

令和 4 年 6 月 30 日現在

機関番号：34324

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K07650

研究課題名（和文）リスク臓器線量及び装置の物理干渉を考慮した全方位照射空間における照射軌道の最適化

研究課題名（英文）Optimization of irradiation trajectory in omnidirectional irradiation space considering risk organ dose and physical interference of equipment

研究代表者

澤田 晃（SAWADA, AKIRA）

京都医療科学大学・医療科学部・教授

研究者番号：80543446

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：治療装置と周辺機器の自由度を活かした動的な3次元回転照射装置に対して、最適な照射軌道の決定手法を考案し、原理実証を行った。治療ビームの幾何学的な通過の有無や累積線量を指標として危険度マップを生成し、正常組織への照射を抑制する回転照射軌道を自動計算した。肺や脳の数値データを用いた治療計画において、危険度が高い領域への照射を最小限に抑制し、危険度が低い領域へは集中照射されることを確認した。また、照射軌道上の機器と患者の衝突検知シミュレータを実装し、光学位置センサを用いた精度評価を行った。臨床環境への調整が進めば、試行錯誤によらず照射軌道を決定する支援技術として波及することが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放射線治療装置による全方位からの複雑な軌道による照射が可能になってきたが、正常組織を回避し標的へ線量集中する軌道の決定は容易ではなく、複雑な照射軌道では、照射装置等と患者との干渉が生じる。本研究で開発した治療ビームの幾何学的な通過の有無や累積線量を指標として、正常組織への照射を抑制する回転照射軌道を自動的に計算する手法は、強度変調回転照射を含む回転型放射線治療に対し、照射空間の自由度を活かした最適化が可能であり、また、照射軌道上での機器や患者の干渉を実時間検知し、臨床で安全な照射軌道の呈示が可能であることを示唆した。これらは、治療の高精度化と共に治療従事者への負荷の軽減への貢献する。

研究成果の概要（英文）：We have devised a method for determining the optimum irradiation trajectory for a dynamic 3D rotary irradiation device that utilizes the degree of freedom of the treatment device and peripheral equipment and have demonstrated the usability. A risk map was generated using the presence or absence of geometrical passage of the treatment beam and the cumulative dose as an index, and the rotational irradiation trajectory that suppresses irradiation to normal tissue was automatically calculated. In the treatment plan using numerical data for lungs and brain, it was confirmed that irradiation to high-risk areas was minimized and intensive irradiation was performed to low-risk areas. In addition, we have implemented a device on the irradiation trajectory and a collision detection simulator for the patient and evaluated the accuracy using an optical position sensor.

研究分野：放射線治療技術学

キーワード：動的照射軌道

### 1. 研究開始当初の背景

国内では、がんが1981年より死因の第1位であり、2016年の人口動態統計によると、年間37万人以上(全死因の28.5%)ががんで亡くなっている。これは、死因2位の心疾患による死亡者数の約2倍である。今後の高齢化の進行および加齢によるがんの発症リスクが高まる点から、侵襲性の低い放射線治療に対する期待はますます大きくなる。

上記期待に応えるべく、放射線治療の高度化への取組みが進められ、定位放射線治療は肺癌や肝臓癌の体幹部腫瘍に対して平成16年に、強度変調放射線治療は脳や頭頸部、前立腺癌に対して平成22年に保険収載となり、施行施設は増加してきた。現在、これらの治療は、基本の固定多門原体から照射装置を回転させる回転型強度変調放射線照射へと、空間的に複雑な軌道の照射に拡張されている。一方、時間の次元を考慮した治療法への拡張も行われ、肺がんなど呼吸性移動を伴うがんに対して、その動きを追跡或いは追尾して照射する4次元治療法が臨床導入されている。近年では、照射時間の短縮および正常組織への照射を回避すべく装置や治療台の位置姿勢を照射中に変化させ、非同一直線の軌道に沿って動的に3次元回転照射する概念が提案され、線量分布の改善や治療時間の短縮に有効であることが示されている。そして、上記のような放射線治療の高度・高精度化に伴い、加速管の小型化、回転照射中の速度や線量率の制御、画像誘導により同定した標的位置と同期した照射装置と治療台の駆動などのハードウェアやソフトウェアの改良が進み、全方位(立体角4 sr)の空間自由度を有する複雑な軌道に沿った連続的な照射が物理的には可能になってきた。

