

Table 2. Femorotibial angle (FTA) before HTO, at the first evaluation, and at the latest evaluation

Classification	Number of knees	FTA (degrees)			
		Before HTO	After HTO	First evaluation ^a	Latest evaluation ^b
All Patients	48	185.4 ± 4.4	168.2 ± 2.9	169.1 ± 4.5	169.8 ± 5.2
Satisfactory group	37	185.5 ± 4.8	167.6 ± 2.8	168.0 ± 4.1	168.4 ± 4.4
Unsatisfactory group	11	185.3 ± 2.1	170.2 ± 2.3	172.7 ± 3.8	174.4 ± 5.2

Data given as mean ± standard deviation

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

^aMean follow-up 6.5 years

^bMean follow-up 17.1 years

Table 3. Distribution of the radiographic osteoarthritis (OA) grade before HTO and at the latest evaluation

Classification	Number	OA grade ^a		
		Grade II	Grade III	Grade IV
Before HTO	48	8	35	5
Latest evaluation ^b	48	1	18	29**

** $P < 0.01$

^aRadiographic OA grade according to the Kellgren-Lawrence classification

^bMean follow-up 17.1 years

Table 4. Distribution of the preoperative radiographic OA grade between the satisfactory group and the unsatisfactory group

Classification	Number	OA grade ^a		
		Grade II	Grade III	Grade IV
All Patients	48	8	35	5
Satisfactory group	37	8	26	3
Unsatisfactory group	11	0	9	2

^aRadiographic OA grade according to the Kellgren-Lawrence classification

Discussion

The first purpose of this study was to evaluate our fixation methods. We used two threaded pins and figure-of-eight wire, and the basic concept of this procedure was similar to a tension band or modified tension band fixation as previously described.^{17,18} Generally speaking, rigid fixation and early rehabilitation is important for good clinical outcome after HTO,^{15,25} and there have been several studies concerning the primary stability of the implants for HTO.²⁶⁻²⁸ Flamme et al.²⁷ tested the initial stability of the following devices: one third tubular plate with a cortical screw, blade plate with screws (Giebel's plate), bone staples, and external fixator. In their study, the highest stability was achieved by the bone staple and external fixator, while Giebel's plate and one third tubular plate were less stable. Recently, we biomechanically evaluated the initial stability of our fixation method and compared it with the bone staple, Giebel's plate, and L-buttress plate. The results of this

study indicated that our method showed similar stability to Giebel's plate and the bone staple against compression and bending stress except rotational force.²⁹ In the present study, we additionally used cast immobilization after HTO in consideration of initial stability of our fixation method, and we clinically experienced 11 of 48 unsatisfactory cases. Furthermore, 7 of the unsatisfactory cases showed correction loss in early postoperative periods. The main reason for this early correction loss is thought to be combination of the lack of initial stability especially against rotational stress and the bone quality of the osteotomy site. Thus, we think the two threaded pins and figure-of-eight wiring fixation is an acceptable fixation procedure for HTO; however, careful attention should be paid to correction loss in the early postoperative periods.

The second purpose of the present study was to evaluate the long-term clinical results after HTO and to determine the factors related to the outcome. There are many studies about the clinical results after HTO. The

majority of authors have reported satisfactory results in the short to midterm, but these results gradually deteriorated over time, especially at more than 10 years after surgery. The reported probability of a good or excellent result after HTO was 75% to 96% after 6 years, 45% to 94% after 10 years, and 46% to 90% after more than 15 years.³⁻¹⁴ In the current study, the percentage of satisfactory results (excellent or good) after HTO was 93.7% after 6 years and 77.1% after 17 years. Our results had the same tendency of deterioration over a long period as the other studies, but still maintained a favorable result up to 17 years after HTO. We think the main reason for the good clinical outcome in spite of the progression of radiographic OA is that good alignment was maintained in the majority of cases during the follow-up period and the ADL of the patients slowly deteriorated with time. Recently, Koshino et al.¹⁴ evaluated 75 knees with a mean follow-up of 19 years and reported good or excellent results in 90% of their series. Good alignment was described as the most important factor for good long-term clinical results.¹⁴

There is still considerable discussion about which factors affect the long-term outcome of HTO, and the present study focused on the correction angle at the surgery and the preoperative severity of knee OA. As for the correction angle, previous studies have reported that the optimum clinical outcomes were associated with a correction of 6° to 16° valgus, and an undercorrection less than 5° was strongly related to a high failure rate.^{5,8-14} In this study, the mean FTA after HTO was 167.6° in the satisfactory group and 170.2° in the unsatisfactory group. In addition, in the unsatisfactory group, progressive varus recurrence was found at the follow-up. We believe that the most important concept for HTO is to shift the loading axis from the medial compartment to the lateral compartment, and this will lead good long-term clinical outcomes in HTO. In order to achieve this safely, we recommend that we should target a valgus correction of at least 10° for medial compartment knee OA.

