

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24601003

研究課題名(和文)非線形的画質挙動のX線CT画像の画質測定法の開発と逐次近似的再構成の画質実態解明

研究課題名(英文)Development of image quality measurement methods for nonlinear CT images, and elucidation of iterative reconstruction methods and their realities.

研究代表者

森 一生(Mori, Issei)

東北大学・医学(系)研究科(研究院)・大学院非常勤講師

研究者番号：90375171

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：X線CTの大きな課題としてX線被曝問題があり、全CTメーカーが逐次近似的再構成法の実用化に注力している。これで被曝を低減しつつ画質を維持向上出来るとされ、肯定的評価報告が相次いでいる。しかし、逐次近似的再構成による画像は非線形場所依存の特性が強いため、従来法による画質測定では臨床実態と異なる結果しか得られない。本研究では、非線形場所依存の画像の画質物理指標(MTFなど)の計測法を開発整備し、一般の計測法の誤謬を明らかにし、そして少なくとも一部の逐次近似的再構成法においては、本質的な画質改善は無いことを明らかにした。多数の講演等によりこれら認識はある程度共有されるに至った。

研究成果の概要(英文)：The most important agenda of X-ray CT is its radiation dose. All CT manufactures are concentrating their effort to develop and refine iterative reconstruction methods (IR type reconstruction). By use of IR, it is claimed to achieve lower noise (i.e. lower dose) while maintaining high resolution. Many reports which are supportive to this view are incessantly published. However, images by IR type method behave non-linearly. Ordinary image quality indexes presuppose linearity of image. Applying them to nonlinear images without extreme care will fall into serious errors. We developed proper measurement methods so that ordinary image quality indexes can be applicable to nonlinear images. Using our methods, we shed light on pitfalls of image quality measurement for nonlinear images. We have confirmed that there is no net gain of image quality at least for some type of IR method. Through our many lectures, our view is now shared to some extent by researchers in this field.

研究分野：医歯薬学

キーワード：医用画像工学 X線CT

1. 研究開始当初の背景

(1) X線 CT は画像雑音を診断レベルにとどめるには大量の X 線照射を必要とする。この X 線被曝は近年問題視されている。

対処のために、2000 年頃から CT メーカーは非線形画像フィルターの利用などの手段で画像をぼかさずに雑音(すなわち被曝)を低減するという方法を盛んに推進した。CT ユーザ等の画質評価もこれを肯定する報告が相次いだ。しかし我々は、これら肯定報告は画質評価の誤りであり、少なくとも CT 診断の主要な対象である軟部組織については実施的な雑音低減(被曝低減)は全く果たされていないことを明らかにした。

代わって 2010 年頃から盛んとなり、現在大きなトレンドとなっているものは逐次近似再構成法 (Iterative Reconstruction Method) あるいはその簡易版である(総称して IR 的再構成と呼ぶことにする)。IR 的再構成もやはり、「画像をぼかさずに雑音(すなわち被曝)を低減する」とされており、あらゆる CT メーカーがこの開発に努力を傾注している。そして放射線技師・医師その他の研究者からは「画質評価の結果、IR 的再構成法の効用は顕著である」とする報告が相次いでいる。

(2) ところが、IR 的再構成による画像は非線形である。すなわち、画質特性が被写体依存で変わる。一方、一般に用いられる主要な画質指標は全て画像の線形性を前提としている。そして肯定的画質評価報告は殆どがこれら線形画質指標を用いている。

一方、臨床画像で目視的に診断能を評価した報告も有り、これらの報告の場合は IR 的再構成で格段の改善があるとは必ずしもされていない。また、古典的な研究では再構成法の改良でぼかさずに画像雑音を(すなわち被曝を)低減する余地は理論的に殆ど無いとされている。これらのことから、通常の画質評価法による IR 的再構成法の肯定的報告の正しさは大変に疑わしい。

(3) IR 的再構成法の画像の挙動を正しく把握しないままに誤った評価をそのまま受け入れることは危険である。適切な臨床運用の条件設定を誤る可能性もある。装置の高額化や、再構成計算時間の延長による検査効率の低下があり得る。また、ハードウェア的に被曝低減をする余地も残されているのだが(たとえば X 線検出効率の向上など) これら真の非被曝低減努力がおろそかになる危険がある。

