

Xây dựng thuật toán tái tạo ảnh trong thời gian thực cho hệ thiết bị xạ hình Compton Camera

Development of Image Reconstruction Algorithm in Realtime for Compton Camera Systems

Bùi Ngọc Hà*, Trần Thùy Dương, Nguyễn Đức Kiên

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

*Email: ha.buingoc@hust.edu.vn

Tóm tắt

Compton Camera là kỹ thuật xạ hình trong đó sử dụng nguyên lý của tương tác tán xạ Compton để tái tạo hình ảnh phân bố của nguồn bức xạ. Compton Camera là kỹ thuật xạ hình 3 chiều, có độ nhạy cao, góc nhìn rộng và dải năng lượng chụp cao hơn nhiều so với kỹ thuật xạ hình truyền qua. Ngoài ra, kỹ thuật xạ hình Compton Camera không sử dụng hệ chuẩn trực cơ khí nên có kích thước nhỏ gọn, phù hợp với các ứng dụng di động, kiểm soát an ninh, dò tìm nguồn bức xạ và cả ứng dụng trong y tế. Trong bài báo này, nhóm tác giả xây dựng thuật toán tái tạo hình ảnh cho thiết bị xạ hình Compton Camera sử dụng dữ liệu từ mô phỏng Monte Carlo. Chất lượng hình ảnh và các thông số của thuật toán sẽ được đánh giá chi tiết nhằm xác định khả năng ứng dụng trong thực tế.

Từ khóa: Compton Camera, kỹ thuật xạ hình, tái tạo hình ảnh, mô phỏng Monte Carlo.

Abstract

Compton Camera is a imaging technique that uses the principle of Compton scattering interaction to reproduce the distribution image of the radiation source. Compton Camera is a 3-D imaging technique, which has a high sensitivity, wide viewing angle and a range of shooting energy that is much higher than the transmissive imaging technique. In addition, the Compton Camera imaging technique does not use a mechanical collimation system, so it is compact in size, suitable for mobile applications, security control, radiation source detection and medical applications. In this paper, the authors built an image reconstruction algorithm for Compton Camera imaging equipment using data from Monte Carlo simulation. The image quality and the parameters of the algorithm will be evaluated in detail to determine the practical applicability.

Keywords: Compton Camera, image reconstruction, radiography, Monte Carlo simulation.

1. Mở đầu

Kể từ khi tia X được phát hiện lần đầu tiên vào những năm 1895, kỹ thuật xạ hình đã có những bước phát triển vượt bậc ứng dụng chẩn đoán, kiểm tra cả trong y tế lẫn công nghiệp. Compton Camera là kỹ thuật xạ hình đầu tiên được phát triển những năm 1970 bởi Singh và cộng sự [1], với mục đích dùng để xác định vị trí của các ngôi sao bức xạ, dẫn đến kỹ thuật này được phát triển ứng dụng trong công nghiệp và y tế. Compton Camera sử dụng tính chất phân bố năng lượng theo góc của tán xạ Compton nhằm xác định được hướng tới của tia bức xạ từ đó xây dựng hình ảnh. Ưu điểm của Compton Camera so với kỹ thuật chụp ảnh bức xạ truyền qua thông thường đó là có trường nhìn rộng, có khả năng quan sát rộng lên tới gần 180°, có khả năng ghi đo năng lượng cao lên tới cỡ 10MeV. Bản chất của tán xạ Compton đã cho biết thông tin về hướng tới của chùm tia bức xạ từ đó không cần phải sử dụng cơ cấu định hướng chùm tia, điều này tạo ưu thế nâng cao độ nhạy cho Compton Camera. Ngoài ra, Compton Camera còn cho biết vị trí trong không gian 3 chiều của nguồn bức xạ đang

được ghi nhận mà không cần phải tiến hành phép quét xung quanh đối tượng. Chính vì những ưu điểm này mà Compton Camera đã được ứng dụng rất nhiều trong thực tế như: xác định vị trí các ngôi sao bức xạ vũ trụ; quản lý chất thải từ nhà máy điện hạt nhân, theo dõi nguồn phóng xạ với độ nhạy cao và nhận diện vị trí nguồn bức xạ trong không gian 3 chiều [2]. Bên cạnh đó, Compton Camera còn được ứng dụng trong y tế, thay thế cho Gamma camera truyền qua của kỹ thuật chụp hình cắt lớp phát xạ đơn photon (SPECT) hoặc sử dụng để giám sát liều trong quá trình xạ trị [3-6].

