

特集

医学・工学連携型研究事業神戸プロジェクト

医用画像解析の課題

—画像取得とコンピュータ処理の負荷バランスの問題—

大阪大学大学院医学系研究科多元的画像解析分野

佐藤嘉伸

はじめに

近年のCTやMR装置などの医用画像撮像技術の進歩に伴い、その情報量が膨大なものとなり、CT/MRデータのコンピュータ解析の重要性が高まっている。臓器形状やその容積・(血管)径・(壁・皮質・軟骨)厚といった客観的かつ定量的情報が、コンピュータ解析により、三次元的かつ全自動に(あるいはわずかな手入力で)獲得することが可能になってきている。ここで注意すべき点は、コンピュータによる画像解析では、「原画像に存在する情報のみを取り出せる」ということである。撮像段階で、必要とする十分な情報を含んでいない画像データ、すなわち、組織のコントラストや解像度が本質的に不足している画像データからは、どんなに高度な画像解析手法を駆使しても、処理により得られる情報の信頼性と精度は必然的に限られたものになる。よって、十分な解像度/組織識別のためのコントラストが得られる方法で画像取得を行う必要がある。実際、撮影プロトコルの最適化により、コンピュータによる後処理における解析精度や自動化の信頼性が驚くほど向上することがある。しかしながら、一方で、十分な解像度や組織識別の情報を得るためには、X線被曝量・撮影時間・記憶容量などが増加し、患者や医療現場に負荷をかけることになる。近年、臨床におけるコンピュータ画像解析の役割の重要性が増すにつれ、画像取得とコンピュータ処理の負荷をどのようにバランスさせるかが、重要

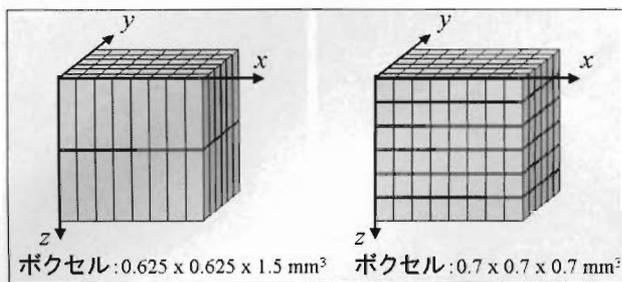
なポイントになってきている。本稿では、この問題について検討する。

コンピュータ画像解析：研究から臨床へ

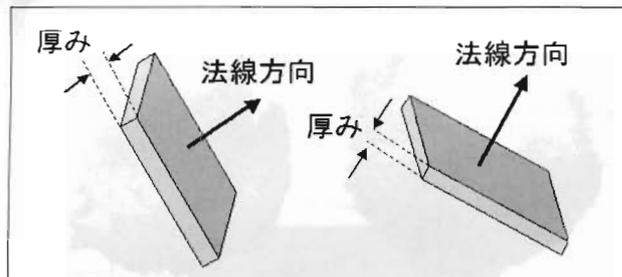
従来、医用画像のコンピュータ解析は、研究レベルにすぎず、臨床に役立つレベル、すなわち患者の利益に対してかかるコストが見合うレベルではなかった。当然ながら、臨床現場における画像取得のプロトコルは、断層像による読影、あるいは三次元描画技術が使われたとしてもMIP像による読影を前提として、得られる診断情報/検査効率/被曝量などのバランスで決められ、コンピュータ解析を目的として、プロトコルを最適化するという事は考えにくいことであった。しかしながら、この2、3年で状況が変化してきた。医用画像撮影装置(特にCTスキャナ)における時空間解像度、および、コンピュータの計算パワーの両方が飛躍的に向上し、コストに見合う形で、臨床的に有用なコンピュータ解析が可能になってきた。このような背景の下、コンピュータ解析により得られる情報を考慮して、負荷バランスを最適化する画像取得プロトコルの検討が必要になってきた。

