

曲率を用いた解剖画像からの大腿部繊維筋の推定
 Estimation of Muscle Fiber in Quadriceps Femoris Muscles
 Using Curvature Information

大城 将健[†] 戸崎 哲也[‡]
 Shoken Ohshiro Tetsuya Tozaki

1. 諸言

近年の医療技術に、骨粗しょう症によって劣化した骨と人工骨を入れ替える人工骨頭置換手術と呼ばれる治療法が存在する。このような治療では骨と密接な関係にある筋肉の動態解析が有効であるとされている。この筋肉を骨格筋と言い、その内部は繊維筋の無数の束で構成されている。つまり、骨格筋の動作解析には繊維筋の 3 次元モデル化が必須である。歩行動作を解析する際に、大腿部の筋動態を 3 次元的に把握することが重要とされる。従来では、臓器や骨を検査する際に、MRI や CT が広く利用されるが、筋肉のような組織を検出するには不向きであるため、一般の臨床試験での使用は望ましくない。そこで本研究では、人体解剖画像データから大腿四頭筋を対象にその繊維筋抽出を行うことを目的とする。この際、単純閾値を用いた場合、背景に存在するバイアス成分の影響で抽出が困難であるため、ここでは画像の持つ曲率情報に基づき、それらの値を利用した繊維筋の抽出及び 3 次元表示を行う。抽出手法としては、画像の持つ 4 次元超曲面曲率を算出し、その得られた 3 種類の曲率に基づいて線状の特徴を有する領域を推定する。また、それらに 3 次元表示を行い、走行状態を視覚化する。本報告では、日本人体型に近い Visible Korean Human Dataset(以下 VKH)[1]を対象として大腿四頭筋の繊維筋の抽出について検討を行った結果を報告する。

2. 手法

本研究では歩行動作に重要な大腿部の筋肉である大腿四頭筋に着目する。これは大腿直筋(Rectus Femoris Muscle)、内側広筋(Vastus Intermedius Muscle)、外側広筋(Vastus Lateralis Muscle)、中間広筋(Vastus Medialis Muscle)で構成される。これらの領域を関心領域とする。初めに、関心領域の取得を行う。そして内部の繊維筋を抽出する。抽出したデータに対し 3 次元表示を行う。

VKH は、2005 年に作成された National Institutes of Health (NIH)が無料提供しているデータセットのことである。これは韓国人の男性や女性の冷凍検体を凍結保存し、0.1mm 刻みでグランドしてその断面を高解像度のデジタルカメラで撮影したものである[1]。約 8500 枚の解剖画像と約 1800 枚の MR、CT 画像があり、解剖画像においては画素サイズ 3040×2008pixel、スライス厚 0.1mm、画素間隔 0.2mm のフルカラー画像である。大腿部付近の解剖画像を図 1(a)に示す。また、このデータセットでは、医師が人体の各領域をセグメンテーションして情報を提供している。図 1(b)は、同図(a)の外側広筋をセグメンテーションしている例である。

