資料

逐次近似応用再構成法がCT画像の物理特性に及ぼす影響：
小児体幹部CT検査を想定した検討論文受付
2019年11月19日論文受理
2020年7月16日

Code No. 251

桐木雅人 村岡里奈 前田勝彦 池内陽子 青山周平 中野伸哉 琴浦規子

兵庫医科大学病院放射線技術部

緒言

小児がんのうち、神経芽腫は白血病・脳腫瘍について多く認められる腫瘍である¹⁾。このような腫瘍性病変に対して、X線コンピュータ断層撮影(computed tomography: CT)検査は腫瘍の局在や広がりの評価に優れ、病期の判断にも有用である²⁾。しかし、小児は成人よりも放射線感受性が高く、被ばくによる影響が成人よりも2~3倍受けやすく³⁾、CT検査の被ばく線量の最適化は極めて重要である。2015年6月に「最新の国内実態調査結果に基づく診断参考レベルの設定」⁴⁾が発表され、CTにおいても適切な診断参考レベル(diagnostic reference level: DRL)としての標準的な診断線量が設定された。その中には小児CTにおけるDRLも定められており、被ばく線量の最適化に対す

る関心が以前に増して高まっている。

近年、CT装置の進歩により被ばく低減のための技術が発展してきており、ソフトウェアの面ではノイズの少ない画像が得られる再構成アルゴリズムが各社で開発されている。その中には、逐次近似再構成法(model-based iterative reconstruction: MBIR)^{5,6)}、逐次近似応用再構成法(hybrid IR)、あるいは深層学習を応用した画像再構成法(deep learning based reconstruction: DLR)^{7,8)}などが臨床現場で導入され始めている。その中でもhybrid IRはメーカー・機種にかかわらず多くの装置で使用することができ、画像再構成に有する時間も従来から使用されていた方法であるfiltered back projection(FBP)と遜色ない速さで再構成が行えるため、臨床現場では広く普及してきている。

Effects of Iterative Reconstruction on Image Quality of Pediatric Body Computed Tomography Images

Masato Kiriki,* Rina Muraoka, Katsuhiko Maeda, Yoko Ikeuchi, Shuhei Aoyama, Shinya Nakano, and Noriko Kotoura

Department of Radiological Technology, Hyogo College of Medicine College Hospital

Received November 19, 2019; Revision accepted July 16, 2020

Code No. 251

Summary

This study evaluated the effects of three types of hybrid iterative reconstruction (IR) on image quality of pediatric body computed tomography images. The image quality components evaluated were noise power spectrum (NPS), task-based modulation transfer function (TTF), and system performance function (SPF). As the IR strength was increased while reducing the radiation dose, the NPS increased in a low-frequency range and the TTF decreased in low-contrast regions. In the low-contrast regions, the calculated SPF decreased over the entire frequency range. Alternatively, in the high-contrast regions, the SPF decreased in the low-frequency regions and increased in the high-frequency regions. The radiation dose reduction using the hybrid IR resulted in the deterioration of the image quality in the low-contrast regions and changes in the spatial frequency characteristics in the high-contrast regions.

Key words: hybrid iterative reconstruction, image quality, pediatric body computed tomography (CT), radiation dose reduction

*Corresponding author

しかし、MBIR や hybrid IR を使用した近年の報告では、低周波数ノイズの低減効果が低いこと⁹⁾や低コントラスト検出能の大幅な向上は期待できない^{10~12)}といった報告がある。また、小児 CT 検査は、対象となる被写体が比較的小さく、組織間コントラストが低いという特徴があり、更に被ばくの観点から低線量での撮影が望まれるが、この条件下での hybrid IR の使用は画像の鮮鋭度の低下やテクスチャが変化する^{13~16)}といった問題点が懸念される。そのため、小児 CT 画像への hybrid IR の適応は十分な検証を行ったうえで臨床に導入しなければならない。

そこで本研究では、小児体幹部 CT 検査における被ばく線量低減と画質の維持を目的とした hybrid IR の導入が CT 画像の物理特性に及ぼす影響について検証したので報告する。

