

患者にやさしい次世代CT装置の構成方式

Construction Methods of Patient-Friendly Next Generation CT Scanners

研究代表者 筑波大学大学院システム情報工学研究科 教授 工藤博幸

登録番号 1081009

[研究の目的]

近年の医療用CTの発展はめざましく、マルチスライスCTや4次元CTなどの最先端の装置が開発されたが、1) 映像の量や画質を優先するあまり被曝量が膨大になっていること、2) 撮影中の静止や息止めなどの大きな負担を患者に強いること、などの本質的な問題点は未だに解決されていない。本研究では、代表者らが考案した『関心領域X線照射方式』と『体動に影響されない画像生成法』の独創的アイデアに基づいて、上述の問題点を解決する『患者にやさしい次世代CT装置』の構成方式と画像生成のデータ処理法を開発する。本方式が実用化されCT装置が低被曝、低負担で利用できるようになれば、医学診断に与えるインパクトは大きいと考えられる。

[研究の内容、成果]

1 関心領域X線照射方式による被曝量低減—発表論文1)～9)

CTイメージングの多くの状況において、対象物内の小さな関心領域(ROI: Region of Interest)だけの画像が欲しい場合が生じる。例えば、心臓病や乳がんの診断では、心臓や乳房を含む小さなROIの画像だけがあれば十分である。現在のCT装置の構成方式やデータ収集法は、このようなROIだけの画像で十分な場合でも、図1(a)に示すようにROIを含む断面を完全に覆うX線ビームを照射して『(ROIのみではなく)対象物断面を通過する全ての直線上の』投影データを測定するものになって

いる。これは、CT装置の画像再構成に用いられるフィルタ補正逆投影(FBP)法の計算手順において、ROIの画像を生成するのにROIを通過しない直線上の投影データも必要になるためである。しかし、直感的にはROIを通過しない直線上の投影データはROIの情報を全く含んでいないため、不必要なことが予想される。そこで、本研究では、図1(b)に示すようにROIだけにX線を照射して、『ROIを通過する(全ての)直線上の』投影データのみを測定する新しいCT装置の構成方式を提案する。この方式に関心領域X線照射方式と呼ぶが、心臓や乳房などの目的とする検査のROIだけにX線を照射するためROI外部の被曝量が非常に少なくなり、直感的に被曝量を(ROIの面積)/(断面全体の面積)に大幅に低減することが期待される(例えば、心臓イメージングの場合約1/10)。

関心領域X線照射方式ではROIを通過しない直線上の投影データは測定されないため、一部が欠損した不完全投影データから画像再構成を行う手法が必要となる。そこで、関心領域X線照射方式のモデルである、Interior問題と呼ばれる画像再構成問題の数学的性質の解明と具体的な画像再構成法の開発を行った。図2(a)のように物体 $f(x, y)$ の内部に完全に含まれるROISを考える。そして、直線がROISを通過する(平行ビーム)投影データ $p(r, \theta)$ (r は動径、 θ は角度)のみが測定可能であるとする。この場合、ROISを通過しない $p(r, \theta)$ は測定されないため、全ての方向の投影データは左

右にトランケーションされることになる. この
 ような投影データから R O I S を厳密に再構
 成する問題が Interior 問題である. 残念ながら,
 1986 年に出版された F.Natterer の本に, 投影デ
 ータに加えて物体の support (境界) の情報が完
 全に分かっていても, Interior 問題の解は一意で
 ないことが証明されている.

