コンピュータドラジオグラフィにおける グリッドライン検出・抑制処理GDSの臨床運用の有用性

加藤元章・西村幸恵・岡本孝英¹⁾・リチャード ヴァン メッター²⁾
シャオフイ ワン³⁾・伊知地宏志⁴⁾・沢井美穂⁴⁾
清岡 誠⁴⁾・池上裕子⁴⁾

論文受付
2004年10月26日

論文受理
2005年5月24日

Code No. 254

東京医科大学病院放射線部

1) 帝京大学医学部附属病院中央放射線部

2) イーストマンコダック社ヘルスイメージングリサーチラボ

3) イーストマンコダック社ヘルスイメージング研究開発センター

4) コダック株式会社ヘルスイメージング事業部

緒言

X線を使用する撮影検査において、一部被写体厚の薄い部位を除き散乱X線の除去を目的としたグリッドの使用は欠かせない。グリッドには散乱X線吸収物質として鉛箔が使用されており、静止グリッドとして使用した場合、その鉛箔は写真上で縞目陰影のグリッドラインとして観察者に認識される。

これまでの診断メディアの主流であるフィルム／スクリーンシステムでは、グリッドラインは規則正しい線状陰影と認識されるが、読影の妨げとなることは少

なかった。ところが、近年急速に発展してきたcomputed radiography (以下、CR)などのデジタル画像処理では、鉛箔の間隔と読み取り時のサンプリング間隔の関係によってはエリasing現象が生じ、グリッドラインがフィルムやモニタ上で干渉縞を形成する場合があります。画像診断の大きな障害となる状況が発生している。

この問題を改善するため、これまでもローパスフィルタを使用しグリッドライン以上の周波数成分を除去することで、画像に出現する干渉縞を防ぐ方法が提案

Clinical Efficacy of Image Processing of Grid Detection and Suppression (GDS) in Computed Radiography

MOTOAKI KATO, SACHIE NISHIMURA, TAKAHIDE OKAMOTO,¹⁾ RICHARD L. VANMETTER,²⁾ XIAOHUI WANG,³⁾ HIROSHI ICHIJI,⁴⁾ MIHO SAWAI,⁴⁾ MAKOTO KIYOOKA,⁴⁾ and YUKO Ikegami⁴⁾

Department of Radiology, Tokyo Medical University Hospital

1) Department of Radiology, Teikyo University Hospital

2) Eastman Kodak Company Health Imaging Research Laboratory

3) Eastman Kodak Company Health Imaging Research and Development

4) Kodak Japan, Ltd., Health Imaging Division

Received Oct. 26, 2004; Revision accepted May 24, 2005; Code No. 254

Summary

In projection radiography, stationary grids are indispensable accessories to the improvement of diagnostic imaging. On the other hand, they are becoming one of the issues facing digital image processing. The lead foil that composes the grid can produce moiré on printed films and monitors according to the sampling interval at which the image is read by computed radiography (CR), creating a major obstacle to diagnosing images. The subject of this study on Grid Detection and Suppression (GDS) was the development of comprehensive image-processing software to detect and suppress grid lines automatically. Our results showed that applying GDS parameters 3~5 could provide a sufficient effect on suppression with little impact on images through the use of a multi-purpose grid (grid ratio 8:1, density 34 lp/cm) for general purposes. In projection radiography, it is expected that soft copy diagnosis will increase because the digital transition is proceeding, and the establishment of high-speed networks is becoming easier. Therefore, the digital environment is expected to improve and the choice of grids and monitors to expand, by using software such as GDS that does not require special skills.

Key words: Computed radiography, Anti-scatter grid, Moiré, Aliasing

別刷資料請求先: 〒160-0023

東京都新宿区西新宿6-7-1

東京医科大学病院 放射線部 加藤元章 宛

されている^{1, 2)}。しかし、この手法を用いた場合、グリッドライン以上の高い周波数成分で構成される被写体情報まで取り去るため、画像情報の損失を招く可能性が避けられない。

イーストマンコダック社では、グリッドラインを検出しバンドストップフィルタを用いることでグリッドライン周波数を抑制し、診断上必要とされる画質にはほとんど影響を及ぼさずに干渉縞を低減させる新しいソフトウェアであるGrid Detection and Suppression(以下、GDS)を開発した^{3, 4)}。

今回の研究は、開発者の協力を得ることによりその理論と特性を理解し、このソフトウェアを今後有効活用していくため、干渉縞低減の効果と画像に対する影響を検証し、日常業務のなかで使用するうえでの適切なパラメータを探ることを目的とした。

