

A Study on Image Acquisition of Gamma Camera using Simulation LUT and MLPE

Seung-Jae Lee^{1,2,*}

¹Department of Radiological Science, Dongseo University

²Center for Radiological Environment & Health Science, Dongseo University

Received: July 05, 2021. Revised: August 20, 2021. Accepted: August 31, 2021.

ABSTRACT

In order to acquire an image from a gamma camera, linearity correction must be performed. To this end, digital coordinates are acquired by using a linearity map to accurately specify the location where the scintillator and gamma rays interact. In this study, a method for acquiring undistorted images and digital coordinates was developed using a lookup table and maximum likelihood position estimation without using a linearity map. The proposed method was verified by configuring a small gamma camera through DETECT2000 simulation. A gamma camera was constructed using a GAGG scintillator and a SiPM optical sensor, and a gamma-ray interaction was generated at the center of the scintillator, and a lookup table was prepared using the ratio of the signals obtained from the SiPM. Through the prepared lookup table and the maximum likelihood position estimation, the position of the signal obtained by the gamma-ray interaction was acquired as digital coordinates to compose an image. As a result, the linearity was maintained compared to the generally acquired image, the accuracy of the location where the gamma-ray interaction was generated was excellent, and the distance between the locations was uniform. Since the lookup table obtained through simulation is created using the ratio of the signal, it can be directly used in the experiment, and the position of the signal can be conveniently obtained with digital coordinates with corrected linearity without creating a linearity map.

Keywords: Gamma Camera, LUT, MLPE, DETECT2000

I. INTRODUCTION

감마카메라는 방사선을 발생시키는 방사성의약품을 체내에 주입 후, 방사성의약품의 방사성동위원소의 붕괴로 방출된 감마선을 검출하여 방사성동위원소의 위치를 영상화하는 장비이다^[1]. 감마카메라는 감마선을 빛으로 변환시켜주는 섬광체와, 섬광체에서 발생된 빛을 수집하여 전기적 신호로 변환하는 광전자증배관 및 신호를 획득하는 여러 회로로 구성된다. 광전자증배관은 일반적으로 원형의 형태를 사용하며, 중심과 외곽에서의 빛 수집의 차이를 보인다^[2]. 또한 광전자증배관이 원형이므로

각각의 위치 사이에 빛의 수집이 저하되는 빈 공간이 발생한다. 이러한 원인으로 인해 감마카메라를 통해 획득한 직선상의 선원은 왜곡된 형태로 나타난다^[3]. 이를 보정하기 위해 직선성 맵을 작성하여 활용한다.

본 연구에서는 직선성 맵을 활용한 보정을 실시하지 않고 감마카메라로 왜곡되지 않은 형태의 영상을 획득하고 디지털 좌표를 획득하는 방법을 개발하였다. 이는 각 감마선과 섬광체가 상호작용한 위치별 신호의 크기를 순람표로 작성하고 최대우도함수^[4]를 사용하여 가장 근접한 위치를 추적하는 방법이다. 순람표는 시뮬레이션을 통해 각 채널

* Corresponding Author: Seung-Jae Lee E-mail: sjlee@gdsu.dongseo.ac.kr Address: 47 Jurye-ro Sasang-gu Busan 47011, Republic of Korea

Tel: +82-51-320-2719

별 획득된 신호의 크기에 대한 비율을 사용하여 작성하였다. 감마카메라에서 최대우도함수를 통한 영상 획득을 위해 DETECT2000^[7,8] 시뮬레이션 툴을 사용하여 순람표를 획득하였으며, 감마선과 섬광체가 상호작용한 위치의 위치 추적의 정확도를 평가하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 감마카메라 구성

감마카메라를 통한 영상 획득을 위해 DETECT2000을 사용하여 구성하였다. 순람표와 최대우도함수를 사용한 감마선과 섬광체의 상호작용 위치를 추적하는 방법에 대한 타당성을 증명하기 위해 소형의 감마카메라를 구성하였다. 이러한 소형의 감마카메라의 섬광체는 빛의 발생률이 매우 높은 Gadolinium Aluminium Gallium Garnet(GAGG)를 사용하였다^[9,10]. GAGG 섬광체는 6.6 g/cm³의 밀도를 지녀, NaI(Tl)보다 작은 두께로 구성가능하여, 분해능을 향상시킬 수 있다. 또한 50,000 photon/MeV의 빛을 발생시켜 우수한 에너지 분해능을 가진다. 빛을 검출하는 센서로는 실리콘광전증배센서(Silicon Photomultiplier, SiPM)을 사용하였다^[11]. SiPM은 부피가 작고, 빛 수집효율이 높아 소형의 감마카메라에 사용하기에 적합하다. Fig. 1과 같이 감마카메라를 구성하였다. GAGG 섬광체의 크기는 12.6 mm × 12.6 mm × 2 mm이다. SiPM은 4 × 4 배열을 사용하였으며, 각 픽셀의 크기는 3 mm × 3 mm이다. 3.2 mm 간격으로 배열되어 전체 크기는 섬광체의 크기와 동일하게 구성하였다.

