

X線CT画像における脊柱の彎曲角度の定量化法の開発とその評価

林 達郎¹⁾ 周 向榮¹⁾ 陳 華岳²⁾ 原 武史¹⁾ 横山 龍二郎³⁾
兼松 雅之^{3),4)} 星 博昭⁵⁾ 藤田 広志¹⁾

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 岐阜大学医学部附属病院放射線部 〒501-1194 岐阜市柳戸 1-1
- 4) 岐阜大学医学部附属病院放射線科 〒501-1194 岐阜市柳戸 1-1
- 5) 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: hayashi@fjt.info.gifu-u.ac.jp

あらまし 脊柱の彎曲はバランスの維持に寄与し、正常な彎曲の維持は重要である。本研究の目的は、X線CT画像において脊柱の彎曲を定量化する新手法の提案である。提案手法では、まず、脊柱管の中心線を自動検出し、側彎をリフォーマットした画像を生成する。次に、ベクトル法とPAL法を用いて彎曲を定量化する。3人の観察者により、Cobb法と2つの提案手法の再現性を評価した。その結果、ベクトル法はCobb角より計測値のばらつきが小さかった。さらに、PAL法も再現性のある手法であることを確認した。したがって、ベクトル法とPAL法は、脊柱の彎曲の定量化に有用である可能性が示唆された。

キーワード 脊柱管、脊柱の彎曲、Cobb法、X線CT画像

Development of a method for quantifying the spinal curvature in X-ray CT images and its evaluation

Tatsuro HAYASHI¹⁾ Xiangrong ZHOU¹⁾ Huayue CHEN²⁾ Takeshi HARA¹⁾

Ryujiro YOKOYAMA³⁾ Masayuki KANEMATSU^{3),4)} Hiroaki HOSHI⁵⁾ and Hiroshi FUJITA¹⁾

- 1) 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
- 2) Department of Anatomy, Division of Disease Control, Gifu University Graduate School of Medicine, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1194, Japan
- 3) Department of Radiology Services, Gifu University Hospital, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1194, Japan
- 4) Department of Radiology, Gifu University Hospital, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1194, Japan
- 5) Department of Radiology, Division of Tumor Control, Graduate School of Medicine, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1194, Japan

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

Abstract Spinal curvature contributes to maintaining spinal balance, and maintaining normal spinal curvature is important. This study proposes a novel method which quantifies a spinal curvature in X-ray CT images. In this method, first, spinal canal is extracted on CT images, and a median plane image of spine is generated based on it. Second, spinal curvature is quantified using a vector method and PAL method on the median plane image. Three observers estimated the reproducibility of the Cobb method and the two proposed method. Experimental result showed the measurement value of the vector method had the variation smaller than the Cobb angle. Also, we confirmed the result value was reproducible by using PAL method. Therefore, a possibility that a vector method and PAL method could quantify for a spinal curvature was suggested.

Keyword Spinal canal, Spinal curvature, Cobb method, X-ray CT image

1. はじめに

近年の治療医学の進歩には著しいものがある。しかし、疾病が重症化してからの治療では、一般に、患者

の心身の負担と多大の医療費を必要とするため、発症を抑える、あるいは疾病の重症化を防ぐ予防医学の一層の進歩が期待されている。現在の身体の状態を正確に把握することは、予防医学で重要な事柄の一つであ

り、本邦では、メタボリック検診などの健康診断が重視されている。

近年、X線CT画像 (Multi-detector row CT: MDCT) を用いて診断や治療を行う機会が増加している。CT画像は、臓器・組織の高精細 (3次元) な形態情報を含むため、臓器・組織の形態的な変化を正確に捉えれば、予防医学に貢献できる可能性があると考えられる。すなわち、臓器・組織が正常な形態から乖離していれば、将来的に疾病を発病する危険性があり、早期の段階で予防的治療法を展開して、疾病の発症、あるいは重症化を未然に防ぐことである。このような予防医学における画像診断の重要性は、西村等によって指摘されており[1]、計算機を用いて臓器・組織の形態を精密に規定すれば、予防医学を支援できると考える。

