

および垂直座標を表している。 A_h , A_v はそれぞれ透視X線像の水平方向と垂直方向の輝度勾配の分散値, s はスケールファクタであり, $0 \leq s \leq 1$ の範囲で $G(s)$ が最大となる値を採用した。

③イメージマッチング評価関数と最適化アルゴリズム

評価指標 I と $-G$ の和をマッチングの評価関数 F , 骨モデルの3次元位置姿勢を表す6自由度パラメータ(各座標軸の回転を表す θ_x , θ_y , θ_z と並進を表す t_x , t_y , t_z)を設計変数として, 滑降シンプレックス法⁵⁾により F を最小化した。滑降シンプレックス法は導関数を必要としないので, 本研究のように評価関数を設計変数による関係式で表せない場合に有効な方法である。

本自動イメージマッチング法の誤差評価は以下の手順で行った。まず脛骨DRRを手動でできるだけ透視像に近づけた後, 最適化計算により, 自動イメージマッチングを行った。大腿骨に関しては, 脛骨自動マッチング後, 3次元測定器で測定した脛骨に対する大腿骨の相対位置を使って初期位置を求めた。この初期位置から最適化計算を開始してイメージマッチングを行った。そして, 大腿骨—脛骨の相対位置姿勢の6自由度パラメータを算出し, 3次元測定器で測定した真値と比較した。ヒト1膝の透視X線撮影により得た6画像(機種: GE横河メディカル ADVANTEX E, field of view: 1024 × 1024 [pixel], pixel size: 0.32 × 0.32 [mm], 8 bit gray scale)を対象とした。

結 果

図3に撮影した透視X線像に対して, イメージマッチングした結果を示す。表1に推定された相対位置の並進ならびに回転パラメータにおける平均誤差±標準誤差と二乗平均誤差(RMSE)を示した。回転パラメータについては, 平均誤差はz軸回りで最大(0.6°)であった。標準誤差とRMSEはx軸回りで最大(2.3°, 2.1°)であった。並進パラメータについては, 平均誤差, 標準誤差およびRMSEいずれもz軸

方向で最大(2.2mm, 3.2mm, 3.6mm)となった。



図3. Fluoroscopic image of the femur and tibia with their DRRs overlaid.

表1. Average error, standard deviation and [RMSE] of estimating rotation and translation parameters of relative pose (n=6).

Rotation (degree)		
θ_x	θ_y	θ_z
0.2±2.3 [2.1]	-0.5±0.1 [0.5]	0.6±0.2 [0.6]
Translation (mm)		
t_x	t_y	t_z
-0.3±1.0 [1.0]	0.8±0.7 [1.0]	2.2±3.2 [3.6]

考 察

本研究ではz軸が画像の奥行き方向に対応しているが, 一般的に一方向から撮影した画像から3次元位置姿勢を推定する場合, この方向の並進移動を表すパラメータの精度が劣ることが知られている。図4と図5は, 最適化計算の過程における類似度と, 回転ならびに並進パラ

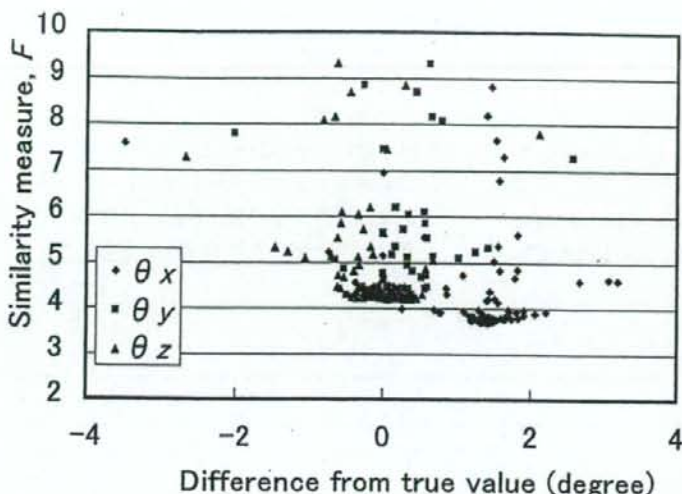


図4. Change in similarity measure with rotation parameters.

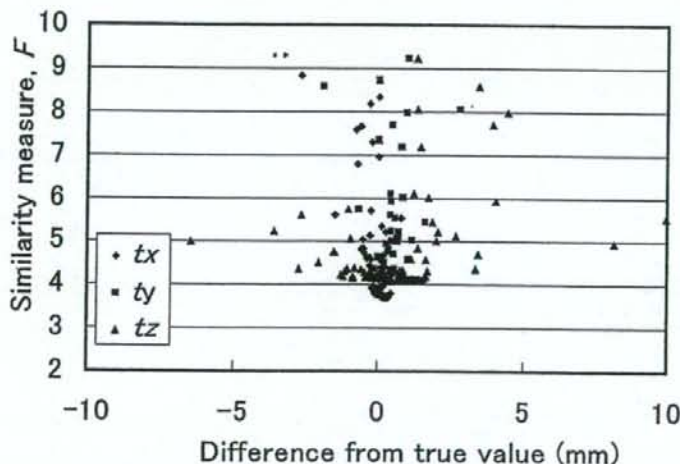


図5. Change in similarity measure with translation parameters.

メータのそれぞれの真値との差異の関係の一例を示している。図5に示すように、真値付近においてz軸方向の並進パラメータ t_z の変化に伴う評価関数 F の変動が小さく、真値への到達が困難であることがわかる。他のパラメータについても、評価関数 F の最小値付近で変動が小さいほど誤差が大きくなる傾向があった。推定精度向上のためには、評価関数 F を構成する評価指標 G , I の変動が大きくなる情報を加える必要があると考えられる。

また、理想的には最適化による推定値は真値

と一致することが望ましいが、骨ポリウムモデルの形状誤差、X線撮像系のひずみ、画像ノイズ等の影響により誤差が生じたものと考えられる。

まとめ

透視単面X線像を利用して膝関節の3次元位置姿勢を自動推定するため、擬似X線像(DRR)と滑降シンプレックス法を用いた自動イメージマッチング法を開発した。精度検証実験の結果、RMSEは面内方向のパラメータにおいては並進1.0mm以内、回転1.0deg以内であったが、面外方向のパラメータにおいては、最大回転誤差2.1deg、最大並進誤差3.6mmと大きくなった。臨床応用のためには、面外方向のパラメータについても並進1.0mm以内、回転1.0deg以内の誤差となるよう、さらなる改良が必要であると考えられる。

<謝 辞>

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究B No. 19360046)の助成を受けて行った。

文 献

- 1) Banks SA, Hodge WA et al.: Accurate measurement of three-dimensional knee replacement kinematics using single-plane fluoroscopy. IEEE Trans Biomed Eng 43-6: 638-649, 1996.
- 2) Canny A: A computational approach to edge detection. IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell 8-6: 679-698, 1986.
- 3) Fregly BJ, Rahman HA et al.: Theoretical accuracy of model-based shape matching for mea-

- asuring natural knee kinematics with single-plane fluoroscopy. *J Biomech Eng* 127 : 692-699, 2005.
- 4) Komistek RD, Dennis DA et al : In vivo fluoroscopic analysis of the normal human knee. *Clinical Orthop Related Res* 410 : 69-81, 2003.
 - 5) Nelder JA, Mead R et al : A simplex method for function minimization. *Computer Journal* 7 : 308-313, 1965.
 - 6) Penney GP, Weese J et al : A comparison of similarity measures for use in 2-D-3-D medical image registration. *IEEE Trans Med Img* 17-4 : 586-595, 1998.
 - 7) 田中伸明, 小林公一 他 : 骨の透視X線像と3次元形状モデルのイメージマッチングによる3次元位置姿勢推定の精度検証. *日本臨床バイオメカニクス学会誌* 28 : 335-339, 2007.