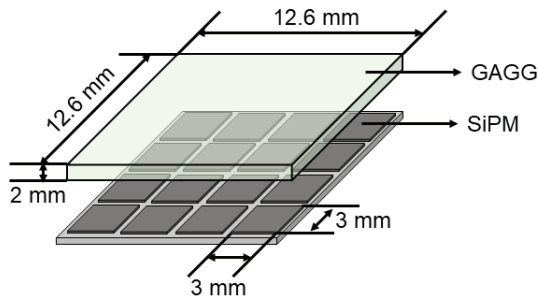


Fig. 1. Schematic diagram of a small gamma camera composed of GAGG scintillator and SiPM.

감마선과 섬광체의 상호작용을 통한 순람표를 획득하기 위해 X 및 Y축으로 1.3 mm에서 11.3 mm까지 1 mm 간격으로, 깊이 방향인 Z축 방향으로는 섬광체의 중심에서 각 위치별 1,000번의 감마선 반응을 일으켰다. 발생한 빛은 16개의 SiPM에서 획득되었으며, 이를 4채널의 신호로 감소시켜, 각 채널별 신호 비율의 평균과 표준편차로 순람표를 작성하였다. 작성된 순람표를 사용하여 최대우도함수에 적용하여 감마선 반응을 일으킨 위치에 대한 평면 영상과 최대우도함수로 획득한 평면 영상을 비교 평가하였다. 최대우도함수를 사용한 평면 영상의 위치는 Eq. 1을 통해 계산되었다.

$$\ln Pr[M_i/x] = - \left(\sum_{i=1}^n \frac{(M_i - \mu(x))^2}{2\sigma_i^2(x)} + \sum_{i=1}^n \ln \sigma_i(x) \right) \quad (1)$$

여기서 M은 각 위치별 감마선 반응을 통해 획득한 4채널의 신호를 나타내며, μ 와 σ 는 각 위치별 순람표의 평균값과 표준편차 값을 나타낸다.

2. 위치 측정의 정확도 평가

섬광체 중심에서 발생시킨 감마선 반응을 통해 획득한 영상의 위치 측정은 최대우도 함수를 통해 완벽히 이루어진다. 그러나 깊이 방향에서 여러 위치에서 발생한 감마선 반응에 의한 위치 측정은 달라질 수 있다. 이러한 여러 깊이 방향의 위치에서 발생한 감마선 반응에 의해 획득된 신호에 대한 위치 측정 정확도를 평가하였다. 깊이 방향에 대한 신호 획득은 Z축 방향으로 0.01 mm에서 1.99 mm까지 0.02 mm 간격으로 감마선 반응을 일으켰고, 각 위치별 서로 다른 발생 정보를 바탕으로 10번 반복하여 감마선 반응을 일으켰다. 즉 (X, Y) 위치에서 총 1,000번의 감마선 반응을 일으켜 위치 측정의 정확도를 평가하였다.

III. RESULT

1 평면 영상 비교

시뮬레이션을 통해 획득한 16채널의 신호를 사용하여 1 mm 간격으로 발생시킨 감마선 반응에 대한 평면 영상을 획득하였다. 영상은 앵거 식을 사

용하였으며, Fig. 2와 같이 나타났다. 11×11 배열의 영상으로 나타났으며, 각 위치별 간격은 일정하지 않고, 직선 형태로 나타나지 않은 것을 확인할 수 있다. 즉, 이러한 직선 형태로 나타나지 않으므로 이를 보정하기 위해 직선성 보정을 시행한다. 최대우도함수를 사용하여 획득한 영상은 Fig. 3과 같다. Fig. 2와 같이 11×11 의 영상으로 나타났으나, 위치별 간격은 일정하고, 직선 형태로 영상화된 것을 확인할 수 있다. 그러므로 추가적인 보정작업이 필요 없다.

