

핀홀 스테레오 비전 센서의 공간 스캔을 통한 방사선의 영상화 시뮬레이션

박순용* · 백승해 · 최창원

Simulation of Radiation Imaging based on the Scanning of Pin-hole Stereo Vision Sensors

Soon-Yong Park* · Seung-Hae Baek · Chang-Won Choi

School of Computer Science and Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

요 약

원자력 발전소에서 예기치 못한 사고가 발생하거나 발전소를 해체하는 작업을 수행하는 과정에서는 방사선 물질의 유출에 대한 우려가 항상 존재한다. 유출된 방사선 물질을 제거하기 위해서는 방사선의 분포에 대한 정확한 정보를 획득할 수 있는 기술이 필요하다. 그러나 방사선 물질의 직접적 취급은 매우 제한적이기 때문에 방사선과 관련된 기술의 개발은 미리 시뮬레이션을 통하여 그 가능성을 검토하여야 한다. 본 논문에서는 방사선 물질의 분포에 대한 3차원 정보를 획득할 수 있는 방사선 영상화 기술을 시뮬레이션하였다. 두 개의 가상의 1차원 방사선 센서를 이용하여 스테레오 방사선 영상을 획득하고, 스테레오 시차를 이용하여 가상의 방사선 물질에 대한 3차원 거리 정보를 획득하였다. 점과 면으로 구성된 가상의 방사선 물질에 대하여 스테레오 방사선 영상 및 3차원 정보의 획득이 가능함을 시뮬레이션하였다.

ABSTRACT

There are always much concern about the leakage of radiation materials in the event of dismantle or unexpected accident of nuclear power plant. In order to remove the leakage of radiation materials, appropriate dispersion detection techniques for radiation materials are necessary. However, because direct handling of radiation materials is highly restricted and risky, developing radiation-related techniques needs computer simulation in advance to evaluate the feasibility. In this paper, we propose a radiation imaging technique which can acquire 3D dispersion information of radiation materials and tested by simulation. Using two virtual 1D radiation sensors, we obtain stereo radiation images and acquire the 3D depth to virtual radiation materials using stereo disparity. For point and plane type virtual radiation materials, the possibility of the acquisition of stereo radiation image and 3D information are simulated.

키워드 : 방사선영상화, 스테레오영상, 비전센서, 시뮬레이션

Key word : Radiation imaging, Stereo image, Vision sensor, Simulation

접수일자 : 2014. 05. 23 심사완료일자 : 2014. 06. 05 게재확정일자 : 2014. 06. 23

* **Corresponding Author** Soon-Yong Park (E-mail: sypark@knu.ac.kr, Tel:+82-53-950-7575)

School of Computer Science and Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.7.1671>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

일본 후쿠시마 원자력 발전소 사고의 예에서 알 수 있듯이 방사선 누출로 인한 대규모 재난 사고가 발생할 경우에 방사선으로 오염된 지역을 사람이 직접 접근하여 오염도를 탐지하거나 오염 물질을 제거하는 것은 매우 위험한 작업이다. 방사선 물질로 오염된 지역의 분포나 오염의 세기를 미리 알 수 없다면 방사선의 방호나 제독 작업을 위한 재난 대응 및 처리 작업을 시행하는데 상당한 어려움이 따른다. 따라서 방사선 사고가 발생하거나 원전의 해체 작업 시 오염 지역의 분포와 세기를 원격에서 탐지할 수 있는 기술의 개발이 반드시 필요하다.

대부분의 방사선 물질에서는 감마선(Gamma-ray)이 방출되며 감마선은 납이나 텅스텐, 두꺼운 콘크리트 등을 제외하고 대부분의 물질을 투과하기 때문에 인체에 위험한 방사선의 하나이다. 원전 사고의 복구 작업이나 노후한 원전을 해체하는 작업이 필요한 경우 감마선을 방출하는 위험한 방사선 물질의 존재 유무 및 분포에 대한 정보를 획득하는 것은 필수적이다[1].

기존의 방사선 센서는 1차원 및 2차원 센서로 구분할 수 있다. 1차원 방사선 센서는 제작이 용이하지만 기타 1차원 센서들과 마찬가지로 방사선 물질의 분포를 파악하기보다는 방사선의 존재 유무와 그 세기 정도만을 탐지할 수 있다. 그러므로 방사선 물질의 분포나 어떤 세기로 방사선이 누출되는지 알기 어렵다. 방사선 오염 지역에서 방사선 물질의 분포를 한눈에 파악하기 위해서는 사진을 촬영하듯이 방사선 분포의 2차원 영상 정보를 획득하는 것이 매우 효과적이다. 예를 들어 방사선 물질의 분포를 촬영할 수 있는 카메라 형태의 2차원 영상장비가 있다면 방사선 오염지역의 분포를 한눈에 파악하는데 매우 도움이 된다. 국외의 경우에는 오래전부터 방사선 영상화 기술과 제품이 개발되어오고 있다[2]. 1차원 방사선 센서를 이용하여 2차원 방사선 영상을 획득하는 장비는 이미 상용화되고 실제 원자력 발전소의 검사에 사용되고 있다[3]. 또한 최근에는 부호화된 구경(coded aperture)을 가지는 2차원 방사선 영상화 장비가 상용화되고 있으나 매우 고가이고 또한 기술 구현의 난이도가 높다[4-6].

한편 2차원 방사선 센서나 장치에서 획득한 영상 정보를 통하여 방사선의 2차원 분포를 알 수 있는 장점이

있지만 방사선 물질의 특성상 2차원 정보로는 방사선의 분포를 파악하기에는 제한적이다. 감마선과 같은 방사선의 경우 짧은 파장을 가지고 있어 납이나 텅스텐 또는 두꺼운 콘크리트 등의 특수한 물질을 제외하고 일반적인 물질을 투과한다. 따라서 2차원 방사선 센서로 획득한 영상정보에서 방사선 물질이 어떤 물체의 표면으로 누출되었는지 아니면 물체의 내부에서 누출되어 외부로 방사선이 방출되고 있는지 알 수 없다. 예를 들어 방사선 물질이 드럼통과 같은 물체의 내부에 유출되어 있다면 2차원 방사선 센서에서 획득된 영상으로는 방사선 물질의 위치가 드럼통의 내부인지 외부인지 알기 어렵다.