本研究では、脊柱の彎曲の定量化による予防医学への支援を目的とする。脊柱の彎曲は起立動作や直立運動の負荷によって発現してくる。成人の脊柱では、頸部と腰部で前彎、胸部と仙骨部で後彎が正中矢状面で観測される[2]。これらは生理的彎曲と呼ばれ、重心のバランスの維持や衝撃の吸収に役立っている。彎曲の変化は、腰痛、側彎症、骨粗鬆症など様々な脊柱疾患の進行と関連があると考えられ、正常な彎曲の維持は脊柱の健康状態を保つために重要である[3]。そのため、脊柱疾患のある患者の診断、治療、および介護を行う上で、信頼性のある彎曲の計測が必要である。

椎骨の終板に基づいた Cobb 法[4]は、臨床医によって最も一般的に使用される彎曲の計測法である。しかし、計測位置に関する統一した基準はない。さらに椎骨の終板は尾根の形状であり、正確な角度の計測が困難であった。これらの Cobb 法による計測値の信頼性を解決するために、脊柱の彎曲や配置を評価するための様々なアプローチが提案されている[5-9]。

本研究の目的は、X線CT画像を用いた脊柱の彎曲の定量化である。われわれは、これまでにX線CT画像から脊柱管の中心線を自動検出し、それに基づいて彎曲を定量化する半自動手法を提案した[10, 11]。文献[10]は、Kuru 等[8]のアプローチを応用した手法であり、文献[11]は、脊柱管の中心線から彎曲を直接的に定量化した手法である。これらの手法による計測値は、いずれも Cobb 角と強い相関性 (0.82-0.89) があつたことを実験で確認している。しかし、提案手法の再現性については、十分に検討していない。再現性がなければ、彎曲の経時変化を正しく識別できない等の問題が生じる危険性があり、再現性の実証は重要である。

そこで本稿では、2つの提案手法と Cobb 法を用いて10症例の彎曲 (胸椎後彎と腰椎前彎) を定量化し、観察者内と観察者間におけるばらつきの評価によって、手法の再現性を検証した。

2. 使用機器と症例

本研究では、2009年2月に臨床診断のために岐阜大学医学部附属病院で駆幹部を撮影した MDCT を用いる。使用機器は GE 社製 LightSpeed 16、撮影条件は、濃度分解能 12 bit, FOV 320-380 mm, マトリクスサイズ 512×512 pixel, 管電圧 120 kV, 管電流 Auto mA, スライス厚 1.25 mm, 再構成間隔約 0.6 mm である。前処理として、ボクセルが等方性の構造を持つように、sinc 関数を用いて補正を行い、スライスの間隔を修正した。したがって、本研究で使用する画像は、0.63-0.74 mm の等方性の空間分解能である。

胸椎と腰椎に骨粗鬆症による圧迫骨折や正常変異を含む症例は、著者の一人である解剖学の専門医の指摘により除外した。したがって、本研究で使用する症例は男性 10 症例 (59-85 歳, 平均 68.5 歳) である。

3. 方法

本手法は、過去に発表した内容と同一であるため、詳細は文献[9-11]に譲り、本稿では概要のみ説明する。

3.1. 脊柱の正中矢状面画像の生成

脊柱は 3 次元的に彎曲しているため、CT 画像の 1 断面のみで彎曲を評価するのは困難である。そこで、脊柱管の中心線を自動検出し、1 断面のみで彎曲を視認できるように CT 画像をリフォーマットした画像を生成する。本稿では、この画像を脊柱の正中矢状面画像 (以下、正中矢状面画像) と定義する。以下に、正中矢状面画像の生成手順を示す (図 1 参照)。

- Step 1: CT 値に対するしきい値処理による骨格の抽出
- Step 2: 横断面の骨格の幅に基づくヤコビ線の検出
- Step 3: ヤコビ線の断面における脊柱管の重心の検出
- Step 4: 上下の断面に脊柱管の重心を伝播
- Step 5: 脊柱管の左右の中心座標がすべての横断面で同一になるように、各横断面で左右に平行移動