画像取得における負荷要因

コンピュータによる後処理の精度や信頼性の向上の観点からみた場合、画像取得において、以下の2つが主な負荷の要因になると考えられる。



a



b

図1 撮像系と撮影対象

- a: 撮像系のモデル。異なるz軸解像度の2つの撮像系を示している。図において、1つ1つの直方体の小箱がボクセルに相当する。
- b: 皮質状の撮影対象のモデル。局所的にみた場合、皮質構造は厚みと法線方向という2つの属性でモデル化できる。

高解像度画像の取得

近年、マルチスライスCTの実用化に伴い、特に体軸方向の解像度が飛躍的に向上した。高解像度撮影により、臓器形状の抽出精度および(血管)径・(壁・皮質・軟骨)厚の計測精度を向上させることができる。しかしながら、体軸方向に関して高解像度画像を取得するためには、CTの場合、患者に対して被曝量という負荷をかけることになる。MRの場合は、高解像度化のためには撮影時間の大幅な増大が検査効率の観点からも患者に対しても負荷となる。

多重画像の取得

同一対象に対して、CTの場合は異なる造影時相、MRの場合は異なるパルスシーケンスで撮影することにより、異なるコントラストの多重画像を取得することができる。画像の多重化により、組織分類の識別精度を向上させることができる。画像の高解像度化と同様に、CTの場合は被曝量、MRの場合は撮影時間の増大が負荷となる。

上の2つの要因に加えて、さらに、データ量の増大という負荷を医療現場にかけることを忘れてはならない。近年、通信および記憶装置ともに大容量になったとはいえ、データ量の増大自体が、被曝量や検査時間と並んで、重要な負荷項目である。

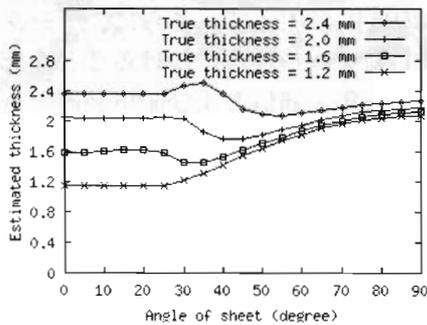
高解像度画像取得における負荷バランス

コンピュータ解析に基づく診断において出てくる典型的な疑問を以下にあげる。

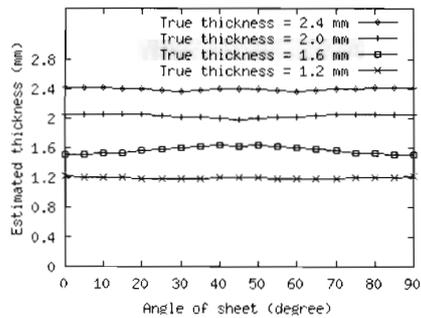
- ・ 仮想内視鏡像における胃壁のひだの描出精度はどの程度か？
- ・ CT/MRボリュームデータから計測した血管径/関節軟骨厚の計測精度はどの程度か？

描出精度や計測精度は、画像取得時の解像度に依存する。一般に、SN比を落とすことなく解像度を十分にあげることができれば、描出能や精度は、十分に向上するといえる。しかし実際には、限りなく解像度をあげることは困難で、また一方で、不十分な解像度で十分な精度が得られないという事態も避けなければならない。問題は、バランスポイントをどこに置くかである。そのためには、客観的な基準が必要である。すなわち、負荷バランスを最適化するには、解像度と描出能/精度の関係を明らかにすることが必要である。

解像度に関して、医用画像において特に注意を要することは、一般にz方向の解像度がxy面内解像度に比べて劣ることが多いという点である(図1a)。このような場合、解像度の非等方性が原因となり、撮影対象の方向に依存して精度が変化する¹⁾。例えば、MRIによって、皮質状の組織(関節軟骨など)の厚み(図1b)を計測することを考える²⁾。図2は、図1aに示すそれぞれの解像度でMRI撮影したときに、皮質状組織の面の法線方向に依存して、厚み計測精度がどのように変化するかを示した図である。これは、MRIの撮像過程およびコンピュータ解析による後処理過程をシミュレートすることにより推定したものであり、実際のMR画像を用いた推定結果ともよく一致することが示されている³⁾。図2から、図1a左図の非等方性解像度では、法線方向とxy面のなす角度が25度以内の場合には、精度が安定しているが、それ



