

原 著

論文受付
2013年9月6日

論文受理
2014年5月1日

Code Nos. 532
590

位置特徴量の導入と特徴量選択による 頸動脈石灰化の自動検出法の改良

高橋 龍¹ 村松千左子¹ 原 武史¹ 林 達郎²
勝又明敏³ 周 向荣¹ 藤田広志¹

¹ 岐阜大学大学院医学系研究科再生医科学専攻知能イメージ情報分野

² メディア株式会社

³ 朝日大学歯学部口腔病態医療学講座歯科放射線学分野

緒 言

頸動脈における石灰化は、動脈硬化性疾患の罹患危険性を予測するマーカーの一つとして期待されている^{1,2)}。動脈硬化性疾患は自覚症状を伴うことが稀であり、患者が自発的に専門の医療機関を受診しない限り、早期発見は難しい。近年では、歯の治療のために撮影される歯科パノラマX線写真において、頸動脈の石灰化が描出されるとの報告がある^{3,4)}。一方、歯科パノラマX線写真で発見された頸動脈の石灰化の存在が、必ずしも動脈硬化性疾患の有無を意味するものではないとの報告もある⁵⁾。

歯科治療で撮影されたパノラマX線写真で頸動脈の石灰化が発見されたとき、歯科医が患者に動脈硬化性

疾患の罹患の危険性について説明することで、早期の段階で医療機関を受診する機会が増加する効果が期待できる。しかし、通常の歯科パノラマX線写真の読影では、歯科医は歯科疾患のみに注視している。さらに、歯科診療時の画像表示条件では歯科パノラマX線写真上の石灰化像の発見は困難であり、検出される可能性は極めて低い。そこで、歯科パノラマX線写真に描出される頸動脈石灰化を自動で検出し、その結果を歯科医に提示するコンピュータ支援検出(computer-aided detection: CAdE)システムの開発が期待される⁶⁾。例えば、棟安らは輝度勾配に注目した手法を提案しており、画像中で画素値が極大となる位置を検出し石灰化領域を特定する手法を開発している^{7,8)}。この手法では75%

Improvements to an Automated Method for Detecting Carotid Artery Calcifications by Adopting a Positional Feature and Feature Selection

Ryo Takahashi,^{1*} Chisako Muramatsu,¹ Takeshi Hara,¹ Tatsuro Hayashi,²
Akitoshi Katsumata,³ Xiangrong Zhou,¹ and Hiroshi Fujita¹

¹Department of Intelligent Image Information, Division of Regeneration and Advanced Medical Sciences, Graduate School of Medicine

²Media Co., Ltd.

³Department of Oral Radiology, Asahi University School of Dentistry

Received September 6, 2013; Revision accepted May 1, 2014

Code Nos. 532, 590

Summary

The purpose of this study was to improve an automated scheme for detecting carotid artery calcification (CAC) in dental panoramic radiographs (DPRs). Using 100 DPRs, the sensitivity of CAC detection employing our previous method was 90.0% with 5.0 false positives (FPs) per image. This study describes two enhancements. One is the adoption of a new feature for the position of CACs in addition to previous features. The other is feature selection employing the support vector machine using all combinations. Five of 12 features were selected. Using our proposed method, the average sensitivity for the same database proved to be 90.0%, with only 2.5 FPs per image. These results indicate the potential effectiveness of the new positional feature and feature selection.

Key words: carotid artery, calcification, support vector machine, dental panoramic radiograph, computer-aided detection

*Proceeding author

の石灰化領域検出率を示しているが、246枚の画像に対し6329例の誤検出があり、誤検出を低減する手法の検討が課題であると結論している。

われわれが最近開発した手法⁹⁻¹¹⁾は、トップハット変換、サポートベクタマシン(support vector machine: SVM)を用いたものであった。100枚の歯科パノラマX線写真(異常症例:34枚)を用いた実験において、hold out法によってテスト画像としてSVMで識別した石灰化領域33~50カ所を対象とした場合、真陽性(true positive: TP)率が90.0%のとき偽陽性(false positive: FP)数が4.3(個/画像)の性能であった。またこの時、検出できなかったものを含めた全94カ所を対象とした場合、10回の2-fold cross validation法の平均結果で感度90.0%のとき5.0個/画像のFP数であった。しかし、高い検出率に対して1画像あたりのFP数が多くシステムの実用性、信頼性に欠ける。そのためFP数をさらに減少させる技術の開発が望ましい。そこで本研究では、われわれの従来法の性能を向上させるため、削除に用いる特徴量に「位置の特徴量」の追加を検討し、また、SVMに学習させる特徴量の選択についても検討を行った。

