

症例の類似性を考慮した複数臓器の確率的アトラスの構築と評価

渡辺 篤人[†] 周 向榮[†] 陳 華岳^{††} 原 武史[†] 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 岐阜市柳戸 1-1

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

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

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

E-mail: [†] watanabe@fjt.info.gifu-u.ac.jp

あらまし 現在, コンピュータ支援診断において, CT 画像からの臓器の自動抽出が必要とされている. 臓器の自動抽出には事前情報として確率的アトラスが用いられることがある. 本研究では類似する症例の画像を用いることにより, 複数の臓器に対して汎用的な確率的アトラスを構築する手法について提案する. 左右肺, 心臓, 肝臓, 胆嚢, 胃, 脾臓, 左右腎臓, 膵臓, 膀胱, 前立腺, 子宮を対象臓器として実験を行い, 確率的アトラスの性能を評価した.

キーワード CT 画像, 確率的アトラス, 類似画像, 複数臓器

Construction and evaluation of probabilistic atlases of multiple organs by using case similarity

Atsuto WATANABE[†] Xiangrong ZHOU[†] Huayue CHEN^{††} Takeshi HARA[†]
Ryujiro YOKOYAMA[†] Masayuki KANEMATSU^{†††, ††††} Hiroaki HOSHI^{†††††}
and Hiroshi FUJITA[†]

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

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

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

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

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

E-mail: [†] watanabe@fjt.info.gifu-u.ac.jp

Abstract Automatic segmentation of organs from CT images is one of very important issues in developing computer-aided diagnosis system. Probabilistic atlas is useful for supporting the automatic segmentation of organs. We propose a method to construct probabilistic atlases for multiple organs by using case similarity. This method was applied to constructing the atlases for right and left lung, heart, liver, gallbladder, stomach, spleen, right and left kidney, pancreas, bladder, prostate, and uterus and also evaluate the performance of the probabilistic atlases was evaluated.

Keywords CT image, probabilistic atlas, image retrieval, multiple organs

1. はじめに

現在, CT 撮像装置は広く臨床の場で用いられているが, 最近のマルチスライス CT 装置の性能の向上により, 従来のヘリカル CT 装置と比較して, 最大約 10 倍の高速撮像が可能となった. また, 広範囲を薄いスライス厚で撮像できるようになり, 直径数ミリの小さい病変をも描写可能となった. そのため, 病巣の早期発見が可能となるなど, CT 画像の診断能は格段に進歩した. しかし, より広範囲でより薄いスライス厚になるにつれ, 読影する医師は数千枚にも及ぶ CT 画像を読影することになり, 医師の負担増大が問題となっている. そのため, 計算機を利用したコンピュータ支援診断 (computer-aided diagnosis : CAD) システムの開発が大きく期待されている[1].

CT 画像から臓器領域を正確に抽出し, 人体の解剖学的な正常構造をコンピュータに理解させれば, 異常部位の自動検出を含む様々な応用が可能と考えられ, このような知的 CAD の開発が進められている[2]. 知的 CAD の開発には大量の正常および異常症例の画像と, その上にある解剖構造が事前知識として必要となるため, 汎用的な臓器の自動抽出法の開発が望まれている.

3 次元 CT 画像からの複数の臓器領域を自動抽出するには, 臓器の位置と形状を表す確率的アトラスや統計形状モデルを利用することが有効であると確認されており, 高精度な臓器アトラスの構築が要求される. 一般的なアプローチとして, 複数の症例から得られた臓器領域に対して, 空間的な位置を正規化し, これらの平均化によって臓器アトラスが作成される. しかし, このような平均的な臓器アトラスでは, 病変などによる臓器の“異変”十分に表現できず, 異常例からの臓器抽出に十分な抽出精度が得られないという問題点がある.

そこで, このような平均的なモデルを構築せず, 入力 CT 画像と複数の CT 画像とを直接比較し, 入力されている臓器の領域と類似する CT 画像のみを選択的に利用することで, 臓器領域を抽出する手法が提案されている[3]. この手法により, 画像上にある臓器領域が病変によって正常から変形したとしても, 似たような病変をもつ症例をデータベースより検索すれば, 精度よく臓器を抽出できる可能性がある.

本研究では, 類似画像を選択し, 確率的アトラスを患者ごとに構築することにより, 臓器抽出を行う新しい手法を提案する. 類似画像検索とそのレジストレーション手法には, 位相限定相関法を用いて高速に行う. また, 構築したアトラスの性能評価を行う. 臓器の確率的アトラスの構築は, 一般的に複数の症例を用いて, 対象臓器 (2 値図形) の空間的な正規化と領域の加算処理から構成される. また, 構成されたアトラスを利

用して臓器の自動抽出を行う際に, 濃淡画像とアトラスの位置合わせも必要である.

