

非造影 CT 画像における腎臓の位置・傾き・形状特徴量の解析と それに基づく腎臓自動抽出に関する初期的検討

吉本 俊一[†] 周 向荣[†] 陳 華岳^{††} 原 武史[†] 藤田 広志[†]

横山 龍二郎^{†††} 兼松 雅之^{†††, ††††} 星 博昭^{†††††}

[†]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: † motoshun@fjt.info.gifu-u.ac.jp

あらまし 本邦では CT 装置が広く用いられ、撮影範囲が胸部から腹部を含む体幹部の CT 撮影のケースも増加している。CT 画像は、各内臓臓器における病変診断に重要な情報を提供している。本研究では、腎臓領域を対象とした CAD システムの開発を行う。腎臓領域では、疾患により形状変異が生じる場合があり、周辺臓器との CT 値の差が少ない。そのため、非造影 CT 画像からの自動抽出は難題であった。本研究は、非造影 X 線 CT 画像からの腎臓領域の自動抽出を目指す。101 症例に基づいて腎臓の特徴量（中心位置、傾き、大きさ）の解析と形状モデルの有効性を検討する。

キーワード X 線 CT 画像, 腎臓, 自動抽出, 楕円モデル

Preliminary study of automated segmentation of kidney in non-contrast CT images base on position, orientation and shape features analysis

Shunichi YOSHIMOTO[†] Xiangrong ZHOU[†] Huayue CHEN^{††} Takeshi HARA[†]

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

[†]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, 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: † motoshun@fjt.info.gifu-u.ac.jp

Abstract The modern CT scanners have been widely used in Japan. The cases of the CT scans covering the human torso (chest and abdomen) increased recently. Such a CT volume can provide the detailed information of human organs for clinical diagnosis. This research focuses on the development of a computer-aided diagnosis system for kidney diagnosis. Kidney regions have a similar CT number distribution with the surrounding tissue regions and have a big variance in the shapes. It is difficult to segment the kidney regions in non-contrast CT images. This research investigates the features of the kidney location, orientation, and shape using 101 CT cases, and discuss the possibility to segment the kidney region based on such features.

Keywords X-ray CT image, kidney, automated detection, ellipse model

1. はじめに

腎臓は代謝老廃物の排泄や体内の水分、体液組織の調節などの機能があり、重要な臓器の1つである。腎病変において、X線CTの有用性は非常に高い。静脈性腎盂造影（intravenous pyelography : IVP）や超音波検査に続く精査としても使用され、あらゆる病変の診断能に優れているので、初期検査に用いられることも多い。近年、超音波検査、MRIも目覚ましい進歩を遂げているが、CTが人病変の診断や経過観察において最も重要な役割を果たしていることには変わりない[1]。また、近年、X線CT装置の性能向上により、短時間で高解像度の画像を得ることが可能となった。そのため、病変の診断や放射線治療の計画などを目的として体幹部領域全体の撮像がしばしば試みられる。これに伴い、対象病変以外にも様々な疾患が発見される可能性がある。そのため、我々の研究グループでは、体幹部X線CT画像を用いた多臓器・多疾患を対象とした計算機支援診断（Computer-aided diagnosis : CAD）システムの開発を行っている[2]。

本研究では、非造影の体幹部X線CT画像から腎臓の自動抽出に用いる腎臓の特徴量を調べるとともに、その特徴量を用いた簡易的なモデルの構築を行った。モデルは、腎臓と形状が似ており、少ないパラメータで構築できる楕円とした。その楕円モデルと実際の腎臓との誤差を計測し、モデルの有用性を検討する。また、このモデルを各実験症例に当てはめる際、腎臓の位置、範囲、傾きの自動推定が必要となる。先に求めた特徴量を学習データとし、これらの自動推定を試みる。なお、今回は左腎臓に対してのみ実験を行った。

2. データベース

本研究で使用した学習用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]）で撮影された非造影体幹部X線CT画像101症例である。症例の選択は、我々のデータベースから無作為に抽出している。ただし、腎臓が左腎、または右腎どちらかが必ず存在している症例に限定している。学習に使用したデータの年齢構成は17～88歳（平均61歳）である。性別構成は男性64症例、女性37症例である。異常症例は、101症例中53症例である。そのうち、左腎、右腎のどちらかが存在していない症例は10症例である。濃度分解能は12[bit]、マトリクスサイズは512×512×784-1104[voxel]であり、等方化処理を行ったため、空間分解能は0.58-0.74[mm]である。

