

중첩 물체에 대한 스테레오 X-선 영상의 3차원 형상복원

황영관*, 이남호*, 박중원**

*한국원자력연구원

**충남대학교 정보통신공학부

e-mail : yghwang@kaeri.re.kr

The Reconstruction of the Stereo X-ray Image for Overlay Objects

Young-Gwan Hwang*, Nam-Ho Lee*, Jong-Won Park**

*Korea Atomic Energy Research Institute

**Dept. of Information Comm. Engineering, Chungnam National University

요 약

X-선 검색장치는 대상체의 단면을 스캔하여 결과를 확인하기 때문에 정확성이 낮다는 것이 문제점으로 지적되어왔다. 이를 개선하기 위하여 선행연구로 스테레오 X-선 검색장치를 개발하여 단일 대상체에 대하여 윤곽선 정합 및 볼륨기반 형상복원 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 스테레오 X-선 검색장치를 이용하여 두 개의 중첩된 대상체를 스캔하여 형상을 분리 복원하기 위한 연구를 진행하였다. 중첩 대상체에 대한 분리 복원을 위해 벡터정보의 거리값을 계산하여 내·외부 복셀을 분리하고 중첩 부분에 대한 제거는 Z축을 기준으로 임계치를 두어 분리하는 알고리즘을 제안하였다. 3차원 스테레오 X-선 검색장치에 대한 스캔영상의 형상복원 알고리즘 개선을 통해 제한된 스캔환경에서 집적화된 대상체의 검색을 가능하도록 할 것이다.

1. 서 론

국가간의 교류가 활발해지며 수출입 물류량이 급격히 증가하고 있는 가운데, 미국이 9.11 사태 이후 수출입 물류에 대한 보안 및 안정성 강화를 위해 자국으로 수입되는 모든 컨테이너 물류의 방사선 검색 의무화를 법률로 제정하였다. 미국, 중국 등은 화물검색장치의 개발에 심혈을 기울여 왔으며 최근에는 일부 제품을 상품화하여 각국에 수출하고 있다. 기 개발된 장치들은 검사대상물의 단면 정보만을 검색하는 방식이므로 2차원 영상 정보만을 제공하고 있다.

2차원 영상 정보만으로는 물류 컨테이너 내부의 대상물의 형태를 정확하게 판단하기 위해서는 한계가 있다. 이러한 문제를 극복하고 신뢰성 높은 검사가 가능하도록 하기 위해서는 대상체에 대한 볼륨 형상 정보가 필요하게 되었고 이에 따라 X-선 검사영상의 3차원 정보 추출에 관한 연구가 다양하게 진행되기 시작하였다. 일반적인 3차원 형상정보는 일반 카메라로부터 대상체의 표면 정보를 통해 영상 정합 및 복원 알고리즘을 이용하여 정보 추출이 용이한 반면 X-선 영상은 물체의 투과밀도 정보만이 존재하므로 검사

대상체의 특정위치에 대한 3차원 정보만을 얻을 수 있다는 한계가 존재한다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 윤곽선 정합 및 볼륨정보를 이용한 스테레오 X-선 검색장치에 대한 연구를 수행하였다.[1][2]

본 논문에서는 선행연구인 스테레오 X-선 검색장치의 알고리즘을 개선하여 단일 대상체 뿐만 아니라 중첩된 대상체에 대한 형상 복원 및 형상 분리에 대한 연구를 진행하였다.

2. 스테레오 X-선 검색장치

스테레오 X-선 영상의 3차원 형상화 연구를 위해 검사 대상체의 방사선 투과 영상을 얻기 위한 축소형 방사선 검색장치를 설계, 제작하였다.

장치의 구성은 그림 1과 같이 대상체를 투과하여 검사하기 위한 X-선 발생장치, 라인스캔 방식의 두대의 X-선 검출장치, 검사 대상물을 X-선 발생장치와 검색장치 사이로 등속 이동시키기 위한 이송장치, 그리고 시스템의 기하학적 구조를 최적화시키기 위해 각종 모터를 제어하기 위한 제어 시스템으로 구성하였다.

