

논문 2016-53-9-15

RMC를 이용한 미지 선원의 방향, 거리 예측

(Estimating the Direction and Distance of an
Unknown Radiation Source Using RMC)

신 영 준*, 김 기 현**, 이 계 민***

(Youngjun Shin, Geehyun Kim, and Gyemin Lee[©])

요 약

방사능 누출 사고 시 대응이나 핵안보 검증을 위한 핵물질 탐지에 있어서, 방사선을 방출하는 미지의 선원에 대한 위치 정보를 파악하는 것은 중요하다. 그러한 기구 중 하나인 회전 변조 시준기는 미지 선원을 원격 감지하기 위한 장비로서 영상화를 통해 선원의 위치 탐지가 가능하다. 본 논문에서는 Kowash의 연구를 기초로 회전 변조 시준기의 시스템 모델과 그를 영상화하는 알고리즘을 소개한다. 하지만 결과 영상화 이미지는 선원의 방향은 보여줄 수 있으나 선원의 거리를 찾지 못하는 문제점이 있다. 또한 선원의 실제 방향뿐 아니라 180° 대칭방향에서도 선원을 추정하는 모호성 문제를 안고 있다. 본 논문에서 우리는 영상화 결과의 방향 대칭적 모호성을 해결하고, 두 대의 RMC를 이용해 거리를 추정하는 방법을 제안한다. 그리고 이를 RMC 시뮬레이션 데이터를 이용하여 성능을 검증한다.

Abstract

Rotating modulation collimator(RMC) is a remote sensing technique for a radiation source. This paper introduces an RMC system model and its image reconstruction algorithm based on Kowash's research. The reconstructed image can show the direction of a source. However, the distance to the source cannot be recovered. Moreover, the RMC image suffers from 180° ambiguity. In this paper, we propose a distance estimation method using two RMCs together with a solution to the ambiguity. We also demonstrate its performance using simulated RMC data.

Keywords : Rotating modulation collimator, Maximum likelihood estimation, Image reconstruction, Radiation source detection, Monte Carlo simulation

I. 서 론

방사능 누출 사고 시 대응이나 핵안보 검증을 위한 핵물질 탐지에 있어서, 방사선을 방출하는 미지의 선원에 대한 핵종 및 위치 정보에 대한 신속한 파악은 빠른 사고 수습과 작업자의 안전 확보에 있어 중요한 역할을 담당한다.

* 학생회원, *** 정회원 서울과학기술대학교 (Seoul National University of Science and Technology)

** 정회원, 세종대학교 (Sejong University)

© Corresponding Author (E-mail : gyemin@seoultech.ac.kr)

※ 본 논문은 한국 연구 재단(NRF-2014R1A1A1003458)과 한국 방사선 안전재단 (1403024)의 지원을 받아 수행되었음.

Received ; March 29, 2016

Revised ; September 1, 2016

Accepted ; September 6, 2016

방사선원의 위치를 원격으로 감지하는 기술을 개발하기 위해 다양한 접근 방법이 시도되어 왔다. 대표적으로 Ziock 등은 광범위 영상감지를 위해 코드화된 개구 이미지(coded aperture imager)를 이용하였으나, 이는 기본적으로 위치 민감형 방사선 검출기 또는 다수의 방사선 검출기를 활용하는 것을 기반으로 한다^[1]. 이에 반해, 회전 변조 시준기(rotating modulation collimator, RMC)를 기반으로 한 방사선원 탐지 기술은 위치민감형 검출기 또는 방사선 검출기의 개수에 구애받지 않아 보다 간편하고 신속한 방식으로 방사선원의 위치를 원격으로 감지할 수 있다. RMC를 이용한 검출기 응답 변조의 초기 개념은 Oda가 제안한 천체 X-ray 검출기로부터 시작되었으며,^[2] 이를 바탕으로 Mertz는 현재의 RMC와 유사한 디자인으로 변형시켰다.^[3]

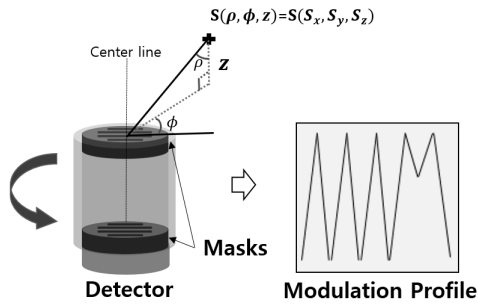


그림 1. 회전 변조 시준기의 구조와 동작 원리
Fig. 1. The structure and operation principle of RMC.

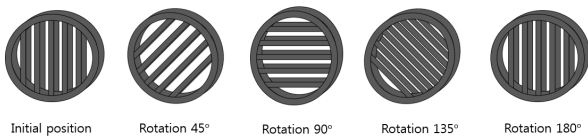


그림 2. 회전 각도에 따른 마스크의 변화
Fig. 2. The change of mask opening over rotation angle.

