

体幹部 X 線 CT 画像における複数臓器に対する 確率アトラスの構築と性能評価

澤田 純奈[†], 林 達郎[†], 周 向荣[†], 陳 華岳^{††}, 原 武史[†], 江 慧研^{†††††}

横山 龍二郎^{†††}, 兼松 雅之^{†††}, 星 博昭^{††††}, 藤田 広志[†]

[†] 岐阜大学大学院医学系研究科再生医科学専攻知能イメージ情報分野 〒501-1194 岐阜県岐阜市柳戸 1-1

^{††} 岐阜大学大学院医学系研究科病体制御学講座解剖学分野 〒501-1194 岐阜県岐阜市柳戸 1-1

^{†††} 岐阜大学医学部附属病院放射線部 〒501-1194 岐阜県岐阜市柳戸 1-1

^{††††} 岐阜大学大学院医学系研究科腫瘍制御学講座放射線医学分野 〒501-1194 岐阜県岐阜市柳戸 1-1

^{†††††} 東北大学 中国瀋陽市

E-mail: sawada@fjt.info.gifu-u.ac.jp

あらまし 計算機支援診断システムにおいて人体の解剖学的構造の自動認識は重要な課題である。解剖学的構造を表現する手法としてアトラスが挙げられる。本研究では、体幹部 CT 画像を用い、複数の臓器に対してアトラスを構築し、評価を行う。実験では、CT 画像 91 症例に適用し、5 つの臓器において 2 種類のラベル画像を用いてアトラスの構築を行い、性能を比較した。

キーワード 計算機支援診断, 確率アトラス, 臓器の位置

Probabilistic atlas construction and performance evaluation of multiple organs in X-ray torso CT Images

Junna SAWADA[†] Tatsuro HAYASHI[†] Xiangrong ZHOU[†] Huayue CHEN^{††}

Huiyan JIANG^{†††††} Takeshi HARA[†] Ryujiro YOKOYAMA^{†††}

Masayuki KANEMATSU^{†††} Hiroaki HOSHI^{††††} Hiroshi FUJITA[†]

[†] Department of Intelligent Image Information, Division of Regeneration and Advanced Medical Sciences, Graduate School of Medicine, Gifu University 1-1 Yanagido, Gifu City, Gifu, 501-1194 Japan

^{††} Department of Anatomy, Division of Disease Control, Graduate School of Medicine, Gifu University 1-1 Yanagido, Gifu City, Gifu, 501-1194 Japan

^{†††} Department of Radiology Services, Gifu University Hospital 1-1 Yanagido, Gifu City, Gifu, 501-1194 Japan

^{††††} Department of Radiology, Division of Tumor Control, Graduate School of Medicine, Gifu University 1-1 Yanagido, Gifu City, Gifu, 501-1194 Japan

^{†††††} Northeastern University, ShenYang, China

E-mail: sawada@fjt.info.gifu-u.ac.jp

Abstract Automatic recognition of human anatomy in computer-aided diagnosis system is an important issue. Atlas may be used as a reference to represent the anatomy. In this study, we propose a method to construct the probability atlas of human organ regions in torso CT images and show the performance evaluation results of the atlas constructed for 6 kinds of inner organs based on a large CT image database. In the experiment, we constructed the atlas in the five organs from 91 cases of CT images, and compared the performance.

Keywords Computer-aided diagnosis, Probabilistic atlas, Organ localization

1. はじめに

近年、高速かつ高分解能で撮像可能な X 線 CT 装置の普及により、従来の CT 装置と比較して、人体の撮像時間の短縮やスキャン領域の拡大、高分解能な CT 画像の取得などが可能となった。撮像時間の短縮は、患者への被曝リスクを低減するため、侵襲性を抑えた検査において非常に有用である。医療機関では、精密検査や診断、放射線治療の計画を目的に体幹部領域の CT 撮像がしばしば行われる。この体幹部領域の CT 画像には、撮像目的の臓器や組織、および疾病などの位置情報だけでなく、他の臓器や組織、および疾病などの位置情報も含まれる。しかしながら、撮像領域の増加に際して情報量が爆発的に増えるため、読影医が数千枚にも及ぶスライス画像を読影し、CT 画像に含まれるすべての情報の解析は、時間的にも非常に困難である。また、多数症例の読影によって、疲労などの原因による対象病変の見落としや、対象病変以外の領域での見落としなどが起こる可能性も否定できない。そこで、医師の見落とし防止や作業負担低減のために、臓器の分割、認識、および病変の検出などの処理をコンピュータで自動的に行うことが考えられる。そのため、体幹部 CT 画像を用いた読影医の診断支援を目的とするコンピュータ支援診断や、治療計画などを補助するツールの開発に期待が集まっている。われわれも人体の解剖学的な構造の理解に基づく知的画像診断支援システムの開発を行っている[1]。