1. 使用機器および方法

1-1 CT 装置および hybrid IR

装置は SOMATOM Definition Edge (Siemens Healthcare, Erlangen, Germany), Discovery MI DR PET/CT (General Electric Healthcare, Waukesha, WI, USA) および Ingenuity TF PET/CT (Philips Healthcare, Andover, MA, USA) を使用した。hybrid IR には sinogram affirmed iterative reconstruction (SAFIRE, Siemens Healthcare), adaptive statistical iterative reconstruction (ASiR, General Electric Medical Systems) および iDose⁴ (Philips Healthcare) を使用した。なお、三つの hybrid IR はノイズ低減レベル (IR 強度) を変更することができる。

1-2 使用ファントム

ファントムには、noise power spectrum (NPS) 測定用として直径 200 mm の水ファントム (Siemens Healthcare) を使用した。また、task-based modulation transfer function (TTF) 測定用として水を封入した直径 200 mm のアクリルファントム (CT 用テストファントム CT-200 形、京都科学) 内に直径 50 mm のアクリルおよび 30 mm の ABS 樹脂 (管電圧 120 kV において CT 値が 120 Hounsfield unit (HU) および -30 HU) 製の円柱ロッドを配置して作成した自作ファントム (Fig. 1) を使用した。エッジデバイスの大きさや形状の違いが TTF の測定結果に影響しない¹⁷⁾ことから、異なる大きさの円柱ロッドの使用は結果に影響しないものとした。また、撮影時には小児用固定具 (Siemens Healthcare) を使用して Fig. 2 のようにファントムの固定およびアライメント調整を行った。

Fig. 1 Schematics of the phantom to measure TTF. Phantom had two contrast objects; the area around them was filled with water.

Fig. 2 Phantom placed on the pediatric fixture.

1-3 撮影条件

基本撮影条件は、「X 線 CT 撮影における標準化～GALACTIC～(改訂 2 版)」¹⁸⁾に準拠するように各装置で可能な限り同等な条件を設定した。Table 1, 2 に各装置における基本撮影条件および画像再構成条件を示す。

撮影線量は、FBP 法による再構成画像のノイズ量が GALACTIC 推奨の範囲内である標準偏差 (standard deviation: SD) 8 となる線量を各装置で基準線量として決定した。この基準線量から Table 3 のように線量を下げるとともに IR 強度を上げていき、各 IR 強度で再構成画像のノイズ量が SD 8 となるように撮影線量を決定した。このとき、各 hybrid IR の IR 強度は三つのレベル (SAFIRE では 1, 3, 5, ASiR では 20, 60,

Table 1 Uniform scan parameters

	GALACTIC	Siemens Healthcare	General Electric Healthcare	Philips Healthcare
Tube voltage [kVp]	120	120	120	120
Collimation [mm]	0.5–1.25	0.6	0.6	0.625
Pitch	–	0.9	0.938	1.015
Rotation time [s]	≤0.5	0.5	0.5	0.5

Table 2 Uniform reconstruction settings

	Siemens Healthcare	General Electric Healthcare	Philips Healthcare
Field of view [mm]	200	200	200
Slice thickness [mm]	5.0	5.0	5.0
Slice interval [mm]	0.5	0.5	0.5
Hybrid IR	SAFIRE	ASiR	iDose ⁴
Kernel	B31 (FBP) I31 (SAFIRE)	Standard B	Standard

Table 3 Scan dose and IR strength

SAFIRE				ASiR			
Reconstruction	Tube current-time product [mAs]	CTDI _{vol} (32 cm) [mGy]	SSDE [mGy]	Reconstruction	Tube current-time product [mAs]	CTDI _{vol} (32 cm) [mGy]	SSDE [mGy]
FBP	67	4.5	8.1	FBP	85	8.2	14.8
IR 1	54	3.7	6.7	IR 20%	68	6.5	11.7
IR 3	32	2.2	4.0	IR 60%	43	4.1	7.4
IR 5	13	0.9	1.6	IR 100%	25	2.4	4.3

iDose ⁴			
Reconstruction	Tube current-time product [mAs]	CTDI _{vol} (32 cm) [mGy]	SSDE [mGy]
FBP	84	5.5	9.9
IR 2	61	4.0	7.2
IR 4	45	2.9	5.2
IR 6	30	2.0	3.6

100%, iDose⁴では2, 4, 6)となるように設定した。なお、SDの測定は各装置でNPS測定用の水ファントムを基本撮影条件にて撮影し、再構成画像の中央にファントム径の約40%サイズの関心領域(region of interest: ROI)を設定して求めた。