1. 方法

1-1 試料画像と撮影装置

本研究では、従来研究^{10, 11)}で用いた朝日大学附属病院にて撮影された100枚の歯科パノラマX線写真を用いた。その内訳は、94カ所の頸動脈石灰化領域を含む34枚と石灰化を含まない66枚である。画像フォーマットは、縦幅1420 pixels, 横幅2920 pixels, 空間分解能0.1 mm/pixel, 階調数12 bitsである。すべてのパノラマX線写真は、パノラマX線装置(Veraview epocs, Morita, Japan)とcomputed radiography(CR 75.0, Agfa, Germany)を用いて撮影された。撮影条件は、フランクフルト平面を基準とする頭部の標準のポジショニング、X線被曝の制御を自動モードに設定して行われた。すべての石灰化は、1名の歯科放射線科医がX線computed tomographyなどのモダリティを用いて、その存在を確認している。なお、本研究は、岐阜大学と朝日大学の倫理委員会の承認を得ている。

1-2 処理の概要

CADeの処理の流れをFig. 1に示す。初めにKirschフィルタとマスク画像による輪郭抽出手法を用いて、下顎骨の輪郭線の自動抽出¹²⁻¹⁴⁾を行う。次に、この自動抽出によって得られた輪郭線を中心から左右へ走査して、関心領域(region of interest: ROI)設定の基準となる

下顎角の一部に当たる変曲点を求める。Fig. 2にROI決定の模式図を示す。まず、画像鉛直方向と輪郭線の成す角度が15°以下となる左右の変曲点を求める。そして、それらを基準としたROIを画像内に設定する(Fig. 1b)。Fig. 1eは左右のROIを拡大した図である。頸動脈石灰化はその周辺部分と比べて、画素値がより高い領域として観察される。そこで、モルフォロジ処理の一つであるトップハット変換を用いて強調処理を行う(Fig. 1c)。しかし、歯科パノラマX線写真上に描出される頸椎や舌骨などの部位にも局所的に画素値の高い部分が多く存在する。そこで、ROIを設定した後、画像水平方向のソーベルフィルタを用いたエッジ画像から各エッジの長さを求める。画像辺縁に存在する70 pixels以上の長さのエッジは頸椎によるものとし、頸椎の描写されている範囲を推定しROIから除外する。また、画像中の190 pixels以上の長さのエッジは舌骨と識別し石灰化検出の対象外とする。そして画像の二値化を行い(Fig. 1d)、二値化画像から検出した石灰化の候補領域について、形状、画素値などに加えて、本手法で新しく追加する位置の特徴量を解析し、石灰化でない領域をFPとして削除する。FP削除には、ルールベース法と新たに特徴量を選択して学習させたSVMを用いる。Fig. 1eの右列に、最終的に残った石灰化候補を示す。

次項から、本手法で新たに検討した手法について詳しく述べる。なお、Fig. 1の頸椎・舌骨削除までの処理は従来法と同様であり、詳細については他の論文⁹⁻¹¹⁾を参照されたい。

1-3 位置の特徴量の算出

われわれの従来法⁹⁻¹¹⁾では、検出された候補領域において、面積、平均画素値、画素値の分散、候補領域とその周辺領域との画素値の差、縦幅、横幅、縦横比、円形度、不整形度、関心領域内の水平方向・垂直方向の相対位置の11個の特徴量を算出していた。本研究では、以下に説明するように、下顎骨輪郭線からの最短距離という位置の特徴量を追加で求める。これら12個の特徴量は、後のFP削除の処理に用いる。

下顎骨輪郭線からの最短距離は、本手法で新たに導入した候補領域の位置に関する特徴量である。前項1-2で記述したように、トップハット変換によって検出された石灰化候補から頸椎と舌骨に重なる領域を削除する処理が加えられている。しかし、削除されなかったものがFPとして存在する場合がある。Fig. 3に歯科パノラマX線写真の左下部分を拡大した画像を示す。画像左端から白の点線までの範囲に頸椎が描出されている。