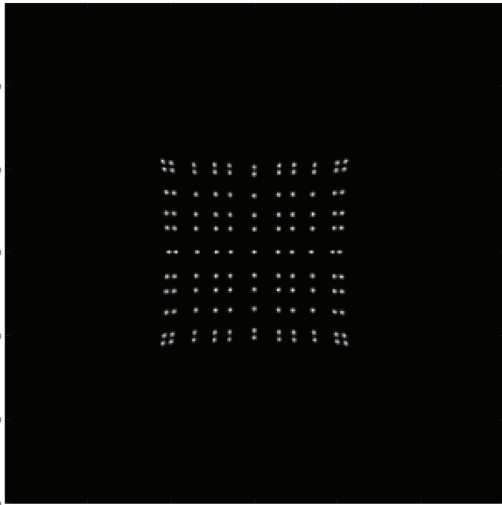


Fig. 2. Flood image acquired through Anger equation using the signal obtained by gamma-ray interaction at 1 mm intervals in the GAGG scintillator.

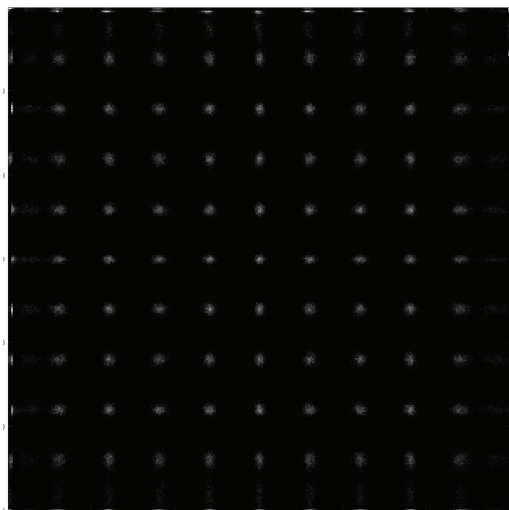


Fig. 3. Flood image acquired using maximum likelihood position estimation (MLPE) and look-up table (LUT). All positions where gamma-ray interaction occurred were uniformly spaced and appeared in the form of a linear line.

2. 최대우도함수를 통한 위치 측정 정확도 평가

최대우도함수를 사용하여 각 감마선 반응이 발생된 위치의 측정 정확도의 평가를 위해 평면 영상을 획득하기 위해 감마선 반응을 일으킨 지점에서 섬광체의 깊이 방향으로 서로 다른 위치에서 감마선 반응을 일으켰다. 정확도는 감마선 반응을 일으킨 X, Y 좌표 값과 순람표와 최대우도함수를 사용하여 계산된 좌표 값의 일치도를 통해 평가하였다. Fig. 4는 정확도 평가를 위해 감마선 반응을 일으켜 획득한 신호를 사용하여 구성한 평면 영상이다. 섬광체 중심에서 감마선 반응을 일으켜 획득한 평면 영상과 동일하게 11×11 배열의 영상으로 획득되었다. 정확도는 $88.2 \pm 10.7\%$ 의 결과를 보였다. 섬광체의 중심에서 감마선 반응을 일으켜 획득한 평면 영상에 비해 각 위치에서 긴 꼬리와 같은 형태가 나타난 것을 확인할 수 있다. 이는 섬광체 깊이 별로 광센서에서 획득된 빛의 양이 달라 나타난 것으로 오차의 원인이 된다.

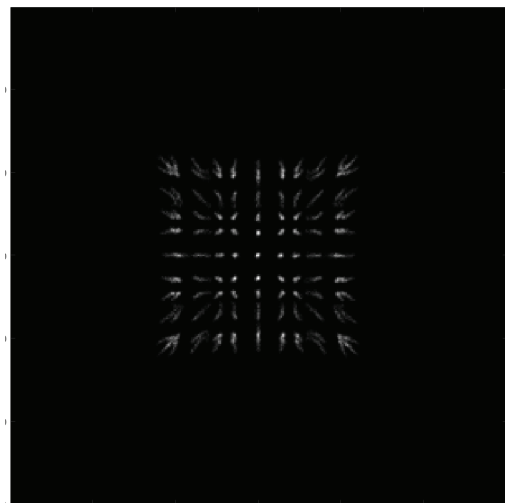


Fig. 4. Flood image acquired by gamma-ray interaction at positions in the depth direction from 0.01 mm to 1.99 mm in an 11×11 array.

