

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26462315

研究課題名(和文)MRI画像解析に基づく計算機支援による定量的なACL再建術最適化

研究課題名(英文)Computer-aided Automated and Quantitative ACL Reconstruction Surgery
Optimization based on MR Image Analysis

研究代表者

小橋 昌司(KOBADHI, SYOJI)

兵庫県立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00332966

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：3次元MRI画像からの正側面擬似単純X線像の全自動生成法を提案した。次に正側面擬似単純X線像上でBlumensaat's lineを自動検出し、Quadrant法により、ACLを構成する前内側線維束(AMB)、後外側線維束(PLB)の付着部位置の推定を行う。ここで得られたACL付着部の2次元座標を3次元の骨領域表面上に写像することでACL付着部の3次元座標を推定する。

提案法を評価するためSKI10データセットに含まれる100名よりランダムに選択した10名のMR画像に適用した。実験結果より3次元のACL付着部座標が推定可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This study proposed a fully-automated synthesis method of lateral pseudo X-ray radiograph image. Then, it automatically detects Blumensaat's line, and predict attachment positions of anterior-medial bundle (AMB) and posterior-lateral bundle (PLB). 3-D position of AMB and PLB are estimated by back-projection to 3-D bonny surface.

The proposed method has been applied to 10 subjects who are extracted randomly from 100 subjects in SKI10 dataset. Experimental results validated that the proposed method detected attachment position of AMB.

研究分野：医用画像認識

キーワード：前十字靭帯再建術 MRI画像 正側面擬似単純X線像 Blumensaat's line 前内側線維束 後外側線維束

1. 研究開始当初の背景

スポーツ外傷で、ACL(図1)損傷は手術対象になる最も多い外傷である。損傷すると膝関節の不安定性が出現し、スポーツ成績に影響を与え、継続による再受傷は、半月板や関節軟骨の二次的損傷をきたし、変形性関節症の進行につながる。これを予防するために、ACL再建手術で安定した膝を作ることが重要である。本邦では年間約3~4万件のACL損傷が発生しており、手術は年間約1万件以上に達する。ACL再建術は大腿骨、脛骨ともにACL附着部に骨孔(骨トンネル)を開け、移植腱を通して固定を行う手術である。八木らの報告では、ACLを構成する前内側線維束と後外側線維束の2重線維束を再現する目的で、各骨に2つの骨孔、2重の自家腱移植により、膝安定性が向上した(Yagi M et al. Am J Sports Med. 2002. 30:660-666.)。



図1 ACL (部)

術後の大腿骨内側の骨孔位置の評価は、単純X線画像を用いたBlumensaat線に基づくQuadrant法(Bernard M, Hertel P 1997 Am J Knee Surg)で行われている。骨孔の位置によって術後成績が大きく左右されるが(Kamath et al. Am J Sports Med 2011;39:199-217)、現在大腿骨内側の骨孔位置は、術中の内視鏡下で骨形状の峰(resident's ridge)を術者が決定(図3)する。そのため、術後評価で用いられるQuadrant法による評価を術中は行われておらず主観的手技である。これが、正確性、再現性を低下する主な原因である。ACL再建術(outside-in法)において、大腿骨表面から関節内に骨孔を開ける際、骨孔入口部の血管(外側上膝動脈など)を損傷する場合があります。術中合併症発生の一因となっている。

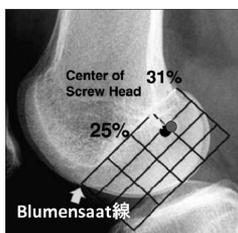


図2 Quadrant法

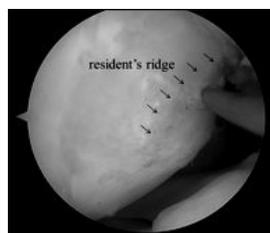


図3 内視鏡写真

術前の骨孔位置術前計画として、単純X線画像を用いた手法があげられる。これは、術後のQuadrant法による評価(図2)で、術後評価においては骨孔位置評価の標準手技である。しかし、内外側後顆輪郭を重ねた撮影が要求されるため、撮影技師の技量に依存し、

再現性が低く、姿勢が異なればその精度も低下する。そのため最終決定は術中の内視鏡下で術者が行う必要があり、以前精度、再現性に問題がある。

MDCT画像を用いた術前計画法も考えられる。例えば、我々が提案したACL術後動態評価システム(Okayama A, et al: 53rd ORS, 32, 835, 2007)で用いたDRR法により、図4のように内外側後顆輪郭を重ねた擬似単純X線画像を作成しQuadrant法で評価する。また、Purnellらの手法(Purnell ML, et al: Am J Sports Med 36:2083-2090, 2008)に準じ、術中の内視鏡画像と同様に、骨表面の立体表示上で靭帯附着部周囲の微細な骨形態(bony landmark)を操作者が同定し骨孔位置を決定する方法も考えられる。これらの利点として、DRRや立体表示は、撮影後の後処理で任意方向での画像生成が可能であるため、撮影者の技量によらず、非常に再現性が高い、また術中内視鏡画像と同様の評価が術前計画として行えるなどがあげられる。一方欠点として、術前にCT画像を撮影する手間と放射線被ばくが問題となり、現在あまり用いられていない。