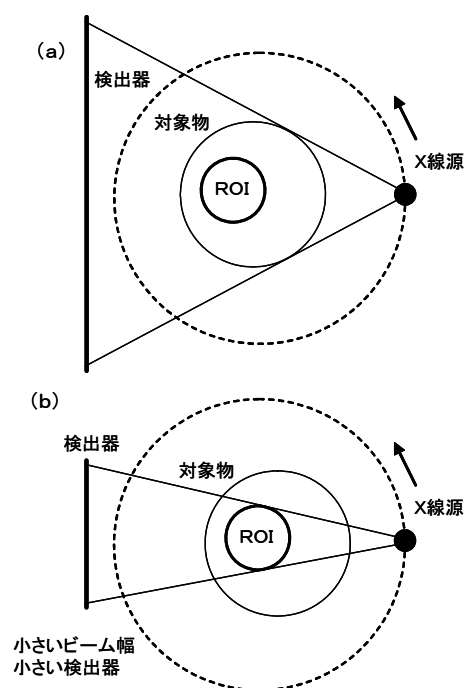


図1 (a)従来のCTと(b)関心領域X線照射方式

そこで, 本研究では, 図2(a)に示すように
 R O I S の内部にある任意の小さい領域 B に
 おいて物体 $f(x, y)$ の値が既知であるという設
 定で Interior 問題を厳密に解くことを試み, 解の
 一意性と安定性を証明し具体的な画像再構成法
 を開発した. 証明などの詳細は発表論文1) ~
 3) を御覧いただくことにして, ここではどの
 ような場合解の一意性と安定性が成立するかを
 まとめた2つの主要結果を述べる.

[結果1] R O I S は物体内部に完全に含まれ,
 事前情報として S の内部にある任意の領域 B

において物体 $f(x, y)$ の値が既知であると仮定
 する. ただし, B はいくら小さな領域であって
 も良い (一点のみではだめ). このとき, 投影デ
 ータ $p(r, \theta)$ の情報と事前情報から, $f(x, y)$ は
 R O I S で一意的に定まり逆変換は安定である. $\square$

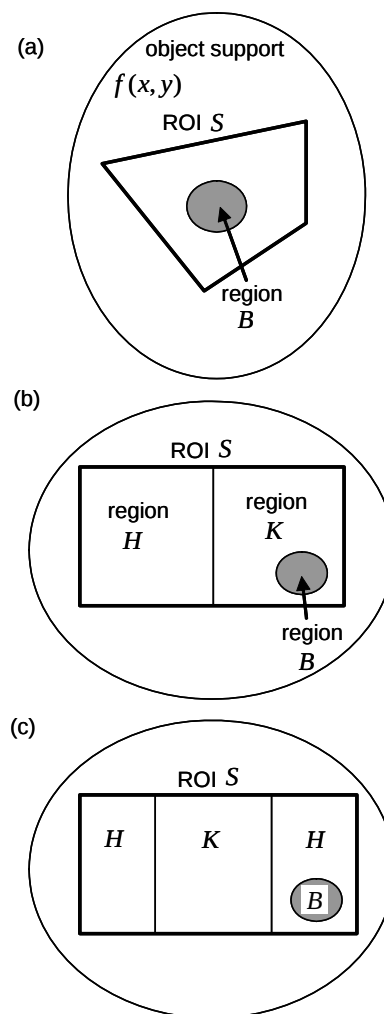


図2 本研究により解の一意性と安定性が示さ
 れる R O I S と事前情報 B, K の配置の例

[結果2] 結果2は結果1を事前情報が大きい
 場合に拡張したものである. R O I S は物体内
 部に完全に含まれると仮定する. 投影データ
 $p(r, \theta)$ は, S の内部にある領域 H (複数の領
 域の union でも可) を通過する全ての直線につ

いて測定されていると仮定する。また、事前情報として S の内部にある領域 K において物体 $f(x, y)$ の値が既知であると仮定する。このとき、3 領域 S, H, K が以下の2つの条件を満足すれば、投影データ $p(r, \theta)$ の情報と事前情報から、 $f(x, y)$ は $ROI S$ で一意的に定まり逆変換は安定である。

(条件1) $S = H \cup K$ (S の内部のどの点においても、 $f(x, y)$ またはその点を通る 180 度方向の $p(r, \theta)$ が測定されている。)

(条件2) $B \equiv H \cap K \neq \{\phi\}$ (S の内部に $f(x, y)$ とその領域を通る全ての $p(r, \theta)$ が測定されている領域 B が存在する。ただし、 B はいくら小さな領域であっても良い。)