しかし、上記の全方位の自由度を持つ複雑な軌道に対する連続的な照射の実現には、

- (1)正常組織を回避しつつ標的への線量集中する照射軌道の決定が容易ではない。
- (2)仮の軌道を決定した後に初めて線量計算が可能となるため、途中段階での照射軌道(治療計画)の評価ができない。
- (3)複雑な照射軌道では、照射装置や治療台などの機器と患者との干渉が生じる。などの課題があり、これらにより、治療計画やQA(Quality Assurance)のやり直しが頻繁に生じて負荷が増え、臨床で有効に機能しないと考える。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、治療ビームの幾何学的な通過の有無や累積線量を指標として、正常組織への照射を抑制する回転照射軌道を自動的に計算する手法を開発し、強度変調回転照射を含む回転型放射線治療に対し、照射空間の自由度を活かした最適化を図ることである。

研究の特徴として、次の点が挙げられる。

- (1)照射方向からの治療ビームの経路に沿って正常組織への通過の有無を幾何的に判定し、正常組織への照射を抑制する軌道の選択が可能

治療計画者は、計画S/W上で放射線の各種臓器への通過の有無を把握する。しかし、体内構造が複雑な場合にはその把握は困難である。そこで、治療計画用CT(Computed Tomography)画像に、照射標的や正常組織の形状を重畳し、任意の照射方向からの治療ビームと各組織との重なりの有無やその範囲を指標として、正常組織への照射を抑制する軌道を選択する。

- (2)各照射位置からの各組織線量の逐次累積による照射軌道の良否評価および最適化へのフィードバック

回転やアーク照射では、軌道を確定した後に線量計算を行い、線量分布や線量指標を基に照射軌道の良否を判定する。そのため、回転型強度変調放射線治療などの複雑な照射では、計画の遅い段階において修正が発生し負担が大きい。本研究では、事前に全方位から照射した時の線量分布を計算し、照射軌道を順次決めていく際に、逐次的に累積線量や線量指標を概算する。これにより、照射軌道の良否を早い段階で判定でき、治療計画へのフィードバックが効率良く行える。

- (3)照射装置や治療台などの機器と患者との干渉の有無を実時間に検知可能

照射装置や治療台などの機器の形状や可動領域、駆動速度を用いて、3次元且つ動的に機器や患者との干渉を検知し、照射方向の適否を判定する。これにより、治療計画の段階で実施不可能な照射方向が取り除かれ、QAでの照射方向の修正の低減が期待できる。

本研究によって、強度変調回転照射を含む回転型放射線治療の高度化をさらに拡張し、治療装置が有する空間自由度を最大限に利用した最適な照射軌道の提供と同時に高精度治療に対する経験の浅い治療計画者に対する支援を可能となる。

### 3. 研究の方法

- (1)照射方向からの照射ビームの正常組織への通過の有無を判定し照射軌道を決定するアルゴリズムの考案

DICOM形式のCTデータと治療計画データより、各臓器を表す点群情報と放射線を照射する腫瘍の中心座標を取り出す。そのデータの点群を3次元空間に配置し、腫瘍の中心位置を通る放射線モデルを作成する。放射線モデルの照射位置を半径Rの球の表面上の位置情報で表し、経度を、緯度をとする。放射線モデルを対象治療装置(Vero4DRT)の照射域である $-\pi \leq \theta \leq \pi$ および

$-\pi/3 \leq \phi \leq \pi/3$ の全地点に移動させ、各地点で放射線モデル内の臓器ごとの点数を計測する。各臓器に重みを乗算し足し合わせた値を危険度とする。その危険度をスコアにした横軸を、縦軸をとする2次元の危険度マップを作成する。危険度 $D_{\theta, \phi}$ を $D_{\theta, \phi} = \sum_{i=0}^n W_i \times D_{i, \theta, \phi}$ と定義する。この際、 $n$ を臓器の数とし、 $W_i$ を各臓器の重み、 $D_{i, \theta, \phi}$ を各臓器の危険度とする。次に、作成した危険度マップを用い、照射経路生成を行う。経路探索には指定した2地点間の実コストと推定コストを計算しながら探索するA\*アルゴリズムを用いた。実コストを開始地点から現在地点までの距離とすると、推定コスト $H(\theta, \phi)$ は $H(\theta, \phi) = dist(\theta, \phi) + I \times D_{\theta, \phi} / D_{max}$ と定義する。この際、 $\theta, \phi$ を現在地点の経度、緯度とし、 $I$ を危険度の経路探索への影響度とし、 $D_{max}$ を危険度マップ上の最大危険度とする。また、実コスト $dist(\theta, \phi)$ は $dist(\theta, \phi) = R \cos^{-1}(\sin\theta \sin\theta + \cos\theta \cos\theta \cos(\Phi - \phi))$ と定義する。この際、 $\theta, \phi$ を到達地点の経度、緯度、 $R$ を3次元の全球の半径とする。図1に危険度マップ上で探索・生成した照射経路の画面表示を示す。