a



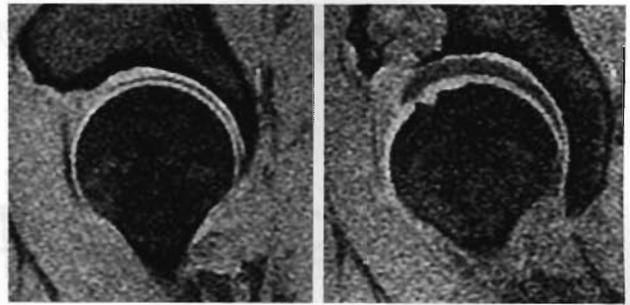
b

図2 厚み計測精度と皮質状対象の法線方向の依存性を表すグラフ

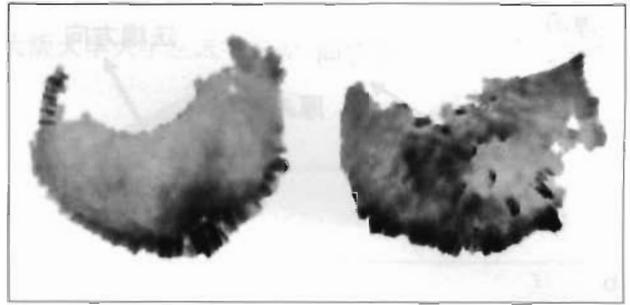
- a : 非等方性解像度 (図1a左図) でMR画像の取得がなされた場合の厚み計測精度
 b : 等方性解像度 (図1a右図) でMR画像の取得がなされた場合の厚み計測精度。横軸は、法線方向とxy面のなす角度。縦軸は、計測される厚みである。z方向の解像度が劣る場合、法線方向とxy面のなす角度が0度のときに、パーシャルボリュームの影響が最も少ないと考えられる。グラフにおける各曲線は、真の厚みが、それぞれ1.2mm、1.6mm、2.0mm、2.4mmの場合に、計測される厚みが法線方向に依存してどのように変化するかを示している。

以上になると実際の厚みとの乖離が大きくなることがわかる。図1a右図のような等方性 (isotropic) 解像度で撮影することがひとつの理想であるが、図1a左図の撮影条件と同じSN比を得るためには、数倍の撮影時間が必要になり、検査効率が極端に悪くなる。しかし、見方を変えれば、図2aより、撮影対象となる皮質状組織の法線方向分布が、xy面となす角度が25度以内に分布しているという条件を満たしていれば、図1aの解像度で撮影して、画像取得の負荷を増やすことなく十分な精度を達成可能であるといえる。実際、股関節軟骨において臨床的に重要な意味をもつ部分は、その条件を満たしている。

図3にMR画像から股関節軟骨厚分布可視化の例を示す⁴⁾。大阪大学病院では、当初、読影のみを目的としていたとき、股関節のMR画像を、図



a



b

図3 MRデータからの股関節軟骨領域のセグメンテーションと三次元的厚み分布の定量化

- a : MR画像 (サジタル像) (左: 正常、右: 病変)
 b : セグメンテーションされた軟骨厚み分布の三次元可視化 (Bottom view、暗い部分ほど厚い)。正常像 (左) では、荷重のかかる部分で厚みが増しているが、病変像 (右) では、その部分が損傷している。

1a左図よりもさらに劣るz方向解像度で撮影していたが、コンピュータ解析による軟骨厚計測を行うため図1a左図の解像度に変更し⁴⁾、この解像度で精度的にも十分であることが示された。図2に示すような客観的な基準を明確にすることにより、股関節軟骨という対象に対して、画像取得の負荷バランスを最適化する解像度を示すことができたといえる。

多重画像取得における負荷バランス

ここでは、CTデータからの肝臓体積計算の例を取り上げる。生体肝移植においては、ドナーの肝臓体積が手術計画を立てる上で不可欠なものである。最近、CTデータから肝臓体積を自動的に計測するコンピュータ解析法が開発された

