社団法人 電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
IEICE Technical Report
MI2010-88(2011-1)

頭部三次元 MRA 画像から嚢状脳動脈瘤を検出する手法の開発

多田 浩章[†‡] 小沢 義典[††] 原 武史[‡] 藤田 広志[‡]

† 千葉労災病院放射線部 〒290-0003 千葉県市原市辰巳台東 2-16
†† 千葉労災病院脳神経外科 〒290-0003 千葉県市原市辰巳台東 2-16
‡ 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 1-1
E-mail: † hiroaki_tada@chibah.rofuku.go.jp

あらまし 本研究では，頭部三次元 MRA 画像を用いて，小さな嚢状脳動脈瘤を検出する手法を提案する．提案手法では，血管領域に対して細線化した後に短枝を検索し，短枝を含む血管領域を初期動脈瘤候補として設定し，ルールベース法とサポートベクターマシンを組み合わせて偽陽性の削除を行う.本手法を 38 症例に適用したところ，真陽性率 92.0%（23/25）のとき，1 症例あたりの偽陽性数が 1.87 個の結果を得た．本手法により，嚢状小脳動脈瘤を良好に検出することが出来る．

キーワード コンピュータ支援診断（CAD），MRA，脳動脈瘤，細線化，サポートベクターマシン（SVM）

Computerized detection of saccular aneurysms in intracranial three-demensional MRA

Hiroaki TADA[†] Yoshinori Ozawa[†] Takeshi HARA[‡] and Hiroshi FUJITA[‡]

† Department of Ragiology, Chiba Rosai Hospital 2-16 Tatsumidai-higashi, Ichihara-shi, Chiba, 290-0003 Japan
†† Department of Neurosurgery, Chiba Rosai Hospital 2-16 Tatsumidai-higashi, Ichihara-shi, Chiba, 290-0003 Japan
‡ Department of Intelligent Image Information, Graduate School of Medicine, Gifu University
1-1, Yanagido, Gifu-shi, Gifu, 501-1194 Japan
E-mail: † hiroaki_tada@chibah.rofuku.go.jp

Abstract We propose a method to detect small saccular intracranial aneurysms in three-dimensional MRA. In the proposed method, short branches were serched for after axis tinning on the vessel region. The initial candidates for aneurysm were determined in region growing from the short branches. False positives were removed with rule-based method and Support-Vector-Macnine(SVM). We applied this method to 38 dataset. The true positive rate reached 92.0%(23/25). The number of false positive were obtained 1.87 per1 case each. Our method is useful to detect small saccular intracranial aneurysms.

Keyword Computer-aided diagnosis(CAD), Magnetic resonance angiography(MRA), Intracranial aneurysm, Axis thinning, Support vector machine

1. はじめに

頭部三次元 MRA(Magnetic Resonance Angiography)は，脳動脈瘤の検出によく利用される．ここでは，Time of flight 法により撮像された画像を MIP（Maximum Intensity Projection）法を用いて表示し画像診断が行われる．MIP 法では，血管径より小さな動脈瘤は，投影方向によっては血管と重なり見えなくなることがあるため，動脈瘤の診断には複数投影方向の MIP 画像と，処理前の横断像の詳細な観察が必要となり，画像診断医の負担は大きい．

そのため，頭部三次元 MRA 画像における脳動脈瘤の検出を支援するためのコンピュータ支援診断（Computer-Aided Diagnosis:CAD）に関する研究が行われており，これまで，動脈瘤を検出するための手法として，１次差分あるいは２次差分の情報を利用して動脈瘤と血管の形状を区別する手法[1-3]，画像特徴量を抽出した後に動脈瘤の検出にニューラルネットワークを用いる手法[4]，血管のスケルトン画像と距離変換画像を利用することにより血管の突出部の特徴を解析し偽陽性削除に利用する手法[5]，３次元ベクトル集中度フィルタを用いて動脈瘤を検出する手法[6]，などが提案されている．

