



会期:平成14年 4月 4日
会場:ポートピアホテル本館

コンピュータ支援診断(CAD)研究 - 過去から未来へ -

藤田広志

岐阜大学大学院 医学研究科再生医科学専攻知能イメージ情報部門

Studies on Computer-aided Diagnosis (CAD): From the Past to the Future

Hiroshi Fujita

Department of Intelligent Image Information, Division of Regeneration and
Advanced Medical Science, Graduate School of Medicine, Gifu University

はじめに

本稿は、日本放射線技術学会(JSRT)第58回総会学術大会(2002年4月神戸で開催)で報告した宿題報告の概要を、一部の内容を更新して(2003年7月現在)まとめたものである。宿題報告は92枚のスライドで構成されていたので、これらすべてを限られた紙面に掲載することができないのは残念である。宿題報告のタイトルは標記のような「大きなもの」であったが、発表内容を準備・構成するにあたっては、1)医工学におけるCAD研究、2)私のCAD研究、3)乳癌診断のCAD研究、4)JSRTとCAD研究、の四つの観点からCAD研究を論述することとした。また、次世代へのメッセージを少しでも伝えられることを願いつつ、スライドを作成した。本稿では、これら的一端を記述した。

1. コンピュータ支援診断(CAD)

CADの用語は、すでに本学会の会員には広く定着していると容易に想像できる。しかしながら、ここではあえて、最初にCADの定義をまとめる。

コンピュータ支援診断(computer-aided diagnosis, CAD)とは、放射線画像をはじめとする医用画像に対して、コンピュータで定量的に解析された結果を「第二の意見(“コンピュータの意見”)として医師が利用するものであり、「医師による診断」である¹⁻⁵(Fig. 1)。最終診断は必ず医師が行うものであり、いわゆる自動診断とは全く異なる概念である点に十分な注意が必要である。なぜなら、CADシステムの性能の向上とともに、医師が画像の最終チェックをせずに、開発者の意図しなかった自動診断のような間違った使い方がなされ、その結果、誤診を招くという危惧があるからである。

CADという用語は、最近は二つに分けて使われる

ことが多くなっている。これらは、コンピュータ支援検出(computer-aided detection, CAD)のCADとコンピュータ支援診断のCADである。

前者のCADでは、コンピュータで自動検出された病巣の候補を、コンピュータのディスプレイ画面などに表示される参照画像に矢印などで示すことによって、医師が気付かない病巣や、(あってはいけないことであるが)うっかりした検出ミスに対して、これらの見落としを減少させることが期待される。これは診断の正確度の向上につながる。特に、集団検診のような大量の画像を読影する現場では、この効果はより大きいと予想される。また、医師の読影経験の相違などによる病巣検出能力の医師間のバラツキも減少させ、ある一定の高いレベルに診断を維持できるという効果も期待される。さらには、CADの利用による読影時間の短縮(生産性の向上)への期待も考えられる。これまでにCADの商用化に成功した企業では、CADをこのような支援検出の意味で使っている。

また、後者のCADでは、病巣の良悪性鑑別を画像を用いて主観的に行うような場合に、コンピュータによって分析された定量的な数値(確率など)を医師に提示するものである。これによって、医師のより客観的な判断を可能にし、診断の正確度が向上すると期待されるものである。この意味のCADシステムは、まだ商用化されていない。これをcomputer-aided differentiation(コンピュータ支援識別)として同じくCADと呼んでコンピュータ支援検出と区別し、これら両者の総称をコンピュータ支援診断CADと呼ぶのが適切かもしれない。

今世紀は、CADシステムがいろいろな領域の診断画像を対象として、次第に普及していくと予想される。適用される撮像モダリティも、対象となる診断領

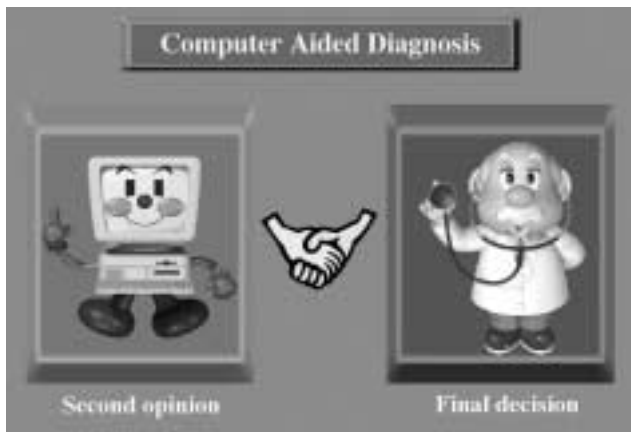


Fig. 1 コンピュータ支援診断(CAD)の概念図

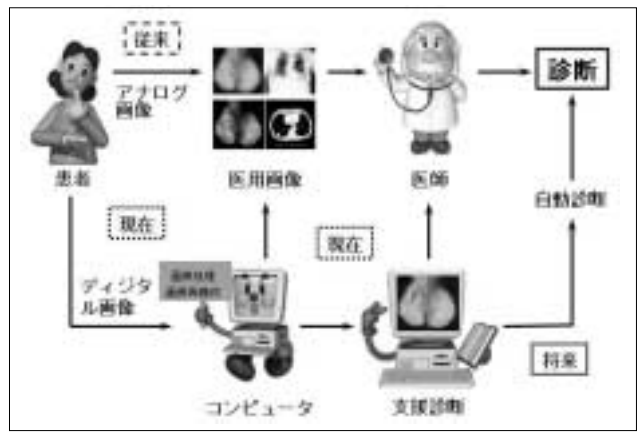


Fig. 2 医用画像技術と診断法の流れ(文献7を大幅に改変)

域も増え、同時に複数の病変を検出するCADが開発され、また、同じ病変の画像検査に対する複数モダリティによるCADを利用するような形態も考えられ、これらはマルチCADシステムと呼ぶことができる⁶⁾。

2. CAD研究の流れ：基礎から臨床へ

2-1 画像診断の流れ

ここでは、医用画像技術と医師の診断との関係について見てみる。これを簡単に表すと、Fig. 2のようになる⁷⁾。100年以上続いているフィルム(アナログ)による診断から、最近のコンピュータによって処理された画像(デジタル)による診断へ、さらに新しいCADの流れに向かおうとしている。これは、医療分野における本格的なパターン認識技術の実用化であるといえる。ただし、いわゆる自動診断はまだSF的な将来の話であるといえるが、特定の画像の分野では、一次元信号ではあるが心電図解析がそうであるように、それほど時間がかからないかもしれない。

2-2 CAD開発の歴史

CADに関係するトピックスを表にするとTable 1のようになる^{5,8)}。CADシステムの開発の歴史を眺めてみると、その歴史は大変に古く⁸⁾、1960年代にまでさかのぼる。ただし、これらの研究では、支援診断という立場をとっていたとは言いがたく、言葉としては自動診断であった。本当の意味でのCADの研究は1980年代に入ってからのシカゴ大学の土井教授らの研究であり、CAD研究が活発になってきたのは、1990年代に入ってからの⁸⁻¹¹⁾。