In western countries, the patients with advanced knee OA were primarily indicated for total knee arthroplasty. Therefore, there have been few studies that evaluate the relationship between the preoperative severity of the knee OA and the clinical result of HTO. Holden et al.³⁰ followed 51 knees for 10 years and found no correlation between the clinical results and the radiographic severity of the knee OA preoperatively. Rinonapoli et al.¹⁰ evaluated 60 knees with an average follow-up of 15 years and their multivariate analysis indicated that the length of follow-up and the amount of preoperative osteoarthritis affected the clinical results. On the other hand, there have been many studies about this issue in Japan, because the preservation of range of motion is important for ADL in Japanese people. Yasuda et al.⁸

found no statistical difference between the preoperative OA stage and the clinical results, but also described that no stage IV patients obtained good results. Sasazaki et al.³¹ compared HTO in mild to moderate OA with advanced OA, and found no clinical difference between the two groups. They also indicated that overcorrection was effective for HTO in advanced OA cases.³¹ In this study, the radiographic OA grade of the knee joint was significantly deteriorated at the mean follow-up of 17 years, but no statistical difference was observed regarding the preoperative severity of the radiographic knee OA between the satisfactory and the unsatisfactory group. Furthermore, three of five patients with preoperative Grade IV OA were included in the satisfactory group at the recent follow-up. Therefore, we agree that the mild to moderate stage is expected to have better results after HTO, but we could also expect good clinical outcomes for the advanced stage if the cartilaginous condition of the lateral compartment is acceptably preserved and the proper postoperative alignment is achieved.

We believe that there are two limitations in this study. The first limitation is that this is a retrospective study and the 70.6% follow-up rate is perhaps low even for the long-term periods of more than 10 years. The second limitation is that we used the JOA score for clinical evaluation. The JOA score is a good scoring system and is popular in Japan. In addition, several recent studies about HTO using this scoring system have been published in international journals.^{24,32,33} However, even though the JOA score is not a worldwide universal measuring system, we believe that we can compare the result of this study with other clinical reports.

In conclusion, HTO with two threaded pins and figure-of-eight wiring fixation showed an acceptable and good clinical outcome for an average of 17 years of follow-up. The present study also suggests that the proper correction angle is necessary to achieve satisfactory long-term clinical results and HTO is considered to be indicated for the patients with a moderate to advanced stage of medial knee OA.

Acknowledgments. The authors extend special thanks to Kazuo Endo for valuable help in performing the statistical analyses of the data.

References

1. Felson DT, Zhang Y. An update on the epidemiology of knee and hip osteoarthritis with a view to prevention. *Arthritis Rheum* 1998;41:1343-55.
2. Jackson JP, Waugh W. Tibial osteotomy for osteoarthritis of the knee. *J Bone Joint Surg Br* 1961;43:746-51.
3. Coventry MB. Osteotomy of the upper portion of the tibia for degenerative arthritis of the knee. A preliminary report. *J Bone Joint Surg Am* 1965;47:984-90.

4. Coventry MB. Upper tibial osteotomy for gonarthrosis. The evolution of the operation in the last 18 years and long-term results. *Orthop Clin North Am* 1979;10:191-210.
5. Rudan JF, Simurda MA. High tibial osteotomy. A prospective clinical and roentgenographic review. *Clin Orthop* 1990;255:251-6.
6. Insall JN, Joseph DM, Msika C. High tibial osteotomy for varus gonarthrosis. A long-term follow-up study. *J Bone Joint Surg Am* 1984;66:1040-8.
7. Berman AT, Bosacco SJ, Kirshner S, Avolio A. Factors influencing long-term results in high tibial osteotomy. *Clin Orthop* 1991;272:192-8.
8. Yasuda K, Majima T, Tsuchida T, Kaneda K. A ten-to 15-year follow-up observation of high tibial osteotomy in medial compartment osteoarthritis. *Clin Orthop* 1992;282:186-95.
9. Coventry MB, Ilstrup DM, Wallrichs SL. Proximal tibial osteotomy. *J Bone Joint Surg Am* 1993;75:196-201.
10. Rinonapoli E, Mancini GB, Corvaglia A, Musiello S. Tibial osteotomy for varus gonarthrosis. *Clin Orthop* 1998;353:185-93.
11. Naudie D, Bourne RB, Rorabeck CH, Bourne TJ. Survivorship of the high tibial valgus osteotomy. *Clin Orthop* 1999;367:18-27.
12. Aglietti P, Buzzi R, Vena LM, Baldini A, Mondaini A. High tibial valgus osteotomy for medial gonarthrosis. *J Knee Surg* 2003;16:21-6.
13. Sprenger TR, Doerzbacher JF. Tibial osteotomy for the treatment of varus gonarthrosis. *J Bone Joint Surg Am* 2003;85:469-74.
14. Koshino T, Yoshida T, Ara Y, Saito I, Saito T. Fifteen to twenty-eight years' follow-up results of high tibial valgus osteotomy for osteoarthritic knee. *Knee* 2004;11:439-44.
15. Koshino T, Morii T, Wada J, Saito H, Ozawa N, Noyori K. High tibial osteotomy with fixation by a blade plate for medial compartment osteoarthritis of the knee. *Orthop Clin North Am* 1989;20:227-43.
16. Hofmann AA, Wyatt RW, Beck SW. High tibial osteotomy. Use of an osteotomy jig, rigid fixation, and early motion versus conventional surgical technique and cast immobilization. *Clin Orthop* 1991;271:212-7.
17. Weber BG, Wörsdörfer O. Zuggurtungsosteosynthese bei tibialkopfosteotomie. *Z Orthop* 1980;118:637-43.
18. Flamme CH, Ruhmann O, Schmolke S, Wichmann R. Long-term outcome following high tibial osteotomy with tension bend principle. *Arch Orthop Trauma Surg* 2003;123:12-6.
19. Koshino T, Tsuchiya K. The effect of high tibial osteotomy on osteoarthritis of the knee. Clinical and histological observations. *Int Orthop* 1979;3:37-45.
20. Schatzker J, Burgess RC, Glynn MK. The management of non-unions following high tibial osteotomies. *Clin Orthop* 1985;193:230-3.
21. Lawrence JS, Bremner JM, Bier F. Osteo-arthritis. Prevalence in the population and relationship between symptoms and X-ray changes. *Ann Rheum Dis* 1966;25:1-24.
22. Ogata K. Interlocking wedge osteotomy of the proximal tibia for gonarthrosis. *Clin Orthop* 1984;186:129-34.
23. Ogata K, Yoshii I, Kawamura H, Miura H, Arizono T, Sugioka Y. Standing radiographs cannot determine the correction in high tibial osteotomy. *J Bone Joint Surg Br* 1991;73:927-31.
24. Kanamiya T, Naito M, Hara M, Yoshimura I. The influences of biomechanical factors on cartilage regeneration after high tibial osteotomy for knees with medial compartment osteoarthritis: clinical and arthroscopic observations. *Arthroscopy* 2002;18:725-9.
25. Billings A, Scott DF, Camargo MP, Hofmann AA. High tibial osteotomy with a calibrated osteotomy guide, rigid internal fixation, and early motion. *J Bone Joint Surg Am* 2000;82:70-9.
26. Zhang Y, Shall LM, Kiritsis PG, Wolfenbarger L, Fairclots JR. Varus tension testing of fixation devices used in proximal tibial osteotomy. *Contemp Orthop* 1995;30:471-6.
27. Flamme CH, Kohn D, Kirsch L, Hurschler C. Primary stability of different implants used in conjunction with high tibial osteotomy. *Arch Orthop Trauma Surg* 1999;119:450-5.
28. Gautier E, Thomann BW, Brantschen R, Jakob RP. Fixation of high tibial osteotomy with AO cannulated knee plate. *Acta Orthop Scand* 1999;70:397-9.
29. Yasumoto H, Omori G, Tanabe Y, Koga Y. Mechanical stability of different fixation procedures after high tibial osteotomy (in Japanese). *J Jpn Soc Clin Biomech* 2001;22:319-23.
30. Holden DL, James SL, Larson RL, Slocum DB. Proximal tibial osteotomy in patients who are fifty years old or less. *J Bone Joint Surg Am* 1988;70:977-82.
31. Sasazaki Y, Fujikawa K, Kobayashi T, Miwa M. Clinical results of the overcorrected high tibial osteotomy for advanced osteoarthritis of the knee (in Japanese). *Bessatsu Seikeigeka* 2002;42:153-58.
32. Choi HR, Hasegawa Y, Kondo S, Shimizu T, Ida K, Iwata H. High tibial osteotomy for varus gonarthrosis: a 10- to 24-year follow-up study. *J Orthop Sci* 2001;6:493-7.
33. Takemae T, Omori G, Nishino K, Terajima K, Koga Y, Endo N. Three-dimensional knee motion before and after high tibial osteotomy for medial knee osteoarthritis. *J Orthop Sci* 2006;11:601-6.

