

画像処理技術を用いた高精度放射線治療の実現に関する研究

臼井, 桂介 / USUI, Keisuke

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

133

(発行年 / Year)

2015-03-24

(学位授与番号 / Degree Number)

32675甲第354号

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2015-03-24

(学位名 / Degree Name)

博士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00010919>

博士学位論文
論文内容の要旨および審査結果の要旨

氏名	臼井 桂介
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	第 570 号
学位授与の日付	2015 年 3 月 24 日
学位授与の要件	本学学位規則第 5 条第 1 項(1)該当者(甲)
論文審査委員	主査 教授 尾川 浩一 副査 教授 八名 和夫 副査 教授 品川 満 副査 首都大学東京教授 齋藤 秀敏

画像処理技術を用いた高精度放射線治療の実現に関する研究

1. 論文内容の要旨

本国における日本人の死因は 1981 年から悪性新生物(がん)が第 1 位であり、がん治療を必要としている患者の数は増加の一途を辿っている。このがん治療では主に 3 つの治療法、すなわち手術療法、化学療法および放射線療法が確立されている。このうち、放射線療法は病巣のみに効果を与える局所療法であるため全身への負担が小さく、さらに組織の形態や機能の温存が可能となる治療法である。これらにより、早期の社会復帰が可能であり生活の質を高く保つことができることから、がん治療における放射線療法の役割は非常に大きい。近年では、放射線治療による副作用を低減させるために正常組織の線量を低下させ、がん細胞に対して高い線量を照射することができる、強度変調放射線治療や定位放射線治療が開発された。これらの治療は高精度放射線治療法と総称され、腫瘍領域に対して放射線を集中して照射し、正常組織への線量をできるだけ少なくすることが可能となることから、治療成績の向上と同時に副作用の低下が実現されつつある。

一方で、これらの高精度放射線治療法では、非常に急峻な線量勾配の治療計画が要求され、放射線の照射位置を計画した位置に正確に合わせる必要がある。もし治療時の照射位置が治療計画時のものと異なってしまった場合には、隣接する正常臓器に高線量が照射され副作用を増加させてしまう可能性がある。よって、高精度放射線治療法を正確に実施するためには、各臓器に投与される線量値が治療計画時と実際の治療時で一致していることが重要となる。

この高精度放射線治療法を正しく実現するには、達成すべき 4 つの課題が存在する。

第 1 は、放射線治療用コーンビーム computed tomography(CT)の投影データに混入する散乱光子が再構成画像の画質に与える影響を定量的に解析し、体内の線量計算に用いる際の問題点を解明することである。これまで、コーンビーム CT 画像は散乱線やモーションアーチファクトの影響を受けて画質が劣化するため、その利用は照射位置の補正や臓器の状態を確認するにとどまっていた。この装置の利用範囲を拡大し、線量計算に使用するためには、

コーンビーム CT 画像の画質劣化の大きな要因である散乱光子の影響を明らかにする必要がある。

第 2 は、治療時の体内の正確な線量分布を推定することである。一般に放射線治療の治療計画では治療を行う以前の日を取得されたマルチスライス CT 画像を用いて線量計算が行われるため、まさにその治療の最中および治療期間中に生じる臓器の移動や患者の体型の変化は、初期の治療計画には考慮されていない。このような様々な変化が患者に生じた場合、治療時と計画時では線量分布が異なるため、正常臓器に対して大線量が照射されることや腫瘍に対しての線量が低下することが生ずる。さらに、治療直前の体内の線量分布を正確に計算する方法は確立されておらず、それを実現するには多くの課題があり容易ではない。

第 3 は、放射線治療時の患者自身の動きに対して、照射位置の精度を高めるための対策が必要である。放射線照射中に患者自身が動いた場合、照射中心の位置が変化し、腫瘍への投与線量が著しく減少し、治療効果の低下が生じる。同時に周囲の正常組織へ大線量が照射されることになり正常組織の障害も招く。しかし、治療中の体動を監視するシステムは臨床現場に普及していないため、現在は患者の動きを抑え込む固定具を患者自身に装着し、体動を抑制する方法が提案されているが、この固定具の使用は患者への負担が増加することと、固定精度が不十分であることの問題が残されている。

第 4 は、放射線治療時の人体内の腫瘍の動きに対して、照射位置の精度を高めるための対策が必要である。動く腫瘍への放射線治療においては、計画時における腫瘍の動きが、治療時にも再現されていることが必須であり、照射前に腫瘍の動きを確認できない場合には照射中心の位置が腫瘍から外れることがあるため、重篤な障害を引き起こす可能性が高い。一方、動く腫瘍の移動位置を治療室内で正確に画像化することは困難であるため、これまでは、腫瘍の動きの範囲内に存在する正常組織にも高線量が照射され、周辺臓器の障害を避けることが困難であった。

本研究では、高精度放射線治療法の精度に関わるこれらの課題を網羅的に扱い、解決のための手法を提案する。本論文は、任意の断層面を画像化するトモグラフィ技術を用いた放射線治療用コーンビーム CT の画質解析、コーンビーム CT とマルチスライス CT を用いた治療計画法の開発、汎用型グラフィックス演算処理ユニットを用いた患者の動きを検出する手法の開発、およびコーンビーム CT を用いた動く標的部位の映像化、という4項目から構成される。