Copyright ©2011 by IEICE

脳動脈瘤の大きさと MRA を用いた医師による診断の感度を調べた研究[7]では，直径 5mm 以上の脳動脈瘤はほぼ 100%検出可能であったが，5mm 未満の脳動脈瘤の感度は 80～87%であったと報告されている．したがって，5mm 未満の小さな動脈瘤を高感度に検出する CAD システムは，医師が脳動脈瘤を診断する上で有用である．そこでわれわれは，頭部三次元 MRA 画像から 5mm 未満の小さな嚢状動脈瘤を高感度に検出する手法を開発した．以下に提案する手法について述べる．

2. データベース

データベースとして，千葉労災病院で収集された 38 例の頭部三次元 MRA 画像を用いた．本データベース中には，大きさが 5mm 以上である嚢状大脳動脈瘤（large saccular aneurysm）が 5 例，5mm 未満である嚢状小脳動脈瘤（small saccular aneurysm）が 25 例，紡錘状脳動脈瘤（fusiform aneurysm）2 例，正常 6 例が含まれている．代表的な症例画像を Fig.1 に示す．

使用された MRI 装置は，シーメンス社製 MAGNETOM VISION 1.5T で，3 次元 Time-of-Flight 法により撮影された．

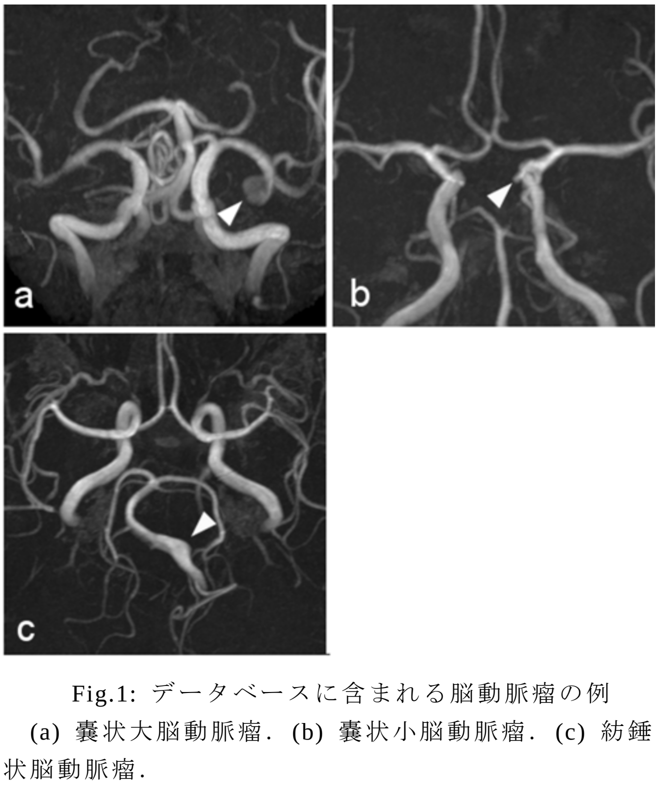

Fig.1: データベースに含まれる脳動脈瘤の例
(a) 嚢状大脳動脈瘤．(b) 嚢状小脳動脈瘤．(c) 紡錘状脳動脈瘤．

3. 方法

MRA 画像における嚢状小脳動脈瘤の検出は次の手順で行った．まず，動脈瘤の探索範囲を限定するために血管領域を抽出した．次に細線化処理によって血管領域を収縮させ，分岐点からの端点までの距離が短い枝（短枝）を動脈瘤の初期候補領域とした．それぞれの候補領域について特徴量を計測し，それらの特徴量を用いたルールベース法とサポートベクターマシン（SVM）により偽陽性の削除を行った．以下に，各処理について述べる．

