

人体内部の計測と診断

鳥脇 純一郎

本文では、主に医学において人体を「みる」ために用いられる技術とそれに関連する話題（いわゆる医用画像処理）のあらましを解説したものである。始めに、主な医用画像を、それらの歴史的経緯も含めて紹介する。次に、医用画像処理の分野の最近の話題の中から、画像に対するコンピュータ支援診断（computer aided diagnosis CAD）、仮想化された人体と仮想化内視鏡システム、および、コンピュータ外科（computer aided surgery CAS）における CV 応用をとりあげ、概要を説明する。最近のサーベイ論文と学術誌特集号のリストを添える。

Measurement and Diagnosis of the Inside of the Human Body

Junichiro Toriwaki

This article introduces the computer vision applications to seeing the inside of the human body. That is, it provides a brief introduction of recent topics in medical image processing. First a list of major images presently used for diagnosis and treatment is given with short comments on historical process of development. Then three topics, computer aided diagnosis (CAD) of medical images, virtualized human body and virtual endoscopy, and image processing in computer aided surgery are explained with the stress on applications of computer vision technologies.

1 まえがき

人体の内部を「みる」ことは、現在の医学では必要不可欠の作業であり、それだけに珍しいことではない。しかし、「みる」ために人体に損傷を与えることは許されないから、かなり特殊な技術を要し、また、それが許されるのは通常は医師や X 線技師に限られる。その点で、本稿で扱う CV は本特集テーマの他の分野と比べると専門性の強い、やや特殊な領域であろう。しかし、人体は元々我々自身のことであり、一旦図として記録されたならば、容易に「みる」ことができるものである。例えば、理科や生物学、さらには解剖学を学ぶ際のテキストや教材の図、人体標本などである。

本文では、主に医学において人体を「みる」ために用いられる技術とそれに関連する話題のあらましを解説したものである。始めに、主な医用画像を、それらの歴史的経緯も含めて紹介する。次に、医用画像処理の分野の最近の話題の中から、画像に対するコンピュータ支援診断（computer aided diagnosis CAD）、仮想化された人体と仮想化内視鏡システム、および、コンピュータ外科（computer aided surgery CAS）における CV 応用をとりあげ、概要を説明す

る。ただし、紙数も時間も制約されているため、個々の技術や手法の詳細はそれぞれの論文に譲り、論文には余り書かれることのない歴史的経緯や各種手法の背景にある考え方をやや多めに入れてある。なお、文献欄には関連する分野のサーベイ、および、雑誌特集号をまとめて、個別手法の詳細を知る際の便宜に供した。

2 医用画像のあらまし

—人体を「みる」技術

2.1 医用画像の種類と例

始めに現在多少とも用いられている医用画像の例を図 1 にまとめておこう。いうまでもなく、それらは何らかの意味で人体を「みる」ために用いられることを意図して開発されてきた。それらの目的を要約すれば、

- (1) 人体内部がどのようなになっているか、
および、
- (2) 人体内部で何が起きているか、
を知ることである。さらに、そのために、
 - (a) 極力人体に損傷を与えない（無侵襲という）
ことが要求される。さらに、

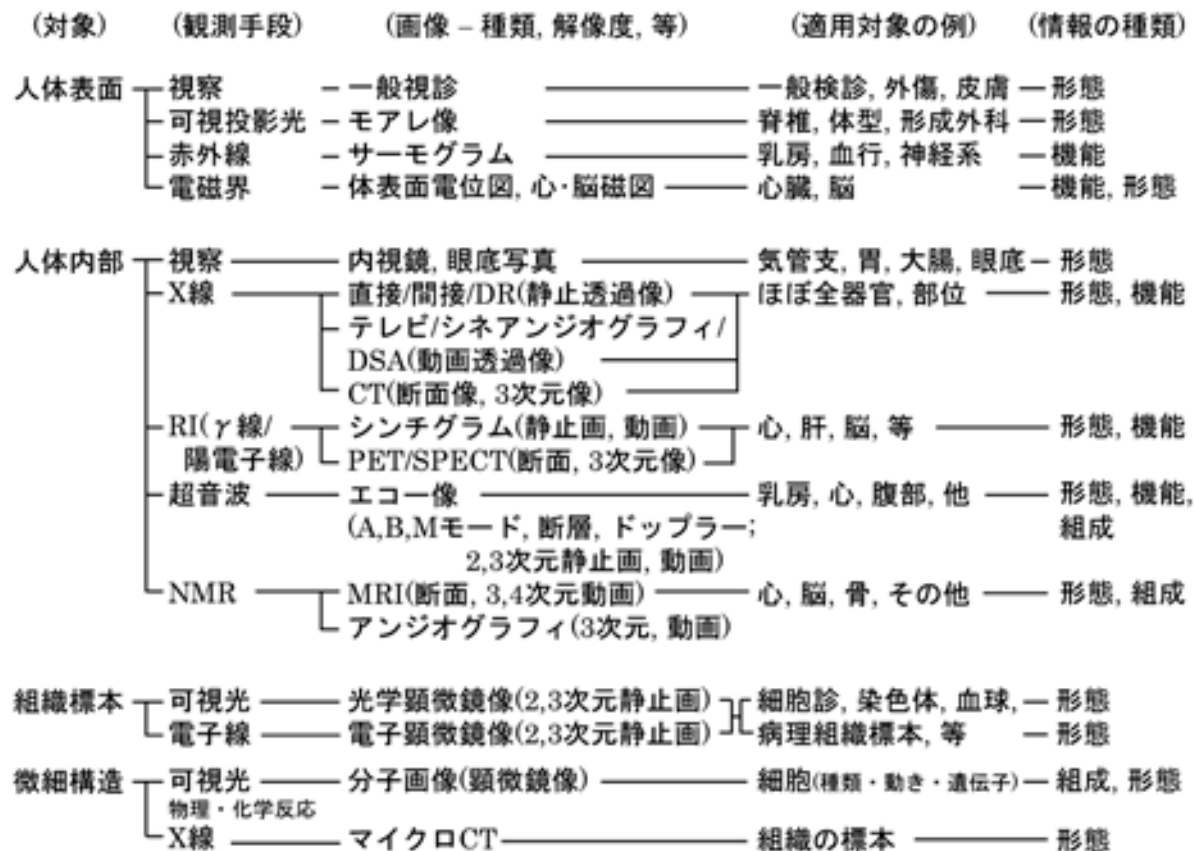


図 1 医用画像の例 .

