

■11 群（社会情報システム）-4 編（医療情報システム）**10 章 診療画像情報の活用**

(執筆者：小山博史) [2008 年 12 月 受領]

■概要■

医学分野において利用されている画像を「医用画像」と呼び、医学へ応用されている画像情報処理技術を医用画像情報処理技術という。

医用画像には、放射線画像，CR，核医学検査画像，超音波検査画像，写真画像，内視鏡検査画像，CT や MRI から再構成画像や CG，手術ナビゲーション用画像があり，VR 技術を利用した仮想空間まで含む。

画像撮影装置で生成される「一次医用画像」のデジタル画像フォーマットは，DICOM (Digital Imaging and COmmunication in Medicine) にほぼ統一されている。この標準化は，一次医用画像をコンピュータで再構成して作成される「二次医用画像」の処理技術を飛躍的に発展させ，診断支援，治療支援，医学教育支援，遠隔医療支援などの応用が広く行われている。

【本章の構成】

本章では，10-1 節で臨床医学における画像情報処理について概説した後，診断支援（10-2 節），治療支援（10-3 節），医学教育支援（10-4 節），遠隔医療支援（10-4 節）の四つの領域に分けて概説する。最後に，10-5 節で診療画像情報の今後の活用の方向性について展望する。

■11 群-4 編-10 章

10-1 はじめに

(執筆者：小山博史) [2008 年 12 月 受領]

近年、臨床医学における画像情報処理は、画像情報処理分野の中でも「医用画像情報学」として独立した学問領域を確立し、コンピュータの性能、ハードディスクの大容量化、大容量高速ネットワーク技術の進歩により臨床医学領域において最も注目される分野の一つとなっている。

医学分野において利用されている画像を「医用画像」と呼び、医学へ応用されている画像情報処理技術を医用画像情報処理技術という。

医用画像には、放射線画像（一般放射線撮影、断層撮影）、Computed Radiography（以下 CR）、核医学検査画像、超音波検査画像（静止画、動画）、細胞診や病理診断の顕微鏡写真や皮膚科疾患などの写真画像、内視鏡検査画像（静止画、動画）、Computed Tomography（以下 CT）や Magnetic Resonance Imaging（以下 MRI）画像から再構成画像（静止画、動画）や Computer Graphics（以下 CG）画像（静止画、動画）、手術ナビゲーション用画像（静止画、動画）があり、Virtual Reality（以下 VR）技術を利用した仮想空間まで含む。

情報工学技術は、現在、上記の医用画像処理の全過程に関与している。特に CT や MRI、CR の普及に伴い、臨床医学におけるデジタル画像処理が加速化された。画像圧縮技術は、医用画像の保存容量を削減し、遠隔地域間の医用画像の転送時間を短縮させた。更に、大容量高速情報ネットワーク技術の進歩は、病院施設内や施設間でデジタル画像の遠隔伝送を容易にし、専門医への診断あるいは治療決定やケアの改善のための医用画像を迅速に転送・共有しながらコンサルテーションに利用することを可能とした。医用画像の遠隔診断支援のことを Teleradiology といい、同様に病理組織の遠隔診断支援のことを Telepathology という。細胞診の遠隔診断支援のことは更に Telecytopathology とされる。Tele はもともと遠隔を意味し、Teleradiology は、Telemedicine（遠隔医療）のサブカテゴリーとして主として一対一の通信環境の時代に登場した。しかし、現在のインターネット社会では、ネットワーク型医療あるいはユビキタス医療といわれる概念の中に含めてとらえた方が妥当といえよう。

ここでは、画像撮影装置でまず生成される画像を「一次医用画像」とし、その一次医用画像をコンピュータで再構成して作成される画像を「二次医用画像」とする。

一次医用画像のデジタル画像フォーマットは、画像撮影装置を開発した企業独自の画像フォーマットであったが、現在、米国放射線学会（ACR）と北米電子機器工業会（NEMA）が開発した CT や MRI、CR など撮影した医用画像のフォーマットとそれらの画像を扱う医用画像機器間の通信プロトコルを定義した規格（DICOM : Digital Imaging and Communication in Medicine）にほぼ統一されている。この一次医用画像のフォーマットの標準化は、二次医用画像処理技術を飛躍的に発展させる重要な要因の一つとなっている¹⁾。

