

デジタル位相コントラストイメージングにおけるエッジ強調の評価

松尾 悟, 杜下 淳次[†], 藤田 広志^{††}, 片渕 哲朗[‡], 杉山 淳子

滋賀医科大学附属病院放射線部 〒520-2192 滋賀県大津市瀬田月輪町

[†]九州大学医学部保健学科 〒812-8582 福岡県福岡市東区馬出 3-1-1

^{††}岐阜大学大学院医学系研究科知能イメージ情報分野 〒501-1194 岐阜県岐阜市柳戸 1 番 1

[‡]岐阜医療科学大学保健科学部放射線技術学科 〒501-3892 岐阜県関市市平賀字長峰 795-1

(2006年6月21日, 最終2006年9月12日受理)

Evaluation of edge enhancement in a digital phase contrast imaging

Satoru MATSUO, Junji MORISHITA[†], Hiroshi FUJITA^{††}, Tetsuro KATAFUCHI[‡], and Junko SUGIYAMA

Department of Radiology, Shiga University of Medical Science

Seta Tsukinowa-cho, Otsu, Shiga 520-2192, Japan

[†]Department of Health Sciences, School of Medicine, Kyushu University

3-1-1, Maidashi, Higashi-ku, Fukuoka, Fukuoka 812-8582, Japan

^{††}Department of Intelligent Image Information, Graduate School of Medicine, Gifu University

1-1, Yanagido, Gifu, Gifu 501-1194, Japan

[‡]Department of Radiological Technology, School of Health Sciences, Gifu University of Medical Science

795-1, Nagamine Ichihiraga, Seki, Gifu 501-3892, Japan

(Received June 21, 2006, In final form September 12, 2006)

Abstract : X-ray beams irradiated from an X-ray tube with a point source or a sufficiently small focal spot produce edge-enhanced images in the boundary of the object due to the effect of phase shift of X-rays. This effect is called phase contrast imaging. A “digital” phase contrast imaging system based on a photostimulable phosphor plate designed for mammography was developed for clinical use recently and now commercially available. However, the effectiveness of the phase contrast imaging applied to the digital system has not been reported yet. In this study, the edge enhancement effect caused by digital phase contrast imaging was evaluated by using the acrylic fiber and acrylic plate, and plant seeds. Our results indicated that higher contrast and sharper images than those for the contact imaging can be obtained. To further improve the image quality of the digital phase contrast imaging, a photostimulable phosphor plate with superior sharpness needs to be developed in the future.

Key words : Edge Enhancement, Phase Contrast Imaging, Digital Mammography

1. はじめに

小焦点 X 線管を用いた位相コントラストイメージングは, Ishikawa, 本田らにより報告がされた [1, 2]. これに続いて著者らは, 位相イメージング用に X 線焦点とフィルム間の距離を 1m と長くし, さらに 1.5 倍拡大ができるように改良された乳房撮影装置と増感紙/フィルム系を組み合わせたアナログ撮影システムを用いて位相イメージングの効果を報告した [3-5]. さらに, この技術は, 輝尽性蛍光板を X 線検出器に用いた乳房撮影用デジタルシステムとして実用化された [6, 7]. しかし, アナログ撮影システムと比べて X 線検出器の画像特性が異なるデジタル位相コントラストイメージングシステム (以下, デジタル位相イメージング) において, アナログ撮影システムと同様なエッジ効果が得られるという報告はされていない.

本稿では, 輝尽性蛍光板を検出器に用いたデジタル位相イメージングにおけるエッジ強調の効果について, ファントムを用いて検討した.

2. 実験方法

2.1 使用機器

本研究で使用したデジタル位相イメージングシステムは, PCM システム (Phase Contrast Mammography, コニカミノルタ) で, これは位相イメージングが可能な幾何学的配置の X 線撮影装置 (MGU-100 B, 東芝) と X 線検出器に輝尽性蛍光板を使用したデータ読取装置 (REGIUS MODEL 190 コニカミノルタ) から構成されている. このシステムで乳房を撮影するときには, 通常, 半切サイズの輝尽性蛍光板を用いる. しかし, 本研究で撮影したファントムは小さいため 18cm×24cm サイズの輝尽性蛍光板 (PM-6 M, コニカミノルタ) を使用した. このシステムのサンプリングピッチは公称 0.04375mm, マトリックスサイズは 4360×5736, 階調は 12 ビットである. 撮影したファントム画像のデジタルデータを, パーソナルコンピュータ (INSPIRON 5100: DELL) へ転送し, 2-3 に示す解析を行った.