(b) できるだけ「ありのままの状態 (自然な状態) でみる (in vivo という)」

ことが望ましい。実際には、(a)、(b) を完全に満たすことは非常に難しく、この意味での不十分さの許される度合いは、画像のもたらす情報との兼ね合いで定まる。

なお、厳密に言えば、医用画像には、

- (i) 見た結果を記録した画像 (ハードコピー)
- (ii) 医師が目の前に見ているリアルタイムの映像 (人体のシーン)

が区別されずに含まれている。さらに、医師や医療関係者が診療目的に利用する以外にも、例えば、

- (iii) 人体内部の構造を理解するための説明図 (解剖図、標本、など)

も人体内部を「みる」と言う意味での CV ツールには含まれてくるかもしれない。

ところで、これらを用いる目的は、診断と治療、すなわち、人体の何らかの不具合を発見し、それを極力取り除く (あるいは修復する) ことである。そ

の意味では、みる画像は個々の具体的な人体に対応するものでなくてはならない。すなわち、医用画像は原則としてひとりひとりの人を見るものである。なお、上記 (1)、(2) に役立つためには画像でなくてもよい。例えば、少数個の数値の組でも役立つものもある。従って、画像を用いるのは、それが最も豊富な情報をもつからであろう。しかし、一方では数字のみの組では人が扱い難い (あるいは、直接には知覚し難い) 面も少なくないため、これを解消するために画像化することもある。この両面のバランスで現在の医用画像があり、また、<数値データ 画像化>、および、<画像そのものの取得>の両面において CV が活用されていると考える。

ところで、図 1 のように多様な画像が存在するのは、それぞれに他の画像には無い独自の特徴があるためである。例えば、①情報の内容、②解像度、③患者・被験者の負担、④扱い易さ、あるいは利用に必要な熟練度、⑤コスト、⑥臓器、疾患の適応、などの各側面においてそれぞれの特色がある。CV の活用をはかるとすれば、これらのどの点に寄与する

か、を常に考えておかななくてはならない。

2.2 「人を見る」技術としての医用画像の歴史

人体内部をみる（知る）ことは古くからの願望であったと思われる。レオナルド・ダ・ビンチは既に多数の人体スケッチを残しているが、内容的には真の姿とは程遠い [Constantino93]。

レントゲンの X 線発見（1895 年）は、外科的損傷なしに人体内部を「みる」手段を初めて手にしたという意味で、「人を見る」技術の上でも画期的できごとであった [館野 01]。これが、長時間のメカニカル・スキャンや解像度などに限界のあるフライング・スポット・スキャナを経由せずに直接にデジタル化できたのはそのおよそ 100 年後、1980 年代のわが国の富士フイルム社のコンピューテッド・ラジオグラフィによる [医用画像 05]。

1972 年の CT (computed tomography) の登場は、人体内部の各点の特性値（X 線減弱係数）を直接に計測することへの道を開いたことで、“人を見る”技術としても画期的な発明であった。もっとも、投影像の範囲ではあってもデジタル画像という点では RI 画像（シンチグラム）が既にあった。しかし、空間解像度には限界があった。

CT は技術的にも急速に発展し、現在では 0.1mm 間隔の等方性解像度で人体を記録するというのも難しくはない。もっとも診療に日常的に使い得るかどうかは、前述の①～⑥の諸要因のトレード・オフで決まってくる。

90 年代の 3 次元 CT の進歩によって、0.1mm きざみの人体をボクセル構造データ（3D 画像）として記録できるようになった。これを利用して個々の人体を仮想環境としてコンピュータ内に構成し、その中を自由に移動しつつ観察（診断）するという利用（ナビゲーション診断 [鳥脇 97]）が考えられるようになったことは、新しい次のステップとして注目に値する。

一方、マイクロ CT によって空間解像度 10μ オーダーで同様の 3 次元データを取得できる可能性も出てきた [Ochs04, Wehrli03]。また、0.5mm オーダーの解像度で 1 秒間隔の 3 次元動画を記録できる可能性も見えている。これらによって、再び従来にはなかったレベルで人を見ることも十分に考えられる。

もう 1 つ見逃せない点は、上記の 3D 画像を、全身像としてみる可能性である。従来は診療で直接対象とする部位を限定して「みて」いたが（現在でも

大半はそうであるが）、それは、技術的限界と前記、利害得失の観点から自然な結果である。しかし、最近では次第に全身を「みる」ケースに拡張されてきている [佐藤 05, 周 05, 朝日 04]。

医用イメージング技術の発展の経過は技術の進歩の歴史としても非常に興味深い。例えば CT の原理は Radon の断面定理（1917 年）にあったが、計算機が使えるまで実現されることはなかった。人体の断面を見る方式のアイデアは国内でも、梅垣洋一郎（1958 年）や高橋信次（1951 年）によって現在の CT の実現の前 1950 年代から出されていたが [医用画像 05]、当時の技術環境の制約で発想自体が今のものとは違っている。実際、レントゲンの X 線も、写真の発明（ダゲールら、1840 年代） [バジャック 03] がなければ、その存在の立証は難しかったであろう。また、レントゲン写真の時代は、“見える”ことに重点があったが、CT は「人体内部の計測」を明確に意識している。人体をみる技術の歴史については、例えば [医用画像 05, 館野 01]などを参照。[館野 01] ではレントゲンの発見をはじめ重要論文の原典の邦訳が読める。[医用画像 05] には詳細な年表がある。[Ritman03] には CT 関連装置の発展史がダーウィンの進化論になぞらえて論評されている。

2.3 解剖図

医用画像で上記に入れてない種類として、解剖図がある。これは、個々の人体をみるというよりは、人体の構造の記録であるが、多数の人が人体の内部構造を知るために、人体内部を「みる」方法を提供するものである。

当初の解剖図はスケッチであり、前出のレオナルド・ダ・ビンチの図が有名である [Constantino93]。[養老 93] には色々の時代の解剖図が紹介されている。[荒俣 91] をみると人体を「みる」（「みせる」）様々の工夫があったことが感じられる。実際、近年に至るまで解剖学の専門書は、[Netter90] に代表されるように、手書きイラストレーションが主流であった。しかし、さらに最近になると、ここでも仮想化された人体（後述）の活用がみられる [Hoehne92]。また、プラストミック標本の発明で実体標本の優れた保存法が確立し、利用しやすい様々の展示が可能になった [人体 04]。この場合には、3 次元形状を崩さずに 3 次元物体の内部構造と外形をどうやって見せるか、に様々の興味深い工夫がみられる [人体 04]。

3 最近の課題から (1) — 診断支援

3.1 診断支援の形

診断支援は、本特集テーマに即して言えば、人を「診る」CVである。すなわち、入力された画像からそこに記録されている人体に関する診断に役立つ情報を抽出して医師に提示する操作である。出力情報の種類と提示の仕方には様々の形があるが、途中のプロセスでは数値的な結果が出されている。その値をそのまま出力するか、再び画像化するかは個々のシステムによる。主な例として以下のものがある。

