

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06097

研究課題名(和文)四次元コンピュータトモグラフィーにおける不完全データに対する重みつき再構成手法

研究課題名(英文) Weighted reconstruction algorithm for time varying object with incomplete projection data

研究代表者

富岡 智 (Tomioka, Satoshi)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：40237110

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：放射線治療をしながら患部の位置および形状をモニタリングするために投影角度限定コンピュータトモグラフィーを提案した。この方法では、モニタリングしたい時刻の投影データは少数の方向のみであり、他の大多数の方向からの投影データには過去に得られたものを利用する。過去に投影データを取得したときの状態と、モニタリングしたい時刻の状態は、異っているので、状態の違いにより再構成像への寄与を変えることのできる重みつき再構成法を用い、低被ばくのモニタリングが実現可能であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In order to monitor positions and shapes of tissue inside body during radiotherapy, we propose a computed tomographic reconstruction technique with limited projection beams. In this technique, the number of angles of projection beams measured at the time of reconstruction is small and most projection beams are lacked. The lacked projection data are replaced by the projection data measured in the past. Since the past state of body is different from that at the reconstructing time, the contribution of each projection data to the reconstructed image should be modified. By applying the weighted reconstruction algorithm to take into account the contribution of the projection data which includes past projection data, we demonstrated feasibility of low exposure monitoring.

研究分野：計算科学

キーワード：コンピュータトモグラフィー 不完全投影データ 時間的変動 重みつき再構成アルゴリズム 低被ばく 投影角限定

1. 研究開始当初の背景

癌治療の主な治療法には、外科手術、薬物療法、放射線治療があげられる。このうち、外科手術は、手術後の入院が必要であり、薬物療法は副作用が大きい。それに対して、放射線治療は癌が広がっていない場合に限定されるが、これらの問題はなく、放射線治療単独で、あるいは、他の療法と併用して用いられる。

放射線治療ではX線や陽子線を患部に照射するが、近年は呼吸等による患部の移動をモニタリングしながらこれらを照射する動態追跡法が採用されはじめている。動態追跡法では患部の周囲に金マーカを埋め込み、それを二方向からのX線により常時撮影しながら、金マーカの位置を決定し、それを基に患部の位置を特定する。この場合、患部の位置は決定できるが、治療中の患部の縮小や変形を知ることはできない。これらの情報を知るためにはコンピュータトモグラフィ（以下CTと略す）により三次元分布をリアルタイムで求めれば良いが、その計測のためには、常時、CT用のX線照射をする必要がありモニタリングのための被ばく量が増えてしまう点が問題であった。

2. 研究の目的

本研究では、放射線治療時の患部の状態をモニタリングするためにリアルタイムCTを用いる場合を想定し、その被ばく量を減らすために、投影角限定CTを提案する。投影角限定CTでは、各時刻において、全ての方向からの投影データを取得せず、特定の投影方向からの投影データのみを取得し、不足している大多数の他方向からの投影データには、過去に取得した投影データを利用する。これにより大幅に被ばく量を減らすことができる。しかし、過去のデータ取得時と再構成時刻の患部の位置等の状態は異なるため、このまま、再構成をすると過去の状態全体を平均化した結果になり、患部が移動する場合には、モーションアーチファクトが発生してしまう。これを抑制するために、過去の状態が再構成したい時刻の状態に近い場合の重みを大きくできるような重みつきCT再構成法を開発し、その有効性を確かめることを目的とする。

3. 研究の方法

重みつきCT再構成アルゴリズムを開発し、どのような重みを与えれば良いかを検討し、シミュレーションにより有効性を示す。

このアルゴリズムは、逐次近似再構成法の一つとして知られているML-EM(Maximum Likelihood-Expectation Maximization)法をベースとしている。逐次近似再構成法自体は、投影データに逆投影オペレータを作用させて再構成像を求めるプロセスと、その再構成像に順投影オペレータにより模擬投影データを求めるプロセスの二つのプロセスから

構成される。これらのオペレータを一回ずつ作用させた結果、すなわち、模擬投影データと、測定投影データの比較を行い、その結果に対して、再度、これらの処理を繰り返すことにより、模擬投影データが測定投影データに近づき、このときの再構成像が最終的な再構成像となる。ML-EM法では、模擬投影データと測定データの比較結果に、これらの比を用いている。