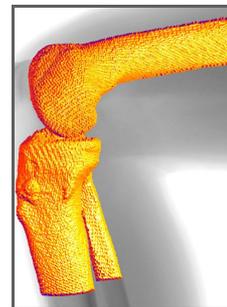


図4 DR画像への骨立体表示の重量

2. 研究の目的

術前のMRI画像解析により定量性、精度、再現性を高めるACL再建術の術前計画支援、術中ナビゲーションを提案する。術前計画システムとして、3次元MRI画像を用いたQuadrant法により骨孔位置決定を行うことで、撮影者や評価者の技量によらず高精度、高再現性を実現する。

3. 研究の方法

提案法では、まず、MR画像より手作業で抽出した大腿骨ラベルデータから正側面擬似単純X線像を生成する。次に正側面擬似単純X線像上でBlumensaat's lineを自動検出し、Quadrant法により、ACLを構成する前内側線維束(AMB)、後外側線維束(PLB)の附着部位置の推定を行う。ここで得られたACL附着部の2次元座標を3次元の骨領域表面上に写像することでACL附着部の3次元座標を推定する。以下で、各ステップの詳細を示す。

Quadrant法は正側面の擬似単純X線像を用いた手法であるため、本研究ではこれまでにMR画像を用いた正側面擬似単純X線像の生

成法を提案する．以下で同手法の概要を説明する．

膝関節は筋肉、脂肪、血管、靭帯、骨領域から構成され、骨領域は海綿骨、皮質骨、軟骨から構成される．単純 X 線像では骨領域はその他組織より高信号値で描出され、さらに、骨表面に存在する皮質骨は骨内部に存在する海綿骨に比べ高信号値で描出される．そのため、大腿骨ラベルデータの表面領域に 1000 Hounsfield Unit (HU)、その他領域に 0 HU を与えることで、骨領域マスクを CT 画像として用い、DRR で用いられる式により投影面上のあるピクセル p の値を算出する．

本研究では、擬似単純 X 線像上で内・外顆後縁が重なる方向を正側面方向と定義し、図 3 に示す顆部後縁を含む短形領域を関心領域として擬似単純 X 線像上で決定する．骨領域を内・外顆側に分割しそれぞれを任意の回転角だけ回転させた場合に生成された擬似単純 X 線像上での関心領域の相関係数を最大化する回転角を、正側面方向として最急降下法を用い計算する．

正側面単純 X 線像では顆間部内壁が高信号値で描出され、これを直線で近似したものが Blumensaat's line と呼ばれる．Quadrant 法では Blumensaat's line を基準として ACL 附着部の位置推定を行う．以下で同手法の概要を説明する．

まず、図 5 に示す顆部後端点以下の関心領域において Z 軸方向に各 X-Y 平面でボクセル値の合計を算出する．これにより、内・外顆部で高い値を取り、顆間部で低い値をとるヒストグラムが得られるため、判別分析法を用いることで顆間部中心の Z 座標 PC_z を推定できる．また、ヒストグラムより、合計ボクセル値が 0 より大きくなる最小と最大の Z 軸スライス位置により顆部幅 D_m を決定できる．これにより、顆間部領域を PC_z を中心とした幅 $0.2D_m$ の領域として決定する．

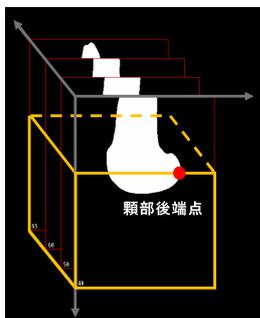
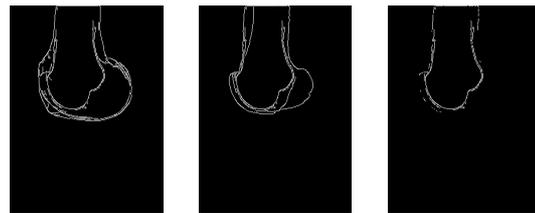