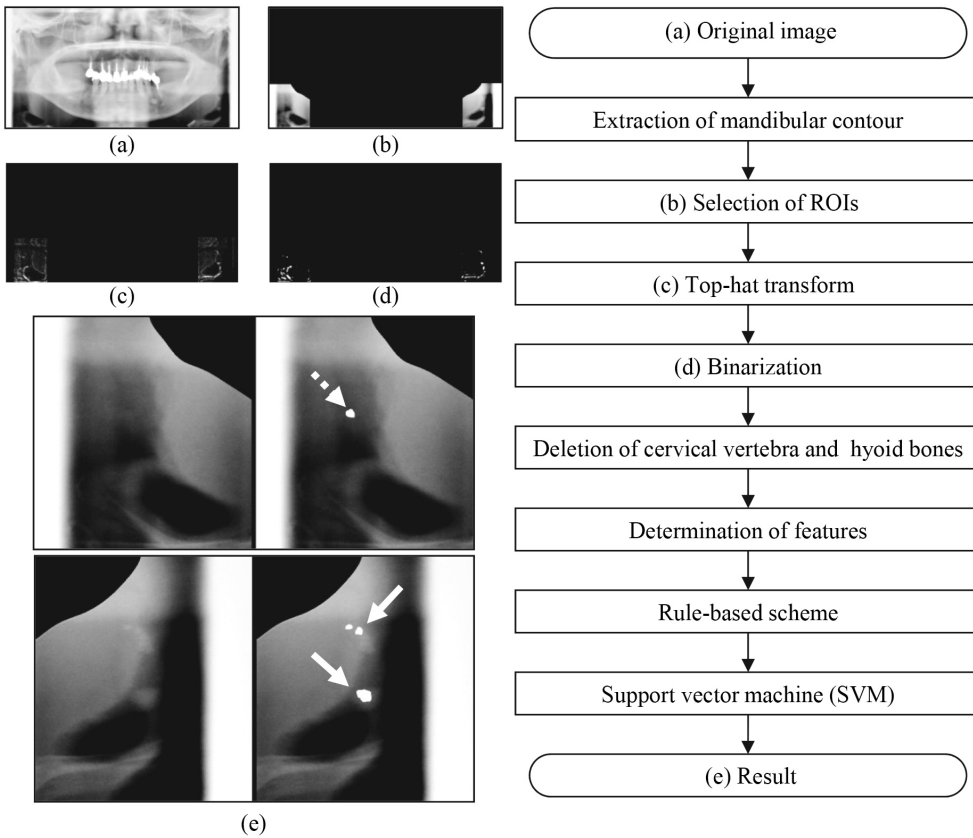


Fig. 1 Outline of the proposed method. (a) Original image, (b) selection of ROIs, (c) top-hat transform, (d) binarization, and (e) result. Upper left: original left ROI, upper right: result of left ROI, lower left: original right ROI, lower right: result of right ROI, arrows: TP detection, dotted arrow: FP detection

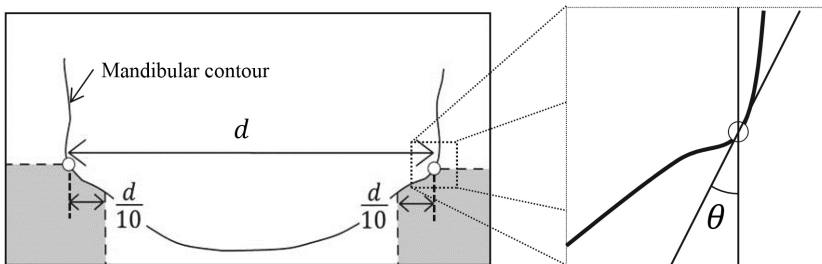


Fig. 2 Figure showing selection of ROIs. Left-hand image: determination of the ROIs, d : distance between two inflection points, circles: inflection points, right-hand image: calculation of the inflection point, θ : angle between the vertical line and the tangent to the contour line. The thick solid line is the contour line.

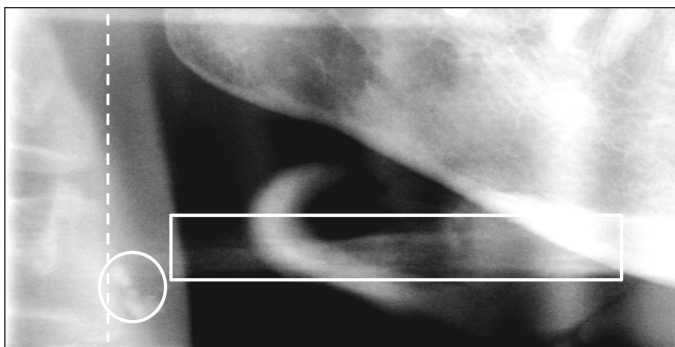


Fig. 3 Position of calcification between the hyoid bone and cervical vertebra in a panoramic radiograph. Rectangle: hyoid bone, broken line: border of cervical vertebra, circle: calcifications

また、白い矩形の枠で囲まれた部分が舌骨を示している。そして白丸で囲まれたものが頸動脈石灰化である。このように、歯科パノラマ X 線写真上において、頸動脈石灰化の出現範囲は頸椎と舌骨の間に描出される可能性が高い。