投影角限定CTにより用いるデータには、再構成したい時刻と状態の異なる過去の投影データも含まれている。状態の異なるデータの再構成像に対する寄与を小さくするために、逆投影オペレータを作用させる際に、測定投影データと模擬投影データの比に重みを乗じることが、我々の開発した重みつき再構成法である。

重みの与えかたには、二つの要因を想定した。一つ目は、治療中の患者の体位の変化に関するもので、これに起因する状態の変化は時間の経過にとともに大きくなる。つまり、過去のデータほど、再構成したい時刻との状態が異なるので、過去のものほど重みを小さくする。二つ目は、周期運動に関するものである。呼吸の場合、再構成したい時刻から過去に遡ると、一旦、状態が変わった後に、一周期後には再構成したい時刻と同じ状態に戻る。そこで、この時刻の近傍に取得した投影データには大きな重みを与える。しかし、実際には周期は一定ではないと考えられるため、状態の類似度を測定するために体表面モニターを併用することを想定した。呼吸等による体内の臓器の動きは、体表面の動きと相関があり、体表面の位置はX線を用いなくてもカメラ等により、簡単に測定できる。体表面の位置を常時モニターし、再構成したい時刻の体表面の位置が、過去の体表面の位置の差が近いときに取得した投影データには、重みを大きくした。重みを与える関数には、一つ目の体位の変化対策用の重みに対して投影データ取得後の再構成したい時刻までの経過時間を引数とする指数関数またはガウス分布関数による減衰関数を、二つ目の周期変動に対する重みについては、経過時間の周期の整数倍からのずれを引数とするガウス分布関数を与え、全体の重みはこれらの積により与えた。いずれも半値幅あるいは時定数はシミュレーションにより最適なものを選んだ。

また、複数のCPUを用いた並列処理によりアルゴリズムの高速化を図り、リアルタイム再構成の可能性を探った。

4. 研究成果

図1のような胸部のモデルのシミュレーションを行った。患者は寝台に寝た状態で、呼吸により肺が上下方向に10%程度膨らみ、それに伴い体表面の上部が移動するモデルを想定した。体内の腫瘍の大きさは変わらないが呼吸と連動して位置が動くものとした。ま

た、呼吸の周期は時間とともに揺らぐものとした。投影データには 70 タイムステップ分のデータを用い、この間、約 5 回の呼吸がなされる。各時刻の投影画像は 2 枚とし、18 タイムステップで一セットの完全投影データが得られものとする。このときの投影角度刻は約 5 度である。過去の投影データを統合した統合投影データは、約 4 セット分の全投影角のデータを利用することとなっている。

再構成像の品位を評価するために、まずは一般的な完全投影データが取得できた場合の結果を示す。図 1 のモデルに対して、投影のシミュレーションを行い、完全投影データを作成した。図 2 に完全投影データを示す。この図の横軸はセンサーのチャンネルを表しており、縦軸が投影方向の方位角を表す。方位角は図 1 の上方向からの投影を 0 度としており。上端と下端が ± 90 度すなわち図 1 の左右の方向からの投影データを表し、縦方向の中央が上下からの投影を表している。投影方向が変化するに従い測定値が徐々に変化している見て取れる。

図 3 には、図 2 の完全投影データの再構成結果(左)と図 1 に示した真の内部分布との残差(右)を示す。投影データの角度刻みが大きいことに起因するラインアーチファクトが見られるが腫瘍の大きさはほぼ再現できている。また残差からは腫瘍のエッジ部分がなまっている様子が見られるが、これも投影方向角度のサンプリングが 5 度刻みと粗いことが原因である。



図 1 胸部の内部分布モデル(真の解)

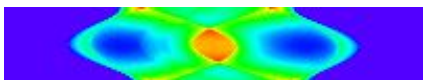


図 2 再構成時刻の完全投影データ



図 3 完全投影データからの再構成結果(左)と残差(右:(色は赤が正,白が0,青が負を表す))

