

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 田中 創大

本論文は陽子線治療の高精度化のための陽子線 CT 画像取得法の研究開発についてまとめられたものである。

特徴的な深部線量分布を活用する陽子線治療では、高い線量集中性を実現するために高精度の陽子線飛程計算精度が求められている。しかし、現状の X 線 CT 画像を用いた治療計画では飛程計算の不確定性は大きく、大きなレンジマージンによって正常組織に過剰な線量が与えられている。1つの解決策として陽子線を用いたイメージングを用いる手法が考えられるが、陽子線イメージングは現在発展途上の技術である。本研究では、システムの複雑化や長い測定時間といった先行研究で生じていた問題を解決するため、新たな陽子線 CT 画像取得法を発案・構築し、実証実験によって陽子線 CT 画像を取得し、その陽子線イメージング技術を向上させた。

第一章の序論では、本研究の背景と目的が説明されている。がんの放射線治療の一般論から始まり、陽子線治療における問題点とその解決策としての陽子線イメージングについて述べられている。そして、臨床利用のための求められる陽子線イメージングの条件に基づいて、先行研究で達成していない点と本研究で目指した目標と実施した内容が示されている。

第二章では、陽子線 CT の原理と本研究で発案・構築した陽子線 CT 取得法の概要が述べられている。X 線 CT から始まり、陽子線 CT において特有な物理パラメータについて説明されている。また本研究で構築した検出システムと画像処理・再構成過程について、その新規性ととも示されている。

第三章から第五章では、構築された検出システムの実証実験によって陽子線 CT 画像が得られ、陽子線 CT 画像取得法の評価結果が示された。

第三章で述べられている実験は開発初期の検出システムの構築と最適化が主な目的であり、70-MeV 陽子線を用いてプラスチックシンチレータを用いた検出システムによって陽子線 CT 画像を得て、評価を行っている。被写体での陽子の散乱やシンチレータ内の散乱による画像劣化など、問題点が抽出された。

第四章では、検出システムの改善としてシンチレータとして BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) を採用することで陽子線 CT システムを向上し、陽子線 CT システムの評価を

様々な要素について行った。シンプルな構成から成る本検出システムで、臨床に求められる空間分解能と画素値精度の 70-MeV 陽子線 CT 画像取得に成功していることは大きな成果である。また、70-MeV 陽子線だけではなく、臨床利用のために必要な高エネルギー陽子線を用いた陽子線 CT 画像取得も行い、評価を行っている。

第五章では、本検出システムで避けることが難しい陽子の散乱による画像劣化を解決する手段としてシンチレータ直前に設置するマルチホールコリメータによって陽子線の直線成分を抽出する手法を提案している。実証実験を通して 70-MeV 陽子線 CT 画像としてはコリメータを用いたシステムと同程度の結果が得られ、マルチホールコリメータを用いた陽子線 CT システムが有効であることが示された。200-MeV 陽子線 CT 画像の画質改善のための手法が確立された。

第六章では、一連の実証実験を通して得られた結果のまとめとして、第一章で挙げられた本研究で目指す目標項目についてそれぞれ評価結果が示された。70-MeV 陽子線 CT 画像では、臨床利用可能なレベルの高い空間分解能が得られたが、画素値の精度については画像再構成時や高エネルギー時で誤差があり改善する必要がある、測定時間は本検出システムではとても短くすることが可能という結果であった。今後、臨床利用に向けて、画質向上とともに被曝量の低減に取り組む必要があるという課題も示された。

第七章では、結論として本研究において新たな陽子線 CT 画像取得法が構築され、様々な被写体について陽子線 CT 画像の取得に成功し、そのシステムにおいて生じる物理現象と画像特性が評価されたとことが述べられた。また、臨床利用に向けた今後の展望と陽子線治療以外の応用の可能性についても説明された。

以上のように本論文は、陽子線治療の精度向上のために求められる陽子線イメージングシステムを新たに構築し、陽子線 CT 画像取得に成功し、そのシステムの評価を多角的な視点から行った。シンプルな検出システムで短時間の測定から高精度の陽子線 CT 画像が得られたことは革新的なことであり、このように陽子線イメージングの新たな手法を提案した点は、学術的にも将来の臨床応用を見据えても大変意義がある。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。