

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870864

研究課題名（和文）高感度な脳機能計測を可能とするあご紐付ヘルメットPET装置に関する基礎検討

研究課題名（英文）A basic study on a helmet-chin PET scanner enabling high sensitivity functional brain measurement

研究代表者

田島 英朗 (Tashima, Hideaki)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所 計測・線量評価部・研究員（任常）

研究者番号：70572907

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：半球状に検出器を配置し、さらにあごの位置に追加検出器を配置することで、脳機能計測のための感度を大幅に向上させることが可能なヘルメットPET装置を提案し、検出器ブロックサイズの最適化検討、画像再構成法の開発、及び試作装置への適用を行った。その結果、検出器ブロック間に隙間が生じることを考慮すると、検出器ブロックサイズが5cm角程度の大きさの時に、脳領域に対する感度が最も高くなることが明らかになった。そして、画像再構成法の開発と、世界初のヘルメット型PET試作機への適用を行い、性能評価を行った結果、高い感度と空間分解能を有することが示され、提案装置が高精度な脳イメージングに有効であることを実証した。

研究成果の概要（英文）：This project proposed the helmet-shaped PET scanner in which detectors are arranged in a hemispherical way and an add-on detector is placed at chin position so that the sensitivity for the functional brain measurement can be significantly improved. The detector block size for the helmet-chin PET was optimized by a simulation study including unavoidable dead spaces between the detector blocks, and the block size of 5 cm square was found to maximize the sensitivity for the brain region. In addition, an image reconstruction method for the helmet-chin PET was developed, and it was applied to a world's first helmet-chin PET prototype system. Experimental performance evaluation showed that the system has high sensitivity and high spatial resolution. In conclusion, the proposed system has promising performance for high sensitivity and accurate brain imaging.

研究分野：医用生体工学

キーワード：PET 脳PET 医用診断機器 認知症診断 ヘルメットPET 陽電子放出断層撮像法 検出器ジオメトリ
脳機能計測

1. 研究開始当初の背景

PET (Positron Emission Tomography : 陽電子放出断層撮像法) は、極微量の陽電子放出核種で標識した化合物を投与し、体内から放出される消滅放射線を検出することで、糖や酸素などの代謝や、神経受容体の活動状態などを生体機能画像として画像化することが可能である。

脳機能測定を行うために特化された脳 PET①-⑤は、アルツハイマー病などの認知症の早期診断に有効であると注目され始めている。より正確な診断のためには、高画質な画像を得る必要があり、そのために求められる装置の性能として、空間分解能と感度がある。空間分解能は、検出器の素子のサイズを小さくすることで向上させられる。また、感度は検出器の厚さを増加することで向上させられるほか、検出器の立体角、または幾何学的感度と呼ばれる、撮影する領域が覆われている範囲を大きくすることで向上させることができる。

通常の PET 装置は、検出器を円筒状に配置するため、立体角を大きくするためには装置を長いトンネル状にする必要がある。しかしながら、長いトンネル状患者ポートは、患者の心理的なストレスを高めるほか、計測中に視覚的な刺激を与えるなどの検査が困難となる。また、多くの検出器が必要となるためコストが高くなってしまいうという問題点がある。

一方で、近年、PET 装置の検出器として、深さ方向の情報を得ることが可能な 3次元検出器である DOI (Depth-of-Interaction) 検出器⑥など、高い空間分解能を持つものが開発され、これまでになかった自由な検出器配置が実現可能になってきた。

そこで、本研究では、脳機能測定に特化することで、装置のコストを下げつつも、高い感度を得ることが可能な新しい頭部専用の脳 PET 装置の提案を行った⑦。

2. 研究の目的

本研究では、脳 PET 装置として、半球状に検出器を配置したヘルメット検出器と、あご検出器によって構成される、あご紐付ヘルメット PET 装置を提案する (図 1)。まず、



図 1 あご紐付ヘルメット PET 装置の概念図

円筒型の PET と比較して、どの程度の性能向上が可能か理論的に解析を行う。

そして、提案装置を PET 検出器の形として一般的な、ブロック型検出器によって構成する方法について検討し、最適な検出器サイズを明らかにする。

また、従来の PET 装置は、幾何学的に単純な検出器配置 (検出器ジオメトリ) であったが、半球状に検出器を配置する提案装置では、画像再構成 (測定データから画像を生成する処理) を行うために、規則性の少ない配置の検出器を計算機上で正確にモデル化する必要がある。そこで、提案装置のための画像再構成ソフトウェアを開発する。