- (i) 分類・診断名を出力する。それぞれの可能性を表す数値を伴うこともある [コンピュータ分類]
- (ii) 異常を疑われる陰影をマークする [マーキング]
- (iii) 計測値を出力する。判断や分類に関する情報を強いてつけることはない [画像計測]
- (iv) 臓器などのセグメンテーションの結果を出力する [画像セグメンテーション]
- (v) データの提示を目的とした画像を生成し、表示する [画像表示]
- (vi) 同一対象人体を異なるイメージング法で記録した画像間の対応関係を定める [レジストレーション、位置合わせ]
- (vii) 同一人体の時系列画像から経時変化情報を検出し、定量化する [時系列画像処理]

(v) を診断支援に含めたのは、前述の通り 3D 画像の利用はこれ無しにはほとんど不可能であると考えたためである。また、逆に (iv) はすべての処理において、コンピュータで実現するために役立つ。

この中で、自動診断とかコンピュータ診断という言い方は最近ではあまり使っていない。それは現在のコンピュータでは能力の不足によってまだ人間の医師なみの能力が実現できるのは難しい、という理解があると同時に、最終的な診断は人間の医師以外には許されない、という面もあるためであろう。そこで、本文では、これらを総称して診断支援と呼んでおく。

3.2 診断支援の発展の経緯

歴史的にみると、X線像のマーキングとコンピュータ分類の最初の発表は [鳥脇 67a, 鳥脇 67b, 鳥脇 67c] であった (図 2)。この中で [鳥脇 67b] は今で言う正常構造の識別、腫瘍影の検出が [鳥脇 67c, 鳥脇 70] である。しかし、それらは画像パターン認識の一部

として扱われ、一定量の研究は地道に続けられたものの、全体としては研究は少なかった。この間、国内では厚生省がん研究助成金研究班の1つ(通称梅垣班、1968年頃から始まり、現在も続いている)の功績が大きい [飯沼 01]。また、1991年からコンピュータ支援画像診断学会が発足、ほぼ同じ頃電子情報通信学会医用画像研究会も発足し、さらには、2003年より文部科学省科学研究費特定領域研究「多次元医用画像の知的診断支援」が開始されて極めて活発な研究が行われている [小畑 04]。なお、1990年頃までの研究成果は [鳥脇 94] に詳しく述べられている。

1998年にアメリカにおいて、FDA (Food and Drug Administration 食品衛生局) の認可を得た CAD システム商用機が登場したとき、同時に『CAD = コンピュータ (医用画像を処理するソフトウェアも含めて) もツールの1つとして用いて、その結果も参照しつつ医師が診断を行う』ことを、計算機支援診断 (computer aided (assisted) diagnosis CAD) と呼んだ。また、この認可取得にあたって、(対象は乳房X線像 (マンモグラム) からの乳がんの診断であったが)、数千例の症例 X 線写真と何人かの医師による読影実験を行い、CAD を用いた医師の診断結果はそれを用いなかった医師の結果よりも有意に向上することを示した [特集 04a, 土井 04]。以来、医用画像処理における CAD という言葉はこの意味で用いられることが多い。また、診断能力の評価尺度として ROC 曲線 (Receiver operating characteristic curve) を用いることが定着した [特集 04a, 特集 04b]。

この頃から以後、CAD は常に実用機、商用機を視野に入れた研究が行われる時代になった。実際、国内においてもマンモグラム (乳がん検診)、CT による肺がん検診については世界的に最高レベルの成果をあげつつある。CT を用いた肺がん早期発見のシステムは日本が最初に提唱したものである [特集 04a, 特集 04b, 山本 93]。なお、個々の研究発表に関しては既にいくつかのサーベイや学術誌特集号が出ているので、本稿では割愛する [文献欄特集号およびサーベイの項を参照]

ここでは、最近数年の発展で注目すべき点を思いつくままにあげておこう。言うまでもなくこれらの最大の要因の1つはコンピュータ技術の急速な進歩である。

- (1) 3次元画像の普及: とくに、等方性解像度 (約 0.1mm) のデジタル画像も珍しくない。しかし、

- 1967：胸部X線写真のパターン認識に関する論文発表（鳥脇・福村ら）
- 1968～現在：厚生省がん研究助成金研究班
“がん診断治療への医用情報処理の応用”～“がんの自動診断のためのソフトウェアシステムの開発に関する研究”～“デジタル画像を利用した診断支援システムの開発と利用に関する研究”
- 1991：コンピュータ支援画像診断学会（CADM）発足
- 1993.12：virtual colonoscopy（Viningら U.S.A）
- 1994.6：仮想化内視鏡システム（森・鳥脇・片田ら）
- 1998：初の商用CAD装置登場（CAD元年）（R2社 U.S.A）
- 1998：The 1st International Workshop on Computer Aided Diagnosis（U.S.A）
- 2003：文部科学省科学研究費特定領域研究“知的医用画像診断”（代表小畑秀文）

図 2 CAD の発展の経過 .

スライス内とスライス間で解像度が異なる（通常はスライス間が広い）画像も少なくないため、対応策は必要である。これは可視化と画像解析双方の一層高度の手法が要求される [鳥脇 02c]。

(2) この結果として、人体（あるいはその一部）の仮想化（仮想化された人体 virtualized human body VHB）の利用とナビゲーション診断という考え方が出てきた。仮想化内視鏡システムはその一例である [鳥脇 04a, 鳥脇 04b]。

(3) 実用システムとしての CAD の考え方が明確にされ、これに基づく商用 CAD の装置がアメリカで登場した（1998）。これによって、実用化の1つの方向が共通認識として形成されつつある。前項も参照。

(4) 例えばサブトラクション（画像間差分）のように技術的には必ずしも新しいものではないが、実用機として改めて製品化されるケースもいくつか出ている。

(5) ナノオーダー、ミクロンオーダーの空間解像度のイメージングも利用され始めている。これはイメージング技術の発展によるが、がんの発見法としても期待されている [Ochs04, Wehrli03, 佐藤 04]。