3.1. 血管領域の抽出

まず画素値のヒストグラムを求め，累積度数分布の 99.9%となる値を閾値として初期血管候補領域を抽出する．ここで抽出された領域には，血管以外にも眼窩や皮下の脂肪などの高信号領域も含まれる．そこで，血管以外の領域を削除するために，500 ピクセル以下の微小領域を削除する．その後，累積度数分布の 99.5%の信号値を閾値として領域拡張を行い，血管の辺縁や細い血管まで抽出する．こうして抽出した領域を脳血管領域として脳動脈瘤の検索範囲として設定した．なお，ここで用いた閾値はヒューリスティックに決定した． Fig.2 に血管抽出処理結果の例を示す．

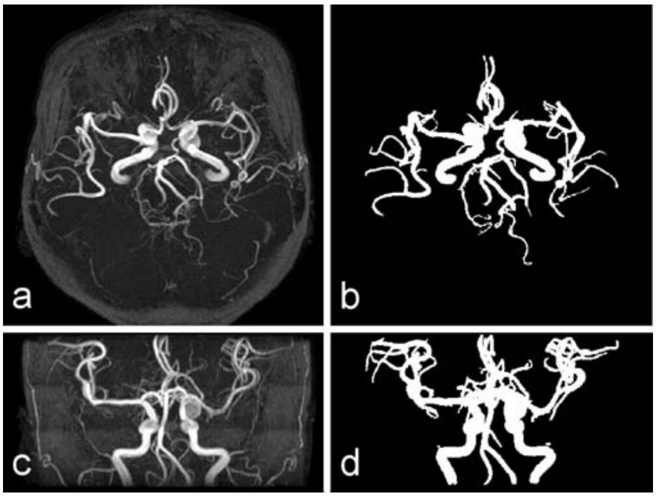

Fig.2: 血管領域抽出処理結果の例
(a) 抽出前 MIP 画像(尾頭方向)．(b)抽出された血管領域（尾頭方向）．(c)抽出前 MIP 画像（前後方向）．(d)抽出された血管領域(前後方向)．

3.2. 血管領域の細線化

抽出された血管領域を血管構造が保たれるように収縮させていくと，嚢状の動脈瘤は血管の中心線から伸びる短い枝として表現される．提案手法では，ユークリッド距離変換を用いた逐次型アルゴリズム[8]を利用し，端点を残しながら画素を削除していく方法を用いた．画素の削除可能性の判定には，連結数に加えて注目画素と 26 近傍からなる 3-3-3 の領域でのパターンマッチングを用い，平滑化が進みすぎて微小な動脈瘤部分に短枝がなくなることを防いでいる．Fig.3 に細

線化の例を示す．

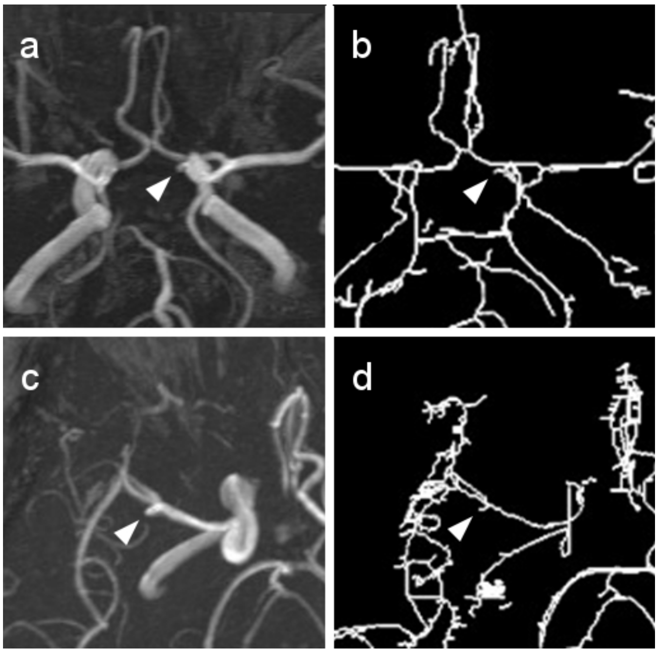

Fig.3: 細線化の例

(a,c)MIP 画像．(b,d)細線化結果．(a,b)左内頚動脈瘤．(c,d)右中大脳動脈瘤．いずれも矢頭が示す位置に動脈瘤がある．

3.3. 初期動脈瘤候補の決定

血管領域の細線化によって得られた中心線の概念図を Fig.4 に示す．中心線を構成する画素の連結数に着目すると，連結数が 1 の画素は端点，連結数 2 の画素は連結点，連結数 3 の画素は分岐点となる．