[†] 神戸市立工業高等専門学校 電気電子工学専攻

[‡] 神戸市立工業高等専門学校 電子工学科 教授

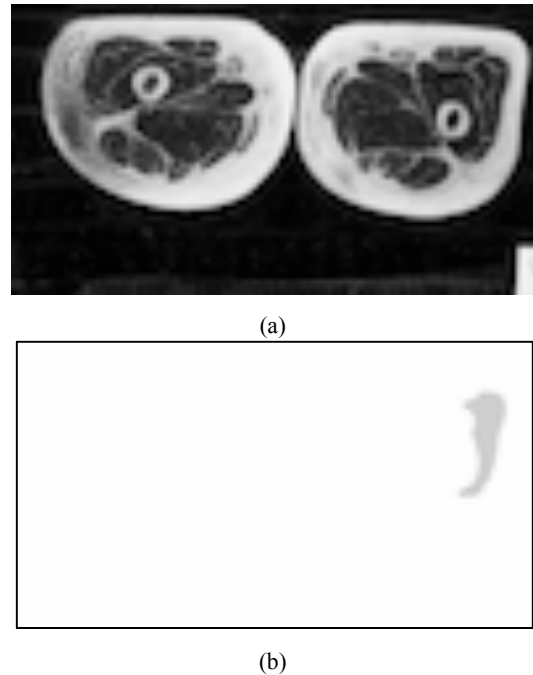


図 1. VKH データの一例

(a)大腿部付近の解剖画像(原画像)、(b)外側広筋のセグメントデータ取得結果画像

2.1 関心領域取得

前述したように、医師によりセグメントされたデータが 1mm 刻みで用意されている一方で、解剖画像は 0.1mm 間隔となっている。この両者のピッチ幅を統一するため、以下の処理を行う。まず、医師によりセグメントされたデータの領域の辺縁部分に当たる画素に距離値 100 を与える。次に、領域内側に向かって距離値を 1 ずつ増やし、逆に背景部分は辺縁から離れるにつれて距離値を 1 減らす。そして 2 値画像を辺縁からの距離を用いた距離画像に変換する。さらに、隣接するスライスごとに距離値に基づいて 9 枚のスライスを線形内挿する。つまり、1mm 刻みのセグメントデータに対し、0.1mm の距離画像を作成する。最後に距離値 100 で 2 値化することで関心領域を得ることができる。

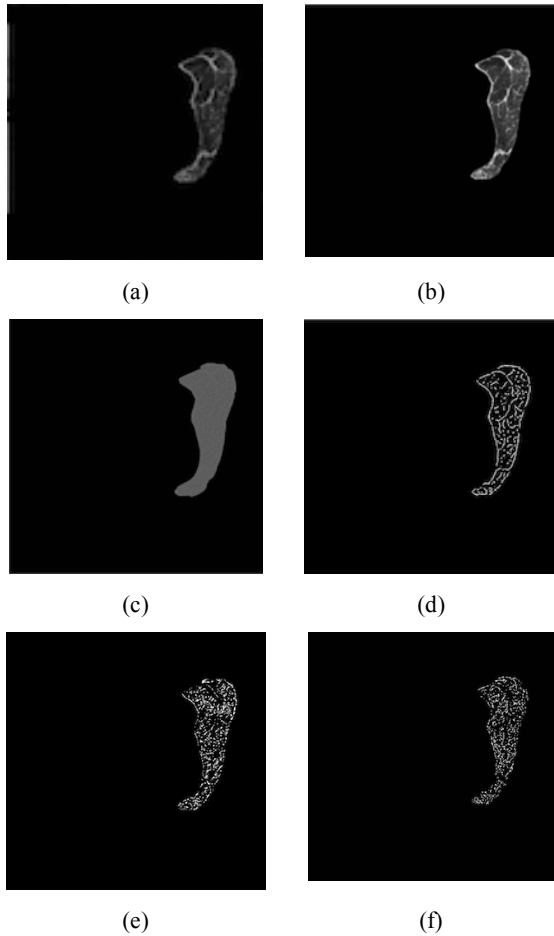


図 2. 曲率に基づく繊維筋抽出結果

(a)関心領域内画像、(a)関心領域内平滑化画像、(a)関心領域内曲率画像、(d)第 1 曲率に基づく抽出結果、(e)第 2 曲率に基づく抽出結果、(f)第 3 曲率に基づく抽出結果

2.2 繊維筋抽出

取得した関心領域内部の繊維筋の抽出を行う。原画像上ではバイアス成分を含むため、均一な閾値で繊維筋の抽出は困難である。そこで、本研究では微分幾何学を用いて 4 次元超曲面曲率を算出し、関心領域に適用する。前処理として画像サイズを圧縮するために、式(1)を用いて関心領域にグレースケール変換を行う。さらに画像中に存在するノイズを除去するため、式(2)に示す 3 次元ガウス関数により平滑化の処理を施す。グレースケール変換のみでは非常に小さい領域でノイズが残っている。この処理によりノイズ周辺に存在する低画素からノイズ領域成分を低くすることができる。

$$\text{出力画素} = 0.30 \times R + 0.59 \times G + 0.11 \times B \quad (1)$$

表 1. 各曲率の閾値

	閾値
第 1 曲率	2.5
第 2 曲率	0.75
第 3 曲率	0.4

$$G(x, y, z, s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}^3 s^3} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{2s^2}\right) \quad (2)$$