(6) 複数臓器の同時抽出の研究も始めている。特定領域研究の多臓器疾病横断型 CAD の成果であろう [周 05, 佐藤 05, 北坂 05]。

3.3 科学研究費特定領域研究「多次元医用画像の知的診断支援」

標記の特定領域研究（代表小畑秀文）が2003年10月から開始された。以下に計画班の研究項目を

あげておく [小畑 04]。本文 3.1 節であげた分野における主要な研究テーマはおおむね網羅されている。

- [1] 人体内部構造の3次元モデリング
 - 1-1 多次元医用画像からの複数臓器構造同時抽出
 - 1-2 人体臓器構造知的モデリング
- [2] CAD の臓器・疾病構断型化と高度化
 - 2-1 解剖学的分類に基づく知的 CAD
 - 2-2 局所病理 - 形態理解に基づく知的 CAD
 - 2-3 正常構造の理解に基づく知的 CAD
 - 2-4 時系列病理形態理解に基づく知的 CAD
- [3] 可視化と実時間検査支援
 - 3-1 知的 CAD としてのナビゲーション診断システムの開発
- [4] モダリティ融合 CAD の開発
 - 4-1 知的 CAD のための複数モダリティ画像統合とデータベースの開発
- [5] CAD の基盤技術
 - 5-1 CAD のための医用画像の画質評価と被曝線量評価

この特定領域研究の底流となっているテーマをひとくちに言えば、「人を診る」手法とシステムである。現在のところ、従来のCVやパターン認識（PR）の手法として知られているものの適用が多い。しかし、それらが提案された1960～70年代には全く想定されていなかった厳しい条件下で有効性を試されている。例えば、

- (1) 特徴選択において、数千個の特徴量から数10個の最良のものを選択する。
- (2) 512³画素の3次元画像が0.1～0.2秒間隔で

生じるのを転送蓄積し、できればリアルタイムで処理する(心臓 3DCT 像など)。

(3) 512 × 512 × 200 画素の 3 次元 CT 像(全身像)と PET 像をリアルタイムで位置合わせする。

(4) 生体組織の相当の大きさの試料を $0.1\mu^3$ の解像度で 3 次元画像化し、必要な処理を行う。

(5) と同じ程度のスケールの画像数百例を、少なくとも主要臓器のセグメンテーションを行い、臓器モデルを自動構築する。

他方では、可変形状モデルの利用やレベルセット法などの計算量の大きい複雑な手法も頻繁に使われている。また、3 次元画像の処理も普通に行われている。

現時点では、これらの中にはイメージング技術の限界によって現実の要求とは必ずしもなっていないものもあるが、ここ 1, 2 年のうちに現実のものとなるであろう。

3.4 CAD ツールの分化

前節のような機能のある程度のレベルのものが実現できたでしょう。それは、文字通り病気の診断を支援するために使われるであろうが、やがてその使われ方は多様化されるであろう。例えば、電子機器デジタル化技術の発展を考えれば、携帯電話でもできるようにもなるであろうし、家庭でも可能なレベルにもなる。また、3D 画像でさえ、個々の被験者が自分のものを持つことも珍しくはなくなるであろう。そうなれば、医師のみでなく、看護師や検査技師、あるいは、一般人も診断支援ツールのユーザには入ってくる。この点を考えるならば、「人を診る CV 技術」の点からは、医師の診断のタイプを規定する意味での CAD (コンピュータ支援診断) に対して、CV 技術の応用は CAD のためのツール(以下 CAD ツールと書く)と考えた方がよい。

CAD と CAD ツールには、そのユーザ、あるいは、使われ方からみて次のような種類が考えられよう [鳥脇 02a]。

(a) 専用 CAD (または CAD ツール)

対象と目的を明確に限定した CAD ツール。例えば、肺がんスクリーニングに用いる 3 次元 CT 画像対象の CAD ツール、あるいは、乳がんスクリーニングのための乳房 X 線写真(マンモグラム)の CAD ツール、など。

(b) 汎用 CAD (または CAD ツール)

対象の病気や部位を特に仮定せずに異常(もしくは

はその疑い)があれば発見し、指示するための CAD (または CAD ツール)。例えば初診時の診断、がんの転移疑いの有無の判定、などに使うツールが相当しよう。

(c) 日常 CAD (または CAD ツール)

開業医が専門外の分野を扱う場合、一般人が健康管理に使う場合などの CAD ツール。

例えば、現在の職場の定期健康診断に組入れられている心電図検査や血液検査にはコンピュータによる判定のコメントやマークがついている。心電図の波形処理は 1960-70 年代には ME (医用電子工学) や医療情報学における主要研究テーマの 1 つであり、波形パターン認識の技術が応用されていた。現在の 3DX 線 CT 像や X 線写真の CAD も同様の時代がくることは確実であろう。これがさらに進めば、血圧計や体温計のように、一般人達が気軽に使う(CV 技術の入った)CAD ツールが実現されるかもしれない。実際、がん検診は既にコンビニからフォームを送って依頼できる(フォームはキオスクにもある)。もちろん、診断はまだ医師に依っている(と筆者は考えているが)。ここに画像のマーキング機能を入れることは、あながち夢想ではない。

一方、汎用 CAD ツールはこれよりはるかに難しい問題であるが、高精細の 3DCT には元々膨大な情報が含まれていて医師が限られた時間内にそのすべてを把握するのは容易でないこと、普通は希な感染症が突然発症したような場合、などにこれから重要になってこよう。前述の科研費特定領域研究において臓器・疾病横断型と言っているのはここに属する。

4 最近の話題から (2) -仮想化された人体とナビゲーション

4.1 仮想化された人体

仮想化された人体 (virtualized human body virtual human body VHB) とは、「人体(またはその一部)を計測し、コンピュータ内部に再構成したものである。それは、外形のみでなく、内部構造も含めて、3 次元物体としての人体をおよそ 0.1mm の解像度で再現する(3 次元デジタル画像の生成)。しかし、計測の結果であるから、そこで用いた計測法の性質で仮想化された人体の物理的意味が変わる。その意味では VHB は観察法依存である。また、VHB は個別人体の全情報を持つという意味で個別人体のモデルであり、それ故に診療に使える。同時

に、それは、コンピュータ上のデータである（仮想の存在である）から、物理的制約なしに操作できる。ここから、自由な観察、内部の移動、変形、手術シミュレーション、記録メディアとしての利用、などの様々の応用が考えられる [鳥脇 04a, 鳥脇 04b]。また、実人体に基づく仮想環境の構築、人体内部の形状の解析 [鳥脇 05]、などもある。

計測法依存という点は、異種モダリティの併用によって急速に改善されつつある。しかし、そのためには、異種モダリティ画像の位置合わせ (registration) という難しい（しかし、非常に魅力的な）CV の問題を提起する。

実際のがん診断においても、最近 CT と PET の併用が始まっている [朝日 04]。この場合には X 線量の問題に対しても十分な配慮が必要である [飯沼 05]。

4.2 仮想化内視鏡システム (VES)