1. GDSの理論

GDSはグリッドラインの検出と抑制という二つの骨子となる機能を有するため、それぞれの動作原理について概要を述べる。

GDSにおける第1過程であるグリッドライン検出のアルゴリズム³⁾は、フーリエ変換を使用した周波数解析に基づき処理される。画像からグリッドラインが検出されると、その画像は第2過程である抑制過程に送られ、抑制処理後あるいは第1過程でグリッドラインが検出されない場合は、CRの基本的な画像処理である階調処理およびエッジ強調処理過程に送られる。

1-1 グリッドラインの検出

グリッドライン検出アルゴリズムに求められる基本的要件を示す。

- (1) 静止グリッドの存在の有無を正確に検出すること
- (2) 静止グリッドの周波数と方向を的確に規定すること
- (3) 処理時間が高速であること

GDSが搭載されたCR装置において、画像データはグリッドの有無にかかわらずグリッドライン検出処理過程を通過する。したがって、この処理過程の速度が遅くなることは、全画像処理過程のボトルネックとなる可能性がある。また、グリッドを使用していないにもかかわらずグリッドが存在すると誤って判断された場合、この画像は必要としないグリッド抑制処理過程に送られることとなり、画像処理全体の速度低下をきたす要因となる。そのため、検出処理過程における速度向上と、グリッドライン検出の精度を向上させることはGDSの価値を高めるために不可欠な要素である。

Fig. 1にGDS検出プロセスの四つの構成要素を示す。

1-1-1 解析領域の決定

第1のステップは、グリッドラインを検出するための領域(region of interest以下、ROI)を選択することである。このプロセスは画像サイズ・処理速度・検出限界・検出精度に影響を及ぼす。GDSにおけるグリッドライン検出手法は、フーリエ変換を使用した周波数解析に基づいており、ROIを2の累乗の正方形とした場合に最も高速な処理が可能である。実際には、サブサンプリングした画像において、グリッドラインの強度がより強く現れる、直接線が照射された部分のような散乱線が少ない領域から、2の10乗である1024×1024のROIが選択される。画像の周辺領域は、フォスファースクリーンのシリアルナンバーやマーカが画像内に入り込む可能性があるためROIからは除外される。GDSによって自動的に決定された検出領域の一例をFig. 2に示す。

1-1-2 パワースペクトルの取得

第2のステップでは、X方向・Y方向に含まれるすべてのラインのパワースペクトルを方向ごとに合計し、それぞれの方向の平均した1Dパワースペクトルを算出する。Fig. 3にカセットの長短軸に沿ったスペクトル解析過程を示す。

グリッドラインとピクセルのアライメントが合致していない場合、グリッドラインの位相がシフトしてしまう可能性があるが、平均した1Dパワースペクトルを得ることにより、グリッドライン検出の精度を改善することが可能である。

1-1-3 グリッド候補の特性解析

グリッドライン検出の第3のステップは、グリッドの候補と考えられるすべてのピークおよびその特性を1Dパワースペクトルから探索するプロセスである。それぞれのスペクトルは、雑音を減少させるためにガウス重畳積分によりあらかじめスムージング処理される。その後、円形カーネルを用いたモルフォロジカルオープニングフィルタ処理を適用することでバックグラウンドを特定し、オリジナルとの差分を求め特異なスペクトルピークのみを分離する。円形カーネルのサイズは、後に続くエネルギー計算誤差の繰り越しを最小限にするため、最も広いピーク幅の数倍のサイズとする必要がある。これはグリッドライン周波数が高周波帯域に存在し、そのエネルギーが相対的に高い場合、画像に悪影響を及ぼすため、あらかじめ既定された強度と周波数を超えるすべてのピークを検出する必要があるためである。

分離されたスペクトルピークに対し、パラメトリック手法により相対周波数、強度、ピークの半値幅、エネルギー干渉およびトータルエネルギーなどのピーク特性を解析することでグリッドラインと予測される候

Fig. 1 GDS detection process flow chart.

Fig. 2 (a) Original image.
 (b) Same image as in (a) showing the highlighted region of interest.
 Note exclusion of the image boundary shown in black.

a b

Fig. 3 Power spectrum analysis using one-dimensional FFT.