人体の解剖学的な構造は、単一臓器の位置、形状と複数臓器間の位置関係から構成されている。このシステムは、高精度な CT 像から組織ごとの解剖学的な正常構造を抽出・認識し、その統計的な変動も考慮したモデル化に基づく手法でデータベース化されたモデル画像と検査対象画像との比較により、異常部位を特定する。また、多臓器・多疾病の同時解析も可能になると期待されている。

モデルを構築する上で、試料画像から人体の解剖学的な正常構造を高精度で抽出する必要がある。しかしながら、ピクセルベースでの大域的な領域の抽出は、CT 値分布が重なる領域が存在するため困難である。

解剖学的な構造の中の臓器の位置に注目し、臓器の位置の推定手法として「確率アトラス」がしばしば利用される[2][3]。しかし、アトラス作成のために正確に臓器を手動抽出する必要があり、そのためには多くの時間が必要となる、という問題点がある。そこで、本研究では単純な手法を用いてアトラスを構築し、その性能評価を行う。

2. 実験試料

本研究で使用した CT 画像は、岐阜大学医学部附属

病院において GE 社製 LightSpeed Ultra (120 [kV], Auto [mA]), LightSpeed16 で撮影された体幹部 CT 画像 91 症例であり、これらはわれわれの CT 画像データベースから無作為に抽出した。症例の内訳は、男性 56 症例、女性 35 症例である。年齢構成は、17~88 歳(平均 60 歳)である。

CT 画像の濃度分解能は 12 [bit]、画像のマトリックスサイズは $512 \times 512 \times 784-1104$ [voxel]、解像度は 0.59-0.74 [mm]、スライス間隔は 0.62-0.64 [mm]、FOV は 320-380[mm]である。実験に用いた画像は、解像度の補間処理を行うため、解像度、スライス間隔ともに等間隔 (0.62-0.74 [mm]) である。

3. 方法

3.1. 確率アトラス

ここでは、臓器の確率アトラスの生成手法と、評価方法について記述する。大まかな流れは、まず多症例の正解ラベル画像を正規化し、同一座標空間に投影し、頻度を計算することで臓器の確率アトラスを生成する。確率アトラスの各画素の値 $atlas(x,y,z)$ は、次式のように表記できる。

$$atlas(x,y,z) = \sum_{i=1}^N \frac{I_i(x,y,z)}{N} \quad (1)$$
$$0 \leq atlas(x,y,z) \leq 1$$

ここで、 N は用いた症例数、 $I_i(x,y,z)$ は症例 i の (x,y,z) 座標に臓器領域が存在すれば 1、存在しなければ 0 とする関数である。

その後、確率アトラスを用いて、各症例に対する位置及び濃淡情報についての尤度画像を生成し、尤度画像に対して評価を行う[5]。これを生成した確率アトラスの性能とする。

確率アトラス生成には、箱状の臓器領域のラベル画像を用いたものと、真の臓器領域のラベル画像を用いたものをそれぞれ作成し、比較する(Fig.1)。

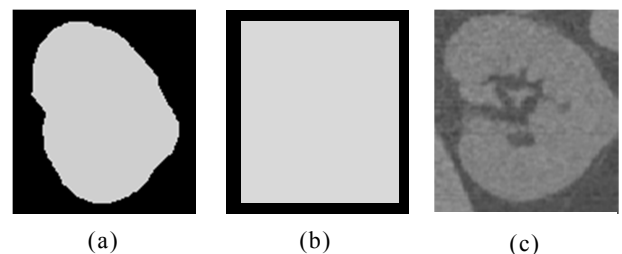


Fig.1 使用ラベル画像例 (左腎臓, coronal 断面)
(a) 真の臓器領域, (b) 箱状の臓器領域, (c) 原画像

3.1.1. ラベル画像

箱状の臓器領域は、箱の中に臓器がすべて含まれるような領域を抽出する。始点(x,y,z)と終点(xx,yy,zz)で表現する。

また、真の臓器領域の抽出では、まず、セグメンテーションにおいて有名なグラフカットアルゴリズム[6][7]による領域分割を利用し、大まかに抽出を行う。この抽出結果では、臓器に接する筋肉や血管など一部の過抽出領域、あるいは抽出不足の臓器領域が発生する。そこで、手動にて過抽出領域の削除、及び抽出不足領域の補完を行う。このようにして得られた2値画像を手動抽出ラベル画像として使用する。

