

動画対応フラットパネルディテクタ装置を用いた 新しい膝関節動態解析法

森岡 茂晃, 真田 茂[†], 北岡 克彦^{††}, 中村 立一^{††}, 松井 武司^{††}, 井上 仁司^{†††}

金沢大学大学院医学系研究科・〒920-0942 石川県金沢市小立野 5 丁目 11 番 80 号

[†]金沢大学医学部保健学科・〒920-0942 石川県金沢市小立野 5 丁目 11 番 80 号

^{††}金沢大学医学部附属病院・〒920-8641 石川県金沢市宝町 13 番 1 号

^{†††}キヤノン(株)DRS 第 2 開発室・〒321-3292 東京都大田区下丸子 3 丁目 30 番 2 号

(2003 年 10 月 31 日, 最終 2003 年 11 月 25 日受理)

Computer Analysis Method as a New Examination for Knee Joint Movement Using a Dynamic Flat Panel Detector System

Shigeaki MORIOKA, Shigeru SANADA[†], Katsuhiko KITAOKA^{††},
Ryuichi NAKAMURA^{††}, Takeshi MATSUI^{††} and Hitoshi INOUE^{†††}

Graduate School of Medical Science, Kanazawa University, 5-11-80 Kodatsuno, Kanazawa, Ishikawa 920-0942, Japan

[†]School of Health Sciences, Kanazawa University, 5-11-80 Kodatsuno, Kanazawa, Ishikawa 920-0942, Japan

^{††}Kanazawa University Hospital, 13-1 Takara-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-8641, Japan

^{†††}Canon Inc., DRS Development Dept. 2

3-20-2 Shimomaruko, Ohtaku, Tokyo 321-3292, Japan

(Received October 31, 2003, in final form November 25, 2003)

Abstract : Recently, a dynamic flat panel detector (FPD) system is appeared as a new digital X-ray modality, and makes it possible to provide dynamic X-ray images for a screening examination of knee function. Knee joint incongruity and osteoarthritis may be diagnosed as the screening examination. We developed a computer analysis method for knee joint movement with using the dynamic FPD. On lateral view of knee joint X-ray images, a movement of the lateral condyle of femur during flexion and extension movement is important in clinical practice, and a relationship between the movement of the lateral condyle of femur and knee joint angles during the movement is also important. We obtained 30 images of five healthy volunteers at 10 seconds during the knee-bending movement. An outline of the lateral condyle of femur were enhanced by the Sobel operator, which selected edge gradients within a limited range of orientations, and then detected by Binarization and the Template matching technique. The knee joint angles were automatically calculated by techniques such as the Sobel operator, and the Hough transform. It concludes that a possibility of computer analysis for a knee joint movement with the dynamic FPD as a new examination was indicated.

Key words : knee joint movement, dynamic flat panel detector system, template matching, Hough transform

1. 背景と目的

近年, 静止画のみならず, 動画対応フラットパネルディテクタ (FPD) 装置の登場により, 一般撮影領

域において, 従来の静態診断から動態診断への応用が可能になってきた [1-3]. また, 医療の高度化により膨大な画像診断情報に対してのコンピュータ支援診断 (CAD) が重要となっている.

関節領域における動態解析の研究には、全膝関節置換術を対象とした研究や、脊椎の動態解析の研究が行なわれている[4,5]。これらは、関節をCT (Computed Tomography)や透視装置などで事前に撮影して、形状データを取得している。その後、その得られた形状データと別に撮影された動画像とを照合させ、動態解析を行う手法を採用している。そのため、このような解析には、時間がかかり、また多大なコストがかかる。一方、動画対応 FPD 装置では、簡便に動画像を取得することができる。そこで、我々は、動画対応 FPD 装置を利用して、スクリーニング検査としての膝関節動態解析法の開発を行った。我々は、すでに透視画像を対象に、1 症例における大腿骨外顆の検出を試みた[6]。今回は、5 症例の FPD 動画像を取得し、複数のテンプレートをを用いたテンプレートマッチング法による新たな解析法を開発したので報告する。

