

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 17 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K09995

研究課題名(和文)4次元高精度放射線治療の線量検証システム構築

研究課題名(英文)Development of dosimetric verification system for four-dimensional radiotherapy

研究代表者

隅田 伊織 (SUMIDA, IORI)

大阪大学・医学系研究科・助教

研究者番号：10425431

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：プラスチックシンチレーターおよび光ファイバーを組み合わせた定点絶対線量計測の測定系を確立した。4次元動体ファントムの開発にあたり、駆動させる対象としてサーボモーターのトルクに依存することが分かった。4次元動体ファントムを用いて、人の規則的な呼吸パターンにおけるサイバーナイフの追尾精度を検証した。

4次元動体ファントムと微小空間の線量計測が可能なプラスチックシンチレータを用いた線量検証システムを組み合わせ、動体追尾中の線量検証を行った。アイソセントリック照射およびコンフォーマル照射のいずれにおいても、計算線量と実測線量間の誤差は3%未満であり、物理的な線量精度が担保されることを確認した。

研究成果の概要(英文)：We developed the dose verification system using plastic scintillator and optical fiber, that can measure the point absolute dose in Gy without perturbation of the detector in the measurement condition. Second, the motion phantom utilizing four motion axes, which are able to be controlled by four servo motors, was developed. After the tracking accuracy of the CyberKnife machine was evaluated and then the dosimetric accuracy of the CyberKnife during motion tracking was evaluated using the developed system. It was found that the overall accuracy in dose between calculated and measured was less than 3%.

研究分野：医学物理

キーワード：動体ファントム 線量検証 シンチレーター

1. 研究開始当初の背景

肺や肝腫瘍のように体内で呼吸性移動を伴う腫瘍に対する放射線治療は 2 つの照射アプローチがある。1 つは待ち伏せ照射、もう 1 つは動体追尾照射である。前者は動く腫瘍が予め設定した場所に位置した時にビームが照射され、後者は腫瘍の動きに追従してビームが照射し続ける。両アプローチとも正常組織へ照射される線量を軽減することが可能であるが、前者ではビーム照射時間が間欠的であるため、照射時間が延びる。その結果、照射中の患者の動く確率が増加する。後者は腫瘍に対して常にビームが照射されるため、正確に腫瘍の動きを捉えている必要がある。現在、ビーム照射効率ならびに腫瘍の動きをリアルタイムに捉え照射が可能な放射線治療装置としてサイバーナイフがあり、本学でも 1998 年より頭部腫瘍に対して臨床使用を開始した (Yamada et al. Radiat Med. 22:98-105;2004.)。現在は機器の更新中であり 2014 年 1 月から頭部腫瘍に加えて、体幹部腫瘍への適応拡大を予定しており、上述の動体追尾照射が可能となる。本装置はビーム径が最小値 5 mm ~ 最大値 60 mm までの円形照射野を設定可能である。近年は汎用型直線加速器 (リニアック) を用いた、前立腺癌や頭頸部癌に代表される、腫瘍と正常組織の位置が近接し正常組織の周囲に腫瘍が取り囲んだ部位へ積極的に強度変調放射線治療 (IMRT) が施行されている (Takahashi et al. J Radiat Res. 51:543-552;2010.)。サイバーナイフにおいても腫瘍サイズより小さなビームを多数使用し積算照射することによって、腫瘍内の線量均一性を保持し凹型の線量分布を作成可能となった。患者に対して正確な線量が照射できることを確認するため治療前の患者ごとの線量検証が重要である。上述の肺や肝に代表される動く腫瘍を対象とし、照射法ではサイバーナイフを含め照射面積の小さいビームを積算して照射する IMRT を対象とした場合、線量検証に必要なものとして正確に患者体内の腫瘍の動きを再現できる動体ファントムの開発、照射面積の小さいビーム出力を正確に計測可能な超小型線量計の開発である。市販の動体ファントムでは腫瘍の軌跡が直線式であり、動きも周期が一定のサインカーブ様がほとんどである。小照射野計測用の市販の小型線量計であっても直径が 7 mm であり、サイバーナイフを含む IMRT 可能機器で使用するビーム幅あるいは径が 5 mm といった細かいビームを正確に計測することができない。