このような従来の研究に比べて, 提案法の特徴は, まず, CT 画像からの高速な臓器検出を導入して, アトラスの構築とアトラスの利用に関するすべての処理は, 臓器を囲んでいる Bounding-box の範囲内で行う. そして, アトラスの構築は Order-made 方式で行う点である[4]. すなわち, 入力された対象画像に合わせて Online で作成し, アトラスを構築する. また, アトラスを作成する際に, 画像データベースの各症例は, 入力画像との類似度を測定して, その類似度で重み付け加算処理によって, アトラスを動的に構築する. さらに, 高速に処理するために, 臓器間の類似性の計算と空間的位置合わせを一つの処理に集約する.

2. 方法

提案法の処理の概要を Fig. 1 に示す. 具体的には, 入力画像から対象臓器の存在範囲を自動的に検出し, その範囲内での部分画像を利用して画像データベースから類似症例を検索し, その検索の結果から確率的アトラスを生成する. 最後に, 確率的アトラスの CT 値から推定される濃淡の尤度画像を利用して, 入力画像上にある臓器の存在確率を計算し, 出力とする. 以下では, それらの処理部分について詳細に説明する.

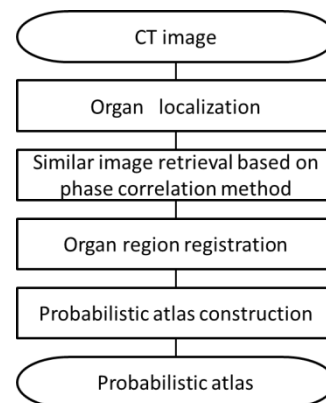


Fig. 1 処理の概要

2.1. 臓器存在領域検出

前段階として, CT 画像から対象の臓器存在領域を Bounding-box として自動的に検出する(). 検出器はアンサンブル学習で作成する. 学習アルゴリズムは Ada-boosting を用いる. また, 臓器を識別するための特徴量としては Haar-like features を用いる. このように求めた臓器存在領域の結果である Bounding-box を用いて, 次項で示す類似画像検索を行う. 具体的な検出処理の詳細は文献[4]に譲る.

2.2. 類似画像検索とレジストレーション

類似画像検索には3次元に拡張した位相限定相関法を用いる。位相限定相関法とは画像間の相関を求める手法である[5]。画像をそれぞれフーリエ変換し、位相部分のみを取り出す。その2つの位相画像の複素共役を乗ずることによって合成する。最後に合成画像を逆フーリエ変換することによって相関画像を得る。相関画像のピークの大きさ（高さ）によって、相関係数を得ることができる。位相限定相関では相関と同じく、画像内における像の平行移動は相関のピークが移動量だけずれる。よって、ピークの大きさを評価する場合には平行移動の影響を受けない。また、移動量を計測する場合には移動方向と移動量を求めることができる。これにより、画像間の位置ずれによる誤差の影響を受けず、また、位置ずれがあるとき、ずれの移動方向と移動量を求めることができる。位相限定相関法では位相画像、すなわち画像内の像の形状にかかわる情報のみを用いているため、画像の輝度変化の影響を受けない。位相限定相関法は複雑な最適化計算を必要としないため、位置合わせに要する計算時間を大幅に削減でき、高速に類似画像検索とレジストレーションを同時に行うことができる。

この手法を用いて入力画像とデータベースの比較を1症例ずつ行い、画像間の類似性と像の位置ずれの推定を同時に行う。

2.3. 確率的アトラス

類似画像検索で得られた結果を利用して、領域補正を行う。領域補正には確率的アトラスの考え方を利用する。入力画像と類似性 p の高い症例の手入力による正解領域 I_{GS} を上位 n 個選択し、類似性により重みをつけて正解領域の位置合わせを行い、式 (1) のように加算し確率的アトラス $I_{position}$ を構築する (Fig. 2)。

$$I_{position}(x, y, z) = \sum_{i=1}^n I_{GSi}(x, y, z) \times \frac{p_i}{p_{sum}} \quad (1)$$