방사선 물질의 분포를 깊이정보를 포함하여 3차원 정보까지 획득하기 위해서는 새로운 형태의 방사선 센서가 필요하다. 따라서 기존의 컴퓨터 비전 연구의 3차원 영상화 기술을 방사선 탐지에 적용하는 것이 본 연구의 착안점이라 할 수 있다[7]. 두 대의 방사선 센서를 사용하여 두 장의 스테레오 방사선 영상을 획득하고 이를 통하여 방사선 물질에 대한 3차원 정보를 획득하고자 한다.

기존에도 3차원 방사선 영상화에 대한 연구가 진행된 바가 있으나 대부분의 경우 라이다(LIDAR) 등과 같은 3차원 거리정보를 획득하는 장비를 사용하여 실내 환경의 3차원 지도를 작성하고 그 지도에 방사선 정보를 중첩(overlay)하는 방법을 사용하고 있다[8, 9]. 이러한 경우 단일 방사선 센서를 사용하여 2차원 방사선 영상을 획득하고 측정된 방사선의 세기에 따라 방사선 물질까지의 거리를 추정하여 3차원 환경 지도와 2차원 방사선 영상을 중첩하고 있다. 본 연구와 유사한 방법을 사용하는 기존 연구는 [10]에서 볼 수 있다. 여기에서는 감마선 센서를 이용하여 다수의 위치에서 2차원 방사선 영상을 획득하고 컴퓨터비전 기술에서 많이 사용하는 삼각법(triangulation)을 이용하여 방사선 물질까지의 거리를 측정하였다[7].

본 논문에서는 1차원 방사선 센서를 사용하여 방사선 물질의 3차원 정보를 추출하기 위한 기술을 제안하고 비전 카메라를 사용하여 제안 기술을 시뮬레이션하였다. 방사선 물질에 대한 2차원 분포를 영상 정보로 획득하기 위하여 1차원 센서를 2차원 공간 스캔하는 방법을 사용할 수 있다. 이를 시뮬레이션하기 위하여 핀홀 렌즈를 장착한 비전 카메라를 X 및 Y 방향으로 스캔하여

가상의 방사선 영상을 획득하였다. 핀홀 렌즈는 실제 방사선 센서의 콜리메이터(collimator)를 시뮬레이션하기 위함이다. 동일한 두 대의 가상 방사선 센서를 가상의 방사선 물질에 대하여 스캔하고 스테레오 방사선 영상을 획득할 수 있었다. 그리고 스테레오 방사선 영상에서 동일한 방사선 물질에 대한 영상 시차를 이용하여 방사선 물질까지의 거리를 측정하였다. 이러한 방법으로 두 대의 1차원 방사선 센서로부터 방사선 물질에 대한 스테레오 영상을 획득하여 거리정보를 포함하는 3차원 방사선 영상화 기술이 구현될 수 있음을 시뮬레이션하였다. 방사선 물질에 대한 스테레오 기반의 3차원 영상화 기술은 국내외에서 개발된 사례가 전무하여 본 논문에서 제안하고 시뮬레이션한 방법으로 3차원 방사선 영상화 장치가 개발된다면 기술적 파급효과가 클 것으로 기대된다.

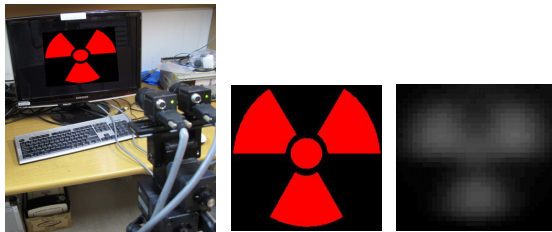


그림 1. 좌로부터 방사선 영상화 시뮬레이터, 가상방사선 물질, 가상방사선 영상
 Fig. 1 From left, Radiation Imaging Simulator, virtual Radiation material, virtual radiation image

II. 방사선 영상화 시뮬레이터의 구성

2.1. 방사선 물질의 스테레오 영상화

방사선 물질의 분포와 3차원 위치를 측정하기위해서 두 개의 방사선 센서를 사용하여 방사선 물질에 대한 스테레오 영상을 획득하고자 한다. 그리고 스테레오 영상에서 방사선 물질의 시차를 측정하여 방사선 물질까지의 거리를 측정한다. 실제 방사선 세기의 측정에 사용하는 방사선센서는 1차원 센서이기 때문에 본 논문에서는 방사선 센서의 시뮬레이션하기위하여 일반적인 비전 카메라 센서를 사용하였다.

비전 카메라 센서는 2차원 영상을 획득하기 때문에 실제 사용하고자하는 1차원 방사선 센서를 시뮬레이션

하기 위해서는 2차원 정보를 1차원 정보로 변환하여야 한다. 따라서 2차원의 방사선 영상 획득을 시뮬레이션하기 위해서는 비전센서를 1차원 센서로 간주하고 그림 2(a)와 같이 팬/틸트 장치를 구동하여 2차원 공간을 스캔하는 과정을 거쳐야 한다. 그림 2(b)에서는 방사선 물질에 대한 스테레오 영상을 획득하기위한 과정을 보여 준다.