2.2 ファントム撮影

デジタル位相イメージングによるエッジ強調の効果を確認するために, アクリルファイバ (直径 5mm), アクリ

ル板 (厚さ 10mm), 植物の種子 (米粒等, 径 2~3mm) の 3 種類のファントムを撮影した. デジタル画像はアナログ画像とは異なり位置依存性が存在する. よって, プロファイルカーブを作成し, それを解析するためには, プリサンプリング MTF 測定時のスリット撮影時のように, アクリルファイバやアクリル板を走査方向に対して 2~3 度傾けて撮影することが考えられる. しかしながら, 本研究における位相イメージングによるエッジ分布像では, 以下で述べる拡大撮影により生ずる半影の影響でエッジが大きくぼかされてしまうために, 位置依存性は事実上, 無視できることを確認した. 従って, 今回のアクリルファイバやアクリル板は, 読み取り方向に対してほぼ垂直に配置した.

デジタル位相イメージングでは, 0.1mm の X 線焦点 (モリブデンターゲット) を使用し, X 線焦点と被写体間の距離は 65cm で, X 線検出器の位置は被写体から 48.5cm 離れた位置にあり, 1.75 倍の拡大撮影ができる幾何学的配置である. 一方, 位相イメージングと比較する目的で撮影した密着撮影では, 0.3mm の X 線焦点 (モリブデンターゲット) を使用し, X 線焦点と被写体 (X 線検出器) 間の距離は 65 cm である. 3 種類のファントムの撮影条件は, 輝尽性蛍光板への入射線量が同等となるように, デジタル位相イメージングでは管電圧 28 kV, 15mAs, 密着撮影では管電圧 28 kV, 5mAs とした. 通常のマンモグラフィにおける密着撮影では散乱線を除去するためのグリッドを使用するが, 今回使用したファントムから発生する散乱線は無視できる程度に少ないと考えて, デジタル位相イメージングおよび密着撮影ともグリッドは使用していない.

2.3 評価方法

2-2 により得られたアクリルファイバやアクリル板の画像のデジタルデータから, プロファイルカーブを作成した.

プロファイルカーブは, ノイズの影響を少なくするために 50 本のプロファイルカーブを平均し (上記の理由により位置依存性による影響はないため), さらに, X 線強度に変換して, アクリルファイバやアクリル板の外側の空気層の平均値で規格化した. アクリルファイバの位相イメージングと密着撮影した画像のプロファイルカーブから, 最大値 I_{max} と最小値 I_{min} を求め, 次式からコントラスト (C) を算出した.

$$C = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}) \quad (1)$$

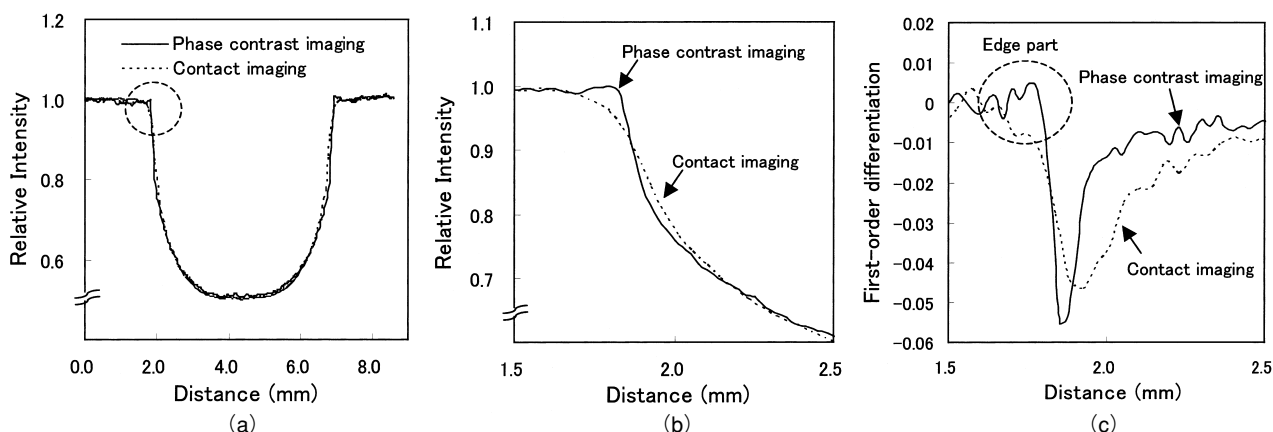


Fig.1 The profiles of acrylic fiber of 5 mm diameter for the digital phase contrast imaging (solid line) and contact imaging (dotted line) are shown in (a). For comparison of intensities at the edge of the fiber images, magnified profiles are also illustrated in (b). The first-order differentiation curves of the profiles are shown in (c). A dotted circle corresponds to an edge part of the acrylic fiber.