$$p_{sum} = \sum_{i=1}^n p_i$$

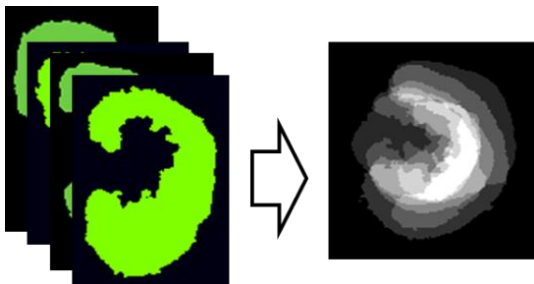
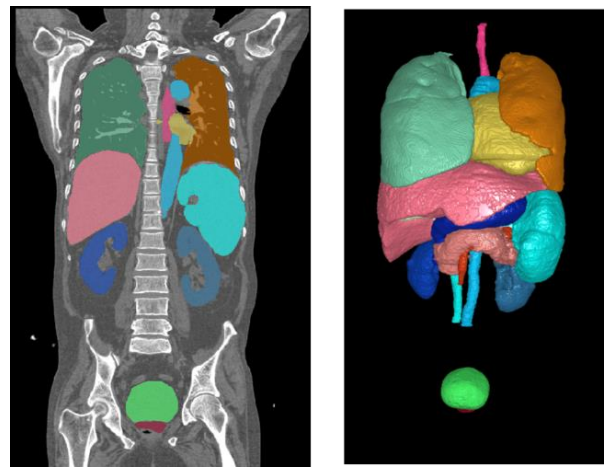


Fig. 2 確率的アトラスの構築

3. 実験

計算解剖学グループ[6]により共有されている CT 画像データベースを用いた（非公開）。東芝社製 Aquilion で撮像された胸部、腹部、体幹部等の画像であり、濃度分解能は 12 [bit]、画像のマトリックスサイズは 512×512 [voxel]、解像度は 0.625-1.148 [mm]、スライス間隔は 1.00 [mm] の非等方性画像である。また、造影と非造影が混在している。同一患者の画像がデータベース上には存在するが、その中から一つ選び、重複しないように症例を選択した。これらの画像の中で、臓器領域の手入力データのある症例を選択した。Fig. 3 に本データベースの画像を示す。また、実験対象となる臓器名と症例数を Table 1 に示す。



Coronal 面

3 D 表示

Fig. 4 データベースの一例

Table 1 対象の臓器と症例数

臓器	右肺	左肺	心臓	肝臓	胆嚢	胃	脾臓
症例数	93	93	26	88	89	29	87
臓器	右腎臓	左腎臓	膵臓	膀胱	前立腺	子宮	
症例数	93	94	31	27	19	7	

これらの症例を用いて leave one organ out 法により実験を行った。臓器存在領域検出後の正解 Bounding-box を用いて、類似画像検索をし、その結果を用いて確率的アトラスを構築した。確率的アトラスを構築する症例数は経験的に類似度の高い上位 15 症例で構築した。

評価方法は ROC (receiver operating characteristic) 分析を参考にして以下の評価曲線を定義し、これを用いてアトラスの評価手法を検討した。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 (Fig. 5). 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[7]. 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した.

また、従来手法のように全症例を平均加算した確率的アトラスも作成し、比較評価した.

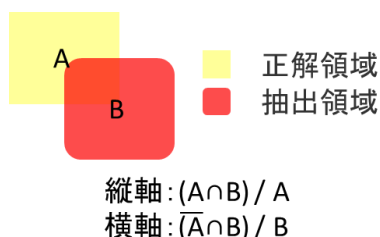


Fig. 5 評価曲線の縦軸と横軸

4. 結果

13 の臓器に対してアトラスの構築と性能を評価した. 提案手法を用いて構築したアトラスと従来法 (全症例の平均化) で構築したアトラスとの比較の一例 (平均評価曲線) を Fig. 6 と Fig. 7 に示す. また、各臓器における評価曲線下の面積を Table 2 に示す.

5. 考察

右肺、左肺、脾臓、右腎臓、左腎臓では類似画像を用いたほうが、従来の平均的なアトラスよりも精度が向上した. しかしながら、心臓、胆嚢、胃、膵臓、膀胱、前立腺においては悪化した. 心臓、胃、膵臓、膀胱、前立腺は精度が向上した臓器よりも手入力された症例が少なく、十分に類似した症例がデータベース上に存在していないと思われる. Fig. 8 に脾臓においてデータベースの症例数を変化させたときの確率的アトラスの平均評価曲線下面積の変化を示す. 症例数が少ない場合は全症例を用いたほうがアトラスの精度は高い. これらのことから類似画像を用いてアトラスを構築する場合では十分な症例数が必要であるといえる. また、胆嚢では周辺の構造 (特に肝臓) が類似画像検索時に影響を与えたと考えられる. これらのことから、臓器形状のデータが十分にあり、周辺構造の影響が大きい臓器では本手法は有用であるといえる.

6. まとめ

本研究では類似画像を用いて確率的アトラスを構

築した. 13 臓器に対して実験し、左右肺、脾臓、左右腎臓において従来の平均的なアトラスよりも精度が向上した. 肝臓、子宮ではほぼ変わらず、心臓、胆嚢、胃、膵臓、膀胱、前立腺では従来の平均的なアトラスを用いたほうが精度は高かった.