각 위치별 정확도를 Fig. 5에 나타내었다. 모든 위치에서 높은 정확도를 보였으나, 몇몇 지점에서 다른 위치에 비해 다소 낮은 정확도를 나타내었다. 이는 SiPM 간격 사이에서, 즉 광센서가 위치하지 않는 지역, 감마선 반응이 발생되어 나타난 결과이다. 상대적으로 다른 지점에 비해 광센서에서 측정

되는 빛의 양이 적고, 영상에서 긴 꼬리로 나타나 영상의 위치가 서로 겹쳐져 위치가 구분이 어려운 지점에서 다소 낮은 정확도로 나타났다.

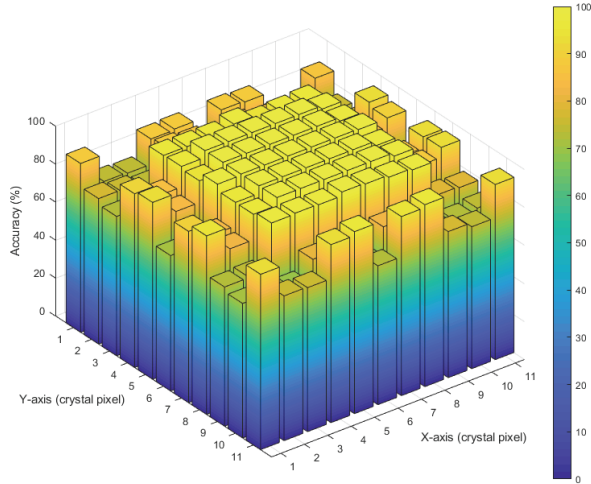


Fig. 5. Flood image acquired through Anger equation using the signal obtained by gamma-ray interaction at 1 mm intervals in the GAGG scintillator.

IV. DISCUSSION

본 연구에서는 소형의 감마카메라를 구성하여 왜곡된 형태의 영상을 직선성 보정 작업 없이 정확한 위치를 디지털 정보로 획득하는 연구를 수행하였다. 광센서로 사각형의 검출영역을 지닌 SiPM을 사용하여 직선성 보정 전의 획득 영상의 왜곡이 크게 나타나지 않았다. 그러나 감마선과 섬광체가 상호작용한 위치가 전반적으로 영상의 중심에 형성되었으며, 각 위치 간격이 차이가 나고 곡선의 형태로 나타난 것을 확인할 수 있었다. 그러나 순람표와 최대우도함수를 적용하여 획득한 영상에서는 영상의 모든 영역에 걸쳐 감마선과 섬광체가 상호작용한 위치가 기록되었으며, 각 위치의 간격이 모두 동일하고 직선 형태로 영상화된 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 본 연구의 결과는 직선성 보정을 수행하지 않더라도 충분히 영상의 왜곡을 보정할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

V. CONCLUSION

감마카메라를 사용하여 피사체의 영상을 획득하기 위해서는 정확한 영상 정보를 획득하기 위해 여

러 보정 작업을 시행한다. 그중 직선성 보정작업은 영상의 왜곡을 최소화하고 정확한 위치로 표현하기 위해 시행하는 중요한 작업이다. 이를 위해서 기존에는 직선성 보정 맵을 사용하여 어긋난 위치에 형성된 영상을 보정된 위치로 이동하는 작업을 통해 보정을 시행하였다.

본 연구에서는 이러한 작업 절차 없이 순람표와 최대우도함수를 사용하여 직선성 보정작업 수행없이 디지털 위치 좌표를 획득하였다. 이를 위해 시뮬레이션을 통해 획득한 각 광센서들의 신호를 사용하여 4채널로 감소시키고 감소된 각 채널별 신호의 비율을 사용하여 순람표를 작성하였다. 작성된 순람표와 새롭게 획득한 신호의 비율을 최대우도함수를 통해 가장 근접한 위치로 측정함으로써 감마선이 섬광체와 상호작용한 위치를 디지털 신호로 측정할 수 있었다. 이러한 순람표와 최대우도함수를 이용하는 방법은 신호의 비율을 사용함으로써 데이터의 차이에 의한 시뮬레이션 순람표를 실험에 적용하지 못하는 부분을 극복가능하며, 기존 장비에 적용 가능하여 보다 편리하고 간결하게 디지털 위치 정보를 획득할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF - 2018R1C1B5085189).

