용한 2차원, 3차원 형상 측정과 검사방 법은 자동화 및 정밀 생산기술의 발전과 함께 산업 현장에 서 요구되는 중요한 기술이다. 그러나 가시광 카메라 영상 을 이용한 시각 검사 방식은 다음과 같은 제약점이 있다: (1) 가시광의 반사 문제, (2) 가려짐(Occlusion) 문제, (3) 그 립자 문제. 특히 가시광 카메라 시스템으로는 완성된 상태 의 기계, 전자 제품에 대한 내부 구조 검사가 근본적으로 불가능하기 때문에, 근래에 X선 투시 영상을 이용한 검사 방법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. X선의 투시 특 성은 가시광 영상의 제약점들을 극복할 수 있다.

대상 물체의 내부 조립상태 이상 유무를 검사하기 위해 서는 검사자에게 대상물체 내부에 대한 3차원 영상을 제시 해 주어야 할 필요가 있다. 대상물체의 3차원 데이터를 획 득하기 위해서는 시점(view point)이 다른 두 장 이상의 영 상, 즉 다시점(Multiview) 영상이 있어야 한다. 다시점 X선 영상처리는 대상 물체의 외곽선 뿐만 아니라 내부의 3차원 데이터까지 얻을 수 있다는 장점이 있다. X선 영상처리를 통한 3차원 데이터 획득에 관한 선행연구들은 다음과 같다. [1,2]에서는 단일 X선 영상처리를 통해 다면체의 기하학적 구조 및 자세를 알아내는 알고리즘을 개발한 바 있으며, [3]에서도 단일 다면체에 대한 X선 영상으로부터 특징점을

책임저자(Corresponding Author)
Manuscript received April 12, 2013 / revised August 19, 2013 / accepted September 2, 2013
이수영, 김순철: 서울과학기술대학교 전기정보공학과 (suyleee@seoultech.ac.kr/soonchulss@naver.com)
이재영: 성공회대학교 멀티미디어공학과(rhi@skhu.ac.kr)
이정규: ㈜비에네스소트 기술연구소(jgl@bns.co.kr)
※ 본 논문은 서울과학기술대학교 교내 일반과제 연구비 지원으로 수행되었으며, 2013년 제28회 제어·로봇·시스템학회 학술대회 에서 초안[8,9]이 발표되었음.

Copyright© ICROS 2013

추출하고, 자세를 추정하는 기술개발을 시도한 바 있다. 위 의 방법들은 단일 다면체만을 대상으로 하여 개발되었으므 로 다수의 부품들이 겹쳐있는 형태의 복잡한 조립물에 대 해서는 적용하기 어렵다. 한편 [4-6]에서는 항만, 공항등에 서 검색대를 통과하는 컨테이너 내부의 물체를 파악하기 위한 스테레오 X선 영상처리 기법을 개발한 바 있다. 이 방법은 물체의 외형만을 판단하기 위한 것이므로 기계 조 립물과 같이 세밀한 물체의 3차원 구조 검사에 적용하기는 어렵다. 또한 Z. Zhu등은 [4]와 유사한 문제에 대해서 물체 외관에 대한 스테레오 X선 영상을 이용하여 3차원 복원을 시도한 바 있다[7].

본 논문에서는 물체에 대한 X선 투시 영상에서 영상 특 이점을 찾고, 회전형 다시점 X선 영상간 특이점 정합을 통 해 대상 물체의 3차원 데이터를 획득하는 방법에 관해 기 술하고자 한다. 또한 획득한 3차원 데이터를 검사자에게 제 시하기 위한 그래픽 표출 시스템을 개발하였다. 본 시스템 은 대상물의 조립상태 검사지원 시스템으로 활용될 수 있 다. 본 논문의 구성은 다음과 같다: II 장에서 회전테이블 방식의 다시점 X선 영상 획득 시스템과 영상획득 모델을 제시하고, III 장에서는 X선의 투과특성을 이용한 영상 특 이점 검출 알고리즘에 관해 설명한다. 그리고 IV 장에서 다 시점 영상의 특이점 정합에 의해 얻어진 3차원 좌표 획득 결과를 제시하고, V 장에서 결론을 맺는다.

II. 다시점 X선 영상 획득

그림 1은 회전 테이블 방식의 다시점 X선 영상획득 방 식을 보여준다. 일반적인 가시광 카메라의 경우는 물체에서 반사된 빛이 카메라 핀홀을 통해 영상센서 면에 상을 맺는 방식이지만, X선의 경우에는 X선 발생장치에서 나온 X선 이 물체를 투과하여 후면의 X선 감광센서 면에 상을 맺는 방식이다. 일반적으로 X선 발생장치는 점원(point source)이



그림 1. X선 영상획득 시스템.