図 4 に過去の投影データを統合した投影データを示す。もし測定対象の状態が変化しないのであれば図 2 の投影データを追加したものとなるが、状態が変化しているためところどころひずみが見られる。これを重みなしで再構成した結果を図 5 に示す。この図の上部の状態が真の解と大きく異なっていることが見て取れる。それに対して下部の部分は真の解と差はない。これは、上部は時間的な状態の変化が大きいのに対して、下部は寝台と接触しているため時間変化が小さいためである。また、腫瘍の部分も図 3 の完全投影データが得られている場合と比べると大きさが小さくなっている様子が見られ、輪郭もぼけている。さらに残差の図から腫瘍部の位置が下にずれていることも解る。

図 6 が重みを考慮した再構成結果である。図 5 の重みなしと比べると、上部の乱れは少なく、また腫瘍の位置のずれもない。図 3 の完全投影データと比較しても、少し値に差があるものの、位置については同等に再現できているといえる。

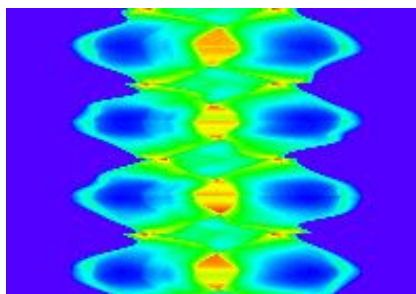


図 4 過去の投影データを統合した投影データ

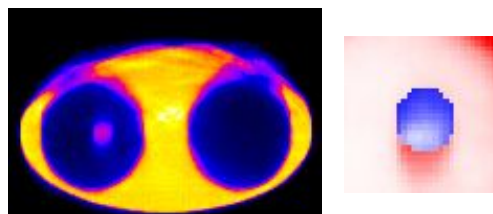


図 5 統合投影データからの重みなし再構成結果

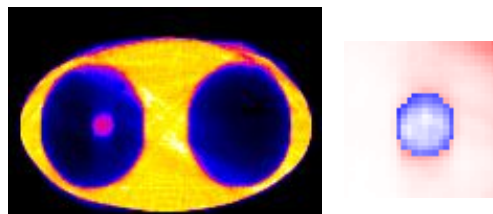


図 6 統合投影データからの重み付再構成結果

よって、重み付き再構成法は、時間的に変化する状態に対しても組織の位置についてはほぼ正確に再現できているといえる。特に注目すべき点は、測定のための被ばく量である。図3の完全投影データを用いた再構成の方が、図5の過去の投影データを併用した重み付き再構成結果より正確であるが、各時刻の投影データ数は、完全投影データに対する再構成が18方向であるのに対し、重み付き再構成の方は2方向のみである。つまり、被ばく量は1/9に低減されているにもかかわらず、若干の再構成品位の低下で収まっていることになる。

計算時間について示す。図6までの再構成像は、センサーのチャンネル数が200で総投影方向数が140の統合投影データから、200x200の再構成像を8つのCPUを用いた並列計算により求めており、逐次計算の繰り返し回数はおよそ30回で、このときの計算時間はおよそ0.5秒程度であった。より大きな再構成像、あるいは、投影データの増加によって、計算時間の増加が予想されるが、今後、計算機のCPU数の増加も期待できる。そこで、並列化による計算時間の低減効果を評価した。図7は並列化数による計算時間の低減結果を示している。使用した計算機は8個のCPUを搭載しておりハイパースレッディング技術により見かけ上16個のCPUとして扱われる。この図の縦軸はセンサーチャンネル数が713で投影角度刻みが1度の180枚の投影データから512x512のサイズの再構成像を計算した際の逐次計算プロセスの1ステップ（逆投影と順投影各1回）あたりの計算時間を示している。横軸は並列化のスレッド数を示しており、CPU数と同じ8までは、スレッド数の0.68乗分の1で計算時間を低減できることを示している。各点は1つに見えるが4回の試行結果をすべてプロットしており、エラーバーがほとんどないといえる。この結果から、今後、CPU数が100程度であれば1/25程度まで低減できることを示しており512x512の再構成画像で逐次計算の繰り返し回数が数十回であれば、1秒以内に再構成が可能である可能性が高い。

