

乳房 X 線画像上の構築の乱れ診断支援システムの開発について

本間 経康

東北大学大学院医学系研究科 医用画像工学分野

Development of Computer-Aided Diagnosis Systems for Detection of Architectural Distortion in Mammograms

Noriyasu HOMMA

Department of Radiological Imaging and Informatics, Tohoku University Graduate School of Medicine

Key words : Computer-aided detection/diagnosis, mammography, and architectural distortions

In this article, trends in development of computer-aided diagnosis (CAD) algorithms for detection of architectural distortion, which is a typical sign of breast cancer in mammograms, are briefly summarized. Recent techniques including the state-of-the-art are reviewed first and some of fundamental problems inherent in the techniques are analyzed from a viewpoint of pattern recognition. New attempts to overcome the problems are then introduced. An essential core of such attempt is a new local contrast-based detection of the sign. The new detection using a difference of Gaussians (DoG) based filter is more robust to noise in mammograms than a breast glands-based detection that has been widely used in conventional CAD algorithms. Furthermore, a new model of normal glands orientation has introduced to evaluate similarity between the actual glands and the normal. This is simpler and more effective than the conventional geometric feature evaluation of the glands configuration. Although some experimental results suggested that the new method is superior to the state-of-the-art, it might be worth to mention that we should use CAD systems with caution no matter if they function very well or not because they have the fundamental limitation in the sense of the pattern recognition problem.

1. はじめに

現在日本では、進行する高齢化に伴いがん罹患率およびがん罹患数が増加している。女性の罹患部位別ではとくに乳房部分におけるがん罹患数が急激に上昇しており、Fig. 1 に示されるように 2007 年現在、部位別がん罹患数において第 1 位となっている¹⁾。また、罹患数のみならず死亡数においても年々増加の一途をたどっており、乳がん治療は医学的にも社会的にも重要課題であるといえる¹⁾。

一般的にがんは早期発見・早期治療により生存率の向上が期待できるが²⁾、乳がんの早期発見には、乳房 X 線画像撮影 (マンモグラフィ) 技術の発展が大きく貢献した。すなわち、マンモグラフィは乳房全体の状態を把握するのに適し、視触診や超音波画像では検出しにくい微細な病変などの検出に有効であるとされ、定期的な乳がん検診の場で幅広く用いられるようになってきた³⁾。さらに、40 歳以上の女性に隔年検診を実施する指針が厚生労働省から出されるなど⁴⁾、定期的な乳がん検診の重要性が広く認識され、Table 1 に示

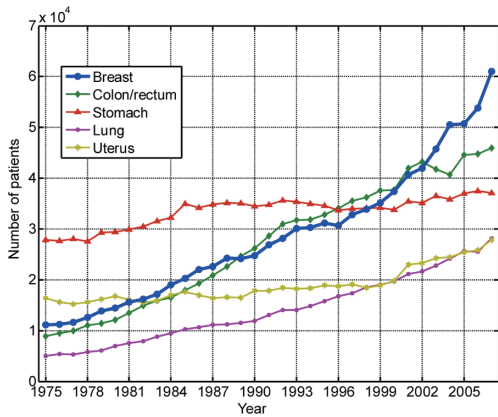


Fig. 1. Trends in number of women's cancer patients by major sites¹⁾.

すように検診受診者も年々増えている¹⁾。しかし、受診者数が増加すれば医師の負担増大を招くことは自明であり、疲労などに起因する誤診、とくに病変の見落としがあってはならない。この診断医の負担軽減および診断確度向上のために、コンピュータ支援診断 (computer aided detection もしくは diagnosis: CAD) システムの開発が行われている^{5,6)}。CAD とはコンピュータによる画像解析情報を読影医に第 2 の意見として提示することにより、診断確度や精度の向上、診断時間の短縮といった診断の質と生産性の改善を目的とした技術である⁷⁾。

乳がんの主な画像所見として、Fig. 2 に示すような微小石灰化、腫瘤および構築の乱れがある。微小石灰化は乳房内の血管や軟部組織の細胞が壊死し沈着したものであり、画像上では Fig. 2(a)

Table 1. Screening rate of breast cancer in the over 40 age group in Japan¹⁾.

Year	2007 past 1 year	2010	
		past 1 year	past 2 years
Screening rate	20.3	24.3	31.4

に示すように白い斑点群として視認される。腫瘤は形状、境界および濃度に特徴を有する占拠性病変であり、Fig. 2(b) に示すように画像上である程度の面積をもった陰影として表れる。構築の乱れは、明確な腫瘤陰影ではないが、正常の乳腺構築が歪みを伴った病変であり、Fig. 2(c) に示すような 1 点から放射状に広がるスピキュラや、乳腺実質の局所的引き込みあるいは歪み等が特徴とされる⁸⁻¹⁰⁾。このように各所見特有の画像的特徴を有するため、全ての病変を網羅的に検出できるような CAD アルゴリズムは存在せず、それぞれを特異的に検出するアルゴリズムが開発されている¹¹⁻¹⁴⁾。

