

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24659684

研究課題名(和文) 高度側弯形状に対する健全形状復元と三次元変形および左右非対称性の定量化手法の構築

研究課題名(英文) Restoring of symmetrical spinal shape, and quantification of three dimensional deformation and asymmetry for the scoliosis

研究代表者

桐山 善守 (Kiriya, Yoshimori)

慶應義塾大学・医学部・特任講師

研究者番号：30383722

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000 円、(間接経費) 600,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高度脊椎側弯症における幾何学的に厳密な左右非対称性の定量化手法の構築を行った。薄板スプライン法を用いることで、側弯形状から本来あるべき左右対称な形状を復元し、これに基づき、脊椎形状を覆う空間のひずみの分布を評価した。ひずみの分布をGreen-Lagrangeひずみを用いて評価したところ、圧縮・伸張・せん断ひずみが複雑に分布していることを明らかになった。本手法により、側弯症のような複雑な変形を示す疾患に対し、3次元的な変形分布の定量化が可能となった。

研究成果の概要(英文)：In this study, the quantitative method to evaluate the geometrical symmetry for excessive deformation of the scoliosis was developed. Using thin-plate spline method, symmetrical spinal shape was restored from the original scoliotic shape. Compared the symmetrical shape with the original scoliotic shape, spatical strain distribution covering the scoliosis was evaluated. As a result, compress/tensile/shear stresses were observed. Therefore, the method was useful to quantify three dimensional strain distributions. Also, the method should be a novel approach to elucidate the bony complicated deformation.

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：外科系臨床医学・整形外科学

キーワード：側弯症 薄板スプライン法 ひずみ分布

1. 研究開始当初の背景

高度脊椎側弯症の外科的治療では、脊椎姿勢が正常になることを目的として矯正されるが、変形した肋骨形状そのものは矯正されない。この結果、治療後であっても、胸郭全体としては依然として強度の左右非対称性が残存することになる。このような胸郭形状の変形は、治療後の患者満足度を低下させるだけでなく、肺を圧迫することによる心配機能の低下や内臓の圧縮など生命維持を脅かすことにもなる。しかし高度側弯症では、脊椎および肋骨形状が3次元的で不均一な変形分布を示しており、平面的な断層画像診断では定量的で精密な評価は困難であった。このため、脊椎と肋骨で基底される胸郭形状の定量的な評価方法の構築が必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、脊椎と肋骨で基底される胸郭形状の3次元的で不均一な空間変形分布と左右非対称性の定量的評価手法の構築を目的とする。具体的には、まず、医療画像から得られる骨形状情報から左右対称となるべき骨特徴点を取得する。続いて、左右対称性を条件として構造力学的なひずみ変形エネルギーを用いた形態変形手法を応用することで、罹患前の左右対称形状の復元を試みる。この復元した形状を基準とし、復元・変形形状間の空間格子形状を比較することで変形分布を定量的に評価する。また、復元形状の横断面に相当する変形形状の横断曲面を取得し、厳密な3次元の左右非対称の評価を行い、側弯症の新たな形状診断手法として提案する。

3. 研究の方法

(1) 本手法の概要

図1に本手法の概要を示す。本研究では、空間の変形分布を定量化するにあたり、対象空間を直方格子で覆い、この対象空間の変形に伴って直方格子も変形させ、変形前後における格子形状を比較することで、空間変形の評価を行う。本研究では、形状や対象空間の変形に薄板スプライン法(Thin - Plate Spline, 以下 TPS 法)を用いた。TPS 法は Bookstein により提案された変形手法であり(Bookstein, 1991), 2つの形態の対応するランドマークの距離が最小になるように周囲を変形させる。この際、ひずみが連続で、かつ、曲げエネルギーが最小となるように周囲を滑らかに変形させることが可能であり、主に生物の形態分析に多用される(Zelditch, 2004)。TPS 法は、変形則を線形変形部分と非線形変形部分に分離して提供することが可能である。こうした情報は、得られた変形則を議論する上で基本的な情報となるため、本研究では TPS 法を利用した。