제어 시스템은 다양한 크기의 검사 대상물에 대한 최적화된 시차영상을 획득할 수 있도록 두 디텍터 간의 간격과 디텍터와 방출 X-선의 광축 일치 (Align) 기능을 위해 디텍터 하부에 수평이동 및 회전 스테이지 기능 구현이 가능하도록 구성하였다. 두 디텍터로부터 얻어지는 2차원 방사선 영상은 대상물에 대한 X-선 장치와 디텍터의 시차(Disparity)로 인해 서로 다른 주시각을 갖게 되어 대상물의 3차원 정보를 추출하는 기본 영상으로 사용된다.



[그림 1] 스테레오 X-선 검색장치

그림 2는 스테레오 X-선 검색장치를 효율적으로 구동시키기 위하여 검색 시스템의 각 장치에 대한 세부적인 설정 및 제어가 가능하도록 구현한 통합운용 프로그램의 GUI 환경이다. A는 대상체를 이송시키기 위한 설정부이며 B는 이중(Dual) 라인 디텍터 기반 방사선 검색장치를 구동함과 동시에 이차원의 방사선 스캔영상을 획득하기 위한 검출기의 설정부이고, C는 X-선 발생장치의 관전압, 관전류 설정제어부이다. D는 기하구조의 정밀 제어를 위한 제어부이며 E는 실험실을 모니터링 하기 위한 Display부이고 F는 획득된 두 개의 영상 출력부이다.



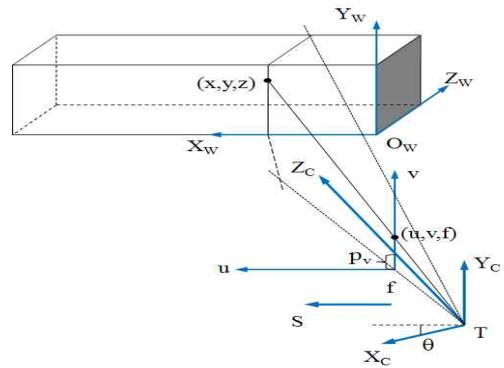
[그림 2] 스테레오 X-선 검색장치 통합운용 프로그램 GUI

획득한 스테레오 영상을 이용하여 A 부분위의 아이콘을 이용하여 3차원 형상 정보를 연산하고, 뷰어

를 통해 복셀화된 3차원 정보를 확인할 수 있다.

3. 스테레오 X-선 영상의 형상복원

스테레오 X-선 검사장치는 라인센서로부터 두장의 이차원 방사선 영상을 획득하고 대상체의 3차원 정보를 형상화 하는 시스템으로 그림 3과 같이 기하좌표를 모델링 할 수 있다.[3]



[그림 3] 라인스캔 시스템 모델링

여기서, 물체가 움직이는 공간을 기준좌표계 (X_w, Y_w, Z_w)로, 센서 좌표계를 (X_c, Y_c, Z_c)로 표시하였고, (u, v, f)는 X-선 영상좌표계, f 는 센서의 초점거리, 그리고 S 는 물체의 이동속도를 나타낸다. 위의 스테레오 X-선 영상 좌표계에 대해 대상물의 3차원 점 (x, y, z)가 좌, 우 스테레오 2차원 영상 점 (u_k, v_k)로 투영되는 변환관계는 다음과 같은 두 식으로 정리할 수 있다.

$$u_k = \frac{x - T_{xk} - (z - T_{zk})\tan\theta_k}{S_k} \quad (1)$$

$$v_k = f_k \cos\theta_k \frac{y - T_{yk}}{z - T_{zk}} + p_{vk}$$

여기서 k 는 1의 경우 좌측 디텍터, 2는 우측 디텍터에 해당하며, $T_k=(T_{xk}, T_{yk}, T_{zk})$ 는 기준좌표계인 월드 좌표계에서 디텍터 좌표계로의 이동변환이고 θ_k 는 좌측 센서와 우측 센서의 회전각도인데, 회전각도는 월드좌표계의 y 축에 대한 상대적인 회전이다. p_v 는 센서의 y 축에 대한 중심 좌표값, S_k 는 물체가 x 축 방향으로 이동하는 속도이다.