そこで、候補領域の位置情報を用いた特徴量として下顎骨輪郭線からの最短距離を導入する。

下顎骨輪郭線との最短距離は下顎骨の輪郭線をもとに算出される (Fig. 4)。輪郭線を左端点から右端点に向かって走査していき、候補領域とのユークリッド距離が

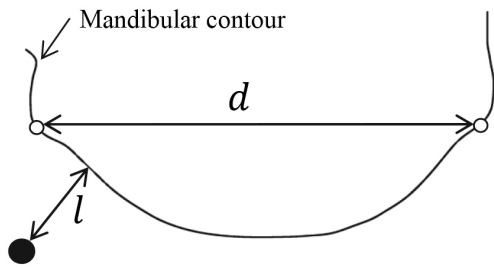


Fig. 4 The shortest distance is relativized by mandible width.
 d : distance between two inflection points,
 l : shortest distance between a calcification and the mandible contour

最も小さくなる値 l を算出する。ただし、下顎骨の大きさは個人差があり、歯科パノラマ X 線写真上での下顎骨と頸動脈の位置関係は同じ大きさの画像でも異なる。そのため、単純なユークリッド距離で算出される位置の特微量では、その個人差に対応できない。本研究では、位置の特微量を相対化する方法として、下顎骨の大きさを指標とした位置の特微量の相対化を行った。

Fig. 4 に相対化の方法を示す。本研究では、下顎骨の変曲点間の水平距離が表すものとして d と定義した。候補領域までの距離 l は下顎骨の輪郭と候補領域の重心間のユークリッド距離(絶対値)である。式(1)のように l に対し d で除算することで、下顎骨の大きさに相対化された最短距離 L (相対値)を算出し位置の特微量とした。

$$L=l/d \dots\dots\dots(1)$$

1-4 ルールベース法

求めた 12 個の特微量に対しルールベース法を適用する。石灰化領域の各特微量の最大値・最小値を求めることで閾値のルールを設定し、石灰化領域(TP)と FP を区別し、FP を削除する。Fig. 5 には、「候補領域とその周辺領域との画素値の差」の場合の例を示す。試料画像 100 枚から検出されたすべての TP(94 カ所中 87 カ所を検出)は最小値 82、最大値 718 の画素値差であった。したがって、それらの値を閾値として TP と FP を区別するルールを設定して FP を削除する。他の特微量に関しても同様に、検出されたすべての TP(87/94 カ所)の最小値、最大値をその特微量の閾値としてルールを設定した。そのため本研究の実験では、ルールベース法を適用する前後での検出感度は 92.6%(87/94 カ所)と変化しない自己学習となっている。設定されたすべての閾値によって、100 症例から初期検出された 6090 個の候

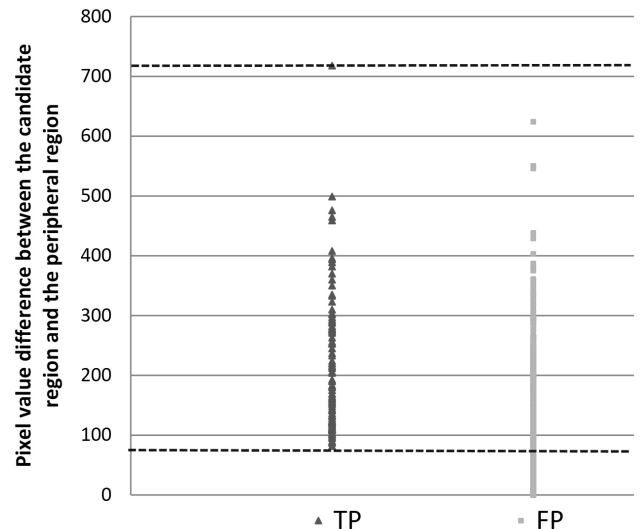


Fig. 5 Example of rule-based scheme for the feature of pixel value difference between the candidate region and the peripheral region. Dashed lines are the threshold set by values of pixel value difference between the candidate region and the peripheral region. The upper line and lower line show the maximum value and minimum value respectively.

