

氏名（本籍）	谷口拓矢	（岐阜県）
学位の種類	博士	（医学）
学位授与番号	甲第1190号	
学位授与日付	令和4年3月25日	
学位授与要件	学位規則第4条第1項該当	
学位論文題目	Effect of computed tomography value error on dose calculation in adaptive radiotherapy with Elekta X-ray volume imaging cone beam computed tomography	
審査委員	（主査）教授 岩田 尚	
	（副査）教授 岩間 亨	教授 大沢 匡毅

論文内容の要旨

【背景と目的】

画像誘導放射線治療（image guided radiotherapy: IGRT）は、診断用イメージング技術を用いることで治療部位を正確に捉え、精度の高い放射線照射を可能にしてきた。特に、幅広い X 線ビームとフラットパネル検出器を装備した 1 回転で広範囲を撮像できる kilovoltage cone-beam computed tomography（CBCT）は、三次元画像を取得することで高い照合精度で IGRT を行うことを可能にしている。さらに、CBCT は治療期間中における腫瘍や臓器の形状だけでなく、その位置関係の変化を経時的に観察することができることから、治療時の状態に合わせた最適な計画に修正する適応放射線治療に利用することができる。しかし、CBCT は診断用 CT に比べ散乱線やヒール効果の影響が大きく、得られた画像の空間的 X 線吸収値（CT 値）を正確に得ることが難しく、撮像条件によっても異なることが問題となる。この問題点は、体内の CT 値を相対電子密度（relative electron density : RED）に変換して X 線の減弱を計算する治療計画にとって、CT 値誤差は線量誤差に直結するため、その臨床使用を難しくする要因となっている。本研究の目的は、CBCT における三次元的な CT 値分布を明らかにし、CT 値誤差が線量計算に及ぼす影響を及ぼすかを検討した。

【対象と方法】

Elekta Synergy に搭載された CBCT における 3 次的な CT 値分布を評価するために組織等価物質が封入されたプラグが同心円状に外側と内側に配置された幅 330 mm、高さ 270 mm、奥行き 250 mm の円柱状ファントムを撮像した。組織等価物質は RED の高い順に、緻密骨、骨梁骨、肝、筋肉、乳房、脂肪、呼吸肺、そして吸気肺の 8 種類あり、それら CT 値の違いを計測するために頭頸部用（S-scan）、胸部用（M-scan）、そして骨盤用（L-scan）に変化させた 3 種類の条件で撮像した。S-scan は、200°回転で画像を収集し、270 mm の画像有効視野を確保し、ビームハードニング効果にともなうカップリングアーチファクトを低減するための bowtie filter を使用せず撮像した。M-scan と L-scan はフラットパネル検出器をオフセット配置することによりそれぞれ 410 mm と 500 mm の画像有効視野を確保し、360°回転で画像を収集し、bowtie filter を使用して撮像した。

診断用 CT の CT 値をコントロールとして、CBCT における各組織等価物質の CT 値を計測した。また、診断用 CT と CBCT の CT 値誤差を算出するために、両者の画像を減算処理した減算画像を作成し、画像中心における水平ラインと垂直ラインの CT 値誤差プロファイルおよび体軸方向の CT 値誤差プロファイルを測定した。体軸方向のプロファイルは、吸気肺、乳房、そして緻密骨の 3 種類について測定した。

CT 値誤差が線量計算精度に及ぼす影響を評価するために、診断用 CT と CBCT それぞれの画像を用いて、両者同じパラメータにて線量計算を行った。診断用 CT と CBCT、それぞれ算出した線量分布は減算処理を行い、減算画像の各組織等価物質における線量誤差を計測した。評価に使用した治療計画は、1 門照射、対向 2 門照射、4 門照射、そして 360° 回転照射の 4 種類とした。

【結果】

CT 値誤差が最も大きくなった条件は L-scan で、画像中心において診断用 CT と比較して、813.7 Hounsfield units (HU) 高い結果であった。加えて、全ての scan 方法において、緻密骨の CT 値誤差は、画像中心部に比べて画像辺縁部の方が高い傾向を示した。特に S-scan において画像中心に対して画像辺縁で 156.4 HU と最も高い結果であり、その他の scan は画像辺縁で約 100 HU 高い CT 値として認められた。また、線量計算誤差は、治療計画方法に限らず CT 値誤差が±100 HU 程度の S-scan と M-scan では、線量誤差が±2%以内であった。診断用 CT に比し最大 CT 値誤差が 813.7 HU であった L-scan は、4 門照射にて線量誤差が 7.6%と最大となり、ほかのどの照射方法においても約 6%程度の線量誤差が発生した。また、線量誤差が生じる部位は治療計画方法によって異なっていた。1 門照射、対向 2 門照射では、最大 CT 値誤差となる画像中心を通過した X 線ビームの経路上においてのみ線量誤差が発生し、4 門照射や 360° 回転照射においては、最大 CT 値誤差となる画像中心に一致した最大線量誤差が発生した。

【考察】

L-scan は画像中心部において最も高い CT 値誤差を示した原因として、L-scan の構成に対して固有の bowtie filter 持たないため、画像中心部に不均一なアーチファクトが発生したと考えられた。加えて、CT 値誤差が増大した要因として、X 線管の陽極と陰極方向に X 線強度が変化するヒール効果の影響も付加したと考えられた。ヒール効果の影響を受けにくい体軸方向は比較的 CT 値の均一性が保たれていたことからヒール効果の影響が主要因と考えられた。一方、緻密骨についてのみビームハードニング効果の影響が大きくなるため体軸方向の均一性が悪化し、bowtie filter を使用しない S-scan では体軸方向 CT 値が大きく変化したと考えられた。

【結論】

本研究は、CBCT における三次元的な CT 値分布による CT 値誤差は、放射線治療計画の線量計算誤差を生じることが示された。固有の bowtie filter を持たない L-scan と S-scan において CT 値が不均一となることが示唆された。その結果、CT 値誤差の発生場所を通過する治療ビームにおいて計算精度を悪化させ、CT 値誤差が±100 HU の場合、線量誤差は±2%以内、CT 誤差が約 800 HU では、線量誤差は最大で約 6%となることを明らかにした。

論文審査の結果の要旨

申請者 谷口 拓矢は、放射線治療計画において、CT 値誤差が線量計算の誤差に及ぼす影響を及ぼすのかを、種々の組織等価物質を用いて検証し解明した。本研究の成果は、放射線医学、特に放射線治療学の発展に少なからず寄与するものと認める。

[主論文公表誌]

Takuya Taniguchi, Takanori Hara, Tomohiro Shimozato, Fuminori Hyodo, Kose Ono, Shuto Nakaya, Yoshifumi Noda, Hiroki Kato, Osamu Tanaka, Masayuki Matsuo:

Effect of computed tomography value error on dose calculation in adaptive radiotherapy with Elekta X-ray volume imaging cone beam computed tomography.

J Appl Clin Med Phys. 2021 Sep;22(9):271-279. doi.org/10.1002/acm2.13384