補を選択し、各々のパワースペクトルについて、最も高いエネルギーを持ついくつかのピークが次の解析過程に送られる。

1-1-4 周波数および方向の特定

グリッドライン検出の最終段階となる第4のステップでは、相対周波数とエネルギー干渉性の加重加算についてより詳細な解析を行い、あらかじめ既定された閾値を超えたピークがグリッドライン周波数としてランクされる。ランクリストがゼロであるという結果が得られた場合はグリッドラインが検出されなかったということになる。

1-2 グリッドラインの抑制

グリッドライン抑制のアルゴリズム⁴⁾は、最も有意であると検出されたグリッドライン周波数に対し、垂直方向にフィルタリング処理を実施された1Dパワースペクトルに基づいている。原画像の損失を最小に抑え、グリッドラインを最大に抑制する手法として、ノッチフィルタが採用されている。このノッチフィルタはバンドストップフィルタの1種であり、特定の周波数に急峻な減衰を与えることが可能なフィルタである。グリッドピーク抑制レベル、カッティングスロープエッジ、インパルス応答速度などを含むフィルタパラメータは、グリッド抑制の最大化およびギブス現象の最小化のために最適化される。

Belykhらの研究結果から、最適なフィルタ選択はブロックコンボリューションを使用したFIR(Finite Impulse Response)Potterノッチフィルタであることが判明している³⁾。一般的にリカーシブIIR(Infinite Impulse Response)フィルタはFIRフィルタよりも速い演算速度を有していると考えられている。しかし、許容できない位相シフトが発生してしまうことが分かっている。ブロックコンボリューションアルゴリズムを使用することによりFIRフィルタの演算速度が向上することが判明している⁵⁾。

ノッチフィルタはグリッドライン周波数よりも高い空間周波数帯域を保持するためにも有効である。ノッチフィルタにとって最も重要なパラメータは帯域阻止幅(バンドストップ幅)である。これはグリッドアーチファクト除去と画像損失の両方に影響を及ぼす。一般的に、バンドストップ幅は狭い方がグリッドラインをより選択的に抑制するが、ギブス現象により原画像に対するひずみも大きくなってしまふ。また、バンドストップ幅を広くすると、ギブス現象によるひずみは抑えられるが、原画像に対する情報損失度合いが大きくなる(Fig. 4)。

フィルタパフォーマンスを最適化するためにインテル社製のSignal Processing Library4.5を使用しており、

インテルMMX技術を組み合わせたPotterノッチフィルタによって効果的なグリッドアーチファクトの抑制、ギブス現象の最小化、そして高速処理が可能となっている。グリッドラインの抑制度合いはsuppression levelが16段階となるようパラメータ化されており(以下、GDSパラメータ、パラメータの値を示す場合GDS-を使用する)、グリッドラインが検出された場合1~16のGDSパラメータから、画像に合わせて最適パラメータを選択し調整することが可能である。

各GDSパラメータにおけるスペクトルパワー減衰量をTable 1に示す。

2. 方法

使用装置の一覧をTable 2に示す。

2-1 グリッドライン検出の検証

コダックCRシステムにおけるサンプリングピッチはカセットサイズにより異なり(Table 3)、干渉縞の発生は使用するカセットとグリッドの組み合わせによって変化すると考えられる。カセットとグリッドの方向を考えた場合、一般的にはカセットの長軸に対しグリッドラインを平行に使用するが、状況によりグリッドラインはサンプリングの方向に対しあらゆる角度を取り得る。そこで、グリッド密度34lp/cm、40lp/cm、60lp/cmの3種類のグリッドを各サイズのカセットと組み合わせ、サンプリング方向と平行、直交、45°となるように配置したときの、それぞれのグリッドライン検出の成否を確認した。

また、X線束とグリッドの中心がずれた状況を想定し、X線束中心をグリッド中心から2cmおよび5cmずらした配置においても同様に検証した。撮影には前腕部のファントムを使用し撮影条件を50kV・16mAsとした。

CR800では操作パネル上にGDSオプションスイッチが配置されており、グリッドラインを検出した場合はONとOFFが選択可能な状態となり、未検出であった場合にはグレイアウトされ使用不可となる。そこで、グリッドライン検出の成否は、GDSオプションスイッチが使用可能であるか否かによって確認した。

グリッド上の位置によりグリッドラインの間隔が異なる可能性として、X線束とグリッドの中心がずれた状況と同様、頭部タウン法のように、意図的にグリッドとのX線入射角度を大きく傾けて行う撮影が考えられる。その場合のグリッドラインの検出を検証するため、格子比8:1・密度34lp/cmのグリッドを用い50°の入射角で撮影した画像のグリッドライン周波数とパワースペクトルを、他の撮影状況による画像と比較した。実験にはすべて24×30cm(四切)のカセットを使用

Fig. 4 Band stop width in notch filter and influence on image.

