

京都大学	博士 (工学)	氏名	坂本 裕介
論文題目	Design Optimization and Plan Optimization for Particle Beam Therapy Systems (粒子線治療システムを対象とした設計・計画最適化)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、粒子線治療システムを対象とした設計および計画の最適化を論じた結果をまとめたものであって、5章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、がん治療法の一つである粒子線治療法について、その特徴と治療装置について概観し、さらなる高性能化と普及を目指すため装置の小型化と粒子ビーム照射精度の向上の重要性を説明した。</p> <p>第2章では、粒子線加速器の小型化を目的とした高温超電導コイルのトポロジー最適化手法について論じている。加速器用コイルの小型化にはコイルの発生する磁界を増大させることが有効であり、そのためには銅線よりも大きな電流を流すことができ、また液体ヘリウムを必要としない高温超電導線材の利用に期待が集まっている。しかしながら高温超電導線材は脆いテープ状の形状で製造上の制約が大きく、従来の銅や低温超電導コイルで最適とされる鞍型のコイル構造を製造することが困難である。そこで本論文では、より製造が容易な角型コイルの積層による製造を可能とする制約の下、加速器用コイルに要求される設計要件である BL 積均一度，中心磁束密度，コイル断面積を目的関数として、コイルの断面形状を設計するトポロジー最適化の方法を提案している。本提案手法では、密度法をベースとしつつ、トポロジー最適化に固有の問題である過度に複雑な形状やグレースケールの発生を抑制するため、ヘルムホルツ型の偏微分方程式を用いたフィルタリングとヘヴィサイド関数を用いた写像の手法を実装し、これによりフィルタリングの半径を調整することによって得られる形状の複雑さをコントロールできるようになった。さらに最適設計例において、加速器用コイルに要求される設計要件を全て満足するコイル形状が得られること示し、方法論の有効性を検証している。</p> <p>第3章では、積層原体照射におけるビーム照射量のロバスト最適化手法の構築について論じている。積層原体照射は高精度照射法の一つであり、がん病巣を複数の層状の領域に分割して照射を行う方法である。この方法では、粒子ビームを遮るコリメータの開口幅を層ごとに切り替えることにより、がん病巣の3次元的な形状に沿った粒子線照射が可能となり、病巣外への不要な線量付与を抑制できるという長所がある。一方、拡散した粒子線でがん病巣全体を1回で照射する従来のパッシブ照射法と比べると、複数回に分割して照射を行う積層原体照射法においては、照射中に患者が動いてしまうことによって合計線量分布に不均一が生じるリスクがある。先行研究では粒子ビームの線量ピークを形成するためのフィルタ装置の設計を調整し、ピークを僅かに鈍化させることで患者の動きに対する線量変動の感度を下げる方法が提案されていたが、がん病巣後方に位置する健康臓器への不要な線量付与が増えるという課題があった。そこで本研究ではフィルタ装置の設計変更を行うのではなく、各層に付与する照射量のバランスを最適化することで、腫瘍外への不要な線量付与をできるだけ増加させずに患者の動きに対するロバスト性を向上する方法を提案している。すなわち、</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	坂本 裕介
<p>各層の照射量の最適化過程において、層ごとに適切な照射量上限を設定することにより患者の動きの大きさに対する線量均一度変化の感度が低く抑えられることを見出し、照射量上限制約のもと最適化問題を解くことにより、患者の動きに対してロバストな粒子数を決定する方法論を構築している。さらに、1次元ならびに3次元の数値例において検証を行い、提案手法によって得られた照射線量分布は、患者の動きが無い場合においては従来手法とほとんど差がなく、また患者の動きがある場合には従来手法と比べて線量均一度が変動しないことを検証している。</p> <p>第4章では、スキャニング照射におけるスポット配置最適化法の構築について論じている。スキャニング照射法は高精度照射法の一つであり、積層原体法と同様にがん病巣を複数の層状の領域に分割し、層を塗り潰すようにして粒子ビームを走査しながら照射を行う方法である。この方法は、コリメータが不要で装置構成が少なくすむ特長があり、また治療の観点においても積層原体照射法よりもさらに照射の自由度が高く、がん病巣の外部への不要な線量を減少させることができる。スキャニング照射は、腫瘍内に並べる照射スポットの配置と、各スポットへのビーム照射量の2つの設計自由度を有するが、照射量最適化の方法については多くの先行研究が存在する反面、スポットの最適配置についての研究例は少なく、多くの文献ではスポットは正方格子状に一定間隔で配置されており、スキャニング照射の有する能力を最大限に発揮できていない。そこで本論文では、この問題を解決する方策として、スポットの配置と照射量の両方を最適化する手法を構築している。すなわち、まずスポット毎の照射量と合計線量分布を定式化し、治療に適した照射線量分布を得るための目的関数を設定した。さらに、スポット配置を最適化するための2段階の最適化アルゴリズムを構築した。この最適化アルゴリズムにおいては、まず十分に多くのスポットを密に配置した状態を初期状態とし、第1段階では、スポット配置を固定して照射量の最適化を行い、照射量の寄与度が小さいスポットを取り除くという操作を行い、第2段階では、再度照射量の最適化を行う手順を繰り返すことによって最適なスポット配置を得る。類似の配置最適化は他の工学分野でも提案されているが、多くは数十個程度の対象物を2次元に配置する問題であるのに対し、粒子線治療におけるスポットは数百から数千個が3次元に配置され、また配置最適化の作業は患者ごとに毎回実施することが求められる。そのため本論文では短時間で最適化を実施するために、複数のスポットを同時に取り除くアルゴリズムを新たに提案するとともに、従来のスポットを1つずつ取り除く場合と性能が大きく変化しないことを検証している。提案手法を用いて得られたスポット配置は、がん病巣の輪郭に沿った閉曲線上の付近に配置されやすい傾向が見られ、また従来の格子状スポット配置と比べてより良好な照射線量分布を求められることを検証した。</p> <p>第5章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、粒子線がん治療の価値を向上し、さらなる普及を目指すために必要となる技術として、装置の小型化と粒子ビーム照射精度の向上を目的とした最適化技術について論じた結果をまとめたものである。得られた主な結果は以下の通りである。