2-2-1 マンモグラフィにおけるCAD

乳房X線写真(以下、マンモグラフィ)における画像解析の研究について世界最初と考えられる論文は、1967年に発行のRadiology誌に掲載されたWinsbergらのものになる¹²⁾。このときの画像の濃度分解能はたか

Table 1 CADとそれに関連する歴史的なエポック(文献5, 8等を参考に作成)

年代	内容
1895年	X線の発見(Roentgen)
1946年	コンピュータの開発: エニアック(Eckert & Mauchly)
1960年代	マンモグラフィや胸部X線写真における画像解析研究(Winsberg, Meyers, Becker, 鳥脇, ...)
1972年	X線CTの発表(Hounsfield)
1974年	先天性股関節脱臼X線写真の自動診断の発表(遠藤ら)
1978年	DSAの発表(Kruger)
1981年	CRの発表(富士写真フィルム)
1982年	画像処理技術の塵肺診断への応用研究委員会発足
1989年	コンピュータ支援画像システム研究会発足
1992年	コンピュータ支援画像診断学会の設立
1994年	シカゴ大学にてマンモグラフィ用CADワークステーションの臨床試験開始
1998年	First International Workshop on CAD(Doi, Chicago)
1998年	世界最初の商用CADシステム(マンモグラフィ)
2001年	RSNAのオープニングセッションにてCADの講演2題

だか4ビット(16階調)であったが、医師のマンモグラフィ画像の読影と同じように、左右の乳房X線画像の比較処理で腫瘍陰影の検出を行っており、技術的には興味深い内容の研究がすでに行われていた。また、ゼロマンモグラフィ(xeromammography)における異常領域の検出や鑑別に関する研究も1970年代に行われていた^{13,14)}。これらの一連の研究は、マンモグラフィに限らず、自動診断という概念で研究が行われてきた。その後、注目に値するのは、1980年代におけるシカゴ大学の土井らの研究であり¹⁵⁾、これはコンピュータ支援診断(CAD)の視点からの研究であった。そして、1990年代には、世界中のたくさんの研究者がマンモグラフィCADの開発に携わるようになってきている。マンモグラフィCADを中心的なテーマとして取り扱った「デジタルマンモグラフィの国際ワークショップ」

(International Workshop on Digital Mammography)が設立されたのが1992年であり、2002年にはドイツ・ブレーメンで第6回目が開催された(<http://www.mevis.de/iwdm2002/iwdm2002.html>)。

一方、国内におけるマンモグラフィCADの開発を見ると、1980年代後半における木戸らによる研究では、すでにシステムを構成しており^{16, 17)}、商品化には至らなかったが、世界に先駆けたわが国における先進的なマンモグラフィCAD開発の研究として大変に興味深いものである(すでにII-TV方式によるデジタルマンモグラフィが利用されていた)。その後、東京農工大学の小畑らや岐阜大学の筆者らが、活発に開発を行っている¹⁸⁾。これらのCADシステムの開発には、わが国の女性に特有なデンスプレストにも十分に対応可能な新しいシステムとして、大きな期待がかかっている。

マンモグラフィCADは、医療画像における世界最初の実用機として、米国のR2 Technology社(<http://www.r2tech.com/>)のCADシステムが1998年にFDA(米国食品医薬品局)の認可を得て、実用化された¹⁹⁾。

その後も、2002年前半に二つの企業の製品がFDAの認可を得て、CADの商品が誕生している²⁰⁾(すでに千台を超える販売との情報あり)。さらに、注目に値する点は、2000年12月の米国議会で、R2社のようなCADの利用に対して2001年4月から、保険の適用が可能と決定されたことであり、CADの利用に拍車がかかる強い要因となっている。

このようにマンモグラフィCADでは、少なくとも三つの企業がFDAをパスして、商品化しているため、それらの臨床的な応用例が多数出てきており、CADの臨床的な有効性を示す論文も増えてきている。

2-2-2 胸部X線画像におけるCAD

胸部X線画像における先駆的な画像解析研究として、1964年のMeyersらによる胸部透視像のデジタル画像から心臓郭比の自動計測²¹⁾や、同年のBeckerらによる胸部X線正面像からの特徴抽出の試み²²⁾があり、わが国では1967年の鳥脇らによる胸部X線写真の肋骨境界の自動識別の研究²³⁾などがある。さらに、塵肺症重症度を自動分類する研究なども、1970年代から数多く行われてきた⁸⁾。

胸部単純X線写真のCADでは、2001年に米国のベンチャー企業Deus Technologies社(<http://www.deustech.com/>)の商品がFDAの認可を得て、実用化に成功している(ノジュール自動検出)。また、同年、三菱スペース・ソフトウェア(<http://www.kansai.mss.co.jp/CADProj/>)が、経時差分処理技術による胸部X線診断支援ソフトウェアの販売を本邦で開始している。この処理技術は、過去画像と現在画像の差分処理を行うこと

により、この期間に発生した病変をサブトラクション画像として「強調処理」するものであり、広い意味でこれもCADといえる²⁴⁾。同社は、2003年4月に、胸部単純X線写真上の「孤立性結節状陰影」の候補領域を検出するCADについても国内で販売を開始した。

2-2-3 その他の領域のCAD

CADは、上記の二つの診断領域に限られるものではない。例えば、胸部X線CT画像における肺癌検診のためのCADシステム^{25, 26)}、X線CT画像の大腸領域におけるポリープ検出のためのCADシステム、胃X線画像のCADシステム、MRIのCADシステム、超音波画像のためのCADシステム、核医学画像のCADシステムなど、CADの適用領域は広く確実に拡張を続けている。

これらのなかで、最近、本邦においてついに実用化されたものが、胸部X線CT画像における肺野のノジュール検出のためのCADシステムである(日立メディコより2003年4月に)。特に、マルチスライスX線CTの実用化に伴い(胸部領域に限らず)、X線CT画像の診断においては大量の画像データが発生するため、CADなしでは読影診断に支障が出始めているのが現状といえる。

なお、DSAシステムにおける血管系や狭窄率の計測は定量的な尺度を与えるという意味では、すでに実用化されている広義のCADシステムになる²⁷⁾。また、CT画像におけるバーチャルエンドスコープ(仮想内視鏡)のような三次元画像を利用したツールも、すでに実用化された広義のCADシステムと解釈される。

2-3 画像処理からCADへの展開

診断領域における画像処理とその展開について、Table 2にまとめた。単一画像による処理から複数画像による処理へ、また、画像解析から三次元画像処理へと、高度な処理へと向かっている。そして、コンピュータ支援診断では、これらの画像処理技術が高度に成熟したものが有効に利用されているといえる。

