

Development of efficient Monte Carlo simulations and precise patient setup techniques in radiotherapy

(放射線治療における効率的モンテカルロシミュレーションと
正確な患者位置決め法の開発)

学位論文内容の要旨

The accurate targeting of tumor volumes in modern radiotherapy enables doctors to destroy cancerous cells while sparing healthy critical structures. Proton therapy, in particular, has attracted attention due to the ability to spare distal volumes. However, this high degree of precision necessitates a high level of accuracy in the planning and delivery systems. The aim of this research is to address two areas concerning precision radiotherapy: the computation speed of dose distribution simulations and patient setup accuracy.

Although the Monte Carlo method is considered the most accurate technique for simulating the passage of high energy particles through inhomogeneous matter, computation times are prohibitively long. Less accurate analytical techniques are therefore used in clinical practice. If the computation speed of Monte Carlo simulations could be improved, this more accurate technique might be better utilized. Parallel computer architectures offer an opportunity to reduce simulation times.

Another area of concern in high-precision radiotherapy is the patient position during delivery. If the patient is not positioned exactly as planned, the target volume may be missed, reducing the treatment benefit, while healthy tissue may be destroyed, increasing morbidity. Doctors have traditionally judged patient position by comparing a portal image, taken with the patient on the treatment couch, with a digitally reconstructed radiograph (DRR) constructed from patient CT data along the beam's eye view (BEV). The images are viewed side-by-side. But the process is subjective and error-prone. A software application could aid doctors to make better judgments of patient setup errors, insuring the accuracy of radiotherapy.

Chapter 1 provides an introduction and scientific background of the research.

In Chapter 2, a technique to improve the speed of Monte Carlo dose distribution calculations with Geant4 is discussed. A linear speed improvement on a cluster of 23 PCs was

achieved. Using a customized Geant4 simulation code navigation library running on a cluster with the parallelization method, a combined speed improvement factor of more than 3000 was achieved, reducing simulation times from several days to a few minutes. Although issues such as fault tolerance or load sharing were not considered, the approach is well suited for many kinds of Monte Carlo simulations on a homogenous cluster of local PCs.

In Chapter 3, the results of Monte Carlo calculated dose distributions of proton treatment of ocular melanoma are presented. The parallelization method described in the previous chapter was employed. An efficient spot scanning method utilizing active energy modulation, which minimizes the number of target spots, was also developed. It was found that a 2.5-mm-diameter proton beam with a 5% Gaussian energy spread was suitable for treatment of ocular melanoma while preserving vision for the typical case that was simulated. The energy spectra and the required proton current were also calculated and reported.

The evaluation of a custom patient couch position setup error software application is described in Chapter 4. The ability of humans to estimate offset values improved statistically using the software for the chest phantom that was tested. Setup error estimation was further improved using an automatic error estimation algorithm. Although estimations were not statistically different for the pelvis case, consistency improved by using the software for both the chest and pelvis phantoms. The algorithm performed well for clinical head and breast cases but performed poorly for pelvis cases, probably due to lack of contrast in the megavoltage portal image. The software incorporates an original algorithm to fuse portal and DRR image which is described in detail. The offset optimization algorithm used in the automatic mode of operation is also unique and may be useful if the contrast of the portal images can be improved.

Chapter 5 summarizes the concluding remarks for chapters 2-4 and the specific points found in the study.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 鬼 柳 善 明
副 査 教 授 古 坂 道 弘
副 査 教 授 住 吉 孝
副 査 教 授 伊 達 広 行 (保健科学研究院)

学 位 論 文 題 名

Development of efficient Monte Carlo simulations and precise patient setup techniques in radiotherapy

(放射線治療における効率的モンテカルロシミュレーションと
正確な患者位置決め法の開発)

