

博士論文（要約）

形状認識技術を用いた
マルチモダル 3D コンプトンイメージングシステムの研究
Study on multi-modal 3D Compton imaging system using shape
recognition technology

吉原 有里

1. 序論

1.1. 研究背景

2011年3月11日の東日本大震災において、津波と地震により発生した福島第一原子力発電所の事故により、原子力発電所を中心とした広い地域に放射性核種が飛散した。飛散した放射性核種の中での主な核種はCs-137、Cs-134であり、それぞれ667 keV、605 keVと796 keVのエネルギーのガンマ線を主に放出する。これらのガンマ線放出核種を可視化するためのガンマ線イメージングシステムの開発が進められてきた。

三次元空間上にガンマ線放出核種の分布の可視化する「三次元ガンマ線マッピング」において、ガンマ線イメージングシステムに求められるのは、システムの軽量性、測定対象とするガンマ線エネルギーへの高い検出効率、三次元空間において線源位置を高精度で特定する能力である。システムの軽量性とは、本研究ではガンマ線イメージングシステムの大きさと重量、そして低消費電力を指し、ドローンなどの遠隔操作ロボットへの搭載を可能とする小型かつ軽量なものとする。また、本研究で測定対象とするガンマ線エネルギーはCs-137あるいはCs-134から放出されるガンマ線のエネルギーに該当するので、600 – 800 keVのガンマ線エネルギー領域への高い検出効率が求められる。三次元空間における線源位置の精度は、直交座標系における空間分解能、あるいは角度分解能などの指標で表され、これらの値が小さいほど高い精度で線源位置の特定することができることを意味する。

ガンマ線マッピングのために従来から用いられてきたガンマ線イメージングの手法として、コリメータイメージングとコンプトンイメージングの二つがある。後者のコンプトンイメージングは、連続して検出された二つの検出イベントから得られた位置とエネルギーの情報から、円錐上にガンマ線の入射方向を推定する手法である。二段に配置した二次元位置敏感型検出器で構成されたコンプトンイメージングシステムの概念図を図1に示す。ガンマ線放出核種に対して前方に配置された検出器を散乱体、後方に配置された検出器を吸収体と定義する。散乱体での検出位置と吸収体の検出位置を結んだ方向は、ガンマ線の散乱方向であり、この逆方向のベクトルをコンプトン軸とする。コンプトンイメージングでは、散乱体で散乱したガンマ線を吸収体で検出することで、散乱前後のガンマ線エネルギーから、コンプトン散乱の運動則を用いてコンプトン散乱角が求められる。

コリメータイメージングと比較して、コンプトンイメージングはコリメータを使用しないため、システムの軽量性、広い視野、高エネルギーのガンマ線に対する高い検出効率の利点を有する。これらの利点により、本研究ではコンプトンイメージングの手法を用いることとした。

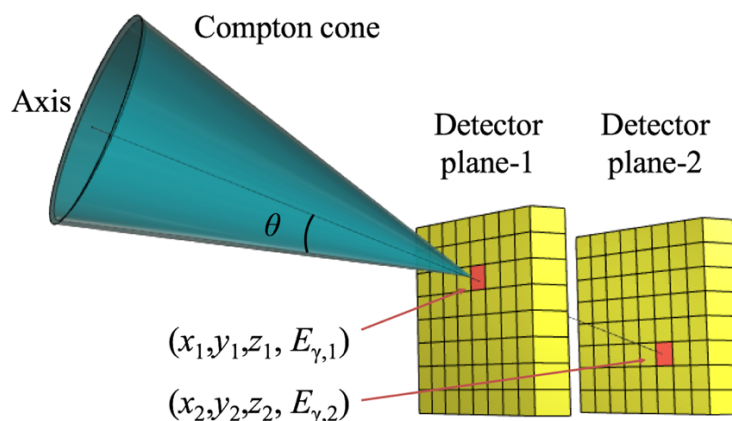


図1：コンプトンイメージングシステムの概念図

1.2. 三次元ガンマ線マッピングにおけるコンプトンイメージングの原理的な制約

コンプトンイメージングには多くの利点があるが、三次元ガンマ線マッピングにコンプトンイメージングを適用するには原理的な制約がある。それは、散乱体と吸収体で構成されたコンプトンイメージングシステムにおいて、散乱体から見た奥行き方向の空間分解能が悪いことである。多数の入射ガンマ線を用いて、それぞれ異なる検出器位置への入射した際の入射角を求めれば、画像再構成を用いることでガンマ線放出核種の奥行き方向の位置は視差を介して求めることができるが、実際には、検出器の大きさやエネルギー分解能の制約を受けて、奥行き方向の空間分解能は著しく悪化する。