2. 研究の目的

(1) 前記背景により、次のような点について、はっきりさせる必要がある。

・一般に為される画質評価法に誤りが無いの

か。

・どのようにすれば適正な画質評価ができるのか。

・IR 的再構成法により真の意味で雑音低減(被曝低減)できるのか。

ここで、一般に用いられている画質評価指標とは次のようなものである: 解像力指標として modulation transfer function (MTF)、雑音指標として雑音標準偏差 (SD) あるいは noise power spectrum (NPS)、体軸方向解像力指標として slice sensitivity profile (SSP)、そしてそれらから派生する信号雑音比 (SNR) やマッチドフィルタ SNR (MFSNR) など。

(2) 多くの画質計測においては解像力と雑音とを同時に同条件で測定することをしていない。両者はトレードオフ関係にあるものであり、線形なデータ処理においては、解像力と雑音とを総合した適切な指標値は不変である。この不変性が破られているときに初めて、IR 的再構成法により本質的な画質改善(被曝低減)が果たされ得るということになる。この不変性の確認をする。

(3) そのために決定的に重要なのは、MTF や SSP などの解像力指標を雑音測定と同条件で(すなわち非線形性が発現しないであろうという条件で) 正確に測定することである。一般にこれら解像力指標は極めて高コントラスト低雑音条件でないと測定は困難であり、極めて低コントラスト高雑音で測定できるような技術開発が必要となる。

(4) 正確に得られた解像力指標と対比して総合的画質指標の改善有無を明らかにするには、雑音指標である NPS の正確さも必要である。今日本邦で行われている NPS 測定は極めて不正確である。この解決もしなくてはならない。

3. 研究の方法

(1) MTF, SSP, NPS の正確な計測法開発のために、真値の判ったシミュレーション画像を用いて精度検証をする(通例の測定においては真値不明のまま、即ち計測精度不明のままに、測定値を受け入れており、信頼度が無い)。シミュレーション画像は次のように生成する。PC 上で典型的な MDCT (マルチスライス CT) でスキャンした投影データを作成し、続いて最も典型的なコーンビームヘリカル再構成法で画像再構成する。諸画質指標の理論的真値は一般の研究者には知り得ないが、我々はスキャン及び再構成の詳細は全て把握しており、真値の理論計算の詳細も知っている。これにより、我々は諸画質測定法の誤差を正確に把握できるのである。

(2) NPS 測定においては、通例本邦で行われ

る仮想スリット法ではなく円周平均法を基礎に開発する。仮想スリット法では関心領域設定に伴う spectral leakage 現象が顕著となり、特に低周波域において誤差が顕著と考えられるからである。円周平均法でも spectral leakage 問題はあり得るので窓関数を導入し、残存誤差のメカニズムを確認して補正措置を講じる。

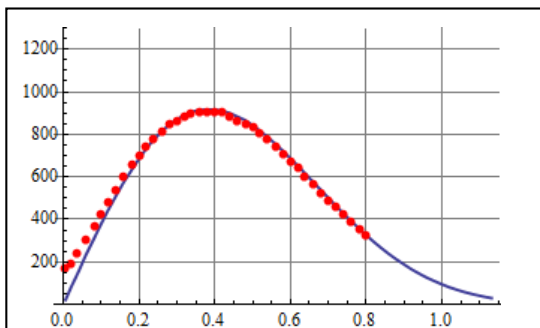
(3)MTF 測定においては、大別して四種ある。直線状被写体を用いる LSF 法、ブロック状被写体を用いる直線エッジ法、円形ブロックを用いる円形エッジ法、ワイヤによる点状被写体を用いる PSF 法である。これら全てについて耐雑音性を向上したデータ処理法を開発し、高雑音低コントラスト条件での精度限界を確認する。

(4)SSP 測定においては、高コントラスト点状被写体を用いるマイクロディスク法が現在受け入れられている。これは不可であり、我々は低コントラストで SSP を測定する手法を開発する。耐雑音性のために広がりを持つシート状被写体を用いる。このときコーン角アーチファクトが測定誤差の原因となるが、挙動特性を調べ、問題回避する測定法を得る。

(5)代表的な IR 的再構成法について、開発した計測法で得た雑音特性と解像力特性をトータルした画質計量値を得て、FBP に対するアドバンテージの有無と程度を定量的に確認する。

