

氏名 水田 哲郎
授与学位 博士(工学)
学位授与年月日 平成22年 9月 8日
学位授与の根拠法規 学位規則第4条第2項

学位論文題目 Development of Methods for Image Quality Evaluation and Corrections of Attenuation and Scattering in Three-Dimensional Whole-body Positron Emission Tomography

(全身用 3D PET における画質評価及び吸収・散乱補正法の開発)

論文審査委員 主査 東北大学教授 石井慶造 東北大学教授 山崎浩道
東北大学准教授 寺川貴樹 東北大学准教授 松山成男
東北大学教授 福田 寛 東北大学准教授 田代 学

(加齢医学研究所)

(サイクロトン・ラジオアイソトープセンター)

論文内容要旨

【背景】全身用 3D PET 計測においては、被検者の体格や撮像条件の違いによって画質が変化し、読影医にとって個々の画像データが必ずしも比較可能な情報になっていないという問題点がある。読影医が「確からしさ」を持って診断を下すためには画質が一定以上に保たれていることが望まれるが、この「確からしさ」の観点で読影医が求める画質を示す指標が何であるかという議論はこれまでなされてきていない。

3D PET 計測においては、画像の定量性を確保するためにいくつかのデータ補正が必要であるが、その中でも吸収補正、散乱補正が画像の定量値に与える影響が大きく、精度を高める手法の開発や実装が求められている。本研究に使用した全身用 3D PET 装置には、 ^{137}Cs 線源を用いたシングルトランスミッションデータ収集機構が搭載されている。シングルトランスミッション計測においては、線源に近接する検出器での計数が不要であり被写体を透過した成分のみを計数すればよいため、線源強度を高めた統計精度の高いデータ収集が可能になる。また ^{137}Cs から放出される γ 線のエネルギーは 662keV であるため、エミッション放射線源から発せられる光子エネルギー(511keV)と近い吸収係数の情報を取得することができる。しかし実際には、計測対象である透過データに加えて被写体の別の場所で散乱されて検出される成分やエミッション放射線源から混入する成分が加算され、吸収係数値が過小評価されるという問題がある。この過小評価を抑制するために、エミッション放射線源からの混入成分は実測補正し、トランスミッション自身の散乱成分は発生が抑えられる幾何設計とした。しかしそれでも、エミッション放射線エネルギーや被写体の大きさの条件が変化した測定系では、過小評価が無視できない場合が存在する。一方で 3D PET のエミッションデータに含まれる散乱同時計数のうち、特に視野外放射線源からの寄与による成分をソフトウェア的手法のみで補正するのは困難であるが、Ferreira らによって提案された光子エネルギー情報とソフトウェア的手法を組み合わせたハイブリッド散乱補正法は、視野外放射線源からの散乱同時計数に対しても有効な補正法と考えられる。

【目的】一つ目の研究課題として、3D PET の画質の到達目標を明確に定めることのできる画質評価手法を開発する。二つ目の研究課題として、 γ 線源を用いた実測の長所を活かしつつ吸収係数値の過小評価を取り除くことのできる吸収補正法を開発する。また視野外放射線源からの散乱同時計数に対しても補正効果の高いハイブリッド散乱補正法を実装する。

【方法 1】画質評価手法として、データ収集時の雑音等価計数 NEC(Noise Equivalent Counts)を被写体体積 volume で割ることによって得られる、画質予測・評価用の新たな物理学的指標 NEC density を考案した。一般的な NEC, 被検者単位長さあたりの Patient NEC (PNEC), そして NEC density (NECD)はそれぞれ次式で与えられる。

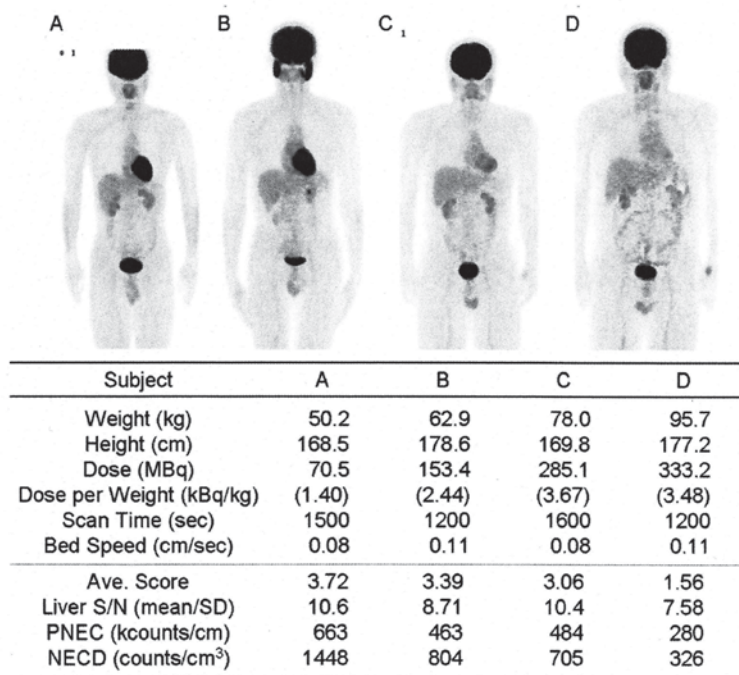
$$NEC_{appr}[\text{counts}] = \frac{T^2}{T+S+2 \cdot f \cdot R} \propto \frac{(T+S)^2}{T+S+2 \cdot f \cdot R}$$