3. 私のCAD研究

3-1 私の研究歴

筆者がCAD研究を行うようになった経緯を示すために、“私の研究歴”を表にすると、Table 3ようになる。本学会の名誉顧問の内田 勝先生の岐阜大学の研究室において、工学部と大学院で放射線画像の評価法の研究について学んだのが医用画像情報の研究分野に踏み込んだきっかけであった^{28, 29)}。そして、当時、本学会でもブームを呼んだエントロピー法による研究「放射線像伝達系のエントロピー解析」で工学博士の学位が名古屋大学より授与された(世話教授：福村晃夫

Table 2 診断領域における画像処理とその展開

・画像処理（二次元単一画像処理が主体） 階調処理，周波数処理，...
・画像処理（二次元複数画像処理） 血管造影差分処理，エネルギー差分処理，経時差分処理，...
・画像解析 <i>measurement & classification</i> 狭窄率の計測，心胸郭比の計測，良悪性の鑑別，...
・三次元画像処理 <i>visualization</i> マルチスライスCTにおける三次元画像形成と処理， バーチャルエンドスコープ，...
・コンピュータ支援診断（CAD，第二の意見の提示） 病変候補のマーキング，良悪性の鑑別の定量的な指標

先生)。これらの研究は、主として増感紙 - フィルム系(いわゆるアナログ画像)が対象であった。

その後、同じく本学会の名誉顧問であるシカゴ大学の土井邦雄先生のもとで、約3年間にわたりデジタル系の画像評価法の研究に従事する機会に恵まれ、その後半では、シカゴ大学におけるCAD研究の最初のテーマであった「DSA画像の血管の解析(撮像系のボケを考慮した血管径の定量的な計測法の開発²⁷⁾)」に従事したことが、私の今日のCAD研究に結びついている。この血管解析の研究では、撮像系のMTF(正確には、プリサンプリングMTF²⁸⁾)を利用しており、画像評価の技術がCAD研究にもうまく結びついている例にもなっている(なお、文献30の“有名な論文”は、筆者がこれまでに書いたものの中で、最も多く世界的に引用されている)。

シカゴ留学から帰国後に、私が最初のCAD研究を行うまでには少しの間隔があったが(その間、山口大学の塚昭義技師長(当時)のグループと、デジタル系の画像評価法をCRに適用した研究に主に従事したため)、国内で最初に手がけたCADの対象分野は、核医学画像(SPECT)であり、その後、マンモグラフィや胸部X線画像、CT画像などに次第に応用分野を広げていった。具体的な研究内容については、以下に紹介する。

3-2 ニューラルネットワーク

1989年に開催された第75回北米放射線学会(RSNA)において、人工ニューラルネットワーク(artificial neural network, 以下ANN)を放射線画像領域に適用した演題が3題あった。ANNとは、生体の神経回路網を模擬した従来のノイマン型とは異なったタイプのコンピュータである³¹⁾。従来のコンピュータは人間の左脳に相当し、これに対し、ANNは右脳に相当する。ニューラルネットワークは、パターン認識に威力を発揮し、学習するコンピュータとして当時脚光を浴びていた技

Table 3 “私 藤田 しの研究歴”

・1976 - 1978	相反則不軌特性の測定法の開発 (岐阜大学・修士論文)
・1978 - 1983	放射線像伝達系のエントロピー解析 (岐阜高専:名古屋大学・博士論文の研究)
・1983 - 1986	デジタルラジオグラフィの画像評価とCAD (シカゴ大学における研究)
・1986 - 1991	CR・DRの画像評価とCAD(核医学) (岐阜高専・電気工学科における研究)
・1991 - 2002	マンモグラフィなど各種CADシステムの開発 (岐阜大学工学部における研究) (15名の工学博士の誕生)
・2002 - 未来	より高度・広範囲なCADシステムの開発 (岐阜大学大学院医学研究科における研究) (VSLラボと医学教育研究開発センター)

術の一つである。特殊なコンピュータのアルゴリズムを作成しなくても、症例を集め、その正解とともにANNを学習させるだけで、未知のデータに対しても正解が得られるという理想的なコンピュータである。

シカゴ大学の土井教授からは「今後有望な手法に成り得るので勉強しておくといよい」という助言をいただいた。早速、RSNAから帰国後、資料を集め、CADに適用しようと思案を重ねた。その結果、核医学画像^{32, 33)}、骨X線画像^{34, 35)}、および乳房X線画像³⁶⁾の三つの領域に適用を試みた。奇しくも、岐阜大学における最初のCADの論文が掲載されたのは、これら三つの領域に関するANNを利用したもので、すべて1992年の掲載であった(宿題報告するまでに約10年の歳月が経過)。以下では、これらのなかで核医学画像への取り組みについて説明する。

ANNのCADへの応用として、心筋SPECT画像のBull's-eye表示にまず注目した^{32, 33)}(Fig. 3)。理由は簡単で、当時のパソコンで取り扱える画像のマトリックスサイズが、メモリーとソフトウェアの制限から32×32画素程度であり、とても容量の大きいX線画像そのものを入力することは不可能であったからである。また、本学会からシカゴ大学に短期留学派遣の1回目であった片淵哲朗氏(国立循環器病センター)との議論の結果でもあった。このCADシステムは、レジデント以上の威力を発揮した。また、複数のANNを連用した手法としても成果を上げている³⁷⁾。この一連の研究成果は、当時の日経新聞などでも取り上げられ(1993.5.23付夕刊)、記事の見出しには、「心臓病 電子頭脳が名医の診断」、「電算機で症例予習」、「血流障害部ピタリ指摘」などと書かれ、ANNの特徴がよく表現されていた。

