

平成 30 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K09883

研究課題名(和文) 逐次近似的再構成法によるX線CT画像の三次元的画質実態解明

研究課題名(英文) Three-dimensionally consolidated reality of image quality of CT images reconstructed by iterative reconstruction methods

研究代表者

森 一生 (Mori, Issei)

東北大学・医学系研究科・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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：X線CT画像の雑音(すなわちX線被曝線量)を減らしつつ画質を向上できるとして逐次近似再構成が台頭しており、現在の画像再構成法より優れるとする評価報告が相次いでいる。しかし、それら報告は視認容易なテスト被写体で画質評価している。また、体軸方向の解像力が織り込まれていない。本研究では視認性不良なテスト被写体による画質測定法を開発するとともに、画質指標に体軸方向解像力を正確に織り込んだ。この方法で見ると、逐次近似再構成は現在の画像再構成法と同等以下の成績となる。すなわち、逐次近似再構成で視認性不良の被写体が視認性良好となることはなく、実質的画質改善(検出能向上、被曝低減)の効用は無いと結論された。

研究成果の概要(英文)：Iterative reconstruction (IR) methods is said to reduce radiation dose while maintaining image quality. Numerous task-based image quality assessment, which mimics clinical tasks, support the superiority of IR methods over existing filtered backprojection (FBP) method. However, the test object is visually too distinct: it does not reflect clinically difficult/important task. Further, it ignores slice sensitivity profile (SSP). We developed methods to measure in-plane resolution and SSP using indistinct test objects buried in noise. We also measured three-dimensional noise power spectrum (NPS) accurately. Using these methods, we evaluated matched filter SNR (MFSNR) of indistinct object for images of IR and FBP. Resultantly, none of three IR methods showed better MFSNR than FBP. Consequently, IR methods do not improve the detectability of indistinct object: radiation dose cannot be reduced. The predominant task-based evaluation method necessarily overvalues IR methods.

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 の X 線被曝抑制と画質向上のために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, IR) である。IR は「画像をぼかさずに雑音 (すなわち被曝) を低減する」とされている。

これについては、我々の科研費の助成を受けた前回の研究 (基盤研究 C、課題番号 24601003) で、それらの誤りがある程度明らかにした: 通常の画質評価法では線形性を前提としてコントラスト雑音比 CNR (contrast-to-noise ratio) の高いテスト被写体で評価をする。ところが、IR による画像は非線形で画質特性が被写体依存で変わるので、非線形画像の画質の過大評価となる。臨床での軟部組織のような低 CNR 被写体に特化した評価では IR の優位性は否定される。しかるに、それでも事態は片付かなかった。その後さらに多様な IR が公表され続け、それらは非線形の様子も複雑化しており、さらに研究の要がある状況となっている。

(2) 一方、task-based assessment という評価法が米国の研究集団から発表された。これは、臨床での軟部組織などの診断のような具体的「タスク」を意識した状況で画質測定をする。前記の我々の研究と似ているが、圧倒的に大規模なスタディであり、その影響力は強く、従来型の画質評価を駆逐したという点で功績は多大である。本邦でもこの task-based 評価が金科玉条となり、多数の研究者が「IR は FBP より優れる。線量を減らせる。」と結論し続けている。

しかし我々はこれら報告は依然として評価法に問題 (後述) があると考え。実際に、厳格な視知覚的試験により検出能 (視認性) において IR の優位性を否定した報告がある。視知覚試験と矛盾する画質評価は是認され得ないであろう。

(3) 従って、最近の IR 法の実力を検出能の観

点で明らかにし、現状の task-based 評価法の問題を明らかにしなければならない。さもなくば、IR 法の過信と誤用は免れず、混迷のままでは正常な技術発展も阻害されよう。

2. 研究の目的

(1) まず、現状の評価手法について我々の思う問題を解決する。

task-based 評価は、低 CNR 指向とは言え、十分低 CNR 条件にチャレンジできていない。この方法では、中低コントラストのテスト被写体エッジで解像力 (modulation transfer function, MTF) を測り、平坦部で雑音パワースペクトル (Noise Power Spectrum, NPS) を測り、MTF と NPS から画質指標として detectability index d^{Γ} と称して matched filter SNR (MFSNR) を算出する。しかし、十分低 CNR で無い限り非線形問題を回避出来ず、エッジ部と平坦部とでは IR の動作状態が違う。MFSNR は線形前提の指標であるから d^{Γ} は意味を失う。また、 d^{Γ} は本来は視認性不良な状況での検出能の指標であるから、視認性良好な状況では意義を持たない。すなわち、非線形の回避と真の意味での画質評価との両面において、視認性不良なテスト被写体で評価せねばならない。