3. 方法

3.1. 腎臓の解剖学的定義

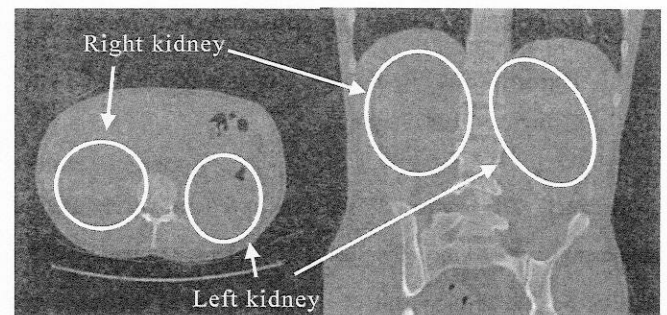
Fig.1に腎臓と周辺組織を示す。腎臓は脊柱の両側で壁側腹膜の後方に存在する。それぞれ、左側を左腎、右側を右腎と区別する。高さは第11胸椎から第2腰椎のあたりにみられ、右腎は肝臓の右葉に圧されるため、左腎よりやや低い位置に存在する。腎臓の外形はそら豆に似た形状をし、上端は幅広く扁平であるが、下端は上端に比べて厚く劣っている。内側縁の中央部にある凹部は腎門と呼ばれている。それらの部分は脂肪組織で充たされている。腎門には血管、神経、リンパ管、および尿管が入り出す。本研究では、凹領域の空洞全体を腎門部脂肪領域と呼ぶ[3]。

腎臓疾患の一つである嚢胞性病変は、腎臓領域に嚢胞ができる。また、炎症性病変では、腎腫大を伴うことがある。これらの疾患では、このように正常状態と比較して腎臓形状が大きく変化する。

3.2. 概要

体幹部X線CT画像で腎臓領域を認識するにあたり、読影医はCT画像上での腎臓の位置情報や腎臓形状から経験的に判別している。このアプローチが計算機による腎臓の自動抽出に有効であると考えられる。そこで、本研究では、腎臓の自動抽出を行うための初期的な検討を行った。

まず、学習用データ101症例から腎臓の各特徴量を求めるために、腎臓輪郭上の任意の箇所に手動で点の入力を行う。入力された点を解析し、それにより得られた各特徴量を学習データとする。学習させたデータを用いて、腎臓の中心位置、範囲（大きさ）、傾きの自動推定を目指す。次に、手動で入力された点を用いて形状モデルを構築する。そして、中心位置、範囲、傾きが自動推定されたと仮定し、それにより構築される形状モデルの有効性を検討する。手動で行った点の入力方法、腎臓の中心位置、範囲、腎臓の傾きの解析を3.3節、形状モデルの構築を3.4節に示す。



(a)Axial-section (b)Coronal-section

Fig.1 Anatomical illustration of kidneys

3.3. 特徴量解析

点の手動入力とは体幹部 X 線 CT 画像の Axial 断面を使用し、数スライス間隔で行った。手入力した点を Fig.2 に示す。腎門部脂肪領域の輪郭を除いた腎皮質の腎臓輪郭を点の手動入力をする際の正解定義とした。その部分を Fig.3 の白線で示す。

腎臓の位置解析は、手動で入力した各点の座標値の x 成分、y 成分、z 成分の最高値と最低値をそれぞれ求め、それらの値の中央値をそれぞれ中心点の x 成分、y 成分、z 成分の値とした。この中心点座標の x 座標値、y 座標値、z 座標値を Fig.4 に示す。腎臓の傾きは、手動で入力した各点を変数とし、主成分分析で求めた第 1 主成分を腎臓の Z 軸の傾きとした。この傾きを 2 つの角度 θ, ϕ を用いて Fig.5 に示す。この θ, ϕ は

$$\theta = \frac{180z}{\pi \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad \phi = \frac{180x}{\pi \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

とし、式中の x, y, z は Z 軸の傾きを表す固有ベクトル値の x 成分、y 成分、z 成分である。主成分分析は、 P 個の変数 $\{X_p\}$ ($p=1,2,\dots,P$) の持つ情報を、情報の損失を最小限に抑えながら、 $\{X_p\}$ の一次結合として与えられる互いに独立な M ($M \leq P$) 個の主成分(総合的指標) $\{Z_m\}$

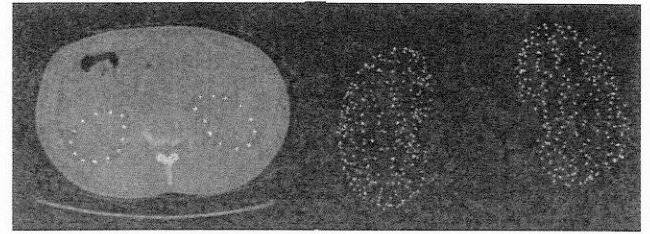
$$Z_m = \sum_{p=1}^P w_{pm} X_p \quad (m=1,2,\dots,M)$$