$$PNEC[\text{counts/cm}] = \frac{NEC_{appr}}{L}$$

$$NECD[\text{counts/cm}^3] = \frac{NEC_{appr}[\text{counts}]}{\text{volume}[\text{cm}^3]}$$

ここで、T は収集データに含まれる真の同時計数、S は散乱同時計数、R は偶発同時計数、f は被写体の有効視野に対する占有率である。各指標が、読影医が必要としている画質を数値的に反映しているかどうかを評価するために、15 例の正常ボランティアについて画質が異なると予測される撮像条件で全身 FDG PET 画像を取得し、それぞれの画像に対して 18 名の読影医・技師が視覚的なスコアリングを行った。またそれぞれの画像に対して再構成画像の均一性を表す Liver S/N(肝臓上の関心領域の信号対雑音比)、PNEC そして NECD を算出した。

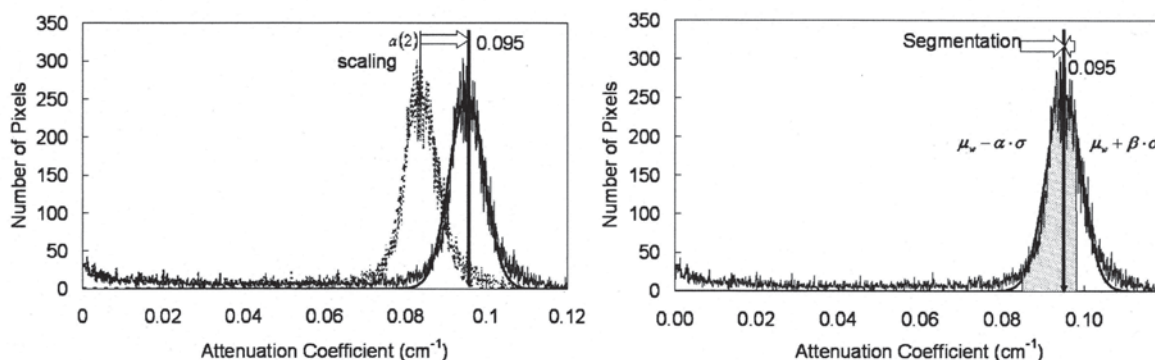
【結果 1】結果の一例を下図に示す。



被検者 A は 4 例の中で最も投与量が少なく、体重も軽い。視覚スコアと 3 つの指標全てにおいて最も良い評価結果が得られている。被検者 C は被検者 B よりも投与量が多く撮像時間も長い。これらの条件を反映して PNEC、Liver S/N は被検者 C の方が高い値を示しているが、視覚スコア、NECD

は被検者 B の方が勝っている。指標によって評価が異なる原因は、被検者 C と被検者 B の体格即ち画像化領域の違いを考慮しているかどうかにあると考えられる。即ち、被写体内有効カウント密度を表す NECD が、最も視覚スコアを反映する可能性が示唆された。15 例に対する各指標と視覚スコアとの順位相関係数は、Liver S/N は 0.81 ($p < 0.0003$)、PNEC は 0.86 ($p < 0.00004$)、そして NECD は 0.91 ($p < 0.000003$)であり、NECD が視覚スコアと最も高い相関があることが分かった。

【方法 2】吸収係数値の過小評価を取り除く方法として、 ^{137}Cs シングルトランスミッション画像に対する軟組織セグメンテーション吸収補正法を開発した。本手法は、吸収係数画像のヒストグラム上で軟組織の吸収係数値(ヒストグラムのピーク値)が水の理論吸収値に一致するような係数を求め、吸収係数画像全体にこの係数を乗算した上で軟組織部に理論吸収係数値を割り当て、吸収係数値の過小評価を取り除く手法である。骨や肺野領域の吸収係数分布は、実測で得られた形状を使用する。