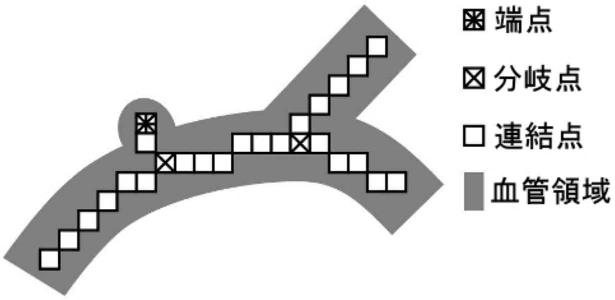

Fig.4: 中心線の概念図

中心線をこれらの特徴的な画素を用いて，分岐点と別の分岐点を両端に持つ部分と，分岐点と端点を両端に持つ部分に区分すると，分岐点と別の分岐点を両端に部分は血管本幹部分に相当し，分岐点と端点を両端に持つ短枝として示される部分に，血管本幹から外側に向けて凸となる領域が含まれる．すなわち，短枝を検索することで嚢状動脈瘤の候補を見つけることができる．そこで，中心線上で全ての短枝を検索し，見つかった短枝を血管領域を境界として膨張処理を行い，得られた膨張領域を初期動脈瘤候補として設定した．

動脈瘤部分の模式図を Fig.5 に示す．

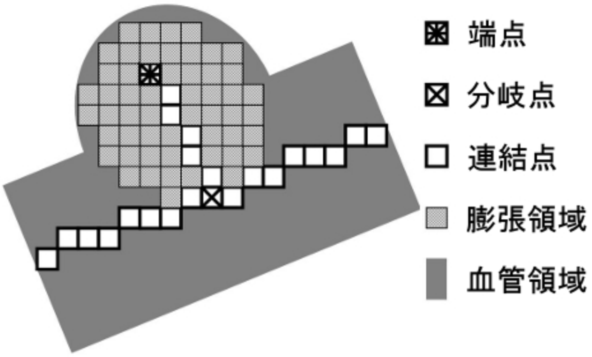

Fig.5: 動脈瘤部分の概念図

3.4. 偽陽性削除

細線化処理における，消去可能性を判定するアルゴリズムの性質により細線化結果は大きく異なる．判定条件がゆるく容易に消去可能と判定されるアルゴリズムでは，細線化結果は平滑化されて短枝は生じにくいが，消去可能性の判定条件を厳密にすると，血管領域の形状や，径の変化などでも短枝が生じやすくなる．提案手法では動脈瘤を高感度に検出できるように短枝を生じやすいアルゴリズムを使用しているために，1 症例あたり 400 個以上の短枝が生じている．したがって多くの偽陽性が存在することになり，効率よく偽陽性を削除することが要求される．そこで，以下に述べるようにルールベース法と識別器の 2 段階の処理による偽陽性削除を行った．

短枝の長さ，座標（x,y,z）と，領域の幾何学的形状に由来する特徴量である，体積，凸度，長径，短径，離心率，表面の画素数，局所的な血流動態に関連する画素値の平均の 11 の特徴量を用いて， ルールベース法により明らかな偽陽性を削除した．

ルールベース法では，特徴空間上で動脈瘤の分布の近くに存在する偽陽性は削除できない．そこで，ルールベース法を適用した後に，サポートベクターマシン（Support Vector Machine:SVM）[9]を適用した．SVM による識別関数は次式で与えられる．

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i y_i K(x, x_i) + b \qquad (1)$$