2. 方法

2.1 対象および使用機器

健常ボランティア(男性：5 名，年齢：22-30 歳，平均：25.4 歳)の右膝関節を対象に行った。なお、ボランティアにはこの撮影に関する十分な説明を行い、同意を得た。本研究で使用する動画像は、以下に示す装置および撮影条件で取得した。

動画対応 FPD 装置：Canon 社製 CXDI-40G 改造型

撮像条件：55kV, 80mA, 6.3msec

撮影時間：10sec (3frame/sec)

2.2 撮影方法

従来、撮影法は、一般撮影で行われている膝関節撮影法と他の膝関節動態解析に関する報告を参考に、側面像における深屈曲位から伸展位、伸展位

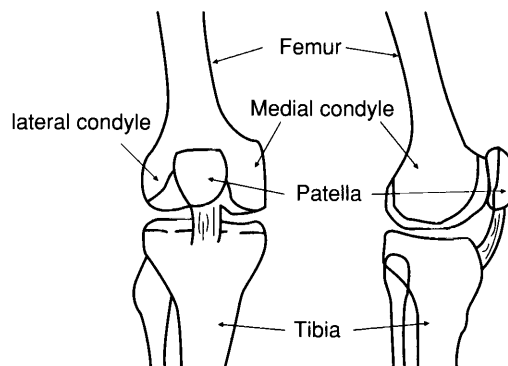


Fig. 1 The anatomy of knee joint

から屈曲位の一連の屈伸運動を採用した[4,7]。膝関節解剖図を Fig. 1 に示す。膝関節側面動画像で診断上重要なのは、大腿骨外顆と脛骨表面の接点である。この点が屈伸運動中にどのような移動軌跡を示すかを評価することが有益である。また、膝関節屈伸運動中に起こる“滑り”から“転がり”を示すロールバック現象の評価のために、移動距離の絶対距離と膝関節屈曲角度との関係が診断上重要である。本研究では、その2つの関係を得るために、まず“大腿骨外顆の自動検出による移動追跡法”と“膝関節屈曲角度の自動検出法”の開発を試みた。なお、テンプレートマッチング処理に用いたテンプレートは、整形外科医院より得た膝関節側面 X 線画像 60 枚の計測データより決定した4タイプになる (Table 1, Table 2)。

撮影画像：4 つ切りサイズ。脛骨大腿関節が中心に位置するように撮影する。

撮影手順：膝関節屈伸運動、深屈曲時を開始として伸展し、その後に屈曲運動を行う(屈曲運動 5sec, 伸展運動 5sec)。

取得画像：1344×1344pixel, 160μm/pixel, 12bit

Table 1 Types of the lateral condyle of femur on 60 X-ray images.

	Maximum	Minimum	Mean ± SD
Vertical size	150	69	125 ± 22.7
Horizontal size	319	131	222 ± 33.8

(Pixel)

Table 2 Details of 4 type's template.

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Vertical size	80	120	160	200
Horizontal size	140	180	220	260

(Pixel)

2.3 テンプレートマッチング法を用いた大腿骨外顆検出の概要

フローチャートを Fig. 2 に示す. 最初に, 大腿骨外顆を抽出するために, 角度を限定した Sobel フィルタによるエッジ強調処理を行った. 次に, 検出エラーを誘引する皮膚面と膝蓋骨のエッジ成分を除去した. そして, 二値化処理を行い, 形状検出に良く用いられるテンプレートマッチング法による大腿骨外顆の検出を行った[8]. 本研究では, 前報告と異なり, 複数のテンプレートを用いて解析した[6].