文献¹⁵⁾によると、マンモグラフィ画像の (研修医による) 読影自習における乳がんの検出結果に関して、微小石灰化や腫瘤の感度はそれぞれ 94%、82% と比較的高い値であるのに対し、構築の乱れの感度は 60% と低い値を示している。このことから、構築の乱れは他の所見と比べて、経験を積んだ医師でなければ見落としが発生しやすい病変であると考えられる。また、実際に臨床応用されている 2 つの商用の CAD システムを用いて得られた構築の乱れの検出感度は 50% 未満であるという報告もあり¹⁶⁾、このような検出の難易

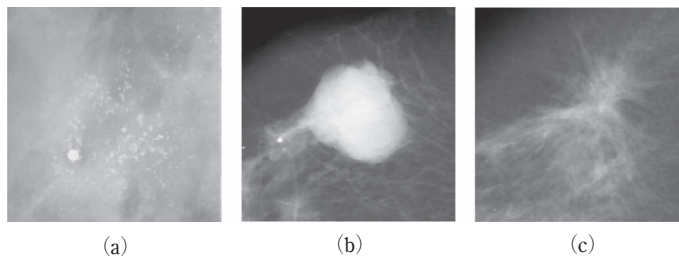


Fig. 2. Typical findings of breast cancer in a mammogram. (a) A microcalcification cluster. (b) A mass. (c) An architectural distortion.

度が高いことにも起因して、学術的にも商用的にも構築の乱れ用 CAD アルゴリズムの開発は停滞傾向にある。しかし、構築の乱れは悪性率が高く、上述のように医師でも経験が浅ければ読影が難しいため、CAD システムによる読影補助がとくに望まれている病変であるともいえる。

そこで本稿では、この構築の乱れ検出に焦点をあてたマンモグラフィ用 CAD アルゴリズム開発における問題点を概説し、それを解決するための試みを紹介する。とくに、専門の異なる読者や初学者が特別な予備知識を必要とせず本質を理解できるように、できるだけアルゴリズムの数学的詳細に立ち入らない解説を試みる。

2. 構築の乱れ検出アルゴリズムと課題

2.1 従来法と性能限界

これまでに構築の乱れを検出対象とした様々な CAD アルゴリズムが提案されている。例えば、平均曲率を用いた乳腺構築検出および集中度算出を用いた方法¹⁷⁻²⁴⁾、フーリエ解析によるフラクタル解析に基づく方法²⁵⁾、フラクタル特徴量およびサポートベクターマシン (support vector machine: SVM) に基づく方法²⁶⁾、多重解像度解析に基づく方法²⁷⁾、数理形態学的フィルタに基づく方法²⁸⁾、ラドン変換により原画像上の線構造を強調し、放射状フィルタを用いる方法^{29,30)}、ガボールフィルタおよび線形力学モデルに基づく方法³¹⁻⁴¹⁾ など様々な方法がある。これらの方法はいずれも、線構造の広がり (スピキュラ) という構築の乱れに特有な特徴に着目し、その特徴を定量化するというアプローチをとっている。しかし、現在のところどれも十分な検出性能とは言えず、とくに乳腺構築の広がり度合いの定量化の点において課題がある。

その原因として次の 2 点が考えられる。まず 1 点目は、乳房 X 線画像は一般画像と異なり空間解像度および濃度分解能の点で極めて高精細である反面、ノイズが大きいということである。それゆえ、病変に伴う線構造は淡く、極めて低コントラストな陰影として現れることもある。その結果、従来法では病変かどうかを判別するに十分な確度

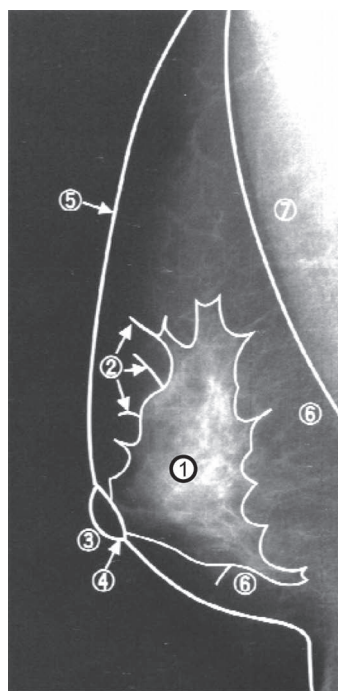


Fig. 3. A normal mammogram⁴⁾. (1) Mammary glands. (2) Cooper's ligament. (3) Nipple. (4) Areola. (5) Skin line. (6) Fatty tissue. (7) Pectoral muscle.

と精度で線構造の抽出が行えていない。2 点目の原因として、仮に乳腺の線構造を抽出できたとしても、それが正常な構造なのか否かを判断する論理が不十分であるということが挙げられる。とくに従来法では単に放射状に広がる線構造を病変と判別するものが多く、その病変が乳房領域上のどの位置に存在するかについて考慮が不十分である。

実際、正常乳腺構築にも部分的に放射状に広がる特徴をもつものが存在する。以下にそのような具体例を説明する。Fig. 3 に正常な乳房 X 線画像およびその乳腺構築を示す。図中 (1) に示されるように、一般に乳腺構築は乳頭を中心にして胸筋方向へ向かって扇形状に広がり、乳頭付近では正常な陰影であっても、放射状の特性が強く現れることが多い。ここで、Fig. 4(a) に示される構築の乱れを含んだ症例に対し、放射状構造を強調す

るアプローチを軸とした最新手法²⁹⁾を適用した結果を Fig. 4(b) に示す。Fig. 4(a) 中の赤線で囲まれた領域は構築の乱れ陰影を示す。Fig. 4(b)