また, デジタル位相イメージングは, 物体の境界面でエッジ強調効果を生ずることから, プロファイルカーブを微分したカーブを作成し, アクリルファイバの境界で生ずる X 線強度の変化を調べた.

さらに, デジタル位相イメージングと密着撮影で撮影した植物種子の画像を観察し, エッジ強調の効果を評価した.

デジタル位相イメージングおよび密着撮影の画像は, どちらも 0.04375mm のサンプリングピッチで収集されている. しかし, 1.75 倍拡大のデジタル位相イメージングを, 密着撮影と同じ大きさで比較するためにサンプリングピッチを 0.025mm で表示してプロファイルカーブの評価や画像の観察を行った.

3. 実験結果

3.1 アクリルファイバによる評価

デジタル位相イメージングと密着撮影により撮影した画像から求めた直径 5mm のアクリルファイバのプロファイルカーブを Fig.1 (a) に, その左側にエッジ部の拡大図を (b) に示す. (b) のアクリルファイバと空気との境界部分のプロファイルカーブを見ると, デジタル位相イメージングは密着撮影と比べて, ファイバの外側の値が高く, 内側は急激に値が低下する傾向がみられる. すなわち, 密着撮影に比べエッジが強調され, またファイバのコントラストが大きくなっている. しかしながら, デジタル位相イメージングでは, 増感紙/フィルム系を用いて撮影したときに観察できた辺縁部での明らかなオーバーシュートによるエッジ強調 [4, 5] はみられなかった.

アクリルファイバのプロファイルカーブから求めたコントラストは, 密着画像が 0.319 (I_{max} : 0.971, I_{min} : 0.503), デジタル位相イメージングによる画像が 0.334 (I_{max} : 1.009, I_{min} : 0.504) となり, デジタル位相イメージングのほうが約 5.3% 高いコントラストであることがわかった.

被写体の境界における X 線強度の変化に着目するために示した Fig.1 (b) の 1 次微分カーブを (c) に示す. グラフの縦軸は X 線強度の微分値 (変化率) を示しており, デジタル位相イメージングは密着撮影と比べて X 線強度の変化率が大きい. この結果は, デジタル位相イメージングでは, X 線が物体を通過する際にわずかな角度で屈折することにより, 物体の外側で X 線束が密になり逆に内側で疎になることで, 物体の境界における X 線強度の変化が大きくなる現象を捉えている.

3.2 アクリル板による評価

デジタル位相イメージングと密着撮影により撮影した直径 10mm 厚のアクリル板の画像を Fig.2 (a) に、そのプロファイルカーブを (b)、1 次微分カーブを (c) に示す。アクリル板の断端部を撮影した画像とプロファイルカーブから、デジタル位相イメージングは、プロファイルの立ち上がりからピークまでの間 (Fig.2 (b) 図中点線矢印) に X 線強度が 0.56 変化するのに対して、密着撮影における同じ範囲での X 線強度の変化は 0.38 である。また、Fig.2 (c) のアクリル板と空気層の境界面の微分カーブからも、デジタル位相イメージングは、密着撮影と比べて狭い範囲内で X 線強度が変化していることから、密着撮影よりも鮮鋭度の高い画像が得られことがわかる。

3.3 植物の種子による視覚評価

Fig.3 には、デジタル位相イメージングおよび密着撮影により得られた植物種子の画像を示す。種子の内部を観

察すると、密度差の大きい部分、例えば実と皮の境界面や種子の重なった部分での鮮鋭性やコントラストは、明らかにデジタル位相イメージングが密着画像と比べて優れている。ノイズに関しては、輝尽性蛍光板への入射線量が同等となるようにして撮影した画像の RMS 値は、デジタル位相イメージングが 0.011、密着撮影では 0.010 と両者に差は認められなかった。

4. 考察

小焦点 X 線管を用いたデジタル位相イメージングを臨床で利用するためには、いくつかの制限が生じる。例えば、小焦点 X 線管を用いたデジタル位相イメージングでは、できるだけ平行な X 線束となるように焦点-被写体間距離を長くし、さらに被写体-検出器間の距離を大きくとることにより強いエッジ強調効果を期待できる [2]。しかし、臨床で使用するためには、装置をコンパクトに設