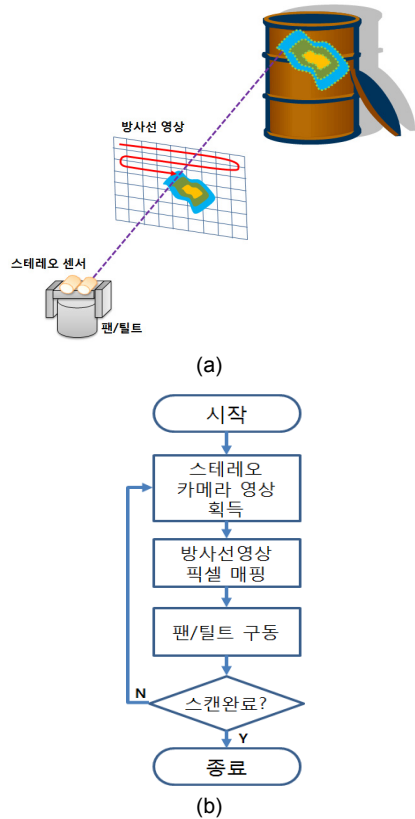


그림 2. (a) 방사선영상화 방법 (b) 방사선 영상화 과정
 Fig. 2 (a) Methods and (b) steps of radiation imaging

2.2. 핀홀 렌즈 제작 및 스테레오 센서 구성

비전(vision) 센서를 방사선 센서로 시뮬레이션하기 위하여 광학 렌즈 대신에 핀홀 (pinhole) 렌즈를 제작하여 카메라에 장착하였다. 핀홀 렌즈의 홀 구경은 1mm, 1.5mm, 2mm 의 세 종류로 제작하였다. 실제 방사선 센서에서 핀홀 렌즈는 콜리메이터(collimator)에 해당하 는 부품이다. 콜리메이터의 성분은 주로 납으로 이루어 져 있으며 센싱 방향을 따라 좁고 긴 홀을 만든다. 이는

콜리메이터가 방사선 물질에서 발생하는 감마선 입자들 중에서 센서의 센싱 방향과 일치하는 감마선 입자만을 센서로 입력되도록 하고 다른 방향의 입자들을 차폐하는 역할을 하기 때문이다.

본 논문에서도 방사선 센서에 사용되는 콜리메이터를 시뮬레이션하기 위하여 카메라의 영상센서 평면과 수직으로 입사되는 빛을 획득하여야 한다. 따라서 핀홀 렌즈를 그림 3(a)에서와 같이 두께 20mm의 알루미늄에 매우 작은 직경의 홀을 만들어서 카메라의 전면부에 부착하였다. 그리고 홀의 내부에서 빛의 반사가 일어나지 않도록 핀홀 렌즈를 흑색으로 도색하였다. 그림 3(b)는 핀홀 렌즈를 카메라에 설치한 모습을 보여준다. 그리고 그림 3(c)는 두 대의 카메라와 핀홀 렌즈 모듈을 팬/틸트 장치에 부착하여 스테레오 방사선 영상을 획득하기 위한 모습을 보여준다. 팬/틸트 장치는 Directed Perception사의 Unit-D46-17를 사용하였으며 팬/틸트의 구동 정밀도는 팬과 틸트 각각 0.0514°이고 구동 범위는 팬이 -158.826°~+158.826° 그리고 틸트가 -46.62°~+31.045°이다.

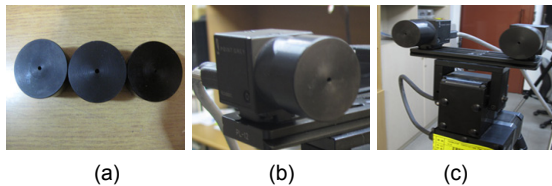


그림 3. (a) 핀홀 렌즈 (b) 핀홀렌즈를 장착한 비전센서 (c) 가상 스테레오 방사선 센서
 Fig. 3 (a) Pinhole lens (b) Vision sensor with a pinhole lens (c) Virtual stereo radiation sensor

2.3. 가상 스테레오 방사선센서의 보정 및 거리 측정 방법

스테레오 방사선 영상을 획득 후 센서에서 방사선 물질까지의 거리를 측정하기 위해서는 영상 센서의 초점 거리 (focal length) 및 베이스라인 (baseline)을 보정 (calibration)하는 것이 필수적이다. 일반적으로 비전 카메라의 초점거리나 두 카메라 사이의 거리인 베이스라인은 고정된 두 카메라의 중심사이의 거리를 측정하거나 카메라 보정 기술을 이용하여 구할 수 있다[7]. 본 논문에서도 두 비전 센서 사이의 거리는 그림 3(c)에서와 같이 팬/틸트에 장착된 두 센서 사이의 거리를 측정하여 알 수 있다. 그러나 두 비전 센서를 2차원 영상센서로 사용하는 것이 아니라 핀홀 렌즈를 장착한 1차원 센

서로 간주하므로 초점 거리를 알 수는 없다. 가상 방사선 영상을 획득하기 위하여 팬/틸트 장치로 1차원 센서를 2차원 공간에 스캔하여 영상을 획득하기 때문에 팬/틸트의 구동 특성에 따라 가상 방사선 센서의 초점거리가 결정된다. 따라서 방사선 영상 센서의 보정은 팬/틸트의 스캔 범위와 최종 획득하는 방사선 영상의 해상도에 따라 결정한다. 가상의 2차원 방사선 영상을 획득하기 위한 팬/틸트 동작 특성 및 최종 획득하는 방사선 영상의 사양을 다음 표에서 보여준다.

