

動体追跡システムの物理特性および
マーカー付マウスピースを利用した頭頸部腫瘍への
臨床応用に関する研究

学位論文内容の要旨

【背景と目的】

動体追跡放射線治療 (RTRT) と強度変調放射線治療 (IMRT) の組み合わせによる放射線治療は、現在の放射線治療技術において呼吸や心拍動による生理学的運動により腫瘍の位置が常に変化し、かつ腫瘍に隣接する危険臓器に対する放射線量を可能な限り低減させることが期待される治療法である。本研究では、動体追跡放射線治療 (RTRT) と強度変調放射線治療 (IMRT) の組み合わせによる放射線治療を行う際に、どのような物理的諸問題が生じるのか、また動体追跡システムが有する性能を最大限に生かした放射線治療を臨床において実践する上でどのような工夫が必要であるかを検討し、臨床にフィードバックさせることを目的とする。

【対象と方法】

本研究では、まず、動体追跡装置の X 線透視装置に関する物理特性について評価を行った。固体ファントムと指頭型電離箱を使用し、公称 X 線エネルギーが 50 ~ 120 kVp、公称パルス幅が 1.0 ~ 4.0 ms において発生する空気カーマ率ならびに深部線量を求めた。

次に、3次元原体セットアップ (3D-CSU) および平行移動による3次元セットアップ (3D-TSU) の精度について立体ファントムとフィルムを用いて測定を行った。ファントムは、分度器を用いて±0.5度以内の精度で回転できる専用の台座を利用して決められた角度に固定し、x, y, z方向についてそれぞれ5度ずつ回転させた。まず、0度から30度の範囲で3D-TSUによる位置補正を行い、ファントムの重心に対する実際の座標と予想される座標の違いを測定した。続いて、ファントムの上面にフィルムを貼り付け、3D-CSUと3D-TSUのそれぞれのセットアップ方法で治療ビームの照射野の違いを測定した。

最後に臨床応用として8名の患者に対して金マーカー付マウスピースを利用した頭頸部腫瘍に対するIMRTの患者セットアップの精度について、3D-CSUの機能を利用した位置エラー、回転エラーの検出を行い、偶然誤差 (random セットアップエラー)、系統誤差 (systematic セットアップエラー) に関する解析を行った。

【結果】

RTRTにおけるX線透視装置から発生するファントム表面の空気カーマ率は、公称X線エネルギーが50~120kVp、公称パルス幅が1.0~4.0msにおいて28~980mGy/hであり、X線透視線量は公称パルス幅に依存して直線的に比例増加し、また公称X線エネルギーに依存して指数関数的に比例増加した。5.0cm深における吸収線量は公称X線エネルギーに依存し、最大線量の37~58%であった。1台のX線透視装置から受けると予測される皮膚線量は28~1163mGy/hの範囲となり、これは公称管電圧とパルス幅に強く

依存し、皮膚表面とアイソセンタの距離にやや依存する結果となった。

立体ファントムを用いて 3 つのマーカーの重心座標に関して治療計画時の位置と実際の位置を比較し、3D-CSU により回転エラーを算出する計算精度について評価した結果、回転範囲が 0 ~ 90° において、RL 軸、CC 軸、AP 軸周りに対する平均値と 1 標準偏差は、それぞれ $0.4 \pm 0.4^\circ$ 、 $0.2 \pm 0.4^\circ$ 、 $0.0 \pm 0.5^\circ$ であった。

最後に臨床応用として、8 名の患者に対して金マーカー付マウスピースを利用した頭頸部腫瘍に対する IMRT を行った患者の位置精度を評価した結果、RTRT における治療期間中の random エラーは、RL 方向、CC 方向、AP 方向についてそれぞれ 0.5、0.6、0.4 mm であり、systematic エラーは 0.2、0.3、0.3 mm であった。照射中のセットアップエラーについて、random エラーは、RL 方向、CC 方向、AP 方向についてそれぞれ 1.0 ~ 2.0 mm の範囲で、systematic エラーは 0.2 ~ 0.6 mm の範囲で維持された。また、照射中の回転エラーについて、random エラーは RL 軸、CC 軸、AP 軸周りに対してそれぞれ、 $2.2 \sim 3.2^\circ$ 、systematic エラーは $1.5 \sim 1.6^\circ$ であった。