Fig. 1. X-ray image acquisition system.



그림 2. X선 영상획득 모델.

Fig. 2. X-ray image acquisition model.

다. 다시점 X선 영상을 얻기 위해서 가시광 카메라와 같이 두 대 이상의 X선원과 감광센서 쌍을 이용하는 방법도 있 지만, 일반적으로는 그림 1과 같이 대상물체를 회전테이블 위에 올려놓고, 일정한 각도로 회전시키면서 다시점 X선 영상을 얻게 된다.

그림 2는 X선 영상획득 모델이다. 회전 테이블의 회전축 중심에 설치된 물체 좌표계에서 물체상의 한 점의 좌표 $P = [x \ y \ z]^t$ 와 영상 좌표계에서 해당 물체점의 좌표 $Q = [u \ v]^t$ 사이의 관계는 다음과 같이 기술된다[1]:

$$u = \frac{L_0 + L_1}{L_0 - z} \cdot x , \quad v = \frac{L_0 + L_1}{L_0 - z} \cdot y \tag{1}$$

여기서 L_0 와 L_1 은 각각 X선원으로부터 회전축까지의 거리 와 회전축으로부터 영상센서면 까지의 거리를 나타낸다. 일 반적으로 대상 물체의 크기가 X선원까지의 거리에 비해 작 으므로 $L_0 \gg z$ 이고, 따라서 식 (1)은 다음과 같이 근사적 으로 선형식으로 표현할 수 있다:

$$u \approx \alpha x, \quad v \approx \alpha y$$
 (2)

여기서 비례상수는
$$\alpha = \frac{L_0 + L_1}{L_0}$$
로 주어진다

이제 물체 좌표계의 *y*축을 기준으로 대상 물체를 θ각 만큼 회전시켰을 때 물체점 *P* 의 좌표는 다음과 같이 *P*' 으로 변환된다:

$$\boldsymbol{P}' = \begin{bmatrix} x'\\ y'\\ z' \end{bmatrix} = Rot(y,\theta) = \begin{bmatrix} c\theta x + s\theta z\\ y\\ -s\theta x + c\theta z \end{bmatrix}$$
(3)

여기서 *c*θ와 *s*θ는 각각 cos(θ)와 sin(θ)를 의미한다. 따라서 회전된 물체점 **P**'의 X선 영상점은 식 (2)에 의해 서 다음과 같이 된다:

$$u' = \alpha \left(c\theta x + s\theta z \right), \ v' = \alpha y \tag{4}$$

그러므로 영상정합(correspondence)을 통해 대응점 P와 P'를 찾을 수 있다면, 식 (2)와 식 (4)로부터 물체점의 좌 표값 $P = [x \ y \ z]^t$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x = \frac{u}{\alpha}, \quad y = \frac{v}{\alpha}, \quad z = \frac{u' - c\theta u}{\alpha s \theta}$$
 (5)

여기서 회전각 θ는 회전 테이블 방식의 다시점 영상에서 미리 알고 있다고 가정한다. 다시점 X선 영상에서 대응점 을 찾기 위한 정합 방법은 일반 가시광 영상에서와 같이 국부 영역의 상관관계(correlation), 또는 국부 영역의 SSD (Sum of Squared Difference)등을 이용할 수 있다.

일반적으로 가시광 영상의 경우에는 모든 화소들 간의 정합이 가능하지만, X선 영상의 경우에는 화소강도(gray scale)의 변화가 크지 않으므로 모든 화소들 간의 정합 보 다는 영상 특이점들 사이의 정합 방식이 적합하다.

III. X선 영상특이점 검출

다시점 영상에서 영상특이점들 간의 정합을 위해서는 먼 저 영상특이점을 검출해야 한다. 본 논문에서는 X선 영상 의 특이점으로서 물체의 모서리를 검출하고자 한다.

어떤 물질을 투과한 X선의 강도는 투과 깊이에 따라 지 수 함수적으로 감쇄되는 성질을 갖게 되며, 이 때 X선의 감 쇄 정도는 입사 X선의 강도와 대상 물질의 물성, 그리고 투 과된 깊이에 따라 다음과 같이 지수함수 식으로 결정된다.

$$I = I_0 e^{-\mu z} \tag{6}$$

여기서 z는 X선이 투과되는 대상 물질의 두께(깊이), I₀는 입사 X선의 강도, I는 투과 후 X선의 강도, μ는 선형 감 쇄 계수이다. 감쇄계수는 X선 광량, 파장, 대상물질의 종류, 밀도 등에 따라 결정된다. 그러므로 X선 영상면에서 한 화 소의 밝기는 투과된 X선이 통과한 물질의 두께에 따라 정 해진다.

