

人体内部の計測と診断

鳥脇 純一郎[†] 目加田 慶人[†]

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。初めに、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 応用を取り上げ、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[†] and YOSHITO MEKADA[†]

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、本文で扱う 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、いったん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。たとえば、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、人体標本などがある。

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。初めに、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 応用を取り上げ、概要を説明する。ただし、紙数が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、論文にはあま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

初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になっているか（構造）、および、
- (2) 人体内部で何が起きているか（機能）、
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（低侵襲という）
ことが要求される。さらに、

[†] 中京大学

Chukyo University

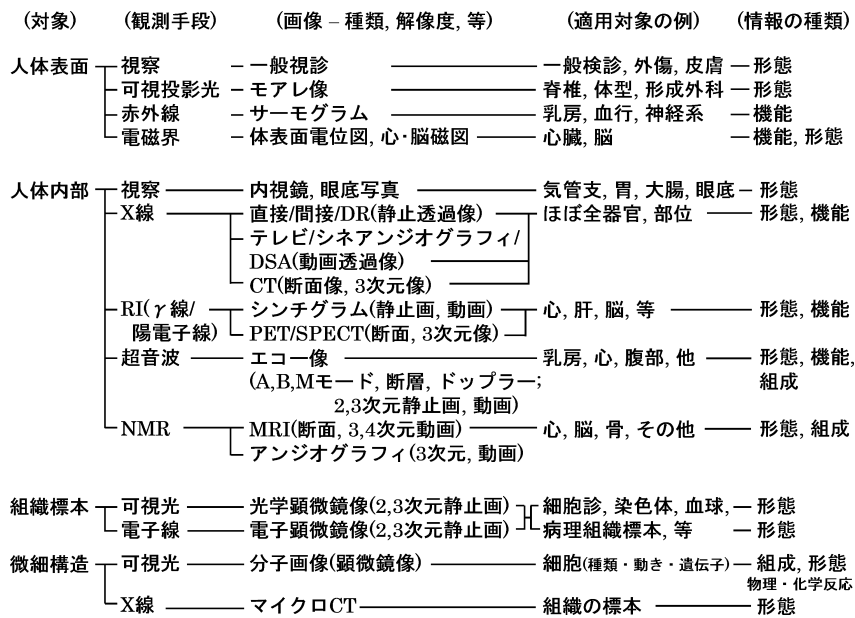


図 1 医用画像の例

Fig. 1 Examples of medical images.

(b) できるだけ「生きたままの状態 (自然な状態, in vivo) でみる
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, 厳密にいえば, 医用画像には 図 2 にも示すように,

- (i) X 線写真や通常の写真のように, 医師が見た結果の記録や診療用情報として, フィルムや紙に出力した画像 (ハードコピー),
- (ii) 内視鏡下手術や内視鏡検査, X 線透視などにおいて医師が診療中に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, たとえば,

- (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」という意味での CV ツールには含まれてくるかもしれない。

「in vivo」は「生体内で」の意。生化学や生理学の実験において「in vitro (試験管内で)」という語と対になって用いられる。実際はもう少し広く, 人工的に制御された環境条件下ではなくて自然の (ありのままの) 状態で観察や実験が行われたという意味で用いられている。

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 1 人 1 人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。たとえば, 少数個の数値の組でも役立つものもある。したがって, 画像を用いるのは, それが最も豊富な情報を持つからであろう。しかし, 一方では数字のみの組では人が扱いにくい (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ない独自の特徴があるためである。たとえば,

- ① 情報の内容,
- ② 解像度,
- ③ 患者・被験者の負担,
- ④ 扱いやすさ, 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