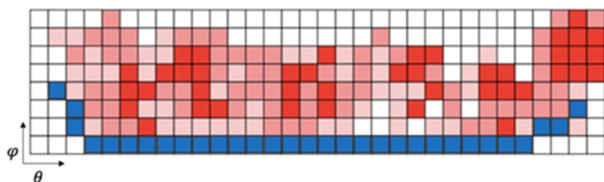


図1 危険度マップ上の照射経路表示

危険度マップ上では危険度の高さを赤色の濃淡で表し、生成した経路を青色で表す。

### (2)連続照射の照射経路の再現

シミュレータから生成された照射経路を元に放射線治療計画を作成するにあたり、放射線治療計画システムにて連続照射の照射経路を作成する必要がある。本研究では、固定照射のビームを複数個使用し、足し合わせることで連続照射の照射経路を擬似的に生成する。照射経度の範囲 $2\pi$ を $N$ 分割する。経度の分割計算 $i$ により求めた照射ビーム $D$ の経度を $\theta_i$ 、緯度 $\phi_i$ とすると、連続照射の照射経路 $P$ は $P = \sum_{i=0}^{N-1} D_{\theta_i, \phi_i}$ と定義できる。ここで擬似的に生成した照射経路を用いて放射線治療計画を作成する。

### (3)照射軌道における機器と患者との相互干渉検知シミュレータの精度評価

機器と患者との相互干渉検知の高精度化には臨床現場の幾何学的構造の調整が必要であるが、臨床現場への立入り制限下で得られたデータを基に、衝突検知シミュレータの精度評価を中心に行った。仮想空間内に、照射装置や治療台の速度・加速度などの駆動条件を含めた機器モデルを生成する。また、3次元デジタイザにより患者の体表データを計測して、個別の患者モデルを生成する。照射軌道に合わせて、機器や患者モデルの位置姿勢を実時間に変化させ、物理エンジンライブラリを利用して動的な軌道において干渉を検知し、空間的・時間的に連続的な照射へ対応可能となる。また、実治療室の機器の形状や配置を調整し、干渉検知の精度を定量評価として、光学位置センサを用いて衝突検知シミュレータの精度評価を行った。NDI製の光学位置センサHybrid Polaris Spectra(以下Polaris)は、搭載された一対のカメラが赤外線反射型マーカーを検知し、立体視によりその三次元位置を1/60秒ごとに計測できる。さらに治具に取り付けられた複数のマーカーを検知することにより、その治具の位置と姿勢の計測を可能とする。またPolarisは1/100mmの精度で治具の先端の座標が取得可能である。Polarisの計測可能範囲は最大で縦1.47m、横1.856m、奥行き2.05mである。それに対し治療装置ガントリー内側の半径は2m以上ある。そこで治療装置の形状データを左右に分割して計測する。各計測範囲は、共通となるオブジェクトを含むように設定し、その形状データを計測する。そして、各計測における共通オブジェクトの形状データ間の変換行列を求め、その変換行列を用いて片方の計測範囲の座標を、もう一方の座標に統合する。変換行列の算出には、異なる位置姿勢で計測した同一物体の二つの座標群に対して一方の座標群を回転、平行移動させ、点群同士の距離を最小とする変換行列を求める手法であるICP(Iterative Closest Point)法を用いる。位置合わせのための回転行列、並進量を $R, t$ 、共通マーカーの座標数を $N_p$ 、左半分の座標群を $P$ 、 $P$ に含まれる座標を $p$ 、右半分の座標群の各点を $q(i)$ とし、二つの座標群を位置合わせするための $(R, t)$ の候補は $e^2(R, t) = 1/N_p \sum_{i=1}^{N_p} \min_{p \in P} \|(p - Rq(i) + t)\|^2$ により求める。また、最適な $(R, t)$ は $(R^*, t^*) = \arg \min e^2(R, t)$ より求める。つまり共通マーカーに対してICP法を用いることにより最適な $(R^*, t^*)$ を求め、左右に分割して取得した治療装置の座標群を一つの座標群に合成する。

本実験では、医療用実験モデルのファントムより肺と脳の腫瘍を設定した2種類のDICOMを使用し、肺と脳の腫瘍に対する2種類の放射線照射計画を作成した。また、放射線照射経路計画の評価には、商用放射線治療計画システム(Eclipse)を用い、10度ごとに放射線を足し合わせ、擬似的に経路を作成し、線量分布とDVH(Dose Volume Histogram)を算出した。肺腫瘍に対する放射線照射計画の評価として、肺腫瘍のDICOMには正常組織として脊髄を設定し、危険度マップ作成時に脊髄に対して重みを設定した。図2に肺の腫瘍に対する照射経路を示した。