本研究の成果はRSNAでも何度か報告し、また、米

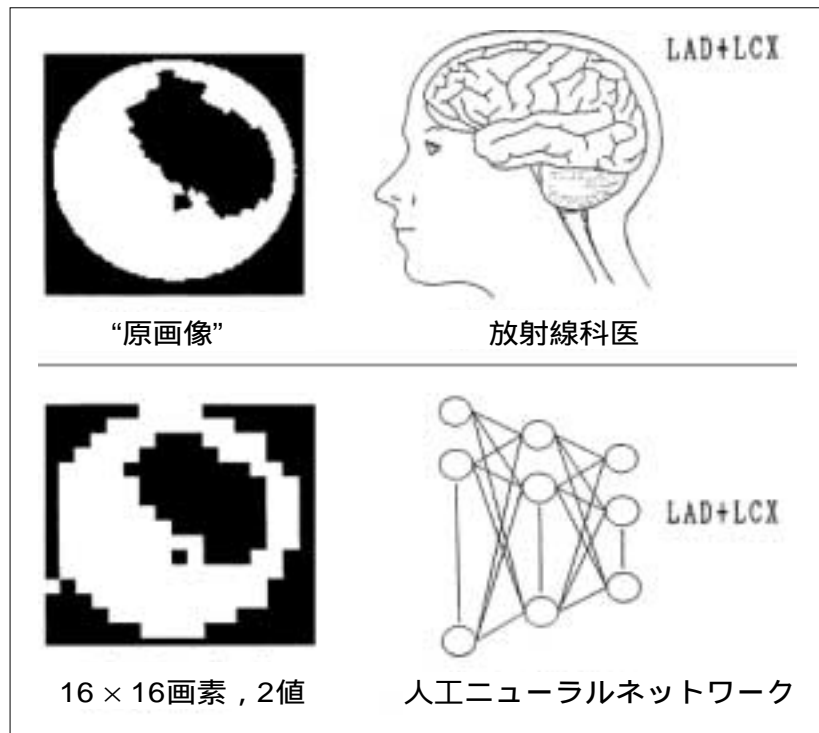


Fig. 3 核医学画像におけるBull's-eye画像を対象としたCADの概念図

国の核医学会誌にANNを応用した最初の論文としても1992年の2号に掲載され³²⁾、ニューラルネットワークのハンドブックでも採用されている³⁸⁾。

片淵哲朗氏は、「心臓核医学における心筋画像の定量解析とコンピュータ支援診断システムの構築に関する研究」としてANNとともにファジイ技術もCADに応用した研究^{39), 40)}を中心に学位論文をまとめ、岐阜大学より工学博士の学位が授与された(2001年3月:論文博士)。氏の論文は、二つの学会の論文賞にも輝いている(異例な記述法であるが、本報告では、いくつかの文献に論文賞受賞の旨を表記した)。なお、これらの研究は、西村恒彦教授(現:京都府立医科大学)らとの共同研究でもあった。

3-3 胸部画像のCAD

胸部単純X線写真については、ノジュールの自動検出に関する研究に取り組んでいる。検出方法として、原 武史氏(現:岐阜大学大学院医学研究科)の考案による遺伝的(GA)アルゴリズムをテンプレートマッチングに応用したもの(GAテンプレートマッチングと命名)を新たに開発している^{41), 42)}。この手法は、CTのスライス面の同定や⁴³⁾、CT画像におけるノジュールの自動検出⁴⁴⁾に応用された。原氏と李 鎔範氏(現:新潟大学医学部保健学科)は、これらの研究を中心に学位論文をまとめ、それぞれ「胸部X線写真と乳房X線写真のためのコンピュータ支援診断システムに関する研

究(2000年9月:論文博士)と「胸部X線ヘリカルCT画像におけるコンピュータ支援診断システムの開発に関する研究(2001年3月:課程博士)」の内容で、岐阜大学より工学博士の学位が授与された。原氏はマンモグラフィCADの研究内容も含み、李氏は高次局所自己相関特徴を用いた新しい腫瘤陰影の検出法の内容も含んでいた⁴⁵⁾。

津坂昌利氏(現:名古屋大学医学部保健学科)は、胸部X線CT画像における縦隔リンパ節の自動検出アルゴリズムの開発⁴⁶⁾を中心に学位論文「X線の物理的解析とX線CT画像のコンピュータ支援診断に関する研究」をまとめ(1999年3月:社会人課程博士)、岐阜大学より工学博士の学位が授与された。津坂氏の論文内容は、X線の物理的解析(X線スペクトル測定とモンテカルロシミュレーションによる散乱線解析)に関する研究内容も含んでいた。

加野亜紀子氏(現:コニカミノルタエムジー)は、胸部単純X線写真のための経時差分処理法の開発とその改良^{47), 48)}について学位論文をまとめ、「胸部X線画像の経時差分処理に基づくコンピュータ支援診断に関する研究(2001年3月:社会人課程博士)」と題して岐阜大学より工学博士の学位が授与された。

4. 乳がん画像診断のCAD

4-1 マンモグラフィCAD

私の研究室で最も長い期間を通じて研究開発を行っ



Fig. 4 岐阜大学で開発したマンモグラフィCADシステムの概観図

ているのが、マンモグラフィのCAD研究である。研究開始の発端は、当時、愛知県がんセンター病院の木戸長一郎先生、遠藤登喜子先生、堀田勝平氏らとのI.I.-TV方式のデジタルマンモグラフィ¹⁶⁾に関する共同研究(画像評価を担当)がきっかけであった。最初は、画質評価が中心であったが、同氏らが豊田中央研究所と共同開発していた世界的に先駆的なデジタルマンモグラフィCADシステム^{16, 17)}の性能向上を検討するにあたり、解像特性の問題点を解決するためにフィルムをデジタル化したマンモグラフィのCADシステムの基礎研究に着手したことが原点であった。微小石灰化の自動検出の最初の成果は、1993年にベルリンで開催されたCAR'93で報告した⁴⁹⁾。現在では、このマンモグラフィCADシステムはコニカ(現：コニカミノルタエムジー)との共同研究として、商品化を目指して開発を進めている。

マンモグラフィCADプロジェクトでは、多くの技術が開発され、たくさんの論文等が執筆された。また、これによってこれまでに下記の7名の学位授与者が岐阜大学で誕生している。われわれが開発してきたマンモグラフィCADシステム(Fig. 4)の開発技術の一端を、学位論文の内容を示すことによって、ここに紹介する。

松原友子氏(名古屋文理大学)は、適応的な閾値法に基づいた腫瘍陰影の自動検出法を開発した⁵⁰⁾。また、乳房スキンラインの自動抽出法⁵¹⁾、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(4分類)の開発⁵²⁾なども行っている。同氏は、これらの業績を「乳房X線写真における腫瘍陰影の自動検出法とその周辺技術に関する研究」と題して学位論文にまとめ、岐阜大学から工学博士の学位が授与された(2002年3月：論文博士)。その後、同氏はまだ実用化されていないディストーション(構築の乱れ)病変のアルゴリズムを開発中である⁵³⁾。

笠井 聡氏(現：コニカミノルタエムジー)は、背景

濃度に依存した多重解像度処理による類円形信号のコントラスト強調手法を取り入れた腫瘍の検出の向上⁵⁴⁾や、乳腺領域周辺に存在する腫瘍陰影検出に特化したアルゴリズムの開発⁵⁵⁾を行い、また、腫瘍陰影の偽陽性候補の削除処理として、2次統計量を用いた手法⁵⁶⁾、左右乳房の比較による手法⁵⁷⁾、索状影の偽陽性候補を削除する手法⁵⁸⁾を開発した。同氏は、これらの業績を「乳房X線画像における腫瘍陰影の検出と解析に関する研究」と題して学位論文にまとめ、岐阜大学から工学博士の学位が授与された(2002年12月：論文博士)。同氏は現在、マンモグラフィCADを実用化するために企業で活躍中である。

畑中裕司氏(現：国立岐阜工業高等専門学校)は、マンモグラフィの胸壁側⁵⁹⁾や乳腺辺縁領域⁶⁰⁾に存在する欠損腫瘍陰影の自動検出法⁶¹⁾の開発を行い、また、医師のマンモグラム読影自習における乳がん検出とCADシステムの検出結果との比較⁶¹⁾について研究した。同氏は、これらの業績を「乳房X線写真における一部欠損領域のある腫瘍陰影の自動検出システムに関する研究」と題して学位論文にまとめ、岐阜大学から工学博士の学位が授与された(2002年3月：課程博士)。