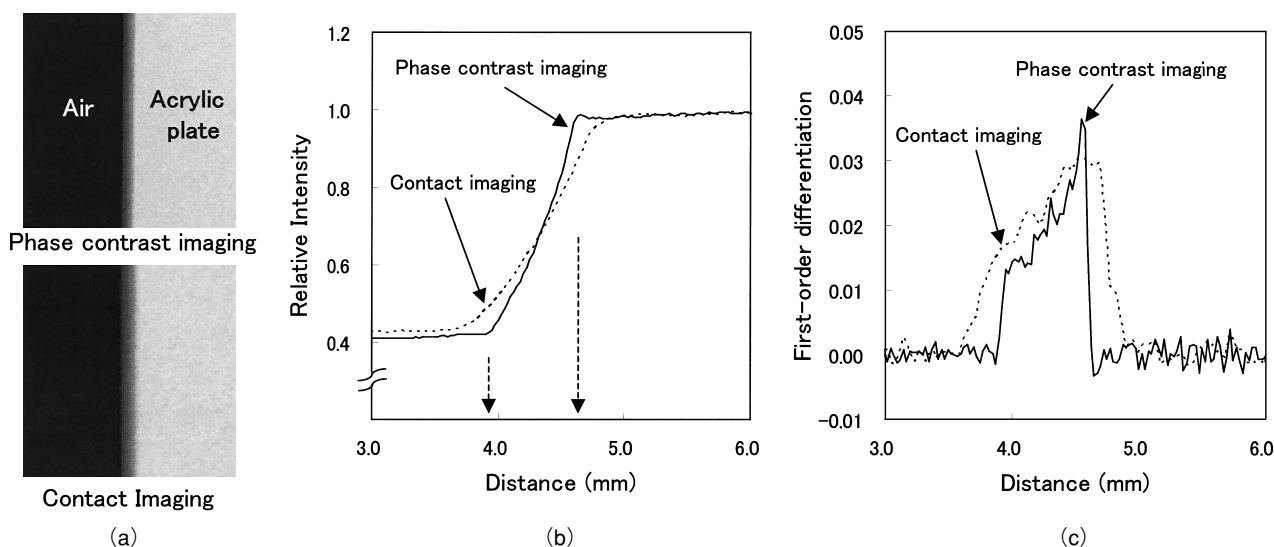


Fig.2 Images of the acrylic plates of 10 mm thickness for the digital phase contrast imaging and contact imaging are shown in (a). The edge profiles of images in (a) are plotted in (b) and their first-order differentiation curves are depicted in (c).

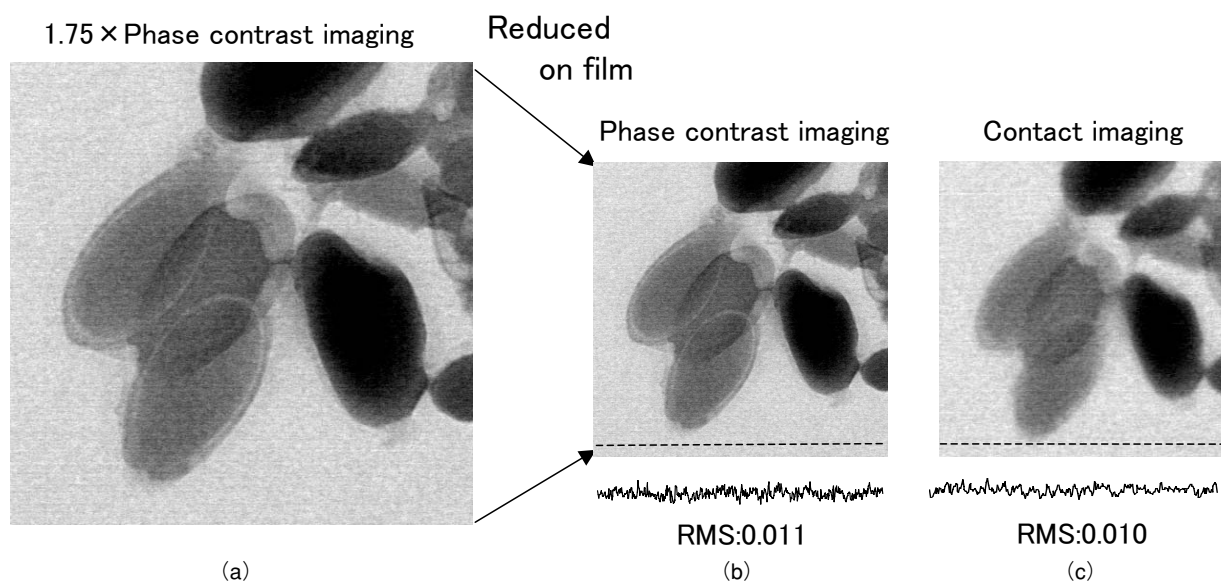


Fig.3 Radiographs of plant seeds for the digital phase contrast imaging and the contact imaging. The image for digital phase contrast imaging (magnification factor : 1.75) is shown in (a). The image size on film for digital phase contrast imaging was reduced by laser-printing with 0.57(1/1.75) times of the reading pixel size to represent in its actual object size as shown in (b). The image for contact imaging is shown in (c). Profile curves with their RMS values in each image are illustrated under each image in order to investigate the noise characteristics.