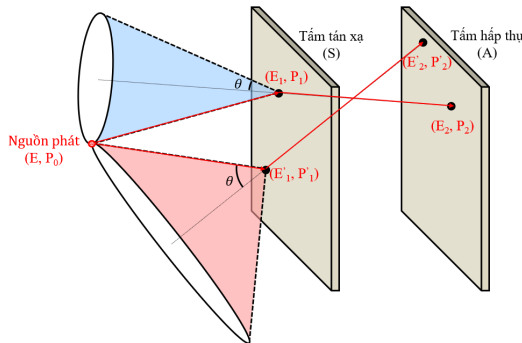
Tại Việt Nam hiện nay, có khoảng hơn 4000 cơ sở sử dụng thiết bị hoặc nguồn bức xạ, với số lượng khá lớn, ứng dụng trong Y tế và Công nghiệp. Do đó, việc quan trắc và kiểm soát các nguồn phóng xạ này cũng đang là một bài toán rất cấp thiết. Kỹ thuật xạ hình Compton Camera với các ưu điểm như đã trình bày ở trên có thể giúp giải quyết các bài toán quan trắc, kiểm soát, cảnh báo, tìm nguồn bức xạ hiện nay tại Việt Nam. Tuy nhiên, trong những năm qua, kỹ thuật xạ hình Compton Camera chưa được các nhóm nghiên cứu trong nước quan tâm nghiên cứu và phát triển do cấu hình của hệ khá phức tạp, yêu cầu cao về độ chính xác hình học cũng như đòi hỏi sự đầu tư không nhỏ vào việc xây dựng thuật toán, chương

trình tái tạo hình ảnh cho hệ. Nhận thấy sự cần thiết của kỹ thuật xạ hình Compton Camera tại Việt Nam, nhóm tác giả đã bắt đầu nghiên cứu về hệ thiết bị xạ hình này trong vài năm gần đây. Trong bài báo này nhóm tác giả sẽ trình bày những kết quả bước đầu của mình trong việc nghiên cứu hệ Compton Camera thông qua việc xây dựng thành công chương trình tái tạo hình ảnh cho hệ sử dụng thuật toán chiếu ngược hình nón, tự xây dựng ma trận Euler sử dụng cho phép quay mặt nón chính tắc trước khi chiếu ngược. Bài báo tập trung vào việc xây dựng thuật toán tái tạo hình ảnh của kỹ thuật Compton Camera, dữ liệu đầu vào thu được thông qua phương pháp mô phỏng Monte-Carlo sẽ không được trình bày chi tiết trong bài báo này.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Nguyên lý của hệ Compton Camera

Tán xạ Compton là tương tác của tia bức xạ tới với lớp điện tử của nguyên tử, trong đó bức xạ không bị hấp thụ hết mà chỉ truyền một phần năng lượng của mình cho điện tử lùi. Tia gamma tán xạ có năng lượng nhỏ hơn tia tới và bị lệch đi một góc so với phương tia tới. Nếu xác định được vị trí tán xạ Compton, đồng thời ghi nhận được vị trí cũng như năng lượng của tia tán xạ, ta có thể xác định được hướng của tia tới. Đây chính là nguyên lý cơ bản của kỹ thuật Compton Camera.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý của một hệ Compton Camera

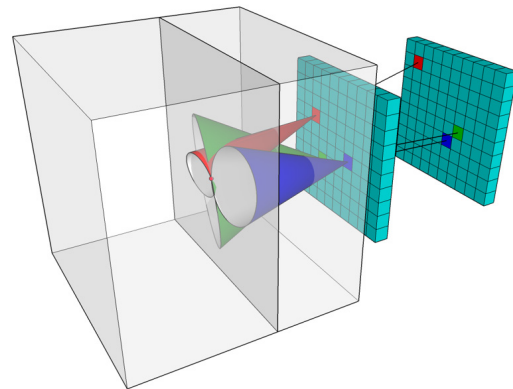
Hình 1 trình bày sơ đồ nguyên lý của một hệ Compton Camera. Thông thường, hệ bao gồm hai ma trận đầu dò có khả năng ghi nhận năng lượng và vị trí tương tác. Tấm S là tấm tán xạ, có bề dày đủ mỏng sao cho chỉ có các tương tác tán xạ xảy ra trong đó. Tấm A là tấm hấp thụ có bề dày đủ lớn sau cho có thể hấp thụ hoàn toàn bức xạ tán xạ đi ra từ tấm tán xạ S. Bằng cách ghi nhận đồng thời cả hai năng lượng hấp thụ và vị trí tương tác trên hai tấm hấp thụ và tán xạ ta có thể xác định được năng lượng bức xạ tới $E = E_1 + E_2$, đồng thời góc giữa tia tán xạ được xác định như sau:

$$\cos \theta = 1 + m_0 c^2 \left[\frac{1}{E} - \frac{1}{E_2} \right] \quad (1)$$

Tấm tán xạ và hấp thụ là ma trận đầu dò có khả năng ghi nhận vị trí tương tác, từ đó giúp ta xác định được hướng của tia tán xạ. Vị trí (phân bố) của nguồn phóng xạ là giao điểm của các mặt nón nhận điểm tương tác trên tấm tán xạ làm đỉnh nón và đường sinh là các đường tạo với tia tán xạ một góc θ như đã tính toán từ công thức (1).