【考察】

IMRT と RTRT を組み合わせた照射では、X 線透視装置から発生する放射線量および患者の被曝線量を低減するためには、幾つかのアプローチがあると考えられる。1) 体内金属マーカーの 3 次元座標を計算させた後に、1 台の X 線透視装置だけを利用する方法、2) 予測モデルを取り入れながら、X 線透視装置パルス数を 30 Hz から 15、10、5、2 Hz へ落として同期照射を行うこと、3) 実際の治療を行う前に腫瘍の動きに関して 4 次元的位置座標データを取得し、それぞれの照射する日に合わせて一番良いセットアップの位置を選択することなどにより、皮膚線量の低減を図ることを可能とした。

3D-CSU の精度は臨床応用においては固形腫瘍かつ挿入されたマーカーの移動がなければ十分に正確であることを示した。しかし、1) 腫瘍が軟部組織で形状が変化しやすい場合、形状変化の影響として腫瘍が回転するかもしれないこと、2) 挿入したマーカーが治療期間内に移動する場合、回転角の計算結果に影響する恐れがあること、3) 体内臓器の動きが大きい場合、体輪郭である皮膚表面から腫瘍の重心位置までの距離と照射ビームの位置関係が治療計画と異なることなどが誤差の可能性として考えられた。

金マーカーをマウスピースに埋め込み、それを応用して RTRT セットアップを行う方法では従来のマニュアルセットアップに比べて、明らかに random エラーと systematic エラーを減少させ、また固定の影響による不快感も生じないことが確認された。しかし、マウスピースの装着不備、頭頸部の動きによる計算エラー、治療計画 CT を撮影する際に起こる歯もしくは金マーカーによるアーチファクト、そして実際に患者に放射線治療をするときに金マーカーから発生する散乱線による口腔粘膜への影響には十分に留意する必要がある。

【結語】

本研究では、提案手法に基づいて RTRT と IMRT の組み合わせによる放射線治療において動体追跡システムの X 線透視装置から発生する放射線量について測定を行い、RTRT と IMRT を組み合わせた場合に皮膚表面あるいは深部への吸収線量を予測し、また RTRT による X 線透視の長時間使用による被曝量低減を行う手法について提案した。加えて、3D-CSU では患者の体位を変更することなく標的体積の回転エラーを補正することが可能であり十分な精度を有することが確認された。最終的に、3 つのマーカーを埋設したマウスピースを利用したときの動体追跡システムによる患者セットアップ精度の評価として頭頸部腫瘍への IMRT において臨床応用を行うことによって、計画標的体積 (PTV) のマージン量を従来手法に比べて半分まで低減させることができた。本研究では、RTRT と IMRT を組み合わせた融合された放射線治療システムとして、頭頸部腫瘍における放射線治療患者への臨床応用を行い、局所制御率向上や Quality Of Life (QOL) の向上について有効性を示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 玉 木 長 良
副 査 教 授 白 土 博 樹
副 査 教 授 福 田 論

学位論文題名

動体追跡システムの物理特性および

マーカー付マウスピースを利用した頭頸部腫瘍への 臨床応用に関する研究

動体追跡放射線治療 (RTRT) と強度変調放射線治療 (IMRT) の組み合わせによる放射線治療は、呼吸や心拍動による生理学的運動により腫瘍の位置が常に変化する状況においても、腫瘍への線量集中と危険臓器への線量低減の達成が期待される治療法である。本研究では、RTRT と IMRT の組み合わせによる放射線治療を行う際に、どのような問題が生じるのか、また動体追跡システムが有する性能を最大限に生かした放射線治療を実践する上でどのような工夫が必要であるか検討し、臨床にフィードバックさせることを目標とする。