変形性膝関節症

新潟大学超域研究機構*, 新潟こばり病院**,
新潟県健康づくり・スポーツ医学科学センター***

KEY WORDS

- 変形性膝関節症
- 大腿四頭筋力低下
- 大腿四頭筋強化
- 疫学調査

大森 豪*, 渡辺 博史**
田中 正栄***, 古賀 良生**

はじめに

変形性膝関節症(knee osteoarthritis ; 以下膝OA)は, 膝関節の関節軟骨を主体とした関節構成体の慢性変性疾患であり, 疫学調査によればわが国では60歳以上の男女のうちX線上膝OAと診断される人が約1,200万人以上いると推察されている。膝OAの治療は, 薬物療法, 関節内注入, 理学療法, 装具療法などの保存治療から, 関節鏡手術, 骨切り術, 人工関節置換術などの手術治療まで, さまざまな方法が病態に合わせて選択されている。しかし, 本症の自然経過を考えると治療の主体は保存治療であり, さらに, そのなかでもリハビリテーションはきわめて重要な位置を占めている。

本稿では, 膝OAのリハビリテーションのうち特に大腿四頭筋力に注目し, 大腿四頭筋力と膝OAの関連性および

大腿四頭筋力訓練の効果について, 最近の研究から得られた医学的エビデンスについて概説する。

I. 変形性膝関節症と大腿四頭筋力の関連性

大腿四頭筋は膝関節運動の主動筋であり, 大腿四頭筋力低下が膝OA患者に共通する所見であることから, 両者の関連性が報告されている。Siemendaは横断調査にて膝OAの女性では膝伸展力が対照群に比べて15~18%低いこと, 無症候性での膝OAでも筋力低下がみられることから, 大腿四頭筋力低下は膝OAの疼痛による結果ではないことを述べている¹⁾。わが国でも武藤が50歳以上の横断調査で膝伸展筋力が膝OA群で有意に低いことを報告している²⁾。また, 近年, 単なる大腿四頭筋力低下のみならず日常生活動作にお

ける筋の反応時間や関節位置覚、関節安定性など他の要素との関連で膝OAに影響するとの報告が散見される⁴⁾⁵⁾。しかし、大腿四頭筋力低下と膝OAの因果関係、さらに膝OAの発症と進行のどちらにより関与するかは明らかになっていない。



図1. 開発した簡易筋力測定器
骨盤帯と下腿遠位部をバンド固定し、膝関節を伸展させた際の膝窩部に生ずる力を測定する。

II. われわれの行った疫学調査(松代膝検診)による大腿四頭筋力と膝OAの関連性

筆者らは、膝OAの発症頻度や悪化要因、自然経過を知る目的で1979年以降7年間隔、28年間にわたり新潟県松代地区において住民検診(松代膝検診)を行ってきた。本検診では、'2000年の第4回検診から独自に開発した簡易筋力測定器を用いて大腿四頭筋力の定量評価を行っている(図1)。その結果では、大腿四頭筋力は男女とも膝OAグレードの進行とともに低下していた(図2)。さらに、肥満と年齢の影響を取り除いた比較において、女性で膝OAとの有意な関連性が明らかとなっている⁶⁾(図3)。また、大腿四頭筋力は歩行時のスラストの出現とも有意な関連性を有していた。スラストは立脚歩行初期にみられる膝の横ぶれ現象で、近年、膝OAの発症・進行との関連性が示されており、大腿四頭筋力は膝関節の安定性とも関係して膝OAに影響を与えていると考えられる⁷⁾(図4, 5)。

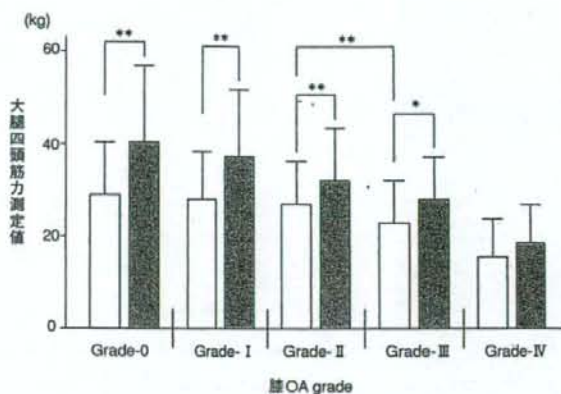


図2. 男女別、膝OA grade別大腿四頭筋筋力値(第5回検診)
□: 女性, ■: 男性, **p<0.01, *p<0.05

III. 膝OAに対する大腿四頭筋力強化の効果

外国における膝OAに対する大腿四頭筋を中心とした筋力訓練はさまざま

な方法が報告されているが、RCT (randomized controlled trial)の結果をみてもほぼすべての報告でその効果が証明されている(表)。さらに、経験のある理学療法士などによる適切な指導とコントロールが訓練効果を増強させることも明らかになっている。

わが国でも日本整形外科学会が大腿四頭筋訓練+SLR (straight leg raising)群とNSAIDs群を比較し、両群で差を認めないことから筋力強化はNSAIDsと同等の効果があると報告した¹⁰⁾。また、池田らはSLR群、ストレッチ群、NSAIDs群の比較でVASとJOAスコア

がSLR群で有意に改善すること、さらに、荷重歩行訓練群と等張性膝伸展筋力訓練群を比較し、両群ともJOAスコア、WOMACおよび膝関節機能評価の有意な改善が得られ、2群間では差がなかったことを報告している¹¹⁾。

われわれも既述した筋力測定器を大腿四頭筋力訓練に用いて単純な杖つぶり運動と比較を行った。その結果、2か月間の訓練後CYBEX6000にて測定した膝屈曲30度、および60度での等尺性最大膝伸展筋力は両群で増加していたが、機器を用いた訓練群では膝屈曲30度においても筋力の増加が認められ

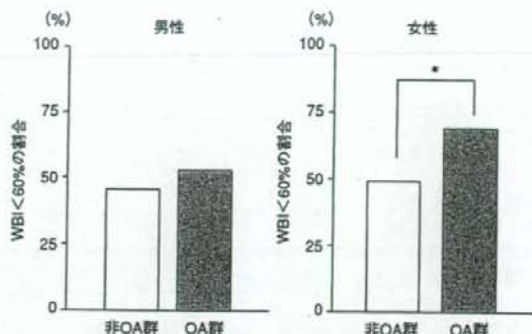


図3. 男女別における非OA群とOA群での体重支持指数(WBI; Weight Bearing Index)の比較(第5回検診)^{a)}
 体重の筋力への影響を標準化するために、大腿四頭筋力測定値を体重で除した値を体重支持指数(WBI)とし、日常生活に問題がないとされるWBI:60%を閾値として比較を行った。

* p<0.05

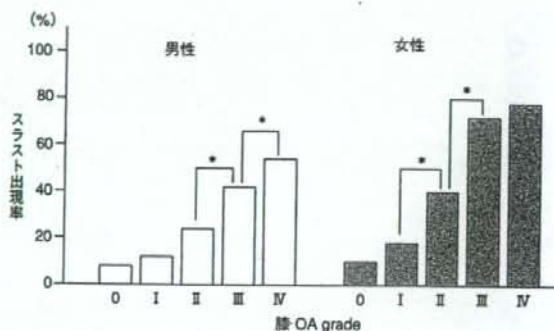


図4. 男女別、膝OA grade別のスラスト出現率(第4回検診)

* p<0.01

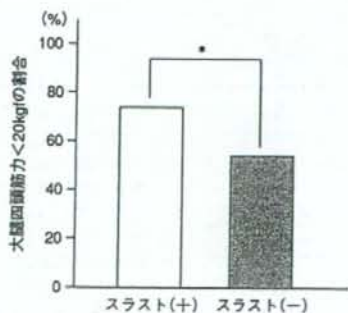


図5. スラスト出現の有無と大腿四頭筋力との関係(第4回検診)

* p<0.01

た(図6)。さらに、2ヵ月間の訓練の継続性を調べたところ機器使用群で訓練継続性が高くなっていった²⁰⁾。

IV. 今後の課題

これまでの多岐に渡る研究の結果、大腿四頭筋強化を主体とした運動療法は膝OAの保存治療として有効性があることは明らかであると考えられる。しかし、その有効性の多くは筋力増加に伴う疼痛軽減や起立歩行能力の改善といった臨床的側面での評価であり、膝関節運動や関節安定性さらには関節面への荷重環境など生体工学的な側面からの解析は詳細には行われていない。今後、これらの問題点を検討し、下肢筋力強化は単に膝OAの臨床症状を改善させるのみの効果なのか、あるいは膝OAの発症を予防し進行を遅らせる効果もあるのかを明らかにすることが重要である。