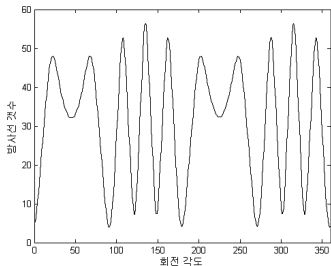


그림 3. 변조 패턴의 예
Fig. 3. An example of modulation profile.

본 연구에서 개발코자 하는 방사선 영상 장비인 RMC는 방사선원을 원격 감지하기 위한 장비로서 검출기와 두 개의 마스크로 구성되어 있다(그림 1). 이 마스크들은 그림 2처럼 함께 회전하면서 매 각도 다른 마스크 패턴을 만들어 방사선을 막거나 통과시키며, 이에 따라 검출기에 측정되는 방사선의 변화가 생긴다. 이러한 회전각도에 따른 검출 입자수의 변화를 변조 패턴(modulation profile)이라 하며 그림 3은 그 예이다.

본 논문에서는 Kowash^[4]의 연구를 기초로 RMC에서 획득한 1차원 변조 패턴으로부터 방사선원의 위치를 2차원으로 시각화하여 보여줄 수 있는 영상화 알고리즘을 소개한다. 또한, 우리는 기존 영상화 알고리즘이 안고 있는 대칭적 모호성을 비대칭 마스크를 이용해 해결할 수 있음을 보인다. 이에 더하여 두 대의 RMC를 이용하여 영상화 알고리즘으로부터 얻은 선원의 방향을 통해 선원의 거리(z)를 추정하는 방법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 이를 검증한다.

II. RMC 영상화 알고리즘

본 절에서는 RMC 시스템 모델을 기술하고 이를 영상화하는 알고리즘을 유도한다.

1. RMC 시스템 모델

RMC 후방에 위치하는 검출기는 방사선원이 방출하는 방사선의 일부를 검출하게 되며 그 수는 선원의 위치와 방사능(activity), 검출기의 효율, 마스크의 회전 각도에 따른 열린 공간의 크기에 따라 달라진다. 방사선원이 푸아송 분포에 따라 방사선을 방출한다고 가정하면, 검출된 입자의 수 역시 푸아송 분포를 따른다고 볼 수 있으며^[5] 그 분포는

$$y_i \sim \text{Poisson}(\tau_i[\alpha \cdot \epsilon(E) \cdot \frac{\Omega(\rho, \phi, z)}{4\pi} \cdot [P_i(\rho, \phi, z) + P_i(\rho, \phi, z)^c \cdot \lambda(E)] + b(E)]) \quad (1)$$

로 쓸 수 있다.

여기서 τ_i 는 일정 각도에서 RMC가 머문 시간(dwelling time)을 나타내며, α 는 선원의 방사능(Bq), $\epsilon(E)$ 은 에너지에 따른 측정 효율이다. 입체각 $\frac{\Omega(\rho, \phi, z)}{4\pi}$ 는 선원에서 등방성으로 방출한 방사선이 앞 마스크의 정면을 향할 확률이며, 그 방사선이 앞·뒷면 마스크의 열린 공간을 모두 통과할 확률은 $P_i(\rho, \phi, z)$ 이다. 하지만 방사선이 마스크에 의해 막히더라도 물질과 에너지에 따라 마스크를 투과할 수 있는데 그 비율은 $\lambda(E)$ 로 나타내며, $b(E)$ 는 백그라운드 입자 수이다(각 항에 대한 자세한 설명과 계산 방법은 Appendix에 기술하였다.).

2. MLEM 알고리즘

RMC를 이용해 측정된 1차원 데이터로부터 2차원 영상을 재구성하기 위해 사용하는 MLEM 알고리즘을 유도한다. 이는 positron emission tomography(PET)에서 대상 표적을 영상화하는 알고리즘과 유사하며^[6] Kowash^[4]가 RMC 영상화에 이용하였다. 먼저 대상 공간을 픽셀화하고, 각 픽셀에서의 선원의 방사능을 α_j 로 나타낸다. 마스크의 회전각도 i 에서의 측정값을 y_i , 그 때 기대되는 수를 $\bar{y}_i(\alpha)$ 라 하면 $\bar{y}_i(\alpha) = \sum_j \alpha_j p_{ij}$ 를 만족한다. 여기서 p_{ij} 는 픽셀 j 의 선원이 방출한 방사선을 마스크가 i 번째 회전 각도에 있을 때 검출될 확률을 뜻한다.