図 1 (e) から、正中矢状面画像では、胸椎と腰椎の前彎と後彎を視認できることがわかる。

3.2. 脊柱の彎曲の定量化

正中矢状面画像上で、ベクトル法[11]と PAL 法[10]を使用して彎曲を定量化する。ベクトル法の計算式を以下に示す (図 2(a)参照)。

$$VEC = \arccos \left(\frac{(\vec{a}, \vec{b})}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|} \right) \quad (1)$$

ここで、 \vec{a} と \vec{b} は図 2 (a) に示すベクトルであり、ベクトルの基準となる 4 点は、手動で指定した横断面における脊柱管の重心である。次に、PAL 法の計算式を以下に示す (図 2(b)参照)。

$$PAL = \frac{(a/p) \times \sum P}{l^2} \times 100 \quad (2)$$

ここで、基準となる2点は手動で指定した横断面における脊柱管の重心、 (a/p) は1ボクセルあたりの面積、 l は2点間の長さ、 $\sum P$ は脊柱管の重心と直線 l で囲まれた面積内のボクセル数である。

ベクトル法と PAL 法で用いる脊柱管の中心線は、いずれも計算機で自動的に抽出するが、基準となる横断面の位置を手動で指定するため、この部分が計測の再現性に影響を与える。

4. 実験

10 症例の CT 画像に 3.1. で記述した手法を適用し、正中矢状面画像を生成する。次に、正中矢状面画像上でベクトル法、PAL 法、および Cobb 法によって脊柱の彎曲を定量化する。

実験では、L1-L5 を腰椎前彎として事前に定義する。3 名の観察者（解剖医 1 名、放射線技師 1 名、技術者 1 名）で腰椎前彎を 1 回計測して、観察者間の計測値のばらつきを評価する。また、放射線技師は 1 週間以上の間隔を空けて腰椎前彎を 3 回計測し、観察者内の計測値のばらつきを評価する。

5. 結果と考察

3 名の観察者により、ベクトル法、PAL 法、および Cobb 法を用いて脊柱の彎曲を計測した結果を表 1 に示す。表 1 の値は、各症例で観察者内と観察者間の平均計測値を求め、さらに 10 症例で平均した値であり、平均±標準偏差で表記した。

表 1 の結果から、Cobb 法の計測値は観察者内のばらつきが 1.96° 、観察者間のばらつきが 1.41° と、いずれも 2° 以内であった。一方で、ベクトル法の計測値は、観察者内のばらつきが 0.82° 、観察者間のばらつきが 0.89° と、いずれも 1° 以内であり、ベクトル法の方が Cobb 法よりばらつきが小さかった。

次に、Bland-Altman Plot により、PAL 法の再現性を調査した。放射線技師の 1 回目と 2 回目の計測値の比較を図 3 (a)、放射線技師と解剖医の計測値の比較を図 3 (b) にそれぞれ示す。図 3 (a)、(b) から、PAL 法による計測値は、観察者内と観察者間のいずれも加算誤差、比例誤差の存在が認められなかった。放射線技師の 3 回目の計測や技術者の計測値との比較など、他の組み合わせについても Bland-Altman Plot により調査したが、同様の結果であり、PAL 法は再現性のある脊柱彎曲の計測値を提供できる可能性が示唆された。

これまでに、単純 X 線写真を用いて、観察者内と観察者間の Cobb 角の計測値を比較した研究が報告されている[12, 13]。文献[12]によると、端の椎骨を事前に

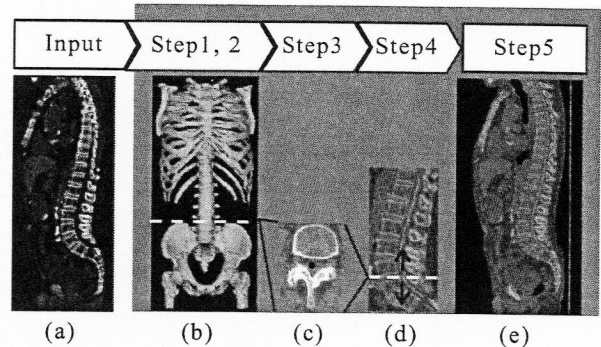


図 1 正中矢状面画像の生成の流れ (a): 入力画像, (b): 骨格の抽出画像 (白い破線: ヤコビ線), (c): 脊柱管の重心の抽出 (黒点: 脊柱管の重心), (d): 脊柱管の重心を上下に伝播 (白線: 脊柱管の中心線), (e): 各横断面を左右に平行移動. ((a, d): CT 画像の矢状面の 1 スライス, (b): 3-D 表示, (c): CT 画像の横断面の 1 スライス, (e): 正中矢状面画像)