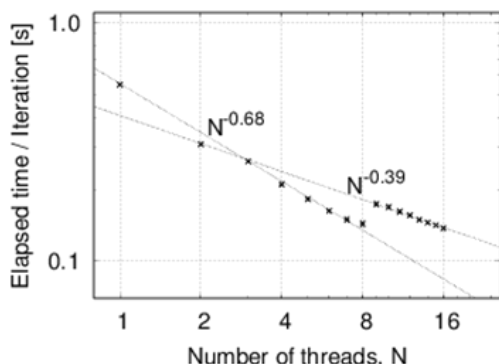


図7 並列化による計算時間の低減

以上より、時間的な変動を伴う測定対象に対して、過去のデータも併用した投影角限定CTは、重み付き再構成により、完全投影データの場合より若干品位は劣化するものの、モーションアーチファクトを抑えた再構成結果を得ることができ、またよりCPU数の多い計算機を用いればリアルタイムの再構成も可能であることが解った。よって本研究で提案する方法の採用により、低被ばくのリアルタイムCTの実現の可能性が高いといえる。

なお、本研究で開発した重み付き再構成アルゴリズムは過去の投影データの中で、再構成時刻の状態と近い状態のもの重みが大きくなるように選んだ。状態が時間変動しなくても投影方向ごとに測定誤差が異なるデータが混在する場合も考えられる。このような場合についても、測定誤差が大きく信頼性が低い投影データに対する重みを小さくすることにより、これらの再構成像への寄与を小さくすれば、再構成像の高品位化につながる。これは医療用CTに限定されず、他分野のCTにも応用できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- 1) S. Tomioka, S. Nishiyama, N. Miyamoto, D. Kando, S. Heshmat: Weighted reconstruction of three-dimensional refractive index in interferometric tomography, *Applied Optics*, 56(24), 6755-6764 (2017), 査読有, DOI:10.1364/AO.56.006755

〔学会発表〕(計 13 件)

- 1) S. Motoi, S. Tomioka, K. Umegaki, N. Miyamoto: Time-dependent weighted reconstruction method with insufficient projection data for mobile target, 医学物理学学会学術大会, 2018
- 2) N. Miyamoto, R. Suzuki, S. Takao, T. Matsuura, S. Hirayama, T. Fujii, S. Tomioka, S. Shimizu, K. Umegaki, H. Shirato: Evaluation of measurement accuracy of novel monoscopic X-ray imaging technique for three-dimensional target localization using multiple internal fiducial markers, 8th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics, 2017
- 3) T. Ano, S. Takao, H. Ueda, T. Fujii, S. Unno, K. Umegaki: Development of Amplitude-Based 4D reconstruction with ML-EM method for on-board Cone Beam CT, 8th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics, 2017
- 4) 富岡智: 重みつきコンピュータトモグラフィの過渡現象への応用, 画像計測

- 研究会, 2017
- 5) 富岡智, 内藤大基, 西山修輔, 宮本直樹, 梅垣菊男: 時間的变化を伴う測定対象に対する重みつき計算機トモグラフィ再構成アルゴリズム, 医学物理学会学術大会, 2016
 - 6) 宮本直樹, 鈴木隆介, 高尾聖心, 松浦妙子, 松崎有華, 藤井孝明, 富岡智, 清水伸一, 梅垣菊男, 白土博樹: 体内マーカ3次元軌跡の解析による呼吸位相評価を利用した動体追跡放射線治療の患者位置決め/ゲート照射の効率化, 医学物理学会学術大会, 2016
 - 7) 阿野知史, 上田英明, 高尾聖心, 藤井孝明, 川村翔太郎, 梅垣菊男: 陽子線治療における呼吸性移動を考慮した空間位置位相別4次元コーンビームCT画像再構成法の開発, 医学物理学会学術大会, 2016
 - 8) 中川晴夫, 宮本直樹, 上田英明, 横川航平, 松崎有華, 長田真由子, 梅垣菊男: 動体追跡陽子線治療における線量分布評価のための腫瘍の呼吸性移動のモデリング, 医学物理学会学術大会, 2016
 - 9) 富岡智: 逐次近似型コンピュータトモグラフィ再構成法における雑音の影響, 画像計測研究会, 核融合科学研究所, 2015

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富岡 智 (Tomioka Satoshi)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 40237110

(2) 研究分担者

西山 修輔(Nishiyama Shusuke)

北海道大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 30333628

宮本 直樹 (Miyamoto Naoki)

北海道大学・大学病院・助教

研究者番号: 00552879

梅垣 菊男 (Umegaki Kikuo)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 40643193