

乳房 X 線画像を用いた乳腺割合の自動測定に関する基礎的検討 ～ガボールフィルタによる乳腺構造の自動抽出～

寺本 篤司[†], 小林 美早紀^{††}, 大塚 智子^{†††}, 山崎 瑞季[†],
安野 泰史^{†††}, 藤田 広志^{††††}

[†]藤田保健衛生大学大学院保健学研究科 〒470-1192 愛知県豊明市沓掛町田楽ヶ窪 1 番地 98

^{††}総合青山病院放射線技術室 〒441-0195 愛知県豊川市小坂井町道地 100 番地 1

^{†††}大同病院放射線科 〒457-8511 愛知県名古屋南区白水町 9 番地

^{††††}岐阜大学大学院医学系研究科 〒501-1194 岐阜県岐阜市柳戸 1 番地 1

(2015 年 4 月 21 日受付, 2015 年 6 月 9 日最終受付)

Preliminary study on the automated measurement of mammary gland ratio in the mammogram: Automated extraction of mammary structure using Gabor filter

Atsushi TERAMOTO[†], Misaki KOBAYASHI^{††}, Tomoko OTSUKA^{†††}, Mizuki YAMAZAKI[†],
Hirofumi ANNO^{†††}, Hiroshi FUJITA^{††††}

[†]School of Health Sciences, Fujita Health University,
1-98 Dengakugakubo, Kutsukake-cho, Toyoake, Aichi 470-1192, Japan

^{††}Department of Radiology, Aoyama Hospital,
100-1 Douji, Kozakai-cho, Toyokawa, Aichi 411-0195, Japan

^{†††}Department of Radiology, Daido Hospital,
9 Hakusui-cho, Minami-ku, Nagoya, Aichi 457-8511, Japan

^{††††}Graduate School of Medicine, Gifu University,
1-1 Yanagido, Gifu, Gifu 501-1194, Japan

(Received on April 21, 2015. In final form on June 9, 2015)

Abstract: The ratio of mammary gland in the breast is useful information for the risk analysis of breast cancer. In this study, we proposed the novel automated measurement technique of the mammary gland ratio in mammogram. It employed Gabor filter in order to detect the mammary gland in mammogram. Filtered image was binarized by automated thresholding method; mammary region was segmented. In the experiments, we calculated Jaccard index to evaluate the degree of coincidence between the detected mammary region and sketched mammary region drawn by radiologist. Subsequently, accuracy of mammary gland ratio was evaluated. Measurement error of mammary gland ratio was 4.9%, and mean Jaccard index was 78.31%; they were better than those of conventional method. These results indicate that proposed method may be useful for the automated analysis of mammary gland for risk analysis of breast cancer.

Keywords: Mammogram, mammary gland, analysis, CAD

1. 緒 言

現在、日本人女性の 12 人に 1 人が乳がん罹患するといわれており、罹患率は年々増加傾向にある[1]。発がんのリスク因子としては、飲酒や肥満などの生活環境要因、出産や授乳の有無、出産年齢などの社会環境要因、初潮年齢や乳がん家族歴などの内分泌環境因子の他、乳腺割合がある[2]。乳腺割合においては、乳房 X 線画像上のおおよその推定をすることが可能であるが、医師の経験などにより評価にばらつきが生じる。そのため乳房 X 線画像をコンピュータにより自動解析し乳腺領域を評価する手法が検討されている[3-7]。例えば、松原らは 2 値化処理により乳房 X 線画像の脂肪、乳腺領域を識別し、画像を自動分類する手法を提案した[3]。また Zhou らも 2 値化を用いて乳腺領域を抽出して面積を算出し、乳房領域に対する乳腺の割合を算出する手法を提案した[4]。また、最近はこの手法を大規模な画像データベースを利用して評価した報告も多くみられる[6, 7]。先行研究で利用されている手

法の多くは、乳房 X 線画像上の画素値に注目し乳腺領域を評価している。しかし、乳腺領域の画素値は装置の撮像条件や撮像後に行われる様々な補正処理によって影響を受けるため、正確な乳腺領域が得られないことがある。