[1,2]에서는 이러한 X선 영상의 특성을 이용하여 단일 다면체에 대한 X선 영상에서 특이점을 검출하는 방법을 제 안한 바 있다.



그림 3. X선 감쇄 특성. Fig. 3. X-ray attenuation characteristic.

다면체와 같이 물체의 x 방향으로 투과 깊이가 선형적 으로 변하는 경우, 식 (1)에 따라 X선 영상에서 u 방향으 로 화소의 밝기 p는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$p = I_0 e^{bu}$$

$$\equiv \ln p = \ln I_0 + bu$$
(7)

여기서 L는 두께가 시작되는 부분의 초기값이다. *u* 방향 으로 *N*개 화소를 취하고, 지수함수식 (6)에 대한 적합정도 오차를 다음 식과 같이 정의한다.

$$E = \sum_{i=1}^{N} (\ln p_i - \ln I_0 - b u_i)^2$$
(8)

이제 *I*₀ 및 *b*에 대한 오차 *E* 의 최솟값은 다음의 연립방정 식을 만족해야 한다:

$$\frac{\partial E}{\partial I_0} = -\frac{2}{I} \sum_{i=1}^{N} (\ln p_i - \ln I_0 - bu_i) = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^{N} (\ln p_i - \ln I_0 - bu_i) u_i = 0$$
(9)

식 (9)의 해는 다음 식 (10)과 같이 행렬 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^{N} u_i \\ \sum_{i=1}^{N} u_i & \sum_{i=1}^{N} u_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ln I_0 \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{N} \ln p_i \\ \sum_{i=1}^{N} u_i \ln p_i \end{bmatrix}$$
$$\equiv \begin{bmatrix} \ln I_0 \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^{N} u_i \\ \sum_{i=1}^{N} u_i & \sum_{i=1}^{N} u_i^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{N} \ln p_i \\ \sum_{i=1}^{N} u_i \ln p_i \end{bmatrix}$$
(10)

식 (6)을 X선 영상면에서 가로(u), 세로(v) 방향으로 스 캔적용하여 L₀와 b를 구하고, 식 (8)에 따른 오차의 크기를 판단하여 물체 두께가 달라지는 부분, 즉 모서리에 해당하 는 X선 영상의 특이점을 검출할 수 있다.

본 논문에서는 위의 방법[1,2]을 확장하여 일반적인 대상 물의 X선 영상 특이점 검출에 적용하고자 한다. 단일 다면 체의 경우는 모서리 부근에서 x 또는 y 방향에 따라 X선 의 투과깊이가 선형적으로 바뀌므로, 식 (6)에 따라 X선의 투과강도가 지수함수를 따르게 된다. 다면체가 중첩된 경우 에도 이와 같은 특성을 보일 것으로 생각할 수 있다. 한편, 다면체가 아닌, 곡면이 있는 물체의 경우에는 x, y 방향에 따라 X선의 투과깊이가 선형적으로 바뀌지는 않는다. 그러 나 물체 곡면의 곡률반경이 충분히 큰 경우에는 모서리 부 근에서 두께의 변화가 근사적으로 선형성을 가지므로 짧은 구간에서는 x, y 방향에 따라 X선의 투과강도가 지수함수 적으로 변할 것으로 생각할 수 있다. 이를 확인하기 위해 곡면을 갖는 물체의 X선 영상에서 화소의 강도를 그림 4에 분석하였다. 그림 4의 X선 영상에서 밝은 부분은 물체 두 께가 얇으며, 어두운 부분은 두껍다. X선 영상에서 실선으 로 표시한 부분의 화소 강도를 아래쪽 그래프에 나타내었 다. 그래프에서 보는 바와 같이 화소의 밝기는 물체의 모서



그림 4. 투과 깊이에 따른 X선 영상의 화소 강도.

Fig. 4. Pixel intensity of X-ray image according to depth of penetration.

리 부근에서 두께에 따라 근사적으로 지수 함수적으로 변 하게 된다. 그러므로 물체의 곡면의 경우에도 식 (10)을 적 용하여 X선 영상의 에지를 검출할 수 있다.