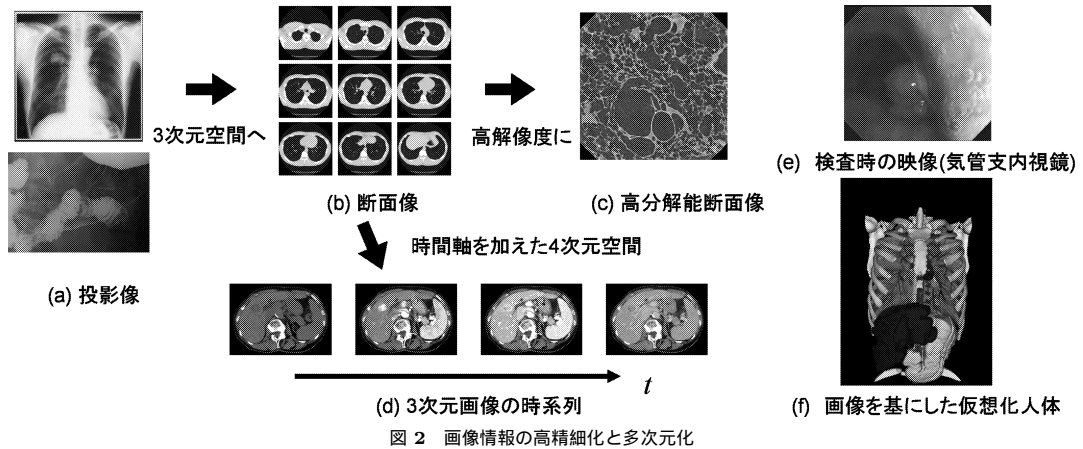


図 2 画像情報の高精細化と多次元化
Fig. 2 Substantial improvement of image quality and introduction of multidimensional images.

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・ヴィンチはすで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ほど遠い⁵²⁾。

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」技術のうえでも画期的できごとであった¹⁹⁾。これが、長時間を要するメカニカル・スキャナ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⁶⁾。

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発明であった。ただし、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) がすでにあった。しかし、空間解像度には限界があった。

CT は 90 年代には技術的にも急速に発展し、現在では 0.5 mm 間隔の等方性解像度で人体を記録することも難しくはない。もっとも診療に日常的に使うかどうかは、前述の ①~⑥の諸要因のトレード・オフで決まってくる。

この進歩によって、0.5 mm 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²⁸⁾) 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 によって摘出標本などのように *in vitro* でならば空間解像度 10μ オーダで同様の 3 次元データを取得できる可能性も出てきた^{64),75)}。また、0.5 mm オーダの解像度で 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。

空間解像度に関するイメージング技術の向上とは別に、時間軸方向の分解能の向上も最近の重要な進歩である。血管に注入した造影剤の体内での動きを経時的に、かつ空間的にとらえることにより高度な診療が可能となる。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 (図 2)。

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、技術的限界と前記の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^{1),15),16)}。

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。たとえば CT の原理は Radon の断面定理 (1917 年) にあったが、コンピュータ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⁶⁾、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³⁸⁾) 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、たとえば文献 6)、19)などを参照。文献 19)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。文献 6)には詳細な年表がある。文献 67)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もある。

当初の解剖図はスケッチであり、前出のレオナルド・ダ・ヴィンチの図が有名である⁵²⁾。文献 50)にはいろいろな時代の解剖図が紹介されている。文献 2)をみると人体を「みる」「みせる」様々な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、文献 63)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⁵⁸⁾。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、利用しやすい様々な展示が可能になった¹⁷⁾。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、に様々な興味深い工夫がみられる¹⁷⁾。

3. 最近の話題から (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いえば、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な形があるが、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とまなうこともある [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、前述のとおり 3D 画像の利用はこれな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い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胸部 X線写真に関しては文献 23)、24)、25)、乳房 X線写真では文献 77) であろう(図 3)。この中で文献 24) は今でいう正常構造の識別、腫瘍影の検出が文献 25)、26) 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⁴⁾。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」が開始されてきわめて活発な研究が行われている⁸⁸⁾。なお、1990 年頃までの研究成果は文献 27) 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: 食品医薬品局) 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

ここでは、2次元から3次元以上の高次元、高解像度画像への進展という装置の技術的な面と歴史の長さから X線によるイメージング技術を述べたが、超音波や MRI やその他のモダリティにおいても程度の差こそあれ同様の技術的な発展があり、それぞれが CV の応用として様々な課題を持つ大きな分野でもある。

- '67 : 胸部X線写真のパターン認識に関する研究開始(鳥脇・福村ら)
- '68~ : 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"
- '72 : 計算機断層撮影(Computed Tomography:CT)発明(ハウズフィールド)
実用化開始
- '82 : 外科手術シミュレーションの研究開始(鳥脇、横井、片田ら)
- '87 : コンピュータ外科研究会(土肥ら)
- '89 : バーチャル・リアリティ登場
- '91 : コンピュータ支援画像診断学会(CADM)発足
- '92 : コンピュータ外科学会発足(国内、国際(ISCAS))
- '93.12 : Virtual Colonoscopy(Viningら U.S.A)
- '94.6 : 仮想化内視鏡システム(森・鳥脇・片田ら)
- '95 : 仮想化された人体の考え方(鳥脇ら)
- '98 : 初の商用CAD装置登場(CAD元年)(R2社 U.S.A)
- '98 : The 1st International Workshop on Computer Aided Diagnosis(U.S.A)
- '01 : 情報強化内視鏡研究開始(鳥脇、森ら)
- '03 : 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3 CAD, CAS の発展の経過

Fig. 3 Historical progress of CAD and CAS.