我々は乳房 X 線画像の画素値ではなく、画像内の乳腺の構造に注目した。乳腺は乳頭部から放射状に広がる線構造を有する。乳腺の線構造を検出することができれば、変動の大きい画素値を用いた方法に比べ正しく乳腺領域を評価できる可能性がある。我々はこれまでに、画像内の線構造を検出できるガボールフィルタを用いて、乳房 X 線画像内の構築の乱れを自動検出する手法を開発した[8]。そこで本研究ではガボールフィルタを用いて乳房 X 線画像内の乳腺領域を抽出して乳腺割合を自動測定する手法を提案し、臨床画像を用いてその有効性に関する基礎的な評価を行う。

2. 方法

2.1 処理概要

Fig.1に本手法の概要を表したフローチャートを示す。本手法では、与えられた乳房X線画像から乳房領域を抽出し、その内部に存在する線成分をガボールフィルタにより検出し、2値化処理により乳腺領域を抽出することで乳腺割合を測定する。以下に個々の処理について順に述べる。

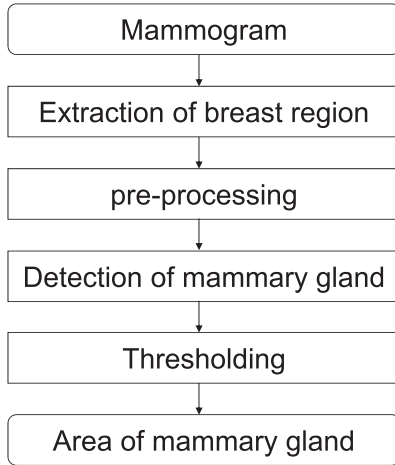


Fig.1 Flowchart of proposed method

2.2 前処理

前処理として、まず Triangle 法を用いた自動2値化[9]とラベリング処理により、不要なマーカーやノイズを除去して乳房領域の抽出を行う。ここで、Triangle 法とは、濃度ヒストグラムにより求めた濃度分布曲線 $h(x)$ (x :濃度) を用いてしきい値を自動的に算出する方法である。濃度分布曲線 $h(x)$ において、低濃度側の裾野 ($h(x) > 0$ となる位置) のポイントと $h(x)$ が最大となるポイントを直線で結ぶ。そして直線上の各位置から $h(x)$ に垂線を降ろし、両者の交点から直線までの距離が最大となる垂線的位置を探索する。得られた垂線と $h(x)$ の交点を求め、そのときの濃度 x をしきい値とする。

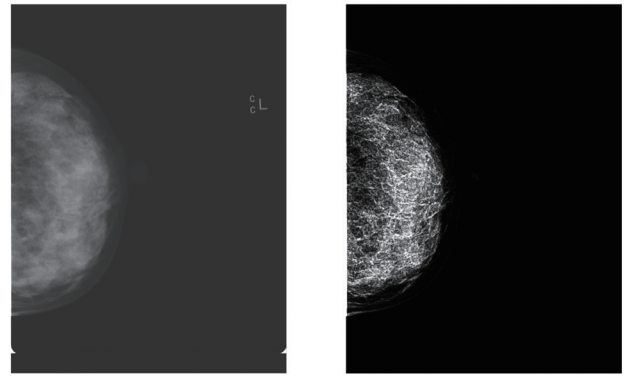
続いて乳房厚と画素値の関係を線形化し、乳腺量による検出精度の変化を緩和するために、式(1)に示すガンマ補正を行う。ここで、 $f(x,y)$ は原画像の画素値、 $g(x,y)$ は補正後の画素値、 γ は補正のための係数を表している。本研究の処理では、試行錯誤的に決定した $\gamma=2.0$ を用いた。

$$g(x,y) = f(x,y)^\gamma \quad (1)$$

そして得られた画像に対してトップハット変換を適用する。トップハット変換処理は、原画像に対して最小値フィルタと最大値フィルタを順に適用した画像を原画像から減ずるものである。この処理によって乳房厚や乳腺密度の不均一性により生じたトレンドを除去し、乳腺などの空間的に細かい成分を強調することができる (Fig.2)。なお、本研究では、上記最大値フィルタと最小値フィルタのフィルタ形状には半径9画素の円を用いた。