Reference

- [1] Y. Choi, J-H. Kim, J-Y. Kim, K-C. Im, S-E. Kim, Y-S. Choe, K-H. Lee, B-T. Kim, "Investigation of the Signal Characteristics of a Small Gamma Camera System Using NaI(Tl)-position Sensitive Photomultiplier Tube", Korean Journal of Nuclear Medicine, Vol. 34, No. 1, pp. 82-93, 2000.
- [2] K-Y. Lyu, *Nuclear Medicine Technology*, Academya, 1st edition, pp. 60-61, 2018.
- [3] Timothy K Johnson, Charles Nelson, Dennis L Kirch, "A new method for the correction of gamma camera nonuniformity due to spatial distortion", Physics in Medicine and Biology, Vol. 41, No. 10, pp. 2179-2188, 1996.

<http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/41/10/023>

- [4] S. J. Lee, C. H. Baek, "Digital Position Acquisition Method of PET Detector Module using Maximum Likelihood Position Estimation", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 15, No. 1, pp. 1-6, 2021. <http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2021.15.1.1>
- [5] Y. H. Chung, S. J. Lee, C. H. Baek, Y. Choi, "New design of a quasi-monolithic detector module with DOI capability for small animal pet", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 593, pp. 588-591, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.05.059>
- [6] Seung-Jae Lee, Cheol-Ha Baek, Yong Hyun Chung, Yong Choi, Wonho Lee, "A Cross-Stack Quasi-Monolithic Detector with DOI Capability for a Small Animal PET", *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 54, No. 6, pp. 2429-2434, 2009. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2008.4774286>
- [7] F. Cayouette, D. Laurendeau, C. Moisan, "DETECT2000: an improved Monte-Carlo simulator for the computer aided design of photon sensing devices," *Proceedings of SPIE, Quebec*, Vol. 4833, pp. 69-76, 2003. <https://doi.org/10.1117/12.474315>
- [8] F. Cayouette, C. Moisan, N. Zhang, C. J. Thompson, "Monte Carlo Modeling of Scintillator Crystal Performance for Stratified PET Detectors With DETECT2000", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 49, No. 3, pp. 624-628, 2002. <https://doi.org/10.1109/TNS.2002.1039539>
- [9] <https://www.epic-crystal.com/oxide-scintillators/gagg-ce-scintillator.html>
- [10] J. Y. Yeom, S. Yamamoto, S. E. Derenzo, V. Ch. Spanoudaki, K. Kamada, T. Endo, C. S. Levin, "First Performance Results of Ce:GAGG Scintillation Crystals With Silicon Photomultipliers", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 60, No. 2, pp. 988-992, 2013. <https://doi.org/10.1109/TNS.2012.2233497>
- [11] https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s14160_s14161_series_kapd1064e.pdf

시뮬레이션 순람표와 최대우도함수를 이용한 감마카메라의 영상 획득 연구

이승재^{1,2,*}

¹동서대학교 방사선학과

²동서대학교 방사선보건환경연구센터

요 약

감마카메라에서 영상을 획득하기 위해서 직선성 보정을 시행해야 한다. 이를 위해서 섬광체와 감마선이 상호작용한 위치에 대한 정확한 위치 지정을 위해 직선성 맵을 활용하여 디지털 좌표를 획득한다. 본 연구에서는 직선성 맵을 사용하지 않고 순람표와 최대우도함수를 사용하여 왜곡되지 않은 영상을 획득함과 동시에 디지털 좌표를 획득하는 방법을 개발하였다. DETECT2000 시뮬레이션을 통해 소형의 감마카메라를 구성하여 제시된 방법에 대해 검증을 실시하였다. GAGG 섬광체와 SiPM 광센서를 사용하여 감마카메라를 구성하였고, 섬광체의 중심에서 감마선 반응을 일으켜 SiPM에서 획득한 신호의 비율을 사용하여 순람표를 작성하였다. 작성된 순람표와 최대우도함수를 통해 감마선 반응에 의해 획득한 신호의 위치를 디지털 좌표로 획득하여 영상을 구성하였다. 그 결과 일반적으로 획득되는 영상에 비해 직선성이 유지되었으며, 감마선 반응을 발생시킨 위치의 정확도가 우수하였으며, 위치 간 간격이 일정하게 나타났다. 시뮬레이션을 통해 획득한 순람표는 신호의 비율을 사용하여 작성되므로 이를 실험에 직접 활용할 수 있어, 직선성 맵을 작성하지 않고 편리하게 직선성이 보정된 디지털 좌표로 신호의 위치를 획득할 수 있다.

중심단어: 감마카메라, 순람표, 최대우도함수, DETECT2000

구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	이승재	동서대학교	교수