図 5. 顆間部領域取得のための関心領域

次に、図 6 に示すように、骨領域全体、顆間部領域の擬似単純 X 線像から Canny 法を用い取得したエッジ画像の論理積により顆間部領域のみのエッジ画像を取得する．最後に、ハフ変換によりエッジ画像から直線検出を行う．なお、正側面擬似単純 X 線像において Blumensaat's line は 30 から 60 度の角度を持つため、ハフ変換により同範囲内の角度を

持つ直線のみを Blumensaat's line 候補として検出する．また、Blumensaat's line は顆間部内壁に存在するため、検出された直線の骨領域内ピクセル値を最小二乗法により直線近似し、傾きの絶対値が最小となる直線を Blumensaat's line として決定する．



(a) 全領域 (b) 顆間部 (c) 論理積
図 6: Canny 法によるエッジ抽出

Quadrant 法では Blumensaat's line が外内側顆の近位境界と交差する点、遠位境界と交差する点を求め、Blumensaat's line と平行で、外内側顆と後面で外接する直線を求める．これらにより決定される長方形内において、骨孔の開口位置を比率 (100%) で求める．なお、Blumensaat's line 沿いに外内側顆の近位側を deep、遠位側を shallow と呼び、Blumensaat's line を high、遠位境界側を low と呼ぶ．図 7 に Quadrant 法による ACL 附着部位置計測例を示す．本研究では図 7 において low 直線を Blumensaat's line と平行で内顆または、外顆後面と重なる直線、deep 端を Blumensaat's line が骨外輪郭と近位で交差する点、shallow 端は骨外輪郭と遠位で交差する点として決定する．

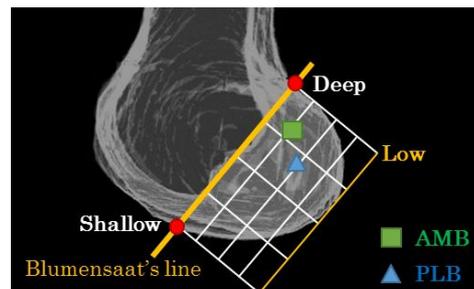


図 7. Quadrant 法による ACL 附着部位置計測

文献 (Piefer et al., The J. of Arthroscopic & Related Surgery, 28:6:872-881, 2012) で示された屍体膝で AMB, PLB の関節内附着位置を Quadrant 法により計測した複数の論文から算出した平均値を表 1 に示す．本研究では、同平均位置を ACL 附着部として用いる．Quadrant 法により擬似単純 X 線像上で推定された 2 次元の AMB, PLB 附着部位置の x 座標 y 座標を用いて 3 次元 ACL 附着部を推定する．まず、顆間部中心座標 PC_z から外顆方向に、AMB, PLB 附着部座標を平行移動した際の骨表面との交点を AMB, PLB 附着部 3 次元位置とする．なお、外顆方向は事前に与えられているものとする．

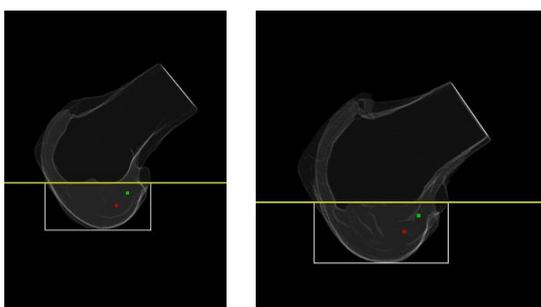
表1 ACL 付着部の平均値

	AMB (%)	PLB (%)
Deep-shallow	21.5	32.0
High-low	23.1	48.8

4. 研究成果

本研究では SKI10 データセット(Heimann et al., 2010)を使用する。本データセットは国際会議 MICCAI2010 の Grand ChallengeWorkshop 2010 で公開された膝 MR 画像のデータセットである。被験者数は 150 名であり、その内 100 名においては複数の専門家により抽出された骨領域のラベルデータが提供されている。また、骨領域は大腿骨、大腿骨側軟骨、脛骨、脛骨側軟骨から構成されている。また、本研究では骨領域ラベルデータを持つ100名よりランダムに選択した10名の被験者の骨領域ラベルデータの大腿骨部のみを使用する。

図8に正側面擬似単純X線像上での提案法による Quadrant 法適用結果を示す。同図では黄色の直線で示す Blumensaat's line が X 軸と平行となるように画像を回転している。また、Quadrant 法適用に用いる矩形領域を白色の長方形で示しており、推定された AMB, PLB 付着部位置をそれぞれ示す。同図より、提案法により 3 次元の ACL 付着部座標が推定可能であることを確認した。