仮想化内視鏡システム (virtual endoscope system VES バーチャル・エンドスコープ・システム) は『管腔様臓器内部を自由に移動しつつ管壁の状態を観察、定量計測し、時に変形も加えて診断するシステム』である [鳥脇 04a, 鳥脇 04b]。バーチャル・エンドスコープは 1993 年 12 月 Vining ら (米) によって virtual colonoscopy として、および、1994 年 6 月に鳥脇、片田、森 (日本) らによって、気管支内視鏡シミュレーションとして、互いに独立に発表され、その後一気に広まった [Vining93, 森 94, 鳥脇 02b, Heinrich01]。以後様々の応用が試みられ、今では医学的にも周知の手法である [Rogalla00, Dachman03, 末永 04]。しかし、CV 技術としては 3 次元配列データの可視化の一手法とみなされる。すなわち、CT など得られた人体の 3 次元画像を観察する方法である。なお、発表当時の Vining らのものはビデオ編集の動画でリアルタイムでは動いていない。筆者らのものは毎秒数フレーム程度で一応動画表示はできていた。この差は、Vining らが今で言うボリュームレンダリング (当時は表示処理は遅かった) を使っていたのに対して、グラフィックスと 3 次元画像認識から入った筆者らは、予め気管支を抽出してから比較的高速表示ができたサーフェスレンダリングを適用したためである [森 94, 鳥脇 02b, 鳥脇 05]。ただし、現在はボリューム・レンダリングでも動画は出せるため、セグメンテーション不要のボリューム・レンダリングを用いることが多い。なお、内視鏡像に対応する画像の生成は小林らも 1995 年頃から試みている [林 96]。

VES を特徴づける機能として次の点があると筆者は考えている。

- (1) 視点の位置とみる方向を人体内部、外部を問わず任意にとれる (内部自由視点)。
- (2) みる位置も方向もインタラクティブに自由に選び、また変更もできる (インタラクティブ・ナビゲーション)。

これによって、観察者は恰も自分が乗り物を操作して人体内を自由に動き回るような感覚をもつことができる (人体内を飛行して通過するという感じで「フライ・スルー (fly through)」という言葉が用いられた)。

- (3) 個々の人体に適用できる (個別人体対応)。

これは個々の被験者の人体の 3 次元像があってそれに適用できる (個別の人体をみるができる) ことを意味する。一般的なモデルに、あるいはデモ用に用意されたものだけに適用できるものであっては有効性は大幅に低下する。

- (4) 対象臓器をできるだけ自動的に切り出せる (自動セグメンテーション)。

医学的な異常 (がんの病変部の範囲など) の指定は最終的には専門医の判断が必須であるから全自動セグメンテーションは考えられないが、少なくとも臓器の正常構造は自動抽出することが望まれる。ここに手作業を要すると煩雑になって臨床応用は望めない。

その他、望ましい機能として次の点もあげておきたい。

- (5) (レンダリング法の多様化)

少なくともボリューム・レンダリングとサーフェス・レンダリングの両者の高度なものが使える。前者は前処理としての構造化が不要、後者は計測には必須、と言う特色がある。

4.3 観察法としての一般化ナビゲーション

VES は現在では様々の人体部位に適用され、その臨床的有用性が検証されつつある [Rogalla00, Dachman03]。同時に、VES は人体の診断のみでなく、一般に 3 次元物体の観察法として新しい可能性を提示したと筆者は考えている。その特色を構成する事項を要約すれば次のようになる [鳥脇 04a, 鳥脇 04b] :

- (a) 対象物の仮想化、
- (b) 視点と視線の自由選択、

- (c) リアルタイム操作、
- (d) 視点移動、

VESが可能となった前提として、個々の被験者の人体の「仮想化」がある。筆者は、これを「仮想化された人体 (virtualized human body VHB)」と呼んで、説明の便宜等のためにつくられる、想像上の「仮想人体」とは区別している [鳥脇 97, 館野 02]。さらに、実際には人体内部をどこへでも自由に動き回って診断するという形に拡大して、筆者はナビゲーション診断と名づけている [鳥脇 97]。

このとき、可視化操作に入る前に、ある程度、内部の構造の解析を行うかどうかで可視化の手法が異なる。例えば、構造の解析がなされれば、面や塊の存在が検出できる。この段階の処理を構造化 (structurization) と呼ぶ。構造化は 3D 画像の認識の問題である。その手法については [鳥脇 02c, 鳥脇 04a, 鳥脇 04b] 参照。

一方、最近では口から飲み込むカプセル内視鏡が実用化され、話題を呼んでいる。これは、1 ~ 2 cm 程度のカプセル内に撮像系と送信系を組み込み、口から飲み込む。そして、送られてくる体内の映像を体外で受診するものである [丸山 03, 中村 03, オリンパス 04]。現在では、国内では試験中、海外では実用化されている。画像の実例はいくつかの web サイトで見られる。画質はまだ十分でないが、既存の内視鏡では見にくい部分 (例えば小腸) を「みられる」新しいタイプの画像取得法として注目されよう。

また、仮想化内視鏡と対照的な観察法として、臓器の仮想展開がある。これは仮想化された人体の臓器壁を仮想的な平面の上に展開するものである。全体を一度にみられる点は優れているが、平面化するための変形が著しい。逆に、仮想化内視鏡はあちこちに動きながら色々の方向からみる、と言う点で「日常的にもものを見る」やり方に沿うものであるが、一度にみえる範囲に限られるため、見落としが生じる危険がある。詳細は [岡 04, 鳥脇 04a, 鳥脇 04b] 参照。

5 最近の話題から (3) – コンピュータ外科

5.1 内視鏡下手術

この話題の最大の特徴は、実人体を「みながら触る、触りながらみる」という点にある。従って、CV

技術の中でも画像取得、生成の方にウェイトがある。まず、前提として、次の事項がある。

- (1) 視野が厳しく限定される。
- (2) 操作も見えなくてはならない。すなわち、医師の手元や操作中のツールも見える必要がある。
- (3) 対象人体 (具体的に手術を受ける患者) の状態 (たとえば、位置、姿勢など) に対する制約も厳しい。

具体例として、内視鏡下手術においては医師も直接に対象を見ているとは限らず、内視鏡視野を介して見なくてはならない。そこで、この視野に様々な情報を提示することが考えられる。それを大型ディスプレイに表示することも試みられる。例えば、視野に見えているのは大局的に見て臓器のどの部分であり、また、見えている臓器の背後には何が存在するか、を表示する試みが報告されている [特集 02b]。

技術的には、対象の実人体、術者自身の手元、道具や装置、基になる画像、そして、必要なら前項の VHB、等の中の位置を正確に合わせること (例えば実体上で 0.1mm 程度の精度) が要求される。

5.2 術中支援画像の取得

ここでは、術中に随時患者の画像を取得、更新したい。同時に、それは、手術室の中や手術の途中で行われなくてはならない。この点で、厳しい作業になる。現在、CT や MRI の利用が始まっている [特集 03c]。