文 献

- 1) Slemenda C, Heilman DK, Brandt KD, et al: Reduced quadriceps strength relative to body weight: a risk factor for knee osteoarthritis in women? *Arthritis Rheum* 41: 1951-1959, 1998
- 2) Slemenda C, Brandt KD, Heilman DK, et al: Quadriceps weakness and osteoarthritis of the knee. *Ann Intern Med* 127: 97-104, 1997
- 3) 武藤芳照, 太田美穂, 甲田道子, 他: 変形性膝関節症の発生と体型・体力の関連についての疫学的研究. *整形外科* 48: 365-370, 1997
- 4) Hurley MV: The role of muscle weakness in the pathogenesis of osteoarthritis. *Rheum Dis Clin North Am* 25: 283-298, 1999
- 5) Fitzgerald GK, Piva SR, Irrgang JJ, et al: Quadriceps activation failure as a

表. 変形性膝関節症に対する筋力訓練の効果に関する主なRCTの報告

研究者(発表年)	研究内容
Chamberlain MA (1982) ¹¹	膝伸展訓練群(自宅)とジアテルミー(病院)を比較
Kovar PA (1992) ⁹	フィットネスでのウォーキングと患者教育のみを比較
Ettinger WH (1997) ¹⁰	エアロビックエクササイズとレジスタンストレーニングと教育のみを比較
Van Baar ME (1998) ¹¹	膝伸展訓練群と無治療対照群を比較
Maurer BT (1999) ¹²	Isokinetic exercise群と教育群を比較
O'Reilly SC (1999) ¹³	大腿四頭筋訓練群と無治療対照群を比較
Deyle GD (2000) ¹⁴	大腿四頭筋および膝屈筋訓練群と超音波治療群を比較
Petrella RJ (2000) ¹⁵	大腿四頭筋訓練群とNSAIDs群を比較
Thomas KS (2002) ¹⁶	大腿四頭筋訓練群と電話でコンタクト群と食品群と無治療対照群を比較
Deyle GD (2005) ¹⁷	教育と指導による病院での筋力訓練群とを自宅での単純な筋力強化群を比較

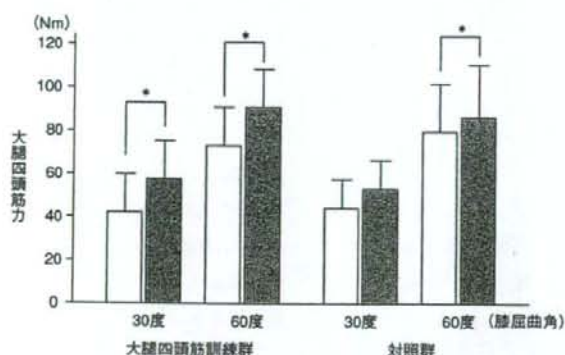


図6. 膝OAに対する大腿四頭筋力訓練の効果
□: 運動前, ■: 運動後, * $p < 0.01$

moderator of the relationship between quadriceps strength and physical function in individuals with knee osteoarthritis. *Arthritis Rheum* 51: 40-48, 2004

- 渡辺博史, 古賀良生, 大森 豪, 他: 膝伸展筋力の加齢変化と変形性膝関節症との関連. *運動・物理療法* 18: 286-291, 2007
- 大森 豪, 古賀良生: 変形性膝関節症に対する疫学調査-松代膝検診の検討. *別冊整形外科* 42: 7-11, 2002
- Chamberlain MA, Care G, Harfield B, et al: Physiotherapy in osteoarthritis of the knee. *Int Rehab Med* 4: 101-106, 1982
- Kovar PA, Allegrante JP, MacKenzie C, et al: Supervised fitness walking in patients with osteoarthritis of the knee: A randomized controlled trials.

Ann Intern Med 116: 529-534, 1992

- Ettinger WH, Burn R, Messier SP, et al: A randomized trial comparing aerobic exercise and resistance exercise with a health education program in older adults with knee osteoarthritis: The fitness arthritis and seniors trial (FAST). *JAMA* 277: 25-31, 1997
- Van Baar ME, Decker J, Oostendorp RA, et al: The effectiveness of exercise therapy in patients with osteoarthritis of the hip and knee: A randomized clinical trial. *J Rheumatol* 25: 2432-2439, 1998
- Maurer BT, Stern AG, Kinossian B, et al: Osteoarthritis of the knee: Isokinetic quadriceps exercise versus an educational intervention. *Arch Phys Med Rehabil* 80: 1293-1299, 1999
- O'Reilly SC, Muir KN, Doherty M: Effectiveness of home exercise on pain and disability from osteoarthritis of the knee: a randomized controlled trial. *Ann Rheum Dis* 58: 15-19, 1999
- Deyle GD, Henderson NE, Matekel RL, et al: Effectiveness of manual physical therapy and exercise in osteoarthritis of the knee. *Ann Intern Med* 132: 173-181, 2000
- Petrella RJ, Bartha C: Home based exercise therapy for older patients with knee osteoarthritis; A randomized controlled trial. *J Rheumatol* 27: 2215-2221, 2000
- Thomas KS, Muir KR, Doherty M, et al: Home based exercise program for knee pain and knee osteoarthritis; randomized controlled trial. *BMJ* 325: 752-756, 2002
- Deyle GD, Allison SC, Matekel RL, et al: Physical therapy treatment effectiveness for osteoarthritis of the knee: a randomized comparison of supervised clinical exercise and manual therapy procedures versus a home exercise program. *Phys Ther* 85: 1301-1317, 2005
- 黒澤 尚, 池田 浩, 他: 変形性膝関節症に対するSLR訓練の効果-多施設RCTの結果. *日整会誌* 79: S9, 2005
- 池田 浩, 黒澤 尚: 変形性膝関節症に対する保存的治療-運動療法の実験-. *MB Orthop* 20: 106-113, 2007
- 渡辺博史, 古賀良生, 田中正栄, 他: 膝関節症に対する大腿四頭筋セッティング訓練. *理療新湯* 6: 59-62, 2002

I. 大規模集団検診の縦断的調査による 変形性膝関節症の発生要因と危険因子

大森 一彦、吉野 良生、遠藤 和男、海辺 博史、西野 勝敏、速水 一弘

大森 一彦 (主任) / 新潟県立医療センター 整形外科
吉野 良生 (主任) / 新潟県立医療センター 整形外科
遠藤 和男 (主任) / 新潟県立医療センター 整形外科
海辺 博史 (主任) / 新潟県立医療センター 整形外科
西野 勝敏 (主任) / 新潟県立医療センター 整形外科
速水 一弘 (主任) / 新潟県立医療センター 整形外科
Kazuo Enji (教授) / 新潟県立医療センター
Hisashi Watanabe (主任) / 新潟県立医療センター
Katsutoshi Nishino (主任) / 新潟県健康づくり・スポーツ医学センター
Tadashi Hayami (部長) / 済生会新潟第二病院整形外科

変形性膝関節症(膝 OA)は common disease であり、その発症と進行には多因子が関与する。大規模集団に対する長期縦断疫学調査(松代膝検診)から得られた結果を横断的および縦断的に解析した結果、膝 OA の危険因子として、加齢、女性、肥満、膝内反変形、thrust 現象、大腿四頭筋力低下などが明らかとなった。膝 OA の危険因子の中で関節への負荷に関わる機械的因子は重要な要因であり、膝 OA の病態解明と予防的治療法確立を視野に入れた詳細な検討が必要である。

はじめに

変形性膝関節症(膝 OA)は、膝関節の関節軟骨を主体とした関節構成体の慢性変性疾患である。膝 OA はいわゆる“common disease”であり、その発症と進行には遺伝素因と環境因子が複雑に関与している。したがって、本疾患の病態を把握し発症や進行に影響する危険因子を明らかにする目的での疫学調査は極めて重要な研究手法と考えられる。

本稿では、我々がやってきた大規模集団に対する長期縦断疫学調査(松代膝検診)から明らかになった膝 OA に関する危険因子について概説する。

松代膝検診の概要

松代膝検診は、1979年に当時新潟県東頸城郡松代町に在住していた40～65歳の男女1,844名を対象として第1回調査を行い、以後7年間隔で2007年の第5回調査まで実施している。初回検診の受診者は1,327名で受診率は81%であり、以後4回の検診すべてにおいて受診者は1,000名を超え受診率も70%以上を維持していた。また、そのうち251名が28年間に行われた5回の検診すべてを受診していた。検診内容は、問診、全身および膝関節の診察、立位膝 X 線の基本項目は5回の検診とも同一内容とし、その他、歩行解析、大腿四頭

key words

変形性膝関節症
(knee osteoarthritis)
縦断疫学調査(longitudinal
epidemiological study)
自然経過(natural course)
危険因子(risk factor)
予防的戦略
(preventive strategy)