IV. 실험 결과

그림 5(a)의 대상물체 X선 영상에 대해서 식 (10)의 특이 점 검출 방법을 적용하였다. 대상 물체는 곡면을 갖는 물체 이다. 그림 5(b)는 가시광 카메라 영상 처리에 많이 사용되 는 LoG (Laplacian of Gaussian) 필터를 적용한 결과이다. X 선은 투과깊이에 따라 지수함수적으로 감쇄하므로 영상면 에서 대상 물체의 모서리 부분이 선명하지 못하게 되고, 따 라서 2차 미분을 기본으로 하는 LoG 필터는 영상 특이점 들을 검출하지 못하는 경우가 많으며, 잡음화소들이 많게 된다.

한편 그림 5(c)는 영상면의 가로 및 세로 방향으로 N=10개의 화소 마스크에 대해 식 (10)의 지수함수 필터 를 스캔 적용한 결과이다. LoG 필터에서 검출하지 못한 많 은 영상특이점들을 잘 검출하고 있으며, 잡음화소도 매우 적은 편임을 볼 수 있다.

그림 6(a)는 그림 5의 대상물체를 회전 테이블에서 10^o 간격으로 회전시키면서 얻은 총 36장의 다시점 X선 영상에 서 대표적인 것을 제시한 것이다. 그림 6(b)는 식 (10)의 기 하함수 필터를 통해 얻은 특이점 영상이다. 다시점 영상에 서 특이점들 간의 정합은 다음 식과 같이 SSD (Sum of Squared Differences)를 적용하였다:

$$C = \sum_{u,v \in W} \{I_i(u,v) - I_{i+1}(u,v)\}^{-2}$$
(11)

위 식에서 *I*_i와 *I*_{i+1}은 총 36장의 영상에서 이웃한 2장의 영상을 의미하며, *W*는 대상화소 주변의 영역을 나타낸다. 본 실험에서는 *W*를 5×5 화소 영역으로 하였다.

그림 7은 정합된 X선 영상특이점들에 대해 식 (5)를 적 용하여 얻은 3차원 좌표를 그래픽 화면에 표출한 것이다.



(a) Original X-ray image.



(b) Result of LoG filter processing.



(c) Result of exponential filter processing.

- 그림 5. X선 영상 에지 검출.
- Fig. 5. Edge detection in X-ray image.



(a) Original X-ray images $(\theta = 0, \theta = \pi)$.



(b) Result of edge detection.

그림 6. X선 영상에서 에지 검출.

Fig. 6. Edge detection in X-ray image.





(b)

그림 7. 그래픽 화면을 통한 3차원 좌표 표출. Fig. 7. 3D coordinates representation in graphic display.

그래픽 프로그램은 OpenGL 패키지를 이용하여 구현되었으 며, 컴퓨터 마우스를 통해 줌인, 줌아웃, 시점변경, 회전등 다양한 사용자 인터페이스가 가능하다. 그림 7에서 보는 바 와 같이 가시광 영상으로는 볼 수 없는 대상물 내부의 영 상을 잘 표현하고 있음을 확인 할 수 있으며, 따라서 검사 자가 불량여부를 판단하는데 큰 도움이 될 수 있다. 그래픽 표출의 연산속도를 고려하여 물체를 고정하기 위한 지그에 해당하는 부분은 나타내지 않았다.

V. 결론

복잡한 기계 조립물을 조립이 완성된 상태에서 검사하기 위해서는 대상물의 내부를 투시할 수 있는 X선 영상이 필 요하다. X선 영상은 많은 정보를 포함하고 있지만 중첩된 물체들의 앞뒤 관계를 파악하기 어렵다는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하고 검사과정의 편의성을 제공하기 위해서는 다시점 X선 영상처리에 의한 3차원 깊이 정보 획 득이 필요하다. 그러나 동일한 물체점이라 하더라도 X선 영상에서는 X선의 조사 방향에 따라 달라지는 투과깊이 변 화 때문에 화소강도가 다르게 나타날 수 있으므로, 다시점 X선 영상에서 임의의 화소점에 대한 대응정합은 매우 어렵 다. 따라서 다시점 X선 영상에서는 임의의 화소점들 보다 는 영상 특이점들이 정합되어야 한다.

본 논문에서는 대상물체에 대한 X선 영상 에지 검출을 위해 물체 투과깊이에 따른 X선의 감쇄특성을 이용한 지수

함수 필터를 적용하였다. 대상물체 내부의 모서리는 X선의 투과깊이에 따른 감쇄특성 때문에 영상면에서 흐리게 나타 나므로 기존의 가시광 카메라 영상의 특이점 추출을 위한 방법으로는 일반적으로 검출이 어렵게 된다. 지수함수 필터 를 적용한 결과 기존 LoG 필터 보다 특이점 추출 성능이 우수함을 확인하였다. 또한 다시점 X선 영상으로부터 대상 물체의 3차원 좌표를 획득하는 방법에 관해 기술하였다. X 선 영상으로부터 특이점을 검출하고, 다시점 영상간의 특이 점 정합과 X선 영상획득 모델식을 통해 특이점의 3차원 좌 표를 얻었으며, 이를 그래픽 화면을 통해 표출하였다. 대상 물체의 3차원 좌표 획득 및 표출은 대상물체의 불량유무를 판정하는데 큰 도움이 된다. 향후 보다 실감있는 표출방법 을 위해 그래픽 렌더링을 추가할 것이다.

