



Title	脊柱側弯症におけるロッド曲線形状が3次元体表面に与える影響 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	小甲, 晃史
Description	配架番号 : 2606
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(医学)
Dissertation Number	甲第14488号
Issue Date	2021-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81868
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Terufumi_Kokabu_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（医学） 氏名 小甲 晃史

学位論文題名

脊柱側弯症におけるロッド曲線形状が3次元体表面に与える影響

(Impact of the rod shape in scoliosis surgery on the back surface)

【背景と目的】

特発性側弯症は、脊柱に三次元的な変形をもたらす小児筋骨格系疾患である。側弯症における変形の程度は、立位全脊柱X線正面像のコブ角により定量的に評価される。コブ角が25°から40°程度の進行性の特発性側弯症の場合は装具治療が適応され、コブ角が40°を超える重度の特発性側弯症患者には、将来的な腰痛、更には呼吸機能低下などの併存症を防ぐために矯正手術が行われる。特発性側弯症の早期発見は適切な治療のために不可欠であるが、側弯検診の現状として、効率的で客観的に側弯症を検知できる機器はない。手術治療に関しては、冠状面の矯正だけではなく、矢状面配列の改善や維持も非常に重要であるが、手術時に行われるロッド曲げ形成は、術者の経験や勘に依存しており、また曲げ形成によりできる notch はロッドの耐久性を著しく低下させる。椎間関節切除術は、変形矯正だけでなく矯正時のロッド変形やロッド折損の防止に有効であるが、椎間関節切除術の効果を評価した *in vitro* または *in vivo* の生体力学的研究はほとんどない。本研究では、3D デプスセンサーを用いた画像評価により背表面の非対称性を検出できる側弯症検出機器の開発を行い、原理検証試験および多施設臨床試験を行った。また、手術に用いたロッド形状を分類することにより、曲げ加工不要なプリベントロッドを開発し、そのロッドを使用する際に必要となる脊柱可動性に対する椎間関節切除の効果を検証した。

【対象と方法】

実験 1. 前屈位背表面の非対称性を検出するアルゴリズムを開発した。原理検証試験としてソフトウェアをインストールしたノートパソコンと 3D デプスセンサーで構成されたシステムによって、特発性側弯症疑いで紹介された 76 名を撮影解析した。被検者は前屈位で撮影解析され、背表面の非対称性の程度を数値化した非対称性指数が得られる。非対称性指数と主カーブコブ角との相関関係を評価した。このシステムの撮影解析の再現性と体幹回転の影響をファントムモデルにて評価し、また、30 人の被検者で体位による再現性評価も行った。

実験 2. 本システムを用いて、本邦 5 施設において前向き試験を行った。先行研究からサンプルサイズを 170 例とし、非対称性指数と主カーブコブ角との相関関係を評価した。

実験 3. 実験 1, 2 における撮影データから背表面の左右高低差データを抽出し、回帰型畳み込みニューラルネットワークに学習させた。実験 1, 2 において、3D 画像データが回収可能であった 160 例を対象とした。5 分割交差検証にてコブ角予測精度を評価した。

実験 4. 胸椎特発性側弯症の解剖学的脊柱再建術に使用された 46 例のロッド形状を解析した。ロッドの中心点群を抽出し、中心点群間の類似性評価に *iterative closest point* (ICP) 法を使用した。30 mm ごとの長さ別グループを作り、そのグループ内で ICP 処理を行い、算出されたロッド間の差分値を用いて、階層クラスター解析にてクラスター分けを行った。

実験 5. 後方矯正固定術を受けた胸椎特発性側弯症患者 20 名を対象とした。術中にスクリーネックコンプレッサー、スクリーネックディストラクターのハンドルに 50N の負荷をかけて、T7 から T11 に挿入された椎弓根スクリーの首部に圧縮力または伸延力を加えた。負荷時と無負荷時におけるスクリー間の距離から各椎間の可動率を算出した。椎間関節切除術の前後で可動率を算出し、その変化量を評価することで椎間関節切除術の効果を評価した。