2.2. Thuật toán tái tạo hình ảnh Compton Camera

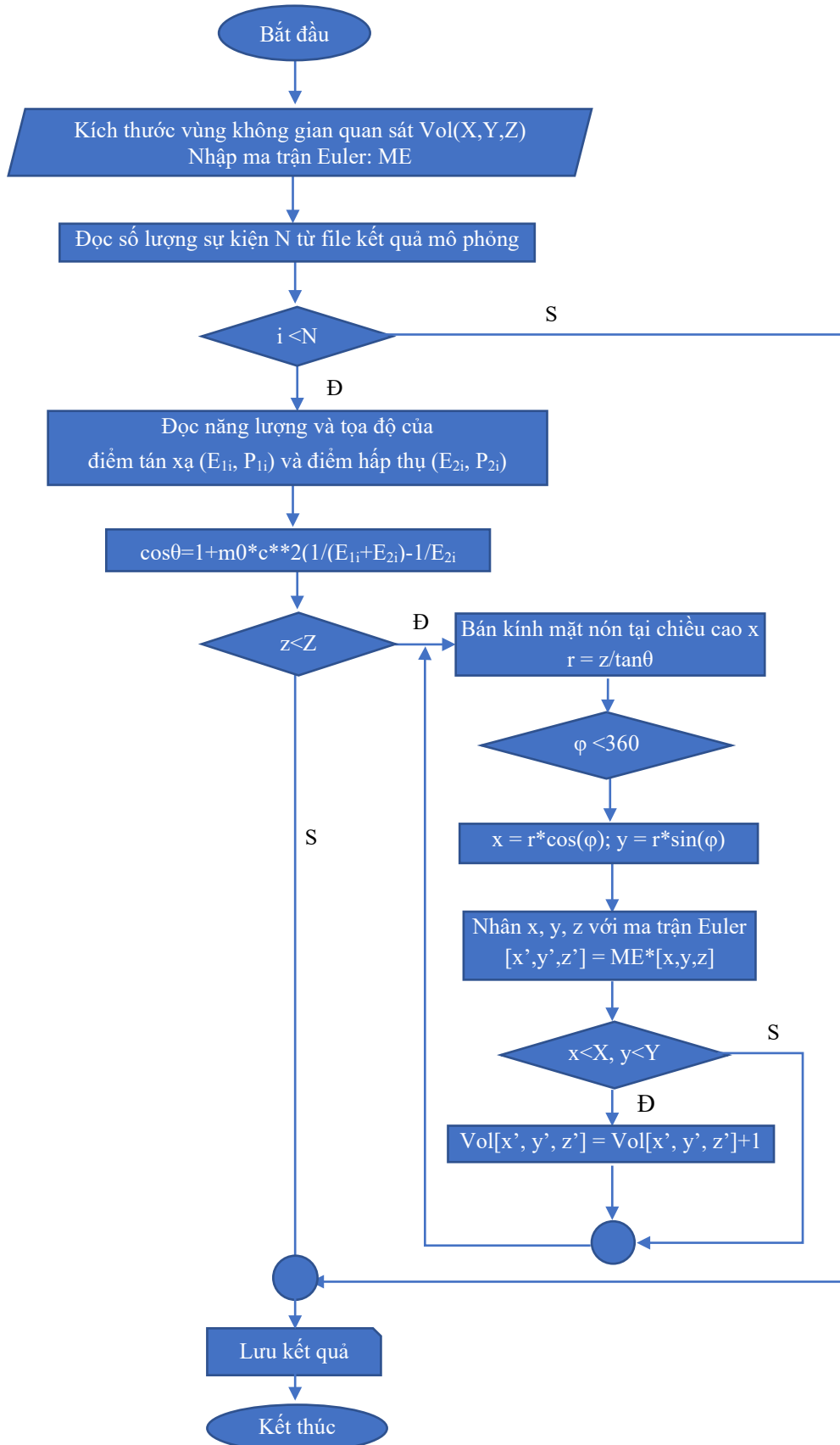
Có nhiều phương pháp được sử dụng để tái tạo hình ảnh thu nhận được từ hệ Compton Camera như phương pháp chiếu ngược hình nón, phương pháp cực đại hóa kỳ vọng (Expectation Maximization – EM), phương pháp chiếu ngược có lọc, phương pháp lặp đại số. Trong bài báo này, nhóm tác giả tập trung vào nghiên cứu và xây dựng chương trình tái tạo ảnh dựa trên thuật toán chiếu ngược hình nón. Đây là phương pháp đơn giản, không đòi hỏi quá cao về cấu hình thiết bị và đặc biệt có thể tái tạo hình ảnh trong thời gian thực, do đó có thể áp dụng cho thiết bị thực tế chế tạo sau này.



Hình 2. Minh họa quá trình chiếu ngược hình nón

Bản chất của phương pháp này là không gian chứa nguồn bức xạ (chưa biết) sẽ được phân đoạn thành những ô thể tích nhỏ (voxel). Từ các cặp điểm tương tác phù hợp trên tấm tán xạ và tấm hấp thụ ta sẽ tính được hướng của tia tán xạ và góc tán xạ (θ). Từ các điểm tương tác trên tấm tán xạ, một hình nón sẽ được dựng (chiếu ngược) với đỉnh nón là điểm tương tác, trục của nón là hướng tán xạ và đường sinh là đường hợp với góc tán xạ một góc θ . Giao điểm của tất cả các mặt nón mô tả vị trí và phân bố của nguồn phóng xạ trong không gian đã khai báo như được minh họa trong hình 2. Hình ảnh Compton Camera thu được là hình ảnh chứa tiết diện của các mặt nón với mặt phẳng ảnh trong không gian ảnh 3 chiều, trong đó vị trí nguồn là vị trí có số lượng đường tiết diện giao cắt nhau lớn, tương ứng với cường độ mức xám lớn. Sử dụng kỹ thuật cắt ngưỡng ta sẽ thu được hình ảnh thực tế của nguồn phóng xạ và xác định được vị trí của nguồn.