本研究においては、側弯形状は取得できるものの、基準となるべき本来の左右対称な形

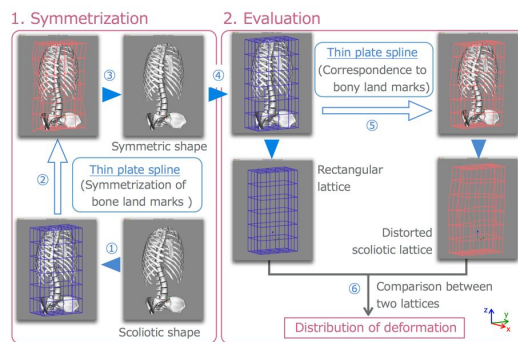


図1 本手法の概要

状は不明のままである。この基準となる形状として平均的な形状を用いた場合、評価対象の固体差が無視されるだけで無く、平均的な形状の母集団に依存した評価となってしまう、利用した平均形状によって評価が異なることが予想される。基準となる形状の構築も手法の中に組み込まれていれば、平均形状を共有することなく手術前後の比較、患者間や重症度の比較が可能となる。このため、本研究では、側弯形状を入力とし、一旦、左右対称な形状を作成し、これを元に入力した側弯形状の空間的変形分布の評価を行うことにした。評価の行程は図1①～⑥に従っており、以下にその詳細を示す

(2) 左右対称形状の作成

入力として用いる側弯形状全体を取り囲むように、直方格子(4×4×6)を設置し(図1), この格子点の位置に応じて TPS 法により内部の形状を変形させた(図1)。なお格子数については、より分割数の多い直方格子(5×5×7)と比較して、自由度が約半分であり、かつ、短時間で同様の結果が得られるため(4×4×6)を採用した。内部の側弯形状を左右対称な形状とするには、格子点を適切な位置に移動する必要がある。このため本研究では、格子点位置の3次元座標を数値最適化により求めた。まず、骨の特徴点として、正中矢状面に存在すべき点 P_c (104点)と左右対称であるべき点 P_l および P_r (466点)を抽出した(図2)。なお、x軸が前方、y軸が左方、z軸が鉛直上方となるように設定した。これらの点を利用し、以下の目的関数が最小となるように格子点位置を探索した。

$$\Omega = c_0 \sum P_{c,y}^2 + c_1 \sum P_{m,y}^2 + c_2 \sum (P_{s,x}^2 + P_{s,z}^2) + c_3 \int \left(\frac{1}{2} \mathbf{E} : \mathbf{E} \right) dV$$

$$\mathbf{P}_s = (\mathbf{I} - \mathbf{n}_y \otimes \mathbf{n}_y) \cdot (\mathbf{P}_l - \mathbf{P}_r)$$

ここで、 \mathbf{P}_m は \mathbf{P}_l と \mathbf{P}_r の中点、 \mathbf{n}_y は y 軸方向の単位ベクトル、 \mathbf{E} は直方格子が変形することにより格子空間に生じる Green-Lagrange ひずみ、 c_{0-3} は重み係数であり、 x, y, z はベクトルの各成分を表している。第一項は、 \mathbf{P}_c と矢状面とのずれを表しており、第二および第

三項は P_r と P_l の左右対称性を評価している。第四項は内部の格子のひずみエネルギーを表しており、過度のひずみを抑制するために設定した。ひずみエネルギーの計算を行うにあたり、各直方格子は 8 節点より成るアイソパラメトリック連続体要素とし、各節点におけるひずみ値を元に格子内部に作用するひずみエネルギーの総和を計算した(久田・野口, 1995)。なお、 $c_0 \sim c_2$ は格子点が 1 mm、 c_3 は格子が 1mm 伸張変形した時に各項の数値桁数が等しくなるように決定し、それぞれ 1.0, 1.0, 1.0, 0.001 とした。入力は格子座標位置であり、数値最適化手法の一つであるシンプレックス法(Nelder and Mead, 1965)を用いた。