中の白い領域は、この位置において病変陰影が存在する可能性が高いと判断された領域である。Fig. 4(a) の乳頭に対応する位置、すなわち Fig. 4

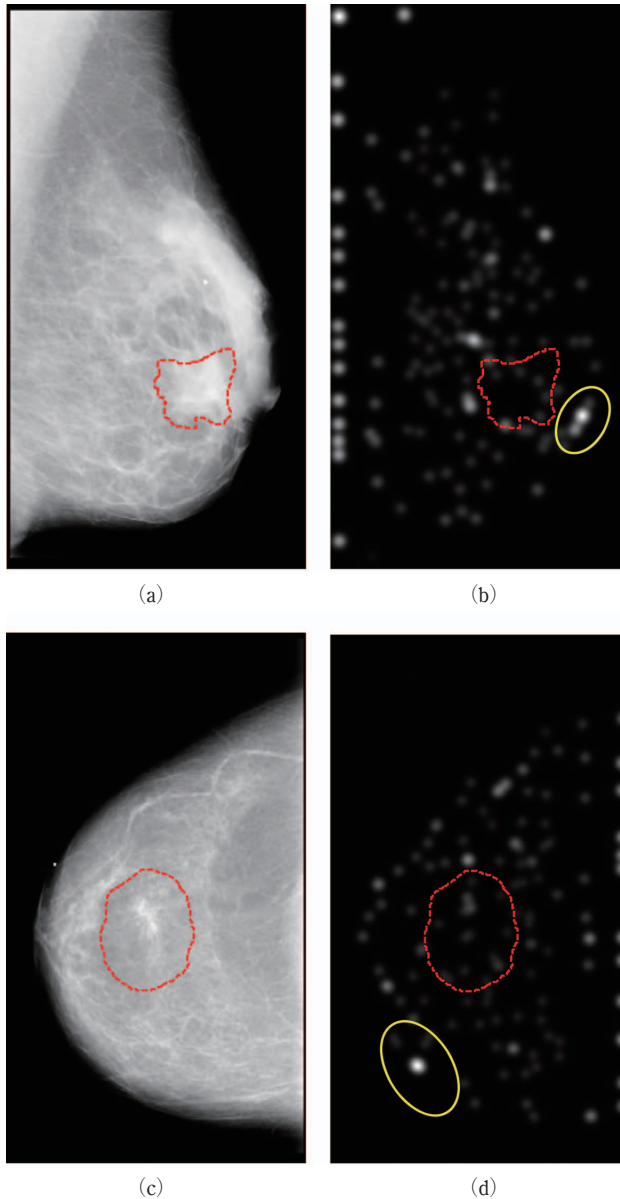


Fig. 4. Two mammograms with architectural distortions and detection results to them by a previous method¹⁹⁾. (a) A mammogram with an architectural distortion. (b) Detection result to Fig. 4(a). A yellow circle is most likely to be the architectural distortion. (c) A mammogram with an architectural distortion. (d) Detection result to Fig. 4(c). A yellow circle is most likely to be the architectural distortion.

(b) 中の黄円内において白い領域が強く現れていることが確認できる。これは、正常な乳腺構築がどのように広がっているかについて考慮せずに、放射状線構造の抽出のみに着目しているためである。次に、Fig. 4(c) に示される構築の乱れを含んだ症例に対して、同様の最新手法を適用した結果を Fig. 4(d) に示す。この例では、Fig. 4(d) 中の黄円で囲まれた領域において高い値をもつ、すなわち、病変陰影である可能性が高いと判断されたが、実際には、この黄円領域は乳房領域の辺縁領域上に存在する正常陰影である。とくに、このような乳房辺縁領域は乳頭から広がる線構造が明瞭に現れやすく、正常な乳腺構築の影響を考慮しないまま放射状特徴量の抽出を行なってしまうと、誤って正常陰影を病変陰影候補として検出してしまう可能性が高い。

以上のように、これまでのような放射状特徴量抽出を軸に据えた検出アルゴリズムでは、正常な乳腺構築が放射状に広がっているような陰影を、病変であると誤認識してしまう可能性がある。

2.2 パターン認識問題

2.1 節で例示した問題は、医用画像診断支援に限らず計算機による画像（もしくはパターン）認識において古くから指摘されており（たとえば文献 42）など）、かつまだ十分な解決が得られていないという点で新しい。文献 42)によれば、パターン認識（pattern recognition）とは、これまでの経験で得られた知識¹に基づいて、対象となるものを再度知覚（re-cognition = recognition）する過程として捉えられる。この定義によれば、はじめて知覚するようなまったく新しいものは認識できないし、計算機の場合（多分生物の認識においても）、認識の基である知識システムが認識性能に大きな影響を及ぼすことは想像に難くない。たとえば、日本語のみを母国語とする場合、アラビア語やヒンズー語の文字を認識するのは一般に難しい。これは、そもそもアラビア文字やヒンズー文

字の知識がなく、かつ日本語で用いられる漢字や仮名文字、さらには（比較的なじみのある）英語アルファベットのような文字の（形状に関する）知識がほとんど使えない（流用できない）事に起因すると（パターン認識の世界では）解釈される。