を用いて表現する手法である。なお、 Z_m は第 m 主成分と呼ばれ、その結合係数 $\{w_{pm}\}$ ($p=1,2,\dots,P; m=1,2,\dots,M$) はある条件を満たすように決定される。その条件は、第 1 主成分 Z_1 の分散は $\{X_p\}$ ($p=1,2,\dots,P$) のあらゆる 1 次式の持つ分散の中で最大であり、第 m 主成分 $\{Z_m\}$ ($m=2,\dots,M$) の分散は $\{Z_{m'}\}$ ($m'=1,2,\dots,m-1$) のすべてと無相関な 1 次式の持つ分散の中で最大である。ただし、

$$\sum_{p=1}^P w_{pm}^2 = 1 \quad (m=1,2,\dots,M)$$

とする[4]。

主成分分析を用いて求めた第 1 主成分を Z 軸、第 2 主成分を X 軸とし、X 軸と Z 軸に互いに直交し合う軸を Y 軸とする。腎臓範囲の解析は、それらの軸と腎臓輪郭との交点を軸ごとに求める。それらの各軸における 2 交点間のユークリッド距離を求める。求めた各軸のユークリッド距離を腎臓の大きさとする。腎臓の大きさは症例ごとに求めた。Fig.6 に示す。各軸と腎臓輪郭との交点は、症例ごとの全手入力点の中から軸に最も近い手入力点を求め、その点と最短距離の関係にある軸上の点である。



(a) The point on an Axial section (b) 3-dimensional display

Fig.2 The points of manual input.



Fig.3 The correct answer definition of kidney outlines.

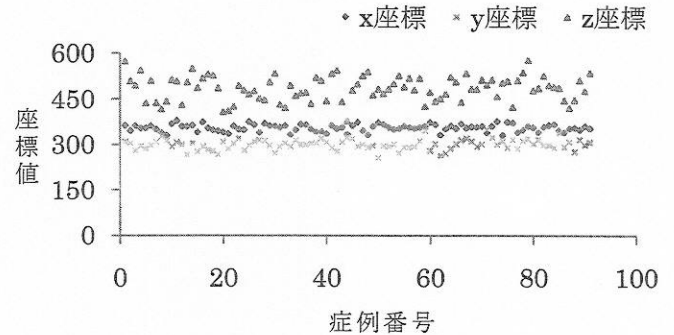


Fig.4 The distribution of center position of the left kidney.

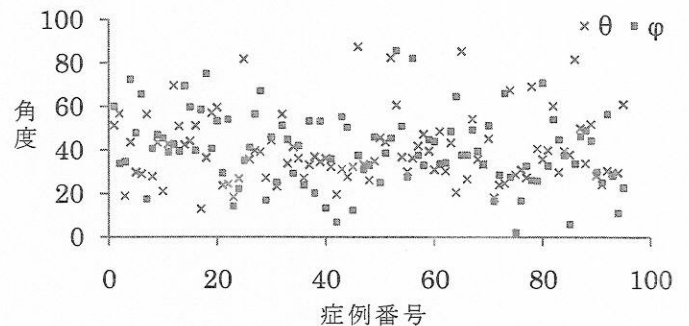


Fig.5 The distribution of inclination of the left kidney.

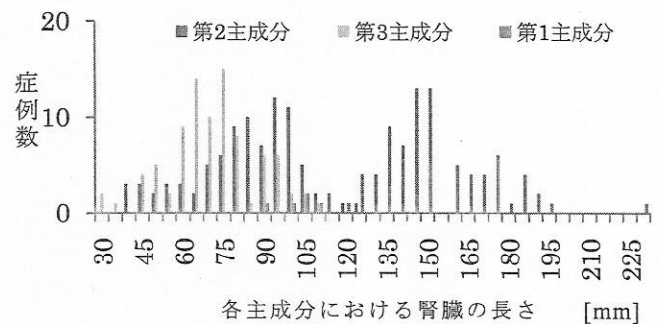


Fig.6 The distribution of the size of the left kidney.

3.4. 形状モデル

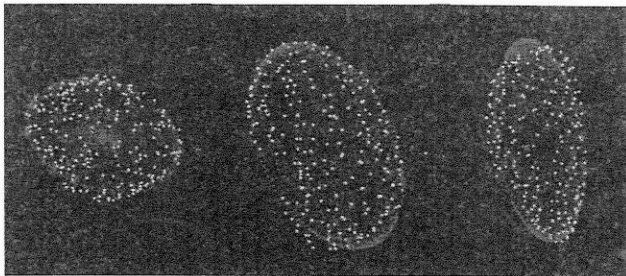
3.3節で求めた特徴量を用いて点で構成されるモデルを構築する。腎臓と形状が似ており、少ないパラメータで構築できる楕円球をモデルとする。この楕円球は

$$\frac{(x-l)^2}{a^2} + \frac{(y-m)^2}{b^2} + \frac{(z-n)^2}{c^2} = 1 \quad (a > b > c > 0)$$