(3) 空間的変形分布の評価

得られた対称形状に、改めて同数の直方格子を設置した(図 1)。この対称形状を元の側弯形状に変形させる際に、上記の骨特徴点が一致するよう TPS 法を用いて格子形状を変形させた(図 1)。これにより、側弯形状を覆う歪んだ格子形状を得ることができる。

対称形状に設置した直方格子を基準とし、歪んだ格子形状のひずみの分布を評価した(図 1)。格子ごとに Green-Lagrange ひずみを求め、格子点におけるひずみ値を算出した。

本研究では、思春期特異性側弯症と診断された女性被験者の全長 CT データを利用した。本研究では、被験者への被曝を最小限に抑える点から、術前評価に利用される CT 計測データを利用した。

4. 研究成果

(1) 結果

入力として用いた側弯形状と、本手法により得られた左右対称な形状を図 3 に示す。入力データに対して Cobb 角は 35 度から 7 度に減少した。矢状面を基準にすると、第 7 胸椎において P_c で最大 7.7 mm の残差が生じていた。また、式(1)において最大誤差を生み出した P_r と P_l も第 7 胸椎において生じていた。ここで P_r と P_l の左右対称性を評価するために、それぞれの矢状面からの距離を l_r と l_l 、 $\text{sgn}_y(\mathbf{X})$ をベクトル \mathbf{X} の y 座標の符号とし、

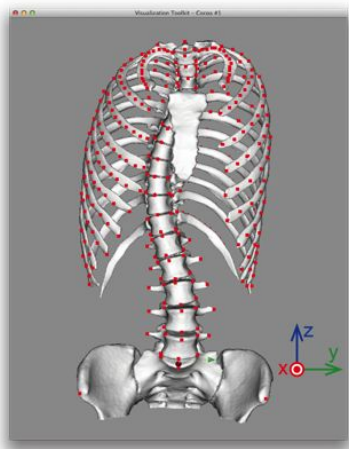


図 2 対象と解剖学的特徴点

対称度として $(\text{sgn}_y(\mathbf{P}_l) \times l_r + \text{sgn}_y(\mathbf{P}_r) \times l_l) / (l_r - l_l) \times 100(\%)$ を定義した。この結果、最大誤差を生み出した P_r と P_l では対称度が -100.0% から -26.4% への減少に留まっていたが、他の部位では最大でも $\pm 9\%$ 程度であったことから、おおむね左右対称な形状を取得することができた。

この形状を基準に、ひずみの分布を評価した。なお、格子境界でのひずみ値は隣接する格子のひずみ値の平均とした。頂椎を含む前額面および横断面におけるひずみの分布をそれぞれ図 4 および 5 に示す。前額面において、頂椎では縦方向の圧縮ひずみが生じており、そのすぐ下部では伸張ひずみが生じていた。また、頂椎を挟んで凹側と凸側とでは、左右方向の圧縮・伸張ひずみおよびせん断ひずみの正負が逆転していた。横断面においては、頂椎の後方で前後方向への引っ張りのひずみが生じており、頂椎と肋骨で囲まれた空間は正のせん断ひずみが生じていた。

(2) 考察

本研究では、側弯形状の空間的変形分布の定量化を実現するために、対象となる空間を格子で覆い、その変形を評価することで目的の実現を試みた。本手法は大きく 2 つの行程から構成されており、前半は側弯形状から左右対称形状の作成、後半は側弯形状の空間的変形分布の評価より成る。