□

結果1と結果2の条件を満たす具体的なイメージングの設定を、図2(a)~(c)に示す。図2(b), (c)の設定における解の一意性は結果1では証明することができず、結果2を使うと($f(x, y)$ が既知である領域 K が大きい場合に) 必要な投影データを結果1から示されるより大幅に削減することができる。

図3に、頭部CT実データの再構成画像を示す。上段に示す脳の内部に含まれる長方形領域がROIである状況を想定し、中段は結果1で解の一意性が示される設定に対する再構成画像、下段は結果2で解の一意性が示される設定に対する再構成画像である。ただし、中段と下段において、(左から) 2列目の画像はFBP法による正しい再構成画像から領域 B, K の事前情報を生成した場合、(左から) 3列目の画像は領域 B, K の事前情報として $f(x, y)$ は一定値と近似した場合、(左から) 4列目の画像は事前情報を使用しない場合の再構成画像を表している。小さな事前情報が画質を劇的に改善し、(2列目と3列目の画像がほぼ同じであることから) 事

前情報はだまかで良いことが分かる。

更に、上述の理論と画像再構成法の発展として、以下の項目についても成果を得た。

- Interior 問題における画像再構成の安定性の解析
- 上述の理論に基づく画像再構成法では物体の support と事前情報を与える小領域 B, K が既知であることを前提としているが、support と領域 B, K を投影データから推定する手法の開発
- 関心領域X線照射方式と画像再構成法の動画像を撮影するダイナミックCTへの拡張
- CT以外の重要な医用イメージング装置であるSPECT (単光子放射型CT) への拡張
- CT装置実データを用いた実験と評価

2 体動に影響されない画像生成法による心臓動画像イメージング – 発表論文10)

心臓用のCTでは投影データの測定中に被写体が動くため、アーティファクト (偽像) のない画像再構成は非常に難しい。商用のCT装置では、心電同期と呼ばれる心電図を同時に取得して動きの周期性を仮定して時相が合わないデータを無視して動画像の各フレームを再構成する手法が採用されているが、1) 全ての測定データを使用しないため画像のSN比が低く被曝量が膨大になる、2) 動きを厳密に補正できる手法でないためアーティファクトを十分に抑制することができない、などの問題点がある。

本研究では、ファンビーム投影データを用いた2次元CTにおいて、被写体の動きを投影データから推定して、画像再構成過程で被写体の動きを補償してアーティファクトの少ない画像再構成を行う新しい手法を開発した。この手法によれば、従来の心電同期と比較して、測定された全ての投影データを (全く捨てずに) 有効に使用して動きも高精度で補償して画像再構成を行うため、被曝量を大幅に低減してアーティ

ファクトの少ない高画質の画像を得ることが期待される。

この手法を実用化するには、1) 動きが既知の元で動き補償を行いアーティファクトが少ない画像再構成を行う手法の開発、2) 投影データから心臓の動きを推定する手法の開発、の2つの技術が必要である。まず、1) の動きを高精度で補償してアーティファクトを抑制する手法について述べる。なお、このような動き補償による心臓用CTの画像再構成は、この分野ではまだ検討されていない新規性が高いものである。同様な動き補償を行う先行研究としてC.Roux らと L.Desbat らの論文が存在するが、これらの手法は被写体の動きが剛体アフィン変換の場合にしか適用できない。心臓を含む横断面の動きは大きく動く部位・小さく動く部位・動いていない部位が混在しており、非剛体変換を用いないと表現できない。この問題点を解決するため、心臓のような非剛体の動きをアフィン変換のパラメータが画像の座標に依存する局所アフィン変換で近似して、局所小領域毎に異なる動きモデルで動き補償を行う画像再構成法を開発した。次に、2) の心臓の非剛体運動を投影データから推定する手法として、図4に示す（動きが既知の元での）動き補償付きの画像再構成と動画解析による再構成画像のオプティカルフロー（動きを表すベクトル場）推定、の2つのステップを交互に反復する手法を開発した。