以下、二次医用画像の臨床医学への応用について、診断支援、治療支援、医学教育支援、遠隔医療支援の四つの領域に分けて概説する。

■11 群-4 編-10 章

10-2 二次医用画像の臨床応用

(執筆者：小山博史) [2008 年 12 月 受領]

10-2-1 診断支援

(1) 仮想内視鏡

仮想内視鏡は、CT あるいは MRI 画像を 3 次元再構成し、あたかも内視鏡検査を行っているかのような画像を提示することである。対象となる臓器は、大腸と気管支であり、前者は大腸がん検診、後者は肺がん検診で行われている大腸内視鏡検査や気管支鏡検査の代替検査として有用とされている。代替検査として有用視される最大の理由は、両方の検査が人体に対する侵襲性が比較的高いことによる。Mayo Clinic の Johnson らは、50 歳以上の無症状の 2600 人に対して通常の大腸内視鏡で腺腫あるいは腺がんと診断された症例における仮想内視鏡での検出精度についての臨床試験を行った。その結果、10 mm 以上の場合感度 90 %で、6~9mm の大きさの場合は 78 %であり大腸がんのスクリーニング検査として仮想内視鏡は有用であると報告している²⁾。

(2) 血管狭窄程度の定量化

心臓の冠動脈や脳血管の狭窄に対する治療として侵襲性が高い手術を必要としないカテーテルを用いた血管内腔拡張術などの血管内治療 (Vascular IVR) が血管狭窄などの治療に革命をもたらしている。血管内治療 (Vascular IVR) とは、血管内に挿入した医療器具によって行われる治療であり、血管内手術 (Intravascular surgery) とも呼ばれている。このような治療を行ううえで、手術を行うべきか IVR を行うべきかの判断が難しいことが少なくなく、治療適応を決めるためには動脈病変の精細な定量化を必要とする。これもデジタル化により自動的または半自動的に行うことが可能である。動脈硬化などの血管狭窄の程度を測定するためには血管造影や超音波検査の一次医用画像が用いられる。

(3) 画像診断支援

臨床医学における画像診断支援には、乳がん検診や肺がん検診で撮影される X 線画像の医師による画像診断の精度の向上を支援する目的で行われるものと、病理顕微鏡診断や染色体異常検査のように顕微鏡画像を画像処理することで診断精度を向上させることを目的として情報工学技術が応用されるものがある。

James らは、乳腺撮影画像について Computer Aided Detection (CAD) が二人の読影医の意見が異なったような場合に有効であるとし³⁾、肺野における腫瘍陰影について Shiraiishi らは、CAD は読影医の腫瘍の特定と分類を支援する結果を示している⁴⁾。更に、近年 CR 画像からではなく、CT 画像から肺腫瘍を検出する手法も開発されている⁵⁾。

臨床検査領域における顕微鏡検査画像に対する画像情報工学技術の応用例は多い。染色体異常の診断では、Karyotype (核型) の決定が必要であり、この染色体の特定にパターン認識技術が使用されている。その診断論理は、人の 23 対の染色体は、互いの大きさとセントロメアの位置で分類されていることに基づいている。染色体の構造の観察が可能となった状態で撮影し、その画像をデジタル化する。コンピュータは、濃淡の変化を解析し、それぞれの

染色体を確認した後にペアで染色体をグループに分類される。まず、染色体ごとに染色体の軸が決められ、染色体ごとに軸に垂直にピクセル密度が計算される。ピクセル密度が最小密度のところをセントロメアの位置とする。染色体の長さで最小値の位置で染色体が分類されることになる。Fuchs らは、9 種類の異なった腎細胞がんの核を免疫染色した画像をコンピュータに学習させた後、133 人の腎がん患者から作成した病理組織画像を CAD で処理したところ、専門医とほぼ同様の診断結果であったと報告している⁶⁾。