Giả sử tấm tán xạ và tấm hấp thụ vuông góc với trục z của hệ trục tọa độ oxyz, tấm tán xạ nằm tại vị trí $z = z_1$, khoảng cách giữa hai tấm đầu dò là d và giá



Hình 3. Sơ đồ thuật toán tái tạo hình ảnh Compton camera

sử bề dày của tấm tán xạ đủ mỏng để sao cho vị trí của đỉnh nón đều có tọa độ z giống nhau. Đối với mỗi tương tác phù hợp, gọi điểm tán xạ có tọa độ $P_1(x_1, y_1, z_0)$, tọa độ của điểm hấp thụ $P_2(x_2, y_2, z_2)$. Ta có phương trình của trục nón có thể được miêu tả như sau:

$$\frac{x-x_1}{x_1-x_2} = \frac{y-y_1}{y_1-y_2} = \frac{z-z_1}{z_1-z_2} \quad (2)$$

Vì vị trí của P_1 và P_2 hoàn toàn ngẫu nhiên nên trục của nón sẽ có phương bất kỳ, việc xây dựng trục

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ -\cos \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma \\ \sin \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

trong đó (x', y', z') là tọa độ của các điểm thuộc mặt nón cần tìm, (X, Y, Z) là tọa độ của các điểm thuộc mặt nón chính tắc. Trong không gian 3 chiều chứa nguồn đã xây dựng trước đó, các pixel có tọa độ thuộc mặt nón vừa xây dựng sẽ được tăng một giá trị mức xám. Phân bố của nguồn thể hiện số lần giao cắt của các mặt nón, hay nói cách khác phân bố của nguồn sẽ được thể hiện thông qua phân bố cường độ mức xám của ảnh. Như vậy, vị trí và hình ảnh tái tạo của nguồn sẽ được xác định. Sơ đồ thuật toán được thể hiện như trong hình 3.

Trong bài báo này, số liệu dùng để tái tạo hình ảnh được lấy từ việc mô phỏng Monte Carlo trên phần mềm MCNP sử dụng thẻ theo dõi hạt (Partical Tracking - Ptrac), cấu hình của hệ mô phỏng bao gồm hai mảng đầu dò: một tấm tán xạ có kích thước $10 \times 10 \times 2$ cm (dài x rộng x bề dày); tấm hấp thụ có kích thước $10 \times 10 \times 10$ cm (dài x rộng x bề dày), khoảng cách giữa tấm tán xạ và tấm hấp thụ là 4cm. Toàn bộ hệ mô phỏng được đặt trong hệ trục tọa độ OXYZ với trục OZ vuông góc và đi qua tâm của các đầu dò, mặt trên của tấm hấp thụ nằm tại vị trí $z = 10,5$ cm và mặt trên của tấm tán xạ nằm tại vị trí $z = 15$ cm. Ngôn ngữ lập trình được sử dụng trong nghiên cứu là ngôn ngữ Python, phiên bản 3.7.

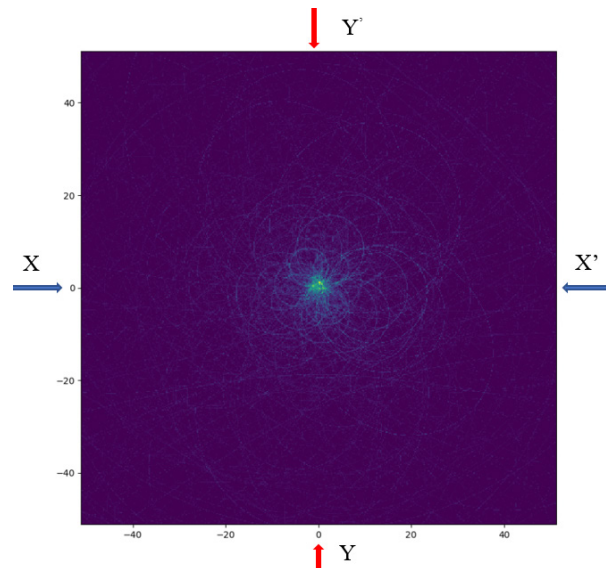
3. Kết quả và thảo luận

Dữ liệu để tái tạo hình ảnh của hệ Compton Camera được lấy từ kết quả mô phỏng ứng với ba trường hợp khác nhau. Trường hợp 1: trong không gian mô phỏng có một nguồn điểm nằm tại vị trí có tọa độ $(0,0,45)$ cm. Trường hợp 2: trong không gian mô phỏng có ba nguồn điểm lần lượt nằm tại các vị trí $(0,0,45)$ cm, $(7,7,35)$ cm và $(7,-7,35)$ cm. Trường hợp 3: trong không gian mô phỏng có một nguồn hình xuyên có tâm xuyên nằm tại vị trí $(0,0,45)$ cm bán kính xuyên 3 cm dày 0,5 cm.