筋力測定、踵骨骨密度検査が途中から追加された。膝 OA の有無とグレード評価は Kellgren-Lawrence 分類に準じて行い、グレード II 以上を膝 OA と判定した。したがって、本稿で述べる膝 OA とは X 線上の OA であり、症状の有無は関係しない。

松代膝検診から明らかとなった 膝 OA の危険因子^{1)~4)}

1. 年齢、性別

男女とも年齢の増加とともに膝 OA の有病率は増加しており、女性では60歳代で30%、70歳代で60%、80歳代では80%以上に達していた。また、男女

I. 大規模集団検診の縦断的調査による変形性膝関節症の発生要因と危険因子

の比較では40歳代では男性が多いが、その他の年代では女性の有病率が高かった(図1)。

2. 肥満

BMI (Body Mass Index)を指標とした解析では、横断調査において女性では膝 OA グレードとともにBMIが増加していたが男性では明らかではなかった。また、縦断調査においても女性では初回調査においてBMIが25以上の肥満群は非肥満群より20年後の膝 OA 発症率が有意に高く、肥満は膝 OA 発症の危険因子と考えられる(図2)。

3. 膝内反変形

大腿脛骨角 (femollo-tibial angle : FTA)で膝アライメントを評価すると、

男女とも膝 OA グレードとともに FTA の増加すなわち内反変形の増強を認めた(図3)。また、縦断調査においても FTA が大きい場合に膝 OA の発症率が高くなっていた。

4. Thrust 現象

Thrust は歩行立脚初期にみられる膝の急激な内反運動(「横ぶれ」現象)のことであり、横断調査では男女とも膝 OA グレードとともに thrust 出現率が増加していた(図4)。さらに、7年間の縦断解析においても thrust 出現と膝 OA 発症の間には因果関係が認められた。

5. 大腿四頭筋力

簡易筋力測定器を用いた膝伸展筋力の定量的評価では、横断調査において

男女とも QA 群の大腿四頭筋力が非 OA 群のそれより有意に低下していた(図5)。また、既述した thrust の出現は大腿四頭筋力低下例に多く、両者に関連性が認められた。

考察

疫学調査による膝 OA の発症悪化要因については、欧米を中心に現在まで多方面からの研究が行われている。これまでに報告された因子の中で、肥満、女性、非喫煙、日常生活の活動性(職業歴、運動歴)、膝関節外傷の既往、人種などは膝 OA との関連がある程度明らかになっている。一方、骨粗鬆症、女性ホルモンなどの膝 OA との関連については一定した見解が得られておらず、さらにビタミンやミネラル、抗酸

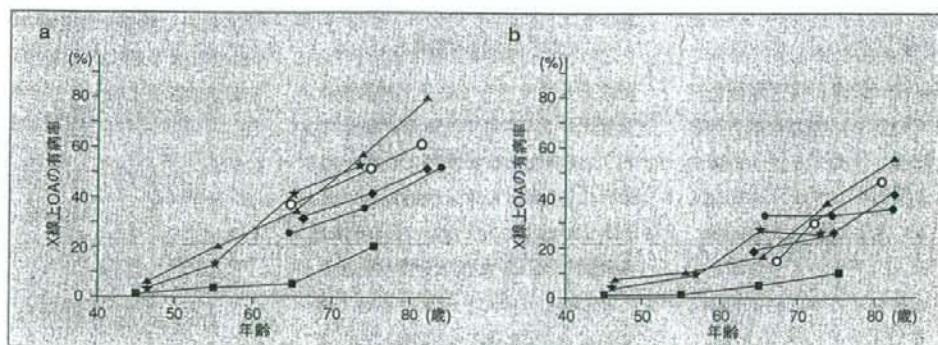


図1 変形性膝関節症の有病率

a : 女性, b : 男性

★ : Lawrence JS (England)

● : Felson DT (Framingham Study, USA)

■ : Davis MA (NHANES- I, USA)

◆ : Schouten JSA (Zotmeer Survey, Holland)

▲ : 古賀良生(松代膝検診, 日本)

○ : Zhang Y (Beijing Study, China)

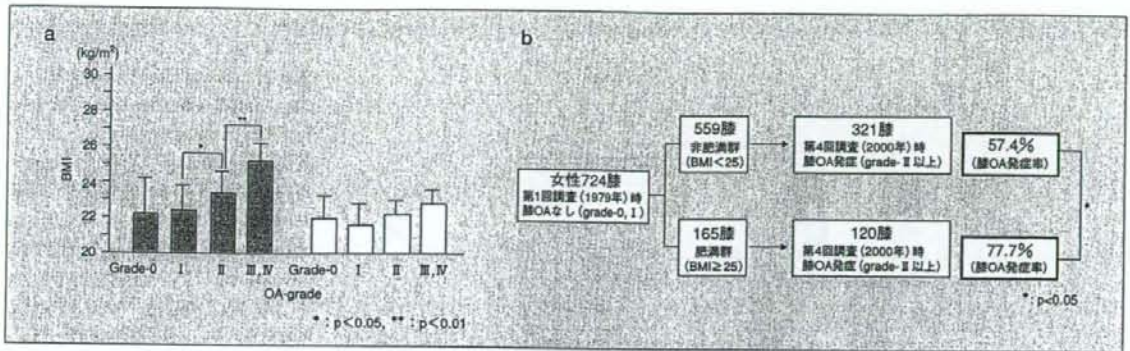


図2 肥満と変形性膝関節症(膝 OA)の関連性

■：女性，□：男性

a：横断解析，女性で膝 OA グレードとともに BMI が増加する。

b：縦断解析，第1回調査で膝 OA がいない女性724膝を BMI の値で肥満群 (BMI ≥ 25) と非肥満群 (BMI < 25) の2群に分け，20年後の第4回調査時の膝 OA 発症率を比較したところ，肥満群で膝 OA 発症率が有意に高い。

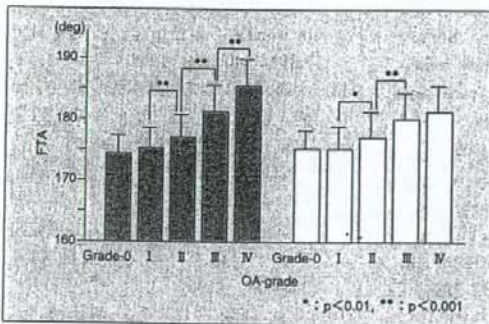


図3 膝内反変形と変形性膝関節症の関連性(横断解析)

■：女性，□：男性

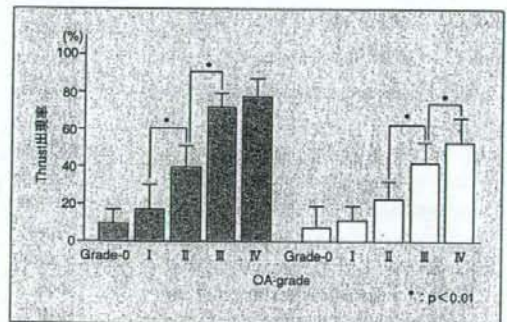


図4 Thrust 出現率と変形性膝関節症の関連性(横断解析)

■：女性，□：男性

化物質などの微量栄養素や遺伝子の膝 OA への関与については不明な点が多い⁵¹⁻¹³⁾。

我々が行ってきた松代膝検診は，対象集団の規模および縦断調査の期間から他に比類のない疫学調査である。今回，横断調査および縦断調査の解析から，加齢，女性，肥満，膝内反変形，thrust 現象，および大腿四頭筋力低下

が膝 OA の危険因子であることが明らかとなった。このうち，加齢，女性，肥満については他の報告にも多くみられるが，膝内反変形，thrust 現象，大腿四頭筋力低下は本検診から得られた貴重な研究結果の1つと考えられる。我々は，内側型膝 OA の病態解明に対して疫学的手法と同時に生体力学的手法を用いて研究を行ってきた。その結

果，下肢アライメントとしての膝内反変形および歩行時の thrust 現象は膝関節の内側荷重を増加させることを実験的にも明らかにしている¹⁴⁾¹⁵⁾。これらの点から，内側型膝 OA の発症・進行の機械的因子として膝内反変形および thrust 現象は極めて重要であり，さらに詳細な検討が必要と考えられる。今後，縦断調査の詳細な解析を行い，