【結果】

実験 1. 非対称性指数とコブ角との相関係数は 0.88 であった。各ファントムモデルにおいて、中間位、 $\pm 5^\circ$ 回転位でそれぞれ 10 回ずつ撮影したところ、回転位間には非対称性指数に有意な差があったが ($p < 0.05$)、変動係数は 1~4%で、再現性は非常に良好であった。被検者の同一体位に対する再現性の評価においても、級内相関係数は 0.995 であり、非常に良好な結果であった。

実験 2. コブ角と非対称性指数との相関係数は 0.85 ($n = 170$, $p < 0.01$) であった。特発性側弯症の診断となるコブ角 10° 以上における非対称性指数のカットオフ値は 1.268 であった。コブ角 10° 以上を予測した場合の感度は 0.97、特異度は 0.93、陽性的中率は 0.99、陰性的中率は 0.72、精度は 0.97、陽性尤度比は 13.55、陰性尤度比は 0.04 であった。

実験 3. 5 分割交差検証を 10 回行ったところ、予測コブ角と実コブ角との相関係数の範囲は 0.87 から 0.89 であった。10 回目の予測コブ角の平均値と実コブ角との相関係数は 0.91 であった。実コブ角と 10 回の予測コブ角の平均値における 平均絶対誤差と二乗平均平方根誤差は、それぞれ 4.0° と 5.4° であった。

実験 4. ロッド長 30mm 毎の各グループでクラスター解析を行ったところ、10 種類の代表的ロッド形状が得られた。各クラスター内の最大差分値は 6.0mm 以下であった。

実験 5. 椎間可動率の絶対値は、圧縮力と伸延力ともに、椎間関節切除術後に有意に増加していた (すべて $P < 0.01$)。可動率の変化量の絶対値は、圧縮力と伸延力ともに、凸側よりも凹側の方が有意に大きかった ($P < 0.01$, $P = 0.046$)。

【考察】

実験 1, 2, 3. 非対称性指数とコブ角との相関係数は、実験 1 の原理検証試験では 0.88、実験 2 の多施設前向き臨床試験では 0.85 であり、開発したアルゴリズムがコブ角予測に優れた性能を有していることを示唆している。更に、開発したアルゴリズムに回帰型畳み込みニューラルネットワークを組み込むことで、予測コブ角と実コブ角との相関係数が 0.91 に向上していた。現在、側弯検診で最も用いられているスコリオメーターで測定した値とコブ角との相関係数は 0.68 と報告されており、本システムは現行の検診システムに代わる検診機器となる可能性がある。今後、学校検診における有用性を証明するために、学校検診における大規模臨床試験を予定している。

実験 4. 特発性側弯症手術に使用されたロッド形状を解析し、ロッドの長さを考慮して 10 種類のロッド形状が導出された。このわずかな差分は、椎間関節切除術により生じる可動性により、術後の脊柱アライメントに影響を与えないと考えられ、形状が 10 種類であることはプリベントロッドを製造する際には適切であると考えられる。

実験 5. 椎間関節切除術は、生体内において脊柱可動性を増加させることが示唆された。また、可動性率の変化量は凸側よりも凹側の方が有意に大きく、多椎間椎間関節切除術が凸側よりも凹側の方に、より大きな可動性増加効果を及ぼすことを示唆している。

【結論】

3D デプスセンサーで撮影した背表面画像において、非対称性を認識して迅速に特発性側弯症を検出するシステムを開発した。本システムは特発性側弯症検出に非常に有効であることが示されたが、回帰型畳み込みニューラルネットワークを組み込むことで更にコブ角予測精度が向上していた。また、特発性側弯症に対して、至適ロッド形状 10 種類を導出した。プリベントロッドにより、ロッド折損のリスクだけでなく、患者の負担も軽減することができると考えられた。また、椎間関節切除術後により脊柱可動性が有意に増加しており、プリベントロッドの差分値を許容する可動性獲得に有用な手技であると考えられた。