最近の IR の多くは、低 CNR 構造の体軸方向解像力を犠牲にして、すなわち slice sensitivity profile (SSP) を厚くして雑音抑制を果たしている。現行評価法は、FBP の画像ととっさり厚切りの IR の画像とを、SSP の土俵が違うままに比較している。本件に関連して低 CNR 構造のエッジで SSP を計測する試みもされているが、十分に低 CNR には至らず、非線形問題を脱却できているか疑わしい。さらに、測定した SSP を正しい形で画質評価指標に織り込む三次元統合の方法は未確立である。

NPS の測定にも課題がある。現状ではアキシャル面内だけで NPS を測定しており (こ

れを NPS_a と記す) 体軸 (z 方向) の NPS_z が無視されている。IR と FBP とでスライス厚の土俵を揃えるために、すなわち低 CNR の SSP の違いを雑音レベルの違いに換算するために、NPS_z も測定する必要がある。現況ではこの認識が抜け落ちている。

(2) 以上を解決し、近年の複雑化した IR は、果たして真の意味で雑音低減をしつつ解像力を確保できるのか、明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 解像力の基本計測量である MT と SSP について、新たな計測手法を開発する。

超低 CNR での MTF 計測法として、水中で軽金属細線を用いた傾斜ワイヤ法を開発する。複数種ワイヤで同時に多レベルの CNR で MTF 計測できる。(現況でデフォルト法のエッジ法は超低 CNR 対応は不可能と判断)

超低 CNR での SSP 計測法として、薄い樹脂層を用いたディスク法を開発する。複数種シートを用い、同時に多レベルの CNR で SSP 計測できる。

(2) 体軸方向の土俵を揃えた三次元統合評価法を開発する。

これを正確に行うには、体軸方向の NPS_z が必要となる。NPS_z の正確な計測法は公表されておらず、開発する。アキシャル面内の NPS_a も従来に優る計測精度とする。

IR 法の画像の超低 CNR での SSP を FBP 法の SSP と同等にしたときに、IR 法の画像の NPS_a は理論上 $K_z \times NPS_a$ となる。この K_z の算出理論を得る。(次項の検出能指標の算出にはこの $K_z \times NPS_a$ を用いる。そして、 K_z は各線量レベル毎に最低コントラストの SSP から得た値を用いる。)

(3) 以上より得た基本計測量を三次元的に総合した画質指標を三種の IR 法について求め、FBP 法と対比する。

具体的には、東芝の CT 装置 Aquilion One に実装された AIDR-3D の strong モードと mild モード、同じく Aquilion One の FIRST

の Body モードと LCD モード、GE 社の CT 装置 Revolution EVO に実装された ASiR-V の 50%モードと 100%モードである。それぞれの CT 装置の FBP 法(再構成関数は標準腹部用)の画像と対比する。

X 線管電流レベルは 10, 50 300 mA の三段階とする。テスト被写体は小径 (180mm) 水中に入れ、システムの最小スライス厚でヘリカルスキャンする。その他詳細な試験条件はここでは記述省略する。

総合的画質指標として現状は detectability index(検出能指標) d^{Γ} として Prewhitening 型の MFSNR が用いられている (d_{PW}^{Γ} と記す)。これは理想観察者の検出能を示す値であり、MTF や NPS の計測誤差に過敏であるから、最適では無いと考える。従って、人間のパフォーマンスに近く、測定誤差にロバストな Nonprewhitening 型の MFSNR も検出能指標として算出する (d_{NPW}^{Γ} と記す)。

検出能指標の算出に当たり、どのような信号を対象とするか決めねばならない。現状の task-based 法ではこの扱いが曖昧な点も問題として懸念される。我々は基本計測量の測定条件から少しも乖離することのないよう、MTF 計測をした超低 CNR のワイヤそれ自身を対象信号とする。

4. 研究成果

(1) 基本量の測定法として次の成果を得た。画像上でテスト被写体(ワイヤ)を視認できないほどの超低 CNR 条件(図 1)でも安定かつ正確な MTF が得られた。委細は論文で発表した。

SSP 計測も、画像上でテスト被写体(樹脂板)が視認性不良な超低 CNR 条件(図 2)で正確な SSP を得る事が出来た。特異な誤差源(現況のエッジ法による SSP 計測もこの問題を被っている)を同定し、解決手法を得た。委細は論文投稿中である。