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^{22),95)}。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^{36),95),96)}。

この頃から以後, CAD はつねに実用機, 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診断 (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^{48),95),96)}。なお, 個々の研究発表に関してはすでにいくつかのサーベイや学術誌特集号が出ているので, 本文では割愛する [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にあげておこう。い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: 特に, 等方性解像度 (約 0.5mm) のデジタル画像も珍しくない。しかし, 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。3次元画像処理には可視化と画像解

析双方のいっそう高度な手法が要求される³¹⁾。

- (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^{32),33)}。

- (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)^{20),65)}。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) たとえばサブトラクション (画像間差分) のように発想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^{44),59),66)}。

- (5) ナノオーダ, ミクロンオーダ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^{14),64),75)}。

- (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 の成果である^{12),15),16)}。

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¹³⁾。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。

システムの感度と 1-特異度の関係を示した曲線で, 曲線下の面積でシステムの評価とすることが多い。

- [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 人体臓器構造の知的モデリング
- [2] CADの臓器・疾病横断型化と高度化
 - 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爆線量評価

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でいえば、「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年代にはまったく想定されていなかった厳しい条件で有効性を試されている。たとえば、

- (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) 512^3 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) 512^3 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 $10\mu^3$ の解像度で3次元画像化し、必要な処理を行う。
- (5) (3)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に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として、それは、文字どおり病気の診断を支

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。たとえば、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²⁹⁾。

(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。たとえば、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)。たとえば初診時の診断、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。

たとえば、現在の職場の定期健康診断に組み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1960~1970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、一般人のたちが気軽に使う(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、がん検診はすで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、診断はまだ医師によっている(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・疾病横断型とい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, または, 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 0.5 mm 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、などの様々な応用が考えられる^{32),33)}。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³⁴⁾、などもある。

観察法依存という点は、同種モダリティの時系列画像や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。実際のがん診断においても、最近では CT と PET の併用が始まっている¹⁾。この場合には X 線量の問題に対しても十分の配慮が必要である⁵⁾。しかし、そのためには、異なる特性を持った 3次元画像の位置合わせ (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 (図 4)。レジストレーションの初期の問題の多くは、剛体間の位置合わせと考えるとよい頭部が対象であったが、相互情報量基準の導入などのアルゴリズムの工夫⁷⁶⁾、あるいはより直接的に計算機の能力の向上などもあって非剛体変形も考慮に入れたレジストレーション手法も用いられ始め、その適用可能範囲は急速に広まった^{41),69)}。

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 パーチャル・エンドスコープ) 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^{32),33)}。パーチャル・エンドスコープは 1993 年 12 月

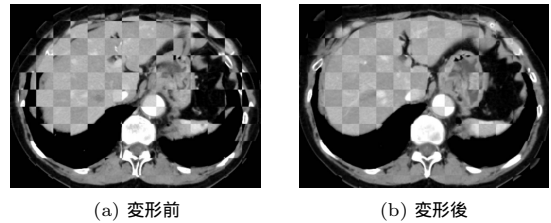


図 4 時系列 CT 画像のレジストレーションの一例。

造影剤の浸透程度が異なる同一被験者の 2 つの CT 画像の非剛体変形による位置合わせ。2 画像を市松模様状に配置してある

Fig. 4 Example of the registration of CT image sequence.

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^{46),57),73),87)}。以後様々な応用が試みられ、今では医学的にも周知の手法である^{18),53),68)}。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見なされる。すなわち、CT などで得られた人体の 3次元画像を観察する一方法である。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^{73),74)}。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 らが今でい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、あらかじめ気管支を抽出していたから当時でも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^{35),46),87)}。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林らも 1995 年頃から試みている³⁹⁾。

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、観察者はあたか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持つことができる (人体内を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)。

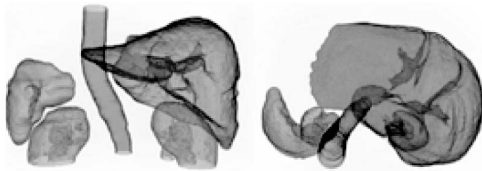


図 5 臓器セグメンテーションの例。
腹部臓器（肝臓，腎臓，脾臓，大動脈）の認識¹²⁾

Fig. 5 Example of the segmentation of abdominal organs.