補領域のうち 925 個が候補として残り、5165 個が FP として削除された。

1-5 SVM による FP 削除

1-5-1 SVM

ルールベース法で削除しきれない FP に対して SVM による識別を行い削除する。カーネルは二次の多項式カーネルを用いた。ソフトマージンの決定には L1 ノルムを用い、ペナルティを与える際の重み定数は 0.5 とした。性能評価は leave one out(LOO)交差検定を行った。

1-5-2 SVM に入力する特微量の選択

従来法⁹⁻¹¹⁾では既存の 11 個の特微量をすべて入力して学習していた。しかし、実験に用いた画像枚数(100 枚)に対して特微量の数が多いため、過学習による SVM の性能低下が懸念される。そこで、本手法では特微量の選択を行う。

特微量の選択方法は総当り探索¹⁵⁾を採用した。選択の結果、平均画素値、候補領域とその周辺領域との画素値の差、円形度、関心領域内の水平方向の相対位置、下顎骨輪郭線からの最短距離による 5 個の組合せが最良の結果を示した。

なお、ルールベース法に用いる特微量の選択については、SVM の入力特微量と合わせて考慮した場合、その組合せの数が膨大になるため今回は検討していない。

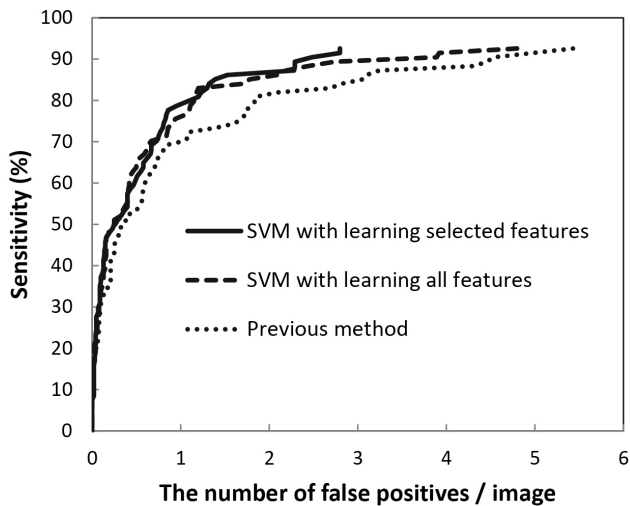


Fig. 6 FROC curves for Leave-one-out cross-validation results for the previous method, SVM with learning all and selected features.

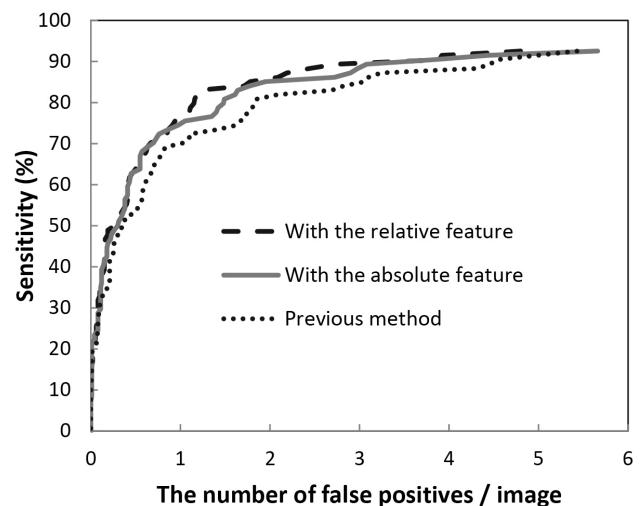


Fig. 7 FROC curves for the previous method, with the absolute positional feature, and with the relative positional feature.

2. 結果

Fig. 6 に CADe の性能を示した free-response receiver operating characteristic(FROC) 曲線を示す。この曲線は、SVM の出力値を閾値として感度と FP 数を算出して得た。どの FROC 曲線も検出感度の最高値は 92.6% である。

従来法⁹⁻¹¹⁾では、頸動脈石灰化の検出感度が 90.0% のとき、画像 1 枚あたり 5.0 個の FP 数となった(80.0% のとき、1.9 個 / 画像)。本手法における位置の特徴量を含めたすべての特徴量で学習させた SVM を用いた場合、検出感度 90.0% のとき、3.9 個 / 画像の FP 数となった(80.0% のとき、1.2 個 / 画像)。さらに、特徴量選択による 5 個の特徴量で学習させた SVM を用いた場合、検出感度 90.0% のとき、2.5 個 / 画像の FP 数となった(80.0% のとき、1.2 個 / 画像)。

また、本研究で追加した位置の特徴量の相対化に対する影響を調べるために、従来手法による 11 個の特徴量に絶対値での位置の特徴量を追加した場合の検出性能を評価した。その結果、検出感度 90.0% のとき、3.8 個 / 画像の FP 数となった。Fig. 7 に Fig. 6 と同様の実験によって得た FROC 曲線を示す。これは、追加する位置の特徴量を相対化せず絶対値のまま算出した場合と、提案手法通りに相対化して算出した特徴量を追加した場合の CADe の性能を示している。なお、この絶対値による特徴量は相対化した特徴量を含めた時よりわずかに figure of merit(FOM)が下がったため、新たに特徴量選択は行わなかった。比較する条件は特徴量の算出方法であるため、SVM に入力する特徴量は選択を行わずすべて入力している。したがって、Fig. 6 の破線