2.3 ガボールフィルタによる乳腺検出

前処理を行った画像に対してガボールフィルタを適用し、線構造の強調を行う。ガボールフィルタは、人間の視覚における物体の認識方法がモデルとなっており、画像中の局所的な線成分の強度と方向の検出を行うものである[8, 10]。ガボールフィルタの演算式を式(2)-(5)に示す。



(a) Original image (b) Pre-processed image

Fig.2 Pre-processing

$$g_\theta(x,y) = \exp\left(-\frac{x'^2 + y'^2}{2\sigma^2}\right) \cos\left(2\pi\frac{x'}{\lambda}\right) \quad (2)$$

$$h_\theta(x,y) = f(x,y) \otimes g_\theta(x,y) \quad (3)$$

$$I(x,y) = \max_\theta [h_\theta(x,y)] \quad (4)$$

$$A(x,y) = \operatorname{argmax}_\theta [h_\theta(x,y)] \quad (5)$$

ここで、式(2)のガボールフィルタ関数は Fig.3 に示すような異方性の形状を有しており、式中の σ はガウス関数の標準偏差を示しており、長軸方向の長さを決定するパラメータである。 γ はガボール関数の空間アスペクト比を指定するものである。また、 λ は波長を示し、フィルタ関数の短軸方向の幅を調整するパラメータである。さらに、 xy 平面にて θ で与えた角度だけフィルタ関数 $g_\theta(x,y)$ を回転させるため、 $x' = x\cos\theta + y\sin\theta$ 、 $y' = -x\sin\theta + y\cos\theta$ とした。

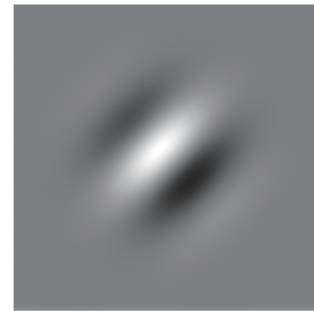


Fig.3 Gabor function

ガボールフィルタ処理は、 θ を変化させながら式(3)の畳み込み積分を行い、式(4)(5)に示すように、 $h_\theta(x,y)$ の最大値とそのときの角度 θ をそれぞれ強度出力画像 $I(x,y)$ 、角度出力画像 $A(x,y)$ として得る。なお、本研究では乳腺の方向は考慮しないため、 $I(x,y)$ のみを利用し、ガボールフィルタのパラメータとして $\sigma=4.3$ 、 $\gamma=0.45$ 、 $\lambda=13.0$ を使用した。また、フィルタの回転角 θ は 0° から 180° までの範囲で変化させた。 θ の変化幅は小さいほど解析精度が高まるが、乳腺割合の測定では精密な乳腺方向の情報は不要であるため、計算コストも考慮し 10° 間隔とした。ガボールフィルタ処理により得られた強度画像 $I(x,y)$ の例を Fig.4 に示す。

2.4 2値化および乳腺割合算出

ガボールフィルタの強度出力画像 $I(x,y)$ を Otsu の自動2値化手法[11]により2値化する。この方法は、しきい値

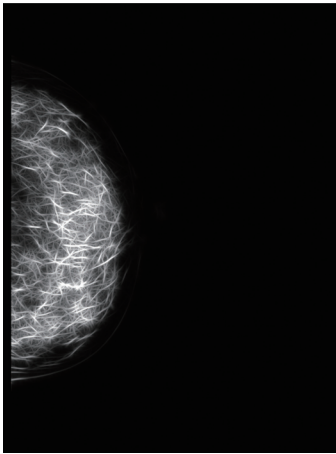


Fig.4 Gabor filtered image (Intensity output)

にて画像を2つの領域に分割する際、2つのクラス間分散とクラス内分散から算出した分離度が最大になる値をしきい値として求める方法である。

続いて、2値化画像に対してクロージング処理を適用することにより乳腺領域の存在する領域を得る (Fig.5)。最終出力となる乳腺割合は、乳腺領域の面積を乳房領域の面積で除すことで求められる。