그렇다면 α 의 가능도(likelihood) 함수는

$$L(\alpha) = \prod_i e^{-\bar{y}_i(\alpha)} \frac{\bar{y}_i(\alpha)^{y_i}}{y_i!} \quad (2)$$

로 쓸 수 있다. 따라서 로그-가능도 함수는

$$l(\alpha) = \sum_i [y_i \log(\bar{y}_i(\alpha)) - \bar{y}_i(\alpha) - \log(y_i!)] \quad (3)$$

이 되며 이것의 1차 편미분

$$\frac{\partial l(\alpha)}{\partial \alpha_j} = - \sum_i p_{ij} + \sum_i \frac{y_i p_{ij}}{\sum_k \alpha_k p_{ik}} \quad (4)$$

이 0이 되는 $\hat{\alpha}$ 으로 MLE를 찾을 수 있다. 이 때 2차 편미분

$$\frac{\partial^2 l(\alpha)}{\partial \alpha_j \partial \alpha_{j'}} = - \sum_i \frac{y_i p_{ij} p_{ij'}}{[\sum_k \alpha_k p_{ik}]^2} \quad (5)$$

이 음의 준정부호(negative semidefinite)이므로 $\hat{\alpha}$ 에서 $l(\alpha)$ 가 최대가 된다. 수식 (4)을 다시 쓰면

$$0 = \alpha_j \frac{\partial l(\alpha)}{\partial \alpha_j} \Big|_{\hat{\alpha}} = - \hat{\alpha}_j \sum_i p_{ij} + \sum_i \frac{y_i \hat{\alpha}_j p_{ij}}{\sum_k \hat{\alpha}_k p_{ik}} \quad (6)$$

이 되며 이로부터 반복 계산 알고리즘을 얻을 수 있다. 따라서 (n+1) 번째 반복횟수에서 각 픽셀에서의 선원의 방사능 α_j^{n+1} 는

$$\alpha_j^{n+1} = \frac{\alpha_j^n}{\sum_i p_{ij}} \sum_i p_{ij} \left(\frac{y_i}{\sum_k \alpha_k^n p_{ik} + b_i} \right) \quad (7)$$

를 통해 반복적으로 갱신하여 찾을 수 있다. 여기서 b_i 는 백그라운드 입자를 보정하기 위한 항이다.

본 계산은 픽셀의 변화량이 일정 값보다 작아지거나 정해진 횟수에 도달할 때까지 반복한 후 종료한다.

3. RMC 영상의 모호성과 거리추정

위의 RMC 영상화 알고리즘을 통해 선원의 방향은 알아낼 수 있지만 거리를 찾아내기는 어렵다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 RMC를 이용하여 거리를 추정하는 방법을 제안한다.

선원의 방향을 정확히 아는 경우 그 거리는 두 대의 RMC를 이용하여 쉽게 찾아낼 수 있다. 하지만 RMC의 구조상 한계로 인하여 방향 추정에 모호성이 생기게 되

며 이에 따라 거리 추정은 단순하게 해결되지 않는다. 기본적인 RMC는 앞면과 뒷면에 동일한 대칭 마스크를 이용하며, 이 경우 그림 2처럼 초기마스크 패턴과 180° 회전했을 때의 마스크 패턴이 동일하게 된다. 따라서 원점을 기준으로 대칭되는 두 위치를 구분하지 못하는 문제가 발생한다. 이는 그림 4에서 보듯이, 45° 방향과 225° 방향의 방사선 통과 확률이 같은 것으로도 확인할 수 있다. 즉, 하나의 선원에 대해 RMC는 두 개의 방향을 예측하게 된다. 따라서 두 대의 RMC를 이용할 경우 각 RMC는 두 개씩 선원의 방향을 예측하고, 총 네 개의 거리를 추정하여 실제 거리를 알아내기 어려워진다. 따라서 거리를 추정하기 위해 우리는 비대칭 마스크를 이용한다. 비대칭 마스크를 이용할 경우 그림 5에서 볼 수 있듯이 두 위치에서의 통과 확률이 달라져 대칭적 모호성이 제거된다. 따라서 영상화 알고리즘은 대칭된 위치에 있는 두 선원을 구분할 수가 있게 되며, RMC당 한 개의 방향만 예측하게 된다. 이 경우 거리를 추정하는 방법은 기본적인 삼각측량법으로 계산할 수 있다. RMC 사이의 거리를 d 라 했을 때 영상화 알고리즘에 의해 얻어진 선원의 방향들 (ρ_1, ϕ_1) , (ρ_2, ϕ_2) 은 그림 6과 같으며, 선원의 위치인 S의 수선의 발을 S_p 라 하면 두 점 사이의 거리는 z 와 같으므로 간단한 기하적 관계에 의해

$$z = \frac{d}{\tan(\rho_1)\cos(\phi_1) - \tan(\rho_2)\cos(\phi_2)} \quad (8)$$

로 쓸 수 있다.

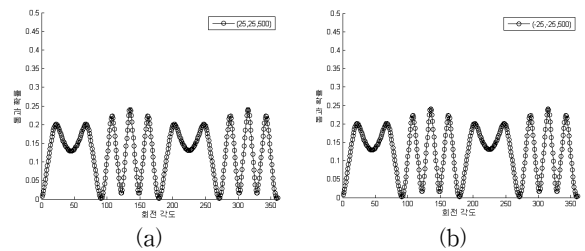


그림 4. 대칭 마스크를 사용 시 (a) 선원이 $(\rho, \phi) = (4.0447^\circ, 45^\circ)$ 일 때의 통과 확률 P_i (b) 선원의 위치가 $(\rho, \phi) = (4.0447^\circ, 225^\circ)$ 에서의 통과 확률 P_i

Fig. 4. The transmission functions for a source at (a) $(\rho, \phi) = (4.0447^\circ, 45^\circ)$ (b) $(\rho, \phi) = (4.0447^\circ, 225^\circ)$ when symmetric masks are used.