1-4 FBP および hybrid IR の物理特性の評価

1-4-1 NPS 測定

各装置において水ファントムを装置のオンセンタにて20回撮像を繰り返した。得られた画像のうち、それぞれ中央の1スライスを使用し256×256ピクセル

のROIを設定してradial frequency法¹⁹⁾にてNPSを20回算出した。統計誤差を少なくする目的で20回分のNPSのデータを加算平均した。得られたNPSより最大値を示す周波数(ピーク周波数)を求めた。

1-4-2 TTF 測定

本研究では、腫瘍性病変を想定して造影前後における腫瘍のコントラスト差を水(CT値0HU)とABS樹脂(CT値-30HU)およびアクリル製(CT値120HU)の円柱ロッドで模擬した自作ファントムを使用した(以下、CT値差30HUを低コントラスト物体、120HUを高コントラスト物体とする)。小児用固定具に

Fig. 3 NPS curves of FBP and hybrid IR.

There are shown from left to right, SAFIRE (a), ASiR (b), and iDose⁴ (c). The NPS value increased on the low spatial frequency side when IR strength was higher.

a | b | c

ファントムを配置し、各装置のオフセンタにて20回撮影を繰り返し、50枚ずつ画像を再構成した。このとき、ファントムのアライメント不良による測定精度の低下を防ぐために再構成画像の最初と最後のスライスの円柱ロッドに対してXおよびY方向にそれぞれプロファイルカーブを求め、位置ずれがないかを確認した。得られた計1000枚の画像から加算平均処理を行って評価用画像を作成し、circular edge法²⁰⁾にて2種類の円柱ロッドからそれぞれTTFを算出した。なお、modulation transfer function(MTF)測定の精度に関してUrikuraらは、評価画像がCNR 28以上を担保できる程度の画像加算が必要²¹⁾としており、本研究の1000枚加算によって得られた評価画像はいずれもCNR 28以上のノイズレベルを満たしていた。また、TTFを算出する際の合成line spread function(LSF)のzeroing不良によるトランケーションエラーを抑える目的で各評価画像を5回ずつ測定し、その平均値を最終的なTTFとした。

NPSとTTFの算出には日本CT技術学会より提供されている画像解析ソフトCT measure²²⁾ (Ver.0.98f)を使用した。

1-4-3 System performance function (SPF) の算出

非線形画像処理であるhybrid IRのノイズ特性と画像特性を加味したシステム性能を評価する目的で、NPSおよびTTFの結果より式(1)を用いて空間周波数の関数であるSPF^{23~25)}を算出した。

$$SPF(f) = \sqrt{\frac{TTF(f)^2}{NPS(f)}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

このSPFの結果より、hybrid IRを使用して線量低減を行った画像の空間周波数特性がFBPと比較して

どのような変化が生じるかを検討した。

2. 結果

2-1 NPS 測定

Figure 3にNPSの結果を示す。FBPと各hybrid IRを比較した場合、空間周波数が約0.4 cycles/mm以上の帯域で、SAFIREではIR強度にかかわらずFBPと同程度(Fig. 3a)、ASiRとiDose⁴では線量を下げてIR強度を高くするにつれてFBPよりも低値のNPSを示した(Fig. 3b, c)。しかし、空間周波数が約0.4 cycles/mm未満ではIR強度にかかわらずすべてのhybrid IRでFBPよりも高値を示し、更にこの傾向は線量を下げてIR強度を高くするほど観察された。ここで、各NPSより求めたピーク周波数をTable 4に示す。すべてのhybrid IRでIR強度が高いほどピーク周波数が低周波数側へ変化する傾向を示した。

2-2 TTF 測定

Figure 4にTTFの結果を示す。低コントラスト物体におけるTTF(Fig. 4a~c)は、すべてのhybrid IRとも線量を下げてIR強度を高くしていくにつれてFBPよりも低値を示した。一方で、高コントラスト物体におけるTTFは、3種類のhybrid IRでそれぞれ異なる傾向を示した。FBPのTTFと比較した場合に、線量を下げてIR強度を高くするにつれてSAFIREでは上昇(Fig. 4d)、ASiRでは低下が認められ(Fig. 4e)、iDose⁴ではFBPと同等の値を示した(Fig. 4f)。

2-3 SPF の算出

Figure 5にSPFの結果を示す。低コントラスト物体におけるSPFでは、すべてのhybrid IRとも線量を

Table 4 NPS peak frequencies in three hybrid IRs

SAFIRE		ASiR		iDose ⁴	
Reconstruction	NPS peak frequency [cycle/mm]	Reconstruction	NPS peak frequency [cycle/mm]	Reconstruction	NPS peak frequency [cycle/mm]
FBP	0.25	FBP	0.26	FBP	0.25
IR 1	0.20	IR 20%	0.25	IR 2	0.21
IR 3	0.16	IR 60%	0.21	IR 4	0.18
IR 5	0.13	IR 100%	0.17	IR 6	0.16

Fig. 4 TTF curves of FBP and hybrid IR.