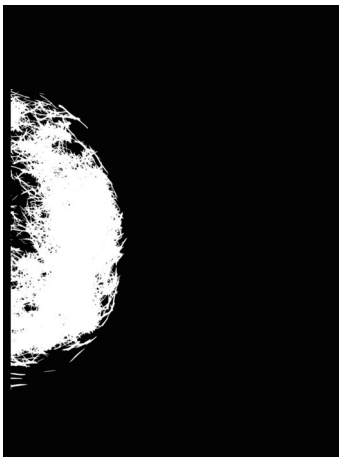


Fig.5 Extraction of mammary gland

3. 検証

3.1 検証方法

本手法の有効性を確認するため、臨床画像を用いて乳腺領域の自動抽出ならびに乳腺割合の自動測定を行った。これらの精度を評価するため、放射線科医による乳房および乳腺領域のスケッチ (以下、スケッチ) を行い、自動測定結果と比較した。さらに、従来手法との比較を行うため、Zhou らが提案した2値化処理に基づく乳腺抽出処理[4]を行った。従来手法では、乳房 X 線画像の画素値ヒストグラムから乳腺分布を4つのクラスに分類し、クラス毎に異なる自動しきい値算出アルゴリズムを適用している。

3.1.1 乳腺領域の評価

提案手法と従来手法が、どれだけ正確に乳腺領域が抽出できているか評価するため、Jaccard Index (JI) を算出する。JI とは、正解領域 (本研究ではスケッチされた乳腺領域) を A、提案手法および従来手法における自動抽出領域を B とすると、以下の式で算出される[12]。提案手法なら

びに従来手法により検出した乳腺領域とスケッチから JI を算出し、比較評価する。

$$JI = \frac{A \cap B}{A \cup B} \times 100 [\%] \quad (6)$$

3.1.2 乳腺割合の評価

本手法ならびに2値化を用いた従来手法により測定した乳腺割合がどの程度正確に得られているか評価する。まず、スケッチの結果から乳腺割合を算出する。そして乳腺割合と提案手法および従来手法の測定結果を比較することで、乳腺割合の測定精度を評価する。

3.1.3 使用画像および処理パラメータ

2013年に乳がん検診にて撮影された12症例12枚の画像を評価対象とした。撮影対象の年齢は40-67歳 (平均53歳、標準偏差9.6歳)、乳房構成は乳腺散在が5例、不均一高濃度が4例、高濃度が3例であり、すべての症例は異常なしと診断されたものである。検診では左右乳房に対してCCおよびMLO方向の画像を撮影しているが、ここでは右CC画像を評価に利用した。撮像装置および撮像条件をTable 1に示す。

Table 1 Imaging parameters

Mammography unit	Sepio Stage Max Vision (Shimadzu)
CR unit	FCR PROTECT CS (Fujifilm)
Tube voltage [kV]	26-30
mAs	18.8-106.0
Pixel resolution [mm]	0.1
Matrix size [pixel]	1770×2370
Bit depth [bit]	10

3.2 検証結果

3.2.1 測定例

Fig.6に提案手法にて乳腺抽出を行った結果の一例 (症例4) を示す。同図 (d)-(f) の黄色で示した領域が自動またはスケッチにより得た乳腺領域を表している。なお、提案手法、従来手法にて得られた乳腺割合はそれぞれ33.8%、27.2%であり、スケッチより得た乳腺割合は34.4%であった。

3.2.2 定量評価結果

次に、12症例について、提案手法、従来手法およびスケッチから算出した乳腺割合をFig.7、提案手法と従来手法にてJIを評価した結果をFig.8に示す。提案手法により自動測定した乳腺割合とスケッチにより算出した乳腺割合の間に生じた誤差は4.9%であり、従来手法よりも約2%小さい結果となった。また、JIにより算出した平均一致度は78.3%となり、従来手法に比べ約3%高い値となった。さらに、JIを用いて、提案手法が従来手法に対して優れているか検定により検証した結果、有意差が得られた ($p=0.047 < 0.05$)。

4. 考察

本研究では、乳房 X 線画像から乳腺領域を自動検出し、乳腺割合を自動測定する手法を開発した。臨床画像を用いて、乳腺割合を自動測定した結果と放射線科医によるスケッチから算出した結果を比較したところ、両者の差は5%以下となり良好な測定精度が得られた。また、提案手