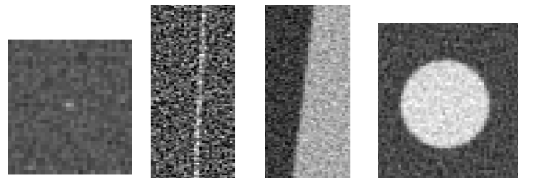
4. 研究成果

(1)NPS 測定において、適切な窓関数の選択に成功し、デコンボリューションによりさらに誤差を減らすことが出来、従来の仮想スリット法において spectral leakage 問題により低周波域の誤差は大きいと言うことを確認できた。この誤差は一件僅少なようでも、MFSNR 値に代入して低コントラスト検出能のために必要な線量に換算すると数 10% の線量誤差に相当する。



NPS の真値 (実線) と一般的に行われる NPS 測定法の結果 (・)。低コントラスト検出能を規定する低周波部の誤差が顕著なこと、およびその原因を明らかにした。我々の方法ではこの誤差を解消できる。

(2)MTF 測定において、目下行われる全ての計測法について、最善な解析を行えば図のような目視的に不鮮明な低コントラスト高雑音状態においても正確な MTF を得られることを確認した。限界の雑音耐性も定量的に確認した。合わせて、LSF 法やエッジ法にはスキャナ非線形問題が現れて本質的にテスト被写体依存であることを検証した。特に円形エッジ法は被写体の位置によっては巨大な誤差を生むことを確認した。



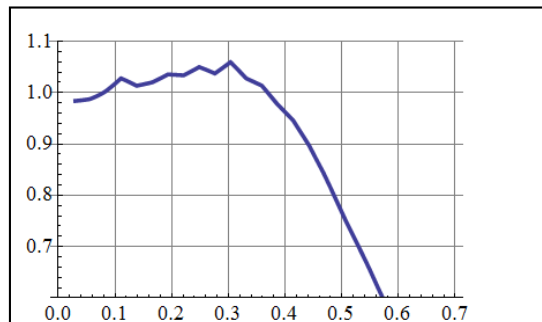
この程度の雑音とコントラストが各測定法(左端は PSF 法、2 番目は LSF 法、三番目は直線エッジ法、右端は円形エッジ法)の限界であることを確認し、限界を達成した。

(3)SSP 測定においては、有限寸法のテスト被写体を用いると、コーン角アーチファクトに伴う位置依存性の誤差を伴うことを明らかにした。この問題は、軌道の位相が 180 度異なるヘリカルスキャンのペアを用いれば解消することも確認できた。もって、高雑音低コントラストでの正確な SSP 測定が可能となった。



低コントラストの SSP ファントム、背景黒部は水、グレーはアクリル、中央縦線はアクリルに対するピークコントラスト 20HU の 25mm 円形シート (サジタル正中面)。背景 SD は約 7HU。この程度の雑音とコントラスト条件で十分正確な SSP を得る事が出来る。

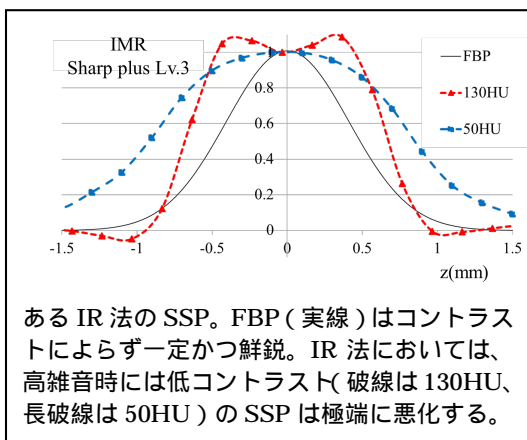
(4)ある代表的な IR 的再構成法において、前



(IR 法の $SNR(f)$) / (FBP の $SNR(f)$)。横軸は空間周波数 f 。IR 法による $SNR(f)$ の改善は、あるとしても 0.2 ~ 0.3 cycles/mm 付近でただか数%である。(高周波域では IR 法で悪化しているが、これはおそらく測定誤差であろう。)

記の正確な測定法を用いて NPS と低コントラスト高雑音 MTF との計測をし、両者を総合する意味で $SNR(f)=MTF(f)/\sqrt{NPS(f)}$ を求めた。在来の画像再構成法 (filtered backprojection, FBP) でも同様に $SNR(f)$ を求めると、殆ど差が無いことを明らかにした。IR 法で線量を半減できる等の言説は誤りであり、減らしても数% (おそらくは 0%) であることを示している。このような測定に成功している例は他にない。