5.3 手術シミュレーション

前記の VHB を使えば、事前に手術のシミュレーションができる。これは、1980 年代に鳥脇、横井、中島らによって始めて試みられたが [Yasuda90]、当時は計算機の制約が多く、数例試みられたのみで、実用には至らなかった。しかし、手術のシミュレーションというコンセプトを提案し、事例を示し得た意義は大きかったと考えている。実際、1990 年代になると、国際、および、国内のコンピュータ外科学会 (computer assisted(aided) surgery CAS) が発足したが、その主要な動機の 1 つとなった。また、精密機械関連技術を基盤とした手術ロボットの開発も活発になり、欧米を中心に既に多数の応用例も商用機もある。

例えば、最近の我が国のプロジェクト研究の一つである『外科領域を中心とするロボティックシステムの開発 (日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業)』におけるサブテーマをみると、以下のよう

なものがある [越智 04]。

[医学系]

- 外科手術解析プロジェクト (骨格器官系)
- 外科手術解析プロジェクト (内臓器官系)

[工学系]

- 画像：術中における多次元画像の獲得と利用
- ロボット：手術ロボティクスシステム開発プロジェクト
- 遠隔手術：Telesurgery における通信システムと情報支援ネットワークの開発

しかし、現時点では必ずしも高度の CV の応用があるわけではない。この点はロボット・ビジョンとは異なり、むしろ、ロボットとしては産業用ロボットやマニピュレータの段階である。

一方では、手術シミュレーションが小規模、かつ、簡便にできれば、別の用途が広がる。例えば、切開中の対象のどの方向に何があるか、が常時見えていれば術者への大きな支援になる。また、事前に内視鏡下のシーンを見られれば、手術計画の立案のためにもメリットも大きい [宮本 05]。

5.4 3次元計測と立体視

内視鏡画像が立体視できれば医師の操作の有力な補助となるため、実際に内視鏡画像を立体視できるようにすることは、すでに実現されている。さらに、内視鏡視野内で3次元計測を行う試みも始まっている。ここでは、CVの技術の寄与が大いに期待される。例えば、臓器の壁の突起・陥凹や脳表面の変形を正確に計測できれば、効果は極めて大きい。

6 むすび

本文では、人を「みる」CV技術の一分野として、人体の内部の計測、診断を行い、さらにその結果を可視化した画像の診断・治療への応用技術についてのあらましを紹介した。具体的に、まず、主な医用画像を紹介した後、最近の医用画像処理の話題の中から、診断支援 (CAD)、仮想化された人体と仮想化内視鏡システム (バーチャルエンドスコープ)、および、コンピュータ外科 (CAS) の中から CV に関連が深いと思われる事柄を説明した。

本文の分野では、いわゆる医用画像処理と言われる領域で、CTの登場 (1972年) がデジタル画像処理の全域を活性化したことで分かるように、CVの中でも近年もっとも発展が著しい領域の一つである。それは、また、がんの早期発見にも見られるよ

うに、我々の日常生活にも直結する。

さらに、ごく最近まで開かれていた「人体の不思議展」の盛況からわかるように、人体の標本や映像は一般の人々にも目に触れうる時代となり、多大の関心と呼ぶ時代でもある。今後は、遺伝子のようなナノスケールから等身大の人体画像まで、「ひとの内部をみる」人体画像の発展は益々期待されている [特集 03b]。しかし、このような急速な発展も過去の研究、開発の蓄積の上に立っている。そして、そこには世界に誇れる日本の成果が沢山ある。それらを理解し、継承したうえで、今後の発展の方向を正確に把握するために、本稿が役立つならば誠に幸いである。

謝辞 日頃 CAD、CAS 関係の研究を共同して進める中でご指導、ご支援頂く、医学系の諸先生、および、名古屋大学情報科学研究科末永研究室、並びに、村瀬研究室の皆さんに深謝する。また、本文電子版作成にご協力いただいた名古屋大学林雄一郎君に感謝する。本文の基礎となった調査、研究の一部は文部科学省科学研究費、厚生労働省がん研究助成金、および、私立大学 HRC 助成金に依った。

参考文献

- [朝日 04] 「がん発見 30 人に一人 - 国立がんセンター総合検診」、朝日新聞、2004年1月13日号
- [荒俣 91] 荒俣宏編著：解剖の美学、リポレポート、1991
- [飯沼 01] 飯沼武：厚生省がん研究助成金研究班「がん診療におけるコンピュータ応用」関連の歴史 (1968-2000)、コンピュータ支援画像診断学会誌、5, 10, pp.1-11 (2001.12)
- [飯沼 05] 飯沼武：FDGPET/CT 検診の有効性評価の考え方 <http://takeshiinumata.at.webry.info/> (2005.2)
- [医用画像 05] 医用画像電子博物館 - 年表、および、歴史で見る医用画像の歩み、<http://www.jiranet.or.jp/>
- [岡 04] 岡宏樹、北坂孝幸、森健策、末永康仁、鳥脇純一郎：臓器外壁情報を利用した仮想展開像作成手法と未提示領域の割合に基づく仮想化内視鏡との比較、電子情報通信学会論文誌、J87-DII, 1, pp.290-301 (2004.1)
- [越智 04] 越智隆弘：外科領域を中心とするロボティクスシステムの開発、日本學術振興会未来開拓學術研究推進事業、最終編集報告書、2004.3
- [オリンパス 04] <http://www.olympus.co.jp/jp/news/2004b/nr041130capslj.cfm>
- [神谷 00] 神谷敏郎：あるミイラの履歴書、中公新書、1529、中央公論社、2000.4.25