Hình ảnh tái tạo của Compton Camera chụp với nguồn điểm có tọa độ $(0,0,45)$ trong trường hợp 1 được thể hiện trong hình 4. Không gian tái tạo 3D của hình ảnh là một hình hộp có kích thước

tiếp phương trình hình nón bất kỳ cực kỳ phức tạp, đặc biệt với việc tính toán trên máy tính. Do đó, để tìm giao điểm của các hình nón này, trước tiên ta xây dựng phương trình chính tắc của mặt nón trong không gian 3 chiều (trục nón vuông góc với mặt phẳng OXY và góc mở của nón bằng góc lệch tán xạ θ), sau đó sử dụng phép quay Euler để quay toàn bộ nón sao cho trục của nón chính tắc trùng với trục của nón thực tế trong công thức (2). Hình nón cần tìm có thể thu được bằng cách thực hiện phép biến đổi Euler với mỗi điểm thuộc hình nón chính tắc:

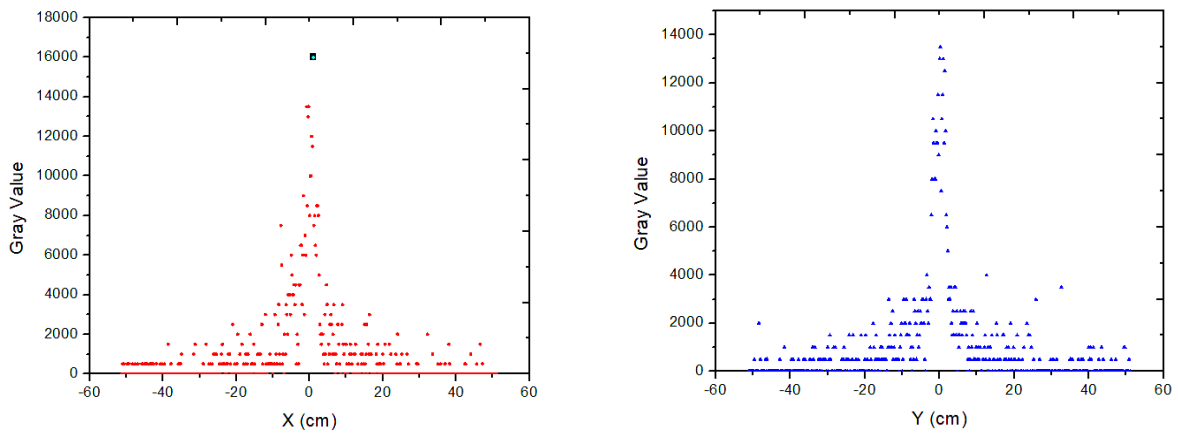
$100 \times 100 \times 100$ cm, trục z chạy qua tâm của hình hộp và vuông góc với các lát cắt 2D chứa hình ảnh của vật thể. Mỗi lát cắt 2D có số lượng điểm ảnh là 1000×1000 điểm ảnh. Ta có thể thấy vị trí của nguồn là giao điểm của các hình elip nằm trên mặt phẳng $z = 45$.



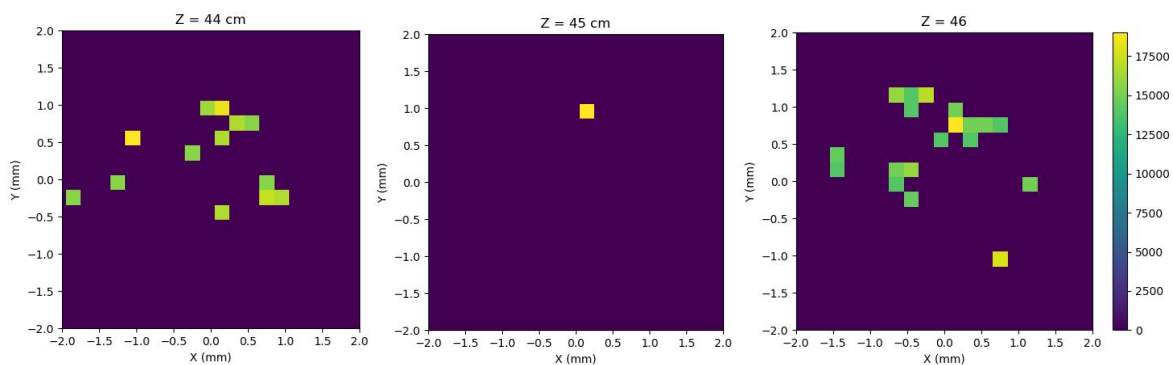
Hình 4. Hình ảnh tái tạo của nguồn điểm

Do thăng giáng năng lượng hấp thụ trong thể tích của mỗi ô trong đầu dò và sai số vị trí nên giao điểm của các hình nón không hội tụ tuyệt đối tại một điểm. Để đánh giá độ hội tụ của các đường giao, ta biểu diễn đồ thị của hình cắt 1 chiều XX' và YY' . Đây là hai đường thẳng vuông góc đi qua nguồn điểm như được chỉ ra trên hình 4.