■11 群-4 編-10 章

10-3 治療支援

(執筆: 小山博史) [2008 年 12 月 受領]

10-3-1 計画支援

(1) 外科手術の術前検討支援

外科手術の術前検討には医用画像は必須のものである。今までは医用一次画像が用いられてきたが、近年の画像処理技術と計算機の性能の向上により臓器や血管を 3 次元再構成して表示しながら術前検討が行われるようになってきた。

3 次元再構成画像は、通常 CT あるいは MRI 装置で作成した医用一次画像データを画像処理用計算機に取り込み、必要に応じて Positron Emission Tomography (PET) のような機能画像とフュージョンされた画像が生成される。フュージョン画像の作成方法には、相互情報量最大化法^{7),8)}などが提案されている。

医用画像の 3 次元再構成の特徴は、他の Computer Graphics (CG) でのプリミティブを用いたモデル作成ではなく、医用一次画像から 3 次元再構成モデルを作成することにある。レンダリング法としてはサーフェスレンダリング法とボリュームレンダリング法の二つがある⁹⁾。サーフェスレンダリングの場合には、二次元画像から目的とする臓器や血管、神経などを抽出する。抽出したデータから Isosurfacing 処理し、形状モデルを作成する。通常、形状モデルのデータ量は非常に大きいため、形状モデルを構成している多面体数を削減する。その後、シェーディング処理や色彩を設定し、目的とするモデルを作成する。

Interactive Computer Graphics (ICG) 技術を用いたリアルタイムレンダリング表示するためには、コンピュータの性能に応じてデータ量を削減する必要がある¹⁰⁾。データ量の削減は当然ながら表示精度を低下させる。そのため、臨床上的利用目的を明確にし、その目的に応じて表示内容の精度を確保し、できるだけ少ないデータ量のモデルを作成することが求められる。

(2) 放射線治療における照射範囲や照射量の設定などの放射線治療計画の最適化支援

放射線治療は主にがん治療に用いられている。放射線治療の課題は、画像上でがんと診断された部位への正確な放射線照射とがん周囲の正常組織への損傷を最小限度に抑えることにある。がん組織と正常組織との再生時間には差があることを利用して放射線源と放射線照射量、照射間隔、照射範囲が決められ、更に患者ごとにがん組織の放射線感受性、がんの進行度や全身状態、日常生活活動 (Activities of Daily Living) など総合的に勘案して治療計画が決められている。画像情報処理技術は、CT や MRI などの一次医用画像から標的となるがんの範囲と損傷を受けてはいけない神経や血管の特定、これらを基にした放射線照射範囲の推定、放射線照射装置と患者の照射部位の体表との位置決め利用されている。特に、照射範囲の推定は 2 次元画像処理から 3 次元画像処理の導入により飛躍的に精度が向上している。このような情報工学技術は強度変調放射線治療 (Intensity Modulated Radiation Therapy : IMRT) 法として現在結実し、実用化されている¹¹⁾。

(3) VR シミュレータを用いた手術計画支援

外科手術に対する高い安全性のみならず患者に侵襲性の低い手術（鏡視下手術など）が求められている。このため、外科医は、今までの開腹手術や開胸手術だけでなく、新しい鏡視下手術を習得する必要がある。一般的学習理論では、手技の習得には例えば鏡視下の胃底部造瘻術では約 20 例が必要とされている¹²⁾。しかし、臨床医が経験できる症例数には限界がある。欧米では、大学病院を中心に手術手技の生涯教育・訓練センターが設置され、生涯教育・訓練が行われている。その手術教育・訓練の多くは、模型や動物が用いられていたが、近年、医用 VR シミュレータが導入され鏡視下手術における基本手術手技の教育への有効性が報告されている¹³⁾。