と Fig. 7 の破線の FROC 曲線は同一の結果である。

Fig. 6, Fig. 7 の結果における FP 数の減少の有意差を調べるため、jackknife free response ROC(JAFROC) 解析を行った。まず、従来法の FOM は 0.66、絶対値による位置特徴量を追加した手法の FOM は 0.70、相対化した特徴量を用いる手法の FOM は 0.71、特徴量選択を行う手法の FOM は 0.70 であった。従来法と絶対値による位置の特徴量を追加した手法では有意確率 $p=0.01$ 、従来法と相対化した特徴量を用いる提案手法では有意確率 $p=0.03$ 、従来法と特徴量選択を行う提案手法では有意確率 $p=0.17$ 、すべての特徴量を用いる場合と特徴量選択を行う場合では有意確率 $p=0.73$ の結果を示した。これらの結果から、有意水準 5% 以下の範囲で位置の特徴量を追加した提案手法による FP 数の減少の有意差を認めた。各手法による検出感度、FP 数、FOM の結果を Table 1 に示す。また、各手法を比較した場合の有意確率 p を Table 2 に示す。

3. 考察

位置の特徴量と特徴量選択を含めた提案手法によって得られた二つの検出例を Fig. 8 に示す。Case 1 では矢印で示した石灰化を正しく検出し、FP はすべて削除した。一方 Case 2 では、左側 3 カ所の石灰化像のうち 2 カ所を検出したが、右側に 1 個の FP を検出した。検出できなかった石灰化像は、淡く周囲との画素値差が小さいものであった。そのため、初期候補としては検出したが、FP として削除したものである。

また、提案手法によって FP が減少した例を Fig. 9 に示す。この症例では、従来手法によって ROI 上部の石

Table 1 Figure of merit (FOM) and FP/image of each method

| | FOM | FP/image at 90.0% sensitivity | FP/image at 80.0% sensitivity |
|-------------------------------------|------|-------------------------------|-------------------------------|
| Previous method | 0.66 | 5.0 | 1.9 |
| SVM with absolute feature | 0.70 | 3.8 | 1.5 |
| SVM with relative feature | 0.71 | 3.9 | 1.2 |
| SVM with learning selected features | 0.70 | 2.5 | 1.2 |

Table 2 *p*-value of each method

| | 1. Previous method | 2. SVM with absolute feature | 3. SVM with relative feature | 4. SVM with learning selected features |
|--|--------------------|------------------------------|------------------------------|--|
| 1. Previous method | – | 0.01 | 0.03 | 0.17 |
| 2. SVM with absolute feature | 0.01 | – | 0.46 | – |
| 3. SVM with relative feature | 0.03 | 0.46 | – | 0.73 |
| 4. SVM with learning selected features | 0.17 | – | 0.73 | – |

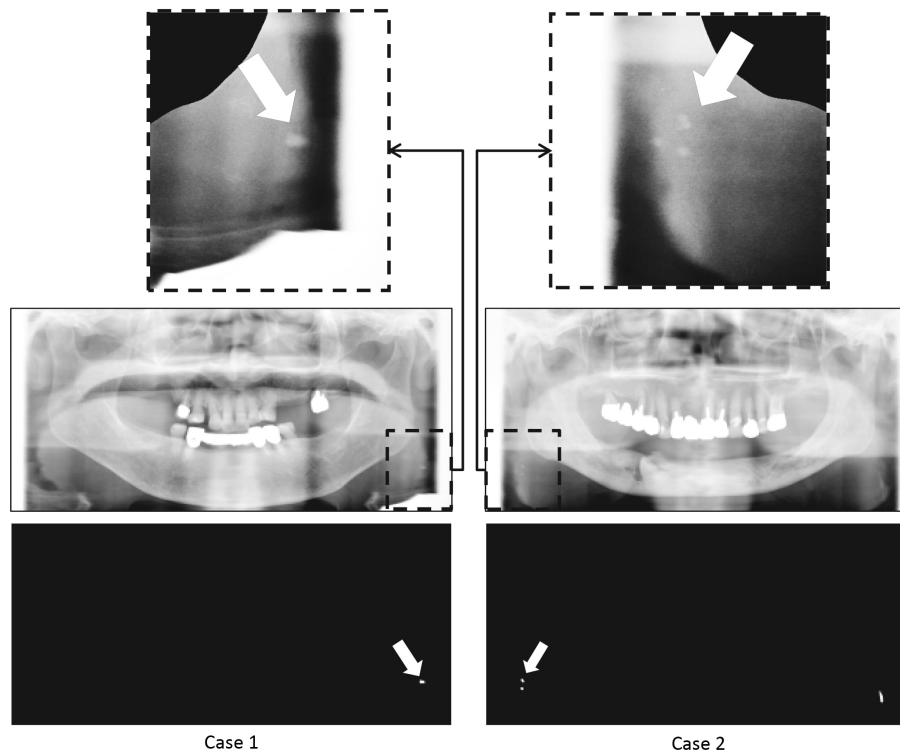


Fig. 8 Examples of results.
Arrows indicate calcifications.