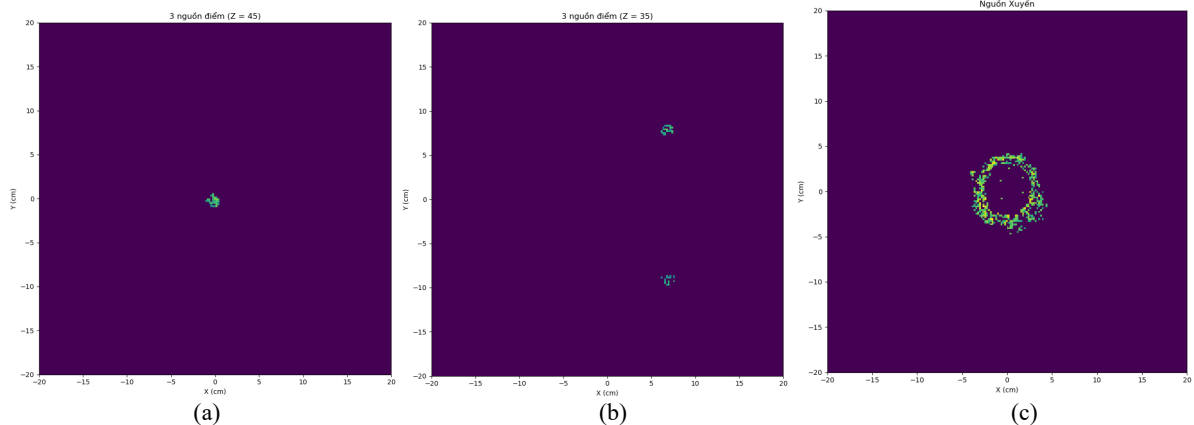
Hình 5 biểu diễn cường độ mức xám của ảnh trên hai đường thẳng XX' và YY' , pixel có số lần giao nhau của các hình elip càng lớn thì giá trị mức xám càng cao. Ta có thể thấy điểm có giá trị mức xám lớn nhất nằm trên tọa độ $(0,0)$ trên mặt phẳng chứa nguồn. Như vậy, thông qua việc xác định cường độ mức xám tại các vị trí trên ảnh tái tạo 2D, chúng ta có thể xác định được chính xác tọa độ theo trục Ox và Oy của nguồn.



Hình 5. Cường độ mức xám của ảnh trên hai đường XX' và YY'



Hình 6. Ảnh của nguồn tại các lát cắt khác nhau ứng với mức cắt ngưỡng 14000



Hình 7. Ảnh tái tạo của 3 nguồn điểm và nguồn xuyên: (a) - ảnh 3 nguồn điểm tại vị trí $z = 45$ cm; (b) ảnh 3 nguồn điểm tại vị trí $z = 35$ cm; (c) - ảnh nguồn hình xuyên tại vị trí $z = 45$ cm

Không gian tái tạo được chia thành các lát cắt khác nhau theo trục Oz . Để xác định được vị trí của nguồn theo trục Oz và thu hình ảnh chính xác của nguồn. Chúng tôi thực hiện việc cắt ngưỡng để loại bỏ giá trị các pixel nằm dưới ngưỡng phù hợp tại các lát cắt khác nhau. Hình 6 chỉ ra hình ảnh của nguồn tại các lát cắt có tọa độ Z lần lượt là 44, 45, 46 cm sau khi đã cắt ngưỡng cường độ mức xám với giá trị 14000. Lát cắt ứng với $Z=45$ cm cho hình ảnh hội tụ và có cường độ mức xám cao nhất sẽ là lát cắt chứa nguồn. Như vậy, vị trí của nguồn được xác định

thông qua việc tái tạo ảnh từ hệ Compton Camera là $(0, 0, 45)$, đúng với vị trí đã đưa ra ban đầu.