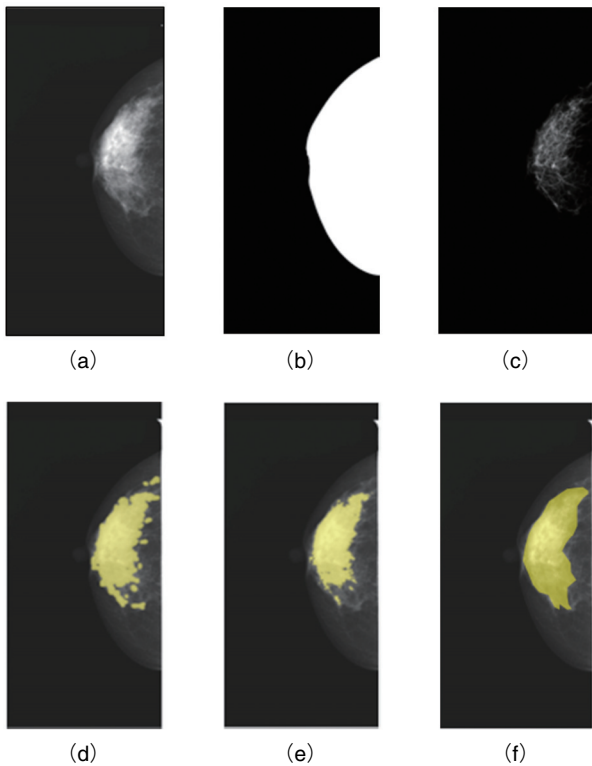


Fig.6 Detection results of mammary gland (Case 4)
 (a) Original image. (b) Breast region. (c) Gabor filtered image.
 (d) Mammary region obtained by proposed method. (e) Mammary region obtained by conventional method. (f) Sketch by radiologist.

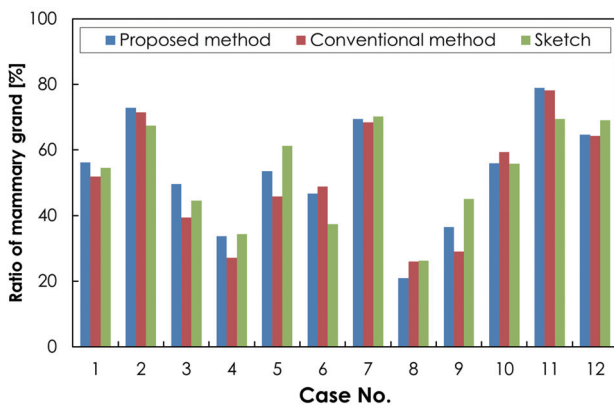


Fig.7 Evaluation results of mammary grand ratio

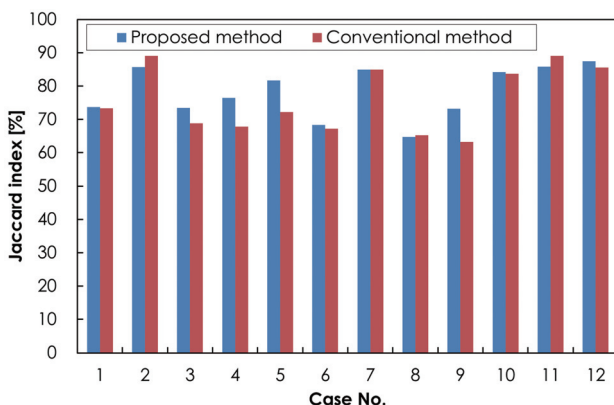


Fig.8 Evaluation results of Jaccard index

法は2値化を用いた従来手法に比べ2%程度誤差が小さいという結果が得られた。さらに、症例毎の誤差に注目すると、従来手法ではスケッチとの間で10%以上の誤差を有する症例が12症例中3症例存在したことにに対し、提案手法ではすべての症例にて10%未満の誤差であった。これより、乳腺を画素値だけで把握している従来手法に比べ、乳腺の線構造に着目する提案手法のほうが安定した乳腺領域の検出を実現しているといえる。