2. 研究の目的

高精度放射線治療を安全に施行するには、綿密な治療計画の立案、計画通りに照射可能であることを確認する目的で精度検証を行う。しかし現状の精度検証システムでは、腫瘍の動きに対応した 4 次元精度検証システムはなく、規則性のある動き (サインカーブ等)

にのみ対応したシステムに留まり、患者の治療計画と検証結果との間で整合性が取れない。本研究では、呼吸に伴い動く腫瘍 (肺・肝臓) に対する正確な照射が可能であるかを検証するため時間軸を加えた 4 次元動体ファントムを開発する。時間軸に対する線量計測を実現するため、発光量から放射線量を算出可能で、時間分解能の高いシンチレータを利用し、新たな線量検出器を開発する。

3. 研究の方法

サーボモータコントロールを可能なソフトウェアを開発し、4 次元動体ファントムを開発する。動体ファントムの駆動軸に対する移動距離精度および繰り返し停止位置精度検証を行う。ファントム上に水等価固体ファントムを配置し、プラスチックシンチレーションファイバーが挿入可能とする。水等価固体ファントムの重量を 1 kg とし、重量負荷条件下でサーボモータの駆動精度およびトルクの妥当性を検証する。吸収線量の算出には、プラスチックシンチレーションファイバーが発するシンチレーション光をカラー CCD カメラで光量を取得し行う。既知のビーム出力と吸収線量の関係から、光量と吸収線量の対応付けを行う。患者の呼吸を模擬した腫瘍の動きをファントムで再現し、サイバーナイフにて動体追尾照射を実施する。照射中の吸収線量をプラスチックシンチレーションファイバーで計測し、計画計算線量と比較する。

(1) 4 次元動体ファントム開発

サーボモータコントロール基盤と 4 つのサーボモータを用いてモータ制御可能なソフトウェアを開発する。研究代表者はシリアル制御のプログラム開発経験を有しており、本ソフトウェアの開発は可能である。腫瘍の移動を再現するために駆動系としてサーボモータを用いる。サーボモータは入力パルス信号に対するモータ振角で制御されるため、モータの回転角度を並進移動距離へ変換する必要がある。サーボモータに回転ギヤおよびテコを取り付け、回転角度と距離の校正を行う。患者の左右方向および頭尾方向については本手法を取る。腹背方向に関しては、テコの原理を用いて上下駆動を制御する。入力パルスと移動距離の校正後、各軸に対する移動量の精度検証を行う。移動距離を 0 ~ 30 mm まで 1 mm 単位で変化させ、移動距離を定規で計測する。繰り返し再現性に関する精度検証を行う。前述の設定距離で動体ファントムを往復運動させ、移動距離を定規で計測する。サーボモータトルクの検証を行う。動体ファントム上にフィルムあるいは電離箱線量計やプラスチックシンチレーションファイバーを挿入可能な水等価固体ファントム (サイズ: 10 cm x 10 cm x 10 cm、重量: 1 kg) を載せ、サーボモータへ重量負荷をかけた場合の繰り返し位置再現性を検

証する。

(2) プラスティックシンチレーションファイバーを用いた超小型線量計の開発
プラスチックシンチレーションファイバーを用いて放射線計測する際、発光をデジタル信号で捉えるため CCD カメラを用いる。図 2 のように、プラスチックシンチレーションファイバーに光ファイバーを接続し、全体を黒色の遮光チューブで覆う。汎用プラスチックシンチレータは放射線照射時に青く光る。光を 24 bits カラー CCD カメラで録画し、RGB それぞれ 8 bits に色分解後、青色成分のピクセル輝度値を採用する。

光量再現性に関する精度検証を行う。汎用型リニアックを用いシンチレータに対して 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 モニタユニット(MU)でビームを 10 回ずつ繰り返し照射し光量を計測する。対照実験のため、同計測を電離箱線量計で行う。シンチレータの電離箱線量計に対する比較を、再現性の変動係数を用いて評価する。許容値は米国医学物理学会の勧告(タスクグループレポート 142, Med Phys. 2009; 36: 4197-4212.)を参考にし、5 MU 以上で 2%以下、5 MU 未満で 5%以下とする。