透視X線像を用いた膝関節の3次元的位置姿勢の自動推定

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

Accuracy of 3-D pose estimation of bone using an image matching technique
with fluoroscopic images and 3-D bone model.

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

Abstract

The mechanical perspective of bone and joint diseases can be gained through accurate measures of joint kinematics. This study attempted to develop an automated method for analyzing in vivo knee kinematics using single plane fluoroscopy and 3D bone models. The study was carried out on one human cadaveric knee. Three sphere markers were fixed to both femur and tibia. A 3D bone model was created by CT scan images of each bone.

After CT scanning, the femur and tibia were fixed using an external fixation device, resembling anatomical positions of the knee. Six single plane fluoroscopic images of 1 set of fixed bones were obtained with different directions of image acquisition. Digitally reconstructed radiographs (DRRs) were generated from 3D bone models by a voxel projection technique. The relative 3D-pose (full 6 degrees-of-freedom parameters) between femur and tibia were determined by matching the DRR of each bone model with the fluoroscopic image of the corresponding bone by automatic maximization of the similarity measure between the 2 images. The true value of the relative pose was measured using a 3D coordinate measuring machine. The RMSE of the in-plane rotation parameter was within 1.0 degrees and the out-of-plane rotation parameters were within 2.1 degrees. For the translation parameters the RMSE took its minimal value of 1.0 mm in the in-plane direction and its maximal value of 3.6 mm in the out-of-plane direction.

Key words : Knee, Kinematics, Single-plane fluoroscopy, Image matching.

※1 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の町8050番地

※2 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

- ※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の町8050番地
- ※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の町8050番地

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

はじめに

関節の運動について定量的知見を得ることは、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・治療法の確立につながると考えられる。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において、術前の人工関節の設置位置計画は静止状態で撮影した単純X線像やX線CT像を基に作成されるのみで、骨および関節の荷重状態での運動機能を考慮に入れて設置位置を決めることは行われていない。人工関節の寿命低下をもたらす摩擦や骨とのゆるみといった現象は、関節の運動に伴う動的負荷に起因するので、これを考慮に入れて設置位置を決めることが出来れば臨床的に有益である。

膝関節の運動を直接的な測定には、連続透視X線画像に対するイメージマッチングにより3次元位置姿勢を表す6自由度パラメータを推定する方法が提案され、人工膝関節置換術後の評価を目的とした動態解析に応用されている¹⁾。近年、この方法を人工関節が設置されていない膝関節に適用する試み⁴⁾がなされているが、金属性の人工関節に比べ骨の輪郭は透視X線像上で明瞭では無いため、イメージマッチングの精度の点で改良の余地が残されている³⁾。著者