そして、開発ソフトウェアを、コンセプト実証のために開発した試作装置に適用し、性能評価を行う。

3. 研究の方法

提案ジオメトリの幾何学的な感度を、半球型の視野内に対して求める理論式を導出し、円筒型の PET 装置と比較した。

ブロック型検出器を用いて提案装置を構成する場合の最適な検出器サイズを明らかにするために、物理現象を精度よくシミュレーションすることが可能な Geant4 ツールキットを用いて、提案装置を模擬し、検出器サイズを変えながら、脳領域に対する感度の評価を行った。

画像再構成ソフトウェアとして、任意の検出器ジオメトリに適用可能なデータ形式とジオメトリのモデル化手法、及び投影演算 (システムモデルを用いて、想定した画像から観測されるデータを予測するための計算) を開発し、逐次近似画像再構成手法として大規模並列化が可能な GPU (Graphics Processing Unit) に対して実装を行った。

提案装置のコンセプト実証のため、放医研独自方式の 4 層 DOI 検出器を用いて試作機を開発し、基本性能評価とイメージング性能評価を行った。

4. 研究成果

提案ジオメトリの幾何学的な感度の理論式を導出し、視野内のすべての位置について評価した結果を図 2 に示す。まず、半球型のヘルメット検出器のみの PET ジオメトリ (ヘルメット PET) の幾何学的な感度を、導出した理論式を用いて計算し、評価した結果、同じ表面積 (同程度の検出器数となるため装置コストが同等) の円筒型 PET 装置 (図 2a) と比較して、半球型の視野に対する平均感度が 1.5 倍になることが示された (図 2b)。しかしながら、半球の中心部の感度は円筒型と同様に低いままであった。そこで、あご検出器として、ヘルメット検出器の 12% の表面積の検出器を、半球と共通する球上であごの位置に、あご検出器として配置した。その結果、低感度領域であった半球中心部の感度を 3 倍に向上させられることが示された (図 2c)。

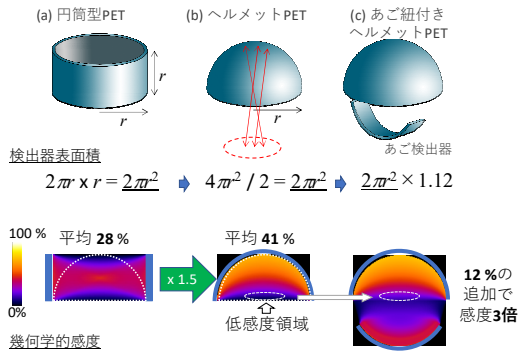


図2 理論式による幾何学的感度の比較

また、ブロック検出器のサイズを変えながら、提案ジオメトリをモデル化し、モンテカルロシミュレーションにより、水等価の物体に放射能を満たした状態（ファントムと呼ばれる）を設定して測定を模擬し、脳領域の感度の変化を調べた結果、4 cmから5 cm角程度の大きさで最も感度が高くなることが明らかになった（図3）。当初は、ブロックサイズが小さいほど隙間を少なくできるため、感度が高くなると予想していたが、実際には、ブロック間の隙間（感度の無い不感領域）が避けられないため、ブロック数が増えることによって、小さい隙間の数が増え、全部合わせると大きなブロックを用いた場合よりも不感領域が大きくなったため、ブロックサイズを小さくすると感度が下がるという結果になった。