(a) Band stop width A — and B ---. ($A < B$)(b) Loss of image information by A and B . ($A < B$)(c) Region where influence of Gibbs event incident is received by A and B . ($A > B$)

a | b | c

Table 1 GDS parameter and spectrum power attenuation.

GDS Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8
Out/In Power	$1/2^2$	$1/4^2$	$1/8^2$	$1/13^2$	$1/18^2$	$1/30^2$	$1/40^2$	$1/50^2$
GDS Parameter	9	10	11	12	13	14	15	16
Out/In Power	$1/63^2$	$1/80^2$	$1/100^2$	$1/160^2$	$1/220^2$	$1/320^2$	$1/500^2$	$1/800^2$

Table 2 Table of devices used.

X-ray Generator	Toshiba	KXO-80G
X-ray Tube	Toshiba	DRX-3724HD 1.1mmAl Target 0.6mm
CR device	Kodak	CR800 System3.0
Laser printer	Kodak	KELP2180
Grid	MITAYA	5 : 1 34lp/cm, 6 : 1 34lp/cm 40lp/cm, 8 : 1 34lp/cm 40lp/cm, 14 : 1 60lp/cm
	JPI	8 : 1 34lp/cm 40lp/cm, 10 : 1 60lp/cm

Table 3 Cassette size and sampling pitch in CR800.

Cassette size	Sampling pitch
18×24cm	$97 \pm 2 \mu\text{m}$
24×30cm	$115 \pm 2 \mu\text{m}$
35×35cm	$168 \pm 2 \mu\text{m}$
35×43cm	$168 \pm 2 \mu\text{m}$

Fig. 5 (a) Original image.
 (b) Image that moves X-ray exposure point and grid center by 5 cm.
 (c) Image that rotates 45° to cassette around grid.
 (d) Oblique incidence image of 50° to grid.

a | b | c | d

し、被写体には頭部ファントムを用いた。Fig. 5(a)～(d)に各画像の入射方向とグリッドの位置関係およびそれぞれの計算領域を示す。

2-2 グリッドライン抑制の検証

2-2-1 物理評価

評価の対象として、散乱X線の影響を受けにくく、グリッドラインのスペクトルピークが比較的強く現れ、GDSによる変化が観察しやすい部位として膝関節を選択し、格子比8:1・密度34lp/cmのグリッドを用い70kV・5mAsで撮影したDICOMデータに対し、GDS OFFおよびGDSパラメータを1～16まで変化させフーリエ変換による周波数解析を行い、各パラメータにおけるグリッドラインのパワースペクトルの変化を検証した。

2-2-2 視覚評価

視覚評価の第1ステップとして、物理評価で使用した膝関節画像データをプリントし、2肢強制選択法(2-alternative forced choice以下、2-AFC法)⁶⁾の手法により、グリッドラインの信号の存在が不確かとなるGDSパラメータを検証した。実験に先立ち、研究にかかわる数名の技師により選択の基準とする試料を決定するための予備テストを行った。本実験での観察者は一般撮影に携わる技師20名で行い、その経験年数は10年未満10名、10年以上10名であった。

第2のステップとして、2-AFC法の結果を基に3種類のGDSパラメータで試料となる写真を作成し、シェッフェの一対比較法(中屋の変法)⁷⁾に従い画質の変化を評価した。

試料として、格子比8:1・密度34lp/cmのグリッドを用いて撮影した頸椎側面・肩関節正面・肘関節正

面・腰椎側面・股関節正面の写真を使用し、それぞれについて微細構造物の描出度と軟部組織の粒状性の2点に注目し評価した。観察者は経験年数10年未満の技師8名、10年以上の技師8名、10年以上の放射線科医2名、整形外科医2名の20名であった。いずれの視覚評価も輝度2900cdのシャウカステンを使用し、照度2340luxの環境で行った。

3. 結果

3-1 グリッドラインの検出

各組み合わせにおけるグリッドラインの検出結果を、検出✓・未検出ーとしてTable 4に示す。35×35cm(大角)および35×43cm(半切)と60lp/cmの組み合わせでは、平行、直交ともに未検出であった。

今回使用したグリッドにおいて、同密度であれば格子比の違いによる検出結果への影響はみられなかった。また、X線束とグリッドの中心を2cmと5cmずらしたそれぞれの実験では、中心を合わせたTable 4の結果と比較して、いずれも変化はみられなかった。