第 1 章では、本研究の概要として、近年の高精度放射線治療法の動向とその課題について述べ、前述の放射線治療における問題に対して画像工学の観点から考案した解決策の意義と本論文の構成について論じた。

第 2 章では、治療用コーンビーム CT の画質解析を行い、被検体から発生した散乱光子がコーンビーム CT の再構成画像におよぼす影響をマルチスライス CT 画像の画質と比較することで明らかにした。ここでは、まず現在の高精度放射線治療に利用されている、直線加速器に搭載されたコーンビーム CT の概要と原理について述べた。そして、モンテカルロシミュ

レーションとファントム実験により、プライマリ光子と散乱光子の投影データを別々に再構成した画像を比較することで散乱光子がコーンビームCTの画質に与える影響を明らかにした。また、マルチスライスCT画像を用いた線量計算の結果との比較を行うことで、コーンビームCT画像を用いた線量計算の精度を求めた。

第3章では、まず高精度放射線治療法の精度を高めるための課題について述べ、コーンビームCTを利用して正確な体内線量の計算が可能となる手法を提案した。ここでは、コーンビームCTの臓器形状の情報とマルチスライスCTのCT値の情報を組み合わせることで作成した合成画像による線量計算の手法について論じた。本研究では、ファントムと臨床の胸部画像を用いた実験により、提案手法が正確な体内線量を計算できることを示し、また先行研究で提案されている他手法と比較して有意に計算精度を向上できることを実証した。

第4章では、放射線治療において、照射中の患者自身の動きが治療効果におよぼす問題点を述べ、放射線治療中の体動に対して画像処理を用いた照射位置の精度を高めるための解決策を提案した。ここでは、USBカメラと汎用型グラフィックス演算処理用ユニット(GPGPU)を用いたリアルタイムで高精度な体動検出システムを構築した。本研究では、汎用型グラフィックス演算処理用ユニットによる位置検出システムの高速度の手法について論じ、頭部定位放射線治療を対象として、患者の体動を想定したファントム実験およびボランティア実験により、提案手法が治療時の体動を許容誤差(2.0mm)以内の精度でリアルタイムに検出できることを示した。

第5章では、放射線治療において、治療時の人体内の腫瘍の動きが治療効果におよぼす問題点を述べ、治療部位確認用のコーンビームCT画像に発生する動く腫瘍のモーションアーチファクトを低減させ、照射位置の精度を向上できる画像再構成法を提案した。ここでは、コーンビームCTの投影画像から標的が同じ位置に属する投影データを選択して再構成することで、標的の移動位置を映像化する手法を開発した。本研究では、シミュレーションと動態ファントム実験により、動く腫瘍の位置を明確にした画像が再構成できることを実証した。また、標的の運動やコーンビームCTのデータ収集条件が画質におよぼす影響をシミュレーションにより明らかにし、本提案手法の有効性を詳細に解明した。

第5章では、本論文により得られた研究結果を総括するとともに、本研究の成果の工学的ならびに臨床的な意義について述べた。

2. 審査結果の要旨

本学位請求論文は画像工学の概念を放射線治療に導入し、高精度放射線治療を実現するための画像工学的手法を開発し、その有効性をシミュレーション、基礎実験ならびに臨床データに対しても明らかにしたものである。審査の結果、以下の点において工学的新規性と有効性を確認した。

1. 治療用コーンビームCTの画質解析

放射線治療機に具備されている治療用コーンビームCT に関して被検体から発生した散乱光子がコーンビームCTの再構成画像におよぼす影響を、モンテカルロシミュレーションとファントム実験により定量的に明らかにした。また、治療計画において、コーンビーム CT 画像を用いる場合とマルチスライスCT 画像を用いる場合の線量計算精度の比較を行うことで、コーンビームCT 画像に混在する散乱線成分が治療計画に与える影響を定量的に明らかにした。

2. コーンビームCT およびマルチスライスCT 画像の合成画像による線量計算法の開発

コーンビーム CT から得られる臓器の形状情報とマルチスライス CT から得られる臓器の電子密度情報を組み合わせた合成画像による線量計算手法を開発し、実験結果から提案手法が正確な体内線量を計算できることを示した。また、これまでの手法との比較実験の結果から、提案手法が有意に計算精度を向上できることを実証した。提案手法は画像融合技術によって高精度放射線治療計画を可能とした点が工学的に高く評価できる。

3. 画像処理技術を用いた放射線治療時の体動の検出法の開発

頭部定位放射線治療を対象として、USB カメラと汎用型グラフィックス演算処理用ユニット (GPGPU) を用いたリアルタイムで高精度な体動検出システムを構築した。このシステムはファントム実験およびボランティア実験により、許容誤差 (2.0mm) 以内の精度でリアルタイムに患者の動きを検出できることを示した。

4. 画像処理技術を用いた放射線治療時の体内の腫瘍の位置検出法の開発

治療部位確認用のコーンビーム CT 画像に発生する動く腫瘍のモーションアーチファクトを低減させ、照射位置を特定できる画像再構成法を提案した。シミュレーションと動態ファントム実験により、動く腫瘍の位置を正確に表した画像が再構成できることを実証し、標的の運動速度や CT データ収集条件が画質におよぼす影響も明らかにした。

以上のように、本論文は画像工学的アプローチにより、高精度放射線治療を実現できる方法論を確立したものであり、画像工学に資するところが大きい。よって、本審査小委員会は全会一致をもって提出論文が博士 (工学) の学位に値するという結論に達した。