実装したハイブリッド散乱補正法では、通常のエネルギウィンドウ(SEW:Standard Energy Window)の他に、光電ピークよりも高いエネルギウィンドウ(U EW:Upper Energy Window)を設定し、二種類のエネルギウィンドウでデータ収集を行う。UEW(T+S)に含まれる被写体での散乱同時計数分布 UEW(S)はその絶対量が少ないため、コンボリューション・サブトラクション法で散乱補正を行い統計精度は低いが高定量性の高い真の同時計数分布 UEW(T)を求める。次に SEW(T)と UEW(T)の感度比を考慮して、SEW(T+S)と UEW(T)を用いて散乱成分 SEW(S)(低周波成分であるという条件付)を推定する。最後に SEW(T+S)から SEW(S)を減算することで、定量性は UEW の補正精度、統計精度は SEW の計数で確保された SEW(T)を求めることができる。

【結果 2】これらの吸収・散乱補正を組み合わせた上で定量性の評価を行った結果、被写体サイズ・放射能濃度・視野外放射能などを変えた測定条件においても、定量性が確保されることが確認された。

【結論】本研究で開発した画質評価指標 NEC density は、被検者の体格や撮像条件の違いを越えて読影医が必要とする画質(視覚スコア)を忠実に反映する指標であることが証明された。本研究によって、3D PET の画質の到達目標を明確に定めることのできる画質評価手法が確立できた。

また本研究で開発した軟組織セグメンテーション吸収補正法は、肺野や骨など個人差のある領域は γ 線実測の長所を活かしつつ吸収係数値の過小評価の問題を解決した。また実装したハイブリッド散乱補正法は、実装した装置においても視野外放射線源からの散乱同時計数に対して高い補正効果があることを確認した。軟組織セグメンテーション吸収補正法とハイブリッド散乱補正法とを組み合わせることで、3D PET の高感度特性を活かしつつ定量性を確保した検査が可能になった。

本研究で開発した画質評価と吸収・散乱補正の手法は、PET の医療機器・測定機器の両面から求められる重要な特性を確保する手段であり、絶対比較可能な PET 検査を実現する手段として臨床分野、研究分野に貢献すると考える。

論文審査結果の要旨

全身用 3D PET 画像の画質は、測定系(体格や撮像条件など)に依存して変化してしまうという問題がある。また読影医が診断に必要とする画質が、どのような指標で表されるかということが明らかにされていない。一方画像の定量性を確保するためには、特に補正量の大きい吸収・散乱補正の精度を確保することが必要不可欠である。本論文は、全身用 3D PET における臨床画像の画質評価手法及び吸収・散乱補正の方法の開発とその評価結果を論じたものである。

本論文は全 6 章で構成されている。

第 1 章は序論であり、背景および目的を述べている。

第 2 章では、PET の測定原理、放射性薬剤、検出器、電気信号処理、データ補正、画像再構成、性能評価方法、そして定量解析方法について、一般論を詳細に述べている。

第 3 章では、研究に使用した全身用 3D PET 装置について述べている。この装置は著者等が開発した装置であり、放射線検出から画像取得に至るまでのハードウェア構成やソフトウェア構成・データ処理方法を詳細に述べている。

第 4 章では、3D PET の画質の到達目標を明確に定めることのできる画質評価手法として、新たな物理学的指標 Noise Equivalent counts (:NEC) density(雑音等価計数密度)の開発内容と評価内容について述べている。NEC density が測定系に依存した画質の変化を捉えると共に医師・技師の視覚スコアと高い相関があることを実証し、読影医が診断に必要とする画質が NEC density で評価可能になることを明らかにした。

第 5 章では、吸収・散乱補正の精度向上に関する開発内容と評価内容について述べている。 ^{137}Cs を用いた吸収補正に関しては、画像変換処理によって過小評価を取り除く軟組織セグメンテーション法を開発し、吸収係数値の定量性が確保されることを明らかにした。また散乱補正についてはハイブリッド散乱補正法の具体的な実装方法を説明し、他の手法では補正が難しいとされている視野外放射線源からの散乱線も適切に補正できることを示している。

第 6 章では、本研究で開発した内容が臨床現場で利用・応用されている事例を述べ、実用性の高い技術であることを示している。また研究内容を総括している。

以上、要するに本論文は、放射線医用断層画像装置 3D PET の課題である画質の確保、吸収・散乱補正精度の確保を目的とした技術開発によって、絶対比較可能な臨床 PET 検査を実現するための知見を与えるものであり、量子エネルギー工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。