- [キオスク 05] コンビニ検診、財団法人愛知診断技術振興財団パンフレット、同財団、2005
- [北坂 05] 北坂孝幸、小川浩史、横山耕一郎、森健策、目加田慶人、長谷川純一、末永康仁、鳥脇純一郎：解剖学的知識に基づく非造影3次元腹部X線CT像からの複数臓器領域の抽出、コンピュータ支援画像診断学会論文誌(2005)(印刷中)
- [小畑 04] 小畑秀文：文部科学省研究費補助金「多次元医用画像の知的診断支援」第1回シンポジウム論文集、2004.3
- [佐藤 04] 佐藤嘉晃、長尾慈郎、北坂孝幸、森健策、末永康仁、鳥脇純一郎、高島博嗣、森雅樹、名取博：マイクロCT画像を用いた肺微細構造からの肺泡領域の抽出、信学技報PRMU2004-9, MI2004-9, WIT2004-9, (医用画像 vol.104, No.90) pp.49-54 (2004-05)
- [佐藤 05] 佐藤、及川、和田、清水、小畑：全身PET像とCT像の組み合わせを用いた診断支援システムの提案、信学技報(医用画像研究会資料), pp.145-150, MI2004-76 (2005.1)
- [周 05] 周、林、村田、小林、藤田、他：高精度な体幹部CT画像に基づく人体の構造認識に関する基礎的研究 - 皮膚、脂肪、骨格領域の自動抽出、小畑秀文：文部科学省科研費特定領域研究「多次元医用画像の知的診断支援」、第一回シンポジウム論文集、pp.75-80 (2004.3)
- [人体 04] 人体の不思議展、(株)メディシユ、2004(展覧会図録)
- [末永 04] 末永康仁：3次元画像認識・理解と動画像解析に基づく医用内視鏡ナビゲーションシステムの開発、文部科学省 科研費補助金(基盤B2)研究成果報告書(2004.3)
- [館野 01] 館野之男編：原典で読む画像診断史、エムイー振興協会、2001.1
- [館野 02] 館野之男：画像診断 病気を目で見る、中央公論社、中公新書 1676、2002.12.20
- [土井 04] 土井邦雄：CADの最近の研究開発と実用システムの概況、映像情報 Medical, 36, 4, pp.390-397 (2004)
- [鳥脇 67a] 鳥脇純一郎、福村晃夫：X線写真のパターン認識 - 電子計算機への導入 -, 日本ME学会放射線関連装置委員会研究会資料(1967.6)
- [鳥脇 67b] 鳥脇純一郎、福村晃夫：胸部X線写真の濃度分布の性質と肋骨境界の自動識別について、電子通信学会医用電子・生体工学研究会資料(1967.2)
- [鳥脇 67c] 鳥脇純一郎、福村晃夫：胸部X線写真の病巣陰影識別に関する基礎的実験、電子通信学会医用電子・生体工学研究会資料 MBE67-13 (1967.11)
- [鳥脇 70] 鳥脇純一郎、福村晃夫、小池和夫、高木良雄：胸部X線写真自動診断システムのシミュレーション、医用電子と生体工学, 8, 3, pp.220-228 (1970.6)
- [鳥脇 94] 鳥脇純一郎、館野之男、飯沼武編著：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, pp.253-259 (1994.12)
- [鳥脇 97] 鳥脇純一郎：仮想化された人体とナビゲーション診断、BME(日本エム・イー学会誌), 11, 8, pp.24-35 (1997)
- [鳥脇 02a] 鳥脇純一郎：コンピュータ支援画像診断学会(CADM)10年一回顧と展望のためのノート、コンピュータ支援画像診断学会(Computer Aided Diagnosis Medical Images)News Letter, 35, pp.6-7 (2002.5)
- [鳥脇 02b] 鳥脇純一郎：仮想化内視鏡システムの発想と実現、CADM(コンピュータ支援画像診断学会)News Letter, No.34, pp.4-12 (2002.1)
- [鳥脇 02c] 鳥脇純一郎：3次元デジタル画像処理、昭晃堂、2002
- [鳥脇 04a] 鳥脇純一郎：ナビゲーション観察 - 内部自由視点による物体観察と医用応用、RADIOISOTOPES(アイソトープ協会誌), 53, 5, pp.331-342 (2004.5)
- [鳥脇 04b] 鳥脇純一郎：仮想化身体とナビゲーション診断 - 総論、IASAI News(中京大学人工知能高等研究所 ニュース No.13), pp.3-15 (2004.2)
- [鳥脇 05] J.Toriwaki: Forms in the Inside of the Human Body, FORMA(投稿中)
- [中村 03] 中村哲也：講演 内視鏡による診断の進歩 - Capsule内視鏡を中心として -, 東海ME懇談会講演会抄録、2003.11.27
- [バジャック 03] Q.バジャック著、伊藤俊治監訳：写真の歴史、創元社、2003
- [宮本 05] 宮本秀昭、林雄一郎、北坂孝幸、森健策、末永康仁、鳥脇純一郎、橋爪誠：3次元CT像からの腹壁領域抽出と変形に基づく仮想腹腔鏡像生成手法の開発、信学技法, Vol.104, No.579, M1 2004-52, pp.7-12 (2005.1)
- [林 96] 林宏光、小林尚志、高木亮、他：Virtual CT endoscopy "Cruising Eye View" 開発に至る過程とその理論、ならびに臨床応用、臨床放射線, 41, 11, pp.1392-1400 (1996.11)
- [松本 03] 松本徹編：らせんCT肺がん検診システムの研究開発、放射線医学総合研究所、2003.3
- [丸山 03] 丸山次郎：NORIKA「超小型カプセル内視鏡」開発物語、徳間書店、2003
- [森 94] 森健策、長谷川純一、鳥脇純一郎、横井茂樹、安野泰史、片田和廣：医用3次元画像における管状図形抽出と気管支内視鏡画像のシミュレーション、3次元画像コンファレンス '94 講演論文集、pp.269-274 (1994.7)
- [山本 93] 山本真司、田中一平、館野之男他：肺癌検診用X線CT(LSCT)の基本構想と診断支援用画像処理方式の検討、電子情報通信学会論文誌、J76-DII, 2, pp.250-260 (1993.2)