五藤三樹氏(現：沖縄職業能力開発短大)は、マンモグラフィから乳がんの良悪性を鑑別する診断ロジックのフローチャートを作成し、CAD研究に応用した⁶²⁾。また、腫瘍陰影の良悪性鑑別に重要な因子であるスピキュラの自動抽出アルゴリズムを開発した⁶³⁾。同氏は、これらの業績を「乳房X線写真における腫瘍陰影のコンピュータ解析に関する研究」と題して学位論文にまとめ、岐阜大学から工学博士の学位が授与された(2000年3月：社会人課程博士)。

福岡大輔氏(国立岐阜工業高等専門学校)は、腫瘍陰影の良悪性鑑別システムの開発⁶⁴⁾、医師の読影とCADシステムの検出結果との比較⁶⁵⁾、超音波断層像における腫瘍陰影のCADシステムの開発⁶⁶⁾などについて研究した。同氏は、これらの業績を「超音波画像と乳房X

線画像のためのコンピュータ支援診断システムに関する研究」と題して学位論文にまとめ、岐阜大学から工学博士の学位が授与された(2001年3月: 社会人課程博士)。

平子賢一氏(三洋電機)は、濃度勾配解析に基づく3重リングフィルタによる微小石灰化クラスタの自動検出システムを開発し⁶⁷⁾、その改良などについても研究した⁶⁸⁾。同氏は、これらの業績を「乳房X線画像における微小石灰化病変の自動検出システムの開発」と題して学位論文にまとめ、岐阜大学から工学博士の学位が授与された(2001年3月: 論文博士)。

中川俊明氏(現: 岐阜大学VSL)は、乳房X線写真における胸筋領域自動抽出法⁶⁹⁾、スケッチ画作成支援システムの開発⁷⁰⁾、局所的なパターンマッチングによる画像検索法の開発⁷¹⁾の研究を行った。同氏は、これらの業績を「医用画像におけるコンピュータ支援スケッチ作画と類似画像検索に関する研究」と題して学位論文にまとめ、岐阜大学から工学博士の学位が授与された(2002年3月: 課程博士)。

これらの一連のマンモグラフィCADの開発に関する研究は、国立名古屋病院の遠藤登喜子先生、愛知県がんセンター病院の岩瀬拓士先生(現: 癌研附属病院)、堀田勝平先生をはじめ多くの共同研究者との成果によるものである。

4-2 乳腺三次元画像のCAD

デンスプレストの多い本邦女性の乳房検査では、超音波画像による検査も多くの施設で利用されている。国内外で複数の研究グループが超音波画像のCADを開発している。

われわれの研究室でも、ある地域における検診画像を対象とした乳腺超音波断層画像の腫瘍の自動検出システムの開発を行ってきた^{66, 72)}。また、三次元的なプローブを用いて撮像されたボリューム画像から腫瘍像の良悪性鑑別を三次元処理で実行するシステムの開発も、ソウル大学のムーン先生から画像データをいただいで研究開発を行ってきた⁷³⁾。これらの研究については、上記の福岡氏や原氏が中心に研究を行ってきたが、現在では、CADソフトウェア開発の基礎的な段階は終了し、集団検診用の超音波装置の開発⁷⁴⁾、すなわちハードウェアの開発を待っている状況であるといえる。

5. JSRTとCAD

本学会(JSRT)では、これまで学術委員会や画像分科会²⁹⁾などを中心にCAD研究に力を入れている。土井先生のCADに関係した教育講演をもとにした解説は、1989年の会誌(45巻5号)に、すでに見ることがで

きる。

画像分科会の画像通信Vol.22, No.2(1999年10月発行)に、寄稿「CADに関する研究を進めるための必要条件 - コンピュータプログラミングの特訓セミナーの提案 - (シカゴ大学・土井邦雄教授の執筆)が掲載され、この当時にはCADセミナーの重要性が議論されるようになった。そして、平成11年9月11日に第1回コンピュータ支援診断(CAD)セミナーが、学術委員会・画像分科会の共催企画として広島国際大学で開催された。2003年の9月開催分まで、初級編と中級編を合わせ、12回のセミナーが開催されてきた(約300名が参加)。

2000年の会誌3号(56巻)には、CAD技術論文特集号が企画され、12編の解説や20編の原著論文が掲載されている。このなかにも、土井教授からのCADに関して本会会員に期待する内容の特別寄稿文が収録されている⁷⁵⁾。

CAD技術の開発・研究促進に関連して、画像処理アルゴリズムコンテストも画像分科会で始まっている。最初の募集期間は2000年4月から3カ月間で、表彰は同年の秋季大会時の画像分科会で行われた。これは、現在も継続されている。

CADの開発研究では、画像データベースが重要な役割をするが、本学会からは「標準デジタル画像データベース: 胸部腫瘍陰影像(1995年度開始の学術調査研究班: 白石順二班長らによる制作, 1998年1月より頒布開始)が刊行され、好評である。

診療放射線技師は「画像を作る達人」であるので、CADの開発にとっては医師や理工学系の研究者・技術者とは異なった立場からの重要なポジションにあり、また、CADが臨床で利用されるようになると、その管理などにも大きな役割をしていくことになる予想される。博士課程まで設立され高学歴化しているわが国における放射線技師に対して、今後、CADに関する大きな期待がかかっていると思う。

6. 広がるCAD研究

CAD研究の対象となる診断領域や撮像モダリティは、急速に広がっている。私の研究室では、幅広く各種のCAD研究を行っており、これらは今後さらに拡張していく予定である。特に、現在、上記で説明した以外に進行中のCAD研究テーマは、腹部X線CT画像における大腸ポリープの自動検出⁷⁶⁾、ラクナ梗塞の自動検出を目的とした頭部MRI画像のCADシステムの開発⁷⁷⁾、腹部MRIにおける肝臓病変の自動分類⁷⁸⁾、検診用PET画像におけるがん候補位置の自動検出、眼底写真における血管の異常部位等の自動検出・解析⁷⁹⁾、法医学分野で歯科X線写真における歯の自動同定法の

研究⁸⁰)などである。

X線CT画像における研究では、マルチスライスCTの出現により、高精細・高画質なCT画像が得られるようになり、最近はこの画像を対象として研究を進めている。特に、これまでのCAD研究のアプローチとは異なり、正常構造を正確に自動抽出する視点からの研究を行っている⁸¹)。また、肺気腫の検出・解析に関する研究も着手している⁸²)。さらに、胸部や腹部のCT検査や検診において、目的とする病変以外の検査も同時にできるようなCADシステムを開発する試み(マルチCAD)として⁶)、乳がんの検査や骨粗鬆症検査⁸³)も検討している。