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）(図 5)．

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．

そのほか，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，という特色がある．

4.3 観察法としての一般化——ナビゲーション

VES は現在では様々な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^{53),68)}．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^{32),33)}：

- (a) 対象物の仮想化，
- (b) 視点位置と視線方向の自由選択，
- (c) リアルタイム操作，
- (d) 視点移動，
- (e) リアルタイムの実人体映像と仮想化された人体との融合表示．

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，説明の便宜など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^{21),28)}．さらに，実際には人

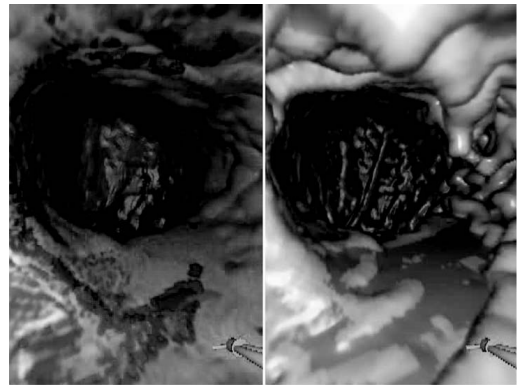


図 6 構造化された仮想化人体に基づくナビゲーション診断．
胃袋の内部のシーン．胃壁上に病変らしさがマッピングされた画像とひだ領域が色づけされた画像⁵¹⁾

Fig. 6 Navigation diagnosis based on the structured VHB.

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²⁸⁾ (図 6)．

VES に関連して CV 技術の利用が期待される分野として実人体像と仮想化された人体の映像の融合（情報強化内視鏡）がある．たとえば，実気管支鏡映像に仮想化内視鏡像を重畳表示した文献⁶²⁾には，画像のレジストレーション，気管支鏡（カメラ）の位置と動きの推定，などの CV 技術応用がみられる．そのほか，3 次元位置センサの利用⁷⁰⁾ や複合現実感表現には CV 分野の研究者が取り組める興味深い問題が数多く存在する．

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．たとえば，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 画像の認識という意味で CV の問題である．その手法については文献^{31)~33)}を参照．

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信するものである^{9),37),43)}．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（たとえば小腸内壁）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^{7),47)}。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いろいろな方向からみる、という点で「日常的にものをみる」やり方に沿うものであるが、一度にみえる範囲が限られることや臓器自体の形状に基づくオクルージョンの発生などで、見落としが生じる危険がある。

VESにおける視点移動の経路(パス)の評価に関しては、与えられたパスに沿ってのフライ・スルーでは画面に表示されない(したがって原理的に見えない)画素の全境界画素に対する割合を用いた評価が文献 7), 40)にある。逆に、与えられた壁面に対して全画素の可視性を保証するパスが文献 56)に示されている。前者はポリウムレンダリングもサーフェスレンダリングも扱えるが、後者はサーフェスレンダリングのみである。当然ながら、人体内部を診るという観点からは対象物を漏れなく表示することが望まれる。冗長性が低く、変形が少なく、かつ、適切な視野で観察しやすい画像や経路の生成には解決すべき問題が残されている。詳細は文献 7), 32), 33), 55), 56)を参照。

終わりに、VESの意義と今後の発展という点からは、観察対象の内部も含めての視点の自由な移動、および、VHBと実人体の統合利用の2点の意義が最も大きいと考える。CV応用によって何が実現できるかは今後の重要な課題である。

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。したがって、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いけない。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。さらに、それを大型ディスプレイに表示することも試みられている。たとえば、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¹⁰³⁾。

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、などの間の位置を正確に合わせることで、いわゆるレジストレーション(たとえば実体上で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¹⁰¹⁾。

5.3 手術シミュレーションと手術ロボット

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。手術シミュレーションは、頭蓋の切断と再配置の術前評価を目的に、1980年代に鳥脇、横井、中島らによって初めて試みられたが⁷⁸⁾、当時はコンピュータの制約が多く、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、その主要な動機の一つとなった。現在では、肝臓など腹部臓器切除や腹腔鏡下手術の術前・術中支援を目的とした、軟組織を対象とした変形・切断シミュレーションにも注目すべき研究が多い^{3),61),71)}。

また、1990年代には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、欧米を中心にすでに多数の応用例も商用機もある。

たとえば、最近のわ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クスシステムの開発(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⁸⁾。

[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

ここでは対象(頭蓋)が剛体として扱えることを仮定している。我々も当初は軟組織の変形をとまなう脳手術のシミュレーションを意図したが、計算機的能力と使える手法の両面の限界で実現できなかった。しかし、後に剛体の仮定がある程度受け入れられる骨を対象に選んだことは、一面では有効な選択であった。