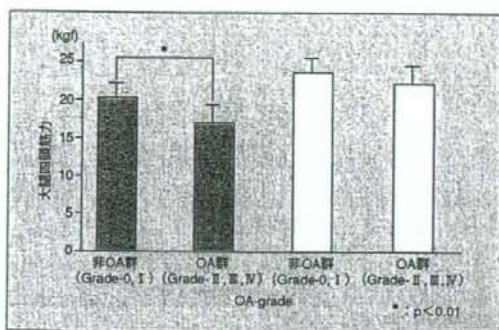


図5 大腿四頭筋力と変形性膝関節症の関連性(横断解析)
■: 女性, □: 男性

各因子と膝OAとの因果関係を明らかにすることで危険因子を確定し、内側型膝OAの発症・進行予防法の確立を目指すことが課題とされる。

文献

- 1) 大森 豪, 古賀良生, 瀬川博之, 他: 変形性膝関節症に対する21年間の疫学的縦断調査—松代検診2000—の経験. 膝 26: 243-246, 2002
- 2) Shiozaki H, Koga Y, Omori G, et al: Epidemiology of osteoarthritis of the knee in a rural Japanese population. The Knee 6: 183-188, 1999
- 3) Omori G: Epidemiology of Knee Osteoarthritis. Acta Medica et Biologica 53: 1-11, 2005
- 4) 古賀良生: 疫学調査による変形性膝関節症の病態. 古賀良生 編, 変形性膝関節症. 東京, 南江堂, 41-64, 2008
- 5) Felson DT, Zhang Y, Hannan MT, et al: The incidence and natural history of knee osteoarthritis in the elderly. Arthritis Rheum 38: 1500-1505, 1995

- 6) Anderson JJ, Felson DT: Factors associated with osteoarthritis of the knee in the first National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES-1). Evidence for an association with overweight, race and physical demands of work. Am J Epidemiol 128: 179-189, 1988
- 7) Davis MA, Ettinger WH, Neuhaus JM, et al: The association of knee injury and obesity with unilateral and bilateral osteoarthritis of the knee. Am J Epidemiol 130: 278-288, 1989
- 8) Hart DJ, Doyle DV, Spector TD: Association between metabolic factors and knee osteoarthritis in

- women; the Chingford Study. J Rheumatol 22: 1118-1123, 1995
- 9) Hart DJ, Mootosamy I, Doyle DV: The relationship between osteoarthritis and osteoporosis in the general population; The Chingford Study. Ann Rheum Dis 53: 158-162, 1994
- 10) Sowers MF, Lachance L: Vitamins and arthritis; the role of vitamins A, C, D, and E. Rheum Dis Clin North Am 25: 315-332, 1999
- 11) Oliveria SA, Felson DT, Klein RA, et al: Estrogen replacement therapy and the development of osteoarthritis. Epidemiology 7: 415-419, 1996
- 12) Spector TD, Cicuttini F, Baker J: Genetic influences on osteoarthritis in women; a twin study. Br Med J 312: 940-944, 1996
- 13) 大森 豪: 変形性膝関節症の疫学要因. 古賀良生 編, 変形性膝関節症. 東京, 南江堂, 69-81, 2008
- 14) 岩崎洋史, 大森 豪, 古賀良生, 他: 下肢アライメント変化による膝関節接触圧力への影響についての実験的検討. 日臨バイオメカ会誌 14: 341-344, 1992
- 15) 大森 豪, 古賀良生, 瀬川博之, 他: 変形性膝関節症用装具の効果に対する運動学的検討. 膝 21: 30-33, 1995

大森 豪 (Go Omori)
新潟大学超域研究機構 教授, 医学博士
1985年 新潟大学医学部卒業, 同整形外科入局
1990年 米国留学
1999年 新潟大学医学部 講師
2002年 同大学院 助教授
2004年より現職
専門は膝関節外科, スポーツ医学, 生体工学



大腿骨MRモデルにおける再現性の高い解剖学的座標系の構築

石谷 周一^{*1} 佐々木俊行^{*1} 織田 広司^{*1} 林 豊彦^{*1*2} 中村 康雄^{*2}
渡辺 聡^{*3} 佐藤 卓^{*3} 大森 豪^{*4} 古賀 良生^{*3}

Development of a highly reproducible anatomical coordinate-system
for MR imaging-based femoral model.

Shuichi ISHIYA, Toshiyuki SASAKI, Koji ODA, Toyohiko HAYASHI, PhD,
Yasuo NAKAMURA, PhD, Satoshi WATANABE, MD, Takashi SATO, MD,
Go OMORI, MD, Yoshio KOGA, MD.

Abstract

To evaluate a patient's knee motion, 3-D bone model-based approaches using a combination of fluoroscopic image sequences of the knee and a 3-D model are under development. For bone model construction, the MR system is presently used because it is less invasive to the patient than CT. A remaining problem is that a conventional anatomy coordinate system defined by the entire femur cannot easily be determined because it takes an enormous amount of time to obtain images of the entire femur. Then, we proposed a geometric approximation method of determining an anatomical coordinate system defined solely by the femoral condyle. Subsequently, we evaluated the reproducibility of the proposed coordinate system and the positional relationship between the proposed and conventional coordinate systems. Empirical results demonstrated that 1) the proposed coordinate system could be determined with high reproducibility as expected and 2) the position and orientation seemed relatively stable with respect to the conventional system.

Key words : MR system, 3-D bone model, geometric approximation method, anatomical coordinate system, femoral condyle.

-
- ※1 新潟大学大学院 自然科学研究科
〒950-2181 新潟県新潟市五十嵐2の町8050番地
 - ※2 新潟大学 工学部福祉人間工学科
〒950-2181 新潟県新潟市五十嵐2の町8050番地
 - ※3 新潟こばり病院 整形外科
〒950-2022 新潟県新潟市小針3丁目27番11号
 - ※4 新潟大学 超域研究機構
〒950-2181 新潟県新潟市五十嵐2の町8050番地

緒 言

我々は、大腿骨CTモデルの解剖学的座標系を図1に示すように定義し、運動分析等で用いてきた³⁾。この座標系は、大腿骨全体の普遍的な骨形状を用いて設定されるため、患者固有の骨形状の影響を受けにくいという特長がある。さらに、広く利用されているGrood⁴⁾らの座標系に基づいているため、臨床医が理解しやすいという利点もある。

近年、3次元骨モデルとして、測定が低侵襲に行えるという利点から、MRモデルが利用されるようになってきた。しかし、大腿骨全体の撮像には膨大な時間を要するため、大腿骨全体で定義される従来の解剖学的座標系は、容易には設定できないという問題がある。そこで本研究では、「顆部形状のみで設定できる再現性の高い顆部MR座標系の構築」を目的とした。

方 法

1. 大腿骨のCT座標系

我々は、大腿骨CTモデルに図1に示す解剖学的座標系を設定している。この座標系の設定手順を述べる。まず、骨頭、内側後顆、外側後顆の3箇所を球近似する。X軸方向を内側後顆と外側後顆の2つの球中心を通る直線とし、原点は2つの球中心の midpoint とする。骨頭を含む3つの球中心から決まる平面の法線ベクトル方向をY軸方向とし、X軸とY軸の外積によってZ軸を決定する。なお、X軸方向は、右大腿骨では内側から外側方向、左大腿骨では外側から内側方向とする。

2. MRIを用いた膝関節3次元骨形状モデルの作成

MRI撮影法は、軟骨などの軟部組織を強調さ

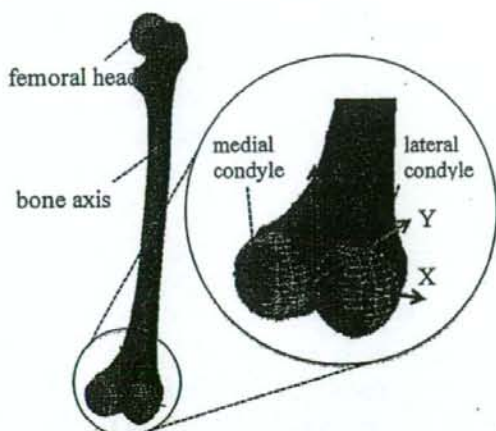


図1. Coordinate system for femoral CT-model.