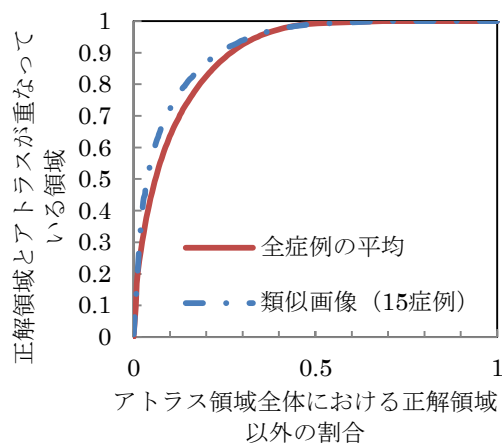


Fig. 6 右肺における確率的アトラスの評価曲線

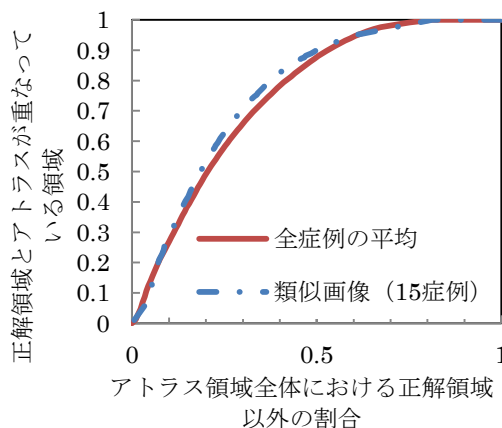


Fig. 7 脾臓における確率的アトラスの評価曲線

Table 2 各臓器における評価曲線下面積

臓器	全症例の平均	類似画像 (15 症例)	臓器	全症例の平均	類似画像 (15 症例)
右肺	0.895	0.911	右腎臓	0.833	0.856
左肺	0.881	0.896	左腎臓	0.837	0.853
心臓	0.907	0.896	脾臓	0.354	0.347
肝臓	0.807	0.807	膀胱	0.783	0.770
胆嚢	0.586	0.548	前立腺	0.815	0.739
胃	0.527	0.490	子宮*	0.349	0.347
膵臓	0.748	0.758			

*症例数が少ないため 6 症例でアトラスを構築

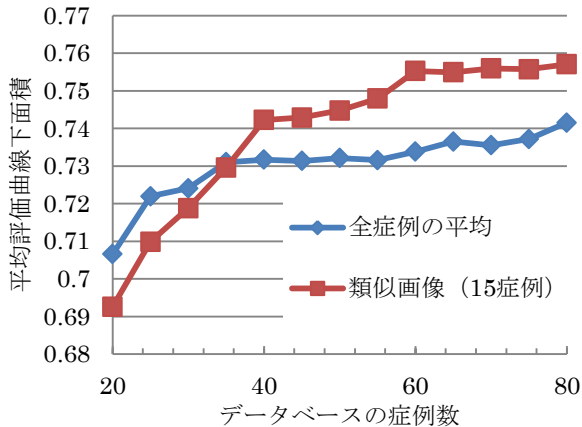


Fig. 8 脾臓におけるデータベースの症例数を変化させたときの平均評価曲線下面積の変化

7. 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，また，実験に用いた原画像および臓器手入力データを提供していただいた計算解剖学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(基盤研究 C23500118)によって行われました．

文 献

- [1] 土井邦雄，“CAD 開発における国際的歴史と実用化の世界情勢”，INNERVISION, vol.16, no.10, pp.1-4, Oct. 2004.
- [2] 藤田広志，福岡大輔，松原友子，佐井篤儀，原武史，星博昭，周向榮，兼松雅之他，“正常構造の理解に基づく知的 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, Jan. 2007.
- [3] 森浩起，小田昌宏，北坂孝幸，三澤一成，藤原道隆，縄野繁，ルッカート ダニエル，森健策，“腹部 3 次元 CT 像データベースを用いた類似画像検索と画像位置合わせに基づく臓器自動抽出手法(計算解剖学),” 電子情報通信学会技術研究報告, MI, 医用画像, vol.109, no.407, pp.217-222, Jan. 2010.
- [4] X. Zhou, S. Yoshimoto, S. Wang, H. Chen, T. Hara, R. Yokoyama, M. Kanematsu, and H. Fujita, “Automated localization of solid organs in 3D CT images: A majority voting algorithm based on ensemble learning,” MICCAI Workshop on Machine Learning in Medical Imaging, paper 01-1-8, Sept.2010.
- [5] 小林孝次，中島寛，青木孝文，川又政征，樋口龍雄，“位相限定相関法の原理とその応用,” テレビジョン学会技術報告, vol.20, no.41, pp.1-6, Sept. 1996.
- [6] “医用画像に基づく計算解剖学の創成と診断・治療支援の高度化”, <http://comp-anatomy.org/wiki/>
- [7] 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誌, vol.7,