(a) 被験者 1

(b) 被験者 10

図8: 擬似単純 X 線像上での Quadrant 法適用結果

本研究では、膝 MR 画像より生成した正側面擬似単純 X 線像上で自動検出した Blumensaat's line に基づく Quadrant 法による 3 次元 ACL 付着部位置の自動推定法を提案した。提案手法により MR 画像を用いた Quadrant 法による 3 次元 ACL 付着部位置の自動推定可能であることを示した。今後の課題として、本手法による ACL 付着部の推定精度の評価および、推定精度の向上、臨床研究への応用が挙げられる。

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 4 件)

1. K. Morita, S. Kobashi, K. Kashiwa, H. Nakayama, S. Kambara, M. Morimoto, S.

Yoshiya, and S. Aikawa, "Lateral Direction Estimation Method in Knee MRI for Anterior Cruciate Ligament Reconstruction," Japanese Journal of Clinical Biomechanics, Vol. 37, pp. 193-198, 2016 年 9 月 20 日. (査読あり) <http://ci.nii.ac.jp/naid/40020964135>

2. K. Morita, M. Nii, S. Kambara, K. Kashiwa, H. Nakayama, S. Yoshiya, and S. Kobashi, "Clinical big image data based Pre-Operative Planning in ACL Reconstruction," Int. Conf. on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC), pp. 19-23, 2016. (査読あり) 10.1109/ICMLC.2016.7860871
3. K. Morita, S. Kobashi, K. Kashiwa, H. Nakayama, S. Kambara, M. Morimoto, S. Yoshiya and S. Aikawa, "Blumensaat's line detection for Quadrant method on MR images," Proc. 2016 IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, pp. 2144-2149, 2016. (査読あり) 10.1109/FUZZ-IEEE.2016.7737957
4. K. Morita, S. Kobashi, K. Kashiwa, H. Nakayama, S. Kambara, M. Morimoto, S. Yoshiya, and S. Aikawa, "Computer-aided Surgical Planning of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in MR Images," Procedia Computer Science, Vol. 60, pp. 1659-1667, 2015. (査読あり) doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.276

[学会発表](計 6 件)

1. 盛田健人, 新居学, 神原俊一郎, 柏薫里, 中山寛, 吉矢晋二, 小橋昌司, "3次元断層 MR 画像を用いた Quadrant 法による統計的標準骨孔開口位置推定," 第 43 回日本臨床バイオメカニクス学会, 北海道立道民活動センター-かでの 2・7(北海道・札幌市), 2016 年 10 月 8 日.
2. 盛田健人, 小橋昌司, 柏薫里, 中山寛, 神原俊一郎, 森本雅和, 吉矢晋二, 相河聡, "ACL 再建術のための 3 次元 MR 画像への Quadrant 法の適用," システム制御情報学会, 京都テルサ(京都府・京都市), 2016 年 5 月 26 日.
3. 盛田健人, 小橋昌司, 柏薫里, 中山寛, 神原俊一郎, 森本雅和, 吉矢晋二, 相河聡, "ACL 再建術のための疑似単純 X 線像を用いた Blumensaat's line 自動検出法," メディカルイメージング連合フォーラム, ぶんかテンプス館(沖縄県・那覇市), 2016 年 1 月 20 日.
4. K. Morita, Md B. Hossain, S. Kobashi, K. Kashiwa, H. Nakayama, S. Kambara, M. Morimoto, S. Yoshiya, and S. Aikawa, "Pseudo Lateral Radiograph Synthesis Method for Computer-aided Surgical

Planning of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction," 7th Int. Conf. on Emerging Trends in Engineering & Technology, 2015. (査読あり) 2015年11月18日 神戸国際会議場(兵庫県・神戸市)

5. 盛田健人, 小橋昌司, 柏薫里, 中山寛, 神原俊一郎, 森本雅和, 吉矢晋二, 相河聡, "ACL 再建術のための膝 MR 画像からの正側面疑似単純X線像作成法," 第42回日本臨床バイオメカニクス学会抄録集, ソラシティカンファレンスセンター(東京都・千代田区), 2015年11月13日.
6. 盛田健人, 小橋昌司, 柏薫里, 中山寛, 神原俊一郎, 森本雅和, 吉矢晋二, 相河聡, "ACL 再建術における MR 画像を用いた術前計画法," 第31回ファジィシステムシンポジウム, pp. 528-533, 電気通信大学(東京都・調布市), 2015年9月3日.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/syojikobashi/home>

6. 研究組織

(1)研究代表者

小橋 昌司 (KOBASHI, Syoji)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00332966

(2)研究分担者

吉矢 晋一 (YOSHIYA, Shinich)
兵庫医科大学・医学部・教授

研究者番号: 00201070

中山 寛 (NAKAYAMA, Hiroshi)
兵庫医科大学・医学部・助教 (20461056)
研究者番号: 20461056

(3)連携研究者

(4)研究協力者