(5) その他いくつかの IR 法においては、前記 $SNR(f)$ は一見 FBP 法よりも優れていたが、我々の開発した SSP 測定法による低コントラストでの SSP は顕著に増大していた (このような明確なデータは過去得られていない)。すなわち、体軸方向解像力の犠牲のもとに雑音低減しているだけで、FBP 法に比べて実質的改善はゼロである可能性が高い。ただし、このことについての詳細な定量確認は未完である。



(6) IR 的再構成法の非線形問題による画質評価の多様な問題点について明らかにしてきた。そして、講演等を通じて関係者に知らしめてきた。結果、明白に見当違いの画質評価報告は多少減ってきているのでは無いかと思われる。

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 5 件)

Sato K, Shidahara M, Goto M, Yanagawa I, Homma N, Mori I. Aliased noise in X-ray CT images and band-limiting processing as a preventive measure. Radiol Phys Technol. 2015 Jan 11. [Epub ahead of print] DOI 10.1007/s12194-015-0306-5 査読有り

Yuki Ichinoseki, Tatsuo Nagasaka, Kota Miyamoto, Hajime Tamura, Issei Mori, Yoshio Machida. Noise Power Spectrum in PROPELLER MR Imaging. Magnetic Resonance In Medical Science [Advance Publication]

Released: March 31, 2015] doi:10.2463/mrms.2014-0071 査読有り

平栗 彩加, 後藤 光範, 佐藤 和宏, 千葉 雄高, 福士 沙江子, 森 一生. X 線 CT 画像の非線形性と MTF 測定: 背景物質およびテスト被写体の材質について. Proceedings of JSCT 2013.

http://www.jsct-tech.org/1st_proceedings_contents.pdf 査読有り

後藤光範, 佐藤和宏, 平栗彩加, 森一生. 異なる逐次近似応用再構成法における挙動の違いについて. Proceedings of JSCT 2013. http://www.jsct-tech.org/1st_proceedings_contents.pdf. 査読有り

森一生. 近年の X 線 CT 画像の非線形的特性と画質の物理評価について. 東北大学医学部保健学科紀要 Vol.22, No.1 pp7-24, 2013 年 1 月. 査読無し

[学会発表] (計 2 3 件)

C. Tominaga, M. Goto, K. Sato, N. Homma, I. Mori. A limitation of the low-contrast straight edge method for measuring the modulation transfer function in computed tomography. 第 7 1 回日本放射線技術学会総会学術大会. 2015.4.16-19 パシフィコ横浜会議センター, 横浜

Mitsunori Goto, M Taura, K Sato, N Homma, I Mori. Measurement of noise power spectrum for CT image: importance of low frequency component and methods to achieve its accuracy. 100th Scientific Assembly and Annual Meeting, Radiological Society of North America, 2014 Nov.30 - Dec 5, Chicago (USA)

後藤光範, 田浦将明, 佐藤和宏, 佐藤益弘, 本間経康, 森一生. 逐次近似再構成の体軸方向解像度測定を目的とした新しい手法の検討. 第 42 回日本放射線技術学会秋季学術大会. 2014.10.10, 札幌コンベンションセンター, 札幌

富永千晶, 後藤光範, 佐藤和宏, 本間経康, 森一生. 低コントラスト円形エッジ法による CT の MTF 測定の問題について. 第 42 回日本放射線技術学会秋季学術大会. 2014.10.10, 札幌コンベンションセンター, 札幌

宮本宏太, 一関雄輝, 齋藤俊輝, 永坂竜男, 森一生, 町田好男. NPS による適応型フィルタの効果の評価 頭部画像での検討. 第 42 回日本磁気共鳴医学会. 2014.9.28, ホテルグランヴィア京都, 京都

平栗彩加, 後藤光範, 佐藤和宏, 千葉雄高, 福士沙江子, 森一生. X 線 CT の MTF は、解析的再構成においても既にテスト被写体の材質や背景に依存し、特に LSF 法による MTF はこの傾向が顕著である. 日本 CT 技術研究会第 1 回研究会学術大会 2013.6.29, 広島大学, 広島

後藤光範, 佐藤和宏, 平栗彩加, 森一生. 異

なる逐次近似応用再構成法における挙動の違いについて. 日本 CT 技術研究会第 1 回研究会学術大会 2013.6.29, 広島大学, 広島

吉田 礼、町田好男、田村元、森一生、引地健生、一関雄輝. 自作傾斜板ファントムを用いた MRI-3D 撮像におけるプロファイル計測精度向上の検討. 第 69 回日本放射線技術学会総会学術大会 2013.4.11-14 パシフィコ横浜会議センター, 横浜