- [柳田 05] 柳田、清水、小畑、縄野：人体の3次元アトラスを用いた複数臓器抽出アルゴリズムの提案、信学技報（医用画像研究会資料）MI2004-68, pp.101-106 (2005.1)
- [養老 93] 養老孟司：解剖学教室へようこそ、筑摩書房、1993,94
- [Constantino93] M.Constantino : Leonardo-Artist, Inventor and Scientist, Crescent Books, N.Y., U.S.A., 1993
- [Dachman03] A.Dachman, ed. : Atlas of virtual colonoscopy, Springer, New York, 2003
- [Ellis91] H.Ellis, B.M.Logan, and A.Dixon : Human Cross-sectional Anatomy Atlas of Body Sections and CT Images, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, England, 1991
- [Heinrich01] Heinrich D.Becker, MD : Bronchoscopy Year 2001 and Beyond, Clinics in Medicine, 22,2, pp.225-239 (2001.6)
- [Hoehne92] K.H.Hoehne, M.Bomans, M.Riemer, R.Schubert, U.Tiede : A volume-based anatomical atlas, IEEE Computer Graphics and Applications, 12, 4, pp.72-78(1992)
- [Levoy88] M.Levoy : Volume rendering, display of surfaces from volume data, IEEE, 8, pp.29-37 (1988)
- [Netter90] F.H. Netter et al : The Ciba Collection of Medical Illustrations, Vol.1 ~ 13, CIBA-GEIGY Corp., Summit, N.J., U.S.A., 1990
- [Ochs04] M.Ochs, J.R.Nyengaard, A.Jung, L.Knudesen, M.V0igt, T.Wahlers, J.Richter, and H.J.G.Gundersen : The number of alveoli in the human lung, Am. J. Respir Grit Care Med. 169, p.120-124 (2004)
- [Ritman03] E.L.Ritman : Evolution of medical tomographic imaging - as seen from a Darwinian perspective, IEEE Proc. IEEE, 91,10, pp.1483-1491 (2003)
- [Rogalla00] P.Rogalla, T.J. van Scheltinga, and B.Hamm, eds. : Virtual Endoscopy and Related 3D Techniques, Springer, Berlin, 2001
- [Stafford93] B.M.Stafford : Body Criticism, MIT Press, 1993
- [Wehrli03] F.W.Wehrli, P. K.Saha, B.R.Gomberg, and H.K.Song : Noninvasive assessment of bone architecture by magnetic resonance micro-imaging-based virtual bone biopsy, Proc. of the IEEE, 91, 10, pp.1520-1542 (2003.10)
- [Vining93] D.J.Vining, A.R.Padhani, S.Wood, E.A.Eserhouni, E.K.Fishman, and J.E.Kuhlmann : Virtual bronchoscopy : a new perspective for viewing the tracheo-bronchial tree, Radiology, Vol.189(P) Nov. 1993
- [Vining03] D.J.Vining : Virtual Colonoscopy : The Inside Story, in V.H.Dachman ed. : Atlas of virtual coloscopy, Springer-Verlag, N.Y., pp.3-4 , 2003
- [Yasuda90] T.Yasuda, Y.Hashimoto, S.Yokoi, and J-I.Toriwaki : Computer system for craniofacial surgical planning based on CT images, IEEE Trans. on Medical Imaging, 9, 3, pp.270-280 (1990-9)
- 最近の CAD 研究に関する解説、サーベイ 発表年次順
- [鳥脇 99a] 鳥脇純一郎：バーチャルリアリティ技術による診断・治療支援、日本コンピュータ外科学会誌、1, 1, pp.5-18 (1999.3)
- [鳥脇 99b] 鳥脇純一郎：計算機支援診断 (CAD) の現状と課題、シンポジウム資料、医用画像情報学会雑誌、16, 2 pp.101-114 (1999.3)
- [鳥脇 99c] 鳥脇純一郎：医用画像の研究課題 - 研究会発足にあたって -、電子情報通信学会医用画像研究会資料、MI99-11 (信学技報 Vol.99, No.50, pp.33-40) (1999.5)
- [Toriwaki99d] Jun-ichiro Toriwaki and Kensaku Mori : Recent progress in biomedical image processing - Virtualized human body and computer-aided surgery, Trans.on Information and Systems of Japan, E82D, 3, pp.611-628 (1999,3)
- [鳥脇 00] 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-II, 1, pp.3-26 (2000.1)
- [鳥脇 01a] 鳥脇純一郎：総論 - 3次元画像処理の医療応用の動向、電子情報通信学会誌、84, 5, pp.287-293 (2001.5)
- [鳥脇 01b] 鳥脇純一郎：資料:X線像の計算機支援診断の40年、コンピュータ支援画像診断学会論文誌、5, 6, pp.1-12, 同訂正1ページ (2001.9)
- [鳥脇 02a] 鳥脇純一郎：医用画像の診断支援 (CAD) における画像処理技術の展開、電子情報通信学会技術研究報告、102, 56, pp.27-34 (2002.5) (医用画像研究会資料 MI2002-21)
- [鳥脇 02b] 鳥脇純一郎：仮想化内視鏡システムの発想と実現、CADM News Letter, No.34, pp.4-12、コンピュータ支援画像診断学会 (2002.1)
- [鳥脇 03] 鳥脇純一郎：医用画像の認識に於ける研究課題の展開、画像電子学会第202回研究会講演予稿 (in 名古屋) 03-01-09, pp.57-66 (2003.5.31)
- [小畑 04] 小畑秀文 ベクトル集中度フィルタとその医用画像処理への応用、電子情報通信学会論文誌、J87-DII, No.1, pp.19-30 (2004.1)
- [山本 04] 山本眞司 CT による肺がん検診の支援画像処理アルゴリズム、電子情報通信学会論文誌、J87-D2, No.1, pp.31-43 (2004.1)

- [村木 04] 村木茂、喜多泰代：3次元画像解析とグラフィックス技術の医学応用に関するサーベイ、信学論、D-II, J87-7-II, 10, pp.1887-1920 (2004.10)
- [鳥脇 05] 鳥脇純一郎：わが国における CAD 研究の歴史と将来、インナービジョン、19、10、pp.5-9 (2004.10)
- [Duncan00] J.Duncan and N.Ayache : Medical image analysis : Progress over two decades and the challenges ahead, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22, 1, pp.85-106 (2000.1)
- [Ginneken01] B.v. Ginneken, B.M.ter Haar Romeny, and M.A.Viergever : Computer-Aided Diagnosis in Chest Radiography : A Survey, IEEE Trans. on Medical Imaging, 20, 12, pp.1228-1241 (2001.12)

CAD に関する雑誌特集号

- [特集 04a] 特集 CAD 最前線 (CAD 2004 No.1)、インナービジョン、19、10 (2004.10)
- [特集 04b] 特集 CAD 最前線 (CAD 2004 No.2)、インナービジョン、19、12 (2004.12)
- [特集 04c] 特集 2 CAD の最新動向と読影現場への導入の可能性を探る、映像情報 MEDICAL 36、4、(2004.4)
- [特集 04d] 特集：医用画像の最先端論文特集、電子情報通信学会論文誌、J87-DII, 1 (2004.1)
- [特集 03a] 特集：VR と画像医学、VR 医学、2.1 通巻 2 号 (2003) 日本 VR 医学会
- [特集 03b] 特集：Molecular Imaging, Medical Imaging Technology, 21, 5 (2003.11)
- [特集 03c] 特集：手術・治療支援のための術中画像の取得と利用、Medical Imaging Technology, 21, 3 (2003.5)
- [特集 02a] 特集：Virtual Endoscopy - 現状と展望、臨床消化器内科、17、6 (2002.6)
- [特集 02b] 特集：人工現実感手術室、情報処理、43, 5 (2002.5)
- [特集 01] 特集：21 世紀の医療・福祉を支える科学技術、電子情報通信学会誌、84、5、2001.5
- [特集 00a] CAD 技術論文特集号、日本放射線技術学会雑誌、56、3、2000.3
- [特集 00b] 次世代医用画像技術論文特集、電子情報通信学会論文誌 D-II、Vol.J83-D-II, No.1、2000.1