3.1.2. 正規化

各 CT 画像は撮影範囲やスケール、骨盤の大きさ、人体の撮影位置等が異なるため、各症例の臓器領域を同じ座標系で表現（正規化）する必要がある。既存の手法では、人体組織・臓器を自動的かつ精密に把握する必要があり、現実的には実現が困難である[5]。そこで、本研究では単純に3次元CT像から人体の存在する箱状の領域を自動で認識し、これを基に正規化を行う。但し、体幹部CT画像において、体軸方向を見ると、すべてにおいて人体が存在するため、上下それぞれ肺野の最上部、恥骨結合の最下部で区切る。

正規化した臓器領域を同一座標空間に投影して、各空間位置に臓器領域である頻度を計算し、確率アトラスを生成する。

3.2. 評価方法

ROC (Receiver Operating Characteristic) 分析を参考にして以下の評価曲線を定義し、それを用いてアトラスの評価手法を検討する。すなわち、縦軸を真の臓器領域が抽出された割合(true extraction rate of organ region)、横軸を抽出された領域全体における真の臓器領域以外の割合(false extraction rate of organ region)として、各尤度画像のしきい値の変更によってプロットされる点を結び、描かれた曲線を「評価曲線」と定義する。このプロットでは、曲線が左上角に近づくほど臓器領域の抽出に有用であると評価できる。同じ手法を用いた評価が、横山らによって行われている[8]。また、この評価曲線下の面積の最大値は1.0であり、1.0に近いほどそのアトラスは臓器の抽出に有用であり、面積が1.0のアトラスは正解画像と同一となる。この評価曲線をすべての症例から求め、それらを平均したものを平均評価曲線と定義し、アトラスの性能評価の尺度とする。

4. 結果と考察

91 症例中 90 症例でアトラスを生成し残りの 1 症例に適用した (Leave-one-out 交差検定)。Fig.2 に箱状の

臓器領域、真の臓器領域それぞれのラベル画像を用いて作成した肝臓及び左腎臓のアトラスと原画像を比較した図を、Fig.3 に箱状の臓器領域を用いて作成したアトラスから生成した左腎臓尤度画像の例を示す。これらの図では、臓器の存在確率が高い画素ほど白く、低いほど黒く表現される。また、箱状の臓器領域、真の臓器領域それぞれのラベル画像を用いて作成したアトラスを評価した。例として左腎臓の平均評価曲線を Fig.4 に示す。また、各臓器のアトラスの評価曲線下の面積を Table 1 に示す。上段に箱状の臓器領域のラベル画像を用いて作成したアトラスの結果、下段に真の臓器領域のラベル画像を用いて作成したアトラスの結果を示す。

全ての臓器において2つのアトラスの差をみると、0.01-0.05 とあまり差はなく、アトラスの抽出性能はほぼ同程度と考えられる。また、アトラス作成にかかる時間が箱状の領域を用いたものでは、真の臓器領域を用いたものの十分の一程度である。これらの結果から、箱状の臓器領域を用いてアトラスを作成することは有用であると考えられる。