前半の側弯形状から左右対称形状の作成では、入力した側弯形状だけから左右対称な形状の作成を行った。この対称な形状が側弯形状を覆う空間のひずみを評価する上での基準となることから、被験者自身の正常な形状を作成することが望ましい。本手法の結果、完全な左右対称性を実現出来なかったものの、入力した側弯形状に比べて弯曲形状はほぼ消失していた。また、獲得された対称形状において、実際の健常では存在しえない骨形状は確認できず、楔型椎体による胸椎の後弯も発生しなかった(Watanabe et al., 2012)。本研

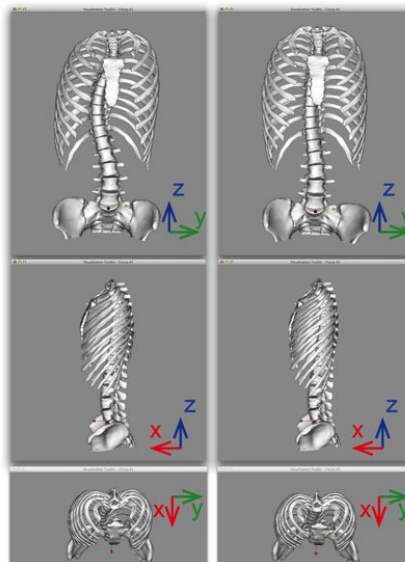


図 3 対称化された側弯形状

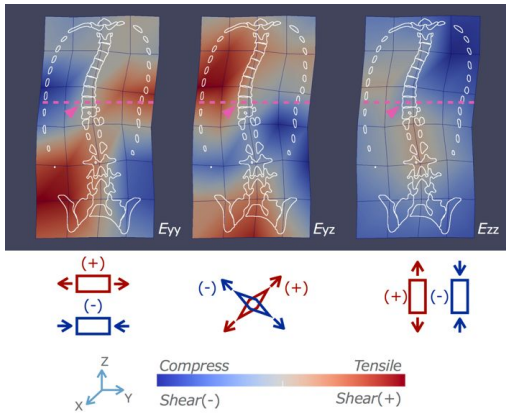


図4 前額面におけるひずみの分布

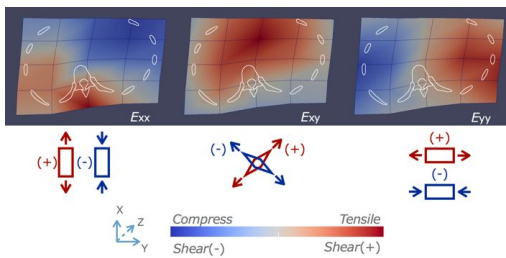


図5 横断面におけるひずみの分布

究では、格子分割数は1種類のみしか用いなかったが、より高度な変形やダブルカーブなどの複雑な変形に対しては分割数を増加させることも検討すべきと考えられる。また本研究では、目的関数として左右対称性の評価と過度のひずみの制限を利用した。変形の大きな部位においては、こうした目的関数が適しているが、変形が小さく並行移動や単純な回転運動のみが生じているような部位では、剛体運動を効果的に実現できるように特徴点間の距離を一定に保つなどの工夫も必要となる。

本研究では、胸椎部に生じる右凸のシングルカーブを有する側弯形状を対象とした。得られた対称形状を基準にしたひずみ分布の評価では、頂椎を挟んで凸側と凹側とで様々なひずみの正負が反転していることを確認できた。脊柱が右側の肋骨に向かって弯曲しているため、図4および図5の E_{yy} のひずみ分布は力学的な解釈とも一致する。また、図4および図5に示すように、脊柱を挟んで凹凸側間で各種ひずみ分布の正負が反転することも、側弯の変形と矛盾しない。一方、図5の E_{xy} では胸郭内には凸側後方から凹側前方(図中左下から右上)に向かう正のせん断ひずみが生じていた。このようなせん断ひずみの分布を明らかにすることは、側弯症の脊柱姿勢の変形だけでなく、胸郭形状の変形を理解し、側弯進行後の形態を予測する上で重要な情報になる。