The upper row shows TTF results obtained from an object of $\angle 30$ HU, and the lower row shows TTF results obtained from an object of $\angle 120$ HU. There are shown from left to right, SAFIRE (a, d), ASiR (b, e), and iDose⁴ (c, f). The TTF value obtained from an object of $\angle 30$ HU decreased when IR strength was higher on each hybrid IR. On the other hand, the TTF value obtained from an object of $\angle 120$ HU increased on SAFIRE, decreased on ASiR, and maintained on iDose⁴.

a	b	c
d	e	f

下げて IR 強度を高くしていくにつれて、ほぼ全周波数域で FBP よりも低値を示した (Fig. 5a~c). 一方で、高コントラスト物体における SPF では、すべての hybrid IR とともに低周波数側では FBP よりも低値に、高周波数側になるにつれて FBP よりも高値になる傾向

となり (Fig. 5d~f), その程度は三つの hybrid IR で異なる結果となった. 特に SAFIRE の IR 3 および 5 では、高周波数側において最低周波数の SPF を超える値となった (Fig. 5d).

Fig. 5 SPF curves of FBP and hybrid IR.

The upper row shows SPF results obtained from an object of Δ 30 HU, and the lower row shows SPF results obtained from an object of Δ 120 HU. There are shown from left to right, SAFIRE (a, d), ASiR (b, e), and iDose⁴ (c, f). The SPF value obtained from an object of Δ 30 HU decreased when IR strength was higher on each hybrid IR. On the other hand, the SPF value obtained from an object of Δ 120 HU decreased in the low spatial frequency side and increased in the high spatial frequency side.

a	b	c
d	e	f

3. 考 察

本研究では、小児体幹部 CT 検査へ hybrid IR を導入するにあたり、IR 強度を変調させながら撮影線量を段階的に下げていく線量低減方法が画像の物理特性にどのような影響を与えるかを FBP との比較によって検討した。

NPS に関して、藤原²⁶⁾ は標準線量の FBP と比較した場合の 40% 線量低減した adaptive iterative dose reduction (AIDR) 3D (mild) の NPS の特徴は、低周波数帯域で高値、高周波数帯域で低値となると示している。また、原田⁹⁾ の報告では AIDR 3D の IR 強度が高くなるほど NPS の低周波数成分の極端な上昇を認めている。本研究で使用した hybrid IR は藤原²⁶⁾ や原田⁹⁾ の報告とは異なるメーカーのものであるが、3 種類の hybrid IR とともに線量を下げながら IR 強度を高めていくほど低周波数成分の NPS の上昇を認めている

(Fig. 3)。このことから、メーカーにかかわらず hybrid IR は線量低減をした際に増加するノイズのうち、抑制しきれない低周波数成分のノイズが残留してしまい、これに高周波数帯域のノイズ低減効果による NPS の低下が加わることから、結果的に NPS のピーク周波数が低周波数側へシフトする現象が生じると考える。本研究では、各 hybrid IR において IR 強度が高いほどピーク周波数が低周波数側へシフトする傾向を示した (Table 4)。このピーク周波数のシフトは画像のノイズテクスチャの変化と関連があり²⁷⁾、Afadzi らの報告^{28, 29)} では低周波数側へのシフトは粗いノイズテクスチャの画像へと変化させ診断に影響を及ぼすと述べている。したがって、hybrid IR を使用した画像は、線量低減率に応じて IR 強度を高めていくとノイズテクスチャが粗くなり、診断能を低下させる危険性があると考えられる。