본 연구에서 설계 제작한 스테레오 X-선 검색장치의 기하구조를 최적화하여 수식 1로부터 3차원 공간의 좌표값을 추출하여 정리하면 물체의 거리는

$$z = \frac{S(u_2 - u_1) - (T_{x1} - T_{z1}\tan\theta_1) + (T_{x2} - T_{z2}\tan\theta)}{\tan\theta_1 - \tan\theta_2} \quad (2)$$

로 표현된다. 그리고 x 와 y 의 좌표값은

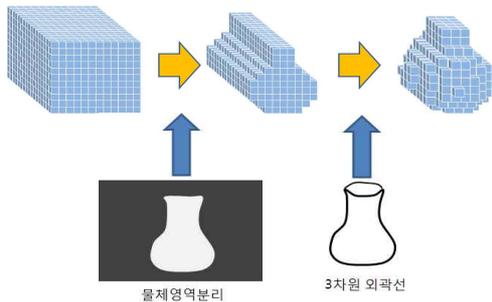
$$x = u_1 S + T_{x_1} + z \tan \theta_1 - T_{z_1} \tan \theta_1 \quad (3)$$

$$y = \frac{(v_1 - p_{v1})(z - T_{z_1})}{f_1 \cos \theta_1}$$

로 표현할 수 있다.

4. 볼륨기반 3차원 형상복원

앞서 계산한 값을 기반으로 3차원 형상정보를 복원하면 윤곽선 기반의 형상만이 복원되어 3차원 정보를 확인하기에는 정보가 부족하다. 이를 보완하기 위하여 볼륨 기반의 체적 복원을 수행하였고, X-선 검사 대상 물체의 3차원 체적 복원의 순서를 그림 6에서 간략히 정리하였다. 우선 복원하고자 하는 3차원 공간에 수 많은 복셀로 구성된 체적을 생성한다.



[그림 4] 체적복원의 순서

이 체적의 크기는 복셀의 개수로 표현되며 가로, 세로, 깊이가 각각 W , D , H 로 표현된다. 초기의 복셀 공간의 크기는 다음과 같이 정한다.

$$W = (X_{\max} - X_{\min}) / v_x \quad (4)$$

$$H = (Y_{\max} - Y_{\min}) / v_y$$

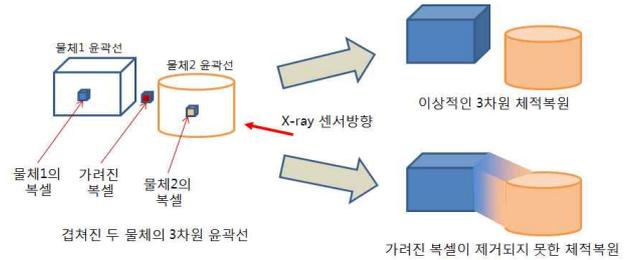
$$D = (Z_{\max} - Z_{\min}) / v_z$$

여기서 v_x, v_y, v_z 는 각각 하나의 복셀의 x, y, z 크기이다. 초기의 체적은 따라서 정방형의 공간을 차지하고 있다. 우선 스테레오 영상에서 물체의 영역을 분리하고 이진화 영상을 이용하여 초기 체적에서 배경에 속하는 복셀을 제거한다. 배경의 복셀을 제거하면 물체 내부점으로 결정되는 복셀이 남게 된다. 물체의 내부점만을 구분하기 위하여 각각의 복셀로부터 3차원 외곽선까지의 3차원 벡터 e 를 모든 외곽선 점들에 대하여 정의하고 이들을 누적하여 내외부를 판별하여 볼륨을 가진 3차원 형상 정보를 얻을 수

있다.