표 1. 가상방사선 센서에서 획득하는 영상의 사양
 Table. 1 Image specifications of the virtual radiation sensor

	가로	세로
영상 해상도	50 픽셀	30 픽셀
팬 구동 각도	25.7°	15.42°
FOV	29.74°	
영상 대각선 크기	58.3 픽셀	

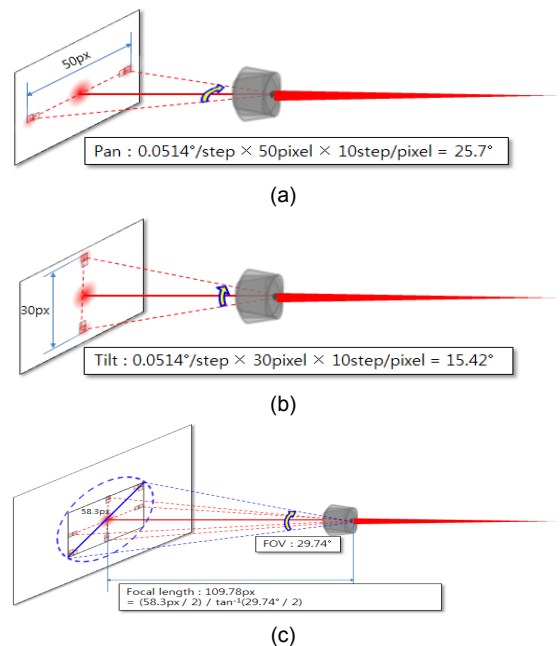


그림 4. 방사선 영상 센서의 초점거리 보정 (a) 팬 스캔각 (b) 틸트 스캔각 (c) 초점거리 계산
 Fig. 4 Focal length calibration of the virtual radiation sensor (a) Pan scan angle (b) Tilt scan angle (c) Focal length calculation

본 논문에서 획득하고자하는 방사선 영상의 해상도는 50×30이다. 팬/틸트를 제어하여 50×30의 방사선 영상을 획득하기 위해서는 팬 및 틸트가 스캔하는 범위를 설정하여야 한다. 실험에 사용한 팬/틸트의 제어 정밀도가 0.0514°/step 이기 때문에 본 연구에서는 1픽셀의 스캔 범위를 팬 및 틸트 모두 10step으로 정하였다. 즉, 팬의 경우 50픽셀을 스캔하기 위해서는 팬을 제어하는 스텝 모터를 500step의 범위로 구동하는 것을 말한다. 이 경우 팬의 스캔 범위는 그림 4(a)와 그림 4(b)와 같이 25.7°가 되며 틸트의 경우 15.42°가 된다.

팬과 틸트의 구동범위가 정해졌으므로 영상 센서의 FOV(Field of View)를 구할 수 있다. 가로 및 세로가 각각 25.7° 및 15.42°인 카메라의 FOV는 29.74°이며 이는 방사선 영상의 대각선 방향의 크기에 해당하므로 58.3 픽셀이 된다. 따라서 그림 4(c)와 같이 방사선 영상카메라의 초점거리(f)를 구할 수 있다.

$$f = \frac{58.3/2}{\tan^{-1}(29.74^\circ / 2)} = 109.78 \text{ (pixel)} \quad (1)$$

스테레오 방사선 영상이 획득된 후 방사선 물질까지의 거리는 다음과 같이 계산한다. 스테레오 영상에서 방사선 물질의 중심 좌표를 찾고 좌, 우 영상에서의 좌표 차이를 시차 d로 간주한다. 미리 보정한 방사선 센서의 초점거리를 이용하여 물체까지의 거리는

$$Z = \frac{Bf}{d} \quad (2)$$

로 계산한다. 여기서 B는 스테레오 방사선 센서의 베이스라인을 말한다.

III. 가상 방사선 영상의 획득

가상의 방사선 물질에 대한 스테레오 영상은 핀홀 렌즈를 장착한 두 대의 비전 센서를 팬/틸트를 이용하여 2차원 공간을 스캔하여 획득한 수십 장의 영상을 합성하여 획득한다. 비전 센서는 2차원 영상 센서이므로 팬/틸트를 구동하여 여러 방향에서 획득한 영상을 처리하여 가상 방사선 영상의 한 픽셀의 밝기값을 결정해야 한다. 그림 5에서와 같이 50×30의 해상도를 가지는 가상 방사

선영상을 생성하기 위해서는 팬/틸트를 50×30의 2차원 공간의 각 위치에서 비전 영상을 우선 획득한다. 그림에서와 같이 가상의 방사선이 존재하는 경우에는 비전 센서의 영상에서도 밝은 부분이 나타남을 알 수 있다. 핀홀 렌즈의 방향이 가상 방사선 물질이 존재하는 방향과 일치할수록 비전센서에서 획득하는 영상의 밝기가 높아진다. 그림 5의 가상 방사선 영상은 식 (3)과 같이 비전 센서에서 획득한 영상의 밝기 평균값을 방사선 영상의 픽셀값으로 변환하여 생성하였다. 일반적으로 가상 방사선 물질이 하나의 점으로 이루어진 경우에 가상 방사선 영상은 2차원 가우시안 함수의 밝기분포를 가지는 영상이 획득된다.

$$I_R(x,y) = \frac{1}{NM} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} I_{x,y}(i,j) \quad (3)$$

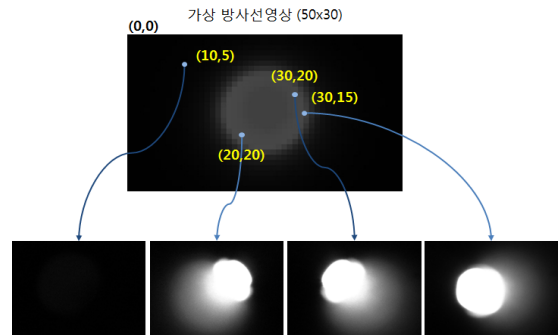


그림 5. 50×30 크기의 가상 방사선 영상을 생성하는 비전 센서 영상의 예
Fig. 5 Examples of vision sensor images for generating a 50×30 radiation image

그림 5에서 보면 가상 방사선물질의 주변주에서도 비전센서의 영상이 밝게 획득됨을 알 수 있다. 이는 알루미늄 재질로 제작한 핀홀의 내부에서 반사가 일어나기 때문이다. 따라서 핀홀 렌즈의 방향이 방사선 물질이 존재하는 방향과 아주 일치하지 않더라도 방사선 물질이 있는 것과 같이 시뮬레이션이 될 수 있다. 그러나 실제 방사선 물질에서 방출되는 감사선은 방사선 센서의 콜리메이터에서 반사가 일어나지 않기 때문에 위 그림 5와 같은 시뮬레이션은 실제 상황과는 다를 수 있다.