REFERENCES

- S. Cho, "X-ray image processing and pose estimation of polyhedral objects based on geometric features," M.S. Thesis, Seoul National University of Science and Technology, 2008.
- [2] J. Kim, Pose Estimation of Polyhedral Objects Based on Geometric Features in X-ray Images, M.S. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2001.
- [3] Y. Roh, Three Dimensional Volume Reconstruction and Shape Measurement of Objects Using X-ray Imaging Technique, Ph.D. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2002.
- [4] N. Lee, Y. Hwang, J. Park, and Y. Lim, "A study on stereo visualization of the X-ray scanned image based on dual-line sensors," *The Journal of the Korea Institute of Maritime Information and Communication Sciences*, vol. 14, no. 9, pp. 2083-2090, 2010.
- [5] N. Lee, S. Park, Y. Hwang, J. Park, and Y. Lim, "A study on stereo visualization of the X-ray scanned image based on volume reconstruction," *The Journal of the Korea Institute of Maritime Information and Communication Sciences*, vol. 15, no. 7, pp. 1583-1590, 2011.
- [6] Y. Hwang, N. H. Lee, S.-H. Baek, S.-Y. Park, and J.-W. Park, "3-D visualization of X-ray objects using stereo line sensors," *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 59, no. 2, pp. 1422-1425, 2011.
- [7] Z. Zhu and Y.-C. Hu, "Gamma/x-ray linear pushbroom stereo for 3D cargo inspection," *Proc. of SPIE Conference on Non-Intrusive Inspection Technology*, vol. 6213, 2006.
- [8] S. Yi, J. Rhi, S. Kim, and J. Lee, "Feature detection for X-ray image of mechanical assembly," *Proc. of 2012* 27th ICROS Annual Conference (in Korean), pp. 163-166, 2012.
- [9] S. Yi, J. Rhi, J. Lee, S. Kim, and J. Park, "3D acquisition by multi-view X-ray images," *Proc. of 2013 28th ICROS Annual*, pp. 379-380, 2013.



이 수 영

1988년 2월 연세대학교 전자공학과 졸 업(공학사). 1990년 2월 KAIST 전기및 전자공학과 졸업(공학석사). 1994년 8 월 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업 (공학박사). 1995년 3월~1999년 8월 KIST 시스템연구부 선임연구원. 1997

년 2월~1998년 2월 Univ. of Southern California 박사후과정. 1999년 9월~2007년 2월 전북대학교 전자정보공학부 부교수. 2005년 6월~2006년 8월 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 방문교수. 2007년 3월~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수. 관심분야는 보행로봇, 로봇비젼, 이동 로봇.



이 재 영

1980년 2월 고려대학교 지질학과 졸업 (이학사). 1987년 9월 Univ. of Oklahoma at Norman EECS 졸업(전산 학 석사). 1993년 10월 SUNYAB 전산 학과 졸업(전산학박사). 1993년 11 월~1997년 2월 삼성데이타시스템 정보

기술연구소 멀티미디어 Lab. 책임연구원. 1997년 2월~2004 년 2월 성공회대학교 정보통신학과 부교수. 2004년 3월~현 재 성공회대학교 멀티미디어시스템공학과 부교수. 관심분야 는 컴퓨터 비젼, 이미지 프로세싱, 컴퓨터 게임.



김 순 철 2007년 3월~현재

2007년 3월~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 재학중. 관심분야는 보행로봇, 로봇비젼.



이 정 규

1990년 2월 KAIST 전기 및 전자공학 과 졸업(공학사). 1992년 2월 서울대학 교 전자공학과 졸업(공학석사). 1997년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업(공학 박사). 1997년 2월~2000년 7월 한국전 자통신연구원 선임연구원. 2000년 7

월~2003년 11월 Erlang Technology, Director of Architecture. 2003년 11월~2010년 8월 네이블커뮤니케이션즈 이사. 2010 년 9월~현재 비에네스소프트 연구소장. 관심분야는 X-ray 영상 분석, 비파괴검사요소기술, 동작인식기술.