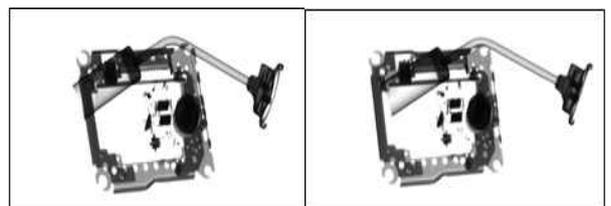
5. 중첩 물체의 체적 분리 복원

중첩 물체의 3차원 체적복원 시 두 물체가 겹쳐진 공간의 복셀이 정확하게 제거되지 못하면, 두 대상체가 연결된 형태로 체적이 복원되기에 중첩물체에 대한 분리 복원이 불가능하다.



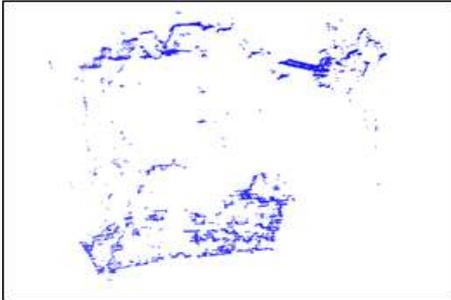
[그림 5] 중첩 물체의 체적복원

체적복원 알고리즘 단계에서 물체를 분리하는 방법으로 복셀과 물체까지의 거리정보를 변수로 하여 일정거리를 벗어나는 경우 내부 복셀의 여부를 판단하기 위한 누적벡터 E 의 계산에 포함하지 않는다. 이는 복셀 v 로부터 너무 멀리 떨어진 3차원 윤곽선의 경우 현재 복셀 v 를 포함하는 물체의 윤곽선이 아닐 가능성이 높기 때문이다. 그러나 단순히 복셀과 윤곽선의 거리 정보만을 이용하면 두 물체사이의 복셀의 경우 누적벡터가 서로 반대 방향의 거리벡터로 인해 상쇄되어 마치 두 물체사이의 복셀이 아닌, 하나의 대상체에 대한 내부 복셀로 연산 되는 오류를 발생하게 된다. 이러한 문제해결을 위해서 거리벡터의 Z 방향을 함께 고려한다. 겹쳐진 두 물체의 사이 공간의 복셀에 대하여 윤곽선까지의 거리 벡터가 주로 Z 축 방향으로 발생되기 때문이다. 가려진 복셀을 내부 복셀과 구분하기 위하여 이들의 누적벡터를 z 방향에서의 거리벡터를 누적하여 임계치보다 크면 누적하지 않도록 설정함으로써 중첩된 영역에서의 내부와 외부 복셀을 구분하도록 하였다. 그림 6은 검색장치로부터 획득한 좌우 영상이며, 그림 7은 중첩 영역의 분리 작업 전의 체적형상이다.



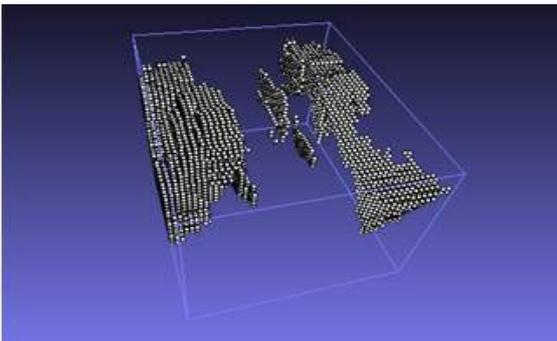
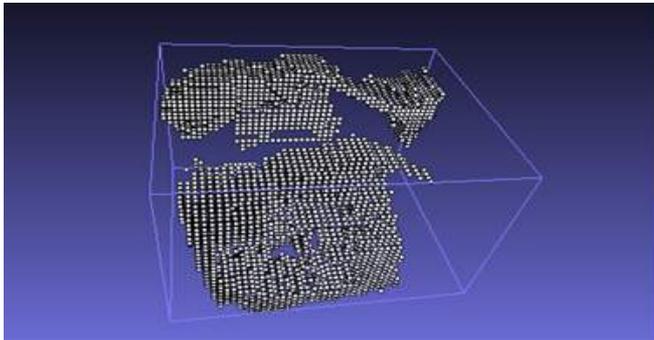
[그림 6] 획득된 스테레오 X-선 영상 : 좌, 우