なお、MTF 計測と SSP 計測と双方において、我々の方法では小信号の信号量も計測でき

る。IR 法ではいずれの信号量も必ずしも保存されないことを発見した(特に SSP 信号量減少は予想外)。

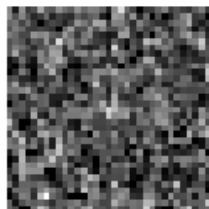


図 1 中央に視認困難な低 CNR ワイヤがある。それでも正確な MTF が得られる。

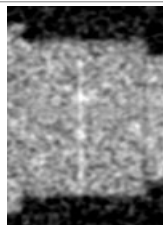


図 2 不明瞭な層(サジタル画像中央)でも正確な SSP が得られる。

(2) NPS 計測法として 3 次元フーリエ変換法で同時にアキシャル面内 NPS_a と体軸方向 NPS_z を正確に得る方法を開発した。IR 法において低 CNR の SSP と NPS_z から、アキシャル面内の雑音スペクトル NPS_a の補正をする係数 K_z を算出する理論式も得た(理論式記述は割愛)。近似が無いので、SSP と NPS_z が異形であっても正確な K_z となる。

(3) 各 IR 法の各ケースで上記手法により基礎計測として MTF, SSP, NPS (NPS_a と NPS_z)、K_z を得たが、それらのデータは大量なのでここでは示さない。ただ、特異な SSP の例を図 3 に示す。IR 法の一部では低コントラストにおいてこのように極端に厚く異様なほどに異形の SSP となるのである(新知見、未報告)。

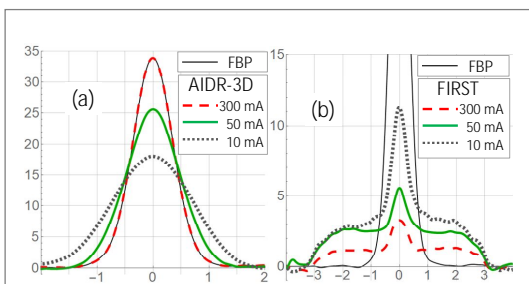


図 3 超低 CNR 層で得た SSP。左は AIDR-3D の Strong モード、右は FIRST の Body モードの SSP の線量(雑音レベル)依存性状況。

以下では、それらを集約した検出能指標 d_{PW}^{Γ} と d_{NPW}^{Γ} とを示し、概説する。グラフでは全て、管電流 10mA と 50mA のみ示し、300mA の図示は略す。グラフの三本のバーは三種の

再構成法に対応するが、三本組が三つあるのは、用いた低コントラストワイヤの三種類と対応する。左からコントラストの低い順に、Ti0.1, Al0.3, Ti0.15 と仮称するが、Ti0.1 が最も低コントラストである。検出能指標値はそのようなワイヤでの値である。

図 4 から、AIDR-3D によって検出能指標値が FBP より向上することはないことが明らかである。理想観察者の検出能 d_{PW}^{Γ} ではわずかに改善する場合も、誤差範囲でしか無い。人間の検出能に近い d_{NPW}^{Γ} では AIDR-3D はむしろ FBP より劣る。通常は AIDR-3D のほうが優れると結論されているが、それは低 CNR の SSP を無視しているからである。

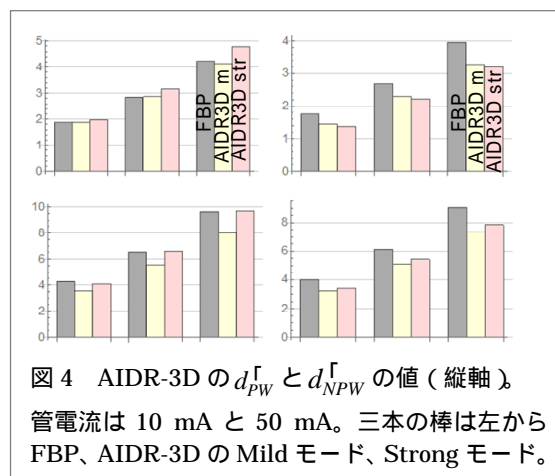


図 4 AIDR-3D の d_{PW}^{Γ} と d_{NPW}^{Γ} の値(縦軸)。管電流は 10 mA と 50 mA。三本の棒は左から FBP、AIDR-3D の Mild モード、Strong モード。