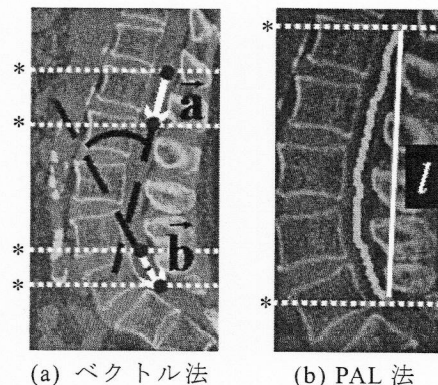


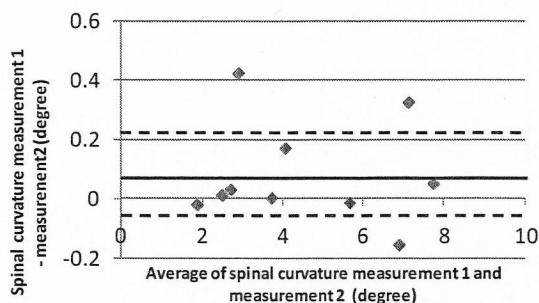
図 2 脊柱彎曲の定量化法 (*: 手動で指定する横断面の位置)

表 1 脊柱の彎曲の計測値 (平均±標準偏差)

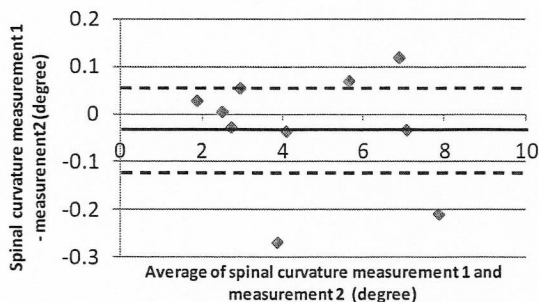
Method	Intra-observer	Inter-observer
Cobb [°]	25.97±1.96	26.44±1.41
VEC [°]	20.09±0.82	19.79±0.89
PAL [%]	4.53±0.07	4.50±0.11

定義せずに、3 人の整形外科医が計測を行ったとき、計測値のばらつきは 2.0° であった。また、文献[13]によると、計測を行う端の椎骨を事前に定義した場合、4 人の整形外科医の計測値のばらつきは、観察者内で 3.8° 、観察者間で 6.3° であった。

本研究の Cobb 角の計測値は、文献[12]の結果には及ばないが、観察者が専門医でないにもかかわらず、文献[13]よりばらつきは小さかった。これは、本研究で計測した Cobb 角が、椎体の形状による影響を受けにくかったことが原因であると考えられる。すなわち、X 線写真は投影像であるため、椎体が尾根状であるとばらつきが増大するが、本研究では 1 枚の断面 (正中矢状面) で計測しているため、形状の影響を受けにくく、



(a) 放射線技師による 2 回の計測値の比較



(b) 放射線技師と解剖医による計測値の比較

図 3 Bland-Altman Plot による PAL 値の再現性の比較 (実線: 平均, 破線: $\pm 1.96\sigma$)

(a) Mean: 0.08, +1.96SD: 0.21, -1.96SD: -0.04, (b) Mean: -0.03, +1.96SD: 0.06, -1.96SD: -0.12