平栗彩加、福土 沙江子、千葉 雄高、後藤 光範、森一生. 高雑音低コントラストの CT 画像の MTF を高精度で計測する方法三種 (ESF, LSF, PSF) の性能限界. 第 69 回日本放射線技術学会総会学術大会 2013.4.11-14 パシフィコ横浜会議センター, 横浜

宮本宏太、一関雄輝、石田俊太郎、伊藤健、永坂竜男、森一生、町田好男. MRI 画像の NPS 計測の実用化に向けた基礎的検討. 第 69 回日本放射線技術学会総会学術大会 2013.4.11-14 パシフィコ横浜会議センター, 横浜

Y Ichinoseki, Y Machida, T Nagasaka, H Tamura, I Mori. Noise Power Spectra in Current MRI Techniques. 98th Scientific Assembly and Annual Meeting, Radiological Society of North America, 2012.12.1, Chicago (USA)

一関雄輝、永坂竜男、山中一臣、伊藤謙吾、田村元、森一生、町田好男. プロペラ収集法における MRI 画像の NPS の基礎的検討. 第 40 回日本磁気共鳴医学会大会、2012 年 9 月 6-8 日、国立京都国際会館, 京都

佐藤和宏、下沢恵太、宮本由希、後藤光範、小山内実、町田好男、森一生. 観察者モデルと観察者能力の整合性の CT 画像を用いた検証. 第 68 回日本放射線技術学会総会学術大会、2012 年 4 月 12-15 日、パシフィコ横浜会議センター, 横浜

後藤光範、佐藤翔耶、澤谷勇太、佐藤和宏、小山内実、町田好男、森一生. CT の MTF 測定において、高雑音非拡大再構成条件に耐える PSF 法の開発評価. 第 68 回日本放射線技術学会総会学術大会、2012 年 4 月 12-15 日、パシフィコ横浜会議センター, 横浜

吉田礼、一関雄輝、小倉隆英、田村元、引地健生、森一生、町田好男. スライスプロファイル法による 3D 撮像の解像特性の検討. 第 68 回日本放射線技術学会総会学術大会、2012 年 4 月 12-15 日、パシフィコ横浜会議センター, 横浜

森一生. 最近の非線形的画質特性の CT 画像について. 第 40 回北海道ヘリカル CT 研究会、2015 年 2 月 7 日、札幌コンベンションセンター, 札幌 (招待講演)

森一生. X 線 CT 画像の非線形的画質特性と物理評価. 第 15 回千葉県 CT 研究会、2014 年 8 月 30 日、千葉大学, 千葉 (招待講演)

森一生. 最近の逐次近似「応用」法による CT 画像について. 第 10 回 Imaging Now in

Kanagawa、2014 年 5 月 24 日、日赤横浜ホール、横浜 (招待講演)

森一生. CT の画質の限界. 第 19 回宮城 CT 診断・技術研究会、2014 年 4 月 19 日、星陵会館, 仙台 (招待講演)

森一生. CT 開発と提言. 第 32 回医用画像工学会、2013 年 8 月 1 日、日本科学未来館 / 産業技術総合研究所臨海副都心センター、東京 (招待講演)

②森一生. 画像再構成. 第 1 回 日本 CT 技術研究会 (JSCT2013)、2013 年 6 月 29 日、広島大学, 広島 (招待講演)

②森一生. 画質評価は難しくなってきた. 第 13 回瀬戸内 CT サイエンスセミナー講演 広島、2012 年 9 月 8 日、エソール広島, 広島 (招待講演)

③森一生. 古い話 TCT-900S と新しい話 (画質評価の問題). 第 10 回 秋田 CT テクノロジーフォーラム、2012 年 7 月 14 日、フォーラム秋田, 秋田 (招待講演)

〔図書〕(計 2 件)

森一生. 他. 日本医用画像工学会、医用画像工学ハンドブック (2012 年 9 月)

森一生. 他. 丸善. 初学者のための原子力・量子・核融合の事典 第 IV 分冊、(2014 年 12 月)

〔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 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
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

森 一生 (MORI ISSEI)

東北大学・大学院医学系研究科・大学院非常勤講師

研究者番号：90375171

(2) 研究分担者

)研究分担者

町田 好男 (MACHIDA YOSHIO)

東北大学・大学院医学系研究科・教授

研究者番号：30507083

(3)連携研究者

()

研究者番号：