計しなければならず、長い距離の確保は困難である。また、デジタル位相イメージングは拡大撮影が基本であり、X線検出器に到達する線量が減少することで被ばく線量の増大が危惧される。しかし、密着撮影では散乱線除去のためにグリッドを使用するのに対して、デジタル位相イメージングシステムではグレーデル効果によりグリッドは不要である。その結果、被ばく線量を密着撮影と同程度まで抑えることができる。さらなる被ばく線量の低減を考慮したい場合には、データ収集後にノイズ低減のための画像処理やリスケーリングなどの画像処理を加えることのできるデジタルシステムの導入が必須である。

本論文で示したように、デジタル位相イメージングシステムでは、増感紙／フィルム系を用いたアナログの位相イメージングシステムで観察できたような明瞭なエッジ強調画像を得ることが難しかった。その理由として、デジタル位相イメージングシステムで使用されている輝尽性蛍光板の解像特性が乳房用の増感紙／フィルム系を用いたアナログシステムの解像特性と比べて劣っているために、位相イメージングによって生じた屈折コントラストによるエッジ強調がぼかされて明瞭に観察できないことが考えられる。増感紙／フィルム系の場合、位相イメージングで撮影した直径3mmのアクリルファイバ像のプロファイルカーブからは、エッジ強調が確認でき密着画像に比べて9.0%のコントラストの上昇を認めた[4,5]。しかし、デジタル位相イメージングシステムで撮影した直径5mmのアクリルファイバ像のプロファイルカーブでは、エッジ強調像はわずかしこ確認できず、密着画像に比べて5.3%のコントラストの改善であった。このように、デジタルシステムを用いた位相イメージングでは、増感紙／フィルム系をX線検出器に用いたアナログの位相イメージングシステムと比べるとエッジ強調効果は小さい。今後、さらに高い鮮鋭度の輝尽性蛍光体が開発されれば、位相イメージングによるエッジ強調はより大きく現れるものと思われる。また、高感度でノイズ特性にも優れたX線検出器を用いることで、被ばく線量の低減も可能になると考える。

5. まとめ

本論文では、デジタル位相イメージング用に開発されたPCMシステムを用いて、位相イメージングおよび密着撮影にて撮影した画像の画質の評価を行った。その結果、デジタル位相イメージングでは密着撮影に比べて、エッジ強調の効果によるコントラストの向上および鮮鋭性の向上を確認することができた。しかし、現状のデジタル位相イメージングシステムでは、位相差により生ずるエッジ強調の効果を失うことなく画像化できる性能までには至っていない。今後の課題として、増感紙／フィルム系の性能に匹敵するデジタルのX線検出器の開発が必要である。

参考文献

- [1] Ishisaka A, Ohara H, Honda C: A new method of analyzing edge effect in phase contrast imaging with incoherent x-rays. *Optical Review*, 7(6), 566-572, 2000.
- [2] 本田 凡, 大原 弘, 石坂 哲: 小焦点X線管を用いたX線位相イメージング. 乳房X線画像の画質向上. *医学物理学会誌*, 22(1), 21-28, 2002.
- [3] 遠山景子, 片渕哲朗, 松尾 悟: X線位相イメージングのマンモグラフィへの応用. *日放技学誌*, 61(2), 245-252, 2005.
- [4] Matsuo S, Katafuchi T, Tohyama K, et al.: Evaluation of edge effect due to phase contrast imaging for mammography. *Med. Phys.*, 32(8), 2690-2697, 2005.
- [5] 遠山景子, 片渕哲朗, 松尾 悟: マンモグラフィへのX線位相イメージングの有用性に関する検討. *医画情誌*, 23(2), 79-84, 2006.
- [6] 本田 凡: デジタル位相コントラスト乳房撮影技術の基本的考え方. *医画情誌*, 21(3), 230-238, 2004.
- [7] 大原 弘, 本田 凡, 石坂 哲: 小焦点X線管デジタル位相イメージング. *日本写真学会誌*, 65(7), 501-505, 2002.