III. 실험

본 논문에서는 시스템 모델로 생성한 RMC 변조 패턴 데

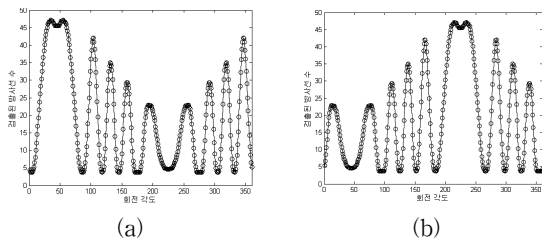


그림 5. 비대칭 마스크를 사용 시 (a) 선원이 $(\rho, \phi) = (4.0447^\circ, 45^\circ)$ 일 때의 통과 확률 P_i (b) 선원의 위치가 $(\rho, \phi) = (4.0447^\circ, 225^\circ)$ 에서의 통과 확률 P_i

Fig. 5. The transmission functions for a source at (a) $(\rho, \phi) = (4.0447^\circ, 45^\circ)$ (b) $(\rho, \phi) = (4.0447^\circ, 225^\circ)$ when asymmetric masks are used.

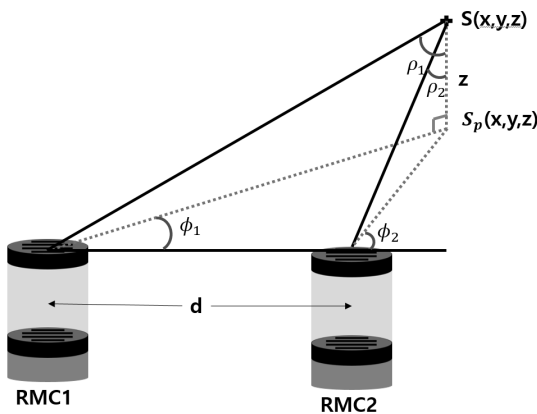


그림 6. 두 개의 RMC를 이용한 거리(z) 추정
Fig. 6. Distance estimation with two RMC systems.

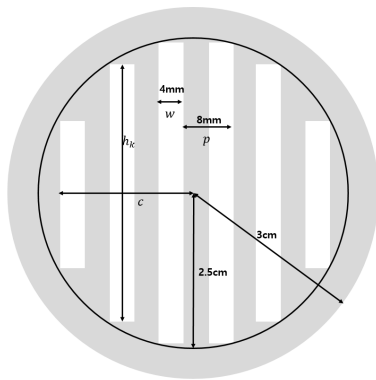


그림 7. 마스크 사양
Fig. 7. Slits and slots of a mask.

이터를 위에서 유도한 영상화 알고리즘에 적용하였다.

이 때, 유도한 알고리즘(수식(7))의 검출확률행렬 p_{ij} 은 RMC 시스템 변수들이 동일하다면 선원의 위치에만 관련된 변수가 되어 미리 계산할 수 있다. 따라서 RMC의 field of view(FOV)내의 영상화 대상 공간을 $21 \times 21 = 441$ 개의 픽셀로 나누고, 각 픽셀의 중심에서 방사선

이 방출되었을 때 그 검출 확률을 선원의 거리(z)에 따라 수치적으로 계산한다.

이 시뮬레이션에서 선원은 1.7 mCi의 방사능을 가진 0.356 MeV의 감마선을 방출하는 Ba-133 점선원으로 가정하고, 그 선원을 $(\rho, \phi, z) = (4.0447^\circ, 45^\circ, 500\text{cm})$ 에 두어 실험을 진행한다. 또한, 마스크의 물질은 납으로 가정하며, 지름은 6cm 두께는 1.27cm로 한다. 그림 7에서 보듯이 각 마스크에는 6개의 슬릿이 있으며, 각 슬릿의 너비(w)는 4mm, 피치(p)는 8mm이다. 각 슬릿의 길이(h_k)는 지름 5cm원에 맞도록 설정하였고, 앞·뒤 마스크의 크기는 동일하다.

1. 선원의 방향(ρ, ϕ) 예측

수식(1)의 시스템 모델에 따라 계측기가 검출하는 방사선의 수를 확률적으로 생성한 후 이를 RMC 영상화 알고리즘을 통해 선원의 방향(ρ, ϕ)을 예측하는 실험을 진행한다.

가. 선원의 거리(z)를 알 경우 방향(ρ, ϕ) 예측

먼저, 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 선원의 거리(z)를 안다고 가정하고 영상화를 진행한다. 즉, 선원의 거리(z) 500cm에 해당하는 검출확률행렬을 이용한다.

