

様式 (7)

報告番号	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px; display: inline-block;">甲 保</div> 第 17 号 乙 保
論文内容要旨	
氏名	田中 義浩
題目	Dose-volume constrained optimization in intensity-modulated radiation therapy treatment planning (強度変調放射線治療計画の線量体積制約に基づく最適化)
<p>強度変調放射線治療 (IMRT: Intensity-Modulated Radiation Therapy) は、リニアック装置による高エネルギー放射線ビームの角度と強度を自由に制御できる機構を利用し、がん細胞が死滅するに十分な線量を標的体積 (PTV: Planning Target Volume) に照射するとともに、周囲のリスク臓器 (OAR: Organ at Risk) はできるだけ少ない線量に抑えられるよう計画された治療法である。IMRT による治療計画は放射線ビーム係数に関する目的関数の最小化問題に帰着される。逆問題解法として、目的関数の極小解をニュートン法や共役勾配法などを用いて求める方法や split feasibility problem (SFP) に基づく方法が知られている。</p> <p>IMRT の最適化法では、PTV, OAR にそれぞれ、下限線量以上、上限線量以下の許容線量になるべく多くの体積割合で照射されるよう設計した目的関数が広く用いられている。ただし、一般的な臨床例では、各体積に 100% の割合で許容線量を照射できる最適解は存在せず、最適化問題は inconsistent となる。一方、線量体積制約は治療計画の評価として基本的であり、放射線治療医学分野において制約のガイドラインが作成されている。従来、線量に基づく目的関数を定めて inconsistent な最適化問題を解き、結果的に線量体積制約を満たすことを期待した方法が用いられている。このため、目的関数を再設定して逆問題を解くという、一連の最適化プロセスに人を介した試行錯誤の手続きが必要となる。このことに起因して、医療従事者が実施する作業には長時間を要し、問題の抜本的な解決が望まれている。</p> <p>本論文では、線量体積制約を満たす状況を表す acceptable の概念を新しく導入し、最適化の目的と結果の評価が異なる従来の問題を解消している。すなわち、最適化問題を非線形ハイブリッド力学系の初期値問題に帰着させ、acceptable な解への収束が理論的に保証された系を提案する。提案系は、線量体積制約の不等式に係る射影をベクトル場を含み、複雑な構造の力学系であるが、適切なリアプノフ関数を見出すことに成功した。すなわち、リアプノフ定理を適用して平衡点の大域的安定性を理論的に証明している。線量に関する Kullback-Leibler divergence は単調に減少し、さらに、放射線ビーム係数の制約としての解の正值性が保証される良い性質を持っている。臨床例に基づく数値実験を通し、acceptable かつ inconsistent な逆問題設定における IMRT 計画の性能を評価した。SFP と同じ収束性を持つ微分方程式系と比較した実験の結果、提案法のみ acceptable な平衡点に収束し、平衡点に対応する IMRT 計画は、臨床例として厳しい設定にも関わらず全ての線量体積制約を実現しており、提案法の有用性が例証された。提案法の実用化によって、試行錯誤の手続きを施すことなく線量体積制約に基づく高精度な IMRT 計画が得られ、本研究結果が医療分野に与える効果は大きい。</p>	