構築の乱れ検出に話を戻すと、病変を正しく認識（して検出）するには、病変に関する正確な知識が不可欠である。現在の計算機が持っている知識システムは、記憶能力において人間のそれをはるかに凌駕するが、残念ながら肝心の記憶すべき情報の整理能力において人間の足元にも及ばない。そこで、パターン認識の分野では、次のような簡単な方法で記憶すべき情報を整理することが多い。いま、対象群の特徴を表すスカラー量（これを特徴量という）をいくつか定義し、ある特定の対象のもつ属性をこれら特徴量の値の集合（ベクトルと考えても良い）として多次元空間（これを特徴量空間と呼ぼう）上の 1 点で表現されたい。このとき、記憶される情報は特徴量の集合である属性として整理されるとみなすことができる。この知識システムを使えば、ある病変候補の属性が、それまでに記憶された病変の属性に特徴量空間上でどの程度近いかで、その候補が病変か否かを判断することができる。ここで、知識システムの正確さ、すなわち ① 属性がどの程度正確に対象を表現できているか、そもそも ② 属性を構成する特徴量が正確に定義できているか、さらには仮にそのような特徴量が存在したとして、それを入力情報である乳房 X 線画像から ③ 正確に抽出できるかが、認識性能に大きく影響することは自然である。したがって、パターン認識の言葉を借りれば、2.1 節で例示した従来法の 2 つの問題点のうち、1 点目は ③、2 点目は ①、② に関する問題であるといえる。

3. 課題解決の試み

本節では、2 節で述べた問題に対して我々のグループが行った試みを紹介し、従来法と比較して、その性能について考察する。はじめに 1 点目の解決策として試みたのは、ノイズに影響されやすい精細な線構造を抽出するのではなく、ノイズに影

¹ ここで、知識とは経験を整理して記憶された情報のうち、必要なきに取りだすことが可能なものを指すことにする。

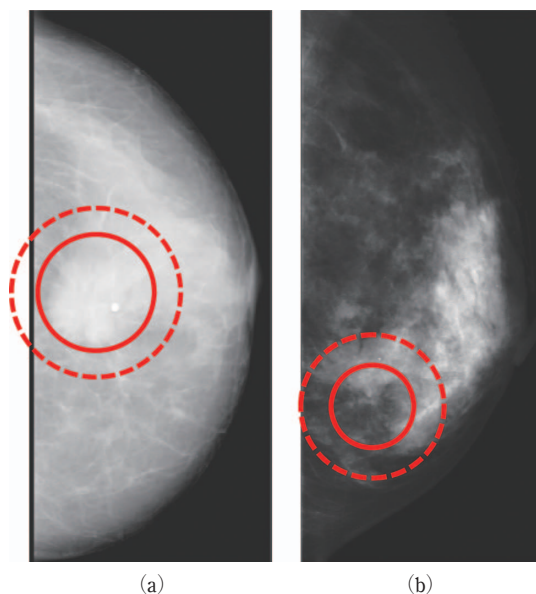


Fig. 5. Examples of architectural distortion with lower and higher intensities compared to those of the surroundings are shown in (a) and (b), respectively.

響されにくい低周波成分である対象領域と周辺との平均的な輝度差を、Difference of Gaussian (DoG) と呼ばれる処理を用いて抽出する手法である⁴³⁾。これは、病変領域は周辺領域と比較すると平均的な輝度値の差、すなわち局所領域的にコントラストが存在するという特徴に着目したものであり、正確²⁾かつノイズ等に対してもロバストな抽出が可能な特徴量に基づく手法である。Fig. 5(a) は赤実線の円で示された病変領域の輝度値が、赤実線と赤点線の円で囲まれた周辺領域の輝度値よりも高い場合である。また、Fig. 5(b) はその逆の場合であり、病変領域の方が周辺領域よりも輝度値が低い場合である。線構造が不鮮明であっても対象領域の平均的な輝度差、すなわち局

²⁾ これは抽出の正確さであり、この特徴量に基づく属性表現の正確さとは必ずしも一致しないことに注意しよう。しかし、どんなに正確な属性を構成する特徴量でも、その抽出が不正確だと結果的に属性も不正確になる。したがって抽出の正確性も認識性能に大きく影響する。

所的なコントラストを活用することで、とくに従来手法では検出が難しい Fig. 5(b) に見られるような線構造が極めて見えにくい例を、病変候補として拾い上げられることが期待される。

次に、2点目の解決策として試みたのは、正常乳腺画像モデルに基づく簡易かつ高精度な判断基準である^{44,45)}。これは乳頭の位置および乳房領域の画像解剖学的な形状に基づき、正常乳腺構築を指数関数によって近似したモデルを構築し、このモデルにより抽出された乳腺構築と実際の乳腺構築を比較しその差異を評価するものである。これにより、従来手法では区別ができなかった乳頭付近や乳房辺縁領域に存在する非病変領域の判別が可能にすることをねらった。

3.1 結果の例

ここでの実験例は、Digital Database for Screening Mammography (DDSM)⁴⁶⁾ と呼ばれる世界的に標準的なデータベースから、構築の乱れを含む50症例および正常例50症例を含む100枚の乳房X線画像を適当に選択して性能評価用データとして用いた。画像の空間解像度は0.05 mm/pixel、濃度は12ビット階調である。