획득 영상은 X-선의 에너지 1209keV, 디텍터는 640개의 1차원 선형배열 화소센서, 대상물 구동 이송체는 10m/min의 등속으로 스캔영상을 획득하도록 설정하였으며, X-선 발생장치와 디텍터 간의 정확한 거리는 1200mm로 시험 공간을 구성하였다.



[그림 7] 중첩영역의 분리 전 체적 형상

그림 8은 오류 윤곽선을 제거하여 체적 복원 한 결과 영상이다.



[그림 8] 체적 분리 후 형상 복원 결과

표 1. 실제 모형과 복원 모델의 비교 (mm)

중첩대상체	실제모형	복원모델
가로	230	210
세로	128	140
깊이	200	185
물체간 거리	50	60

표1에서 나타낸 결과는 실제 대상체인 토치와 디스

크의 크기 정보를 나타낸 것이고 복원 모델은 형상 복원시 복셀간의 간격을 5mm로 설정하여 복원된 형상의 가로, 세로, 깊이, 분리된 물체간의 거리의 복셀수로부터 산출된 결과값을 나타낸다. 결과에서 확인 할 수 있듯이 실제 모형과 복원 모델은 약 10% 이내의 오차를 보이는 것을 알 수 있다. 검색 시스템에서 더 정밀한 센서의 보정이 이루어지고, 정합알고리즘의 개선과 볼륨복원에서의 알고리즘 개선이 이루어진다면 복원 모델의 오차가 줄어들 것으로 기대된다.

4. 결 론

스테레오 X-선 검색장치는 컨테이너 상자 내의 보이지 않는 화물의 3차원 형태를 검색하는 새로운 개념으로 고안하여 설계 제작된 것이다.

본 연구는 장치의 공간기하좌표를 보정하고 공간 정보 변수변환을 정의하고 시험 대상물에 대한 3차원 형상화 연구를 수행하였다. 먼저 스테레오 X-선 영상 획득 후 윤곽선 검출로부터 정합하여 3차원 윤곽선을 복원하고 윤곽선 오류 제거 작업을 통해 3차원 체적 복원과정을 진행하였다. 현재 형상복원 결과는 실제모형과 10% 이내의 오차를 보이지만 센서 감도 개선 및 스테레오 정합, 체적복원 알고리즘의 최적화 연구를 통해 개선된 결과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

본 논문의 결과는 컨테이너 내부에 중첩된 검사 대상체의 보다 개선된 3차원 형상 정보를 검색하는 과정에서 제공할 수 있음을 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 황영관, 이남호, 이승민, “Calibration을 통한 스테레오 X-ray 검색장치의 기하구조 최적화 연구”, 한국산학기술학회논문지, 제11권, 제9호, pp. 3422 -3427, 9월, 2010.
- [2] 이남호, 박순용, 황영관, 박종원, 임용곤 “볼륨기반 X-선 스캔영상의 3차원 형상화 연구”, 한국해양정보통신학회논문지, 제15권, 제7호, pp. 1583-1590, 8월, 2011.
- [3] Gupta, R. and R. Hartley, Linear push-broom camera, IEEE Trans PAMI, 19(9), pp963-975, (1997)