灰化が検出されていたが、舌骨とその周辺に FP が残されていた。しかし、提案手法を用いた FP 削除を行うことで、FP がすべて削除され、石灰化が正しく検出された。

解析結果から、位置の特徴量を導入した本手法は従来法⁹⁻¹¹⁾の性能を向上させたことが明らかである。さらに、SVM に入力する特徴量の選択を行った。それに

よって JAFROC 解析による FROC 曲線全体の有意差は認められなかったが、感度 80.0% 以上の高い検出感度において FP 数の減少が確認された。臨床現場で本システムが用いられる場合を想定すると、高い検出感度を保ち FP 数を減少させたことは意義のある改善だったと考えられる。

また、位置の特徴量を追加したことによる従来法との

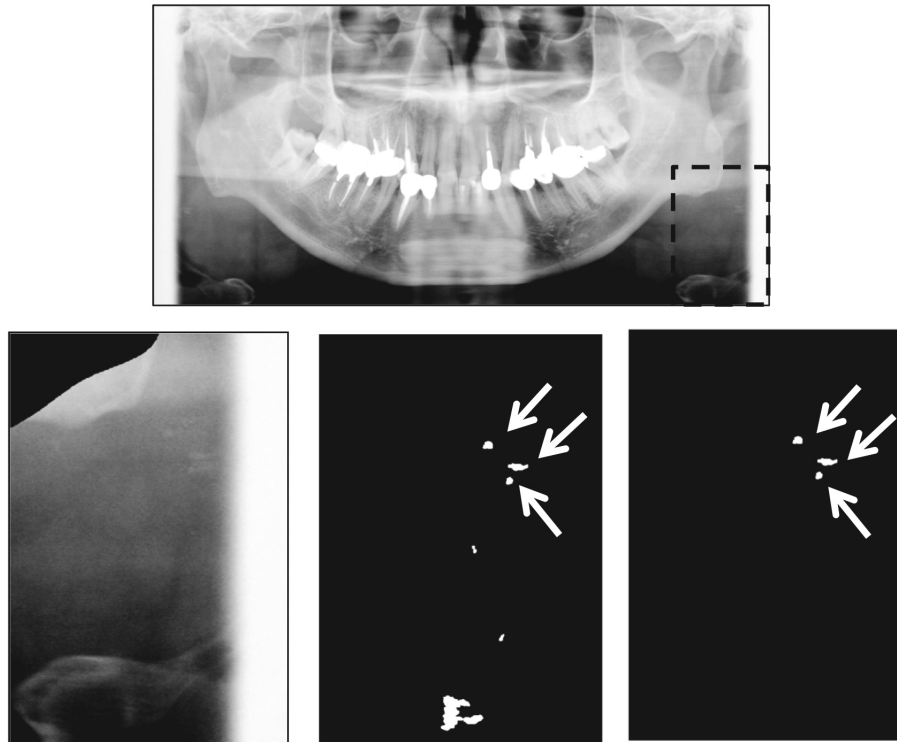


Fig. 9 An example of the improved results. FPs were reduced using the proposed method. At the top is the original image. The dashed rectangle shows the ROI. At lower left is an enlargement of the ROI image. The lower middle image shows the candidates detected using the previous method. The lower right shows the candidates detected using our proposed method. The arrows identify calcifications.

有意差は確認できたが、相対値による位置の特徴量を追加した提案手法と絶対値による位置の特徴量を追加した場合の統計的有意差は認められなかった。ただし、今回と異なるマトリクスサイズの画像を検出対象とする場合、位置の特徴量の相対化は検出率の維持や偽陽性削除法の性能維持に重要な要素であると考えられる。今後のさらなる偽陽性削除法の改良には、既存の形状、画素値、位置とは種類の異なる画像内情報を定量化した特徴量を検討する必要がある。

最後に、本研究で開発された CADe は一施設において撮影された画像データのみを用いて構築したものである。今後は、異なる撮像条件下で撮影された歯科パノラマ X 線写真を用いて性能評価を行い、濃度階調数や空間分解能が異なる入力画像に対しても検証を行い、より汎用的な手法に改良する必要がある。