また、JIによる乳腺領域の一致度の評価では、従来手法と同等あるいは従来手法のほうが良好であった症例は乳腺割合が高い傾向にあった。この理由として、乳腺割合が高い症例は乳腺密度も高く、乳腺領域と脂肪領域の境界が明瞭であるため2値化しきい値の決定が容易であり、従来手法であっても正確な乳腺領域を得ることができたと思われる。一方、提案手法が従来手法に比べてJIが高い症例では乳腺割合が低い傾向にあった。乳腺割合が低い場合は乳腺領域と脂肪領域の境界が不明瞭であり、濃度情報のみを利用した従来手法では正確なしきい値を算出できなかったことがその理由として考えられる。有意差検定の結果が示すとおり、提案手法は従来手法よりも有意に改善しており、統計的な観点からも本手法が乳腺領域の自動測定手法として有効であることが確認された。

本研究では、1種類のガボール関数を用いて乳腺の解析を行ったが、ガボール関数のパラメータを変化させることでガボール関数が検出する線成分の太さを制御することができる。今後はパラメータと測定精度の関係を、実験により明らかにしたい。

さらに、本研究では右CC画像のみを対象としたが、MLO画像については胸筋と乳腺が重なっている部分にて胸筋の繊維質を過剰検出するため、正しく乳腺の評価を行うことができなかった。また、胸筋部分を評価から除外することもできるがスケッチとの対比が困難となる。今後は、乳腺の走行方向を加味した乳腺検出処理を検討し、MLO画像に対応できるよう改良を進めたい。さらに、日本人女性の乳房X線画像を用いて評価を行ったため乳腺割合が全体的に高く、乳腺割合の低い脂肪性乳房が検証用のデータに含まれていなかった。今後は、脂肪性乳房も評価対象に含めた大規模なデータベースを構築して、有効性の評価を進める必要がある。

5. 結論

本研究では、ガボールフィルタを用いて乳房X線画像内の乳腺領域を抽出することにより乳腺割合を自動測定する手法を提案し、臨床画像を用いて有効性の基礎的な評価を行った。検証の結果、放射線科医のスケッチ像から評価した値と近い測定結果が得られ、従来手法と比較しても良好な結果であったことから、本手法が乳腺割合を正確に自動測定できることが示唆された。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金(新学術領域研究:26108005:「医用画像に基づく計算解剖学の多元化と高度知能化診断・治療への展開」)により行われました。

参考文献

[1] 国立がん研究センター:がん情報サービス, http://ganjoho.jp/public/statistics/pub/statistics_01.html, Accessed

11 Apr. 2015.

- [2] 日本乳癌学会：科学的根拠に基づく乳癌診療ガイドライン2 疫学・診断編 2013年版，第2版，金原出版，東京，2013.
- [3] 松原友子，土本多美子，原 武史，他：乳腺実質濃度の評価に基づくマンモグラムの自動分類法，医用電子と生体工学，38(2)，93-101，2000.
- [4] Zhou C, Chan HP, Petrick N, et al.: Computerized image analysis: Estimation of breast density on mammograms, *Med Phys*, 28(6), 1056-1069, 2001.
- [5] Byng JW, Boyd NF, Fishell E, et al.: The quantitative analysis of mammographic densities, *Phys Med Biol*, 39(10), 1629-1638, 1994.
- [6] Oliver WE, Lorraine T, Richard B, et al.: Mammographic Breast Density: Comparison of Methods for Quantitative Evaluation, *Radiology*, 275(2), 345-355, 2015.
- [7] Olivier AP, Gordon EM, James TP, et al.: Reliability of Automated Breast Density Measurements, *Radiology*, 275(2), 366-376, 2015.
- [8] 吉川るり葉，寺本篤司，松原友子，他：複数のガボールフィルタを用いた乳房 X 線画像における乳腺構造解析と構築の乱れの検出，*Medical Imaging Technology*, 30(5)，287-292，2012.
- [9] Zack GW, Rogers WE and Latt SA: Automatic measurement of sister chromatid exchange frequency, *J. Histochem. Cytochem*, 25(7), 741-753, 1977.
- [10] Grigorescu SE, Petkov N and Kruizinga P: Comparison of texture feature based on Gabor filter, *IEEE transactions on image processing*, 11(10), 1160-1167, 2002.
- [11] 大津展之：判別および最小 2 乗規準に基づく自動しきい値選定法，*電子情報通信学会論文誌*，J63-D(4)，349-356，1980.
- [12] Jaccard P: The distribution of the flora in the alpine zone, *new phytologist*, 11(2), 37-50, 1912.