シミュレーション実験による提案手法の詳細な評価を行った。図5に動き補償を行わない場合と提案手法により動き補償を行った場合の再構成画像を示す。動き補償を行わない場合と比較してアーティファクト・被写体動きによる画像の歪等の画質劣化は大きく削減され、通常の静止画像再構成とほぼ同等の画質の画像が得られている。また、投影データに雑音を加えたシミュレーション実験を行った結果、提案手法では全ての測定データを捨てずに有効に使用するため、画像のSN比は心電同期と比較して大幅

に向上することが明らかになった。

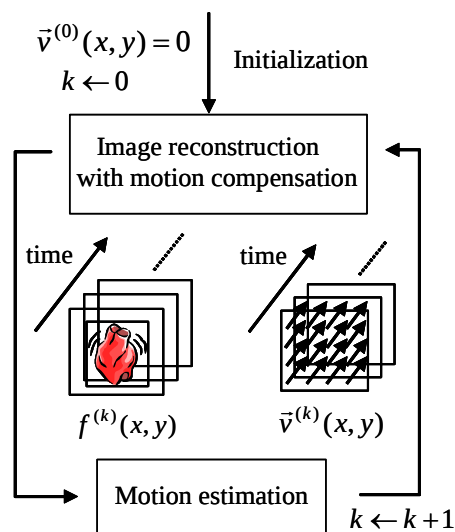


図4 心臓の動きを推定する反復法

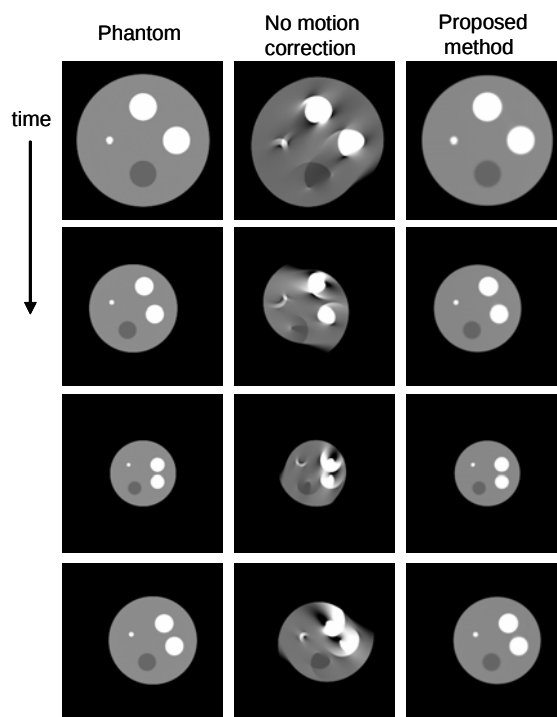


図5 動き補償を行わない場合（2列目）と提案手法により動き補償を行った場合（3列目）の再構成画像の比較

【今後の研究の方向、課題】

今後の課題としては、開発した方式を実際のCT装置に組み込み臨床評価を含めた実用研究

を行うことがあげられる。

[成果の発表, 論文等]