이와 같이 방사선 영상화 시뮬레이션에서 발생하는 문제를 분석하기 위하여 그림 6에서와 같이 6개의 작은 원으로 구성된 가상의 방사선 물질을 컴퓨터 모니터에

출력하고 방사선 영상을 획득하였다. 그림 7에서는 팬/틸트가 그림 6의 점a부터 점f까지 6개의 위치에 고정되었을 때 핀홀 비전 센서에서 획득한 영상을 보여주고 있다. 그림 6에서 a위치에서는 가상 방사선 물질이 존재하기 때문에 그림 7(a)의 영상이 획득된다.

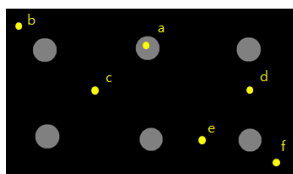


그림 6. 6개의 작은 원으로 구성된 가상 방사선 물질
Fig. 6 Virtual radiation materials of six small circles

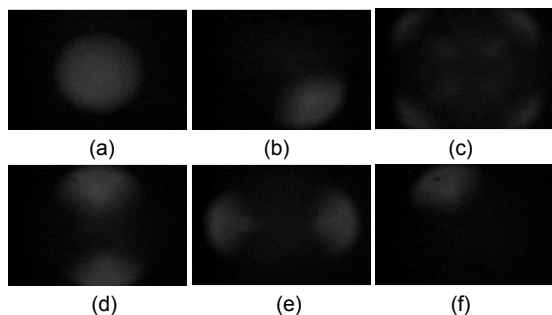


그림 7. 그림 6의 가상 방사선 물질의 각 위치에서 획득한 비전 센서 영상들

Fig. 7 Vision sensor images of every positions of the radiation materials in Figure 6

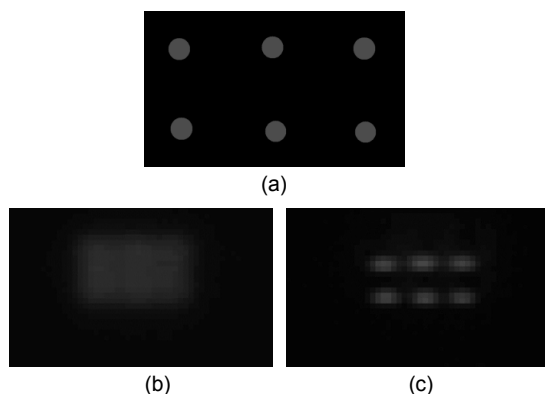


그림 8. 가상 방사선 영상 합성 방법의 비교. (a) 가상 방사선 물질 (b) 가중치 미적용 (c) 가중치 적용한 가상 방사선 영상
Fig. 8 Comparison of radiation image generation (a) Virtual radiation material (b) Without pixel weight (c) With pixel weight

이러한 경우에는 식(3)을 적용하여 방사선 영상 $I_R(x,y)$ 를 합성하더라도 방사선 물질에 대한 영상이 문제없이 생성될 수 있다. 반면 그림 6의 b에서 f까지의 위치에 대한 핀홀 영상 $I_{x,y}(i,j)$ 를 그림 7에서 살펴보면 가상 방사선 물질이 없는 위치에서도 핀홀 카메라 영상에서도 가상 방사선의 잡음이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 매우 작은 알루미늄 핀홀 렌즈가 비전 센서에 장착되었지만 가상 방사선 물질이 존재하는 방향에서 벗어난 방향으로 팬/틸트를 구동하여 영상을 획득하더라도 가상 방사선 물질에서 발산되는 빛이 핀홀 내부에서 반사가 일어난 결과임을 알 수 있다. 실제 감마선의 경우 센서의 콜리메이터의 홀의 방향과 벗어나면 내부 벽에 부딪히는 동시에 흡수되기 때문에 이러한 현상은 발생하지 않는다. 따라서 실제 방사선 물질을 시뮬레이션하기 위해서는 이러한 내부 반사로 인한 잡음을 제거하여야 한다. 본 논문에서는 식 (3)과 같이 핀홀 영상의 단순 평균값을 가상 방사선 영상의 한 픽셀값으로 변환하지 않고 식 (4)와 같이 핀홀 영상의 픽셀위치에 따라 가중치를 두어 방사선 영상을 생성하였다. 영상 위치에 대한 가중치는 일반적으로 2차원 가우시안 함수를 이용하였으며 핀홀 영상의 중심에서 가우시안 함수의 가중치 값이 최대가 되도록 하였다. 그리고 가우시안 함수의 표준편차를 실험적으로 결정하여 가장 최적으로 방사선 영상이 시뮬레이션이 되도록 하였다. 가우시안 가중치를 적용한 결과와 적용하지 않은 결과는 그림 8에서 비교하였다. 가중치를 적용하지 않은 경우에는 그림 8(b)와 같이 방사선 물질의 분포를 정확히 알 수 없는 반면 가중치를 적용한 경우 그림 8(c)와 같이 가상 방사선 물질의 모습과 거의 유사하게 가상 방사선 영상이 획득됨을 알 수 있다.

$$I_R(x,y) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} w(i,j) I_{x,y}(i,j) \quad (4)$$

IV. 스테레오 방사선 영상화 실험 결과

4.1. 점(point) 방사선 물질에 대한 영상화 실험

실제 방사선 물질이 매우 좁은 영역에 분포할 경우에는 방사선 물질을 하나의 점(point)으로 간주할 수 있다. 점의 형태로 분포하고 있는 방사선 물질에 대한 영상화