RMC 시스템 모델을 이용하여 생성한 회전 각도에 따른 검출 방사선 개수는 그림 8과 같으며, 이를 Π -2 절의 영상화 알고리즘을 통해 영상화 한 결과 이미지는 그림 9와 같다. 여기서 사각형은 예상한 선원의 방사능이며 원은 실제선원의 방향을 나타낸다. 사각형과 원이 일치하는 것을 볼 때, 선원이 존재하는 방향을 정확히 찾은 것으로 볼 수 있다. 또한, 방사능 추정치는 이 둘을 합한 1.6 mCi로 원래 방사능 수치인 1.7 mCi에 근접한 것을 확인할 수 있다. 이 때, Π -3절에서 설명한 바와 같이 대칭 마스크를 사용하였으므로 방사선원의 방향 $(\rho, \phi) = (4.0447^\circ, 45^\circ)$ 과 대칭인 $(\rho, \phi) = (4.0447^\circ, 225^\circ)$ 에도 선원이 있는 것처럼 결과가 얻어지는 것을 볼 수 있다.

위에서 유도한 영상화 알고리즘은 그림 10에서 볼 수 있듯이 반복 횟수가 증가함에 따라 로그-가능도의 값이 증가하며 그 변화는 처음 100번 반복할 때까지 급격하게 증가하고 이후 서서히 수렴한다.

나. 선원의 거리(z)를 모를 경우 방향(ρ, ϕ) 예측

실제 환경에서는 선원의 거리(z)를 알 수 없으므로 선원의 실제 거리와 다른 검출확률행렬을 이용하여 영

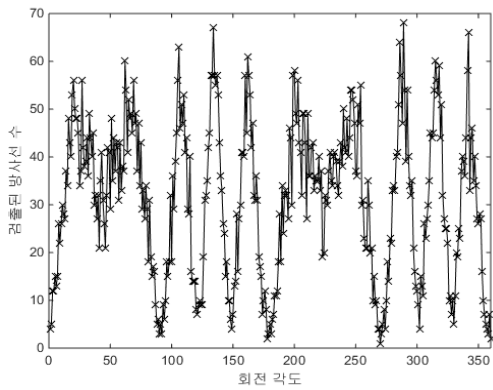


그림 8. 선원의 위치가 $(\rho, \phi, z)=(4.0447^\circ, 45^\circ, 500\text{cm})$ 일 때 대칭 마스크를 통과해 RMC 검출기에서 계측한 입자 수

Fig. 8. Simulated photon counts of RMC with symmetric mask from a source at $(\rho, \phi, z)=(4.0447^\circ, 45^\circ, 500\text{cm})$

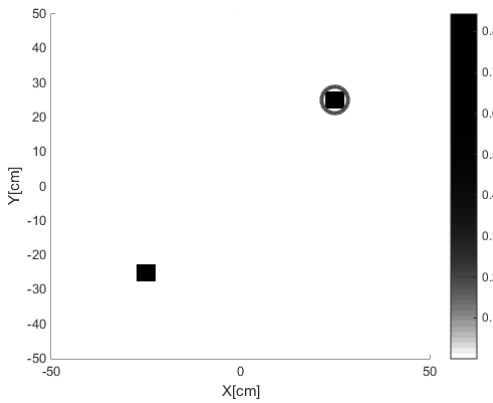


그림 9. 거리가 500cm인 검출확률 행렬을 이용해 그림 8의 변조패턴을 영상화 한 결과

Fig. 9. The reconstruction image of Figure 8 using a system matrix at $z=500\text{cm}$.

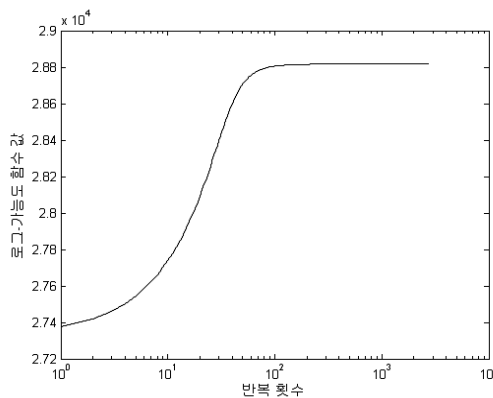


그림 10. 반복 횟수에 따른 로그-가능도 함수 값
Fig. 10. Log-likelihood values over iteration counts.

상화한 후 그 결과를 살펴보도록 한다. 이 실험에서는 원래 선원과 RMC간의 거리인 500cm가 아닌 800cm에서의 검출확률행렬과 이전 실험에서 얻은 그림 8의 변조패턴을 이용한다.

영상화 결과 이미지인 그림 11을 보면 선원의 거리가 다른 검출확률행렬을 사용했음에도 선원의 방향을 제대로 찾은 것을 확인할 수 있다. 다만, 선원이 존재하지 않는 곳에서 선원이 있는 것처럼 나타나는 아티팩트 (artifact)가 발생한 것을 볼 수 있는데 이는 거리를 잘못 지정했기 때문이다.

방사능 추정치는 이 둘을 합한 4.07 mCi로 원래 방사능 수치인 1.7 mCi로 차이가 심하다. 그 이유는 영상화시 실제보다 더 먼 거리를 가정하였기 때문인데, 같은 수의 입자를 RMC에서 검출하기 위해서는 떨어진 거리만큼 더 강한 선원의 있어야 하는 것으로 해석할 수 있다. 따라서 방향과 방사능을 제대로 예측한 것으로 볼 수 있다.