せる3D-Flashとし、スライス幅は2mmとした。骨形状モデルの作成には、専用システムZedView (LEXI社、東京)を用いた。撮影した全ての矢状断面において、骨輪郭形状をコンピュータのディスプレイ上で手動デジタルイズし、得られた点列データから3次元骨形状モデルを3次元再構築した。

3. 顆部MR座標系の構築

原点とX軸は、半自動的に抽出した内外側後顆関節面を球近似した後、CT座標系と同様の方法で設定する。

内外側後顆関節面の自動抽出法について述べる。まず、MRモデル上で参照点をデジタルイズする。参照点は、図2のような顆間窩最後方点と内外側顆間部前面点の前後2点とした。この参照点間の距離を基に、あらかじめ用意しておいた関節面抽出用モデルをMRモデルの大きさに合わせるようにスケール変換する。

関節面抽出モデルは、モデルポーンからCTモデルを作成し、内外側後顆関節面をサンプリ

ングしたモデルである(図3)。これには、従来のCT座標系を設定し、参照点I、IIを設定しておく。

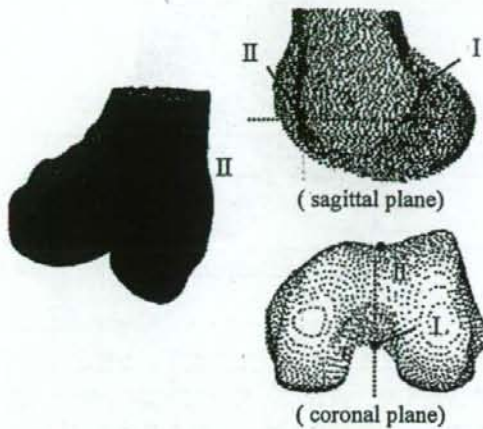


図2. Femoral MRI-model and reference points I and II for scaling.

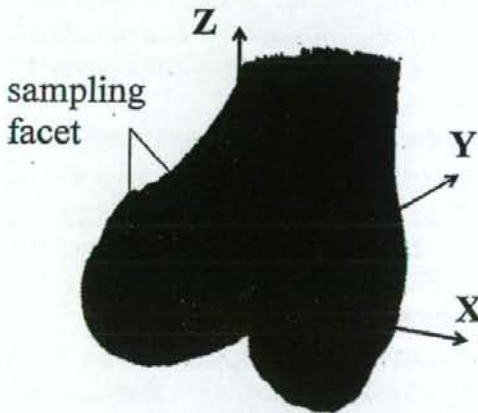


図3. Femoral Condyle Model for extracting articular facets from patient's MRI-model.

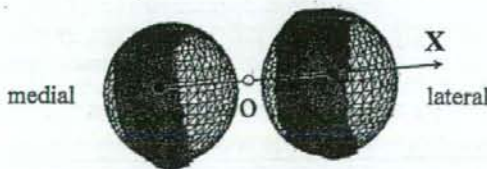


図4. Extracted articular facets of patient's MRI-model: After a sphere is fit to each facet in a least-square manner, the X-axis and the origin of coordinates are decided.

次に、MRモデルと関節面抽出用モデルの表面形状データを重ね合わせる。2つのモデルの重ね合わせ(registration)には、ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムを用いた。重ね合わせ後、関節面抽出用モデルのサンプリング点から最近距離にあるMRモデル上の点群を後頭関節面と定義する。最後に、この内外側後頭関節面それぞれに球をフィッティング(最小二乗法)し、X軸方向を内側後頭と外側後頭の2つの球中心を通る直線、原点を2つの球中心の中点とする(図4)。

Y・Z軸は、CTモデルでは骨頭を用いて決めるが、顆部形状のみのMRモデルではそれが使えないため、次に述べる方法で設定する。まず、設定したX軸に垂直な平面(矢状面)に3次元骨モデルを投影し、2次元骨モデル(2次元点列データ)を得る。次に、この点列データの(骨)輪郭を自動抽出する(図5-(a))。次に、顆部輪郭と骨軸輪郭の境界点2点をデジタル化し、この2点を端点とする曲線を顆部輪郭曲線とする(図5-(b))。この操作により、全骨輪郭を骨軸輪郭と顆部輪郭とに分離できる。次に、顆部輪郭曲線を楕円で近似する(最小二乗)(図5-(c))。楕円パラメータは以下の方法で推定した。

楕円は(1)式で示すように、楕円の中心座標(x_0, y_0)、長軸、短軸の長さa、b、x軸方向から長軸への回転角 θ の5つのパラメータから構成されている。

$$\frac{((x-x_0)\cos\theta+(y-y_0)\sin\theta)^2}{a^2} + \frac{((x-x_0)\sin\theta-(y-y_0)\cos\theta)^2}{b^2} - 1 = 0 \dots (1)$$

この式を書き換えれば、

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey - 1 = 0 \dots (2)$$

となる。ここでA~Eは係数を表す。(2)式に線形最小二乗法を適用し、すべての係数を推定する。係数の推定後、(1)式と(2)式の関係から以下の(3)-(6)式で表わされる中心座標(x_0, y_0)、長軸の回転角 θ 、長軸a、短軸bが求まる。

$$x_0 = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$y_0 = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{B}{A - C} \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$(a, b) = \sqrt{\frac{2(Ax_0^2 + Bx_0y_0 + Cy_0^2 + 1)}{A + C \pm \frac{B}{2\sin\theta \cos\theta}}} \dots\dots (6)$$

※ただし、(6)式で求めた大きい値を長軸a、小さい値を短軸bとする。

最後に、図5-(d)のように楕円の長軸方向をZ軸、短軸方向をY軸と決定する。このようにして、顆部形状のみのMRモデルに解剖学的座標系(顆部MR座標系)が設定できる(図6)。

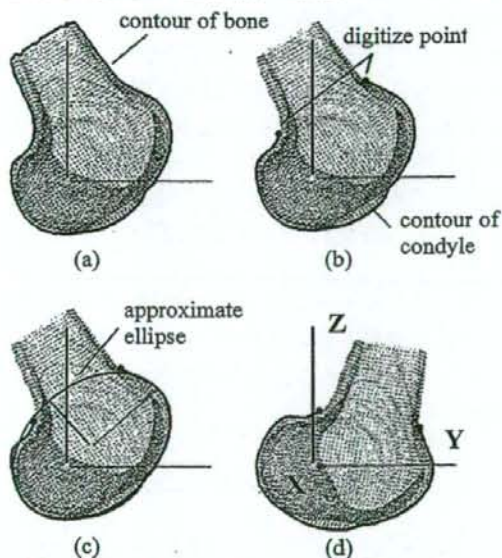


図5. Procedure for determining the Y and Z-axis, (a)-(d).

実験方法

1. 再現性評価

今回提案した座標系の再現性を評価した。評価項目は、検者内のばらつきと検者間のばらつきとした。実験手順を説明する。まず、MRモデルに顆部MR座標系を設定した。次に、装置

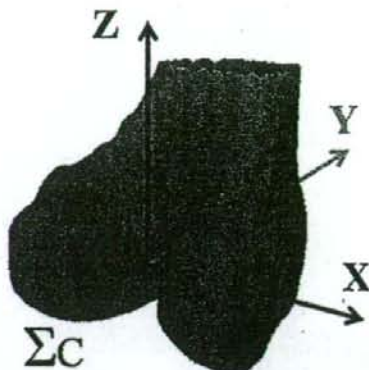


図6. Anatomical coordinate system for femoral condyle.