Free-response receiver operating characteristic (FROC) 解析の結果を Fig. 6 に示す。FROC 曲線は横軸に画像1枚あたり偽陽性数 (false positives per image: FPI) をとり、縦軸にとった真陽性率 TPF との関係プロットしたもので、画像の主観的評価で用いられる ROC 曲線同様、曲線が左上にあるほど検出性能が高いと判断される。

図中、放射状フィルタ設計に基づく検出法²⁹⁾ は上向き三角形 (▲)、ガボールフィルタと線形力学モデルに基づく検出法³¹⁾ は四角形 (■)、DoGに基づく検出法⁴³⁾ は円 (●)、DoG および正常乳腺画像モデルに基づく検出法^{44,45)} は菱形 (◆) として示されている。また、放射状フィルタ設計に基づく検出法およびガボールフィルタと線形力学モデルに基づく検出法においては、今回用いたデータセットによる追実験の結果を実線、文献^{29,31)} において得られた結果を破線で示した。

Fig. 6 より明らかなように、我々が試みた DoG に基づく検出法の FROC 曲線は他手法の曲線と

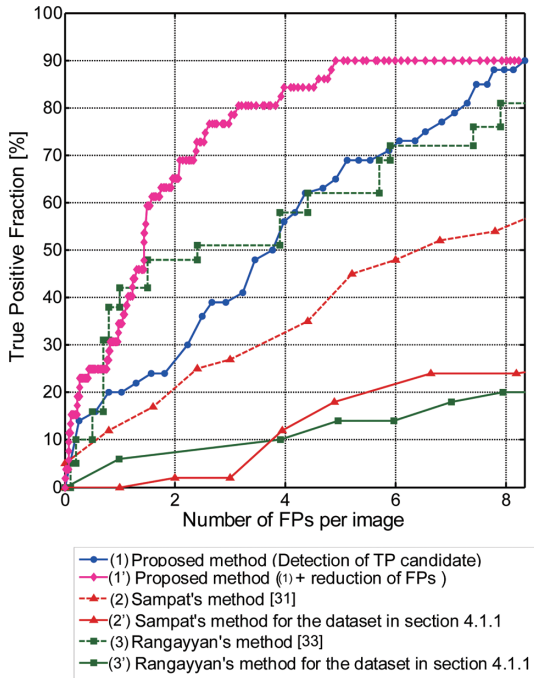


Fig 6. FROC curves obtained by the proposed method and previous methods.

比べて左上に位置しており、従来手法を上回る性能を有していることが確認できる。とくに今回用いたデータに対しては最新検出法の性能を大幅に上回っている。また、DoGに基づく病変検出法では真陽性率80%において偽陽性数7.2/枚であったが、正常乳腺画像モデルに基づく特徴量を用いることで、真陽性率80%において偽陽性数3.1/枚と大幅に改善され、真陽性率を維持したまま偽陽性数を大きく低減できている。これは正常乳腺画像モデルを従来よりも正確に近似できたこと、ならびに正常モデルとの差異を抽出するアルゴリズムが症例ごとに異なる特徴に対してもロバストであったことが貢献していると考えられる。また、今回得られた検出性能は最先端の研究結果^{34,38-41)}と同等以上かそれよりも優れた性能である。

3.2 考察

3.2.1 試みの有効性が確認できた症例

Fig. 7(a) に示す乳腺構築の乱れを含む症例に対して、放射状フィルタ設計に基づく検出法、ガ

ボールフィルタと線形力学モデルに基づく検出法、およびDoGに基づく検出法を適用し得られた検出結果をそれぞれFig. 7(b), Fig. 7(c), およびFig. 7(d) に示す。Fig. 7(b), Fig. 7(c) およびFig. 7(d) において、白い画素が強く現れている領域ほど、原画像上で病変陰影が存在する可能性が高いと判定されたことを示している。なお、Fig. 7(d) はある設定値における、DoGの絶対値画像である。この症例は、構築の乱れが平均的に高輝度な陰影の例であり、構築の乱れに伴う放射状の線構造が非常に淡く映っている。それゆえ、線構造強調処理を主体としたアプローチの従来手法では、線構造を上手く捉えることができずFig. 7(b) およびFig. 7(c) の赤線で囲まれた領域内の構築の乱れ陰影を病変候補領域としての確に指し示せていない。一方、周辺との対象領域との平均的な輝度差に着目したDoGに基づく提案手法では、Fig. 7(d) より明らかなように、構築の乱れ陰影が含まれる領域を病変候補領域として強調できている。これは、提案手法で新たな特徴として着目した周辺と対象領域との平均的な輝度差が、従来手法では検出できない放射状の線構造が極めて不明瞭な陰影において、効果的に機能したことを示していると考えられる。

3.2.2 残された課題

今回の試みでは検出が困難であった症例をFig. 8に示す。赤線で囲まれた領域の構築の乱れ陰影は、極めて高濃度な乳腺構築に重なるようにして存在しており、その陰影を視覚的に判断するのは容易ではない。この症例のように周辺領域と病変陰影との平均的な輝度差がほとんどない場合、今回提案したDoGのような局所的な輝度値変化検出に基づく方法でも病変陰影検出は非常に困難であると考えられる。これは放射状の線構造抽出を主としたアプローチをとる従来手法にも同様のことが言え、高濃度乳腺上に存在する病変陰影の検出は現在のCADシステム全体が抱える課題とされる⁴⁷⁾。