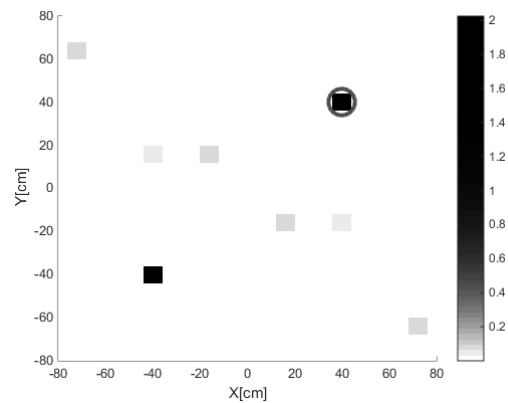


그림 11. 거리가 800cm인 검출확률 행렬을 이용해 그림 8의 변조패턴을 영상화 한 결과

Fig. 11. The reconstruction image of Figure 8 using a system matrix at $z=800\text{cm}$.

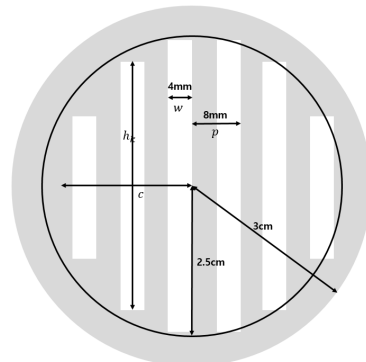


그림 12. 비대칭 마스크 사양
Fig. 12. Slits and slots of a asymmetric ma.

2. 비대칭 마스크를 통한 모호성 해결

대칭적 모호성 해결을 위해 앞면 마스크를 그림 12처럼 비대칭 마스크로 만들었다. 즉, 앞면 마스크의 슬릿만을 2mm 이동된 형태로 설정하였다. 이를 이용해 방사선 수를 생성하고(그림 13), 영상화한 결과 이미지인 그림 14를 보면 대칭 마스크를 이용했을 때의 그림 9와 다르게 방사선원의 방향(ρ, ϕ)=(4.0447°, 45°)에만 선원이 있는 것으로 예측하여 모호성이 제거된 것을 볼 수 있다.

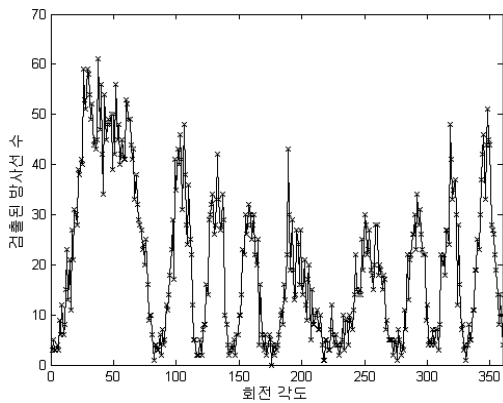


그림 13. 비대칭 마스크일 때 RMC에서 계측한 입자 수
Fig. 13. Simulated photon counts of RMC with asymmetric masks.

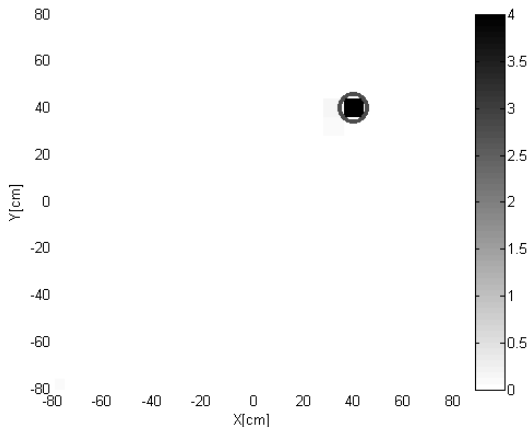


그림 14. 비대칭 마스크일 때 거리 800cm 검출확률행렬을 이용하여 그림 13의 변조패턴을 영상화한 이미지
Fig. 14. Reconstruction image of Figure 13 When asymmetric masks are used.

3. 선원의 거리(z) 예측

방사선이 검출되었을 때 선원의 거리를 모름에도 선원의 방향(ρ, ϕ)을 예측할 수 있었다. 이를 수식 (8)에 대입하여 두 개의 RMC로 선원의 거리(z)를 계산할 수 있다.

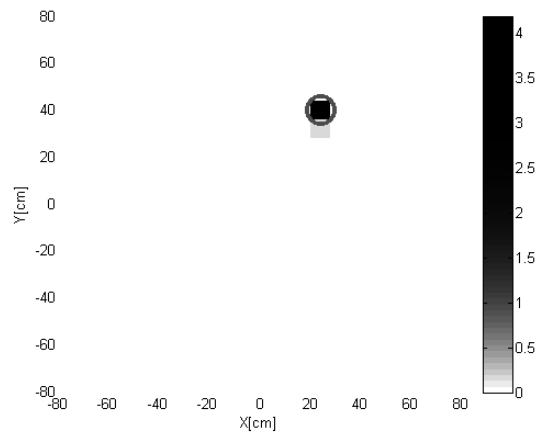


그림 15. 그림 14와 같은 설정에서 RMC2의 영상화 결과
Fig. 15. Reconstruction result of RMC2.