4 次元超曲面曲率[2][3]とは、3 次元濃淡画像の空間方向の 3 つの軸に加えて、第 4 軸目として濃度値を付加することによって 3 次元濃淡画像を 4 次元空間内の 4 次元超曲面と考えたときの法曲率のことである。これは、式(3)に示す第 1 基本式と式(4)に示す第 2 基本式から式(5)の行列 W を導出することによって得られる固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ として求めることができる。

$$F_1 = \begin{pmatrix} 1 + f_x^2 & f_x f_y & f_x f_z \\ f_y f_x & 1 + f_y^2 & f_y f_z \\ f_z f_x & f_z f_y & 1 + f_z^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$F_2 = -\frac{1}{D} \begin{pmatrix} f_{xx} & f_{xy} & f_{xz} \\ f_{yx} & f_{yy} & f_{yz} \\ f_{zx} & f_{zy} & f_{zz} \end{pmatrix} \quad (4)$$

ただし、 $D = \sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}$ である。

$$W = F_1^{-1} F_2 \quad (5)$$

$f_x, f_y, f_z, f_{xx}, f_{xy}, f_{xz}, f_{yy}, f_{yx}, f_{yz}, f_{zz}, f_{zx}, f_{zy}$ はそれぞれ $f(x, y, z)$ の偏導関数を表し、3 次元ガウス関数の偏導関数と畳み込みによって計算する。また、ガウス関数の標準偏差を表すパラメータは対象によって変動させる必要がある。ここでは、対象とする領域の大きさを考慮して標準偏差 $\sigma = 3$ とした。行列 W の固有値 3 つを $|\lambda_3| \leq |\lambda_2| \leq |\lambda_1|$ とすると、固有値に対応する固有値ベクトル e_1, e_2, e_3 は互いに直交し、その方向は各固有値から得られる曲率に対応する輝度変化の方向と一致する。ここでは、固有値の絶対値の大きい順に第 1 曲率、第 2 曲率、第 3 曲率と定める。領域の抽出は各曲率の大きさに基づいて 2 値化することで行う。ここで、閾値の決定は経験的な値に基づくものとして、表 1 に示す値を適用した[4][5]。

図 2 に、各曲率の値に応じた 2 値化結果を示す。(a)が関心領域内部を輝度画像に変換した画像、(b)が(a)に平滑化の処理を施した画像、(c)が(b)から 4 次元超曲面を算出した際の輝度画像、(d)が関心領域内の 4 次元超曲面算出後、第 1 曲率に基づいて繊維筋を抽出した結果、(e)が第 2 曲率に基づいて抽出した画像、(f)が第 3 曲率に基づいて抽出した結果を示す。これらの結果より、第 1 曲率、第 2 曲率に基づいた場合、線状に伸びる陰影に強く反応しており、線状陰影の走行方向に依存するものと考えられる。また、第 3 曲率は線状陰影を呈していないため、第 1、第 2 曲率に直交し陰影の内部方向に強く反応し、分岐点等で高い値を持つと考えられる。