このようなコンプトンイメージングシステムにおける深さ分解能の原理的な制約は、以前から指摘されている問題であり、他の研究グループにより解決方法が提案および実証されてきた[1-3]。その解決方法は、多数の検出器を用いるか、あるいは一つの検出器を移動させることで、計測対象とするガンマ線放出核種を周辺の広い範囲から撮像するにより視差を大きく取り、奥行き方向の空間分解能を向上させるというものであるが、検出器配置の制約がある場合には適用することができない。そこで、本研究では、深さ方向の位置については、ガンマ線放出核種が存在可能な曲面の形状をLiDAR (Light Detection And Range) パッケージなど別のモダリティを利用して認識し、その曲面に対してコンプトン散乱の運動則により求めたガンマ線放出核種の存在可能な円錐表面を投影し、それら二つの面の交わった曲面にガンマ線放出核種の位置を限定することで、奥行き方向の位置情報を求めるものとする。このようなマルチモダリティの手法をとることで、従来のコンプトンイメージングでは制約があった奥行き方向の空間分解能をLiDARパッケージの有する数cm程度の空間分解能にまで高めることができる。

1.3. 研究目的

本研究では、周辺物体の位置情報を与えるLiDARパッケージとガンマ線放出核種の存在する情報を与えるコンプトンイメージングシステムを組み合わせた新しいマルチモデル3Dコンプトンイメージングシステムの開発・性能評価・Cs-137に対する三次元ガンマ線マッピングを実施することで、提案するマルチモダルイメージングシステムの有用性を示すことを目的とする。システム開発においては、福島原子力発電所の事故により飛散したCs-137、Cs-134の放出するガンマ線エネルギーに対して高い検出効率を得られるように最適化し、またドローンなどに搭載可能な小型かつ軽量のシステムとなるように設計する。また、性能評価に関しては、設計したシステムが期待通りの性能を示しているかを検証することとした。

さらに、従来のコンプトンイメージングシステムの奥行き方向の空間分解能の限界を実験的に検証するとともに、検出器を移動させて複数の視点から撮像した時の空間分解能と、開発したマルチモダルイメージングシステムによる空間分解能を比較することで、マルチモダルイメージングシステムの三次元ガンマ線マッピングへの有用性を示すものとする。

2. 本論

2.1. システム設計

本研究においては、5 m以上離れた位置からガンマ線放出核種の位置同定に必要な1m程度の空間分解能を実現できるよう、エネルギー分解能が5-7%と十分に高いエネルギー分解能を有するGAGGシンチレータ[4]を採用した。さらに、環境の温度変動に対して検出器の高いエネルギー分解能を維持するために、温度保障回路を実装し、測定した温度に対してSiPM (Silicon Photomultiplier)アレイに印加するバイアス電圧を調整することでGAGGシンチ

レータとSiPMアレイからの出力を安定化した。また、Cs-137とCs-134の放出するガンマ線エネルギーに対して高い検出効率を示すように、散乱体と吸収体の厚さをそれぞれ5 mmと10 mmとして、各8×8ピクセルを配列した検出器を用いて構成した。

信号処理においては、高いエネルギー分解能を維持しつつ個々の検出器ピクセルからの信号を高速のデジタル信号へと変換する動的しきい値時間幅処理法 (Dynamic Time-over-Threshold method) [5]と、大量のデジタル信号を並列処理するためのFPGA (Field Programmable Gate Array) 上に実装したファームウェアにより、検出器の個々のピクセルで出力されたパルスから有用なイベントのみを高速で抽出するスキームを構築した。

コンプトンシステムとLIDARパッケージからの情報は、それぞれ共通のCPUクロックで同期して取得される。それぞれイベントと情報の抽出が行われた後、LiDARパッケージから提供された曲面に対して、コンプトンコーンを描いていくことで、三次元画像再構成が行われる。