医用 VR シミュレータの利点は、航空機の飛行シミュレータを用いたパイロットの訓練と同様に、患者に傷害を与えず、いろいろな手術の状況を仮想空間内に構築し、習得できるまで何度も疑似体験ができることにある。また、手技のログデータを測定することも可能であり、習得レベルの客観的データの収集と習得手技レベルの客観的評価も可能となる。一方、現段階の医用 VR シミュレータ側の現時点での課題としては、仮想空間内の臓器モデルや腸間膜などの組織モデルの現実味が低いこと、臓器と周辺組織との融合画像表示が困難であったが、近年高性能の GPU (Graphic Processing Unit) の登場により徐々に解決しつつある。しかし、個々の症例ごとのモデル作成には、CT や MRI からの一次医用画像から訓練用モデルを作成する処理の自動化技術開発が求められる。

手術手技の訓練には、高精細の仮想モデルの表示だけでなく、血管の移動や腸間膜の剥離、切開などの操作感の体験も必須となる。そのために訓練者への触感の提示や非剛体である血管や臓器の生理学的変化表示がリアルタイムに表示されることが必要となる。VR シミュレータを用いた手術計画の支援を行うためには、特に症例ごとの仮想モデルを一次医用モデルから手術予定日まで迅速に作成し、体験できる統合システムを開発する必要がある。

10-3-2 治療実施支援

情報工学技術を用いた外科手術実施支援の目的は、手術施行中の手術の安全性と手術精度の向上にある。このような情報工学システムを一般的に手術ナビゲーションシステムと称する。初期には、大腿骨骨折に対する人工骨頭置換術¹⁴⁾や脳神経外科領域での定位脳手術や脳腫瘍摘出術¹⁵⁾などで実用化されてきた。

基本的手順は、まず、症例ごとに CT あるいは MRI 撮影時に体表にマーキングを行ってうでで撮影し、一次医用画像を作成する。その画像データを手術ナビゲータシステムに読み込む。手術ナビゲーションシステムは、現実空間座標測定装置と接続されている。このため、CT あるいは MRI 撮影した際、マーキングした体表の位置座標とナビゲータ上に表示されたマーキングの位置座標を合わせることで、現実空間座標系とナビゲータ内の座標系が統合される。次に、操作や穿刺などを行うための手術器具の位置や動きを手術中リアルタイムに計測するために手術器具にセンサを設置する。最後に、センサを付けた手術器具を先に述べた体表のマーカを指すことで、現実空間上の体表の座標系と手術器具の座標系と CT や MRI の座標系の三つの座標系がナビゲーションシステム内で統合されることになる。これにより、事前に操作上手術器具が接触してはいけない神経や血管（肉眼上表面から確認できない場合など）があれば事前にナビゲーション内にその情報を入力することで、臓器の裏側にあって

肉眼的に確認できない場合などに、それらの神経や血管に手術器具が接触しそうなときに警告を発することが可能となる。

10-3-3 治療評価支援

臨床医学における診断や治療法の評価を検証する研究を臨床研究といい、診断法や治療法効果の評価には評価項目（エンドポイント）があり、がん治療の場合にはがんの大きさが放射線治療や薬物治療効果のエンドポイントとして利用される。肺がんや乳がんでは、専門医は今まで一次医用画像フィルムを読影し、フィルム上のがんと診断した部位の大きさを手動計測していたが、医用画像のデジタル化によりモニタ画面上で画像処理アプリケーションの機能を用いてがんの大きさや距離の計測が可能となっている。がん診断以外でも、近年アルツハイマー症例での記憶担当領域とされる海馬の体積計算（Volumetry）を行い、診断に応用することも可能となっている¹⁶⁾。

このように、デジタル画像処理技術を用いた正確な評価対象の測定により、症例の特徴と治療方法とその効果に関する統計解析が可能となり、精度の高い医療の実現にもつながることが期待される。

■11 群-4 編-10 章

10-4 医学教育訓練支援

(執筆者：小山博史) [2008 年 12 月 受領]