RMC2를 RMC1의 오른쪽 10cm에 두고 한 개의 선원에 각 RMC가 계측하는 변조패턴을 생성하여 영상화를 진행한다. 거리 800cm에서의 검출확률행렬을 사용하였을 때 RMC1에서는 그림 14와 같이 선원의 방향 (4.0447°, 45°)로 추정하지만, RMC2에서는 선원이 (3.3371°, 59°) 방향에 있는 것으로 예측한다(그림 15). 이 결과에 수식 (8)을 적용하면

$$z = \frac{10cm}{0.0707 \cdot 0.7071 - 0.0583 \cdot 0.5145} = 500cm$$

가 되어 거리가 다른 검출확률행렬을 이용했음에도 불구하고, 실제 선원의 거리를 정확히 찾아낸 것을 볼 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 회전 변조 시준기의 시스템 모델에 대해 설명하고, 변조 패턴으로부터 방사선원의 위치를 시각화하여 보여줄 수 있는 MLEM 영상화 알고리즘을 도출하였다. 이 알고리즘을 이용해 마스크가 대칭일 때와 비대칭일 때 영상화한 결과, 선원의 방향(ρ, ϕ)을 찾을 수 있었다.

또한, 두 개의 RMC를 이용해 선원의 거리(z)를 예측하는 방법을 제안해 선원의 위치를 정확히 찾아낼 수 있었다.

REFERENCES

[1] K. P. Ziock and K. E. Nelson, "Maximum Detector Sizes Required for Orphan Source

- Detection”, Coden Nimaer, vol. 579, no. 1, pp. 357-362, August 2007.
- [2] M. Oda, “High-Resolution X-Ray Collimator with Broad Field of View for Astronomical Use”, Applied Optics, vol. 4, no. 1, pp. 143, January 1965.
- [3] L. Mertz, “A Dilute Image Transform with Application to an X-Ray Star Camera”, Symposium on Modern Optics. Polytechnic Institute of Brooklyn, pp. 787-791, New York, America, March 1967.
- [4] B. R. Kowash, “A Rotating Modulation Imager for Orphan Source Search Problem”. Ph. D. Dissertation, University of Michigan, September 2008.
- [5] F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, Fourth edition, Wiley, 2010.
- [6] Y. Vardi, L. A. Shepp, L. Kaufman, “A Statistical Model for Positron Emission Tomography”, Journal of the American Statistical Association, vol. 80, no. 389, pp. 8-20, March 1985.
- [7] B. R. Kowash, D. K. Wehe, “A unified near- and far-field imaging model for rotating modulation collimators”, Nuclear Instruments and Methods in physics Research A, vol. 637, no. 1, pp. 178-184, May 2011.
- [8] X-5 Monte Carlo Team, MCNP Overview and Theory, Los Alamos National Laboratory, 2008.

Appendix

수식 (1)의 RMC system model에서 각 항이 의미하는 바^[7]와 실제 계산한 방법에 대해서 설명한다.

가. 입체각

선원에서 나온 방사선이 계측기에 측정되기 위해선 먼저 RMC의 앞면 마스크에 도달해야 한다. 그 양은 선원이 방사선을 구의 형태로 균등하게 방출한다고 가정하면 $\frac{\Omega(\rho, \phi, z)}{4\pi}$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 Ω 는 RMC의 윗면과 선원과의 입체각(Solid Angle)으로

$$\Omega = \int_A \frac{\cos\alpha}{r^2} dA \quad (9)$$

로 쓸 수 있으며, A는 RMC 앞면 마스크의 넓이, r은 선원으로부터 RMC 앞면 마스크까지의 거리, α 는 선원의 중앙에서 RMC 앞면 마스크의 끼인각을 나타낸다.

나. 마스크 통과 확률 $P_i(\rho, \phi, z)$

RMC 앞면 마스크에 도달한 방사선이 앞·뒷면 마스크의 열린 공간을 통과할 확률은 마스크들을 동일 선상에 두어 열린 공간과 막힌 공간의 비율로 구할 수 있다. 이 때, 앞면 마스크의 위치를 기준 선상으로 정하면 마스크와 검출기의 위치는 비례식에 의해

$$[S_{XProj}, S_{YProj}] = (S_X - \frac{S_X}{M}, S_Y - \frac{S_Y}{M}) \quad (10)$$

$$M = \frac{S_z + L}{S_z} \quad (11)$$

으로 쓸 수 있다. 여기서 L은 마스크간의 거리 S_z 는 앞면 마스크와 선원과의 거리를 나타낸다.