TTF に関しては、各 hybrid IR とも線量を下げているとともに IR 強度を高くするほど低コントラスト物体の TTF の値が低下した (Fig. 4a~c). タスクベースの解像特性を表す TTF に関して、Richard ら²⁰⁾ は、IR 法においては対象物体のコントラスト差と線量 (画像ノイズ量) に依存するとしたうえで、線量が低くなるにつれて ASiR (IR 50%) の TTF が低下することを示している。本研究では線量を下げながら IR 強度を高くして画質の維持を試みたが、三つの hybrid IR はいずれも線量の低減率とともに TTF の低下を認めた。これは Richard らの結果と同様な傾向を示しており、低コントラスト物体において、線量を低減した場合に hybrid IR では TTF の維持ができないことを意味する。つまり、CT 値差 30 HU 程度の低コントラスト物体では再構成法の種類にかかわらず、線量を下げると解像特性が劣化することが考えられる。一方で、高コントラスト物体の TTF では三つの hybrid IR で異なる傾向を示した (Fig. 4d~f)。これはエッジ抽出アルゴリズムの違いが関連しており、CT 値差 120 HU のタスクにおいては、SAFIRE ではエッジ強調、ASiR では平滑化作用に伴うエッジ成分の低下が生じ、iDose⁴ ではエッジの保存精度が他と比べて高いという特徴があると考えられる。

SPF に関しては、低コントラスト物体と高コントラスト物体で異なる傾向を示した。まず、低コントラスト物体では各 hybrid IR とも線量を下げながら IR 強度を高くするほど全周波数域において SPF が低下した (Fig. 5a~c)。Samei ら²³⁾ の報告では、SPF に信号スペクトル成分に関する関数を乗じたものの積分値として得られる detectability index (d'^2) に関して、CT 値差 120 HU のタスクでの FBP と ASiR (IR 50%) を比較するとその差は少なく、撮影線量を下げた場合には両者とも同様な d'^2 の低下率を示している。本研究では Samei らの報告よりも低いコントラスト (CT 値差 30 HU) のタスクを想定しており、このコントラストでの SPF は ASiR 以外の二つの hybrid IR でも全周波数域において低下していることから、FBP と各 hybrid IR の d'^2 の差が更に少ないことが予想される。つまり、低コントラスト物体では再構成の種類による SPF の差は少なく、撮影線量を下げた分だけ画像の周波数特性が悪くなるため、hybrid IR を使用しても画質の改善はみられないと考える。一方で、高コントラスト物体では各 hybrid IR とも線量を下げながら IR 強度を高くするほど FBP と比較して SPF が低周波数側では低く、高周波数側では高くなり (Fig. 5d~f)、特に SAFIRE の IR 3 または 5 では高周波数側の SPF が

最低周波数の値を超える傾向となった。このような SPF に関して、Kawashima らの報告²⁴⁾ では最低周波数の値を超えるのは非現実的な傾向であるとしたうえで、この異常な SPF は滑らかな背景であるにもかかわらず不自然に鋭いエッジを示す画像の特徴と関連する可能性があるとして述べている。つまり、SPF で表現される周波数特性の傾向が FBP と乖離した場合には、貼り絵状³⁰⁾ などと称されるテクスチャの画像に変化してしまう可能性があり、特に高周波数側で異常な SPF の上昇を示した SAFIRE (IR 3 および 5) では違和感のあるテクスチャになることが予想される。これらの SPF の特徴を踏まえると、hybrid IR を用いた線量低減法は、CT 値差 30 HU 程度の低コントラスト物体では線量低減率とともに画質を劣化させ、120 HU 程度の高コントラスト物体では FBP とは全く異なる周波数特性を持つ画像へと変化させてしまう可能性があると考えられる。過去の報告^{12, 15, 16)} では、IR 強度の高い hybrid IR は CT 画像の構造物の形状や鮮鋭度、テクスチャを変化させるとしている。このような問題点は本研究で示した SPF の低下あるいは周波数特性の変化の影響が関連しており、視覚評価の裏付けとなる物理指標になりうるため、視覚評価と SPF との相関関係を明らかにすることが今後の課題である。

以上より、被ばく線量低減と画質の維持を目的とした小児体幹部 X 線 CT 検査において、hybrid IR を使用した線量低減法はコントラスト差に応じて画質の低下あるいは周波数特性の変化を招く可能性があり、hybrid IR のみでの画質の維持は困難であると考えられる。