頭部タウン法を想定した実験では、一般的に使用される入射角30°の方法に加え、入射角50°での撮影においてもグリッドラインの検出が確認できた。Fig. 5(a)～(d)に示した、異なる撮影状況でのグリッド上の任意の場所におけるグリッドライン周波数をTable 5に示す。また、今回設定したそれぞれの計算領域におけるパワースペクトル強度は③>①>②>④>⑤の順であった。

3-2 物理評価

DICOMデータの周波数解析の結果、GDSの作用によりグリッドラインのパワースペクトルが抑制されて

Table 4 Result of the grid line detection by arrangement of a grid.

	34lp/cm			40lp/cm			60lp/cm		
	Parallel	Cross	45°	Parallel	Cross	45°	Parallel	Cross	45°
18×24cm	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
24×30cm	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
35×35cm	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	✓
35×43cm	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	✓

いることが確認できた。

Fig. 6に膝関節正面画像におけるパワースペクトルの変化を示す。(a)は2-AFC法の予備テストとして使用した画像であり、GDS OFFのピーク値と比較し、GDS-7および16ではほぼTable 1で示した設定値に減衰されていると確認される。(b)は2-AFC法の結果から選択した3種類のGDSパラメータにより処理した画像である。

また、パワースペクトルピークの抑制にともない、グリッドライン周辺の空間周波数領域においてパワースペクトルの落ち込みがみられた。

3-3 視覚評価

3-3-1 2-AFC法

今回のようなグリッド信号の有無を判定する2-AFC法において、比較の基準とする試料には、本来グリッド未使用の写真を選択すべきである。そこで、同じ被写体をグリッド未使用にて撮影した写真を比較基準に用い、予備テストとしての2-AFC法を行った。しかし、グリッドの有無それぞれのカセットについて読み取り処理を行った写真では、ヒストグラムの違いから画質に微妙な違いを生じ、すべてのGDSパラメータにおいて、ほぼ違いを見分けてしまう結果となった(Fig. 7(a))。

次に、グリッドを使用した写真のなかから、グリッドラインを見分ける可能性が低いと思われるGDS-16の写真と比較基準として同様の予備テストを行った。しかし、グリッドライン周辺の空間周波数の落ち込みが画質の変化として捉えられ、グリッド未使用時と同様にほぼ違いを見分けてしまう結果となった(Fig. 7(b))。

そこで、グリッドラインのパワースペクトルのピークが、本来被写体の持つレベルまで減衰され、グリッド未使用時の画像と比較しても、特異なスペクトルピークとして認識することが困難と思われる、GDS-7の写真と比較基準の試料として用いた(Fig. 7(c))。

Table 5 Grid line spatial frequency in each calculating area.

Calculating area	①	②	③	④	⑤
Spatial frequency (cycle/mm)	3.29	3.26	3.26	2.31	3.26

Fig. 6 Power spectrum of knee image.
(a) GDS OFF and using GDS-7 and -16.
(b) Using GDS-2, -4, and -6.

その結果、GDS-5の写真では、グリッドラインの信号を的確に認識することがほぼ不可能となることが分かった。Fig. 8にGDS-7の写真と比較したときの、GDS OFFおよびGDS-1～6のグリッドライン認識結果を示す。

Fig. 7 Expansion display of the inside of knee joint.

(a) No Grid.

(b) Using GDS-16.

(c) Using GDS-7.

a | b | c

Fig. 8 Detectability of grid line detection of GDS-1~6 and GDS OFF by 2-AFC experiment when image of GDS-7 is comparison criterion.

3-3-2 一対比較法

Table 6に、(a)肩関節の微細構造物の描出度と(b)肩関節の軟部組織の粒状性を評価した一対比較法の結果を示す。それぞれGDS-2を α_1 、GDS-4を α_2 、GDS-6を α_3 とした。その結果、すべての $(\alpha_i - \alpha_j)$ で95%・99%のどちらの信頼区間においても有意差は認められなかった。同時に比較テストを実施した他の試料についても同様の結果であった。

また、評価の順位は(a)肩関節の微細構造物の描出度において $\alpha_2 > \alpha_3 > \alpha_1$ 、(b)肩関節の軟部組織の粒状性評価では $\alpha_2 > \alpha_3 > \alpha_1$ であったが、他の試料での結果を含めた全体で一律性はみられなかった。Fig. 9に一対比較法の試料として使用した写真のうち、肩関節正面および股関節正面の拡大像を示す。