(1) 매우 얇은 두께의 마스크

마스크의 두께가 매우 얇다고 가정하면 2 차원으로 나타낼 수 있다. 이 때 그림 7과 같이 슬릿 넓이(width)를 w, 슬릿 피치(pitch)를 p, 슬릿 길이를 h_k , c는 마스크 중심에서 가장 우측 슬릿의 오른쪽 가장자리까지의 x축상 거리를 나타낸다. 따라서 앞면 마스크는

$$G_{front}(x, y) = \sum_{k=0}^{N-1} [u(x - pk + c) - u(x - pk - w + c)] \cdot [u(y + \frac{h_k}{2}) - u(y - \frac{h_k}{2})]. \quad (12)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 u 는

$$u(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 & x \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

이며, 뒷면 마스크는

$$G_{rear}(x, y) = \sum_{k=0}^{N-1} [u(x + \frac{-pk + c}{M} - S_{XProj}) - u(x + \frac{-pk - w + c}{M} - S_{YProj})] \cdot [u(y + \frac{h_k}{2M} - S_{XProj}) - u(y - \frac{h_k}{2M} - S_{YProj})]. \quad (14)$$

로 앞면 마스크에서 크기와 위치가 달라진 형태로 쓸 수 있다.

(2) 두께가 t인 마스크

두께가 있는 마스크의 경우 마스크의 윗면과 아랫면

을 매우 얇은 마스크 두 개로 나타낼 수 있다. 즉, $F_{front}(x,y) = G_{\uparrow}(x,y) * G_{\downarrow}(x,y)$ 으로 쓸 수 있으며 뒷 마스크도 이와 동일하다.

따라서 총 구하는 P_{ij} 은

$$P_i = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_{front}(x,y) F_{rear}(x,y) dx dy}{A_{det}} \quad (15)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 F_{front} 는 앞면 마스크, F_{rear} 은 앞면 마스크의 위치일 때의 뒷면 마스크, A_{det} 는 두 마스크의 겹친 면적을 나타낸다.

본 논문에선 수식 (10)-(15)로 얻어지는 통과확률을 MATLAB을 이용하여 수치적으로 계산하였다. 앞 뒤 마스크를 잘게 샘플링하여 모델링을 한 뒤 마스크의 요소끼리 곱한 결과의 합을 열린 공간의 총합으로 정한 후, 이를 겹치는 면적으로 나누어 계산할 수 있다.

다. 에너지에 따른 감쇠 계수

마스크가 방사선을 막더라도 마스크 물질의 밀도와 방사선의 에너지에 따라 투과할 수 있다. 그 비율은

$$\lambda(E) = e^{-\frac{\mu}{\rho}(E)\rho_{mat}t_{eff}} \quad (16)$$

로 쓸 수 있으며 여기서 μ/ρ 에너지에 따른 물질 감쇠 계수, ρ_{mat} 는 물질의 밀도, t_{eff} 는 방사선이 지나는 유효두께이다.

III절의 실험에서 마스크의 물질은 납으로 가정하였으므로 ρ_{mat} 은 $11.34g/cm^3$ 이며, μ/ρ 는 2.8454×10^{-1} 이다. t_{eff} 는 방사선이 평행하게 들어온다고 가정하고, 각도에 따른 두께들의 평균으로 설정한다.

라. 검출기 효율

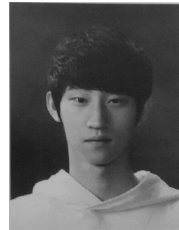
감마선이 검출기에 도달하더라도 그 에너지에 따라 검출기가 탐지할 확률이 다르다. 이를 수치적으로 계산하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같이 계산한다.

$$\epsilon(E) = \frac{N_{Window}}{N_{Total}} \quad (17)$$

여기서 N_{Total} 은 총 검출기에 도달한 입자의 개수, N_{Window} 는 도달한 입자의 개수 중 검출기가 측정할 입

자의 개수를 나타낸다. 방사선 차폐 및 수송 계산용 몬테카를로 전산 모사 프로그램인 MCNP6(Monte Carlo N-Particle code)를 [8]이용하여 CLYC 검출기를 모델링 하였을 때 감마선의 계측 효율은 0.39831이다.

저 자 소 개



신 영 준(학생회원)

2015년 서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과 학사 졸업.

2015년~현재 서울과학기술대학교 정보통신미디어공학과 석사과정.

<주관심분야: 패턴인식, 기계학습, 신호처리>



김 기 현(정회원)

2007년 서울대학교 원자핵공학과 학사

2008년 University of Michigan 핵 & 방사선공학과 석사

2011년 University of Michigan 물리학과 석사

2013년 University of Michigan 핵 & 방사선공학과 박사

2014년~현재 세종대학교 원자력공학과 조교수
<주관심분야: 방사선 계측 및 응용, 영상처리, 방도체, 센서>



이 계 민(정회원)

2001년 서울대학교 전기공학부 학사

2007년 University of Michigan EECS 석사

2011년 University of Michigan EECS 박사

2011년~2012년 University of Michigan Research Fellow

2013년~현재 서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과 조교수

<주관심분야: 머신러닝, 신호처리, 의료정보학>