1. 高温超電導コイルを用いて小型の粒子線加速器を実現するため、加速器用コイル断面形状を対象に、トポロジー最適設計法を構築している。すなわち、加速器用コイルの設計要件である BL 積均一度、中心磁束密度、コイル断面積を目的関数として定式化している。そして、トポロジー最適化の課題である過度に複雑な形状やグレースケールの発生を抑制するため、ヘルムホルツ型の偏微分方程式を用いたフィルタリングとヘヴィサイド関数を用いた最適化アルゴリズムを構築している。さらに最適設計例において、加速器用コイルに要求される設計要件を満たすコイル形状が得られており、方法論の有効性を検証している。

2. 粒子線照射の一手法である積層原体照射法において、照射中の患者の動きに対して付与線量分布が変動してしまう問題を解決するため、粒子線照射量のロバスト最適化設計法を構築している。すなわち、各層の照射量に上限を設けることによってその層の照射中に患者が動いた場合の線量変動を抑制できることを見出し、上限制約付き最適化問題を解くことで患者の動きに対して線量分布が変動しにくい照射を実現する方法を開発している。さらに、実際の患者の動きを模擬した 1 次元および 3 次元のシミュレーションを実施し、提案手法において線量変動が小さくなることを検証している。

3. 粒子線照射の一手法であるスキヤニング照射法において、がん病巣外への不要な照射線量の低減と治療時間の短縮を同時に実現するスポット配置最適化手法を構築している。すなわち、スポットを十分に密に配置した状態でスポット毎の粒子線照射量の最適化を行なった後に、寄与度の低いスポットを取り除き、再度照射量の最適化を行う手順を繰り返すことによって最適配置を得るという 2 段階アルゴリズムを開発している。そして、2 次元および 3 次元の数値例により、得られたスポット配置は従来の格子状配置と比べ、より少ないスポット数で良好な線量分布を形成できることを検証している。

以上のように本論文は、粒子線治療装置の小型化と照射精度向上に資する最適化手法を構築し、数値例により提案手法の有効性を示しており、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 5 年 12 月 18 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。