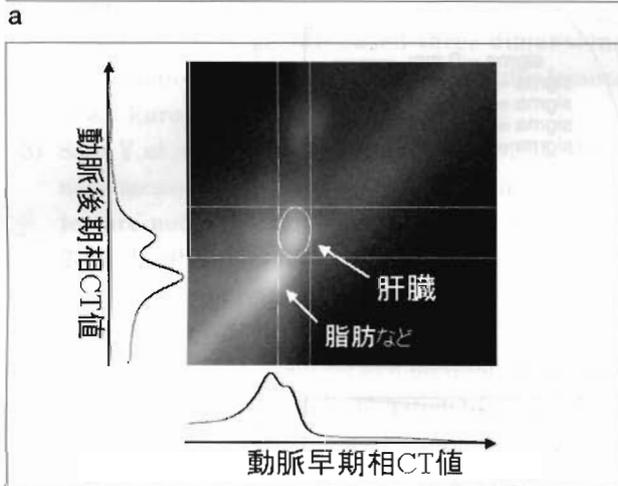
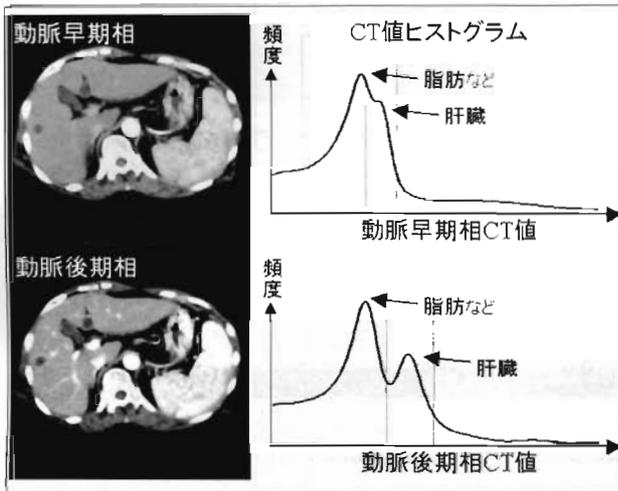


図4 肝臓CTデータのCT値ヒストグラム

a: 動脈早期相と後期相のそれぞれのヒストグラム。
b: 動脈早期相と後期相を組み合わせた結合ヒストグラム。明るさが頻度を表している。

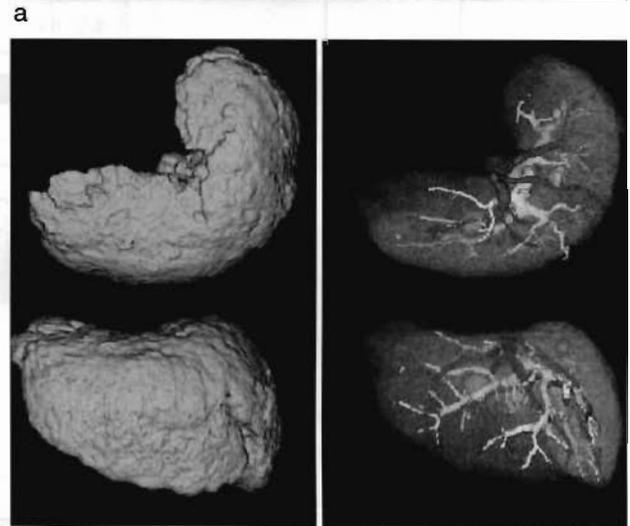
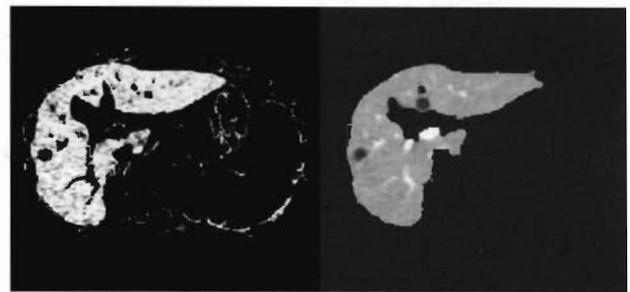