らは、X線CT撮影により予め構築しておいた3次元骨構造モデルを使って擬似X線像 (Digitally Reconstructed Radiograph : 以下DRR) を表示し、DRRに現れる輝度の濃淡を使ってイメージマッチングする手法⁷⁾を提示したが、手動でイメージマッチングを行っていたため、作業に長時間を要するという問題点があった。そこで、本研究ではマッチングの高速化のため、滑降シンプレックス法による自動推定法を開発するとともに、同法の推定精度について検討することを目的とした。

実験方法

1. 3次元測定器による真値測定

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、3次元測定器により真値を測定した。ヒト切断膝1膝を用い、大腿骨および脛骨に直径15mmの亚克力製球マーカをそれぞれ3個ずつ任意の箇所に接着した後、創外固定器を用いて解剖学的位置関係を再現するように固定した。マーカの中心座標を3次元測定器 (MITUTOYO : BH504 Coordinate Measuring Machine) で測定し、これから3次元測定器の座標系を基準とする各骨の座標系を決定した。この結果を基に脛骨を基準とする大腿骨の相対位置を求めた。

2. DRRの作製と表示

DRRに必要な3次元骨形状ボリュームモデルを作成するために、CT撮影を行った（機種：TOSHIBA社製 X-Vision, field of view : 640×512 [pixel], pixel size : 0.35×0.35 [mm], slice thickness : 1 [mm]）。閾値処理により骨領域を抽出して0.35×0.35×1.0 [mm] のボクセルで構成されるボリュームモデルを作成した。さらに、DRR表示の高速化を図るため、スプライン補間により1辺が1mmの等方性（立方体）ボクセルに変換した。

DRRはボリュームモデルを構成する全てのボクセルを仮想X線照射点から画像平面に投影することで作成した（図1）。まず画像平面上において、一つのボクセルが投影された領域のX線量を $a\mu(x, y, z)$ とした。ここで、 a はX線の減衰を表す定数、 $\mu(x, y, z)$ はボクセル値である。そして、ある画素 $p(u, v)$ に着目すると、全てのボクセル（個数を N とする）の投影によって n 個（ $0 \leq n \leq N$ ）のボクセルが投影することになるので、次式によってその画素の輝度値を求めた。

$$I(u, v) = I_0 e^{-\sum_{i=1}^n a\mu_i(x, y, z)} \dots\dots\dots (1)$$

ここで I_0 は輝度値の範囲である。 a と I_0 は実際の透視X線像とDRRのコントラストを合わせるため適宜調整する。

3. 自動推定法

① 骨輪郭情報を用いた評価指標

透視X線像における骨の輪郭をCanny法²⁾で自動抽出し、同時に抽出されたノイズを手動で除去した。次に、DRRの輪郭を表示し、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 I を計算し、類似度を表す評価指標とした（図2）。

$$I = \sum_{i=1}^N d_i / N \dots\dots\dots (2)$$

② 輝度濃淡情報を用いた評価指標

透視X線像とDRRに対し、次式で表されるGradient difference⁶⁾により両画像の輝度勾配

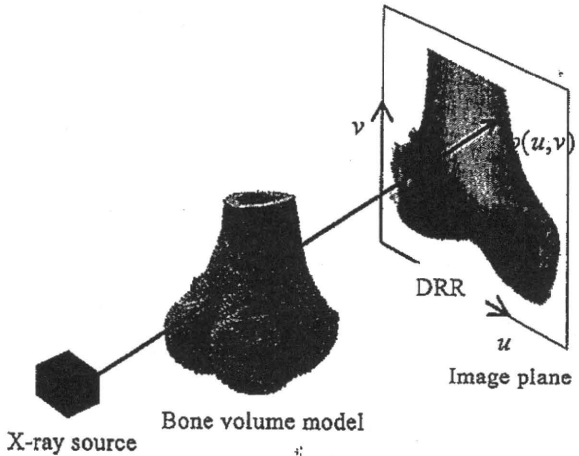


図1. Generation of DRR from bone volume model.

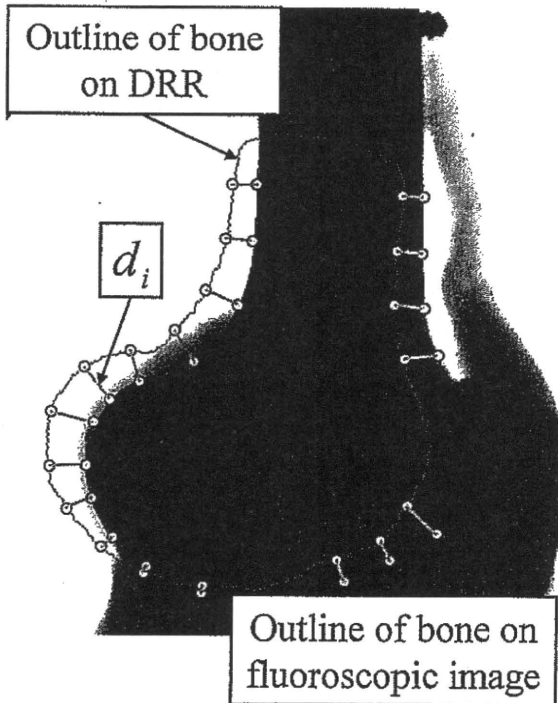


図2. Distance from a point of bone on DRR to the closest point of bone outline on fluoroscopic image.