● 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人工知能的に高度の 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。これらの分野では人体の安全性を最優先にすべきことに留意しなければならない。この点を考慮すれば、すでに高いレベルの要素技術が蓄積されているといえる。今後、様々なモダリティの画像に対する領域分割（セグメンテーション）と認識、および、位置合わせと適切な可視化手法の開発により、人体内部の観測と計測を飛躍的に向上させる可能性があり、高度な CV 技術の応用が期待される分野である。なお、人体への非侵襲性を保つためにはビジョン技術だけでなく制御技術や精密機器関連の技術も重要な開発課題である。

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、柔軟性の高いシステムが開発されれば、別の用途が広がる。たとえば、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、術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⁴⁵⁾。

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。ここでも、CVの技術の寄与がおおいに期待される。たとえば、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、効果はきわめて大きい。

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（パーチャルエンドスコープ）、および、コンピュータ外科（CAS）を取り上げて CV に関連が深いと思われる事柄を説明した。

本文の分野はいわゆる医用画像処理といわれる領域である。それは、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の中でも近年最も発展が著しい領域の1つである。それは、また、がんの早期発見にもみられるように、

我々の日常生活にも直結する。

さらに、2005年初め頃まで開かれていた「人体の不思議展」の盛況から分かるように、人体の標本や映像が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」人体画像の発展はますます期待されている¹⁰⁰⁾。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多数ある。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、本文が役立つならば誠に幸いである。

なお、本文は解説・サーベイ文献³⁵⁾に加筆修正を加えたものである。しかしながら医用画像処理の全域からみれば、本文で取り上げているのはきわめて限られた範囲である。たとえば、イメージング、画像伝送、表示、画像データベース、などはすべて含まれていない。また、本文で触れた項目でも限られた事項しか取り上げていない。文献を網羅することも意図していないし、組織的に選択したものでない。これらを考え合わせて、紙面の関係で触れることができなかった事項がきわめて多いことを改めてお断りしておきたい。

謝辞 日頃 CAD, CAS 関係の研究を共同して進める中でご指導、ご支援いただき、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、ならびに、村瀬研究室、および、中京大学生命システム工学部長谷川純一ゼミ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 助成金によった。また、多数の貴重なご指摘と重要な論文をご教示いただいた査読者、編集者の方々に深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 「がん発見 30 人に 1 人—国立がんセンター総合検診」, 朝日新聞, 2004 年 1 月 13 日号。
- 2) 荒俣 宏 (編著): 解剖の美学, リプロポート (1991).
- 3) Cotin, S., Delingette, H. and Ayache, N.: Real-time elastic deformations of soft tissues for surgery simulation, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.5, pp.62–73 (1999).
- 4) 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, Vol.5, No.10, pp.1–11 (2001.12).

- 5) 飯沼 武：FDGPET/CT 検診の有効性評価の考え方 (2005.2).
<http://takeshiinuma.at.webry.info/>
- 6) 医用画像電子博物館一年表, および, 歴史で見る医用画像の歩み. <http://www.jira-net.or.jp/>
- 7) 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, Vol.J87-DII, No.1, pp.290-301 (2004.1).
- 8) 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, 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業, 最終編集報告書 (2004.3).
- 9) <http://www.olympus.co.jp/jp/news/2004b/nr041130capslj.cfm>
- 10) 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).
- 11) コンピニ検診, 財団法人愛知診断技術振興財団パンフレット, 同財団 (2005).
- 12) 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, Vol.9, No.1, pp.1-14 (2005). (電子ジャーナル) http://www.jstage.jst.go.jp/browse/cadm/9/1/_CONTENTS/-char/ja/
- 13) 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). (同シンポは第 3 回まで行われている)
- 14) 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胞領域の抽出, 信学技報 PRMU2004-9, MI2004-9, WIT2004-9 (医用画像 Vol.104, No.90), pp.49-54 (2004.5).
- 15) 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 (電子情報通信学会医用画像研究会資料), pp.145-150, MI2004-76 (2005.1).
- 16) 周, 林, 村田, 小林, 藤田ほか: 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).
- 17) 人体の不思議展 (株) メディシユ (展覧会図録) (2004).
- 18) 末永康仁: 3 次元画像の認識・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)
- 19) 館野之男編: 原典で読む画像診断史 (株) エムイー振興協会 (2001.1).
- 20) 辻 久男: R2 社製マンモ CAD 装置 ImageChecker (DM), インナービジョン, Vol.19, No.12, pp.37-39 (2004.12).
- 21) 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).
- 22) 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, Vol.36, No.4, pp.390-397 (2004).
- 23) 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).
- 24) 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).
- 25) 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).
- 26) 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, Vol.8, No.3, pp.220-228 (1970.6).
- 27) 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, pp.253-259, シュプリンガー・フェアラーク・東京 (1994.12).
- 28) 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), Vol.11, No.8, pp.24-35 (1997).
- 29) 鳥脇純一郎: コンピュータ支援画像診断学会 (CADM) 10 年—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 of Medical Images) News Letter, No.35, pp.6-7 (2002.5).
- 30) 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).
- 31) 鳥脇純一郎: 3 次元デジタル画像処理, 昭晃堂 (2002).
- 32) 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), Vol.53, No.5, pp.331-342 (2004.5).
- 33) 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).
- 34) Toriwaki, J.: Forms in the Inside of the Human Body, FORMA (採録決定), 形の科学会英文論文誌, 電子版 (<http://www.scipress.org/journals/forma/index.html>) 公開準備中.
- 35) 鳥脇純一郎: 人体内部の計測と診断, 情報処理学会研究報告, Vol.2005, No.18, pp.73-84 (2005-CVIM-148(9)) (2005.3)
- 36) 鳥脇純一郎 (編著), 長谷川純一, 清水昭伸, 平野靖 (共著): 画像情報処理, コロナ社 (2005).