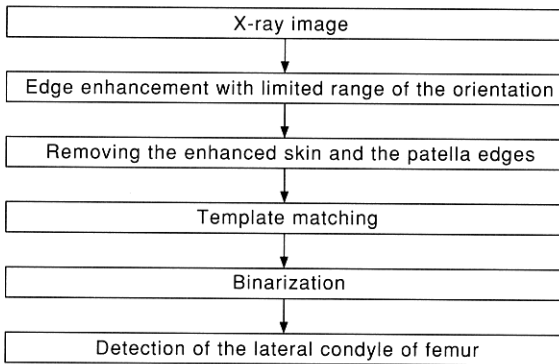


Fig. 2 Flowchart for the detection of the lateral condyle of femur

2.3.1 大腿骨外顆検出

大腿骨外顆下端のエッジを強調するために角度を限定した Sobel フィルタによる処理を行った. カーネルサイズは, 後に行うテンプレートマッチング処理や予備実験の結果から, 大腿骨外顆のエッジが良く強調されたカーネルサイズ 7×7 pixel, 係数 2 のものを採用した. 原画像を $f(i, j)$ とした場合, x 軸方向に Sobel フィルタをかけたものを $g(i, j)$, y 軸方向に Sobel フィルタをかけたものを $h(i, j)$ とすると, エッジの角度(θ)は,

$$\theta = \tan(h(i, j)/g(i, j)) \quad (1)$$

である. 本法では, 大腿骨外顆下端のエッジが良好に強調される $-180^\circ < \theta < 25^\circ$ を採用した.

次に, テンプレートマッチングの検出エラーを減少させるために, 皮膚面と膝蓋骨表面のエッジ成分を除去した. この処理は, 角度を限定しない Sobel 画像を参照して行った. すなわち, X 線が FPD に直接入射する部分に皮膚面と膝蓋骨表面が隣接することを利用した. その処理法は, 画像上に正方形のカーネルを走査させ, カーネルの一角に位置するピクセルが, ある閾値以下の場合には, そのカーネルの中心点のピクセル値を 0 とする方法である. カー

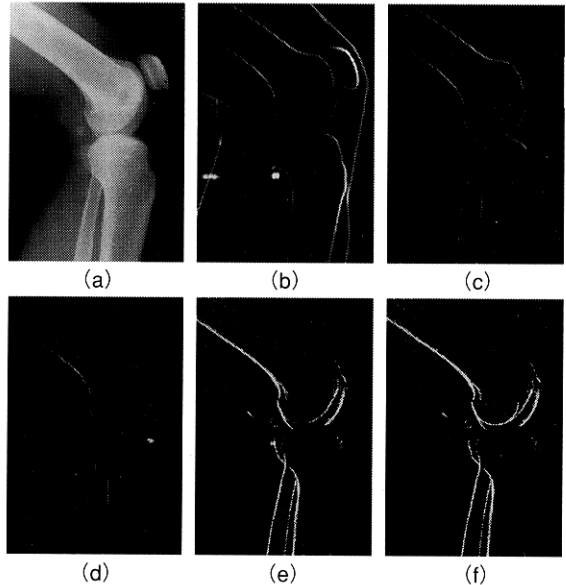


Fig. 3 The steps of the detection of the lateral condyle of femur (a) Original Image, (b) Edge-enhanced image by the Sobel operator, (c) Edge-removed images of the skin and patella edges, (d) Edge-enhanced image by the Sobel operator with a limited orientation, (e) Binarized image, (f) Template matched image

ネルサイズは、本研究で使用した5例の全ての膝データにおいて適応した60pixelとした。次に、二値化処理を行い、テンプレートマッチング法を用いて大腿骨外顆の検出を行った。形状は半円で幅が5 pixel のものを使用した(Table 2)。また、検出した際の半円状テンプレートの最下端点を大腿骨外顆と脛骨表面が接する点であるとした。全画像から得られた検出点を結んだものを移動軌跡とした。原画像から大腿骨外顆検出までの処理画像を Fig. 3 に示す。