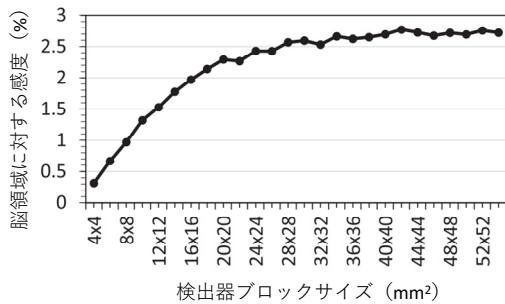


図3 検出器ブロックサイズの最適化

あご紐付ヘルメットPET装置に対応した画像再構成のソフトウェアとして、測定されるガンマ線対の同時計数データ（リストモードデータ）をそのまま使用する、リストモード画像再構成法の開発を行った。そして、投影演算を並列化し、複数のGPUで同時に計算できるように実装した。また、PETの測定データから定量的な画像を得るためには、様々な補正を行う必要がある。具体的には、検出器素子ごとの感度のばらつきを補正する感度補正法、測定対象内でのガンマ線の減弱（吸収とも呼ばれる）を補正する減弱補正法、独立した2つのガンマ線対の発生事象がたまたま同時に起こり、それぞれのうち片方ずつが検出される偶発同時計数（ランダム）を補正するランダム補正、測定対象内で散乱した

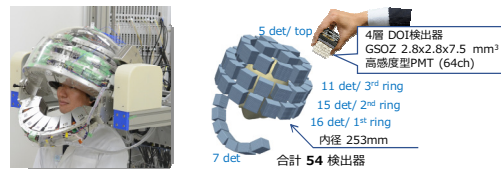


図3 あご紐付ヘルメットPET試作機と

その検出器配置を表す3次元図

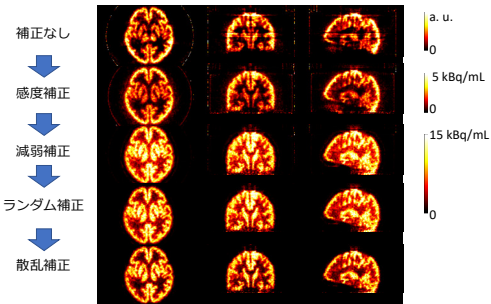


図3 開発した試作機を用いて3次元脳ファントムを測定し、開発した画像再構成法及び各種補正方法を順次適用した結果得られた再構成画像（左から横断面、冠状面、矢状面）

のちに測定された散乱成分の補正を行う散乱補正法の開発を行い、再構成法に組み込んだ。

コンセプト実証のために開発した試作機で3次元脳ファントムを測定したデータに、開発した画像再構成法を適用した結果、各種補正法を適用することで、定量性に優れ、空間分解能の高い画像を得ることに成功した。

以上より、提案装置が高精度な脳機能測定のために優れた性能を持つことを示し、低コストで高性能な普及型脳PETとして応用が広がることを期待できる。

<引用文献>

- ① Eriksson L, Wienhard K, Eriksson M, et al., The ECAT HRRT: NEMA NEC evaluation of the HRRT system, the new high-resolution research tomograph, IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 49, 2002, 2085-8
- ② Yamaya T, Yoshida E, Obi T, et al., First human brain imaging by jPET-D4 prototype with a pre-computed system matrix IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 55, 2008, 2482-92
- ③ Bauer C E, Brefczynski-Lewis J, Marano G, et al., Concept of an upright wearable positron emission tomography imager in humans, Brain Behav., Vol. 6, 2016, e00530
- ④ Yamamoto S, Honda M, Oohashi T, et al., Development of a brain PET system, PET-Hat: a wearable PET system for brain

research, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 58, 2011, 668-73

- ⑤ Omura T, Moriya T, Yamada R, et al., Development of a high-resolution four-layer DOI detector using MPPCs for brain PET, IEEE NSS/MIC Conf. Rec., 2012, Anaheim, M18-41
- ⑥ Hirano Y, Nitta M, Inadama N, et al., Performance evaluation of a depth-of-interaction detector by use of position-sensitive PMT with a super-bialkali photocathode, Radiol. Phys. Technol., Vol. 7, 2014, 57-66
- ⑦ Tashima H, Ito H, Yamaya T, A proposed helmet-PET with a jaw detector enabling high-sensitivity brain imaging, IEEE NSS/MIC Conf. Rec., 2013, Seoul, M11-11

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Ahmed A M, Tashima H, Yoshida E, Nishikido F, Yamaya T, Simulation study comparing the helmet-chin PET with a cylindrical PET of the same number of detectors, Phys. Med. Biol. Vol. 62, 2017, 4541-4550 (査読有)
- ② Ahmed A M, Tashima H, Yoshida E, Yamaya T, Investigation of the optimal detector arrangement for the helmet-chin PET - A simulation study, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, Vol. 858, 2017, 96-100 (査読有)
- ③ Tashima H, Yamaya T, Proposed helmet-PET geometries with add-on detectors for high sensitivity brain imaging, Phys. Med. Biol. Vol. 61, 2016, 7205-7220 (査読有)
- ④ 田島英朗, PET 装置の構成要素と基礎原理 (3) PET イメージングに必要なデータ補正と画像再構成, Med. Imag. Technol. Vol. 34, 2016, 287-291 (査読無)