- 37) 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).
- 38) Q. バジャック (著), 伊藤俊治 (監訳): 写真の歴史, 創元社 (2003).
- 39) 林 宏光, 小林尚志, 高木 亮ほか: 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, Vol.41, No.11, pp.1392-1400 (1996.11).
- 40) 林雄一郎, 森 健策, 齋藤豊文, 長谷川純一, 鳥脇純一郎: 仮想化内視鏡システムにおける自動探索機能と未観察領域提示によるナビゲーション診断の高度化, 画像の認識・理解シンポジウム講演論文集 MIRU2000, II pp.II-331-II-336 (2000.7).
- 41) 林雄一郎, 出口大輔, 松岡寿典, 北坂孝幸, 森 健策, 目加田慶人, 末永康仁, 長谷川純一, 鳥脇純一郎: 早期相・晩期相からの CT 値分布推定による肝臓領域抽出手法の開発, 電子情報通信学会技術研究報告, MI2004-84, pp.19-24 (2005).
- 42) 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).
- 43) 丸山次郎: NORIKA 「超小型カプセル内視鏡」開発物語, 徳間書店 (2003).
- 44) 胸部 X 線画像読影支援システム (Truedia/XR). http://www.mss.co.jp/techinfo/CADProj/products/TruediaXR/Txr_main.html
- 45) 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, MI 2004-52, pp.7-12 (2005.1).
- 46) 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).
- 47) 森 健策, 櫛田晃弘, 長谷川純一, 末永康仁, 鳥脇純一郎, 片田和廣: 3 次元医用画像の変形に基づく管腔臓器の仮想展開像の作成と胃 X 線 CT 像への応用, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J83-D-II, No.1, pp.351-361 (2000.1).
- 48) 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 D-II, Vol.J76-D-II, No.2, pp.250-260 (1993.2).
- 49) 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).
- 50) 養老孟司: 解剖学教室へようこそ, 筑摩書房 (1993, 94).
- 51) 渡辺恵人, 長谷川純一, 目加田慶人, 森 健策, 縄野 繁: 腹部 X 線 CT 像を用いた胃壁ひだパターンの集中性解析, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J87-D-II, No.1, pp.155-163 (2004.1).
- 52) Constantino, M.: *Leonardo-Artist, Inventor and Scientist*, Crescent Books, N.Y., U.S.A. (1993).
- 53) Dachman, A. (Ed.): *Atlas of virtual colonoscopy*, Springer, New York (2003).
- 54) Ellis, H., Logan, B.M. and Dixon, A.: *Human Cross-sectional Anatomy Atlas of Body Sections and CT Images*, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, England (1991).
- 55) Hayashi, Y., Mori, K., Hasegawa, J., Suenaga, Y. and Toriwaki, J.: Quantitative evaluation of observation methods in virtual endoscopy based on the rate of undisplayed region, *Proc. SPIE, Medical Imaging 2003, Physiology and Function: Methods, Systems, and Applications*, pp.69-79 (2003.2).
- 56) He, T., Hong, L., Chen, D. and Liang, Z.: Reliable path for virtual endoscopy: Ensuring complete examination of human organs, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.7, Issue 4, pp.333-342 (2001.10).
- 57) Becker, H.D.: Bronchoscopy Year 2001 and Beyond, *Clinics in Medicine*, Vol.22, No.2, pp.225-239 (2001.6).
- 58) Hoehne, K.H., Bomans, M., Riemer, M., Schubert, R. and Tiede, U.: A volume-based anatomical atlas, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.12, No.4, pp.72-78 (1992).
- 59) Kano, A., Doi, K., MacMahon, H., Hassell, D.D. and Giger, M.L.: Digital image subtraction of temporally sequential chest images for detection of interval change, *Medical Physics*, Vol.21, Issue 3, pp.453-461 (1994).
- 60) Levoy, M.: Volume rendering, display of surfaces from volume data, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.8, pp.29-37 (1988).
- 61) Masutani, Y. and Kimura, F.: A new model representation of liver deformation for non-rigid registration in image-guided surgery, *Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2001) 15th International Congress and Exhibition, International Congress Series 1230*, Lemke, H.U., Vannier, M.W., Inamura, K., Farman, A.G. and Doi, K. (Eds.): pp.19-24 (2001.6).
- 62) Mori, K., Deguchi, D., Sugiyama, J., Suenaga, Y., Toriwaki, J., Maurer Jr., C.R., Takabatake, H. and Natori, H.: Tracking of a bronchoscope using epipolar geometry analysis and intensity-based image registration of real and virtual endoscopic images, *Medical Image Analysis*,