2.4 膝関節屈曲角度の自動計測の概要

フローチャートを Fig. 4 に示す。大腿骨外顆検出に用いた角度を限定した Sobel 画像を用いて、膝関節屈曲角度を自動的に計測した。屈曲角度は、大腿骨背面と脛骨背面からなる角度とし、エッジ強調されたそれらの直線状のエッジ成分に対し、各々 Hough 変換による直線検出を行った。そして、その2直線の交叉角度を膝関節屈曲角度とした。

2.4.1 Hough 変換を用いた大腿骨・脛骨背面エッジの検出

大腿骨外顆検出処理で得た角度を限定した Sobel 画像には、大腿骨外顆のエッジが強調されるのと同様に大腿骨背面と脛骨背面に直線状のエッジが強調される。その直線状のエッジ成分に対して、連続的なエッジ成分検出に良く用いられる Hough 変換処

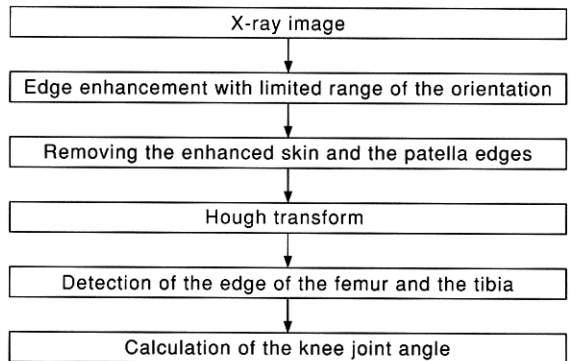


Fig. 4 Flowchart for the automated calculation of the knee joint angle

理を行った[9,10]。Hough 変換処理における直線は次式に示すように定義する[10]。

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (2)$$

ただし、 ρ は原点からの距離、 θ は垂角($0 \leq \theta \leq \pi$)になる。すると、この直線状の点(x_i, y_i)は次式で示すよう

に、 $\rho-\theta$ 空間で正弦波に写像される。

$$\rho = x_i \cos \theta + y_i \sin \theta \quad (3)$$

大腿骨背面と脛骨背面の2直線を検出するために、脛骨大腿関節が撮影照射野の中心に位置することを利用して、画像を上下2分割にし、また深屈曲位に対応するために下段をさらに左右に2分割した。処理過程における原画像、Hough 空間像、検出画像を

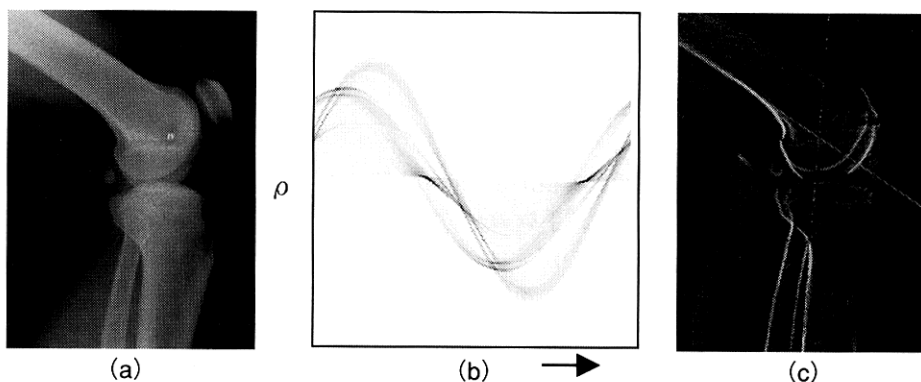


Fig. 5 Images of Hough transform (a) Original Image, (b) Hough transform of the edge-enhanced image in Fig. 3 (d), (c) Detected 2 straight line of the femur and the tibia on the image

Table 3 Table of success rate of detecting the lateral condyle of femur using the template matching technique.