ビームの光量と吸収線量の関連付けを行う。上述のモニタユニット設定で得た吸収線量値と積算光量に対応付ける。

(3) 4 次元動体ファントムと超小型線量計を用いた複合試験

患者の呼吸を模擬した動く腫瘍(左右および腹背方向は Sin カーブ、頭尾方向は Sin カーブの 4 乗)を作成し、4 次元動体ファントムで駆動する。サイバーナイフを用いて腫瘍へ照射する治療計画を立案し、計算線量を算出する。プラスチックシンチレーションファイバーを用いてリアルタイム線量計測を行い、計算線量と比較する。

4. 研究成果

プラスチックシンチレーターおよび光ファイバーを組み合わせた定点絶対線量計測の測定系を確立した。計測箇所に対する検出器そのものの擾乱の影響がないことを確認できた。一方で、微小空間における定点測定に焦点を当てたため、シンチレーション光と検出感度のバランス(微小空間を測定する場合は、検出器サイズが小さいことが望ましい。しかしながら、検出器サイズが小さいと、検出器の発するシンチレーション光の光量が減少する)が重要であり、その両方を満足する検出器サイズとして 1 辺 0.5 mm の立方体が妥当であると判断した。4 次元動体ファントムの開発にあたり、駆動させる対象としてサーボモーターのトルクに依存することが分かった。最大で 1 辺 10 cm の立方体が上限であることを確認した。4 次元動体ファントムを用いて、人の規則的な呼吸パターンにお

けるサイバーナイフの追尾精度を検証した。また、追尾精度を Web camera と画像処理を組み合わせ解析可能なソフトウェアの開発を行った。呼吸パターンに基づく腫瘍の動きを調べた。動きの速度変化が激しい箇所では追尾精度が瞬間的に悪化する傾向を得た。4 次元動体ファントムと微小空間の線量計測が可能なプラスチックシンチレータを用いた線量検証システムを組み合わせ、人の呼吸を模擬した動く腫瘍ならびに、不規則性を持たせた呼吸波形に基づく動く腫瘍の 2 種類に関して、動体追尾中の線量検証を行った。アイソセントリック照射およびコンフォーマル照射のいずれにおいても、計算線量と実測線量間の誤差は 3%未満であり、物理的な線量精度が担保されることを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

Sumida I, Shiomu H, Higashinaka N, Murashima Y, Miyamoto Y, Yamazaki H, Mabuchi N, Tsuda E, Ogawa K. Evaluation of tracking accuracy of the CyberKnife system using a webcam and printed calibrated grid. JOURNAL OF APPLIED CLINICAL MEDICAL PHYSICS. 査読有. 17;2016:74-84.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1120/jacmp.v17i2.5914>

Kurosu K, Sumida I, Shiomu H, Mizuno H, Yamaguchi H, Okubo H, Tamari K, Seo Y, Suzuki O, Ota S, Inoue S, Ogawa K. A robust measurement point for dose verification in delivery quality assurance for a robotic radiosurgery system. J Radiat Res. 査読有. 58;2017:378-385. DOI: 10.1093/jrr/rrw103.

Kurosu K, Sumida I, Suzuki O, Shiomu H, Ota S, Otani K, Tamari K, Seo Y, Ogawa K. Dosimetric and clinical effects of interfraction and intrafraction correlation errors during marker-based real-time tumor tracking for liver SBRT. J Radiat Res. 査読有. 59;2018:164-172. DOI: 10.1093/jrr/rrx067.

Koike Y, Sumida I, Mizuno H, Shiomu H, Kurosu K, Ota S, Yoshioka Y, Suzuki O, Tamari K, Ogawa K. Dosimetric impact of intra-fraction prostate motion under a tumour-tracking system in hypofractionated robotic radiosurgery. PLoS One. 査読有. 13;2018. DOI: 10.1371/journal.pone.0195296.

[学会発表](計 0 件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：
取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

隅田 伊織 (SUMIDA, Iori)
大阪大学・大学院医学系研究科・助教
研究者番号：10425431

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし