

超解像と逐次法を応用したトモシンセシス再構成技術の開発

福田 航*, 森田 順也*, 山田 雅彦*

Improved Tomosynthesis Reconstruction using Super-resolution and Iterative Techniques

Wataru FUKUDA*, Junya MORITA*, and Masahiko YAMADA*

Abstract

Tomosynthesis is a three-dimensional imaging technology developed for use with limited view angle projection data. Because of effective reduction in the overlapping visibility of the normal tissue and lesion of interest, the detection of pathological lesions is improved relative to what can be achieved using conventional mammography. However, because of the limited viewing angle, tomosynthesis is not sufficient for exact tomography reconstruction. To address this problem, we have developed a novel reconstruction algorithm for use with tomosynthesis that incorporates super-resolution and iterative techniques. This article outlines this new reconstruction technology and uses actual experimental results to demonstrate its utility.

1. はじめに

マンモグラフィは、乳がんの早期発見や診断のために広く臨床で利用されているが、正常な乳腺構造と病変が重なった場合に検出が難しく、平面上に投影された画像から病変の広がり等の診断情報を読み解くには高度な読影技術が必要になる。こうした問題を受け、複数の角度から投影画像を撮影し、断層像を再構成することで画像上の構造の重なりを低減するトモシンセシスと呼ばれる機能が開発された。当社はこの機能を搭載した乳房撮影装置「AMULET Innovality」を2013年から発売している。

トモシンセシスを用いた読影は、マンモグラフィ単独の読影に比べて、乳腺の多い領域に隠された病変検出や良悪性判断に有用であることが示されている¹⁾。また、マンモグラフィ撮影と同じ装置で同時に撮影できるため、超音波などの別検査が必要な装置に比べ受診者の負担が少ない。一方で、マンモグラフィに追加の撮影が必要なため、X線による被ばくが増加する等の課題がある。本稿では最初にトモシンセシスの原理とその課題について述べ、それらを改良するために開発した再構成技術とその効果について紹介する。

2. トモシンセシスの原理と課題

2.1 再構成法の原理

トモシンセシスやCTにおいて、断層画像を生成する再構成法はFBP法(FBP: Filtered Back Projection)と呼ばれる

方法が広く利用されている。Back Projectionとは、X線が被写体を透過した経路を逆にたどることで、被写体の断層を算出する方法である。特定の高さの断層面を生成する場合は、各々の投影画像を断層高さに応じて位置を合わせた後に画素値を加算することで実現できる(Fig. 1)。これにより、断层面と同じ高さにある構造は強調され、異なる高さにある構造は平均化により減弱される。FBP法は、Back Projection時に高周波を強調するフィルタを加えることで、明瞭な断層画像の生成を実現している^{2) 3)}。

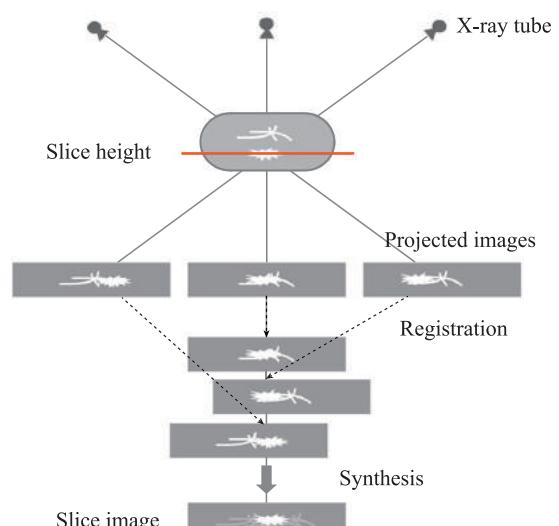


Fig. 1 Tomosynthesis data acquisition and the back projection process

本誌投稿論文（受理2015年12月7日）

*富士フイルム（株）R & D統括本部

画像技術センター

〒258-8538 神奈川県足柄上郡開成町宮台798

*Imaging Technology Center

Research & Development Management Headquarters

FUJIFILM Corporation

Miyanodai, Kaisei-machi, Ashigarakami-gun, Kanagawa
258-8538, Japan

2.2 トモシンセシスの課題

トモシンセシスは正常な乳腺構造と病変の画像上の重なりを低減することで読影に有用な情報を得ることができるが、通常のマンモグラフィと比較すると劣る点も存在する。トモシンセシスの3つの課題を順に説明する。

1つ目の課題は、焦点面以外の構造の写り込みである。トモシンセシスは投影角度が制限されているため、原理的に完全な断層面を再現できず、焦点面以外の構造が断層面に写り込む。この焦点面以外の構造の写り込みにより、乳腺や腫瘍の濃淡情報がなくなる場合がある。このため通常のマンモグラフィ画像と断層像を比較し、断層で低下する濃淡情報を補う等の読影時の工夫が必要になる⁴⁾。

2つ目の課題は、画像鮮鋭度の低下である。トモシンセシスではX線管球を移動させながら複数の画像を撮影するため、撮影時間が長くなり撮影中の体動が発生する確率が高くなる。これを防ぐため、撮影のたびにX線管球を止めるのではなく、一定速度でX線管球を走査しながら撮影する装置が多い。また、撮影時に画素を数画素まとめて読み込むことで撮影時間を短縮している。しかしながら、こうした撮影時の工夫は通常のマンモグラフィ撮影よりも画像の鮮鋭度が低くなる原因になる。

3つめの課題は被ばく量の増加である。トモシンセシス撮影をマンモグラフィに追加するとその分被ばく量が増加することになる。AMULET Innovalityは、通常のマンモグラフィ撮影にトモシンセシス撮影を加えても被ばく量はMQSA (Mammography Quality Standards Act and Program) で推奨するマンモグラフィの被ばく量を下回っている。しかしながら、より安心して受診してもらうためには、被ばく量を低減することは重要な課題である。

3. 課題を解決するための再構成技術

前節で述べたトモシンセシスの課題を改良するため、3つの技術要素を持つ再構成処理を開発したので、順に説明する。

3.1 焦点面以外の構造の抑制技術

すでに述べた通り、FBP法を用いると断層画像に焦点面以外の構造の写り込みが原理的に発生する。この写り込みを抑制するためにさまざまな研究がされている。

代表的な方法として、投影画像で高いコントラストを持つ物体を識別し、影響を受けないように再構成する方法がある⁵⁾。この方法は人工物や石灰化等の高コントラスト構造の写り込

みの抑制には有効であるが、乳腺構造などの淡い構造に起因する構造の写り込みを除去できない。

もうひとつの方法として、逐次再構成と呼ばれる方法がある^{6) 7)}。この逐次再構成の概念は次に示すステップで説明できる (Fig. 2)。

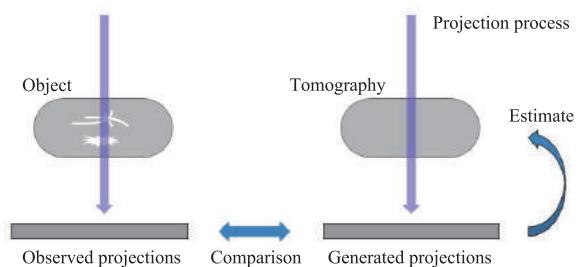


Fig. 2 Iterative reconstruction process

Step1. 初期断層画像を生成する。

Step2. 被写体が検出器に投影されるプロセスを模擬し、断層画像から投影データを生成。

Step3. 生成した投影データと実際に観測した投影データを比較し誤差量を算出。

Step4. 誤差量が小さくなるように断層画像を推定し更新。

Step5. Step2-4を繰り返し。

このステップで逐次的に断層画像を推定し、焦点面以外の構造の写り込みを低減することができる。

逐次再構成は断層画像の推定を何度も繰り返す必要があるため膨大な処理時間が必要になるが、近年の計算機の高性能化に伴い、CTの分野を中心に実用化が進んでいる。

提案する再構成技術は、この逐次再構成の原理に基づいている。高精細でデータ量の大きなトモシンセシスでは、逐次再構成による処理時間の増加が大きな問題となる。本技術では、投影プロセス時に必要な座標計算を最適化することで演算時間を大幅に短縮し、さらにGPUを用いた超並列化演算により、実用的な演算時間を実現した。研究機の環境 (GPU : NVIDIA Quadro K4200) で、 2364×2964 画素サイズの断層画像1枚あたりの生成に約400msecの高速演算を実現した。

石灰化（高コントラスト構造）と乳腺（低コントラスト構造）を模擬したファントム画像で、焦点面以外の構造の写り込みを比較した結果をFig. 3に示す。焦点位置を基準（0mm）

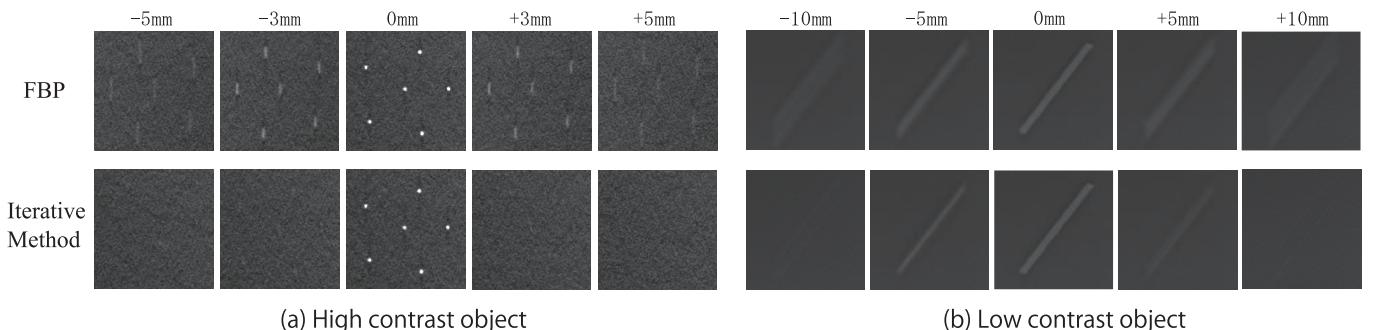


Fig. 3 The effect of iterative reconstruction

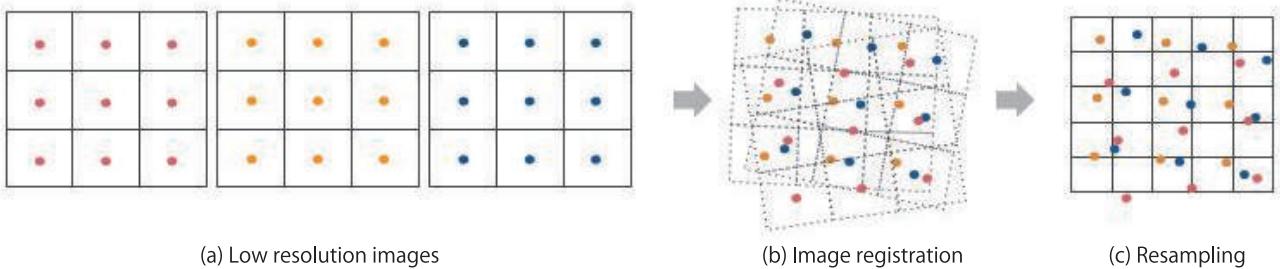


Fig. 4 Image super-resolution process

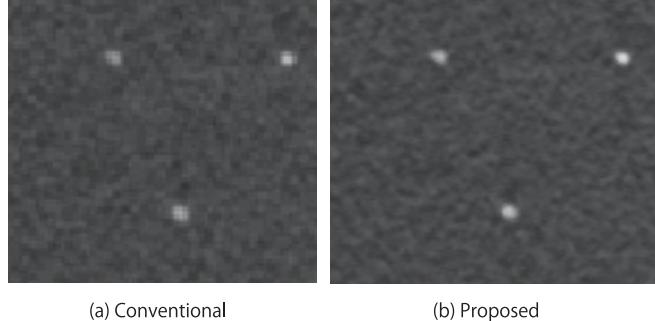


Fig. 5 The effect of sharpness improvement

として、前後の本来は構造が存在しない高さ位置での断層画像を左右に並べる。焦点位置(0mm)でピントのあった構造が、FBP法では焦点面からはずれた場合でも写り込むが、逐次再構成を用いた提案手法の場合は、焦点面からはずれた場合の写り込みが抑制されていることがわかる。

3.2 鮮鋭度低下を防ぐ微細構造の復元技術

石灰化や乳腺構造等の微細構造の視認性を向上するため超解像技術を再構成に応用した。超解像とは撮影機器が持つ物理限界を超えて、観測画像よりも高解像度の画像を生成する技術である。わずかずつ異なる情報を持つ観測画像を複数枚用意することで、実質的により細かいサンプリング間隔を持つ情報を取得することができる^{8) 9)}。超解像の基本原理をFig. 4を用いて説明する。わずかに異なる位置から撮影された複数枚の観測画像セット(Fig. 4a)を、観測画像のサンプリング間隔よりも細かな精度で位置合わせし、同一空間上にプロットする(Fig. 4b)。この空間上ではより細かな間隔で画素格子を定めても格子内に情報が含まれることになるため、単純な補間処理では得ることができない情報を復元することができる。

トモシンセシスでは異なる位置から複数の投影画像を撮影するため、超解像を実現するために必要な情報量を持っている。ただし、単純な位置合わせとは異なり投影プロセスでの位置ずれを画素毎に正確に考慮する必要がある。Fig. 5に石灰化を模擬したファントム画像の例を示す。わずかな位置ずれを考慮しない従来法(a)で再構成した断層画像に比べ、超解像を応用した提案手法(b)では石灰化の視認性が大幅に向かっていることが確認できる。

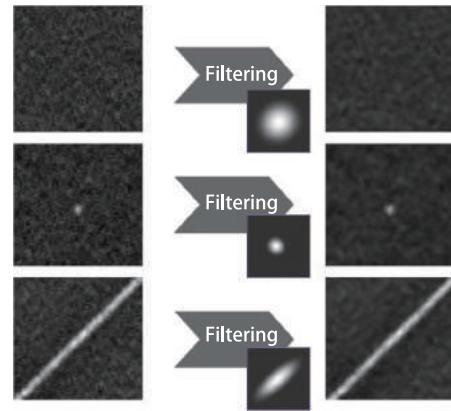


Fig. 6 Improvement in image granularity

3.3 低線量撮影時の粒状改善技術

撮影時に線量を下げるとき、検出器に到達するX線が少なくなるために量子ノイズが相対的に増加し、信号がノイズに埋もれる。そこで、再構成時に「構造を持たないノイズ」成分を抽出し、これを低減することにより粒状性を改善する。Fig. 6に粒状改善技術の概要を示す。ノイズ成分を抽出するため、点や線などの人体構造に合わせたフィルタを設計し、設計したフィルタを用いて断層画像に構造パターンに応じて異なる特性のフィルタをかける。これにより、石灰化や乳腺構造といった複雑なパターンが存在する領域であっても画像を劣化させずに粒状を改善する。

構造に応じたフィルタ処理による効果をFig. 7に示す。構造に応じたフィルタ処理を適用した(b)では、石灰化の鮮鋭度を維持したまま粒状性を抑制できていることがわかる。

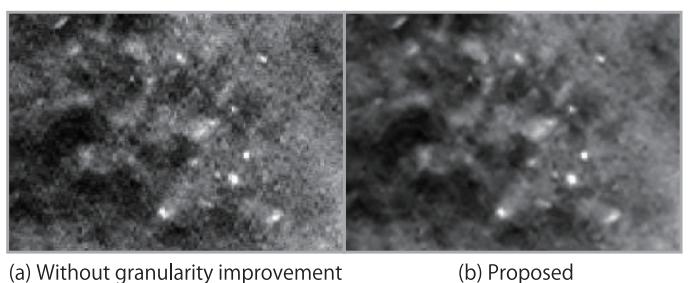


Fig. 7 The effect of granularity improvement

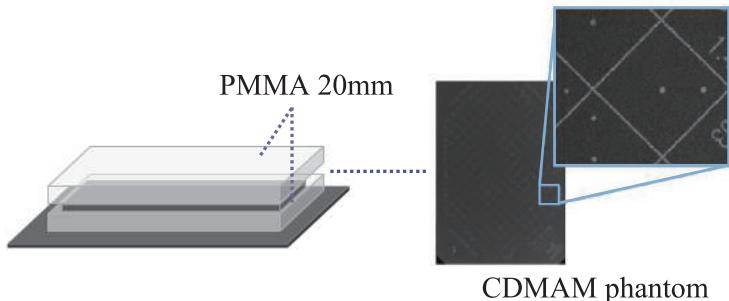


Fig. 8 Study conditions when using a CDMAM phantom

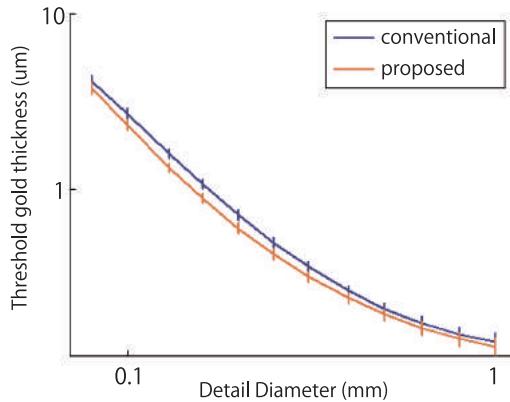


Fig. 9 The result of threshold contrast measurements at the same dose

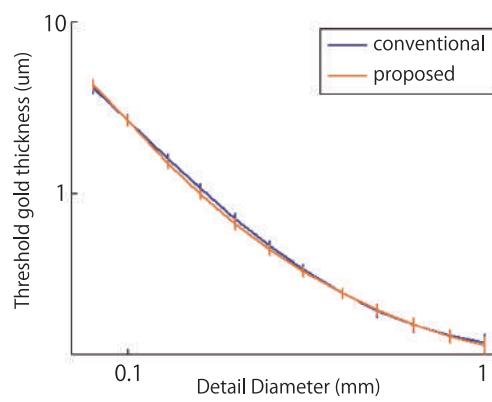


Fig. 10 The result of threshold contrast measurements at a 40% lower dose

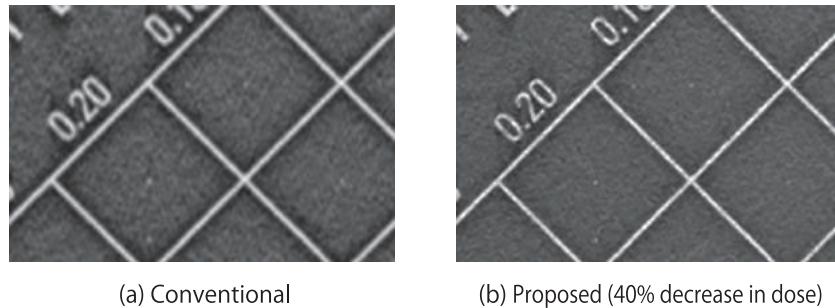


Fig. 11 Image comparisons with a CDMAM phantom

4. 物理評価による定量化

提案する再構成技術を物理測定により評価する。本実験では撮影装置としてAMULET Innovalityを用い、当社装置に搭載されているFBP法をベースに改良した独自再構成処理（以下では従来法と呼ぶ）と比較する。

4.1 信号検出能（CDMAMによる計測結果）

提案する再構成処理での画像信号検出能を従来法と比較する。Fig. 8に示すように、CDMAMファントムは格子点の中心と四隅のうち1箇所に円盤が埋め込まれており、1組の円盤の直径と厚さは格子点ごとに異なる。目視評価ではすべての格子に対する円盤の位置を解答することにより、視認限界を示す曲線を描き画質を量化するが、解析ソフトを使用することで簡便に算出できる。本実験はCDMAM type 3.4と解析ソフト（CDMAM analyzer ver.1.5.5）を用いた¹⁰⁾。

本実験ではFig. 8に示す通り、厚さ20mmのアクリル板2

枚の間にCDMAMファントムを挟み、高線量（W/Al 33kV, 40mAs）と低線量（W/Al 33kV, 25mAs）で各々16枚ずつ撮影した。生成した断層画像の中から最も焦点のあった断層画像を抜き出し解析ソフトで算出した。