図 5 は ASiR-V の検出能評価結果である。ここで、重要なのは FBP での d_{PW}^{Γ} や d_{NPW}^{Γ} が 5 程度以下のケースである。それ以上の高い値においては被写体の検出率は既にほぼ 100% なので検出能向上の意味がないからである。このように見たとき、少なくとも d_{NPW}^{Γ} で見る限り ASiR-V による実質的な検出能向上は皆無である。また、FBP での値が既に高い場合は、ASiR-V による検出能向上は顕著に見えるが、これは CNR が十分低いテスト被写体での MTF が用いられているため非線形問題を十分回避できていない、すなわち現況の評価法と同様の問題が露呈しているものであろう。そしてその過大評価の傾向は、理由説明は略すが、 d_{PW}^{Γ} を用いると顕著となる。 d_{NPW}^{Γ} のほうが IR 法の過大評価の危険は

やや緩和するのである。

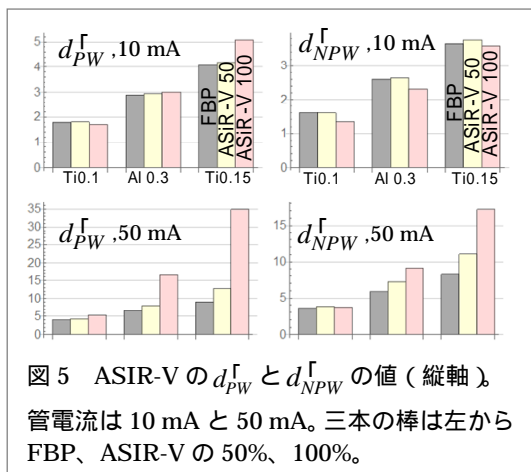


図5 ASIR-Vの d_{PW}^{Γ} と d_{NPW}^{Γ} の値(縦軸)、管電流は10 mAと50 mA。三本の棒は左からFBP、ASIR-Vの50%、100%。

図6はFIRSTの検出能評価結果である。この場合、 d_{PW}^{Γ} と d_{NPW}^{Γ} の違いが著しいが、いずれにせよFBPでの検出能が低いときにはFIRSTの検出能はFBP未満である。この理由は、図3のように著しくSSPが悪化している割に雑音がそれほど低下しないという意外な特性(データ開示省略)が原因している。FBPでの値が既に高い場合の d_{PW}^{Γ} はFIRSTで向上して見えるが、視認性良好な状況での向上には実質的な意義が無いし、そもそも十分低CNRでないために非線形を回避できていないという評価の誤謬であろう。本例も、 d_{PW}^{Γ} ではIR法を過大評価する傾向が顕著であることを示している。管電流が300mA(図示しない)ではさらにこの傾向が顕著となる。

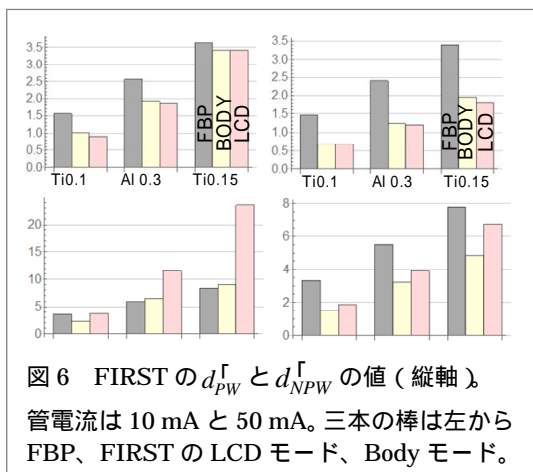


図6 FIRSTの d_{PW}^{Γ} と d_{NPW}^{Γ} の値(縦軸)、管電流は10 mAと50 mA。三本の棒は左からFBP、FIRSTのLCDモード、Bodyモード。

(4) 以上の成果をまとめると、次のようになる。これらについては論文執筆中である。

視認性が不十分な低CNRの被写体での解

像力の計測法を得た。

低CNRでのSSPの相違を正確に計算に織り込む必要と、その方法を明らかにした。

以上により、視認性不十分な被写体ではIRは検出能を改善しないと確認された。すなわち、視知覚試験と矛盾しない結果を初めて物理評価で得ることができた。

視認容易な被写体と理想観測者の d_{PW}^{Γ} を用いる現況評価法ではIRを過大評価する。

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6件)

Tominaga C, Azumi H, Goto M, Taura M, Homma N, Mori I. Tilted-wire method for measuring resolution properties of CT images under extremely low-contrast and high-noise conditions. Radiol Phys Technol (2018) (in press) (査読有り)

富永千晶, 安海弘樹, 後藤光範, 田浦将明, 本間経康, 森一生. PSF法による超低CNR条件でのMTF測定について. Proceedings of JSCT 4th Annual Meeting (JSCT2016) p23-26, 16004 (査読有り)