現代の放射線治療における腫瘍体積の正確なターゲティングは、重要な健常臓器を温存しながらがん細胞を破壊することを可能にする。なかでも陽子線治療は、腫瘍よりも深い位置の組織を温存しうることから、注目を集めている。しかし、これらの方法の精度を向上させるには、治療計画とビーム供給システムにおける高いレベルの正確さを必要とする。本論文では、放射線治療の精度に関する2つの点、線量分布のシミュレーション解析の高速化と患者のセットアップ精度の向上を目的としている。

モンテカルロ法は、不均一物質内の高エネルギー粒子の通過をシミュレートする上で最も正確な手法と考えられているが、計算時間が非常に長い。したがって、あまり正確ではない線量解析技術が臨床では使用されている。モンテカルロシミュレーションの計算速度を向上させることができれば、より正確なこの手法が、有効に活用される可能性がある。並列コンピュータアーキテクチャは、シミュレーション時間を短縮する方法を提供している。

高精度放射線治療におけるもう1つの関心事は、放射線照射時の患者の位置決めである。患者が正確に計画通りの位置に固定されていない場合、標的体積を逃し治療上の利益を減じる他、健康な組織が破壊され致死率が高まる可能性がある。医師は、従来ビーム方向像に沿って、患者のCTデータから作成されたデジタル再構成X線写真(DRR)と治療台上の患者で撮影したポータルイメージを比較することによって、患者の位置を判断している。その際、画像は横に並べて表示されている。しかし、その比較過程では、主観的なエラーが発生しやすい。両者をうまく対応づけるソフトウェアアプリケーションは、患者のセットアップ誤差について、よりよい判断を下すよう医師を支援することができ、放射線治療の精度を保証する。

このような観点からシミュレーション速度の改善とセットアップ位置評価について研究

を行い、以下のような構成で論文をまとめている。

第1章では、研究の背景と目的について述べている。

第2章では、Geant4を用いたモンテカルロ線量分布計算の計算速度を向上させる手法について検討している。この手法では、23台のPCクラスタにより、計算速度の改善が達成された。並列化されたクラスタ上にてカスタマイズされたGeant4のナビゲーションライブラリを実行することにより、3000倍以上の総合的な速度改善率が達成され、数日から数分へシミュレーション時間が短縮された。耐障害性や負荷分散の設定などの問題は残っているものの、本アプローチはPCの均質分散クラスタにおける多様なモンテカルロシミュレーションに適している。

第3章では、眼の黒色腫を実際例として取り上げ、陽子線治療においてモンテカルロ法を適用して計算された線量分布の結果を示している。この計算では、前章での並列化方式が採用された。ターゲットスポット数を最小限に抑えるアクティブエネルギー変調を利用した、効率的なスポットスキニング法も開発された。シミュレーションにより、典型的な症例に対して、5パーセントのガウス分布エネルギー広がりを持つ2.5 mmの直径陽子ビームが、視力を維持しながらの眼黒色腫の治療に適していることが分かった。エネルギースペクトルと治療に必要なプロトンカレントも計算している。

第4章では、患者用のカスタムソファ位置のセットアップエラーに関するソフトウェアアプリケーションの評価について述べている。既存のソフトウェアに加え、自動エラー推定アルゴリズムを用いることによって、エラー推定の改善を図った。推定値は骨盤の症例に対し統計的に差がなかったものの、胸と骨盤のファントム両方のソフトウェアを使用して、一致度が改善した。使用したアルゴリズムは、頭部と胸の臨床例ではよい結果をもたらしたが、骨盤の症例に対してはうまく動作しなかった。これは、おそらくメガボルトポータル画像のコントラストが不足しているためと考えられる。新たなソフトウェアは、詳細に記載されているポータルとDRR画像を融合する独自のアルゴリズムを搭載している。自動モードで行うことができるオフセット最適化アルゴリズムは、固有のものであり、ポータル画像のコントラストが改善されれば、より多くの臨床症例にて役に立つものと考えられる。

以上のとおり、本論文は放射線治療のシミュレーション法とセットアップ位置評価について、その高度化を行ったものであり、医療工学の分野への貢献大である。よって著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。