医用画像の医学教育訓練支援の歴史は古い。医学診断支援と医学実践手技訓練に分けられる。まず、医学診断支援への医用画像の応用には、医学部卒業前における基本的画像診断法の教育訓練に用いられてきた。また、卒後は生涯教育や専門医取得のために利用されている。一次医用画像を用いた医用画像データベースがインターネット上にも公開されるようになった。近年では、内視鏡や超音波検査で撮影された動画のデータベースや3次元形状モデルなども公開されつつある。また、病理分野では Virtual Microscopy (仮想顕微鏡) というデータベースシステムが病理部門でも導入され、患者ごとの顕微鏡画像がデジタル化され、疾患別検索や類似症例検索も可能となり病理診断についての教育訓練に応用されるようになってきている¹⁷⁾。しかし、このような情報システムを用いた学習者の評価機能を有するものは現時点ではまだ少ない。

医学実践訓練への医用画像情報処理技術の応用としては VR シミュレータがあることは前述したとおりである。外科教育側としてのニーズは大きいにもかかわらず、技術的には仮想空間の現実味がまだ不足している。特に、触覚を体験できる手術体験用触覚提示装置は極めて少ない。この手術操作の際の反力生成機構については、ロボット外科手術支援システムにおける重要な工学技術要素であるにもかかわらず現状では実装された例は少ない(詳細は別章参照)。

■11 群-4 編-10 章

10-5 Tele-expertise : 専門知識や技術の転送

(執筆者：小山博史) [2008年12月 受領]

これからの医療社会において医療情報の安全な交換技術の構築・普及は、安心安全な医療社会を実現するうえで重要な要素の一つである。

臨床医学の実践には、特に専門的かつ幅広い知識を要し、その進歩も著しい。このため、医学における情報量も爆発的に増大し、特に医用画像を用いた診断、治療の進歩は日進月歩である。このため、医療者間の高度な専門知識や技術の相互交換と連携支援は必須となっている。特に、診断が困難である場合や手術が難しい場合に既に保存された医療情報へのアクセスを必要とする。また、医療者間や医療者と患者間で交換された医療情報の保存も必要となる。このような医用コンサルテーションやコミュニケーション技術には、画像圧縮技術、音声や映像処理技術、遅延補間技術などが含まれており、一つのコンピュータの中に統合され、インターネット接続されているコンピュータから容易に行えるようになってきている。

この実践上課題となるのは患者の個人情報保護の問題である。一次医用画像情報の DICOM 内の個人情報を削除する連結不可能匿名化技術や安全なデータ転送を可能とする高度なセキュリティ技術の実用化が必要となる。HPKI (Health Care Public Key Infrastructure) はその社会情報基盤とされ、上記のような医用画像の安全な転送や医療分野の多地点の症例カンファレンスを行ううえで広く普及されるべきものである¹⁸⁾。