- Vol.6, Issue 3, pp.321–336 (2002.9).
- 63) Netter, F.H., et al.: *The Ciba Collection of Medical Illustrations*, Vol.1 ~ 13, CIBA-GEIGY Corp., Summit, N.J., U.S.A. (1990).
- 64) Ochs, M., Nyengaard, J.R., Jung, A., Knudsen, L., Voigt, M., Wahlers, T., Richiter, J. and Gundersen, H.J.G.: The number of alveoli in the human lung, *Am. J. Respir Grit Care Med.*, Vol.169, pp.120–124 (2004).
- 65) <http://www.r2tech.com/main/home/index.php>
- 66) Radke, R., Andra, S., Al-Kofahi, and Royssam, B.: Image change detectio algorithms: A systematic survey, *IEEE Trans. MI*, Vol.14, No.3, pp.294–307 (2005.3).
- 67) Ritman, E.L.: Evolution of medical tomographic imaging — as seen from a Darwinian perspective, *Proc. IEEE*, Vol.91, No.10, pp.1483–1491 (2003).
- 68) Rogalla, P., van Scheltinga, T.J. and Hamm, B. (Eds.): *Virtual Endoscopy and Related 3D Techniques*, Springer, Berlin (2001).
- 69) Rueckert, D., Sonoda, L.I., Hayes, C., Hill, D.L.G., Leach, M.O. and Hawkes, D.J.: Non-rigid registration using free-form deformations: Application to breast MR images, *IEEE Trans. Medical Imaging*, Vol.18, Issue 8, pp.712–721 (1999.8).
- 70) Sato, Y., Nakamoto, M., Tamaki, Y., Sasama, T., Sakita, I., Nakajima, Y., Monden, M. and Tamura, S.: Image guidance of breast cancer surgery using 3D ultrasonic images and augmented reality visualization, *IEEE Trans. Medical Imaging*, Vol.17, No.5, pp.681–693 (1998).
- 71) Suzuki, S., Suzuki, N., Hattori, A., Uchiyama, A. and Kobayashi, S.: Sphere-filled organ model for virtual surgery system, *IEEE Trans. Medical Imaging*, Vol.23, Issue 6, pp.714–722 (2004.6).
- 72) Stafford, B.M.: *Body Criticism*, MIT Press (1993).
- 73) Vining, D.J., Padhani, A.R., Wood, S., Eserhouni, E.A., Fishman, E.K. and Kuhlmann, J.E.: Virtual bronchoscopy: A new perspective for viewing the tracheobronchial tree, *Radiology*, Vol.189 (P) (1993.11).
- 74) Vining, D.J.: *Virtual Colonoscopy: The Inside Story*, *Atlas of virtual colonoscopy*, Dachman, V.H. (Ed.), pp.3–4, Springer-Verlag, N.Y. (2003).
- 75) Wehrli, F.W., Saha, P.K., Gomberg, B.R. and Song, H.K.: Noninvasive assessment of bone architecture by magnetic resonance micro-imaging-based virtual bone biopsy, *Proc. IEEE*, Vol.91, No.10, pp.1520–1542 (2003.10).
- 76) Wells III, W.M., Viola, P., Atsumi, H., Nakajima, S. and Kikinis, R.: Multi-modal volume registration by maximization of mutual information, *Medical Image Analysis*, Vol.1, pp.35–51 (1996).
- 77) Winsberg, F., Elkin, M., Marcy, Jr. J., et al: Detection of radiographic abnormalities in mammograms by means of optical scanning and computer analysis, *Radiology*, Vol.89, pp.211–215 (1967).
- 78) Yasuda, T., Hashimoto, Y., Yokoi, S. and Toriwaki, J-I.: Computer system for craniofacial surgical planning based on CT images, *IEEE Trans. Medical Imaging*, Vol.9, No.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）