本研究にはいくつかのリミテーションがある。まず、本研究ではスライス面内の物理特性のみの評価であり、体軸方向の評価ができていない。次に、ファントムを用いた物理特性のみの検討であり、視覚評価による検出能評価や臨床画像を用いた検討を行っていない点である。更に、本研究は管電圧が 120 kV のみの検討であり、小児体幹部 CT における造影検査に関しては低管電圧撮影³¹⁾ の有用性が報告されている。このため Dual-energy CT³²⁾ も含めた低管電圧撮影³³⁾ と hybrid IR を併用することで線量低減の可能性も考えられるとして今後の課題とする。

4. 結 語

小児体幹部 X 線 CT 検査を想定し、撮影線量低減下における 3 種類の hybrid IR 画像の物理特性を評価した。線量低下に伴い、低コントラスト物体では画質の劣化、高コントラスト物体では空間周波数特性の変化が生じ、FBP と同等の画質の維持は困難であった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、画像解析ソフト CT measure の使用方法をご教示いただきました第4回CT応用セミナー講師の皆様には深く感謝申し上げます。

また、本論文の論旨は第47回日本放射線技術学会

秋季学術大会(2019年, 大阪)にて発表した。

利益相反

筆頭著者および共著者全員が開示すべき利益相反はない。

参考文献

- 1) 日本医学放射線学会. 148 神経芽腫の診断と病期診断に必要な画像検査は何か? 画像診断ガイドライン. 金原出版, 東京, 2016: 486-489.
- 2) Brisse HJ, McCarville MB, Granata C, et al. Guidelines for imaging and staging of neuroblastic tumors: consensus report from the International Neuroblastoma Risk Group Project. *Radiology* 2011; 261(1): 243-257.
- 3) National Research Council. Health risks from exposure to low levels of Ionizing radiation: BEIR VII phase 2. Washington, DC: National Academies Press, 2006.
- 4) 医療放射線防護連絡協議会, 日本小児放射線学会, 日本医学物理学会, 他. 最新の国内実態調査結果に基づく診断参考レベルの設定(平成27年6月7日). <http://www.radher.jp/J-RIME/report/DRLhoukokusyo.pdf> (Accessed 2019.11.19).
- 5) Smith EA, Dillman JR, Goodsitt MM, et al. Model-based iterative reconstruction: effect on patient radiation dose and image quality in pediatric body CT. *Radiology* 2014; 270(2): 526-534.
- 6) 平野高望, 安田光慶, 鈴木航, 他. 逐次近似応用再構成法と逐次近似再構成法における物理評価と視覚評価について: フィルター補正逆投影法との比較. *日放技誌* 2019; 66(797): 237-242.
- 7) Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E, et al. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Proc NIPS'12* 2012; 1: 1097-1105.
- 8) Tatsugami F, Higaki T, Nakamura Y, et al. Deep learning-based image restoration algorithm for coronary CT angiography. *Eur Radiol* 2019; 29(10): 5322-5329.
- 9) 原田耕平, 大橋芳也, 千葉彩佳, 他. 逐次近似応用再構成を用いた低コントラスト検出能の評価を目的とした新しい digital phantom 作成ツールの開発. *日放技学誌* 2018; 74(8): 769-778.
- 10) Baker ME, Dong F, Primak A, et al. Contrast-to-noise ratio and low-contrast object resolution on full- and low-dose MDCT: SAFIRE versus filtered back projection in a low-contrast object phantom and in the liver. *AJR Am J Roentgenol* 2012; 199(1): 8-18.
- 11) Urikura A, Hara T, Ichikawa K, et al. Objective assessment of low-contrast computed tomography images with iterative reconstruction. *Phys Med* 2016; 32(8): 992-998.
- 12) 西村一見, 田中千香子, 深尾真理, 他. 逐次近似応用CT再構成を用いた低吸収域の検出能評価—超急性期脳梗塞評価用ファントムの開発および解析—. *日放技学誌* 2016; 72(2): 157-164.
- 13) Miéville FA, Berteloot L, Grandjean A, et al. Model-based iterative reconstruction in pediatric chest CT: assessment of image quality in a prospective study of children with cystic fibrosis. *Pediatr Radiol* 2013; 43(5): 558-567.
- 14) Mannil M, von Spiczak J, Muehlematter UJ, et al. Texture analysis of myocardial infarction in CT: Comparison with visual analysis and impact of iterative reconstruction. *Eur J Radiol* 2019; 113: 245-250.
- 15) 高木 卓. (3)胸腹部領域の撮影における目的別撮影条件(ワークショップより良い撮影技術を求めて(その120)—『小児CT撮影について再考する』). *放射線撮影分科会誌* 2014; 62: 27-30.
- 16) Sagara Y, Hara AK, Pavlicek W, et al. Abdominal CT: comparison of low-dose CT with adaptive statistical iterative reconstruction and routine-dose CT with filtered back projection in 53 patients. *AJR Am J Roentgenol* 2010; 195(3): 713-719.
- 17) Takata T, Ichikawa K, Mitsui W, et al. Object shape dependency of in-plane resolution for iterative reconstruction of computed tomography. *Phys Med* 2017; 33: 146-151.
- 18) 高木 卓. 日本放射線技術学会撮影部会. X線CT撮影における標準化〜GALACTIC〜(改訂2版). 日本放射線技術学会出版委員会, 京都, 2015.
- 19) 日本放射線技術学会. 1・2・3 ノイズ特性の測定, 標準X線CT画像計測 改訂2版. オーム社, 東京, 2018: 78-84.
- 20) Richard S, Husarik DB, Yadava G, et al. Towards task-based assessment of CT performance: system and object MTF across different reconstruction algorithms. *Med Phys* 2012; 39(7): 4115-4122.
- 21) Urikura A, Ichikawa K, Hara T, et al. Spatial resolution measurement for iterative reconstruction by use of image-averaging techniques in computed tomography. *Radiol Phys Technol* 2014; 7(2): 358-366.
- 22) Ichikawa K. CTmeasure. Japanese society of CT technology, Kasumi, Minami-ku, Hiroshima, JPN, <http://www.jsct-tech.org/>, 2012-2014.
- 23) Samei E, Richard S. Assessment of the dose reduction potential of a model-based iterative reconstruction algorithm using a task-based performance metrology. *Med Phys* 2015; 42(1): 314-323.
- 24) Kawashima H, Ichikawa K, Matsubara K, et al. Quality evaluation of image-based iterative reconstruction for CT: comparison with hybrid iterative reconstruction. *J Appl Clin Med Phys* 2019; 20(6): 199-205.
- 25) Ichikawa K, Kawashima H, Shimada M, et al. A three-dimensional cross-directional bilateral filter for edge-preserving noise reduction of low-dose computed tomography images. *Comput Biol Med* 2019; 111: 103353.
- 26) 藤原 誠, 吉澤隆雄, 首藤雄助, 他. 低線量CT撮影におけるフィルタ補正逆投影法に量子ノイズ除去フィルタを用いた画像のノイズ低減効果. *日放技誌* 2014; 61(746): 1543-1549.
- 27) Solomon JB, Christianson O, Samei E. Quantitative comparison of noise texture across CT scanners from different manufacturers. *Med Phys* 2012; 39(10): 6048-6055.
- 28) Afadzi M, Lysvik EK, Andersen HK, et al. Ultra-low dose chest computed tomography: Effect of iterative reconstruction levels