실험을 수행하기 위하여 가상 방사선 물질로 레이저 광원을 사용하였다. 레이저 광원은 직진성이 있기 때문에 레이저 광의 축(axis)방향과 핀홀 렌즈의 축방향의 일치 여부에 따라 비전 센서에서 획득되는 광량의 크기가 매우 큰 차이가 발생한다. 따라서 가상의 방사선 센서인 비전센서를 통하여 획득하는 가상 방사선 영상이 점 형태의 방사선 물질의 형상을 최대한 유지하고 있을 것으로 판단하였다. 그림 9에서는 한 개의 점 레이저광을 이용한 가상의 점 방사선 물질에 대한 영상화 실험 장치를 보여준다. 점레이저 광원을 스테레오 비전센서 방향으로 설치하고 가상 방사선 영상을 획득하였다. 비전센서에 1.5mm의 핀홀 렌즈를 사용하였고, 레이저광원에서 출력되는 빛의 세기가 매우 높기 때문에 레이저광원과 비전센서 사이에 1mm 핀홀 렌즈를 레이저광원의 광축과 동일한 방향으로 설치하여 레이저광원의 세기를 줄이고 광원에서 산란된 빛을 차단하였다. 두 대의 카메라는 Pointgrey사의 FL2-032S2C 모델로 640×480의 해상도로 영상을 획득하였다. 두 대의 카메라는 IEEE1394B 인터페이스를 통하여 동기화되어 동시에 영상을 획득한다.

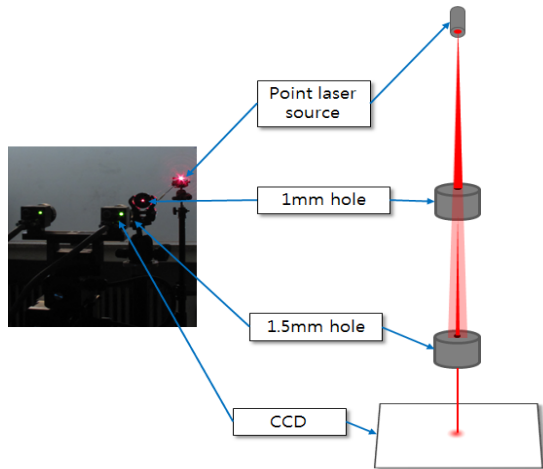


그림 9. 점레이저 광원을 이용한 점 형태의 방사선 물질의 영상화 실험 장치
 Fig. 9 Experimental set for imaging of a point radiation material using a laser point

그림 10에서는 점 형태의 가상 방사선 물질에 대한 방사선 영상화 결과를 보여준다. 비전센서의 영상의 평균값을 방사선 영상의 픽셀값으로 변환한 경우는 레이

저 광원의 높은 밝기값으로 인하여 그림 10(a)와 같이 매우 큰 타원형의 방사선 영상이 획득된다. 가상 방사선 물질을 점으로 간주한 것에 비하여 방사선영상화가 실패함을 알 수 있다. 반면 비전영상의 중앙부에서만 가우시안 함수를 가지는 가중치를 사용하여 방사선영상을 획득한 경우에는 그림 10(b)와 같이 가상의 방사선 물질의 형태와 유사한 작은 원형의 형태로 영상이 획득됨을 알 수 있다. 그러나 가상 방사선 물질이 점레이저라 하더라도 광원에서 발산되는 빛의 세기로 인하여 방사선영상에서는 점을 형태로 영상이 획득되지 못하고 가우시안 분포를 가지는 원형의 형태로 방사선 물질이 관측됨을 알 수 있다.

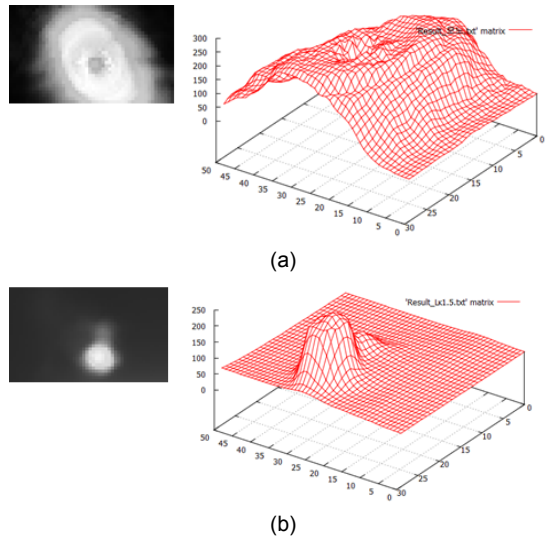


그림 10. 가상 점 방사선 물질의 영상화 비교 (a) 가중치 미적용 (b) 가중치 적용
 Fig. 10 Comparison of imaging of point radiation material (a) Without pixel weight (b) With pixel weight

4.2. 면(plane) 방사선 물질에 대한 영상화 실험

일정한 영역을 가지는 가상 방사선 물질에 대한 영상화 실험을 수행하기 위하여 그림 11과 같이 가상방사선 물질을 모니터에 출력하고 방사선 영상을 획득하는 실험을 수행하였다. 카메라는 앞서의 실험과 동일한 카메라를 사용하였다. 모니터의 전면에서 팬/틸트 장치를 이용하여 가상 방사선 물질의 영상을 획득하고 거리를 측정하였다. 팬/틸트의 스캔 범위가 모니터의 화면 영역을 스캔할 수 있도록 모니터에서 일정한 거리를 두고

센서 장치를 설치하였다. 가상의 방사선 물질까지의 거리를 76cm와 150cm로 두 개의 위치를 설정하고 아래 그림12와 같은 원형의 그림을 모니터에 출력하였을 때 스테레오 비전 센서에서 스테레오 방사선 영상을 획득하고 시차를 측정하였다. 실험에서 사용한 스테레오 센서의 경우 초점거리는 109.78 픽셀이며 스테레오 센서의 베이스 라인은 45mm이다.