分布の類似度を表す評価指標 G を求めた。

$$G(s) = \sum_{u,v} \frac{A_v}{A_v + (I_{diffv}(u, v))^2} + \sum_{u,v} \frac{A_h}{A_h + (I_{diffh}(u, v))^2}$$

$$\begin{cases} I_{diffv}(u, v) = \frac{dI_f}{du} - s \frac{dI_{DRR}}{dv} \\ I_{diffh}(u, v) = \frac{dI_f}{dv} - s \frac{dI_{DRR}}{du} \end{cases} \dots\dots (3)$$

ここで、 I_f と I_{DRR} はそれぞれ透視X線像とDRRの輝度値、 u, v は画像平面における水平

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 \pm 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。

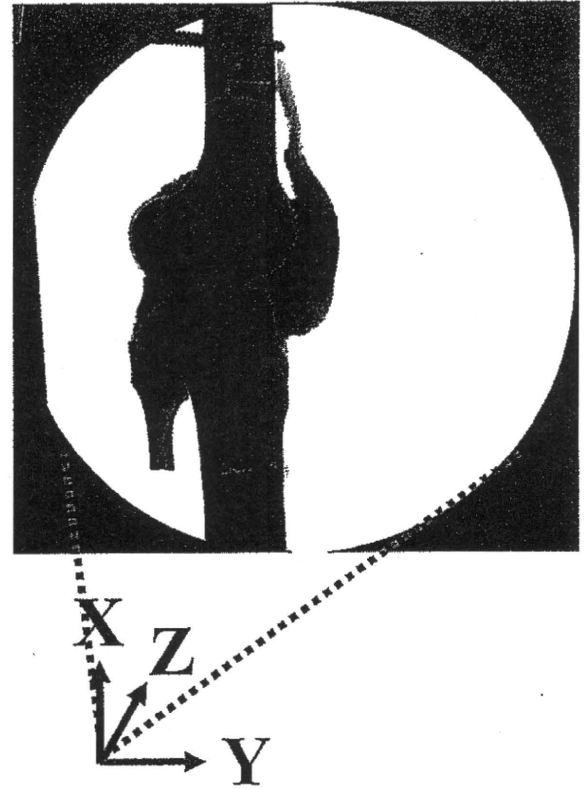


図3. Fluoroscopic image of the femur and tibia with their DRRs overlaid.

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

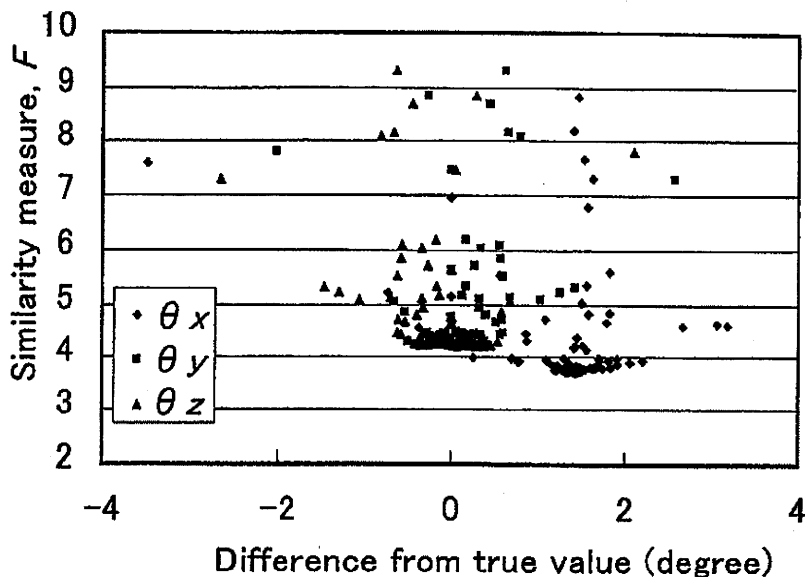


図4. Change in similarity measure with rotation parameters.

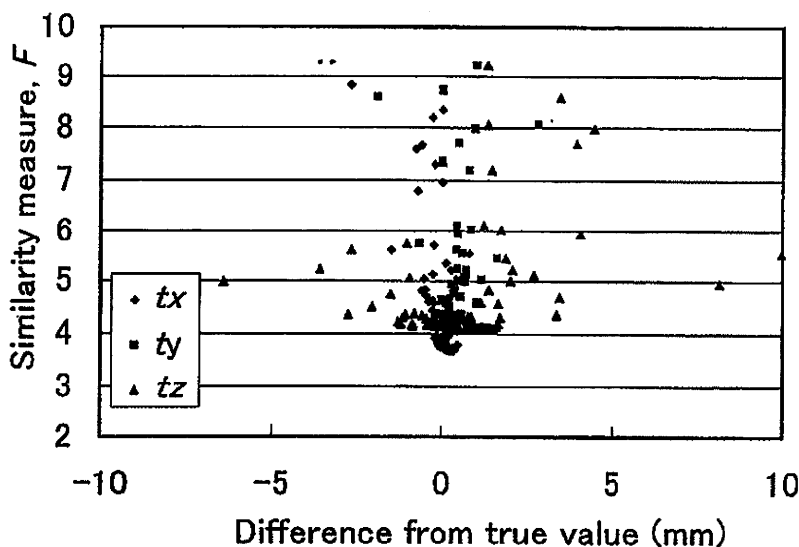


図5. Change in similarity measure with translation parameters.