ここで，α_i はラグランジュ乗数であり，α_i の制約条件は次のようになる．

$$0 \le \alpha_i \le \frac{\delta}{\mathrm{n}},$$
$$\frac{\delta}{\mathrm{n}}\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \alpha_i y_i = 0 \tag{2}$$

また，次式で示すように，カーネル関数 $K(x, x_i)$ にはガウシアンカーネルを用いた．

$$K(u,v) = \exp(-\gamma |u-v|^2) \tag{3}$$

計算ライブラリは LIBSVM[10] を使用し，C-classification の調整パラメータδ，および動径基底関数γの最適値選択には，一例消去交差確認法（leave-one-out cross validation method）を用いて，（δ，γ）を変化させながらヒューリスティックに平均誤判別率を計算し，この平均誤判別率が最小となる（δ，γ）の組み合わせを最適値として，動脈瘤と偽陽性の判別に使用した．

4. 実験結果

本手法を 38 症例（うち嚢状小脳動脈瘤 25 個）に適用することによって，嚢状小脳動脈瘤の検出性能を調べた．血管領域を細線化することによって得られた中心線から短枝を検出し初期動脈瘤候補を決定したところ，候補数は 16,361 個であった．この初期候補に対して，短枝の長さ，座標，領域の体積，凸度，長径，短径，離心率，表面の画素数，画素値の平均という特徴量を求めてルールベース法を適用すると，全ての動脈瘤を残しつつ候補数は 406 個となり，今回用いた特徴量が動脈瘤と正常血管を区別するのに有効であることが示唆された．

次にこの 406 個の動脈瘤候補を一例消去交差確認法を使用して，パラメータδ，γを最適化した SVM に入力したところ，23 個（92.0%）の嚢状小動脈瘤を検出できた．このとき偽陽性は 71 個（1.87 個/症例）であった．Fig.6 に，検出された嚢状小脳動脈瘤の画像例を示す．