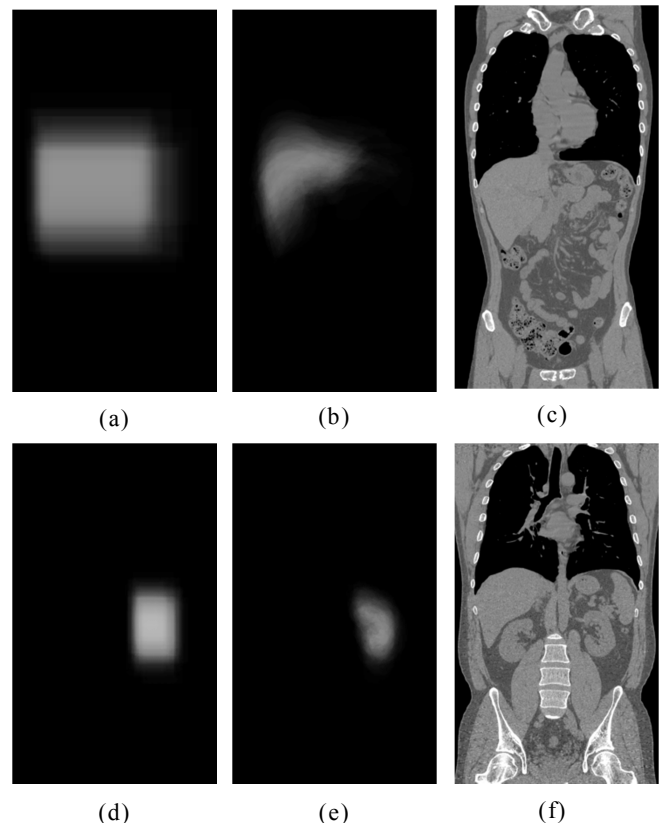


Fig.2 肝臓及び左腎臓アトラス coronal 断面の 1 スライス。(a)箱状の臓器領域を用いて作成した肝臓アトラス、(b)真の臓器領域を用いて作成した肝臓アトラス、(c)原画像、(d)箱状の臓器領域を用いて作成したアトラス、(e)真の臓器領域を用いて作成した肝臓アトラス、(f)原画像。

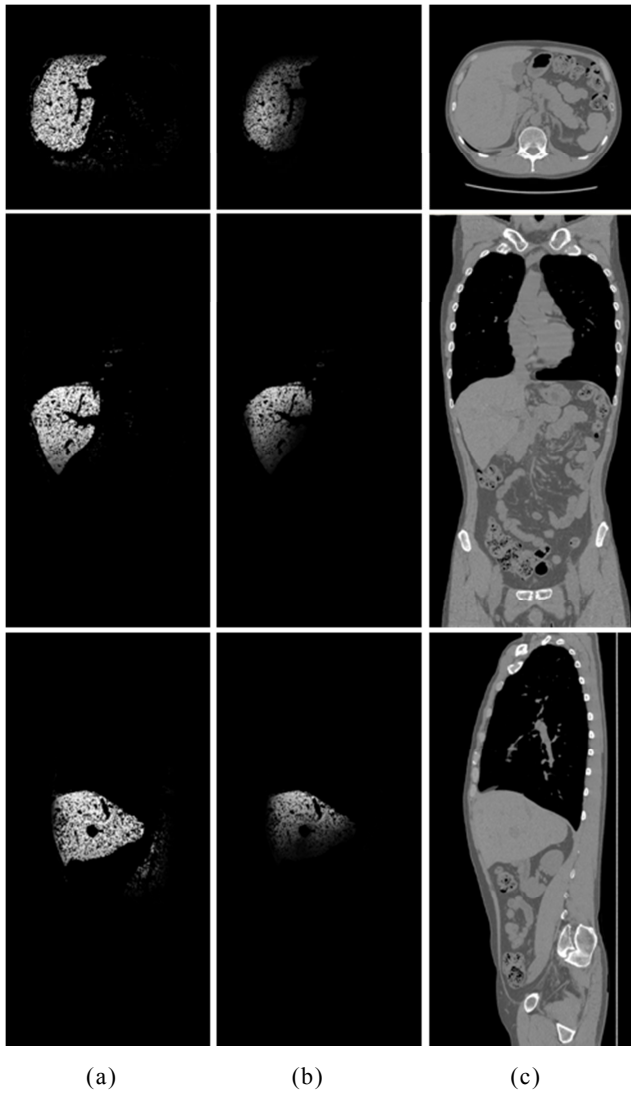


Fig.3 肝臓尤度画像の各断面の1スライス. (a)箱状の臓器領域を用いて作成した肝臓アトラスから生成した尤度画像, (b)真の臓器領域を用いて作成した肝臓アトラス生成した尤度画像, (c)原画像.

Table 1 各臓器のアトラスにおける評価曲線下の面積. 上段: 箱状の臓器領域のラベル画像を用いて作成したアトラスの評価, 下段: 真の臓器領域のラベル画像を用いて作成したアトラスの評価.