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、骨ボリュー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・スポーツ医科学センター***

大森 豪*, 渡辺 博史**
田中 正栄***, 古賀 良生**

KEY WORDS

- 変形性膝関節症
- 病態と危険因子
- 大腿四頭筋強化
- 疫学調査

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。Slemenda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⁾²⁾。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³⁾。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

Progress and evidence of medical
rehabilitation for knee

osteoarthritis

Go Omori (教授)

Hiroshi Watanabe

(リハビリテーション部主任)

Masaei Tanaka (主任)

Yoshio Koga (副院長)

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に影響するとした報告が散見される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)。

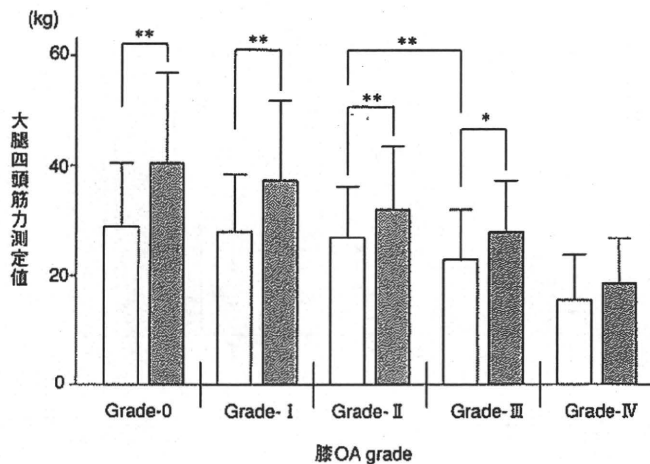


図2. 男女別、膝OA grade別大腿四頭筋筋力値(第5回検診)
□: 女性, ■: 男性, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

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¹⁸⁾。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¹⁹⁾。

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枕つぶし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

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

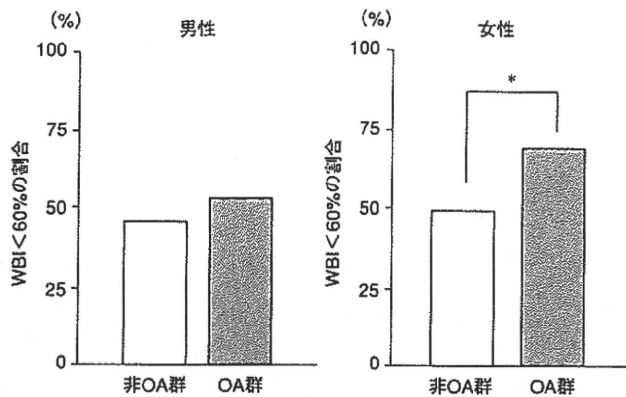


図3. 男女別における非OA群とOA群での体重支持指数(WBI; Weight Bearing Index)の比較(第5回検診)^{a)}

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

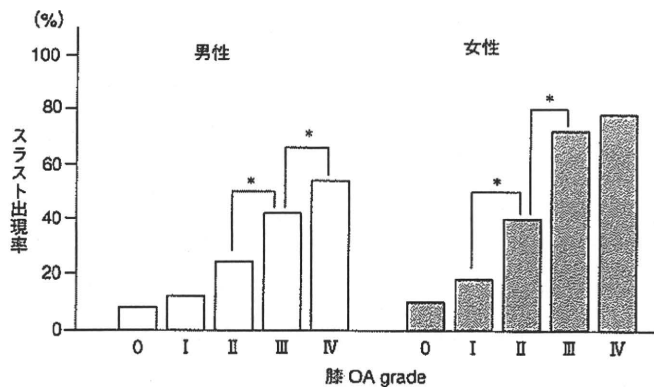


図4. 男女別、膝OA grade別のスラスト出現率(第4回検診)

* p < 0.01

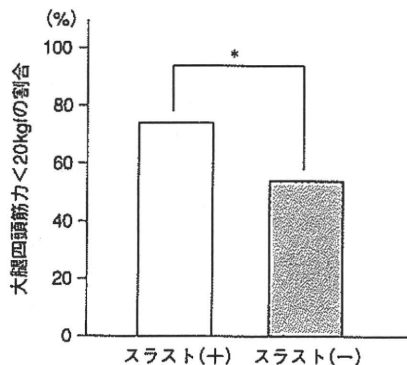


図5. スラスト出現の有無と大腿四頭筋力との関係(第4回検診)

* 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症と体型・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) ⁸⁾	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

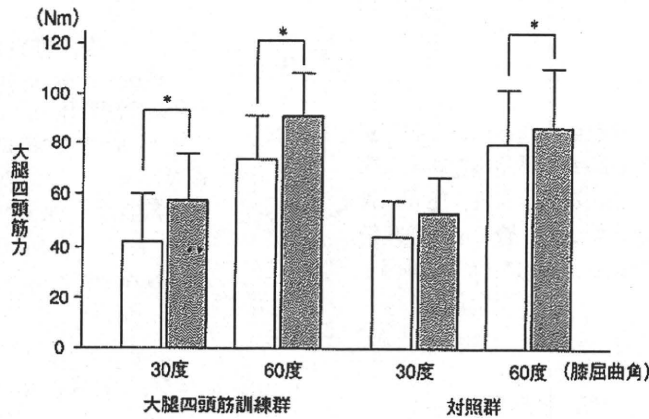


図6. 膝OAに対する大腿四頭筋力訓練の効果
□: 運動前, ■: 運動後, *p<0.01

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

- 6) 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
- 7) 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
- 8) Chamberlain MA, Care G, Harfield B, et al : Physiotherapy in osteoarthritis of the knee. *Int Rehab Med* 4 : 101-106, 1982
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 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

- 14) 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
- 15) Petrella RJ, Bartha C : Home based exercise therapy for older patients with knee osteoarthritis ; A randomized controlled trial. *J Rheumatol* 27 : 2215-2221, 2000
- 16) 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
- 17) 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
- 18) 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
- 19) 池田 浩, 黒澤 尚: 変形性膝関節症に対する保存的治療-運動療法の実践-. *MB Orthop* 20 : 106-113, 2007
- 20) 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