4. 考 察

グリッドラインの検出結果について、密度60lp/cmのグリッドと大角または半切との組み合わせで、平行、直交ともに未検出であった理由として、CR800ではそれらのサンプリングピッチが $168 \pm 2 \mu\text{m}$ であり、60lp/cmのグリッドライン間隔(約 $167 \mu\text{m}$)よりも広いことに起因する。

また、グリッドの配置と入射点のずれに関する実験結果では、日常業務で想定されるグリッドの使用状況下において、GDSのグリッドライン検出能が低下するなどの変化はみられなかった。このことは、ベッド上などグリッドとカセットが不安定な状況下での撮影時においても、GDSが少なからず有効に働くものと期待できる。

Table 6 (a)Confidence interval in visibility evaluation of shoulder joint micro-structure.
(b)Confidence interval in granularity evaluation of shoulder joint soft tissue.
The parameter used is shown in GDS-2: α_1 GDS-4: α_2 GDS-6: α_3 .

(a)				
$\alpha_i-\alpha_j$	95% Interval		99% Interval	
	$\alpha_i-\alpha_j+Y_{0.05}$	$\alpha_i-\alpha_j-Y_{0.05}$	$\alpha_i-\alpha_j+Y_{0.05}$	$\alpha_i-\alpha_j-Y_{0.05}$
$\alpha_1-\alpha_2=-0.1833$	0.49	-0.1233	0.5822	-0.2155
$\alpha_1-\alpha_3=0.2167$	0.5233	-0.09	0.6155	-0.1822
$\alpha_2-\alpha_3=0.0333$	0.34	-0.2733	0.4322	-0.3655

(b)				
$\alpha_i-\alpha_j$	95% Interval		99% Interval	
	$\alpha_i-\alpha_j+Y_{0.05}$	$\alpha_i-\alpha_j-Y_{0.05}$	$\alpha_i-\alpha_j+Y_{0.05}$	$\alpha_i-\alpha_j-Y_{0.05}$
$\alpha_1-\alpha_2=-0.1333$	0.2764	-0.5431	0.3997	-0.6663
$\alpha_1-\alpha_3=-0.1167$	0.2931	-0.5264	0.4163	-0.6497
$\alpha_2-\alpha_3= 0.0167$	0.4264	-0.3931	0.5497	-0.5163

Fig. 9 Example of image used as sample of pair comparison method.
(a) Shoulder joint using GDS-2.
(b) Shoulder joint using GDS-4.
(c) Shoulder joint using GDS-6.
(d) Hip joint using GDS-2.
(e) Hip joint using GDS-4.
(f) Hip joint using GDS-6.

a	b	c
d	e	f

一般的な頭部タウン法では、グリッドに対し入射角 $30\sim40^\circ$ が使用される。しかし、実際の撮影では被写体の大きさや位置、また、X線束とグリッドラインのアライメントのずれにより、グリッドラインのスペクトルピークが低くなる可能性がある。そこで、今回の実験では敢えて 50° での検証を試みた。その結果、パワースペクトルは今回の実験中最も低い値を示したが、ROIの選択要件から、検出領域にはグリッドラインの強度が強く現れる領域が選択されることと、通常の入射角度が今回の実験よりも小さいことからパワースペクトルの最大値はより高い値となり、実際の撮影においてもグリッドライン検出は期待できるものと考ええる。

グリッドライン抑制の物理評価における試料の選定について、本来のグリッドの適用を考えると、今回のような評価には、腹部など散乱X線の影響を受けやすい部位のデータを使用するべきである。しかし、そのような部位で描出されるグリッドラインは、被写体厚の薄い部位と比較して散乱X線の影響によりパワースペクトルが弱められることが予測される。

そのため、腹部などの被写体厚の厚い部位を選択して実験を進めた場合、より小さなGDSパラメータでも十分な抑制効果が得られる結果につながる可能性があり、撮影部位や環境により、強いパワースペクトルを持つグリッドラインが描出された場合、十分な抑制効果が得られるかどうかの疑問が残ることとなる。

そこで、本来グリッドを使用せずに撮影可能な散乱X線の影響を受けにくい部位であり、腹部などの部位と比較してグリッドラインのパワースペクトルのピークが強く現れ、縞目陰影やエリアシング現象による障害が生じやすいと考えられることから膝関節のデータを選択した。Fig. 10に散乱X線の影響を受けやすい部位として腰椎画像と、今回の評価に使用した膝関節画像におけるグリッドラインの描出の変化を示す。