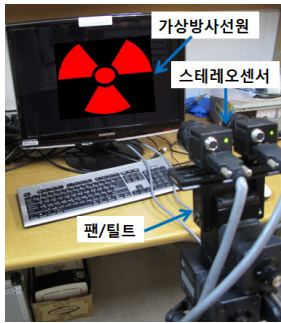


그림 11. 면 형태의 가상 방사선 물질의 영상화 실험 장치
Fig. 11 Experimental set for imaging of plane-type radiation materials

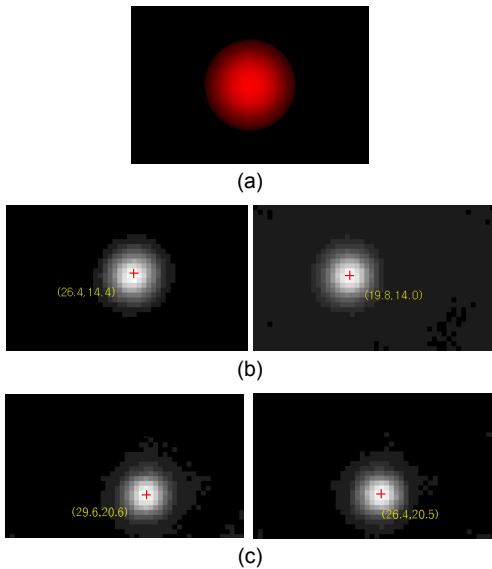


그림 12. 원형 가상 방사선 물질의 스테레오 영상화 실험 (a) 가상방사선 물질 (b) 76cm 거리에서의 방사선 영상 및 시차 (c) 150cm 거리에서의 방사선 영상 및 시차
Fig. 12 Example of stereo radiation imaging (a) Virtual radiation material (b) Stereo radiation image at 76cm (c) Stereo radiation image at 150cm

그림 12에서와 같이 50×30의 해상도로 스테레오 방사선 영상을 획득하였을 때 스테레오 시차는 각각 6.6 픽셀과 3.2픽셀이며 이때 방사선 물질까지의 거리는 74.8cm와 154.4cm로 계산되었다. 실제 거리와의 오차는 1.513%와 2.92%로 비교적 정확한 값이 계산되었다. 시차의 계산은 각 방사선 영상의 밝은 부분을 가우시안 함수로 모델링하고 그 함수의 2차원 평균값을 사용하였다.

4.3. 가상 방사선 물질의 거리 측정 실험

가상 방사선 물질에 대한 스테레오 영상화와 거리 측정의 정확도를 분석하기 위하여 그림 13과 같이 6개의 작은 원형으로 구성된 가상 방사선 물질을 모니터에 출력하고 스테레오 방사선 영상을 획득하였다. 가상 방사선 물질에서 각각 67cm와 100cm의 거리에서 스테레오 영상을 획득한 결과는 그림 13(b) 및 그림 13(c)와 같다. 획득된 스테레오 영상에서 6개의 원형의 가상 방사선 물체의 중심을 2차 가우시안 함수를 사용하여 측정된 결과를 보여주고 있다. 표 2에서는 각 원형물체의 중심의 스테레오 시차와 이를 이용한 거리 측정결과를 보여주고 있다.

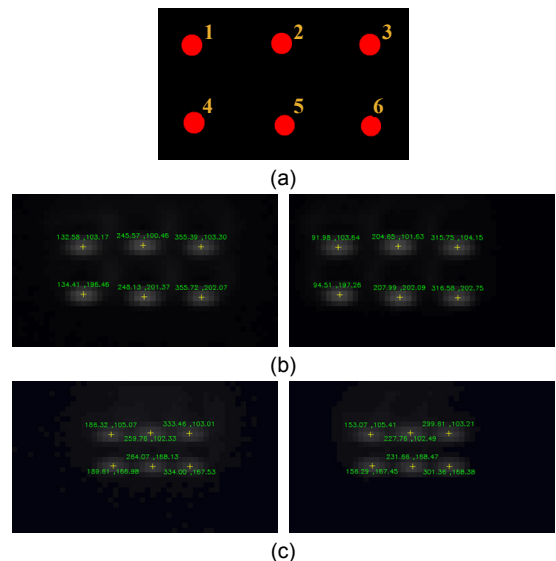


그림 13. 방사선 영상화 및 시차 측정 (a) 6개의 가상 방사선 물질 (b) 67cm 및 (c) 100cm 에서의 스테레오 방사선 영상 및 시차
Fig. 13 Radiation imaging and disparity (a) 6 virtual radiation materials. Stereo image and disparity at (b) 67cm and (c) 100cm

표 2. 스테레오 방사선 영상의 시차 및 거리 측정 결과
Table. 2 Results of disparity and distance from stereo radiation images

방사선 물질번호	67cm		100cm	
	시차 (pixel)	측정거리 (cm)	시차 (pixel)	측정거리 (cm)
1	40.6	73.6	33.3	89.8
2	40.9	73.1	29.0	103.0
3	39.6	75.5	33.9	88.2
4	39.9	74.9	33.3	89.8
5	40.1	74.5	32.4	92.3
6	39.1	74.8	32.7	91.4
평균오차(cm)	7.8		7.7	

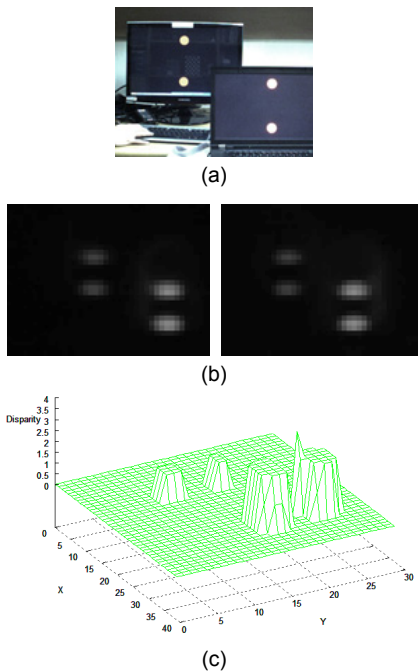


그림 14. 서로 다른 깊이를 가진 가상 방사선 물질에 대한 실험
 (a) 가상 방사선 물질 (b) 스테레오 영상 (c) 3차원 시차지도
Fig. 14 Experiments to radiation materials of different depth
 (a) Virtual radiation materials (b) Stereo image
 (c) 3-D disparity map