Risk factor of knee osteoarthritis—Matsudai knee osteoarthritis survey

大森 豪・古賀 良生・遠藤 和男・渡辺 博史・西野 勝敏・速水 正

Go Omori(教授) / 新潟大学超域研究機構

Yoshio Koga(副院長) / 新潟こほり病院

Kazuo Endo(教授) / 新潟医療福祉大学

Hiroshi Watanabe(主任) / 新潟こほり病院リハビリテーション部

Katsutoshi Nishino(主任) / 新潟県健康づくり・スポーツ医科学センター

Tadashi Hayami(部長) / 済生会新潟第二病院整形外科

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)

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、我々が行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

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 OA 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

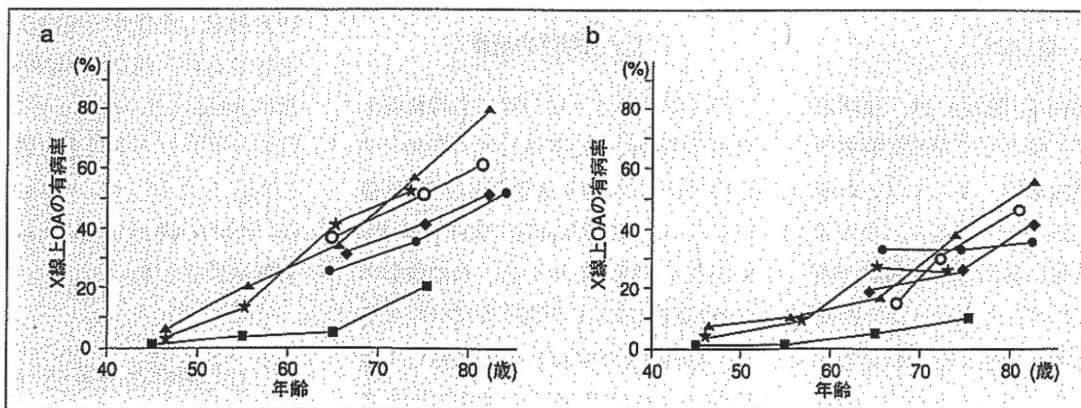


図1 変形性膝関節症の有病率

- 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)

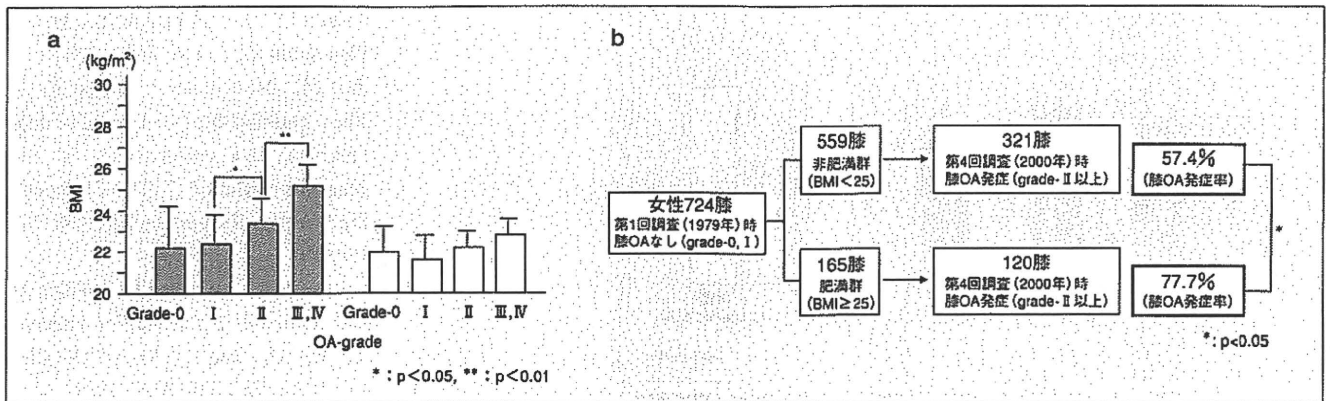


図2 肥満と変形性膝関節症(膝 OA)の関連性

■：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．

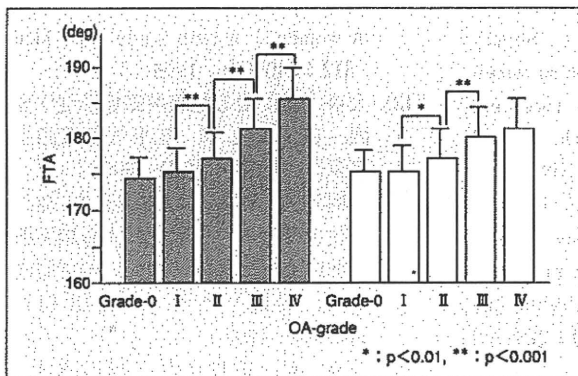


図3 膝内反変形と変形性膝関節症の関連性(横断解析)

■：女性，□：男性

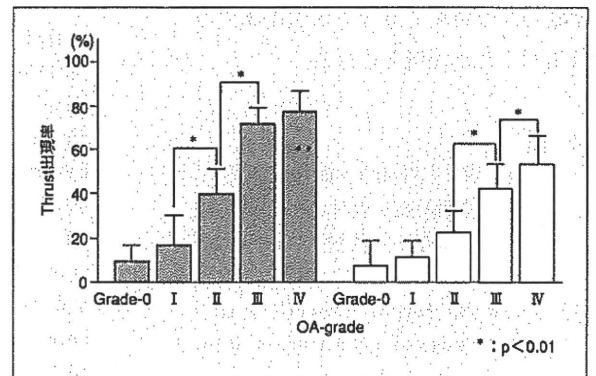


図4 Thrust 出現率と変形性膝関節症の関連性(横断解析)