Heart	Liver	Spleen	Left Kidney	Right Kidney
0.76	0.84	0.77	0.47	0.55
0.81	0.85	0.81	0.52	0.52

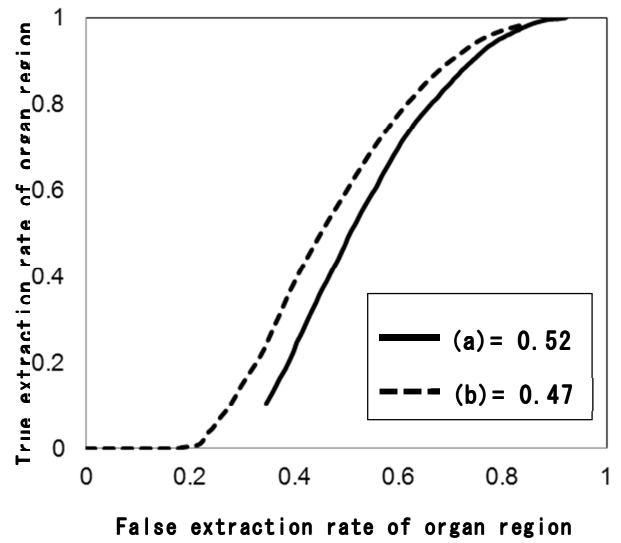


Fig.4 左腎臓アトラスに対する評価曲線と評価曲線下の面積. (a)箱状の臓器領域を用いて作成, (b)真の臓器領域を用いて作成.

5. まとめ

本研究では、複数の臓器に対して、より単純な手法での確率アトラスの構築し性能評価を行った。箱状の臓器領域、真の臓器領域それぞれのラベル画像を用いてアトラスを作成し比較を行った結果、どの臓器においても評価曲線下の面積の差は0.05以下となり、同程度の性能を示した。アトラス作成における準備や処理時間を考慮すると、箱状の臓器領域を用いて作成したアトラスが有効であると考えられる。今後、箱状の臓器領域を自動で推定することで、アトラスの自動生成を試みる計画である。

6. 謝辞

本研究を進めるにあたり、有益なご助言をいただいた藤田研究室の方々に感謝の意を表します。本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金(新学術領域研究 21103001 及び基盤研究 C00359738)によって行われました。

文 献

- [1] 藤田広志, 周向荣, 原武史, “正常構造に基づく知的 CAD,” 文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「多次元医用画像の知的診断支援」, 第 4 回シンポジウム論文集, pp.55-62, 2007.
- [2] H. Park and P.H. Bland, “Construction of an abdominal probabilistic atlas and its application in segmentation,” IEEE Tarans Med. Imaging, vol.22, no.4, pp.483-492, 2003.
- [3] 小畑秀文, 清水昭伸, 荻原義裕, 縄野 繁, “多次元医用画像からの複数臓器構造同時抽出,” 多次元医用画像の知的診断支援第三回シンポジウム論文集, pp.1-6, 2006.
- [4] X. Zhou, T. Hara, H. Fujita, R. Yokoyama, T. Kiryu, M. Kanematsu, H.Hoshi, “Preliminary study for automated recognition of anatomical structure from torso CT images,” Proc.2005 IEEE Engineering in medicine and Biology 27th Annual Conference, pp.650-653, 2005.
- [5] 北川輝彦, 周向荣, 原武史, 藤田広志, 横山龍二郎, 近藤浩史, 兼松雅之, 星博昭, “体幹部非造影 X 線 CT 画像における肝臓アトラスの構築とその肝臓自動抽出法への応用,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J91-D, no.7, pp.1837-1850, 2008.
- [6] Y. Boykov and M.-P. Jolly, “Interactive graph cuts for optimal boundary & region segmentation of objects in n-d images,” ICCV2001, vol.1, p.105, 2001.
- [7] Y. Boykov and G. Funka-Lea, “Graph cuts and efficient n-d image segmentation,” Int. J. Comput. Vision, vol.70, no.2, pp.109-131, 2006.
- [8] 横山耕一郎, 北坂孝幸, 森健策, 目加田慶人, 長谷川純一, 鳥脇純一郎, “CT 値の分布特徴を利用した 3 次元腹部 X 線 CT 像からの肝臓領域抽出,” コンピュータ支援画像診断学会論文, vol.7, no.4-3, pp.1-11, 2003.