今回の試みでは、第1段階で局所コントラストに着目した病変候補検出を行っており、このような低コントラスト病変を想定していない、つまり、

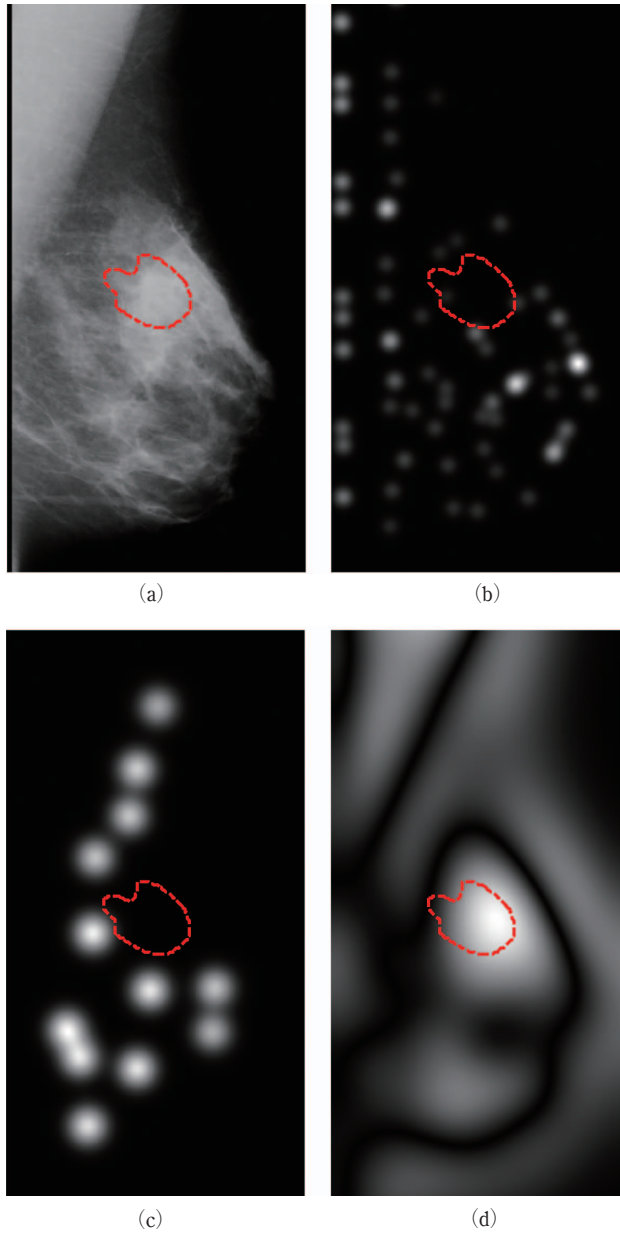


Fig. 7. Result of the previous methods^{29,31)} and proposed method. The region surrounded by a red line indicates an architectural distortion. (a) An original mammogram. (b) Result of the previous method²⁹⁾. (c) Result of the previous method³¹⁾. (d) The DoG image $|D_k(x, y, \sigma)|$ with $\sigma = 87.5$.

CAD アルゴリズムにとっては初めて経験する (?) 病変なので「認識」できないのも無理はない。また、問題の原因が分かればその解決は可能であ

ることが多い。実際、乳腺濃度の判断アルゴリズムを組み込みことで、このような高濃度乳腺領域における病変検出感度を高められることは確認で



Fig. 8. A difficult case to detect by the proposed method.

きる。このように原因解析とその解決を繰り返し、様々な論理を積み重ね、組み合わせていくことで、更なる性能向上が期待できる。

4. おわりに

本稿では、読影医師の負担軽減のためのコンピュータ支援診断システムのうち、乳がんの典型的な画像所見の一つである乳腺構築の乱れ陰影を検出するアルゴリズムの開発における問題とそれを解決するための試みを紹介した。

病変と周辺領域にある程度のコントラストが存在する場合には、意図した性能向上が認められた。また、今回の試みでも検出が困難であった高濃度な乳腺領域に存在する病変に対しても、その原因と解決指針を示し、そのような原因解析と解決の繰り返しが性能向上につながる可能性を指摘した。しかし、どんなに高性能なシステムが開発されても、2.2 節の最後に示したパターン認識における 3 つの問題は本質的な限界として存在する。将来的には臨床応用に値するシステムが開発されるものと期待されるが、臨床現場におかれては、このようなシステムの本質的限界をご理解いただ

いて適切にご活用いただきたい。

謝 辞

本稿は、半田岳志氏の東北大学大学院工学研究科修士学位論文⁴⁴⁾の内容を基にして、加筆修正して編集したものである。また、本稿で紹介した研究の一部は、ST 復興促進プログラム (A-Step) シーズ顕在化タイプ 241FS0027 の助成によった。