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Mean \pm SD
Success Images/30	30/30	26/30	24/30	18/30	17/30	115/150
%	100%	86.7%	86.7%	60%	56.7%	76.8% \pm 18.3

Fig. 5 に示す。その結果、大腿骨背面と脛骨背面の連続的なエッジ成分を直線として検出し、その2直線の角度を膝関節屈曲角度として出力した。

3. 結果

60枚の膝関節側面X線画像上の大腿骨外顆を計測した結果より、縦幅は、最大値が150.0pixel(2.4mm)、最小値が69.0pixel(1.1mm)、横幅は最大値が319.0pixel(5.1mm)、最小値が131.0pixel(2.1mm)となった。また、それらの平均値は、縦幅125.0pixel \pm 22.7(2mm \pm 0.4)、横幅222.0pixel \pm 33.8(3.5mm \pm 0.5)の半円を示した(Table 1)。ただし、その中には、大腿骨外顆と内顆のずれが5mm以内にX線画像上で投影されるといふ撮影基準を外れるものも含めた。その理由は、屈伸運動中の側面投影画像では、通常の側面静止画像とは異なり、大腿骨外顆と内顆が大きくずれて投影されるからである。この60枚の計測データより、テンプレートのサイズは平均値を基準として、最大値と最小値の範囲内の4タイプとし、形状は大腿骨外顆に類似する半円状のものとした(Table 2)。

5症例のテンプレートマッチング処理による大腿骨外顆検出の結果をTable 3に示す。検出結果は、100%~56.7%(平均:76.7% \pm 18.3)となり、前報告の59%に比べ、高い値となった[6]。

大腿骨外顆の自動で検出された点と手動で検出した点の移動軌跡のグラフをFig. 6に示す。手動の結果と自動の結果とは、必ずしも一致しないが、おおまかには類似した半円弧状の曲線を描いた。深屈曲位から立位にかけて、“滑り”となる大きな移動を示し(Fig. 6: area A)、立位時には、“転がり”で狭い範囲に集積する動きを示した(Fig. 6: area B)。移動軌跡から求められた絶対移動距離と膝関節屈曲

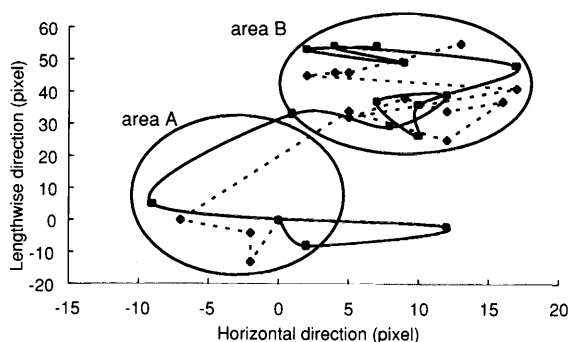


Fig. 6 The movement track of the lateral condyle of femur during extension. The graph starts from 0 that means the first image of dynamic images. (a) The straight line shows automatic detected points. (b) The dotted line shows manual detected points. (area A) The area A indicates that the first movement of the lateral condyle of femur roughly drew an arched line. (area B) The area B indicates that the latter movement of the lateral condyle of femur roughly drew accumulated area.

角度との関係をFig. 7に示す。膝関節屈曲角度の範囲は、144.0°~4.9°となった。深屈曲位から立ち上がり始めた時は大きく動き、50°付近では同じような移動距離を示した。最後に、立位になる時点では、大きく移動し、この動きはロールバック現象であったと考える。

4. 考察

大腿骨外顆検出は、検出エラーがあるものの、前報告より良い検出結果となった(Table 3)。その理由は、多数のX線画像から計測した大腿骨外顆データによるテンプレートを使用したことによる(Table 2,3)。一方、検出エラーの原因は、大腿骨外顆と内顆のコントラスト差が低く、エッジが十分に強調されなかったためと考える。また、Fig. 6より、移動軌跡は、まだ検出精度が低いために、膝関節の動態