4. 結 語

本研究では、位置の特徴量の導入と特徴量選択によって、従来法⁹⁻¹¹⁾の性能改善を行った。同じ画像デー

タを用いた実験の結果、感度が 90.0% のとき検出される FP 数が 5.0 個 / 画像から 2.5 個 / 画像に改善された。また、従来法と提案手法には FP 数の減少に統計的有意差が確認された。特に、位置の特徴量の追加が FP 削除法の改善に大きく寄与していた。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、有益なご助言をいただいた藤田研究室の方々、朝日大学歯学部の方々、メディア株式会社の方々に感謝の意を表します。

本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発制度 (SCOPE) において採択された「知的画像処理の活用による高度歯科遠隔診断システムの研究開発」(平成 24 年 8 月～25 年度末) プロジェクトによって行われました。また、平成 24 年度岐阜大学技術交流研究会「歯科画像診断支援システムの実用化推進技術交流研究会」の活動費支援のサポートも受けました。

参考文献

- 1) Nandalur KR, Baskurt E, Hagspiel KD, et al. Carotid artery calcification on CT may independently predict stroke risk. *AJR Am J Roentgenol* 2006; 186(2): 547-552.
- 2) Ertas ET, Sisman Y. Detection of incidental carotid artery calcifications during dental examinations: panoramic radiography as an important aid in dentistry. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2011; 112(4): e11-e17.
- 3) Sisman Y, Ertas ET, Gokce C, et al. The Prevalence of Carotid Artery Calcification on the Panoramic Radiographs in Cappadocia Region Population. *Eur J Dent* 2007; 1(3): 132-138.
- 4) Kumagai M, Yamagishi T, Fukui N, et al. Long-term cigarette smoking increases the prevalence of carotid artery calcification seen on panoramic dental radiographs in male patients. *Tohoku J Exp Med* 2007; 212(1): 21-25.
- 5) 森本泰宏, 田中達朗, 鬼頭慎司, 他. 高齢者におけるパノラマ X 線写真上で検出される頸動脈の石灰化は脳血管障害と関係があるのか? 九歯大・画像診断歯科放射線 2006; 45(4): 203-204.
- 6) 藤田広志, 勝又明敏. 歯科領域画像と CAD を利用した新しいスクリーニングパスの提案. *映像情報(M)*2012; 44(6): 595-597.
- 7) 棟安実治, 長谷川憲司, 浅野 晃, 他. 歯科パノラマ X 線写真における石灰化領域の一検出法. *電子情報通信学会技術研究報告* 2007; 107(237): 29-34.
- 8) 泉 佳範, 原田裕典, 棟安実治, 他. 局所領域の勾配を考慮した歯科パノラマ X 線写真における石灰化に対する自動検出手法の改善. *電子情報通信学会技術研究報告* 2012; 112(78): 23-28.
- 9) Sawagashira T, Hayashi T, Hara T, et al. An automatic detection method for carotid artery calcifications using top-hat filter on dental panoramic radiographs. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2011; 2011: 6208-6211.
- 10) 澤頭 毅, 原 武史, 勝又明敏, 他. モルフォロジー演算を用いた歯科パノラマ X 線写真上の頸動脈石灰化の自動検出法. *電子情報通信学会技術研究報告* 2013; 112(411): 293-297.
- 11) Sawagashira T, Hayashi T, Hara T, et al. An automatic detection method for carotid artery calcifications using top-hat filter on dental panoramic radiographs. *IEICE Trans Inf Syst* 2013; E96-D(8): 1878-1881.
- 12) 松本拓也, 林 達郎, 原 武史, 他. 歯科パノラマ X 線写真における下顎皮質骨の厚みの自動計測による骨粗鬆症のスクリーニング. *電子情報通信学会技術研究報告* 2012; 111(389): 325-329.
- 13) Matsumoto T, Hayashi T, Hara T, et al. Automated scheme for measuring mandibular cortical thickness on dental panoramic radiographs for osteoporosis screening. *Proc. SPIE Medical Imaging* 2012; 8315: 83152L-1-83152L-6.
- 14) Muramatsu C, Matsumoto T, Hayashi T, et al. Automated measurement of mandibular cortical width on dental panoramic radiographs. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 2013; 8(6): 877-885.
- 15) 浜本義彦. 4.3 特徴選択法. *統計的パターン認識入門*. 森北出版, 東京, 2009: 67-80.

問合せ先

〒 501-1194 岐阜市柳戸 1-1

岐阜大学大学院医学系研究科再生医科学専攻知能イメージ情報分野 高橋 龍