まず動体追跡装置の物理特性に関する評価を行い、次に臨床応用として 8 名の患者に対してマーカー付マウスピースを利用した頭頸部腫瘍に対する IMRT の患者セットアップの精度について、3次元原体セットアップ (3D-CSU) の機能を利用した位置エラー、回転エラーの検出を行い、偶然誤差 (random セットアップエラー)、系統誤差 (systematic セットアップエラー) に関する解析を行った。

固体ファントムと指頭型電離箱を使用して測定された RTRT における X 線透視装置から発生するファントム表面の空気カーマ率は、公称管電圧が 50 ~ 120 kVp、公称パルス幅が 1.0 ~ 4.0 ms において 28 ~ 980 mGy/h であり、線量は公称パルス幅に対して直線的に比例し、また公称管電圧に対して指数関数的に比例した。5.0 cm 深における吸収線量は公称管電圧に依存し、最大線量の 37 ~ 58%であった。

立体ファントムを用いて 3 つのマーカーの重心座標に関して治療計画時の位置と実際の位置を比較し、3D-CSU により回転エラーを算出する計算精度について評価した結果、回転範囲が 0 ~ 90° において、RL 軸、CC 軸、AP 軸周りに対する平均値と 1 標準偏差は、それぞれ $0.4 \pm 0.4^\circ$ 、 $0.2 \pm 0.4^\circ$ 、 $0.0 \pm 0.5^\circ$ であった。

8 名の患者に対して金マーカー付マウスピースを利用した頭頸部腫瘍に対する IMRT を行った患者の位置精度を評価した結果、RTRT における治療期間中の偶然誤差は、RL 方向、CC 方向、AP 方向についてそれぞれ 0.5、0.6、0.4 mm であり、系統誤差は 0.2、0.3、0.3 mm であった。照射中のセットアップエラーについて、偶然誤差は、RL 方向、CC 方向、AP 方向についてそれぞれ 1.0 ~ 2.0 mm の範囲で、系統誤差は 0.2 ~ 0.6 mm の範囲で維持された。また、照射中の回転エラーについて、偶然誤差は RL 軸、CC 軸、AP 軸周りについてそれぞれ、 $2.2 \sim 3.2^\circ$ 、系統誤差は $1.5 \sim 1.6^\circ$ であった。

本研究では、提案手法に基づいて RTRT と IMRT の組み合わせによる放射線治療において X 線透視装置から発生する放射線量を測定し、RTRT と IMRT を組み合わせた場合に皮

膚表面あるいは深部線量を予測し、また X 線透視装置の利用における線量低減手法について提案した。加えて、3D-CSU では患者体位を変更することなく標的体積の回転エラーを補正することが可能であり十分な精度を有することが確認された。最終的に、マーカー付マウスピースを利用した頭頸部 IMRT において臨床応用を行うことによって、計画標的体積 (PTV) のマージン量を従来手法に比べて半分まで軽減させることができることを証明し、頭頸部領域の放射線治療では RTRT と IMRT を組み合わせた融合された放射線治療システムにより、局所制御率向上や Quality Of Life (QOL) の向上について高い有効性を示した。

口頭発表に際し、副査の福田教授から 3 個の金マーカーが腫瘍に対して片側に偏って設置した時の位置精度、患者セットアップ・補正に要する時間、長期フォロー患者の唾液腺機能の評価、金マーカーからの散乱線の影響に関して質問がなされた。次いで主査の玉木教授からセットアップ誤差の方向依存性、腫瘍サイズの変化とマーカー位置の変化の対策、頭頸部領域への画像誘導放射線治療の可能性に関して質問がなされた。最後に副査の白土教授からコンピュータの発展に伴う良い点と悪い点に関して質問がなされた。いずれの質問に対しても、申請者は研究結果や文献的知識により、概ね適切な回答を行った。

この論文はマーカー付マウスピースを開発し頭頸部 IMRT への応用を行った初めての報告であり臨床における有用性を証明した。また、RTRT を利用した体幹部定位照射や IMRT における X 線透視線量の軽減と適応範囲の拡大を図る上で重要な基礎データとなることが期待される。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ申請者が博士 (医学) の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。