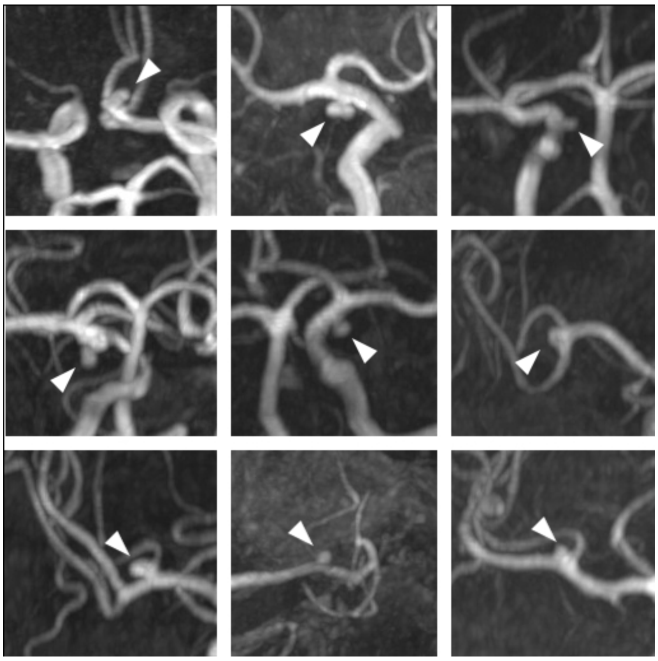

Fig.6: 正しく検出された脳動脈瘤の例．

5. 考察

本手法で検出できなかった 2 つの脳動脈瘤を Fig.7 に示す．

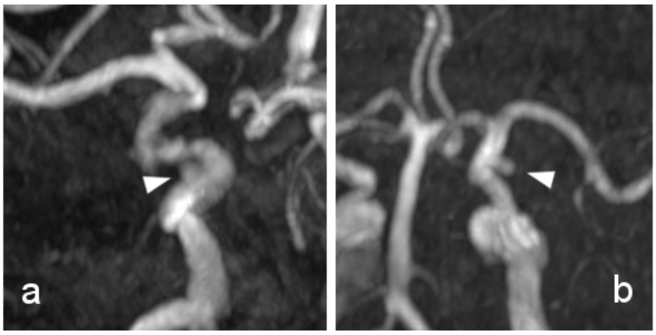

Fig.7: 検出できなかった脳動脈瘤の例．
(a) 右内頸動脈瘤　(b)左内頸動脈瘤

(a)の症例では動脈瘤周辺の血管径は不整で，辺縁も明瞭ではなく，モーションアーチファクトも含まれている．画質が悪いために動脈瘤の特徴が捕らえきれずに検出失敗したものと思われる．(b)の症例に関しては，MIP 画像で脳動脈瘤は明瞭に描出されており，画質の問題はなさそうである．同部位に発生している症例がデータベース中に少ないことが考えられるため，今後データベースを拡充した後に再検討したい．

血管領域を細線化し短枝を検索することにより，嚢状の小さな脳動脈瘤を検出できることが確認できた．一般的に撮影される頭部三次元 MRA 画像のボクセルサイズが仮に 0.4mm 程度であるとすると，2mm 程度の小さな脳動脈瘤は 5 ボクセルの大きさしかない．このように小さな脳動脈瘤を高感度に検出するためには，

短枝が生じやすい細線化処理を行う必要がある．今回用いた細線化処理のアルゴリズムでは，用意したデータベース中の全ての嚢状小脳動脈瘤領域に短枝を発生させることが出来，他の未知症例でも良好に初期動脈瘤候補を設定できるものと示唆された．

初期動脈瘤候補中の偽陽性については，今回 1 症例あたり 430 個が観察されたが, ルールベース法と SVM の組み合わせで，良好に偽陽性を削除できることが確認された．識別器の種類による性能の違いを評価するために，SVM の替わりに線形識別器（Linear Discriminant Analysis:LDA）と 2 次識別器（Quadratic Discriminant Analysis:QDA）を適用して同様に実験した．Fig.7 に, 各識別器の出力値を閾値処理することによって得た FROC 曲線を示す．

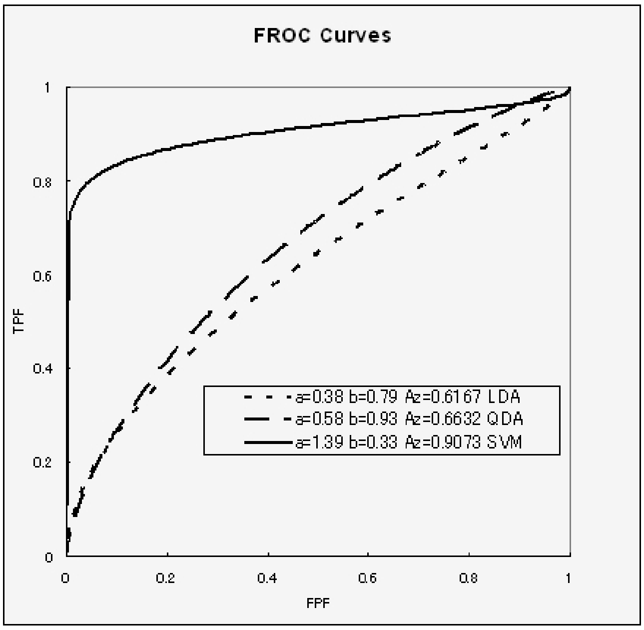

Fig.7: FROC 曲線

Az 値は, SVM で 0.9073, LDA で 0.6167, QDA で 0.6632 となり, SVM の性能は LDA, QDA と比べて有意に（p ＜0.001）優れていることが分かった．