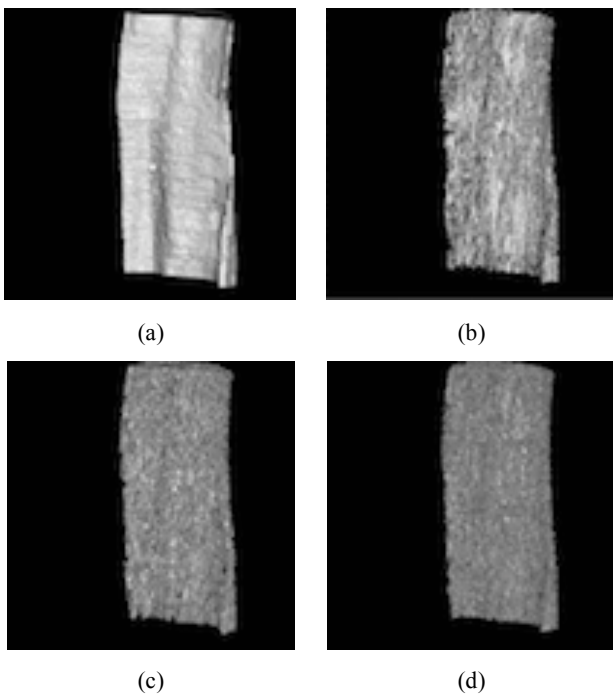


図 3. 繊維筋(外側広筋)の抽出結果

(a)セグメントデータからの関心領域、(b)第 1 曲率に基づく抽出結果、(c)第 2 曲率に基づく抽出結果、(d)第 3 曲率に基づく抽出結果

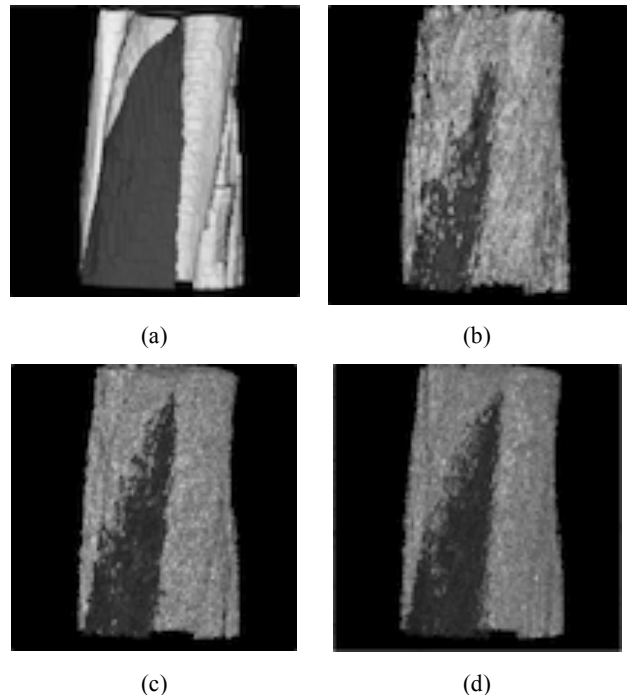


図 4. 繊維筋の抽出結果

(a)セグメントデータからの関心領域、(b)第 1 曲率に基づく抽出結果、(c)第 2 曲率に基づく抽出結果、(d)第 3 曲率に基づく抽出結果

2.3 3次元表示

閾値設定後の画像データを 3 次元的に表現するための手法として、ボリュームレンダリングを採用する。大腿四頭筋のそれぞれを合成した 3 次元像を図 3、図 4 に示す。(a)は、関心領域の 3 次元画像を、(b)は第 1 曲率に基づいた繊維筋の抽出結果を、(c)は第 2 曲率に基づいた結果を、(d)は第 3 曲率に基づいた結果を示す。青色が大腿直筋、黄色が外側広筋、水色が中間広筋、緑色が内側広筋を表す。(b)、(c)より、それぞれの領域において鉛直方向に走行する線状陰影を確認することができる。一方(d)からは線状の陰影を確認することはできない。図 5 には第一曲率での抽出結果で、1 周 360 度を 90 度刻みで回転させた画像である。全筋肉に対して同様の出力が得られていることが分かる。

3. 結果

4 次元超曲面曲率の導入によって、背景に存在するバイアス成分の影響を受けずに均一な閾値で繊維筋の抽出を行った。第 1 曲率[図 2(b)]と第 2 曲率[図 2(c)]では共に線状陰影を抽出しているため、3 次元表示した際に[図 3(b)(c)]、繊維筋の走行方向が表現されている。これに対し第 3 曲率[図 2(d)]は、孤立点において強い値を持つ。従って、繊維筋を表現するには不向きであることが 3 次元表示[図 3(d)]から理解できる。