[学会発表] (計 11 件)

- ① Tashima H, Yoshida E, Iwao Y, Wakizaka H, Takado Y, Seki C, Suhara T, Yamashita T, Yamaya T, Development of the helmet-neck PET prototype for high sensitivity brain imaging, European Congress of Radiology 2017, Vienna, Mar. 2017
- ② 田島英朗、吉田英治、岩男悠真、脇坂秀克、山下大地、田沢周作、山谷泰賀、ヘルメット PET 装置の開発: 追加検出位置の最適化、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜、神奈川県、2017 年 3 月
- ③ Tashima H, Yoshida E, Iwao Y, Wakizaka H, Tazawa S, Seki C, Kimura Y, Suhara T, Yamaya T, First clinical test of the helmet-chin PET prototype, IEEE NSS/MIC,

Strasbourg, Nov. 2016

- ④ 田島英朗、吉田英治、岩男悠真、山谷泰賀、ヘルメット型 PET における画像再構成法の開発、第 35 回日本医用画像工学会、千葉大学西千葉キャンパスけやき会館、千葉県、2016 年 7 月
- ⑤ Tashima H, Yoshida E, Nishikido F, Wakizaka H, Iwao Y, Ahmed A M, Mohammadi A, Kimura Y, Suhara T, Fujibayashi Y, Tazawa S, Yamaya T, Initial clinical test of the first helmet-chin PET prototype for highly sensitive brain imaging, SNMMI Annual Meeting, San Diego, June 2016
- ⑥ Tashima H, Yoshida E, Nishikido F, Wakizaka H, Nitta M, Ahmed A M, Mohammadi A, Tazawa S, Kimura Y, Suhara T, Fujibayashi Y, Yamaya T, Development of the helmet-chin PET prototype, IEEE NSS/MIC, San Diego, Nov. 2015
- ⑦ Ahmed A M, Tashima H, Yoshida E, Yamaya T, Sensitivity comparison of the helmet-chin PET with a cylindrical PET: a simulation study, IEEE NSS/MIC, San Diego, Nov. 2015
- ⑧ Yamaya T, Yoshida E, Tashima H, Inadama N, Shinaji T, Wakizaka H, Nitta M, Tazawa S, Suhara T, Fujibayashi Y, First prototype of a compact helmet-chin PET for high-sensitivity brain imaging, SNMMI Annual Meeting, Baltimore, June 2015
- ⑨ Ahmed A M, Tashima H, Yoshida E, Yamaya T, Sensitivity analysis of the helmet-with-jaw PET using Geant4, 第 109 回日本医学物理学会学術大会, パシフィコ横浜, 神奈川県, Apr. 2015
- ⑩ Tashima H, Ito H, Yamaya T, Simulation study of helmet-PET with add-on detectors for high sensitivity brain imaging, WMIC 2014, Seoul, Korea, Sep. 2014
- ⑪ 田島英朗、伊藤浩、山谷泰賀、顎部検出器付ヘルメット型 PET 装置の提案、第 33 回日本医用画像工学会大会、東京慈恵会医科大学、東京、2014 年 7 月

[その他]

次世代 PET 研究報告書

<http://www.nirs.qst.go.jp/usr/medical-imaging/ja/study/main.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田島 英朗 (TASHIMA, Hideaki)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所・計測・線量評価部・研究員

研究者番号: 70572907

(2)研究協力者

山谷 泰賀 (YAYAMA, Taiga)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発
機構・放射線医学総合研究所・計測・線量
評価部・チームリーダー

吉田 英治 (YOSHIDA, Eiji)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発
機構・放射線医学総合研究所・計測・線量
評価部・主幹研究員

岩男 悠真 (IWAO, Yuma)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発
機構・放射線医学総合研究所・計測・線量
評価部・博士研究員

脇坂 秀克 (WAKIZAKA, Hidekatsu)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発
機構・放射線医学総合研究所・計測・線量
評価部・技術員