- 1) H.Kudo, M.Courdurier, F.Noo, and M.Defrise,” Tiny a priori knowledge solves the interior problem in computed tomography,” *Phys.Med.Biol.*, Vol.53, No.9, pp.2207-2231, 2008.
- 2) M.Courdurier, F.Noo, M.Defrise, and H.Kudo,” Solving the interior problem of computed tomography using a priori knowledge,” *Inverse Problems*, Vol.24, No.6, Paper No. 065001(27 pages), 2008.
- 3) 工藤博幸,” インテリアCTの提案,” *映像情報メディカル*, Vol.40, No.13, pp.1188-1193, 2008.
- 4) E.A.Rashed and H.Kudo,” Region-of-interest reconstruction from truncated projection data under blind object support,” *Conference Record of 2008 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, Paper No. M3-7(5 pages), 2008.
- 5) E.A.Rashed and H.Kudo,” Iterative region-of-interest reconstruction from truncated CT projection data under blind object support,” *日本医用画像工学会誌 Medical Imaging Technology*, 投稿中.
- 6) H.Kudo,” Image reconstruction for region-of-interest and interior tomography,” *International Forum of Medical Imaging in Asia (IFMIA) 2009*, Paper No. MI2008-118(6 pages), 2009.
- 7) H.Kudo and E.A.Rashed,” Uniqueness results and image reconstruction for region-of-interest and interior tomography,” *Brain Storming - Quantitation of Functional Images with Single Photon Emission Computed Tomography*, Paper ID Kudo, 2009.
- 8) T.Zeniya, H.Watabe, H.Kudo, Y.Hirano, K.Minato, and H.Iida,” Clinical usability of a compact high resolution detector for high resolution and quantitative SPECT imaging in a selected small ROI,” *Conference Record of 2008 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, Paper No. M6-391(3 pages), 2008.
- 9) Q.Huang, T.Zeniya, H.Kudo, H.Iida, and G.T.Gullberg,” Interior SPECT reconstruction problem with tiny a priori knowledge – An application for high resolution pinhole brain imaging,” *10-th International Meeting on Fully 3-D Image Reconstruction in Radiology and Nuclear Medicine*, 投稿中.
- 10) K.Taguchi and H.Kudo,” Motion compensated fan-beam reconstruction for nonrigid transformation,” *IEEE Trans.Med.Imaging*, Vol.27, No.7, pp.907-917, 2008.

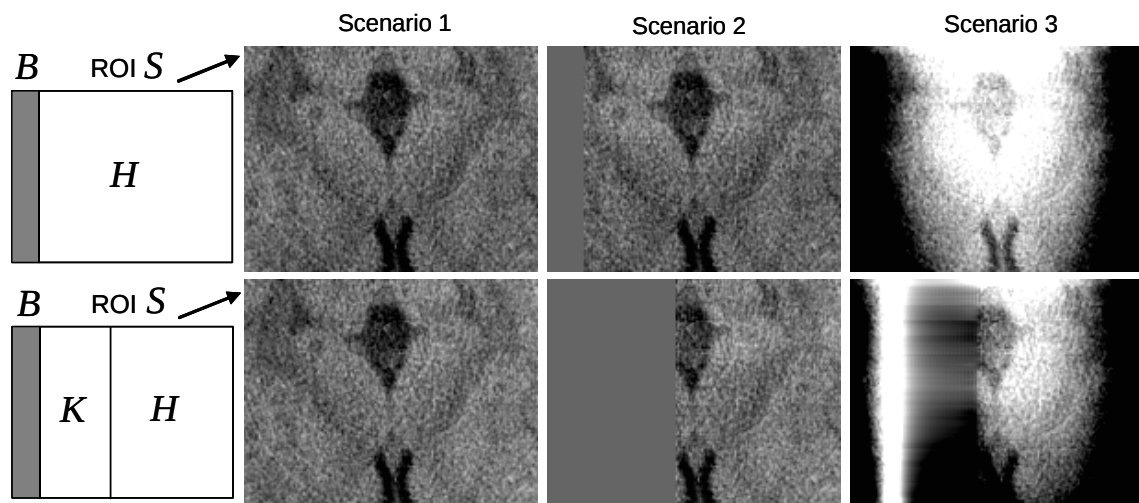
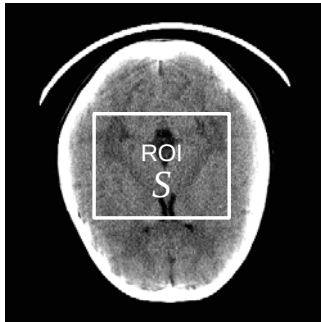


図3 CT装置の実投影データを用いた再構成結果（（左から）2列目：領域 B 、 K の事前情報をFBP画像から作成，3列目：領域 B 、 K の事前情報を一定値として近似，4列目：事前情報なし）