後藤光範, 田浦将明, 富永千晶, 森一生. 新しい逐次近似再構成法における体軸方向解像力の検討. Japanese Journal of Computed Tomography Technology (JJCT) Vol.4 Number 1, July 2016 p27-31 (査読有り)

森一生. CTにおける画質の物理指標について. インナービジョン 30(11): 2-4 2015 (査読無し)

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) 8:178-192 (査読有り)

富永千晶, 安海弘樹, 後藤光範, 田浦将明, 本間経康, 森一生. 円形エッジ法によるMTF計測: 低コントラスト条件での回転中心近傍配置の問題について. Proceedings of JSCT vol.3, 64-66, 2015 (査読有り)

〔学会発表〕(計12件)

M. Goto, M. Taura, C. Tominaga, H. Azumi, N. Homma, I. Mori. Evaluation of Hybrid-type Iterative Reconstruction using 3D-consolidated Signal to Noise Ratio in Computed Tomography. 日本放射線技術学会第73回総会学術大会, 2017.4.13-16, パシフィコ横浜, 横浜

C. Tominaga, H. Azumi, M. Goto, M. Taura,

N.Homma, I. Mori. The Measurement of Signal Quantity Change in Iterative Reconstruction. 日本放射線技術学会第73回総会学術大会, 2017.4.13-16, パシフィコ横浜, 横浜

C. Tominaga, H. Azumi, M. Goto, M. Taura, N.Homma, I. Mori. Accurate Measurement of Modulation Transfer Function of CT from Extremely Low-contrast Non-zoomed Wire Image. 102nd Scientific Assembly & Annual Meeting of the Radiological Society of North America, 2016.11.27-12.2, Chicago (USA)

C. Tominaga, H. Azumi, M. Goto, M. Taura, N.Homma, I. Mori. Measurement of Low-contrast Modulation Transfer Function of CT image: Revisit of Averaging Method to Cope with Noise. 102nd Scientific Assembly & Annual Meeting of the Radiological Society of North America, 2016.11.27-12.2, Chicago (USA)

富永千晶, 安海弘樹, 後藤光範, 田浦将明, 本間経康, 森一生. PSF 法による超低 CNR 条件での MTF 測定について. JSCT2016 日本 CT 技術学会第4回学術大会, 2016.6.25, 大阪市立総合医療センター, 大阪

富永千晶, 安海弘樹, 後藤光範, 本間経康, 森一生. 低 CNR 条件の MTF 測定における加算平均方法の比較. 第72回日本放射線技術学会総会学術大会, 2016.4.14-17, パシフィコ横浜, 横浜

安海弘樹, 後藤光範, 富永千晶, 本間経康, 森一生. PSF 法における MTF の位置依存性とその改善, 第72回日本放射線技術学会総会学術大会, 2016.4.14-17, パシフィコ横浜, 横浜

M. Goto, M. Taura, C. Tominaga, H. Azumi, N. Homma, I. Mori. Longitudinal resolution of CT images reconstructed by IR-type methods. 101st Scientific Assembly & Annual Meeting of the Radiological Society of North America, 2015.11.29-12.4, Chicago (USA)

M. Goto, C. Tominaga, M. Taura, H. Azumi, N. Homma, I. Mori. A Method to Measure Slice Sensitivity Profile of Recent Non-linear CT Images at Low Contrast-to-Noise. 101st Scientific Assembly & Annual Meeting of the Radiological Society of North America, 2015.11.29-12.4, Chicago (USA)

富永千晶, 安海弘樹, 後藤光範, 田浦将明, 本間経康, 森一生. 円形エッジ法による MTF 計測 - 低コントラスト条件での回転中心近傍配置の問題について -. 日本 CT 技術学会第3回学術大会 2015.6.27, 北里大学白金キャンパス, 東京

後藤光範, 田浦将明, 富永千晶, 森一生. 新しい逐次近似再構成法における体軸方向解像力の検討. 日本 CT 技術学会第3回学術大

会 2015.6.27, 北里大学白金キャンパス, 東京

富永千晶, 後藤光範, 佐藤和宏, 本間経康, 森一生. 低コントラスト直線エッジ法による CT の MTF 測定の問題について. 第71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, 横浜

〔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

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

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

本間経康 (HOMMA NORIYASU)
東北大学・大学院医学系研究科・教授
研究者番号 : 30282003

(4) 研究協力者

後藤光範 (GOTO MITSUNORI)