그림 14는 서로 다른 깊이를 가지는 가상의 방사선 물질에 대한 3차원 영상화 실험을 수행하였다. 서로 다른 깊이에 놓인 두 대의 모니터에 가상의 원형의 방사선 물질을 출력하고 스테레오 영상을 획득하였다. 그림 14(b)와 같이 서로 다른 깊이에 있는 가상의 방사선

물질에 대하여 시차와 밝기가 다른 스테레오 영상이 획득되었다. 스테레오 영상에 다이내믹 프로그래밍 (dynamic programming) 기법의 스테레오 정합 알고리즘을 적용하여 2차원 시차지도를 그림 14(c)와 같이 획득하였다[11]. 시차지도는 모든 픽셀에 대한 시차정보를 보여주고 있으며, 배경을 제외하고 방사선이 존재하는 픽셀의 경우 방사선 물질까지의 거리 차이에 따라 시차가 다르게 획득되었음을 알 수 있다.

V. 결 론

눈에 보이지 않는 방사선 물질의 존재 및 분포 유무를 쉽게 파악할 수 있는 방사선 영상화 기술은 원자력 발전소의 사고대처나 해체작업에 있어 매우 중요한 기술이다. 국외의 방사선 영상화 기술에 비하여 국내의 수준은 매우 낮은 실정이다. 본 논문에서는 방사선 물질의 2차원 영상 정보뿐만 아니라 그 깊이정보까지 획득할 수 있는 3차원 방사선 영상화 기술을 제안하였다. 방사선 물질을 사용하지 않고 제안기술을 시뮬레이션하기 위하여 가상의 1차원 방사선 센서를 제작하고 보정하였다. 두 대의 가상 방사선 센서를 팬/틸트를 이용하여 스캔하여 스테레오 방사선 영상을 획득하였다. 실제 방사선 센서의 특성을 고려하여 스테레오 방사선 영상의 화질을 개선하고 시차 정보를 이용하여 방사선 물질까지의 거리를 측정할 수 있음을 보였다.

앞으로 제안된 기술을 바탕으로 스테레오 방사선 영상을 획득할 수 있는 센서 장치를 제작하고 실제 방사선 물질에서 방출되는 방사선을 영상화하여 2차원 분포의 정보를 획득할 예정이다. 또한 스테레오 정합 기술을 이용하여 방사선 물질에 대한 거리정보를 획득함으로써 3차원 방사선 영상화 기술을 실환경에서 적용하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 국방과학연구소의 민군기술 협력진흥센터 및 한국원자력연구원의 지원으로 수행되었음

REFERENCES

- [1] J. F. Christian et al. "Nuclear material detection techniques." *SPIE Defense and Security Symposium. International Society for Optics and Photonics*, 2008.
- [2] Canberra Industry Incorporation, <http://www.canberra.com/>
- [3] J. T. Santo, M. Maul, R. Lucero, M. Clapham, B. Battle, D. Sluszka, B. Carberry, "Application of Remote Gamma Imaging Surveys at the Turkey Point PWR Reactor Facility," *Proceedings of the Institute of Nuclear Materials Management*, pp. 454-487, 2006.
- [4] M. Gmar, M. Agelou, F. Carrel, V. Schoepff, "GAMPIX: A new generation of gamma camera", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol. 652, pp. 638 - 640, 2011.
- [5] O. Gal, M. Gmar, O. P. Ivanov, F. Lainé, F. Lamadie, C. L. Goaller, C. Mahé, E. Manach, V. E. Stepanov, "Development of a portable gamma camera with coded aperture," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol. 563, no. 1, pp. 233-237, 2006.
- [6] G. S. Cho, H. J. Shin, Y. K. Chi, J. H. Yoon, "Development of a coded-aperture gamma camera for monitoring of radioactive materials," *Journal of radiation protection*, v.29, no.4, pp. 257-261, 2004.
- [7] E. Trucco, A. Verri, *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*, Prentice Hall, 1998.
- [8] L. Mihailescu, K. Vettera, J. Maltza, J. Rohela, C. Mooreb, L. Supicb, "Spectroscopic 3D gamma-ray imaging for nuclear safeguards," *IAEA-CN-184/193*, 2010.
- [9] L. Mihailescu, K. Vetter, and D. Chivers "Standoff 3D Gamma-Ray Imaging" *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 56, no. 2, April 2009.
- [10] W. Lee, D. K. Wehe, "3D position of radiation sources using an automated gamma camera and ML algorithm with energy-dependent response functions," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*: vol. 531, no. 21, pp. 270-275, Sep. 2004.
- [11] S. Daniel, R. Szeliski. "A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms." *International journal of computer vision* vol. 47, no. 1-3, pp. 7-42, 2002.



박순용(Soon-Yong Park)

1991년 경북대학교 전자공학과 학사
 1993년 경북대학교 대학원 전자공학과 석사
 2003년 미국 뉴욕주립대학교 스토니브룩 박사
 1993년 ~ 1999년 한국원자력연구소 로봇기반연구실 선임연구원
 2004년 ~ 2005년 한국전자통신연구원 디지털콘텐츠연구단 선임연구원
 2005년 ~ 현재 경북대학교 컴퓨터학부 부교수
 ※ 관심분야 : 3차원 스캐닝, 로봇 SLAM, 3DTV



백승해(Seung-Hae Baek)

2004년 경북대학교 컴퓨터공학과 학사
 2010년 경북대학교 대학원 전자전기컴퓨터학부 석사
 2010 ~ 현재 경북대학교 대학원 컴퓨터학부 박사과정
 ※ 관심분야 : 자동차비전, 카메라보정, 3차원 복원



최창원(Chang-Won Choi)

2012년 경북대학교 컴퓨터공학과 학사
 2012 ~ 현재 경북대학교 대학원 컴퓨터학부 석사과정
 ※ 관심분야 : 자동차비전, 표시판인식