周波数解析の結果、GDSはグリッドラインのパワースペクトルを抑制すると同時に、周辺の周波数領域にも影響を及ぼすことが分かった。これは、ノッチフィルタにおけるギブス現象の影響を低減するため不可欠とも考えられ、いたずらに大きなパラメータを使用することは避けるべきである。

2-AFC法を用いた評価では、GDS-5付近で視覚上グリッドラインを認識することがほぼ不可能となることが判明し、GDS-4または5を選択することで十分なグリッドライン抑制効果が得られていると考えられる。

続いて行った一対比較法による画質評価では、2-AFC法において85%の観察者がグリッドラインを認識するGDS-2に加え、ほぼ認識不能となるGDS-6においても、試料とした5部位についてその画質には変化が

みられなかった。

グリッドライン検出の検証結果から、日常業務で想定されるグリッドの使用状況であればGDSの検出機能は十分に有効であり、格子比 $8:1$ ・密度 34lp/cm の汎用グリッドを使用したグリッドライン抑制の検証結果から、画質に変化はみられないものの、抑制機能が空間周波数に与える影響を考慮すると、GDS-3～5が日常業務のなかで使用するうえでの適切な値であると考えられる。

一般的に理想的なグリッドの性能とは、コントラスト改善度が高く露出倍数が小さいものとされており、低密度グリッドと同等のコントラストを確保し、ほぼ同一の露出倍数とするには、低密度グリッドの1ランク上のグリッド比を選択する必要があるとされる^{8,9)}。グリッドラインが視覚上目立ちやすいという低密度グリッドの欠点を、GDSの機能が補うことが可能であると考え、グリッドを選択する際に、敢えて高価格な高密度グリッドを求めるのではなく、価格や性能を優先するなど選択の自由度を広げるものと思われる。

GDSの有する機能を考えて、モニタ表示におけるモアレ発生時に有効であることが予測される。しかし、モニタにおけるモアレの発生要因にはさまざまなパラメータが影響し、今回の研究だけで結論付けることはできない。そこで、われわれの施設において確認することのできた、GDSによるモニタ上での画質の変化を参考までに記述する。

Fig. 11はコダックDICOMビューアーAutoRadで表示したGDS OFFとGDS-4の股関節軸位像($8:1$ ・ 34lp/cm 、 90kVp ・ 50mAs)を、スクリーンキャプチャソフトを使用して取り込んだものであり、使用したビューアーの画像表示に関するハードウェアは、グラフィックチップIntel815、表示解像度 1024×1280 ・リフレッシュレート 75Hz 、モニタNEC Multi Sync LCD2010Xである。

GDS OFFにおけるモアレは、モニタ表示信号とグリッドラインの干渉によるものであり、表示するハードウェア、あるいは解像度や拡大率により異なる。しかし、GDS-4の画像については、本研究に使用した数台のPCにおいても、また、表示するサイズを変更してもモアレの発生を確認することはなかった。このことは、モアレ発生の一つの要因であるグリッドラインが十分に抑制されていることの証明といえる。

今回の一対比較法に使用した試料について、ビューアーでの表示を確認したところ、すべての試料において、GDS-2ではグリッドラインがわずかに観察できるものの、モアレ状の陰影は消失し、GDS-3ではグリッドラインを確認することもほぼ不可能であった。

Fig. 10 Comparison of grid line visibility depending on the difference of scattered X-ray amount.

- (a) Original image of vertebrae lumbales.
- (b) Vertebrae lumbales GDS OFF.
- (c) Vertebrae lumbales using GDS-1.
- (d) Vertebrae lumbales using GDS-2.
- (e) Original image of knee joint.
- (f) Knee joint GDS OFF.
- (g) Knee joint using GDS-1.
- (h) Knee joint using GDS-2.

a	b	c	d
e	f	g	h

5. 結 語

今回の研究テーマとしたGDSは、グリッドラインを自動的に検出し抑制することを目的としたソフトウェアであり、日常業務の自動処理としてGDSを使用する場合、GDS-3～5を標準とすることでさまざまなグリッド使用状況に対応できると考える。

このようなソフトウェアが普及することは、デジタル画像処理におけるグリッドの選択範囲を広げるとともに、モニタ診断におけるハードウェア選択を容易にすると考えられ、X線画像のデジタル化と、画像ネットワークの普及を進める要因になりえるものと考えられる。

謝 辞

今回の研究にあたり、ご多忙中にもかかわらず環境測定にご協力いただいた株式会社森山X線用品 森山氏、ならびに、視覚評価にご参加いただいた放射線科 赤田・朴両医師および整形外科 宮川・香取両医師に深く感謝いたします。

Fig. 11 Hip joint axial image of monitor display.