- 79) 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，Vol.1, No.1, pp.5–18 (1999.3).
- 80) 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，Vol.16, No.2, pp.101–114 (1999.3).
- 81) 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).
- 82) Toriwaki, J. and Mori, K.: Recent progress in biomedical image processing—Virtualized human body and computer-aided surgery, *Trans. Information and Systems of Japan*, Vol.E82D, No.3, pp.611–628 (1999.3).
- 83) 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，Vol.J83-D-II, No.1, pp.3–26 (2000.1).
- 84) 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，Vol.84, No.5, pp.287–293 (2001.5).
- 85) 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，Vol.5, No.6, pp.1–12, 同訂正1ページ (2001.9).
- 86) 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，Vol.102, No.56, pp.27–34 (2002.5) (医用画像研究会資料 MI2002-21).
- 87) 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).
- 88) 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).

- 89) 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，Vol.J87-D-II, No.1, pp.19-30 (2004.1).
- 90) 山本真司：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 D-II, Vol.J87-D-II, No.1, pp.31-43 (2004.1).
- 91) 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，電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J87-D-II, No.10, pp.1887-1920 (2004.10).
- 92) 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，Vol.19, No.10, pp.5-9 (2004.10).
- 93) Duncan, J. and Ayache, N.: Medical image analysis: Progress over two decades and the challenges ahead, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.22, No.1, pp.85-106 (2000.1).
- 94) Ginnneken, B.v., Romeny, B.M.ter Haar and Viergever, M.A.: Computer-Aided Diagnosis in Chest Radiography: A Survey, *IEEE Trans. Medical Imaging*, Vol.20, No.12, pp.1228-1241 (2001.12).

CAD に関係する雑誌特集号

- 95) 特集 CAD 最前線 (CAD 2004 No.1), インナービジョン, Vol.19, No.10 (2004.10).
- 96) 特集 CAD 最前線 (CAD 2004 No.2), インナービジョン, Vol.19, No.12 (2004.12).
- 97) 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, Vol.36, No.4 (2004.4).
- 98) 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 D-II, Vol.J87-D-II, No.1 (2004.1).
- 99) 特集：VR と画像医学，VR 医学，2.1 通巻 2 号，日本 VR 医学会 (2003).
- 100) 特集：Molecular Imaging, *Medical Imaging Technology*, Vol.21, No.5 (2003.11).
- 101) 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*, Vol.21, No.3 (2003.5).
- 102) 特集：Virtual Endoscopy—現状と展望，臨床消化器内科, Vol.17, No.6 (2002.6).
- 103) 特集：人工現実感手術室，情報処理, Vol.43, No.5 (2002.5).
- 104) 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, Vol.84, No.5 (2001.5).
- 105) CAD 技術論文特集号，日本放射線技術学会雑誌，Vol.56, No.3 (2000.3).
- 106) 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).

(平成 17 年 9 月 20 日受付)

(平成 18 年 3 月 17 日採録)

(担当編集委員 村上 和人)



鳥脇純一郎 (正会員)

1962 年名古屋大学工学部電子工学科卒業。1967 年同大学大学院博士課程了。同年 4 月名古屋大学工学部助手。以降，同助教授，名古屋大学大型計算機センター助教授，豊橋技術科学大学教授，1983 年名古屋大学工学部（後に大学院工学研究科情報工学専攻）教授。2003 年 4 月より現職。工学博士。パターン認識，画像処理，グラフィックスおよびそれらの医学情報への応用に関する研究に従事。最近は 3 次元画像処理，コンピュータ外科，コンピュータ支援診断，バーチャルエンドスコープ等が中心である。著書：『画像理解のためのデジタル画像処理 I, II』(昭晃堂)，『3 次元デジタル画像処理』(昭晃堂)，『認識工学』(コロナ社)，等。電子情報通信学会，コンピュータ支援画像診断学会，IEEE 等各会員。



目加田慶人

1991 年名古屋大学工学部情報工学科卒業。1996 年同大学大学院博士後期課程修了。1996 年宇都宮大学工学部情報工学科助手。2001 年名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻助教授，2004 年より中京大学生命システム工学部教授，現在に至る。画像処理・パターン認識とその医用応用，信号処理等の研究に従事。博士(工学)。1998 年日本医用画像工学会論文賞，2002 年 FPGA/PLD Design Conference 審査委員特別賞，MIRU2004 優秀論文賞。IEEE，電子情報通信学会，日本医用画像工学会，コンピュータ支援画像診断学会各会員。