結果、3 次元で表示することによって第 1、第 2 曲率では繊維筋の走行方向を視覚的に捉えることが可能ということが得られた。

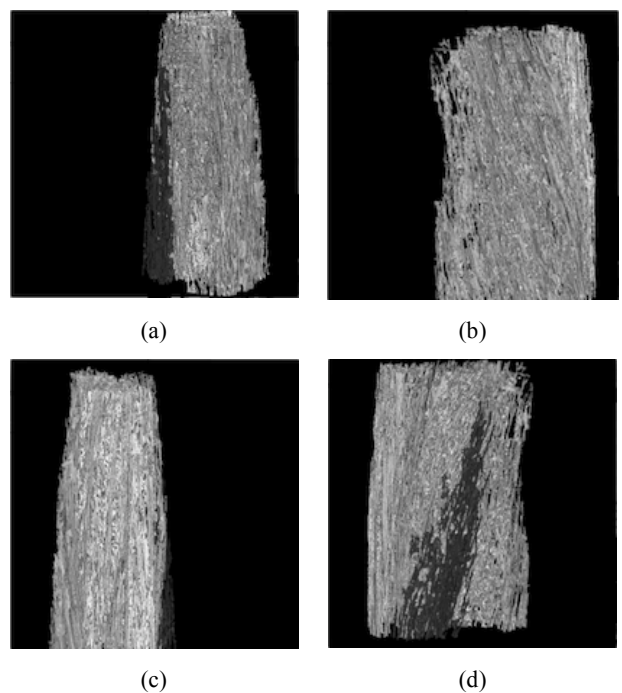


図 5. 第一曲率の抽出結果回転画像

(a)0[度] (b)90[度] (c)180[度] (d)270[度]

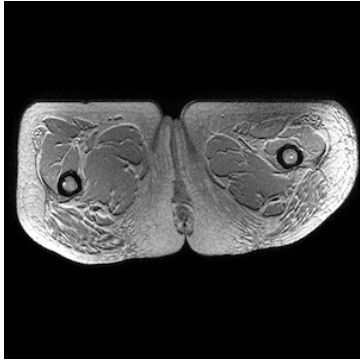


図 6. VKH データ内蔵の MRI 画像

4. 考察

本報告では骨格筋に焦点を置き、大腿四頭筋内の繊維筋抽出を試みた。その過程として、微分幾何学に基づいた 4 次元超曲面曲率を導入した。これにより、関心領域に置ける画像濃度値の濃度勾配を算出し、背景バイアスの影響を受けることなく閾値の設定を可能とした。また、第 1 曲率及び第 2 曲率において、3 次元で表示することで繊維筋の走行方向の推定を可能とした。しかし、現段階では閾値の設定方法には、結果を確認しながら決定する方法を採っているため最適とは言えない。加えて、繊維筋の推定に過ぎないため、定量的な評価が必要となる。従って、今後は最適な閾値を決定できる手法の確立が必要となる。さらに、VKH に内蔵されている同被験体の MRI データ[図 6]を研究対象とし、本手法の適用により精度評価を行うことが挙げられる。最終的には筋動態の解析を加えるなどにより、診断支援やリハビリテーションの指標となることを目標とする。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 16K00411 の助成を受けたものである。また、これらの研究成果及び関連成果を得るに当たり、韓国科学技術情報研究院より Visible Korean Data をご提供いただきました。

参考文献

- [1] in Seo, Min Suk Chung, Sung Bae Hwang, Young Sook Lee, Doung-Hwan Har, Hyung, Seon Park: "Visible Korean Human: Improved Serially Sectioned Images of the Entire Body", IEE TRANSACTIONS ON MEDICAL IMAGING, VOL.24, NO3, MARCH 2005.
- [2] O.Monga and S.Benayoun: "Using partial derivatives on 3D images to extract typical surface features", Computer Vision and Image Understanding, vol.61, no.2, pp.172-189, 1995.
- [3] 平野靖、清水昭伸、長谷川純一、鳥脇純一郎: "4 次元超曲面の曲率を用いた 3 次元濃淡画像に対する追跡型細線化の一手法", 電子情報通信学会論文誌, J-83-D-II, 1, pp.126-136, 2000.
- [4] Tetsuya Tozaki, Michio Senda: "Extraction and Visualization of Structural Information Based on FDG-PET Images", The 13th IASTED International Conference on Biomedical Engineering, 852, pp.013, 2017.
- [5] 大城将健、戸崎哲也: "人体解剖画像からの大腿四頭筋内繊維筋組織の抽出", FIT2016 第 15 回情報科学技術フォーラム, G007, 2016.