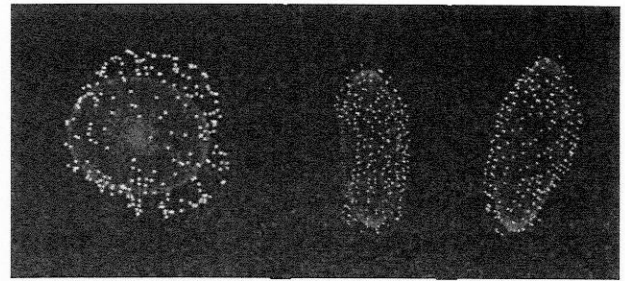
と表せる。ここで、 x は楕円球を構成する点座標値の x 成分、 y は y 成分、 z は z 成分、 l は楕円球の中心座標値の x 成分、 m は y 成分、 n は z 成分、 a, b, c は楕円球のそれぞれの軸の長さである。本研究では、22 症例に対して楕円モデルと実際の腎臓との誤差を計測し、精度評価を行う。誤差の計測方法は、点入力点とその点から最も近い楕円球モデルの点とのユークリッド距離を求め、その距離をその点の誤差値とする。このように、すべての手入力点に対して誤差値を求め、誤差値の合計を手入力点数で割ることにより、症例ごとに手入力点 1 点あたりの平均誤差値を求める。

4. 結果と考察

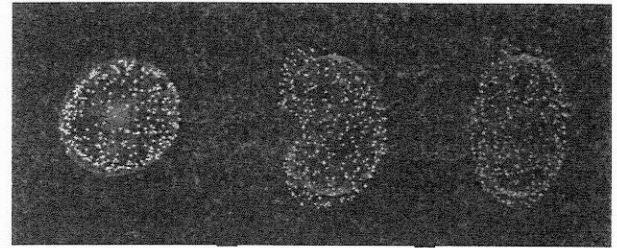
症例ごとに構築した楕円球と手動入力した点との 1 点あたりの平均誤差値が低い症例では 3[pixel]、高い症例では 26[pixel]であった。それぞれの結果画像を Fig.7 と Fig.8 に示す。22 症例における 1 症例あたりの平均は 7.16[pixel]であった。この値と平均誤差値に近い症例の結果画像を Fig.9 に示す。すべての症例において腎臓はそら豆形状なため、楕円形状から外れてしまい、誤差が発生した。また、他臓器からの圧迫がある症例や形状変異がみられる症例に対しては、誤差が大きくなる傾向にあった。これにより、楕円球の正常構造モデルとしての有効性が得られた。今後は、点で構成されるそら豆形状を適用したモデルを構築する必要がある。その方法として、点分散モデル(point distribution model : PDM)などが挙げられる。また、モデルを当てはめるために腎臓の位置と範囲と傾きを自動推定する必要がある。



(a)Axial-direction (b)Coronal-direction (c)Sagittal-direction
Fig.7 The approximation results of a kidney domain



(a)Axial-direction (b)Coronal-direction (c)Sagittal-direction
Fig.8 The approximation results of a kidney domain



(a)Axial-direction (b)Coronal-direction (c)Sagittal-direction
Fig.9 The approximation results of a kidney domain

5. まとめ

本研究では、腎臓の自動抽出に用いる特徴量(腎臓の大きさ、中心位置、傾き)を解析した。それらの特徴量を適用した楕円モデルを症例ごとに構築し、各手入力点との誤差を計測した。楕円モデルの 1 症例あたりの平均誤差は、平均 7.16[pixel]であった。今後の課題は、点で構成される腎臓形状を適用したモデルの構築と腎臓の位置、範囲、傾きの自動推定を行うことである。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、有益なご助言をいただいた研究室の方々に感謝の意を表します。本研究の一部は、日本学術復興会科学研究費補助金、柏森情報科学復興財団研究助成金、岐阜大学活性化経費、および厚生労働省がん研究助成金(長谷川班)によって行われました。

文 献

- [1] 陣崎雅弘, “腎,” “腹部の CT, 平松京一(編), pp.232, 榊メデイカル・サイエンス・インターナショナル, 東京, 2001.
- [2] 藤田広志, 周向榮, 原武史, “正常構造に基づく知的 CAD” 文部科学省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.
- [3] 南山堂, “腎臓,” “医学大辞典, pp.1062, 榊南山堂, 東京, 2004.
- [4] 有馬哲, 石村貞夫, “主成分分析,” “多変量解析のはなし, pp.79-126, 東京図書(株), 東京, 2002.