ばらつきの減少に寄与したと考える。ただし、1 枚の断面で計測した Cobb 角が臨床上で有用性があるかについては、今後検討する必要がある。

10 症例による小規模な結果ではあるが、ベクトル法の計測値は Cobb 角よりもさらに再現性があり、PAL 値についても再現性のある計測結果が得られることを確認した。現時点で、これらの手法は半自動であるが、計算機による椎骨のレベルの自動識別を実現すれば、手法を全自動化でき、再現性のある手法を実現できる。したがって、今後は椎骨のレベルの自動識別にも取り組む予定である。

6. まとめ

MDCT を対象として、Cobb 法、ベクトル法、および PAL 法を用いて腰椎前彎を計測し、観察者内と観察者間のばらつきを評価した。その結果、ベクトル法は Cobb 法よりも計測値のばらつきが小さく、PAL 法も再現性の高い計測値を提供できることを確認した。

今後の課題として、椎骨のレベルを自動識別することにより、提案手法の全自動化を目指す。また、疾病の検知に対する提案手法の有用性についても検討していく予定である。

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。本研究の一部は科学研究費補助金 (若手研究 B: 21700462)、柏森情報科学振興財団研究補助金、岐阜大学活性化経費、および厚生労働省がん研究助成金 (飯沼班) によって行われました。

文 献

- [1] 西村恒彦: 予防医学の時代における画像診断の役割—健康寿命の延伸を求めて—。日本放射線技術学会近畿部会雑誌, 10 (1): 71-73 (2004).
- [2] 越智淳三: 解剖学アトラス 第 3 版. 文光堂, 33, 東京 (1990).
- [3] TS Keller, CJ Colloca, DE Harrison, DD Harrison, TJ Janik: Influence of spine morphology on intervertebral disc loads and stresses in asymptomatic adults: implications for the ideal spine. Spine J, 5 (3): 297-309 (2005).
- [4] JR Cobb: Out line for the study of scoliosis. Am Acad Orthop Surg Instr Course Lect, 5: 261-275 (1948).
- [5] AB Ferguson: Roentgen diagnosis of the extremities and spine. Hoeber, New York (1949).
- [6] AM Briggs, TV Wrigley, EA Tully, PE Adams, AM Greig, KL Bennell: Radiographic measures of thoracic kyphosis in osteoporosis: Cobb and vertebral centroid angles. Skeletal Radiol, 36 (8): 761-767 (2007).
- [7] T Vrtovec, B Likar, F Pernus: Quantitative analysis of spinal curvature in 3D: application to CT images of normal spine. Phys Med Biol, 53 (7): 1895-1908 (2008).
- [8] O Kuru, B Sahin, S. Kaplan: Alternative approach to evaluating lumbar lordosis on direct roentgenograms: Projection area per length squared. Anat Sci Int, 83 (2): 83-88 (2008).
- [9] 韓 明旭, 林 達郎, 周 向榮, 陳 華岳, 原 武史, 藤田広志, 横山龍二郎, 兼松雅之, 星 博昭: 体幹部 X 線 CT 画像における脊柱の正中矢状面画像を利用した椎体の骨密度と彎曲角度の自動計測法. 医用画像情報学会雑誌, 印刷中.
- [10] 林 達郎, 周 向榮, 陳 華岳, 原 武史, 藤田広志, 横山龍二郎, 兼松雅之, 星 博昭: X 線 CT 画像における胸椎後彎と腰椎前彎を評価するための半自動手法の開発. 信学技報, MI2008-80, 97-100 (2009).
- [11] 林 達郎, 周 向榮, 陳 華岳, 原 武史, 藤田広志, 横山龍二郎, 兼松雅之, 星 博昭: 体幹部 X 線 CT 画像における脊柱管の自動検出に基づく脊柱彎曲の定量化法の検討. 医用画像情報学会第 154 回大会 (2009).
- [12] JE Pruijs, MA Hageman, W Keessen, R van der Meer, JC van Wieringen: Variation in Cobb angle measurements in scoliosis. Skeletal Radiol, 23 (7): 517-520 (1994).
- [13] RT Morrissy, GS Goldsmith, EC Hall, D Kehl, GH Cowie: Measurement of the Cobb angle on radiographs of patients who have scoliosis. Evaluation of intrinsic error. J Bone Joint Surg Am, 72 (3): 320-327 (1990).