中の大まかな動きのみを示した。その理由は、形状とサイズを固定した4タイプのテンプレートによる検出法では、大腿骨外顆が半円状でなく、楕円状に投影された場合には、大腿骨外顆最下端点の正確な検出ができないからである。したがって、診断に用いるために、さらに検出精度向上のための改善が必要である。その一つとして、固定テンプレートの枚数を増やすのではなく、SSDA法による形状変化に対応した形状検出法が適すると考える。

一方、膝関節屈曲角度の検出は、比較的良好にできた。この理由は、大腿骨と脛骨は、軟部組織に対してコントラスト差が大きく、骨のエッジを明確に強調できるからである。しかし、脛骨背面を検出するエラーやずれが生じるときがあり、精度向上が必要である。ずれの原因は、エッジ成分の幅による影響と考える。その改善法として、Sobelフィルタのカーネルサイズの縮小や細線化処理による方法を考える。

5. まとめ

膝関節の機能検査として、迅速かつ簡便なスクリーニング検査となる動画対応FPDを用いた膝関節動態解析法の開発を試みた。本法は、初期段階の変形性膝関節炎や人工関節の術前術後の評価に有益であると考えられる。また、インフォームドコンセントとしての利用価値も高いと考える。

参考文献

- [1] 田中利恵, 真田 茂, 鈴木正行, 他: 胸部動画像を対象とした呼吸性動態の定量化, 医事情誌, 20(1), 13-19, 2003.
- [2] 真田 茂: 動態解析の可能なX線スクリーニング検査法の開発, 映像情報, 35(2), 121-125, 2003.
- [3] 山田真一: 直接変換方式X線平面検出器(動画対応)の特徴技術解説 フラットパネルディテクタ(Flat Panel Detector), 日放技学誌, 55(8), 735-738, 1999.

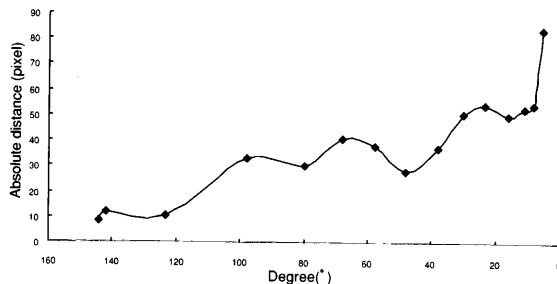


Fig. 7 The graph shows that the relationship between the absolute value distance of the movement track of the lateral condyle of femur during extension and knee joint angles.

- [4] Banks SA and Hodge WA: Accurate measurement of three-dimensional knee replacement kinematics using single-plane fluoroscopy, IEEE Trans Bio Eng, 43(6), 638-649, 1996.
- [5] Zheng Y, Nixion MS, Allen R: Lumber spine visualization based on kinetic analysis from videofluoroscopic imaging, Med. Eng. & Phys. 25, 171-179, 2003.
- [6] 森岡茂晃, 真田 茂, 北岡克彦, 他: 膝関節側面X線動画像における大腿骨外顆の自動検出, 信学技報, 102(299), 13-17, 2002.
- [7] 高橋正治, 川上嘉昭, 杜下淳次, 他: 凶解診療放射線技術実践ガイド, 235-236, 文光堂, 東京, 2002.
- [8] 有村秀孝, 石田隆行, 桂川茂彦, 他: テンプレートマッチング技術を用いた胸部X線写真の撮影方向と画像の向きを認識する方法の開発, 日放技会学誌, 58(8), 1047-1054, 2002.
- [9] Sanada S, Doi K, MacMahon H: Image feature analysis and computer-aided diagnosis in digital radiography: automated detection of pneumothorax in chest images, Med Phys, 19(5), 1153-1160, 1992.
- [10] 画像処理標準テキストブック編集委員会: イメージプロセッシング<画像処理標準テキストブック>, 187-190, 財団法人画像情報教育振興会, 東京, 2001.