■参考文献

- 1) <http://medical.nema.org/>
- 2) C. D. Johnson, M. H. Chen, A. Y. Toledano, J. P. Heiken, A. Dachman, M. D. Kuo, C. O. Menias, B. Siewert, J. I. Cheema, R. G. Obregon, J. L. Fidler, P. Zimmerman, K. M. Horton, K. Coakley, R. B. Iyer, A. K. Hara, R. A. Halvorsen Jr., G. Casola, J. Yee, B. A. Herman, L. J. Burgart, P. J. Limburg, "Accuracy of CT colonography for detection of large adenomas and cancers," N. Engl. J. Med., vol.359, no12, pp.1207-1217, Sep. 2008; Erratum in: N. Engl. J. Med., vol.359, no.26, p.2853, Dec. 2008.
- 3) J. J. James, E. J. Cornford, "Does computer-aided detection have a role in the arbitration of discordant double-reading opinions in a breast-screening programme?," Clin. Radiol., vol.64, no1, pp.46-51, Jan. 2009; Epub. 2008 Sep. 4.
- 4) J. Shiraishi, H. Abe, F. Li, R. Engelmann, H. MacMahon, K. Doi, "Computer-aided diagnosis for the detection and classification of lung cancers on chest radiographs ROC analysis of radiologists' performance," Acad. Radiol., vol.13, no.8, pp.995-1003, Aug. 2006.
- 5) T. W. Way, L. M. Hadjiiski, B. Sahiner, H. P. Chan, P. N. Cascade, E. A. Kazerooni, N. Bogot, C. Zhou, "Computer-aided diagnosis of pulmonary nodules on CT scans: segmentation and classification using 3D active contours," Med. Phys., vol.33, no.7, pp.2323-2337, Jul. 2006.
- 6) T. J. Fuchs, P. J. Wild, H. Moch, J. M. Buhmann, "Computational pathology analysis of tissue microarrays predicts survival of renal clear cell carcinoma patients," Med. Image Comput. Comput. Assist. Interv. Int. Conf. Med. Image Comput. Comput. Assist. Interv., vol.11(Pt 2), pp.1-8, 2008.
- 7) F. Maes, A. Collignon, D. Vandermeulen, G. Marchal, P. Suetens, "Multimodality image registration by maximization of mutual information," IEEE Trans. Med. Imaging, vol.16, no.2, pp.187-198, Apr. 1997.
- 8) J. P. Pluim, J. B. Maintz, M. A. Viergever, "Mutual-information-based registration of medical images: a survey," IEEE Trans. Med. Imaging, vol.22, no.8, pp.986-1004, Aug. 2003.
- 9) J. K. Udupa, H. M. Hung, K. S. Chuang, "Surface and volume rendering in three-dimensional imaging: a comparison," J. Digit Imaging, vol.4, no.3, pp.159-168, Aug. 1991.
- 10) D. A. Bowman, S. Coquillart, B. Froehlich, M. Hirose, Y. Kitamura, K. Kiyokawa, W. Stuerzlinger, "3D user

interfaces: new directions and perspectives,” IEEE Comput. Graph. Appl., vol.28, no.6, pp.20-36, Nov.-Dec. 2008.

- 11) Intensity Modulated Radiation Therapy Collaborative Working Group, “Intensity-modulated radiotherapy: current status and issues of interest,” Int. J. Radiat Oncol Biol. Phys., vol.51, no.4, pp.880-914, Nov. 2001.
- 12) G. Ahlberg, O. Kruuna, C. E. Leijonmarck, J. Ovaska, A. Rosseland, R. Sandbu, C. Stromberg, D. Arvidsson, “Is the learning curve for laparoscopic fundoplication determined by the teacher or the pupil?,” Am. J. Surg., vol.189, no.2, pp.184-189, Feb. 2005.
- 13) K. Gurusamy, R. Aggarwal, L. Palanivelu, B. R. Davidson, “Systematic review of randomized controlled trials on the effectiveness of virtual reality training for laparoscopic surgery,” Br. J. Surg., vol.95, no.9, pp.1088-1097, Sep. 2008.
- 14) R. Hofstetter, M. Slomczykowski, M. Sati, L. P. Nolte, “Fluoroscopy as an imaging means for computer-assisted surgical navigation,” Comput. Aided. Surg., vol.4, no.2, pp.65-76, 1999.
- 15) R. D. Johnson, R. J. Stacey, “The impact of new imaging technologies in neurosurgery,” Surgeon, vol.6, no.6, pp.344-349, Dec. 2008.
- 16) R. A. Heckemann, A. Hammers, D. Rueckert, R. I. Aviv, C. J. Harvey, J. V. Hajnal, “Automatic volumetry on MR brain images can support diagnostic decision making,” BMC Med. Imaging, p.8-9, May 2008.
- 17) M. W. Braun, K. D. Kearns, “Improved learning efficiency and increased student collaboration through use of virtual microscopy in the teaching of human pathology,” Anat. Sci. Educ., vol.1, no.6, pp.240-246, Nov. 2008.
- 18) H. Takeda, Y. Matsumura, K. Nakagawa, T. Teratani, Z. Qiyang, H. Kusuoka, M. Matsuoka, “Healthcare public key infrastructure (HPKI) and non-profit organization (NPO): essentials for healthcare data exchange,” Stud. Health Technol. Inform., vol.107 (Pt 2), pp.1273-1276, 2004.