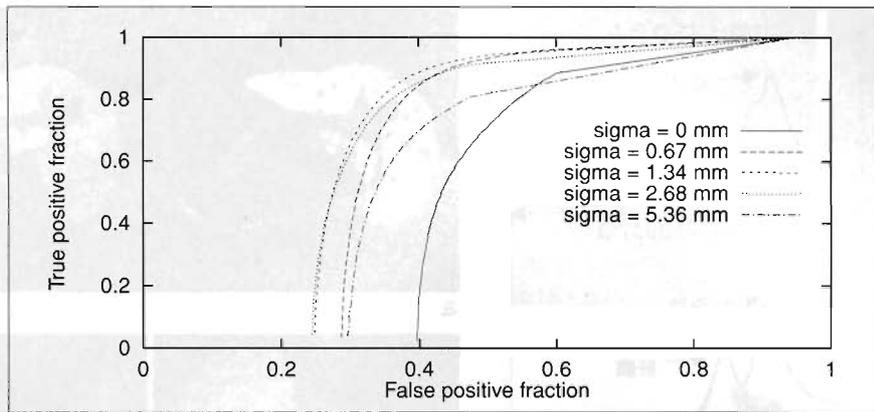
図5 CTデータからの肝臓領域の自動セグメンテーションの処理過程

a: 肝臓領域の強調画像(左)と抽象結果(右)
b: セグメンテーション結果の三次元可視化
(左: 肝臓表面の可視化、右: 肝臓内部の血管と腫瘍の可視化)

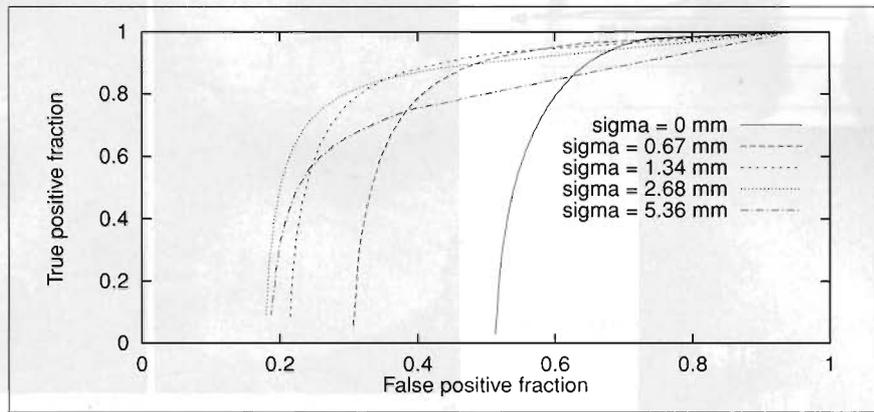
[Virtual Place M, (株) 医用画像工学研究所、東京] 6, 7)。この方法では、造影効果により肝臓領域が強調されることを利用して、肝臓領域抽出の信頼性を向上させている。いうまでもなく、画像取得段階での肝臓組織のコントラスト情報が、肝臓領域抽出精度向上のキーポイントとなる。大阪大学病院では、断層像読影における肝癌診断精度の向上のため、肝臓のCTダイナミック検査において、1回の息止め(動脈相)の間に2回のスキャン(動脈早期相と後期相)をすることで、コントラストの異なる2時相の多重画像データを取得している^{8)*}。これら2時相における異なるコントラストを組み合わせることにより組織分類の性能が