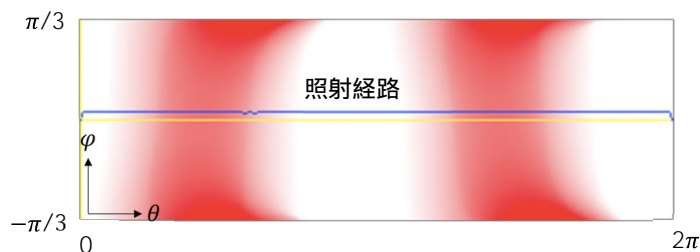


図2 肺腫瘍に対する放射線照射経路

図3、4に図2の照射経路を用いた計画の線量分布とDVHを示す。図4の結果より、脊髄に対しての線量が非常に低くなっていることから、正常組織に設定した脊髄に対してできる限り線量を抑えて、腫瘍に所定の線量を照射可能であることを確認した。

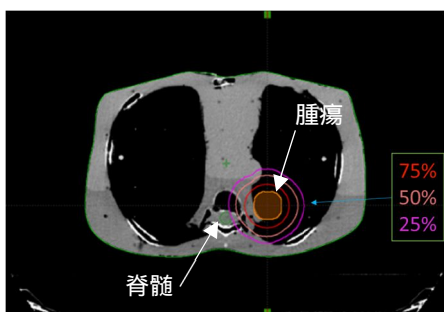


図3 肺の照射中心部分の線量分布

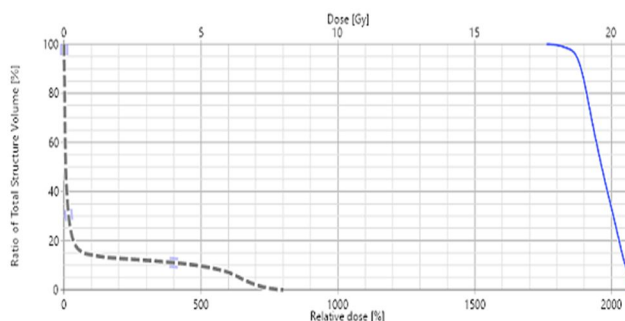


図4 腫瘍と脊髄のDVH

次に脳腫瘍に対する放射線照射計画を評価した。脳腫瘍のDICOMには正常組織として脳幹を設定し、危険度マップ作成時に脳幹に対して重みを設定した。図5に脳の腫瘍に対する照射経路を示す。

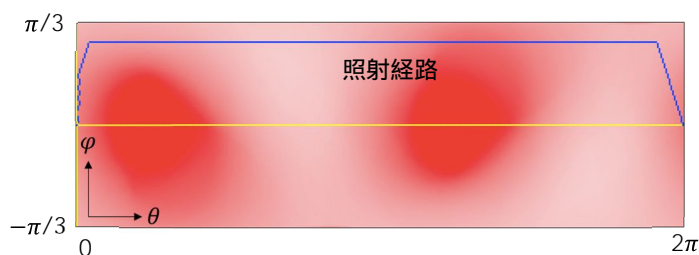


図5 脳腫瘍に対する放射線照射経路

図6、7に図5の照射経路を用いた計画の線量分布とDVHを示す。図7の結果より、腫瘍に所定の線量を照射できたことが確認できるが、脳幹への線量が高くなっている。その理由として、脳幹と腫瘍の位置が非常に近く、図5の危険度マップを見ると、全体的に危険度が高いため、放射線が避けきれなかった点が挙げられる。2種類の放射線照射計画を評価した結果、双方の計画ともに正常組織への線量を出来る限り最小限に抑えつつ、所定の線量を標的に照射できることが確認できたため、開発したシミュレータにて探索・生成した照射経路は放射線照射計画に十分に有用であると考えられる。