- on image quality. *Eur J Radiol* 2019; 114: 62-68.
- 29) Afadzi M, Fosså K, Andersen HK, et al. Image Quality Measured From Ultra-Low Dose Chest Computed Tomography Examination Protocols Using 6 Different Iterative Reconstructions From 4 Vendors, a Phantom Study. *J Comput Assist Tomogr* 2020; 44(1): 95-101.
- 30) 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. *東北大保健紀* 2013; 22(1): 7-24.
- 31) Yu L, Bruesewitz MR, Thomas KB, et al. Optimal tube potential for radiation dose reduction in pediatric CT: principles, clinical implementations, and pitfalls. *Radiographics* 2011; 31(3): 835-848.
- 32) Navin PJ, Kim B, Wells ML, et al. Reducing radiation dose for multi-phase contrast-enhanced dual energy renal CT: pilot study evaluating prior iterative reconstruction. *Abdom Radiol* 2019; 44(10): 3350-3358.
- 33) Euler A, Stieltjes B, Szucs-Farkas Z, et al. Impact of model-based iterative reconstruction on low-contrast lesion detection and image quality in abdominal CT: a 12-reader-based comparative phantom study with filtered back projection at different tube voltages. *Eur Radiol* 2017; 27(12): 5252-5259.

問合先

〒663-8501 西宮市武庫川町 1-1
兵庫医科大学病院放射線技術部 桐木雅人