同等線量で撮影した従来法と提案法の結果をFig. 9に示す。この曲線は下になるほど画質がよく、小サイズかつ低コントラストの信号を描出できていることを示している。同等線量の場合、提案手法で算出した曲線が常に従来法の下になり、検出能が向上する結果となった。また、高線量で撮影した従来法と低線量で撮影した提案法を比較した結果をFig. 10に示す。この場合、従来法で算出した曲線と低線量撮影し提案手法で算出した曲線はほぼ一致しており、検出能で劣らない結果となった。

CDMAM画像の焦点があった断層面の画像をFig. 11に掲載する（従来手法と線量を約40%低減した提案手法）。この例では、格子の中に埋め込まれている円盤の視認性低下は見られない。

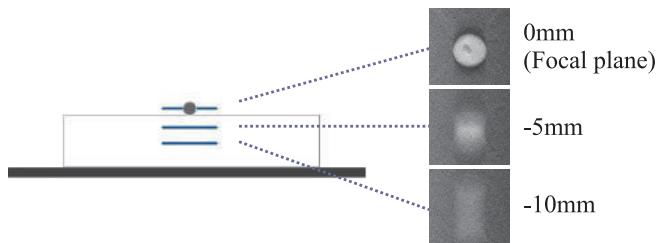


Fig. 12 Study conditions when using an acrylic ball phantom

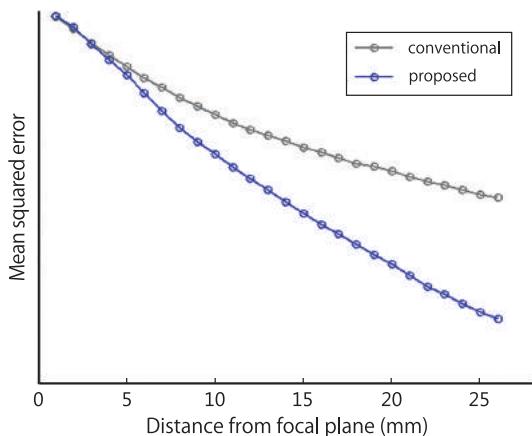


Fig. 13 Results of applying contrast to the acrylic ball

4.2 焦点面以外の構造の写り込み計測

アクリル球を用いたファントムを撮影し、焦点以外に写りこむ構造を定量化する。6cmのアクリル板の上に15mmのアクリル球を配置し、断層画像を再構成する（Fig. 12）。

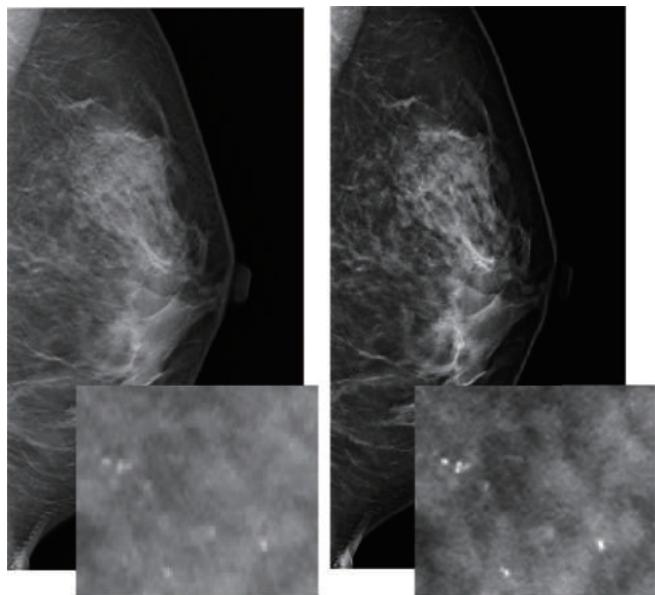
アクリル球が存在する領域を3cm×3cmの範囲で切り出し、背景濃度との二乗誤差を計測することにより、高さ毎の構造の写り込み量を従来法と提案法の各々で計測した。

Fig. 13にアクリル球構造の写り込みの計測結果を示す。グラフは焦点面での二乗誤差量を1とし、構造の写り込みがない背景濃度の二乗誤差を0として正規化した。いずれの方法でも焦点面から離れるにつれて、構造の写り込みが小さくなっているが、提案手法の方が構造の写り込みがより少ないことがわかる。