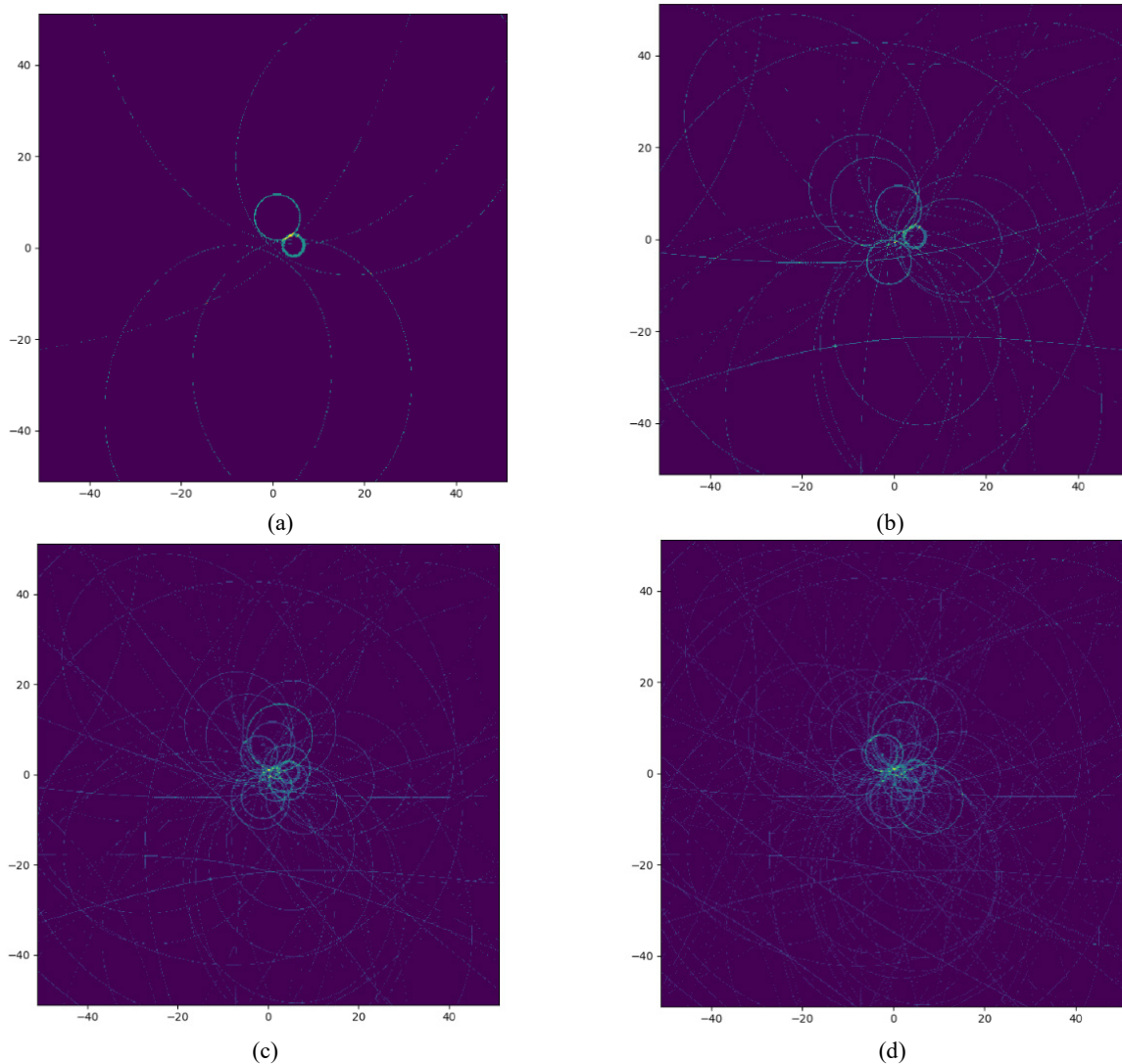
Thực hiện việc cắt ngưỡng tương tự đối với ảnh chụp trong trường hợp 2 (3 nguồn điểm) và trường hợp 3 (nguồn hình xuyên), chúng tôi thu được ảnh của nguồn được thể hiện trên hình 7. Hình 7.a và 7.b mô tả ảnh chụp từ 3 nguồn điểm tại các mặt phẳng ảnh $x = 45$ cm và $z = 35$ cm tương ứng. Vị trí hình ảnh của nguồn tương đối chính xác so với tọa độ điểm nguồn được khai báo trong mô phỏng. Hình 7.c mô tả ảnh chụp từ nguồn hình xuyên tại mặt phẳng $z = 45$ cm. Ta thấy tọa độ của hình xuyên nằm tại vị

trí $(0,0,45)$ đường kính trong của xuyên cỡ 3cm, hình ảnh thu được sau cắt ngưỡng còn nhiều điểm nhòe và không liên tục do số sự kiện mô phỏng cho nguồn này chưa đủ lớn, dẫn đến thăng giáng thống kê lớn.

Một trong những ưu điểm quan trọng của kỹ thuật Compton Camera đó là hệ số sử dụng bức xạ cao do đó cho độ nhạy lớn hơn nhiều lần so với kỹ thuật xạ hình truyền qua. Để khảo sát độ nhạy của kỹ thuật Compton Camera, nhóm tác giả tiến hành tái tạo hình ảnh của nguồn điểm với số lượng sự kiện tương tác lần lượt là 10, 50, 100 và 200 sự kiện. Kết quả của quá trình khảo sát này được thể hiện trong hình 8. Từ hình 8, ta thấy với 50 sự kiện giao điểm của nguồn đã hiện lên một cách tương đối rõ ràng. Điều này khẳng định độ nhạy của Compton Camera cao hơn nhiều so với các kỹ thuật xạ hình khác, đặc biệt trong các ứng dụng liên quan tới an ninh và quan trắc môi trường. Khi đo ở điều kiện phóng xạ môi trường có cường độ bức xạ tự nhiên vào khoảng 50 tới