MR座標系から顆部MR座標系への座標変換Tを算出した。最後に、座標変換Tの回転・並進パラメータを算出した。これを各検者が数回行い、回転・並進パラメータの平均と標準偏差を計算した。検者内のばらつきはこの標準偏差の値で評価した。また、各検者の平均値を各検者の代表値とし、代表値の平均と標準偏差を計算した。検者間のばらつきはこの標準偏差の値で評価した。

被験膝は、X線上一明らかな関節症性変化の無いACL損傷膝の大腿骨1体(女性)とした。検者は5名、座標系の設定回数は各検者5回とした。顆部MR座標系の設定には自作のソフトウェアを用いた。

2. CT座標系との位置関係評価

今回提案した顆部MR座標系がCT座標系とどのような位置関係にあるかを評価した。実験手順を説明する。まずMRモデルに顆部MR座標系を設定し、CTモデルにCT座標系を設定した。このCT座標系の原点とX軸は、今回顆部MRモデルへ適用した方法と同様に設定した。次に、MRモデルとCTモデルの表面形状データの重ね合わせを行った。重ね合わせ後、顆部MR座標系からCT座標系への座標変換を求め、座標変換の回転・並進パラメータで2つの座標系の違いを評価した。2つの座標系の位置関係の違いはパラメータの平均値で評価し、ばらつきは標準偏差で評価した。

被験膝は、X線上一明らかな関節症性変化の無

いACL損傷膝の大腿骨5体(男性:3体,女性:2体)とした。顎部MR座標系の設定には自作のソフトウェアを用い,CT座標系の設定には座標系設定ソフトModel Viewer (LEXI社,東京)を用いた。2つのモデルの重ね合わせ(registration)には,ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムを用いた。

結 果

1. 再現性評価

表1,2に検者内・検者間の装置MR座標系から顎部MR座標系への座標変換の回転・並進パラメータの標準偏差を示す。

検者内では,最大で回転が 0.35 [deg],並進が 0.05 [mm]となった。検者間では,最大で回転が 0.13 [deg],並進が 0.04 [mm]となった。

表1. Intraobserver errors (S.D.) of the transformation parameters from MRI coordinate system to the proposed coordinate system. (n=5)

Examiner	Rotation [deg.]			Translation [mm]		
	x	y	z	x	y	z
1	0.29	0.07	0.02	0.05	0.04	0.02
2	0.28	0.05	0.04	0.02	0.02	0.01
3	0.08	0.03	0.05	0.03	0.03	0.01
4	0.35	0.05	0.01	0.03	0.02	0.01

表2. Interobserver errors (S.D.) of the transformation parameters from MRI coordinate system to the proposed coordinate system. (n=5)

Rotation [deg.]			Translation [mm]		
x	y	z	x	y	z
0.13	0.05	0.03	0.04	0.03	0.01

2. CT座標系との位置関係評価

表3に顎部MR座標系からCT座標系への座標変換の回転・並進パラメータを示す。回転パラメータの平均±標準偏差は,屈曲伸展で -9.98 ± 4.16 [deg],内外反で -0.40 ± 0.71 [deg],内外旋で -0.15 ± 0.86 [deg]であった。一方,並進パラメータの平均±標準偏差は,内外側で 0.82 ± 0.68 [mm],前後で 0.66 ± 0.81 [mm],遠近位で 0.19 ± 0.49 [mm]であった。

表3. Deviation of the transformation parameters of MRI coordinate system of the condyle from a conventional CT coordinate system. (n=5)

Rotation [deg.]			Translation [mm]		
x	y	z	x	y	z
-9.98 ± 4.16	-0.40 ± 0.71	-0.15 ± 0.86	0.82 ± 0.68	0.66 ± 0.81	0.19 ± 0.49

考 察

まず,提案した座標系の構築法について論じる。この方法の特徴は,顎部全体の形だけを用いて半自動的に座標系を設定している点にある。特にY・Z軸は,矢状面投影した輪郭が楕円に近いことから,当てはめた楕円の長軸と短軸とした。その結果,図5に示すように,顎部の前後軸と遠近位軸に近いY・Z軸を設定することができた。この座標系設定法は,骨モデルのいくつかの骨特徴点だけを用いるのではなく,形状全体を用いて軸を決定するため,モデル形状の誤差に対してロバストな推定法と考えられる。

次に,提案した座標系の再現性について論じる。検者内のばらつきは,回転で 0.35 [deg.]以内,並進で 0.05 [mm]以内となり,非常に高い再現性を得ることができた。この要因は,参照点の設定に比較的デジタルサイズしやすい点を選んだことと,合計4点というデジタルサイズの少なさにあると考えられる。

次に,CT座標系との位置関係について論じる。CT座標系との位置関係は,伸展で平均 9.98 [deg],並進で平均 1 [mm]未満であった。原点は,MR座標系もCT座標系も同じ方法で設定しているため,並進パラメータで差が小さいのは当然である。屈曲・伸展パラメータで差が大きいのは,CT座標系は大腿骨の骨頭中心を用いて設定するためである。これらの結果から,得られた顎部MR座標系を屈曲方向に 9.98 [deg]回転すれば,平均的にCT座標系に近い顎部MR座標系が得られることが分かった。

最後に,顎部MR座標系のCT座標系に対するばらつきについて述べる。平均的には両者の差がゼロに近いとしても,標準偏差が大きければ,個々の症例では差が大きくなることが多く,

従来のアライメント評価結果と対応させることは難しい。臨床的には、標準偏差は回転で1.0 [deg] 以下、並進で1.0 [mm] 以下が要求されている。本実験結果では、標準偏差は、屈曲伸展で4.16 [deg]、その他の回転パラメータで0.86 [deg] 以下、全ての並進パラメータで0.81 [mm] 以下であった。屈曲伸展以外のパラメータは、臨床目標を達成できたが、屈曲伸展に関しては大きな値を示した。しかし、この値は、比較した両座標系でY・Z軸の決定法が全く異なる上に、モデル同士のレジストレーション誤差を含むことを考えれば決して大きな値ではない。

今回提案した顆部MR座標系は、顆部形状だけで設定が可能である。この方法をCTモデルに適用すれば、大腿骨全体を撮像せずに座標系の設定が可能となるためX線被曝量を軽減できる。そのため、今後CTモデルへの適用を考えたい。また、脛骨座標系の自動構築も今後の課題である。

結 語

大腿骨MRモデルにおいて、顆部形状全体を用いた座標系の半自動構築法を考案した。この座標系の再現性を評価した結果、検者内・検者間両者において非常に高い再現性を示した。ま

た、この顆部MR座標系とCT座標系との位置関係を調べた結果、MR座標系はCT座標系に対して伸展方向に 9.98 ± 4.16 度回転したが、他のパラメータの平均も標準偏差も比較的小さかった。今後の課題は、CTモデルへの適用、脛骨座標系の自動構築である。

文 献

- 1) Eckhoff D. G., Bach J. M. et al. : Three-Dimensional Mechanics, Kinematics, and Morphology of the Knee Viewed in Virtual Reality. The Journal of Bone and Joint Surgery Vol. 87-A, Supplement 2, 2005.
- 2) DeFrate L. E., Papannagari R. et al. : The 6 Degrees of Freedom Kinematics of the Knee After Anterior Cruciate Ligament Deficiency : An in vivo Imaging Analysis. The American Journal of Sports Medicine, vol. 34, no. 8, 2006.
- 3) Grood E. S., Suntay W. J. : A joint coordinate system for the clinical description of three-dimensional motions : Application to the knee. Journal of Biomechanical Engineering vol. 105, no. 2, pp. 136-44, 19
- 4) 古賀良生, 寺島和宏ほか : "3次元膝運動解析結果の評価法", 日本臨床バイオメカニクス学会誌, vol. 15, 383-386, 1994.

2 方向X線像を用いた骨および人工膝関節の 3次元自動位置姿勢推定法の精度

小林 公一^{*1} 田中 伸明^{*2} 小田川健一^{*3} 佐藤 卓^{*4}
坂本 信^{*1} 田邊 裕治^{*3} 大森 豪^{*5} 古賀 良生^{*4}

Accuracy of automated image matching technique of bone and implants using
biplanar radiography.

Koichi KOBAYASHI, PhD., Nobuaki TANAKA, Ken-ichi ODAGAWA, Takashi SATO, MD.,
Makoto SAKAMOTO, PhD., Yuji TANABE, PhD., Go OMORI, MD., Yoshio KOGA, MD.