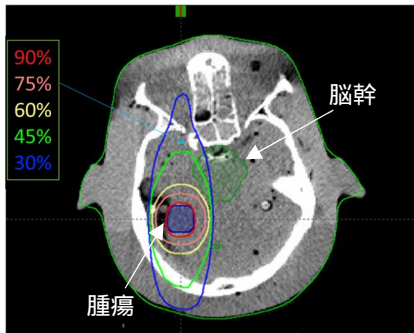


図 6 脳の照射中心部分の線量分布

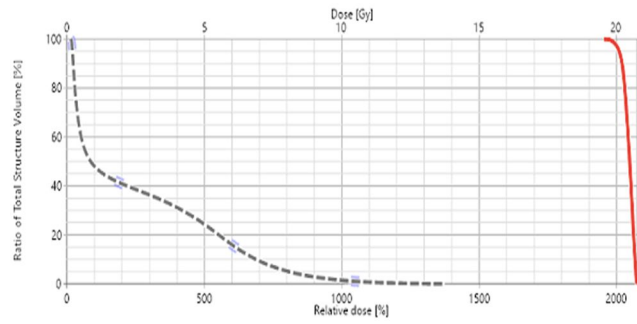


図 7 腫瘍と脳幹の DVH

(2)光学位置センサを用いた照射軌道における機器と患者との衝突検知シミュレータの精度評価  
 36 種の条件下でガントリーとベッドとの距離を計測し、シミュレータの距離計算の精度評価を行った。指定した条件は、ベッドの高さ(VRT)、ベッドの位置(LONG)、リングの角度(RING)、ガントリーの角度(GANTRY)の4点とした。ICP法により形状データの合成を行った結果、視覚的に座標群が正しく合成され、広範囲の測定が可能となった。また、RING(deg)、GANTRY(deg)、LONG(mm)、VRT(mm)の組み合わせに対する、ベッドとガントリー間の距離の実測値およびシミュレータ値の例を表1に示した。表1よりシミュレータと実測との間には323-38mmの誤差があった。この誤差はベッドと治療装置の位置関係がシミュレータと実測とで異なったため生じたと考えられる。

表 1 シミュレータと実測のベッドとガントリー間の距離 (mm)

RING	GANTRY	LONG	VRT	シミュレータ値	実測値
0	135	600	-300	351	28
315	90	600	-150	129	196
45	45	600	-300	273	235
310	135	1200	-300	171	10
25	90	1200	0	127	45
45	45	1200	-150	184	145

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sueoka Masaki, Sawada Akira, Tanabe Hiroaki, Okada Yuki, Taniuchi Sho, Okuuchi Noboru, Tanooka Masao, Kokubo Masaki, Yamakado Koichiro	4. 巻 8
2. 論文標題 Verification of Dosimetric and Positional Accuracy of Dynamic Tumor Tracking Intensity Modulated Radiation Therapy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Medical Physics, Clinical Engineering and Radiation Oncology	6. 最初と最後の頁 211 ~ 224
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4236/ijmpcero.2019.84019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 樋口大規, 小野智博, 相澤理人, 柿野諒, 澤田晃, 中安直規, 伊藤仁, 坂本隆吏
2. 発表標題 超音波画像照合装置を用いた前立腺照射中の経時的移動変化の検討
3. 学会等名 第34回高精度放射線外部照射部会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村嶋晃一, 澤田晃, 末岡正輝, 石原佳知, 小久保雅樹, 森山真光
2. 発表標題 ダイナミックウェーブアーク照射に対応した 照射経路の自動生成に関する研究-脳腫瘍に対する照射経路
3. 学会等名 電子情報通信学会2021年総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 樋口 大規, 澤田 晃, 伊藤 誉志之, 英 奈都美, 小野 智博, 宮部 結城, 中安 直規, 伊藤 仁, 坂本 隆吏, 武村 哲浩
2. 発表標題 動体追尾照射併用のIMRTにおける患者個別精度検証
3. 学会等名 第33回高精度放射線外部照射部会学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 末岡正輝, 澤田晃, 田邊裕朗, 岡田雄基, 奥内昇, 小久保雅樹
2. 発表標題 動体追尾 IMRT の線量と照射位置精度の検証
3. 学会等名 4病院フォーラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sueoka Masaki, Sawada Akira, Tanabe Hiroaki, Okada Yuki, Taniuchi Sho, Okuuchi Noboru, Tanooka Masao, Kokubo Masaki, Yamakado Koichiro
2. 発表標題 Verification of dosimetric and positional accuracy for dynamic tumor tracking intensity modulated radiation therapy
3. 学会等名 Asia Oceania Conference of Medical Physics 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 樋口大規, 澤田晃, 伊藤誉志之, 英奈都美, 小野智博, 宮部結城, 中安直規, 伊藤仁, 坂本隆史, 武村哲浩
2. 発表標題 動体追尾照射併用のIMRTにおける位置精度および線量分布検証
3. 学会等名 第32回高精度放射線外部照射部会学術大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	森山 真光  (MORIYAMA MASAMITSU)  (00283953)	近畿大学・情報学部・准教授    (34419)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	石原 佳知  (ISHIHARA YOSHITOMO)  (60709351)	日本赤十字社和歌山医療センター（臨床研究センター）・放射線治療科部・課長補佐     (84703)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関