7. まとめ

CADの実用化はまだ始まったばかりであり、その応用分野が急速に広がりつつある現状である。本邦では、これまでCAD研究の大型の予算は皆無であったが、文部科学省の科学研究費補助金の特定研究領域に、2003年度から4年の計画で「多次元医用画像の知的診断支援(代表者:東京農工大学・小畑秀文教授)」が認められている(7億円規模)。CADに対するその期待の大きさがうかがえる。

本講演で紹介したように、本格的なCAD研究はまだ始まったばかりであるといっても過言ではなく、たくさん論文が書ける(本稿で紹介したわれわれの論文は、一部に過ぎません!)すばらしい研究テーマであり(論文賞などの受賞の機会も増えるかもしれない)^{脚注}、研究費も取れる最先端のテーマである。特に、本学会会員の多くの方々には、医療施設のCAD研究にとってはすばらしい環境で日常仕事をしているので、是非とも多くの方々のCAD研究への参画を期待する(Fig. 5参照)。CAD研究には、まず熱きハート(情熱)が大切である!⁸⁴)

上記で紹介した12名の方以外にも、岐阜大学で学位を授与された方がいる⁸⁵)。これらの方々には、小倉敏裕氏(現:群馬県立医療短期大学)、学位論文「新しい医用X線デジタル画像システムの画質とその臨床応用に関する研究(1997年3月:論文博士)」、杜下淳次氏(京都医療技術短期大学)、学位論文「医療用X線画像の



Fig. 5 CADはすばらしい研究テーマである。

画質特性とその応用に関する研究(1997年3月:論文博士)、宮地利明氏(金沢大学医学部保健学科)、学位論文「MRIにおける撮像法および解析法の開発と画質を中心とした諸特性の評価に関する研究(2002年3月:社会人課程博士)」であり、画像評価が中心的な研究課題であった。今後も、多くの方々が続いていくと思われる。なお、15名中の4割に相当する6名の方は、臨床放射線技師免許の保有者である。

著者が2002年度から所属している新設の医学研究科・再生医科学独立専攻内の知能イメージ情報部門では、医科学博士(Medical Science)という新しい学位を授与する。一般学生はもちろん、社会人学生も募集中である。興味ある方は、研究室のホームページ(<http://www.fjt.info.gifu-u.ac.jp/>)を是非ご覧下さい。

謝 辞

本宿題報告の機会を与えていただきました本学会の関係各位に感謝申し上げます。また、原稿の提出が大変遅れたことを深くお詫び申し上げます。

なお、本稿で紹介しました岐阜大学のCADシステムの開発は、あまりに多すぎて個々の氏名を記述できませんが、診療放射線技師の方々には言うに及ばず、医と工の各分野からの非常に多くの方々との共同研究によるものであり、ここにお礼申し上げます。

脚注

1992年から宿題報告を行った2002年(3月)までの10年間に、研究室からのCADに関する出版物は、原著論文73編、国際会議Proceedings 33編、著書7編、解説34編、技術報告24編になる。

参考文献

- 1) 藤田広志: コンピュータ支援診断(CAD)システム(1)基礎. INNERVISION. 16(4), 83-90, (2001).
- 2) 藤田広志: ラジオグラフィにおける画像読影CADシステムの現状. 新医療, 28, 9月号, 46-49, (2001).
- 3) 藤田広志: コンピュータ支援診断(CAD: Computer-aided diagnosis), 特集: ここまで来た医用画像. 映像情報インダストリアル, 34(5), 29-35, (2002).
- 4) 藤田広志: CADにおける最近の動向. JPACS(日本PACS研究会)NEWSLETTER, No.12, 5-6, (2002).
- 5) 藤田広志: コンピュータ支援診断(CAD)の最新情報とその将来. 医学物理, 23 Supplement No.1, 1-24, (2003).
- 6) 藤田広志: 3次元画像を対象としたマルチCAD(コンピュータ支援診断)システムの基礎的研究. 平成13~14年度日本学術振興会科学研究費補助金研究成果報告書, (2003).
- 7) 鳥脇純一郎: 新しい医用画像環境 - 仮想化された人体と映像メディア処理の時代へ -. 新医療, 4月号, 40-45, (1997).
- 8) 鳥脇純一郎, 館野之男, 飯沼 武 編: 医用X線像のコンピュータ診断. シュプリンガー・フェアラーク東京, 東京, (1994).
- 9) 土井邦雄, 他: CAD元年(1998 in USA) - コンピュータ支援診断システム, 21世紀への始動 -. INNERVISION, 14(10), 1-82, (1999).
- 10) 鳥脇純一郎: X線像のコンピュータ支援診断 - 研究動向と課題. 電子情報通信学会論文誌(D-II), J83-D-1K(1), 3-26, (2000).
- 11) 藤田広志, 真田 茂, 石田隆行(エディタ): CAD技術論文特集号, 日放技学誌, 56(3), 317-509, (2000).
- 12) Winsberg F, Elkin M, Marcy J, et al.: Detection of radiographic abnormalities in mammograms by means of optical scanning and computer analysis. Radiology, 89, 211-215(1967).
- 13) Ackerman LV, and Gose E: Breast lesion classification by computer and zeroradiograph. Cancer, 30, 1025-1035(1972).
- 14) Hand W, Semmlow JL, and Ackerman LV: Computer screening of xeromammograms: A technique for defining suspicious areas of the breast. Computer and Biomed Research, 12, 445-460(1979).
- 15) Chan HP, Doi K, Galhotra S, et al.: Image feature analysis and computer-aided diagnosis in digital radiography. 1. Automated detection of microcalcifications in mammography. Med Phys, 14, 538-548(1987).
- 16) 木戸長一郎, 遠藤登喜子, 堀田勝平: 乳癌検診に対するDMR(Digital Mammo-Radiography)の意義. 癌と化学療法, 15, 1665-1670, (1988).
- 17) 遠藤登喜子, 石垣武男, 木戸長一郎, 他: デジタルマンモグラフィによる自動スクリーニング装置の開発[特集: ここまで来たコンピュータ支援診断システムの進歩]. INNERVISION, 8(9), 56-58(1993).
- 18) 藤田広志: マンモグラフィにおけるコンピュータ支援診断(CAD)システムの現状と問題点. 乳癌の臨床, 15(6), 635-646, (2000).
- 19) 長谷川玲: 世界で初めて商品化されたマンモグラフィ用CAD - ImageChecker -. 日放技学誌, 56(3), 355-358, (2000).
- 20) 藤田広志: マンモグラフィCADシステムの現状. Med Imag Tech, 21(1), 27-33, (2003).
- 21) Meyers PH, Nice CM, Becker HC, et al.: Automated computer analysis of radiographic images. Radiology, 83, 1029-1034(1964).
- 22) Becker HC, Nettleton WJ, Meyers PH, et al.: Digital computer determination of a medical diagnostic index directly from chest X-ray images. IEEE Trans BME, 11(3), 67-72(1964).
- 23) 鳥脇純一郎, 福村晃夫, 小池和夫, 他: 胸部X線写真の濃度分布の性質と肋骨境界の自動識別. 医用電子と生体工学, 5(3), 182-191, (1967).
- 24) 内田 勝(監修), 藤田広志・小寺吉衛(編集): デジタル放射線画像. p.161-164, オーム社, 東京, (1998).
- 25) 仁木 登: 肺癌CT検診支援システム. 日放技学誌, 56(3), 337-340, (2000).
- 26) 山本真司: 肺がん検診の読影支援システム. 新医療, 28, 9月号, 50-53, (2001).
- 27) Fujita H, Doi K, Fencil LE, et al.: Image feature analysis and computer-aided diagnosis in digital radiography. 2. Computerized determination of vessel sizes in digital subtraction angiography. Med Phys, 14(4), 549-556(1987).
- 28) 藤田広志: 研究今昔 第1回: 私の恩師と愛弟子の研究雑感. 医画情誌, 20(1), 2, (2003).
- 29) 藤田広志: 画像分科会を振り返る. 画像通信, 26(1), 40-42, (2003).
- 30) Fujita H, Tsai DY, Itho T, et al.: A simple method for determining the modulation transfer function in digital radiography. IEEE Trans on Med Imag, 11(1), 34-39(1992).
- 31) 藤田広志: ニューラルネットワークとその医用画像解析への応用. 医画情誌, 10(1), 22-37, (1993).
- 32) Fujita H, Katafuchi T, Uehara T, et al.: Application of artificial neural network to computer-aided diagnosis of coronary artery disease in myocardial SPECT bull's-eye images. J Nucl Med, 33(2), 272-276(1992).
- 33) 片淵哲朗, 藤田広志, 植原敏勇, 他: 複数ニューラルネットワークを用いた心臓核医学のためのコンピュータ診断支援システムの開発. 電子情報通信学会論文誌D-II, J76-D-1K(11), 2436-2439, (1993).
- 34) 藤田広志, 石田隆行, 山下一也, 他: 骨X線写真における骨梁パターンのニューラルネットワーク解析. 医用電子と生体工学, 30(4), 297-300, (1992).
- 35) 芦田 修, 藤田広志, 石田隆行, 他: ニューラルネットワークによる骨粗鬆症診断のためのX線骨梁像の解析. 医画情誌, 10(3), 111-118, (1993). [平成6年6月, 医用画像情報学会内田論文賞受賞].
- 36) 藤田広志, 堀田勝平, 遠藤登喜子, 他: ニューラルネットワークによるマンモグラフィ腫瘤陰影の良悪性の判別. Med Imag Tech, 10(2), 126-129, (1992).
- 37) 片淵哲朗, 藤田広志, 植原敏勇, 他: 心臓核医学におけるコンピュータ支援診断システムの構築 - 複数ニューラルネットワークによる虚血性心疾患のエキスパートシステムの開発 -. 医用電子と生体工学, 39(1), 15-23, (2001). [平成15年6月, 日本エム・イー学会論文賞・阪本賞受賞].
- 38) Fujita H: Part G: Neural Networks in Practice: Case Studies, G5.2 Neural networks for diagnosis of myocardial disease, in Handbook of Neural Computation(分担執筆) Editors in Chief Fiesler E and Beale R, G5.2:1-G5.2:6, A joint publi-