大幅に向上し、結果として肝臓領域の抽出精度が向上することが示された⁷⁾。

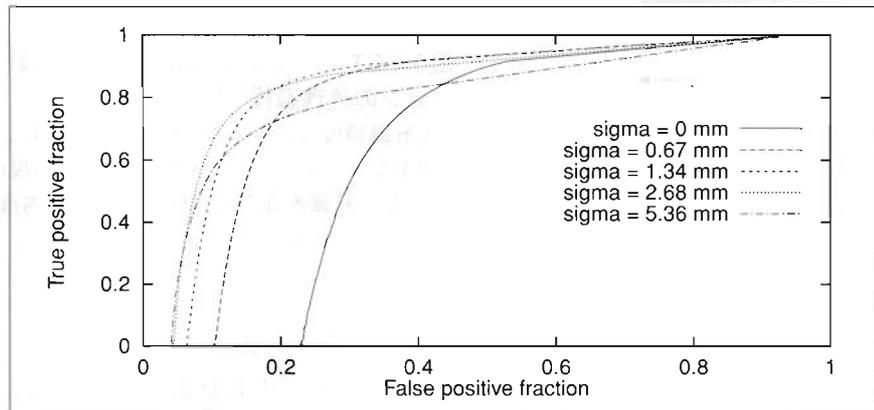
図4に、1時相単一画像のヒストグラムと2時相多重画像の結合ヒストグラムを示す。肝臓領域に対応するヒストグラムのピークの分離性がより良好になっている。図5にCT画像からの肝臓領域抽出結果を示す。図6に、マニュアルトレースとの比較により、コンピュータにより抽出された肝臓領域に対するROC曲線を示す。この図から、客観的に、2時相多重画像により組織分類における性能が大幅向上していることが示されている。生体肝移植におけるドナー肝臓体積計測は、もはや、動脈相息止め2回スキャン法が開発された本



a



b



c

図6 肝臓領域の抽出性能を表すROC曲線

a : 動脈早期相単一画像を用いた場合

b : 動脈後期相単一画像を用いた場合

c : 2時相多重画像を用いた場合

CT画像を平滑化処理を施してROC曲線を計算した。各平滑化パラメータごとにROC曲線を表示している。

来の目的である、読影の際の肝臓診断能の向上とは別目的である。ある大学病院では、生体肝移植の手術計画に用いる肝臓領域の抽出精度向上を目的として、息止め2回スキャン法を採用する方向で検討している。これは、コンピュータ解析結果の向上を目的として、プロトコルを最適化を行お

うとしている事例であり、息止め2回スキャン法の採用を決定するには、画像取得における負荷(1回分の余分な被曝)を増やしても、コンピュータ解析結果の向上がその負荷に見合うという判断が必要になる。図6は、その判断のためのひとつの客観データを示しているといえる。

まとめ

画像取得の段階で、解像度の選択や多重画像の取得をどのように行うかにより、コンピュータ解析の性能が変わってくる。高解像度化や多重画像の取得により、被曝量、検査時間、データ量など

負荷がかかるので、客観的な基準に基づいて、負荷バランスを決定する必要がある。本稿では、具体的な事例を取り上げて、この負荷バランスの問題を議論した。

[注釈]

*：動脈相の息止め2回スキャンは、マルチスライスCTによる高速高解像度スキャンが可能になって初めて可能になったプロトコルである。

文献

- 1) 佐藤嘉伸：わかりやすい3次元画像処理の基礎：等方ボクセルの利点について. 画像診断 20(5) : 499-508, 2000
- 2) Nakanishi K et al: MR-based three-dimensional presentation of cartilage thickness in the femoral head. European Radiology (in press)
- 3) Sato Y et al : Limits to the accuracy of 3D thickness measurement in magnetic resonance images, lecture notes in computer science(Proc. MICCAI 2002, Forth International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention). 2208 : 803-810, 2001
- 4) Sato Y et al : A fully automated method for segmentation and thickness determination of hip joint cartilages from 3D MR data. Computer Assisted Radiology and Surgery: 15th International Symposium and Exhibition (CARS2001), Berlin, 2001
- 5) Nakanishi N et al : MR evaluation of the articular cartilage of the femoral head during traction, Acta Radiol 40 : 60-63, 1999
- 6) 医療用画像の領域抽出方法. 特願2001-152523, 平成13年5月22日
- 7) 榎本 潤ほか：マルチスライスCT画像からの肝臓領域自動抽出. 電子情報通信学会論文誌 D-II (in press)
- 8) Murakami T et al : Hypervascular hepatocellular carcinoma: detection with double arterial phase multidetector row helical CT. Radiology 218 : 763-767, 2001