動脈瘤は血流の変化が大きな場所や,構造的に弱い分岐部や屈曲部に出来やすいといわれ，好発部位が存在する．動脈瘤の検出に注目領域の位置情報である座標を使うことは動脈瘤が特異的に発生しやすい場所があることを考えると理にかなっている．しかし，ルールベース法のみや線形識別器または 2 次識別器を適用しても数箇所存在する脳動脈瘤の好発部位を識別境界で分離することは難しい. SVM はカーネルトリックを用いて入力ベクトルをより高次の特徴空間で扱うため, 脳動脈瘤の好発部位を識別するのには適していると考えられる．今回の実験で嚢状小脳動脈瘤を高感度に検出できたのも, SVM の適用が大きく影響しているものと想像できる．今回は，SVM の計算負荷を抑える意味でも前段にルールベース法を適用したが，ルールベース法を用いずとも高性能なシステムを組めるかどうかは今後の検討課題としたい．

脳動脈瘤には今回検出対象にした小さな嚢状動脈瘤の他に, 大きな嚢状動脈瘤や, 紡錘状動脈瘤があり，それぞれ特徴は異なる．そのため，それらを高感度に検出するためには，対象の特徴に応じた手法が必要であると考えている．今後は，症例データベースの拡充をしつつ，それら特徴の異なる脳動脈瘤の検出にも対応できるシステムの開発を進めて行きたい．

6. まとめ

本研究では，細線化処理を用いた頭部三次元 MRA 画像における小さな嚢状動脈瘤の検出手法を提案した．血管の中心線から短枝を検索して初期動脈瘤候補とし，ルールベース法と SVM を組み合わせて偽陽性を削除するのが特徴で，38 症例の MRA 画像に適用したところ，真陽性率 92.0%（23/25）のとき，1 症例あたりの偽陽性数が 1.87 個の結果を得た．したがって，本手法は小さな嚢状脳動脈瘤の検出に有用であると考えられる．

謝　辞

本研究の一部は横河医療ソリューションズ株式会社（旧横河電機株式会社ソリューション事業部医療ソリューション本部）との共同研究で行われました．大島康実氏，林　尚典氏，田中洋平氏，はじめ同社の関係諸氏に感謝いたします．

文　献

[1] Arimura, et al, "Automated computerized scheme for detection of unruptured intracranial aneurysms in three-dimensional MRA." Academic Radiology vol.11, no.10, pp.1093-1104, 2004.

[2] 川下郁夫，他，"投票と多数決原理に基づいた MR Angiogram における脳動脈瘤の検出" 信学技法 MI 2005-1～13, pp.49-54，2005.

[3] Hayashi N, "Feasibility of a curvature-based enhanced display system for detecting cerebral aneurysms in MR angiography" Magnetic Resonance in Medical Sciende, vol.1, pp.29-36, 2003.

[4] 餘語佐斗志，"ニューラルネットワークを用いた脳動脈瘤コンピュータ診断支援システムの構築" Med Imag Tech vol.23, no.5, pp.333-338, 2005.

[5] Arimura, "Computerized detection of intracranical aneurysms for three demensional MR angiography:feature extraction of small protrnusions based on a shpe-based difference image technique" Medical Physics, vol.33, no.2, pp.394-401, 2006.

[6] 小椋　潤, "ベクトル集中度フィルタを用いた MRA 画像における脳動脈瘤の検出法" MII, vol.24, No.2, 2007.

[7] 田邊純嘉，"脳血管障害における画像診断の進歩と診療への展開" CI 研究，vol.23，no.2，pp.77-90,

2001.

[8] 齋藤豊文，森　健策，鳥脇純一郎，"ユークリッド距離変換を用いた3次元ディジタル画像の薄面化および細線化の逐次型アルゴリズムとその諸性質"，信学論（D-II），vol.J79-D-II, no.10, pp.1675-1685, Oct. 1996.

[9] Cortes, C., Vapnik, V., WSupport-vector network." Machine Learning, vol.20, pp.1-25, 1995.

[10] Chih-Chung Chang, Chih-Jen Lin,"aLibrary for Support Vector Machines" http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers/libsvm.pdf, 2001.