文 献

- 1) Matsuda, T., Marugame, T., Kamo, K., Katanoda, K., Ajiki, W., Sobue, T., The Japan Cancer Surveillance Research Group: Cancer Incidence and Incidence Rates in Japan in 2006: Based on Data from 15 Population-based Cancer Registries in the Monitoring of Cancer Incidence in Japan (MCIJ) Project, *Japanese Journal of Clinical Oncology*, **42**, 139-147, 2012
- 2) 全国がん (成人病) センター協議会の生存率共同調査 (2013 年 1 月集計), <https://kapweb.chiba-cancer-registry.org/web/general/top.aspx>. [accessed anuary 23, 2013]
- 3) 日本医学放射線学会, マンモグラフィガイドライン委員会, 日本放射線技術学会, 乳房撮影委員会 (編): マンモグラフィガイドライン第 2 版 (増補版), 医学書院, 2007
- 4) 厚生労働省: がん予防重点健康教育及びがん検診実施のための指針, http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/gan_kenshin.html. [accessed anuary 9, 2013]
- 5) Fujita, H., Hara, T., Matsubara, T., Fukuoka, D.: Computer-aided diagnosis (cad) in the field of breast-cancer image diagnosis, *Medical Imaging and Information Sciences*, **23**, 19-26, 2006
- 6) Tang, J., Rangayyan, R.M., Xu, J., El Naqa, I., Yang, Y.: Computer-aided detection and diagnosis of breast cancer with mammography: recent advances, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, **13**(2), 236-251, 2009
- 7) 藤田広志: 医用画像のためのコンピュータ支援診断システムの開発の現状と将来, *日本写真学会誌*, **66**(5), 484-490, 2003
- 8) *Illustrated Breast Imaging Reporting and Data System (BI-RADS)*, American College of Radiology, 4th edition, 2003
- 9) 東京都がん検診センター: 手にとるようにわかるマンモグラフィ, バクトル・コア, 東京, 2002

- 10) 東野英利子, 角田博子, 秋山太: マンモグラフィ診断の進め方とポイント, 第3版, 金原出版, 2008
- 11) Jing, H., Yang, Y., Nishikawa, R.M.: Detection of clustered microcalcifications using spatial point process modeling, *Physics in Medicine and Biology*, **56**(1), 1-17, 2011
- 12) Eltonsy, N.H., Tourassi, G.D., Elmaghraby, A.S.: A concentric morphology model for the detection of masses in mammography, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, **26**(6), 880-889, 2007
- 13) Karssemeijer, N., te Brake, G.M.: Detection of stellate distortions in mammograms, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, **15**(5), 611-619, 1996
- 14) Zwiggelaar, R., Parr, T.C., Schumm, J.E., Hutt, I.W., Taylor, C.J., Astley, S.M., Boggis, C.R.M.: Model-based detection of spiculated lesions in mammograms, *Medical Image Analysis*, **3**(1), 39-62, 1999
- 15) Hatanaka, Y., Matsubara, T., Hara, T., Shinohara, N., Fukuoka, D., Fujita, H., Endo, T.: A comparison between physicians' interpretation and a cad system's cancer detection by using a mammogram database in a physicians' self-learning course, *Nippon Hoshasen Gijutsu Gakkai zasshi*, **58**(3), 375-382, 2002
- 16) Baker, J.A., Rosen, E.L., Lo, J.Y., Gimenez, E.I., Walsh, R., Soo, M.S.: Computeraided detection (CAD) in screening mammography: sensitivity of commercial CAD systems for detecting architectural distortion, *American Journal of Roentgenology*, **181**(4), 1083-1088, 2003
- 17) Ichikawa, T., Matsubara, T., Hara, T., Fujita, H., Endo, T., Iwase, T.: An automated extraction method for region of architectural distortion on mammograms by using concentration index and the top-hat processing, *IEICE Technical Report*, **102**(575), 31-34, 2003
- 18) Ichikawa, T., Matsubara, T., Hara, T., Fujita, H., Endo, T., Iwase, T.: Automated detection method for architectural distortion areas on mammograms based on morphological processing and surface analysis, *Proc of SPIE*, Vol. 5370, 920-925, 2004
- 19) Matsubara, T., Ichikawa, T., Hara, T., Fujita, H., Kasai, S., Endo, T., Iwase, T.: Novel method for detecting mammographic architectural distortion based on concentration of mammary gland, *International Congress Series*, **1268**, 867-871, Elsevier, 2004
- 20) 市川徹子, 松原友子, 原武史, 藤田広志, 遠藤登喜子, 岩瀬拓士: マンモグラムにおける乳腺の集中を伴う構築の乱れ領域の自動検出法, 電子情報通信学会論文誌, D-II, 情報・システム, II-パターン処理, **87**(1), 348-352, 2004.
- 21) 松原友子, 牧田貴成, 稲永和子, 原武史, 藤田広志, 遠藤登喜子, 岩瀬拓士: 乳房X線写真における乳腺の構造解析に基づく構築の乱れの自動検出法, 電子情報通信学会技術研究報告, MI, 医用画像, **105**(580), 49-52, 2006
- 22) 牧田貴成, 松原友子, 原武史, 藤田広志, 遠藤登喜子, 岩瀬拓士: 乳腺構造の集中度評価に基づくマンモグラムにおける構築の乱れの自動検出, 電子情報通信学会技術研究報告, MI, 医用画像, **107**(133), 17-20, 2007
- 23) Shibata, Y., Matsubara, T., Hara, T., Fujita, H., Endo, T., Iwase, T.: Improvement of automated detection for architectural distortion on mammograms, *IEICE Technical Report*, **109**(64), 65-68, 2009
- 24) Nemoto, M., Honmura, S., Shimizu, A., Furukawa, D., Kobatake, H., Nawano, S.: A pilot study of architectural distortion detection in mammograms based on characteristics of line shadows, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, **4**(1), 27-36, 2009
- 25) Tourassi, G.D., Delong, D.M., Floyd Jr., C.E.: A study on the computerized fractal analysis of architectural distortion in screening mammograms, *Physics in medicine and biology*, **51**(5), 1299-1312, 2006
- 26) Guo, Q., Shao, J., Ruiz, V.: Investigation of support vector machine for the detection of architectural distortion in mammographic images, *Journal of Physics: Conference Series*, **15**, 88-94, 2005
- 27) Kawamura, T., Takada, T., Yamamoto, K., Nakayama, R., Watanabe, R., Takeda, K.: Computer-aided diagnosis scheme for detection of architectural distortion on mammograms using multiresolution analysis, *Proc of 21nd International Congress and Exhibition: Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS)*, Vol. 3, 418-419, 2008
- 28) Tourassi, G., Eltonsy, N., Inamura, K., Doi, K., Vannier, M.W., Elmaghraby, A., Lemke, H.U., Eds. Farman, A.G.: Investigating performance of a morphology-based CAD scheme in detecting architectural distortion in screening mammograms, *Proc of 20th International Congress and Exhibition: Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS)*, 336-338, 2006
- 29) Sampat, M.P., Whitman, G., Markey, M.K., Bovik, A. C.: Evidence based detection of spiculated masses and architectural distortions, *Proc of SPIE*, Vol. 5747,