- cation of Institute of Physics Publishing Ltd and Oxford University Press.(1996)
- 39)片瀨哲朗, 浅居喜代治, 藤田広志: ファジィ推論における非ファジィ化の検討 - 新しい非ファジィ化法の提案 - . 医画情誌, 18(1), 19-30, (2001). [平成14年6月, 医用画像情報学会内田論文賞受賞].
- 40)片瀨哲朗, 浅居喜代治, 藤田広志: ファジィ推論における非ファジィ化の検討 - 密度モーメント法を用いた医療支援診断への応用 - . 医画情誌, 18(1), 31-38, (2001). [平成14年6月, 医用画像情報学会内田論文賞受賞].
- 41)原 武史, 藤田広志: 遺伝的アルゴリズムによる濃淡画像のテンプレートマッチング. 電子情報通信学会論文誌, J78-D-I(2), 385-388, (1995).
- 42)原 武史, 藤田広志, 吉村 仁, 他: 胸部X線写真における結節状陰影の自動検出 - 遺伝的アルゴリズムの適用 - . Med Imag Tech, 15(1), 73-81, (1997).
- 43)原 武史, 藤田広志, 津坂昌利, 他: 胸部X線CT画像のスライス面の自動分類 - 遺伝的アルゴリズムを用いた方法 - . 医画情誌, 11(3), 91-95, (1994).
- 44) Lee Y, Hara T, Fujita H, et al.: Automated detection of pulmonary nodules in helical CT images based on an improved template-matching technique. IEEE Trans on Med Imag, 20(7), 595-604(2001)
- 45)李 鎔範, 中川俊明, 原 武史, 他: 高次局所自己相関特徴を用いた胸部X線CT画像上の腫瘍陰影の自動検出. 医画情誌, 18(3), 135-143, (2001). [平成14年6月, 医用画像情報学会金森奨励賞受賞].
- 46)津坂昌利, 藤田広志, 宇野光雄, 他: 胸部X線CT画像における縦隔リンパ節の自動検出アルゴリズムの開発. 医用電子と生体工学, 36(4), 343-350, (1998).
- 47)加野亜紀子, 池添潤平, 安原美文, 他: 胸部集団検診X線画像を対象とした経時差分処理における新しい自動重ね合わせ法. 電子情報通信学会論文誌D-II, J83-D-I(1), 263-270, (2000).
- 48)加野亜紀子, 藤田広志: 胸部経時差分技術における肋骨偽画像の除去処理法の検討. 日放技学誌, 56(3), 503-506, (2000).
- 49)藤田広志: CAR '93 in Berlin に参加して. CADM News Letter, No.6, 10, (1993).
- 50)松原友子, 藤田広志, 遠藤登喜子, 他: 乳房X線写真における腫瘍陰影検出のためのしきい値法に基づく高速処理アルゴリズムの開発. Med Imag Tech, 15(1), 1-13, (1997).
- 51)松原友子, 原 武史, 藤田広志, 他: マンモグラムCADシステムにおける乳房スキンラインの自動抽出処理. 日放技学誌, 56(3), 480-485, (2000).
- 52)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).
- 53) Matsubara T, Ichikawa T, Hara T, et al.: Automated detection methods for architectural distortions around skinline and within mammary gland on mammograms. Proc of CARS 2003, International Congress Series 1256, 950-955(2003)
- 54)笠井 聡, 梶 大介, 加野亜紀子, 他: 背景濃度に依存した多重解像度処理による類円型信号の強調手法. 電子情報通信学会論文誌D-II, J86-D-I(1), 156-159, (2003).
- 55)笠井 聡, 松原友子, 原 武史, 他: マンモグラム上の乳腺領域周辺に存在する腫瘍陰影検出に特化したアルゴリズムの開発. 医用電子と生体工学, 38(2), 111-117, (2000).
- 56)大塚 修, 笠井 聡, 畑中裕司, 他: 2次統計量を用いたマンモグラムCADシステムにおける腫瘍陰影の偽陽性候補の削除. 医画情誌, 18(1), 13-19, (1999).
- 57)笠井 聡, 藤田広志, 原 武史, 他: 腫瘍陰影自動検出アルゴリズムにおける左右乳房画像の比較による偽陽性候補の削除. Med Imag Tech, 16(6), 655-666, (1998). [平成11年7月, 日本医用画像工学会論文賞受賞].
- 58)笠井 聡, 藤田広志, 原 武史, 他: マンモグラム上の腫瘍陰影自動検出アルゴリズムにおける索状影の偽陽性候補の削除. コンピュータ支援画像診断学会論文誌(インターネット上), 3(2), 1-7, (1999). <http://www.toriwaki.nuie.nagoya-u.ac.jp/cadm/Journal/index.html>
- 59) Hatanaka Y, Hara T, Fujita H, et al.: Development of an automated method for detecting mammographic masses with a partial loss of region. IEEE Trans on Med Imag, 20(12), 1209-1214, (2001)
- 60) Hatanaka Y, Hara T, Fujita T, et al.: An automated detection method of mammographic masses existing around thick-mammary-gland and near chest-wall regions. Proc of the 15th International Congress and Exhibition CARS 2001(Computer Assisted Radiology and Surgery), 527-532, Elsevier Science, (2001)
- 61)畑中裕司, 松原友子, 原 武史, 他: 医師のマンモグラム読影自習における乳がんCADシステムの検出結果との関係. 日放技学誌, 58(3), 375-382, (2002).
- 62)五藤三樹, 遠藤登喜子, 藤田広志: マンモグラム上の腫瘍陰影の良・悪性鑑別について. 医画情誌, 15(1), 27-35, (1998). [平成11年6月, 医用画像情報学会内田論文賞受賞].
- 63)五藤三樹, 森川聡久, 藤田広志, 他: 乳房X線写真におけるスピキュラ自動検出のための多段型振り子フィルタの開発. 医用電子と生体工学, 37(2), 171-177, (1999).
- 64)福岡大輔, 原 武史, 藤田広志, 他: 乳房X線写真における腫瘍良悪性鑑別システムの開発. 医用電子と生体工学, 39(1), 24-29, (2001).
- 65)福岡大輔, 原 武史, 遠藤登喜子, 他: 乳房X線写真における医師の読影とCADシステムの検出結果との比較. 日放技学誌, 56(3), 436-442, (2000).
- 66)福岡大輔, 原 武史, 藤田広志, 他: 初期輪郭の自動生成と制御点の統合を含んだ動的領域輪郭抽出法. 電子情報通信学会論文誌D-II, J81-D-I(6), 1448-1451, (1998).
- 67)平子賢一, 藤田広志, 原 武史, 他: 乳房X線写真における微小石灰化検出フィルタの開発 - 濃度勾配と3重リングフィルタ解析に基づく方法 - . 電子情報通信学会論文誌D-II, J78-D-I(9), 1334-1345, (1995).
- 68)平子賢一, 藤田広志, 原 武史, 他: コントラスト補正処理と可変リングフィルタ解析を導入した微小石灰化クラスタ検出法. Med Imag Tech, 14(6), 665-679, (1996). [平成9年7月, 日本医用画像工学会論文賞受賞].
- 69)中川俊明, 笠井 聡, 原 武史, 他: 乳房X線写真における胸筋領域自動抽出法. 医画情誌, 18(1), 39-45, (2001).
- 70)中川俊明, 原 武史, 藤田広志, 他: 乳房X線写真のスケッチ画作成支援システムの開発. 医用電子と生体工学, 39