Abstract

We have developed a 3-dimensional (3D) lower extremity alignment assessment system that has been applied to pre-operative planning and post-operative alignment assessment of total knee arthroplasty (TKA) with the subject in a standing position. The system evaluates alignment by matching 3D bone and component model projections to frontal and oblique X-ray images manually. In this paper, an automated matching technique is presented to reduce the laborious task for manual image matching and improve the repeatability of pose estimation. Sawbone femur and tibia and femoral and tibial components of a TKA system were used. Three spherical markers were attached to each sawbone and each component to define the local coordinate system. Outlines of the CT-based 3D bone models and the component computer-aided design (CAD) models were projected onto the extracted contours of the femur and tibia and the implants in frontal and oblique X-ray images. Three dimensional pose of each model (full 6 degrees of freedom (DOF) parameters) was recovered by minimizing the difference between the projected outline and the contour using the downhill simplex algorithm. The relative poses were recovered within $-0.3\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$ and $-0.5\text{deg} \pm 1.1\text{deg}$ for the femur with respect to the tibia, $-0.9\text{mm} \pm 0.4\text{mm}$ and $0.4\text{deg} \pm 0.4\text{deg}$ for the femoral component with respect to the tibial component, $-0.8\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ and $0.8\text{deg} \pm 0.3\text{deg}$ for the femoral component with respect to the femur, and $-0.3\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ and $-0.5\text{deg} \pm 0.4\text{deg}$ for the tibial component with respect to the tibia.

Key words : Pose estimation, Image matching, Biplanar radiography, Leg alignment, TKA.

*1 新潟大学 医学部保健学科

〒951-8518 新潟県新潟市中央区旭町通2-746

- ※2 新潟大学大学院 自然科学研究科
〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2-8050
- ※3 新潟大学 工学部機械システム工学科
〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2-8050
- ※4 新潟こばり病院 整形外科
〒950-2022 新潟県新潟市西区小針3-27-11
- ※5 新潟大学 超域研究機構
〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2-8050

Corresponding Author : Koichi KOBAYASHI, PhD.

Department of Health Sciences, Niigata University School of Medicine
2-746 Asahimachi-dori, Chuo-ku, Niigata 951-8518, JAPAN
Tel & Fax : 025-227-0935
E-mail address : kobayasi@clg.niigata-u.ac.jp

緒 言

下肢関節の3次元アライメントを定量評価することは、種々な関節疾患の病因解明や機能障害進行の把握において重要であると同時に、より効果的な診断・治療法の確立に繋がると考えられる。例えば、変形性膝関節症の治療法として多く施行されている人工膝関節置換術では、人工膝関節の設置位置により術後の下肢アライメントと関節運動が規定されるため、術前のアライメント測定とこれを矯正するための設置位置計画が術後成績に大きな影響を与えると指摘されている¹⁰⁾。著者らはCT像から構築した3次元骨形状モデルと立位2方向X線像を用いて下肢の3次元アライメントを評価するシステムを開発し、すでに臨床応用している^{8), 9)}。このシステムでは、下肢全長(骨盤、大腿骨、脛骨)の2方向X線像に3次元骨形状モデルの投影像をマッチングすることで股関節または膝関節のアライメント評価を行うと同時に、人工膝関節のCADモデルを投影することで設置位置計画を作成する。さらに、人工膝関節置換術後にも2方向X線撮影し、人工膝関節のCADモデルの投影像をマッチングさせることで設置位置評価を行っている。しかしながら、イメージマッ

ングを手動で行っているため、作業に長時間を要することと、再現性の確保が問題となっている。

そこで、本研究ではイメージマッチングを自動化することでこれら問題の解決を図ることを目的とした。2方向X線像における骨および人工膝関節の輪郭と、対応する3次元モデルの投影像との輪郭を滑降シンプレックス法により最小化することで、骨と人工膝関節の3次元的位置姿勢を推定する方法を開発するとともに、同法の推定精度について検討を行った。

実験方法

1. 3次元下肢アライメント評価システム

このシステムは0°から60°回転する回転台と、イメージングプレート(IP)を格納するカセットホルダから構成される。X線源はIPから約3mのところ設置する。患者は回転台の上に立ち、0°で正面像、60°で斜角像をX線撮影する(図1)。患者撮影に先立ち、アクリル製フレームに鋼球マーカを72個接着した校正フレームを撮影することにより、0°と60°それぞれの回転台位置において中心射影を想定したカメラ定数を決定し、射影行列⁴⁾を構築しておく。

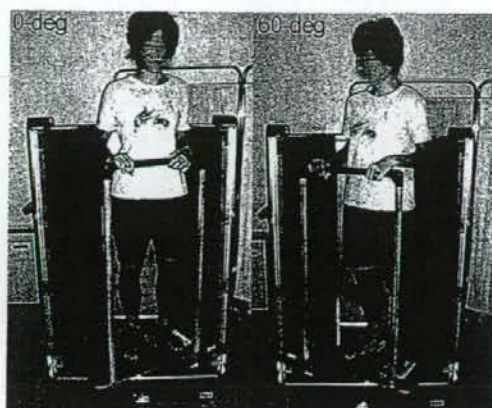


図1. Rotation table for biplanar radiography.

2. 自動イメージマッチングアルゴリズム

X線像における骨および人工膝関節の輪郭をCanny法¹⁾で自動抽出する。次に、前節で述べた射影行列を用いて仮想2方向X線撮影システムを構築する。そして3次元形状モデルを0°と60°のX線像に投影し、その輪郭だけを表示する(図2)。各X線像について、輪郭点ごとに最も近い投影像の輪郭点との距離を求めてその平均値を計算し、両X線像の和をとる。すなわち

$$D_{mean} = D_{mean}^0 + D_{mean}^{60} = \sum_{i=1}^{N^0} \|\text{OLX}_i^0 - \text{OLV}_i^0\| / N^0 + \sum_{i=1}^{N^{60}} \|\text{OLX}_i^{60} - \text{OLV}_i^{60}\| / N^{60}$$

ここで、OLX_iはX線像の輪郭点、OLV_iは仮想投影像におけるOLX_iとの最近接輪郭点、Nは輪郭点数である。上付き添え字の0と60はそれぞれ0°および60°のX線像に関する値であることを示している。そして、D_{mean}を3次元骨形状モデルの位置姿勢を表す6自由度パラメータすなわち3個の並進パラメータ(t_x, t_y, t_z)と、3個の回転パラメータ(θ_x, θ_y, θ_z)の関数とし、滑降シンプレックス法⁵⁾でこれを最小化することで6自由度パラメータの値を決定する。以上の計算はMicrosoft[®] Visual C++6.0で自作したソフトウェアにより実行した。

3. モデル骨と人工膝関節を用いた検証実験

自動イメージマッチングによる3次元位置姿勢の推定精度を検証するため、モデル大腿骨お

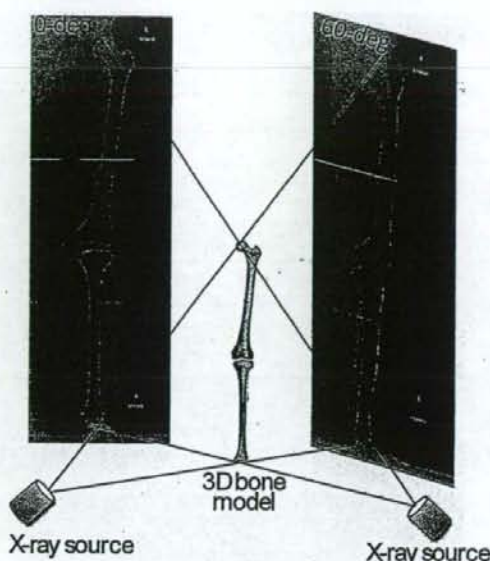


図2. Virtual biplanar radiography system.

よびモデル脛骨(Sawbone)と人工膝関節を用いた実験を行った。大腿骨と脛骨にアクリル製球マーカをそれぞれ3個ずつ任意の箇所に設置した後、CT撮影(水平分解能0.31mm, スライス厚さ1mm)を行い、3次元再構築ソフト(ZedView4.0, Lexi, 東京)を用いてスライス像から3次元形状モデルを再構築した。3次元形状モデルの座標系は球マーカの中心座標を基に規定した。次に創外固定器を用いて大腿骨と脛骨を伸展位で固定し、2方向X線撮影した。続いて、大腿骨と脛骨に人工膝関節(ADVANCE, Wright Medical Orthopaedics, 米国)の大腿骨コンポーネントと脛骨コンポーネントを設置し2方向X線撮影した(図3)。各コンポーネントには3個ずつ鋼球マーカを接着し、これを基にコンポーネントのCADモデルの座標系を規定した。

3次元位置姿勢の真値は3次元測定器により求めた。すなわち、骨およびコンポーネントに取り付けたマーカの中心座標を3次元測定器で測定し、これから3次元測定器の座標系を基準とする骨およびコンポーネントの座標系を決定した。この結果を基に①脛骨を基準とする大腿骨の相対位置、②脛骨コンポーネントを基準と