

学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（医学） 氏名 木村 傑

学位論文題名

画像機器の観点からの動体追跡装置の品質管理法の提案

(A proposal of quality assurance procedures for a real-time tumor tracking radiotherapy system from the view point of imaging devices)

【背景と目的】

動体追跡放射線治療は、2対の透視X線装置で構成される動体追跡装置で体内の腫瘍もしくはその近傍に留置された金マーカの動きを毎秒30フレームで持続的に追跡し、予め定めた範囲に金マーカが存在する時のみ、直線加速器が治療ビームを照射する方法である。主に、呼吸性移動を伴う臓器に対して同期照射を行うための治療法であるが、放射線治療機器としてその精度を担保するためには、動体追跡装置の定期的な品質保証と品質管理が必須である。動体追跡装置は、診断用放射線機器としての側面を持つが、その標準的な評価方法には2003年のIEC 62220-1標準がある。一方、放射線治療において品質保証と品質管理で推奨される方法には2009年のAAPM TG-142レポートがあり、動体追跡装置は治療装置の付属品の項目Planner kV imagingの一つに該当する。そこでは、画質に関する品質管理項目も明記されているが、動体追跡装置についてはこれまで金マーカの3次元追跡精度と画質の関連性は検討されていなかった。本研究では、動体追跡装置における追跡精度と画質の関連性を検討し、画像機器の観点から動体追跡装置の実際的な品質管理法を提案する。

【方法と結果】

本研究では、北海道大学病院で現在稼働しているSyncTraXのプロトタイプ装置を使用した。幾何学的体系は、X線管焦点からアイソセンターの距離が229 cm、X線管焦点からカラーイメージインテンシファイア (I. I.) の距離が425 cm、X線管の仰角が 38.3° である。X線管は管電圧を40-110kV、管電流を10-200 mA、パルス幅を1-4 msecの透視条件を、被写体厚に応じて任意に設定できる。Red、Green、Blue (以下RGB) の画像を同時に出力する2対のカラーI. I.を備えた透視装置 (以下、装置A, B)により体内にある直径2.0 mmの金マーカの3次元座標をリアルタイムに計算する動体追跡装置において、その3次元追跡精度は重要である。

まず、直線加速器の照射安全性を保つための指標としてインターロック (照射を停止する) に用いられる、透視画像上の金マーカの2次元座標を決定するためのパターン認識の一致度であるPattern Recognition Score (以下PRS: 0-100の値) およびそこで決められた2次元座標より得られる2つの空間ベクトルの共通垂線間の距離であるDistance Between Ray (以下DBR [mm])

と、その共通垂線の中点として得られる3次元座標計算精度(3次元座標の標準偏差 σ_{3D})の関係を調べた。0-60 mm/secの速度で回転運動できる、PMMA厚さ10 cmの回転動体ファントムに装着された静止状態の金マーカーを、透視条件を変化して追跡し、その10秒間(300フレーム)の追跡ログで得られた金マーカーの3次元座標の変動 σ_{3D} [mm]と、平均PRS、DBRの標準偏差 σ_{DBR} [mm]の関係を調べた。 σ_{3D} と平均PRSは負の相関、 σ_{DBR} は正の相関をそれぞれ示し、99%信頼区間である $3\sigma_{3D}$ を <0.5 mm (2.0 mmの金マーカーにおいて半分の1.0 mmのズレに相当する、片側あたり0.5 mm以内の誤差を99%の確率で達成する)とするために必要な平均PRSは装置A、Bでそれぞれ >54.34 、 >57.29 、その半分の <0.25 mmとするためにはそれぞれ >80.31 、 >82.27 となった。同じく、 $3\sigma_{3D}$ を <0.5 mmとするために必要な σ_{DBR} は、装置A、Bでそれぞれ <0.45 、 <0.39 [mm]、その半分の <0.25 mmとするためにはそれぞれ <0.15 、 <0.24 [mm]となった。ここで、金マーカーを速度10-60 mm/sec (10 mm/sec 間隔)で回転した時、平均PRSに有意な変化が認められなかったが($p>0.05$)、 σ_{DBR} は速度に応じて増加した。

次に、静止した金マーカーの2次元透視画像の画質と平均PRSの関係を評価した。患者体厚を模擬してアイソセンターに設置したPMMA厚さを10, 20, 30 cmとし、管電圧を80 kV、110 kV、管電流を10 - 200 mA、パルス幅を1, 2, 3, 4 msecとして画質条件を設定した。そのカラーI. I.の透視画像(RGB)の空間周波数0.5-1.25 [lp/mm]の範囲の解像度特性MTFと雑音特性NPSから画質指標 \int NEQを評価した。続けて、同条件で金マーカーの追跡を行い、その時の平均PRS(100フレーム)と画質指標 \int NEQの関係を調べた。 \int NEQが高いほど平均PRSも上昇する相関を示したが、平均PRSが90を超えたあたりで上昇はゆるやかに飽和した。ここで、平均PRSと \int NEQの関係の近似式より、 $3\sigma_{3D}<0.5$ mmを達成するのに必要な \int NEQは、装置AのRGBでそれぞれ >136.25 、 >337.56 、 >116.60 、装置BのRGBでそれぞれ >52.48 、 >232.83 、 >128.97 となった。同様に $3\sigma_{3D}<0.25$ mmでは、装置AのRGBでそれぞれ >223.21 、 >585.50 、 >429.57 、装置BのRGBでそれぞれ >162.39 、 >491.51 、 >337.55 となった。

【考察】

追跡精度としての σ_{3D} は、平均PRSと負の相関、 σ_{DBR} と正の相関を示した。動きの速さによっても σ_{DBR} は上昇して追跡精度は低下するが、平均PRSは必要条件である静的な(静止した金マーカーでの)3次元追跡精度を保証した。その平均PRSと画質指標 \int NEQにも相関が有ることから、動体追跡装置の3次元追跡精度が画質に依存することが確認され、画質指標 \int NEQは動体追跡装置の静的な品質管理の指標に適していることがわかった。本研究では、診断用放射線機器としての側面も持つ動体追跡装置の透視画像を、IEC 62220-1 標準を踏襲しつつ品質管理に必要な簡便性・迅速性を確保するために工夫した方法で評価した。放射線治療機器の品質管理の標準であるAAPM TG-142 レポートの画質評価の項目では、コントラスト、解像度、ノイズと一様性について明記されているが、 \int NEQを評価する過程で得られた画質指標である入出力特性(線量率に対して得られる透視画像のピクセル値)、MTF、NPSをそれらに当てはめ、動体追跡装置のアクセプタンスおよびコミッション時に評価した値を基準値として、その変動を確認して動体追跡装置の追跡性能の品質管理を行うことを提案したい。

【結論】

画質指標 \int NEQは平均PRSと相関があり、動体追跡装置による金マーカーの3次元追跡精度は画質に依存することがわかった。動体追跡装置の品質管理を、画質指標 \int NEQはもとより、その評価の過程で得られる入出力特性、MTF、NPSも評価項目に加えて行うことを提案した。