- 26-37, 2005
- 30) Sampat, M.P., Bovik, A.C., Whitman, G.J., Markey, M.K. : A model-based framework for the detection of spiculated masses on mammography, *Medical Physics*, **35**, 2110-2123, 2008
- 31) Ayres, F.J., Rangayyan, R.M. : Characterization of architectural distortion in mammograms, *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, **24**(1), 59-67, 2005
- 32) Rangayyan, R.M., Ayres, F.J. : Gabor filters and phase portraits for the detection of architectural distortion in mammograms, *Medical and Biological Engineering and Computing*, **44**(10), 883-894, 2006
- 33) Ayres, F.J., Rangayyan, R.M. : Reduction of false positives in the detection of architectural distortion in mammograms by using a geometrically constrained phase portrait model, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, **1**(6), 361-369, 2007
- 34) Banik, S., Rangayyan, R.M., Desautels, J.E.L. : Detection of architectural distortion in prior mammograms of interval-cancer cases with neural networks, *Proc of Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*, 6667-6670, 2009
- 35) Rangayyan, R.M., Banik, S., Desautels, J.E.L. : Computer-aided detection of architectural distortion in prior mammograms of interval cancer, *Journal of Digital Imaging*, **23**(5), 611-631, 2010
- 36) Banik, S., Rangayyan, R.M., Desautels, J.E.L. : Detection of architectural distortion in prior mammograms using fractal analysis and angular spread of power, *Proc of SPIE*, Vol. 7624, 8, 2010
- 37) Rangayyan, R.M., Banik, S., Desautels, J.E.L. : Detection of architectural distortion in prior mammograms of interval cancer using Laws' texture energy measures, *Proc of 24th International Congress and Exhibition : Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS)*, Vol. 5, 200-201, 2010
- 38) Banik, S., Rangayyan, R.M., Desautels, J.E.L. : Detection of architectural distortion in prior mammograms, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, **30**(2), 279-294, 2011
- 39) Banik, S., Rangayyan, R.M., Desautels, J.E.L. : Rényi entropy of angular spread for detection of architectural distortion in prior mammograms, *Proc of 2011 IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, 609-612, 2011
- 40) Rangayyan, R.M., Banik, S., Desautels, J.E.L. : Detection of architectural distortion in prior mammograms using measures of angular dispersion, *Proc of IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, 1-4, 2012
- 41) Rangayyan, R.M., Chakraborty, J., Banik, S., Mukhopadhyay, S., Desautels, J.E. : Detection of architectural distortion using coherence in relation to the expected orientation of breast tissue, *Proc of IEEE International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS)*, 1-4, 2012
- 42) 渡辺慧 : 認識とパターン, 岩波新書, 1978
- 43) Handa, T., Zhang, X., Homma, N., Ishibashi, T., Kawasumi, Y., Abe, M., Sugita, N., Yoshizawa, M. : DoG-Based Detection of Architectural Distortion in Mammographic Images for Computer-Aided Detection, *Proc of SICE Annual Conference*, 762-767, 2012
- 44) 半田岳志 : 乳房 X 線画像診断支援のための局所的明暗情報に着目した病変検出法に関する研究, 東北大学大学院工学研究科修士学位論文, 2013
- 45) 本間経康, 半田岳志, 石橋忠司, 川住祐介, 吉澤誠 : 乳房画像病変検出システム, 乳房画像病変検出方法, 乳房画像病変検出プログラムおよび乳房画像病変検出プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体, 特願, 2013-115007, 2013
- 46) Heath, M., Bowyer, K., Kopans, D., Moore, R., Kegelmeyer, P. : The Digital Database for Screening Mammography, *Proc of the 5th International Workshop on Digital Mammography*, 212-218, 2000
- 47) Tourassi, G.D., Floyd Jr. C.E. : Performance evaluation of an information-theoretic CAD scheme for the detection of mammographic architectural distortion, *Proc of SPIE*, Vol. 5370, 59-66, 2004