- (4), 297-304, (2001).
- 71) 中川俊明, 原 武史, 藤田広志: 局所的なパターンマッチングによる画像検索法. 電子情報通信学会論文誌D-II, J85-D-II(1), 149-152, (2002).
- 72) 福岡大輔, 原 武史, 藤田広志, 他: 乳房超音波断層像における腫瘍像の自動検出法. 医画情誌, 14(3), 148-154, (1997). [平成11年6月, 医用画像情報学会金森奨励賞受賞].
- 73) Fujita H, Endo T, Hara T, et al.: Computer-aided detection and diagnosis in breast imaging. Proc of the first Seoul International Workshop for computer aided diagnosis, 1-16, (2003).
- 74) 松中敏行: 乳腺超音波. CADM NewsLetter, No.38, 8-9, (2003).
- 75) 土井邦雄: CADの現状と今後の進展 - CAD特訓セミナーの提案と日本放射線技術学会会員への期待 -. 日放技学誌, 5(3), 318-320, (2000).
- 76) 久山慶子, 福岡大輔, 原 武史, 他: 複素PARCOR係数による凹領域の認識と腹部X線CT像における大腸ポリープ像の自動検出への応用. 電子情報通信学会技術研究報告(2003-1), MI2002-112, 1-4, (2003).
- 77) 横山龍二郎, 李 鎔範, 原 武史, 他: 脳MR画像におけるラクナ梗塞領域の自動検出. 日放技学誌, 5(3), 399-405, (2002).
- 78) Zhang X, Kanematsu M, Fujita H, et al.: Computer-aided differentiation of focal liver disease in MR imaging. Proc of CARS 2003, International Congress Series 1256, 1063-1069, (2003).
- 79) 陸 苗, 畑中裕司, 月山佳大, 他: Automatic distribution and shape analysis of blood vessels on retinal images. 電子情報通信学会技術研究報告(2003-1), MI2002-126, 83-86, (2003).
- 80) 小川真史, 中川俊明, 原 武史, 他: 高次局所自己相関特徴を用いた歯科X線写真の類似判定法. 医画情誌, 1(2), 80-85, (2002).
- 81) Zhou X, Kobayashi S, Hayashi T, et al.: Lung structure recognition: A further study of thoracic organ recognitions based on CT images, Proc of CARS 2003, International Congress Series 1256, 1025-1030, (2003).
- 82) Hara T, Yamamoto A, Zhou X, et al.: Automated volume measurements of pulmonary emphysema on 3-D chest CT images. Proc of CARS 2003, International Congress Series 1256, 1043-1048, (2003).
- 83) 西原貞光, 小池正紘, 上田克彦, 他: X線CT装置における椎体部平均CT値の装置内変動と装置間変動. 医画情誌, 20(1), 40-43, (2003).
- 84) 藤田広志: CADの研究を始めるために必要な基礎知識. 日放技学誌, 5(11), 1303-1309, (2001).
- 85) 片渚哲朗, 塚超伸介, 宮地利明, 他: 新春座談会: 社会人としての大学院 - 職場と大学 -, 日放技学誌, 5(1), 1-13, (2002).