本研究では、側弯形状から左右対称な形状を作成し、再度、側弯形状に変形させる方法

を選択した。側弯形状の大きさや状態を評価するだけであれば、入力に用いた側弯形状と作成した左右対称な形状を比較すれば良いが、この場合には基準が側弯形状となるため患者間の比較が困難になる。また、平均的な健常形状を基準にすることも考えられるが、平均的な健常形状は年齢、性別、人種、生活習慣等の母集団の違いの影響を受けることになる。このため、側弯形状の評価が、疾患や患者の固体差によるものだけでなく基準となる平均形状の影響も受けることになる。これに対して本手法は、左右対称な形状の作成法が含まれているため、解析時のパラメータが同じであれば、固体差を考慮した上での患者間評価が可能になる。

(3) 成果の位置づけと今後の展望

従来の整形外科領域では、内部構成要素の相対位置や向きなど、対象物体そのものの情報を利用して対象物体の変形の度合いを評価することが多かった。これに対して、本研究では、対象物体の存在する空間を用いて対象物体の変形を評価しており、本手法はこれまでにない新しい試みであるといえる。現在、脊柱側弯症においては、Cobb角やLenke分類などの評価法が臨床的に用いられているが、これらは実際の手術において椎骨の配列を改善する必要性と密接に関連しているためであり、本手法は基本的な定量化方法が異なっている。すなわち、本手法は変形疾患の変形度を評価するための極めて新しい手法とすることができ、脊椎変形疾患に留まらず他の関節部位に対する評価手法としても応用ができる点で、基礎的なながらも画期的な手法と言える。

この一方で、克服すべき課題もある。本手法により得られた連続的なひずみの分布を、椎骨の移動や肋骨形状の骨切り量に変換し定量的に提示する手法についても合わせて開発することで、より実践的な臨床への応用が期待できる。

また本手法では、固体力学における基本的な物理量としてGreen-Lagrangeひずみテンソルの各成分を可視化した。今後、従来の臨床評価手法と本手法とを比較検討することで、従来手法の物理的な意味を明らかにすることが可能となる。さらに、臨床結果とひずみ値の種別や値との相関関係を明らかにすることによって、形態評価に基づく臨床診断技術が確立され、より定量的な形態変形の評価が期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

Kiriyama Y, Watanabe K, Matsumoto M, Toyama Y, Nagura T, Quantification of the spatial distribution of scoliosis using a thin-plate spline method, Journal of

Biomechanics, 査読有り, 47(1), 2014, 302-307.

DOI: 10.1016/j.jbiomech.2013.10.013

桐山善守, 渡辺航太, 松本守雄, 戸山芳昭, 名倉武雄, 薄板スプライン法を用いた側弯形状の空間的変形分布の定量化手法の開発, 臨床バイオメカニクス, 査読有り, 34, 2013, 25-32.

URL:

<http://webcat.nii.ac.jp/naid/40019872725>

〔学会発表〕(計2件)

Kiriyama Y, Watanabe K, Matsumoto M, Toyama Y, Nagura T, Development of quantification of spatial strain distribution for scoliosis, American Society of Biomechanics, 2013年9月4日~7日, Omaha (USA).

桐山善守, 渡辺航太, 松本守雄, 戸山芳昭, 名倉武雄, 側弯形状に対する薄板スプライン法を用いた空間的変形分布の定量化手法の開発, 日本臨床バイオメカニクス学会, 2012年11月9日~10日, 千葉.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桐山 善守 (KIRIYAMA, Yoshimori)

慶應義塾大学・医学部・特任講師

研究者番号: 30383722

(2) 研究分担者

松本 守雄 (MATSUMOTO, Morio)

慶應義塾大学・医学部・准教授

研究者番号: 40209656

渡邊 航太 (WATANABE, Kota)

慶應義塾大学・医学部・特任講師

研究者番号: 60317170