■：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⁵⁾⁻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，

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

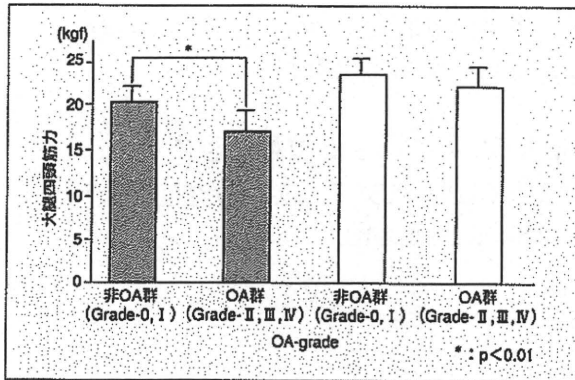


図5 大腿四頭筋力と変形性膝関節症の関連性(横断解析)
■: 女性, □: 男性

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, Mootoosamy 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: 変形性膝関節症用器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

Corresponding Author : Toyohiko HAYASHI, PhD.

Department of Biocybernetics, Faculty of Engineering, Niigata University

2-8050 Ikarashi, Niigata 950-2181, JAPAN

Tel : 025-262-7339 Fax : 025-262-7778

E-mail address : hayashi@eng.niigata-u.ac.jp

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

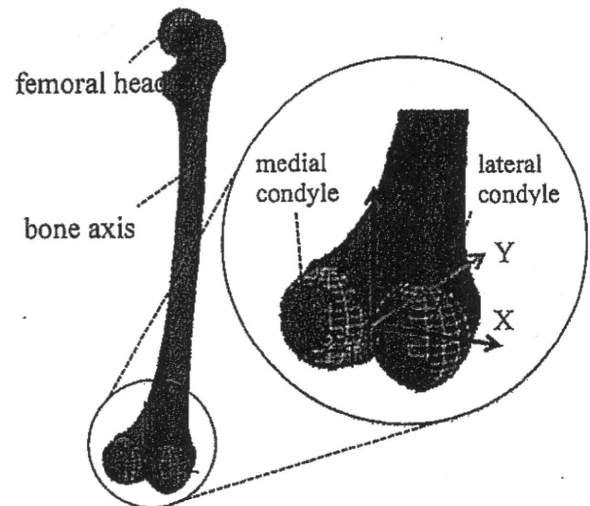


図1. Coordinate system for femoral CT-model.

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化し、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化する。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、モデルボーンから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。

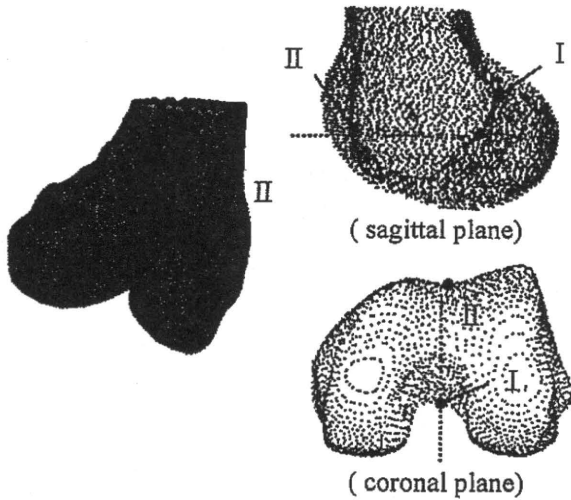


図2. Femoral MRI-model and reference points I and II for scaling.

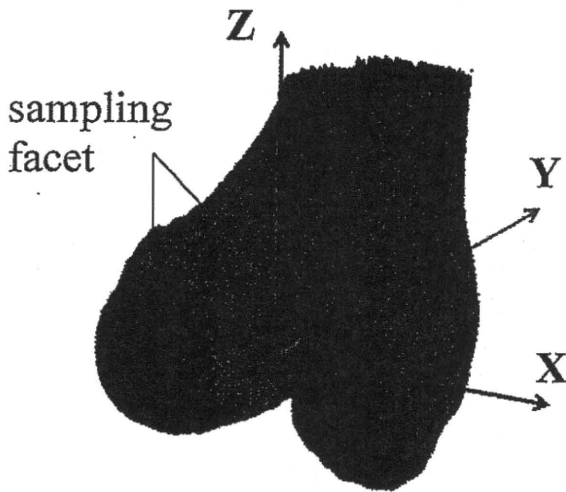


図3. Femoral Condyle Model for extracting articular facets from patient's MRI-model.

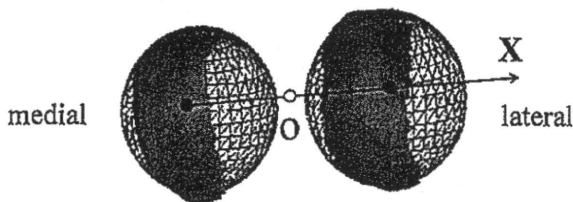


図4. Extracted articular facets of patient's MRI-model : After a sphere is fit to each facet in a least-square manner, the X-axis and the origin of coordinates are decided.

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顆関節面と定義する。最後に、この内外側後顆関節面それぞれに球をフィッティング (最小二乗法) し、X軸方向を内側後顆と外側後顆の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。

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

この式を書き変えれば、

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

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。