100 hạt/giây, Compton Camera chỉ mất vài phút để có thể hiển thị được ảnh khá chính xác.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sử dụng máy tính phổ thông để tái tạo hình ảnh có cấu hình như sau: CPU Intel® Core™ i3-4130 xung nhịp 3.40GHz, RAM 12GB. Chương trình tái tạo hình ảnh chỉ sử dụng 1 nhân của CPU cho thời gian tái tạo (dạng hình nón trong toàn bộ không gian 3D có kích thước $1000 \times 1000 \times 100$ pixel) là 0,02 s cho mỗi sự kiện. Như vậy tốc độ ghi nhận cực đại của hệ có thể lên tới 50 sự kiện cho một giây, phù hợp với khả năng ghi nhận bức xạ, xác định nguồn bức xạ tại điều kiện phóng nền tự nhiên. Chương trình tái tạo hình ảnh được viết với khả năng chạy song song trên nhiều nhân của CPU hoặc chạy trên card đồ họa GPU thông qua công cụ hỗ trợ CUDA. Do đó, chúng ta có thể rút ngắn rất nhiều thời gian tái tạo trong trường hợp muốn chụp ảnh cho các ứng dụng có cường độ bức xạ cao hơn.



Hình 8. Ảnh tái tạo thu được với số lượng sự kiện khác nhau:
(a) – 10 sự kiện; (b) – 50 sự kiện; (c) – 100 sự kiện; (d) – 200 sự kiện

Compton Camera không chỉ nhạy so với các kỹ thuật xạ hình truyền qua mà nó còn cho phép thu được hình ảnh có độ phân giải không gian tốt hơn nhiều. Từ kết quả thể hiện trên hình 6, sử dụng Compton Camera ta thu được hình ảnh của nguồn điểm tại vị trí $z = 45\text{cm}$ (cách mặt trước của camera 40cm) lệch đi 1mm so với vị trí thực tế của nguồn, tương ứng với góc lệch 0.14 độ. Trong khi kỹ thuật xạ hình truyền qua sử dụng hệ chuẩn trực cơ khí với tỷ số lưới 10:1 có bề dày tâm chuẩn trực là 1.20mm, đường kính lỗ truyền qua 0.12mm [7] cho góc mở lên tới hơn 10 độ.

4. Kết luận

Nhóm nghiên cứu đã xây dựng thành công chương trình tái tạo hình ảnh của kỹ thuật xạ hình Compton Camera. Đây là một chương trình đơn giản nhưng có tốc độ cao, độ chính xác khá tốt và có khả năng sử dụng để chụp ảnh các nguồn phóng xạ hoạt độ thấp với độ nhạy cao. Để nâng cao tốc độ xử lý của chương trình ta có thể chạy chương trình song song trên nhiều nhân CPU hoặc sử dụng GPU để tái tạo ảnh. Đây sẽ là cơ sở để nhóm nghiên cứu có thể áp dụng các thuật toán tái tạo phức tạp hơn như chiếu ngược có lọc, cực đại hóa kỳ vọng, phương pháp lặp để cải thiện chất lượng ảnh đồng thời giúp ngắn thời gian tái tạo. Các cấu hình phức tạp hơn của hệ Compton Camera cũng sẽ được nghiên cứu mô phỏng nhằm mục đích có thể xây dựng được một hệ thiết bị xạ hình Compton Camera thực tế tại trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

Lời cảm ơn

Bài báo được hỗ trợ nghiên cứu từ đề tài cấp cơ sở mã số T2018-PC-129 của trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

Tài liệu tham khảo

- [1] M. Singh, 1983, An Electronically collimated gamma camera for single photon emission computed tomography. Part I: Theoretical considerations and design criteria", *Medical Physics*, vol. 10, pp. 421-427.
- [2] Y. Nakamura, K. Shimazoe, H. Takahashi, 2013, Design and fabrication of endoscope-type Compton Camera, *Science Direct, Section A*, 731, 283-287.
- [3] M. Fontana, D. Dauvergne, J. M. Létang, J. L. Ley, É. Testa, 2017, Compton Camera study for high efficiency SPECT and benchmark with Anger system, *Phys. Med. Biol.*, 62(23), 8794-8812.
- [4] M. L. Jan, I. T. Hsiao, H. M. Huang, 2017, Use of a LYSO-based Compton Camera for prompt gamma range verification in proton therapy, *Med. Phys.*, 44(12), 6261-6269.
<http://doi.org/10.1002/mp.12626>.
- [5] Y. Sato, Y. Tanifuji, Y. Terasaka, H. Usami, M. Kaburagi, K. Kawabata, W. Utsugi, H. Kikuchi, S. Takahira, T. Torii, 2018, Radiation imaging using a compact Compton Camera inside the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station building, *J. Nuc. Sci. Tech.*, 55, 965-970.
- [6] S. Aldawood, P.G. Thierolf, A. Miani, M. Böhmer, G. Dedes, R. Gernhäuser, C. Lang, S. Liprandi, L. Maier, T. Marinšek, M. Mayerhofer, D.R. Schaart, I. ValenciaLozano, K. Parodi, 2017, Development of a Compton Camera for prompt-gamma medical imaging, *Science Direct, Rad. Phys. Chem.*, 140, 190-197.
- [7] Glenn F. Knoll, 2010, *Radiation Detection and Measurement - 4 edition*, p49-50, John Wiley & Sons, Inc.