2.2. 性能評価

検出器のエネルギー分解能は、測定対象のガンマ線エネルギーに対して最適化され、散乱体は200 keV以下、吸収体は400 – 800 keVにおいて良好なエネルギー分解能になるように校正した。このとき、662 keVに対する散乱体と吸収体の各64チャンネルのエネルギー分解能はそれぞれ12.1% (FWHM) と11.6% (FWHM)を示した。また、9 kcps以下の計数率においては検出器に入射した全てのガンマ線光子を検出することが可能であり、6.6 kcpsにおいては偶発的な同時計測率を10%程度に抑制することができた。

散乱体表面から420 mm離れたところに配置したCs-137、Cs-134それぞれの点線源に対して二次元再構成を行った時、それぞれの軸における空間分解能から算出した角度分解能の平均はCs-137で10.97° (FWHM)、Cs-134で11.58° (FWHM)を示した。この角度分解能は、5 m離れた位置からそれぞれ0.96 m、1.01 mの広がりを持ってガンマ線放出核種の位置を同定することができることを示唆しており、目標としていた1 mの空間分解能を満たしていることが確認された。また、ARM (Angular Resolution Measure)を各ガンマ線エネルギーに対して求めたところ、662 keV、605 keV、796 keVそれぞれに対して、それぞれ7.81° (FWHM)、11.5° (FWHM)、7.46° (FWHM)の値が得られた。

2.3. 奥行き方向の空間分解能の検証

はじめに、単体コンプトンイメージングによる空間分解能について検証を行った。散乱体中心から70, 120, 220, 320, 420 mm離れた位置にCs-137点線源を配置して、それぞれの位置で測定を行った。散乱体の検出器平面と平行な軸をXとY、散乱体の検出器平面と垂直な軸をZとしたとき、散乱体中心から420 mmの地点に配置したCs-137点線源に対して、Z方向の空間分解能は 1380 ± 10 mm (FWHM)を示し、XとY方向の空間分解能の $124 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ (FWHM)と比べて10倍以上悪いことが示された。また、XとY方向の空間分解能に対するZ方向の空間分解能の比は、散乱体中心からガンマCs-137点線源の位置が遠ざかるほど悪化することから、従来のコンプトンイメージングの奥行き方向の空間分解能の限界が実験的に示唆された。

次に、LiDARパッケージとコンプトンイメージングを組み合わせたマルチモダルシステムを用いてデータ取得を行い、三次元再構成を行なった。実験室においてははしごの3段目にCs-137線源を配置し、データ取得を行った。このとき、LIDARパッケージにより得られたはしごの3段目に、コンプトンイメージングによってホットスポットが描かれ、三次元ガンマ線マッピングにおける有用性が示された。

3. 結論

本研究では、近年進展がめざましい形状認識技術を、ガンマ線放出核種の分布の可視化に持ちられるコンプトンイメージングの原理に組み合わせることにより、従来のコンプトンイメージングでは原理的に制約があった奥行き方向の空間分解能を向上させることを可能とする、新しいマルチモダル3Dコンプトンイメージングシステムの研究を行なった。本システムは、福島第一原子力発電所の事故に伴うガンマ線放出核種の汚染評価への適応を目指し、ドローンなどの遠隔操作ロボットに搭載可能なシステムの軽量性、Cs-137, Cs-134の放出するガンマ線エネルギーへの高い検出効率、三次元空間において線源位置を高精度で特定する高い空間分解能を有するように設計され、また設計した性能が得られていることが実験的に確認された。また実験室において、はしごの3段目にCs-137線源を配置し実験を行なったところ、LIDAR パッケージにより得られたはしごの3段目の位置に、コンプトンイメージングによってホットスポットが描かれ、三次元ガンマ線マッピングにおける実用性を示すことができた。

参考文献

- [1] J. M. Jaworski and Z. He, In Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2011 IEEE, pp.976-981 (2011).
- [2] J. Kataoka, et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 732, pp.403-407, (2013).
- [3] Y. Sato, et al., J. Instrum., 12(11), C11007 (2017).
- [4] P. Sibczynski, et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 772, pp.112-117 (2015).
- [5] K. Shimazoe, et al., "Dynamic time over threshold method." IEEE Trans. Nucl. Sci., 59(6), pp.3213-3217 (2012).