- (a) GDS OFF.
- (b) Using GDS-4.

a | b

なお、本論文の要旨は、日本放射線技術学会 第59回総会学術大会(2003. 4, 横浜)において発表した。

参考文献

- 1) 三上直樹：デジタル信号処理の基礎. pp.21, CQ出版, 東京, (1998).
- 2) 坂巻佳壽美：見てわかるデジタル信号処理. pp.35, 工業調査会, 東京, (1998).
- 3) Belykh IN, and Cornelius CW: Antiscatter stationary grid artifacts automated detection and removal in projection radiography images. Proc SPIE, 4322, 1162-1166, (2001).
- 4) Barski LL, and Wang X: Characterization detection and suppression of stationary grids in digital projection radiography imagery. Proc SPIE, 3658, 502-520, (1999).
- 5) Oppenheim AV, and Schaffer RW: Digital signal processing. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, (1975).
- 6) 大塚昭義, 砂屋敷忠, 小寺吉衛編：実験 画像評価—初学者のための実験入門書. pp.71-80, 日本アクセル・シュプリンガー出版, 東京, (1994).
- 7) 日科技連官能検査委員会編：新版 官能検査ハンドブック. pp.349-391, 日科技連出版社, 東京, (1973).
- 8) JIS Z 4910-1983
- 9) 三田屋商事 資料

図表の説明

- Fig. 1 GDS検出プロセスのフローチャート
- Fig. 2 (a) 原画像
(b) GDSが自動的に決定した検出領域(灰色枠部分)および検出領域から除外された領域(黒枠部分)
- Fig. 3 一次元FFTによるパワースペクトル解析過程
- Fig. 4 ノッチフィルタにおける帯域阻止幅(バンドストップ幅)と画像情報への影響
(a) バンドストップ幅 A—— およびB--- ($A < B$)
(b) 画像情報の損失 A およびB ($A < B$)
(c) ギブス現象の影響を受ける領域 A ○ and B □ ($A > B$)
- Fig. 5 (a) 原画像
(b) X線入射点をグリッド中心から 5cmずらした画像
(c) カセットに対しグリッドを45°回転させた画像
(d) グリッドに対し50°の角度で入射した画像
- Fig. 6 膝関節正面画像におけるパワースペクトル
(a) GDS OFFおよびGDS-7, 16使用時
(b) GDS-2, 4 および 6 使用時
- Fig. 7 膝関節正面内側部の拡大画像
(a) グリッドなし
(b) GDS-16使用時
(c) GDS-7使用時
- Fig. 8 GDS-7の写真を比較基準とした場合の2-AFC法におけるGDS OFFおよびGDS-1~6 のグリッドライン認識結果
- Fig. 9 一対比較法の試料として使用した写真の例
(a) 肩関節 GDS-2使用時
(b) 肩関節 GDS-4使用時
(c) 肩関節 GDS-6使用時
(d) 股関節 GDS-2使用時
(e) 股関節 GDS-4使用時
(f) 股関節 GDS-6使用時
- Fig. 10 散乱X線の影響を受けやすい部位と受けにくい部位でのグリッドライン描出の比較
(a) 腰椎 原画像
(b) 腰椎 GDS OFF
(c) 腰椎 GDS-1使用時
(d) 腰椎 GDS-2使用時
(e) 膝関節 原画像
(f) 膝関節 GDS OFF
(g) 膝関節 GDS-1使用時
(h) 膝関節 GDS-2使用時
- Fig. 11 モニタ表示における股関節軸位像
(a) GDS OFF
(b) GDS-4使用時
- Table 1 GDSパラメータとスペクトルパワー減衰量(設定値)
- Table 2 使用装置一覧
- Table 3 CR800におけるカセットサイズとサンプリングピッチの関係
- Table 4 グリッドの配置によるグリッドライン検出の結果
- Table 5 各計算領域におけるグリッドライン周波数
- Table 6 (a) 肩関節の微細構造物描出度評価における信頼区間
(b) 肩関節の軟部組織粒状性評価における信頼区間
使用したGDSパラメータをGDS-2: α_1 , GDS-4: α_2 , GDS-6: α_3 に示す.