5. 臨床への適用

人体画像に対して、従来法と提案手法を適用した結果をFig. 14に掲載する。画像は撮影角度±7.5°の振り角で撮影した。従来法と比較すると提案法では、よりコントラストがつき、石灰化等の微細構造の視認性が向上していることがわかる。これは、逐次的な再構成により焦点面以外の写り込みを低減しコントラストが向上したことと、超解像処理を応用了処理により鮮銳度が向上したと考えられる。

また、提案手法で再構成したトモシンセシスと通常マンモグラフィを比較し、病変の検出に必要な撮影線量を臨床研究により検証している¹¹⁾。この研究では通常のマンモグラム撮影に対して、50%までトモシンセシス撮影を低線量化してもマンモグラフィ撮影の検出とほぼ同等の検出性能を保つことを報告している。



(a) Conventional

(b) Proposed

Fig. 14 Clinical example

6.まとめ

トモシンセシス撮影における課題と新しく開発した再構成技術の原理を説明し、本技術を用いることでトモシンセシスにおける石灰化や腫瘍の視認性改善ができるることを物理実験で検証した。本技術が広く利用され、画質向上と診断能向上に貢献することを期待し、今後も医療の発展に繋がる技術開発に挑戦していく。

参考文献

- Rafferty, E. A. et al.“Assessing Radiologist Performance Using Combined Full-Field Digital Mammography and Breast Tomosynthesis Versus Full-Field Digital Mammography Alone; Results of a Multi-Center, Multi-Reader Trial.”. Radiological Society of North America : 93rd Scientific Assembly and Annual Meeting. Chicago. 2007-11-25/30.
- Sechopoulos ioannis. A review of breast tomosynthesis. Part I. The image acquisition process. Medical Physics. 2013, 40(1), 014301.
- Sechopoulos ioannis. A review of breast tomosynthesis. Part II. Image reconstruction, processing and analysis, and advanced applications. 2013, 40(1), 014302.
- Koibuchi, Yukio; Odawara, Hiroki. Breast Tomosynthesis, Three-Dimensional X-Ray Breast Imaging Systems: Current Clinical Relevance. MEDIX. vol.56, p.23-27.
- Kalender, W. A.; Hebel, R.; Ebersberger, J. Reduction of CT artifacts caused by metallic implants. Radiology.

-
- 1987, 164(2), p.576-577.
- 6) Nuyts, J.; Man, B. D.; Dupont, P.; Defrise, M.; Suetens, P.; Mortelmans, L. Iterative reconstruction for helical CT: a simulation study. Physics in Medicine and Biology. 1998, 43(4), p.729-737.
 - 7) Fukuda, W.; Maeda, S.; Kanemura, A.; Ishii, S.; Bayesian X-ray computed tomography using material class knowledge". 2010 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2010).Dallas, Texas. 2010-0314/19, p.2126-2129.
 - 8) TSAI, R. Y.; Huang, T. S. Multiframe image restoration and registration. Advances in Computer Vision and Image Processing. 1984, vol.1, p.317-339.
 - 9) Kanemura, A.; Maeda, S.; Fukuda, W.; Ishii, S.; Bayesian image superresolution and hidden variable modeling. Journal of Systems Science and Complexity. 2010, 23(1), p.116-136.
 - 10) Karssemeijer, N.; Thijssen, M. A. O. "Determination of contrast-detail curves of mammography systems by automated image analysis". Digital mammography '96: proceedings of the 3rd international workshop on digital mammography. Chicago. Elsevier, 1996, P.155-160. Note: CDCOM software and sample images are posted at www.euref.org.
 - 11) Endo, T. et al. "Comparison of Low Dose Tomosynthesis Plus Synthesized Mammography with Digital Mammography Alone for Breast Cancer Screening". Radiological Society of North America: 101th Scientific Assembly and Annual Meeting. Chicago. 2015-11-29/12-04.

商標について

- ・本報告中にある「AMULET Innovality」（販売名：デジタル式乳房用X線診断装置 FDR MS-3500）は富士フィルム（株）の登録商標です。
- ・その他、本論文中で使われている会社名、システム・製品名は、一般に各社の商標または登録商標です。