

平成 21 年 5 月 26 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2006年度～2008年度
 課題番号：18700483
 研究課題名（和文） 携帯型膝関節運動機能評価システムの開発
 研究課題名（英文） Development of a portable analyzing system for evaluation of knee-joint motion
 研究代表者
 茅野 功 (KAYANO ISAO)
 川崎医療福祉大学・医療技術学部・講師
 研究者番号：70390242

研究成果の概要：本研究では、健常者における膝関節の屈曲伸展運動（膝関節運動）を非侵襲・無負荷で解析し、その運動機能を定量的に評価することを目的とした携帯型システムの開発を行った。椅子に腰かけ下肢を自由振動させる様子を、コンピュータに接続した CCD カメラによって 10 秒間測定するだけで、被験者の下肢部筋肉の粘性及び弾性を示すパラメータを約 67 秒で定量的に解析することができる。本装置を利用することにより、効率的なトレーニング法の検討や、予防医学への貢献が可能となると考える。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	240,000	3,440,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：健康・福祉工学・膝関節運動

1. 研究開始当初の背景

人間にとって歩行は日常生活のために欠かすことのできない重要な動作であり、歩行機能の低下は Quality Of Life(QOL)の低下に直接結びつく。加齢に伴う身体機能の低下等による膝関節運動機能の低下は、歩行機能低下の代表要因であり、この種の膝関節運動機能の低下に対処するには、リハビリテーションと同時に適切な福祉機器の提供が望まれている。

これまでの研究により、膝関節運動機能は大腿二頭筋をはじめとする下肢筋肉や腱の

粘弾性に反映されることが分かっている。そこでこの膝関節運動機能の評価することにより、スポーツ選手など下肢強化のトレーニングに励む人々へ、その成果を簡易かつ定量的に表示でき、効果的なトレーニングメニューの作成に効果を挙げるのが期待される。このような膝関節運動機能の評価する装置は研究開始当初（2006年）のところで実用化されているものは存在していない。

我々は本研究開始当初までに、この膝関節運動機能の評価手段として、持ち上げた下肢を自由落下させることにより生じる下肢の減衰振幅運動を利用する Pendulum Test を用

いる試みを行っている。この Pendulum Test による膝関節運動を対象とした脊髄の機能を、反射弓を構成する α 運動細胞・ γ 運動細胞・筋紡錘・筋等の諸器官をモデル化した制御理論から、減衰振幅運動を表す運動方程式の算出方法を検討した。さらに、コンピュータに有線で接続された加速度計を下肢に 2 個装着させ、これにより上述の算出方法を用いて膝関節運動をソフトウェアにより解析するシステムの開発を試みた。しかし、このシステムには加速度センサを固定する治具の重量により下肢の膝関節運動を抑制したり、また有線ケーブルによる測定ノイズの混入の原因となる場合が多く、所望のデータを得られないことがある欠点を持っていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上述のシステムを改良して膝関節運動を非侵襲・無負荷で解析し、その運動機能を定量的に評価することのできるシステムの開発を行うことである。

このシステムの開発にあたる具体的計画は以下 3 点である。

- (1) 無線による膝関節運動測定手法の検討
- (2) 膝関節運動解析用ソフトウェアの検討
- (3) 解析されたデータの妥当性の検討

3. 研究の方法

(1) 提案する膝関節運動測定手法

従来の Pendulum Test による膝関節運動測定手法の欠点である、加速度センサ及び固定治具による運動の制限やノイズの混入を除去するため、本研究ではコンピュータに接続した CCD カメラを用いた動画像の解析による手法の提案を行った。この提案法による膝関節運動解析装置の概要を図 1 示す。

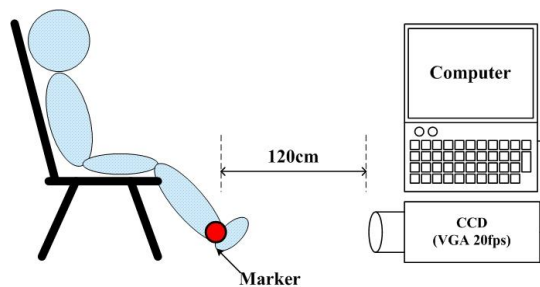


図 1 膝関節運動解析装置の概略

被験者の足首部に直径 68mm、重さ 3g の赤色マーカーを付け、下肢部の屈曲や伸張が妨げられないよう Pendulum Test 用椅子に座り安静を保つ。膝関節運動は、持ち上げられた下肢部を自由落下させることにより引き起こされ、このときの運動は大略、膝関節を中心とした円弧状の減衰運動となる。この

Pendulum Test による運動軌跡はこれまでの運動モデル解析により健常者の場合、式(1)、(2)で定義される。

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + K\theta + \frac{1}{2} mgl \sin \theta = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dB}{dt} = b_r(B_{rM} - B(t)) - a_r(B(t) - B_{m}) \left| \frac{d\theta}{dt} \right| \quad (2)$$

ここで、 J 、 B 及び K はそれぞれ慣性、粘性及び弾性係数であり、 m 、 g 及び l はそれぞれ下肢荷重、重力加速度及び下肢長さである。また、 θ は鉛直方向に対する膝の角度を示す。さらに、 a_r 、 b_r 、 B_{rM} 及び B_{m} はそれぞれ、粘性減少係数、粘性増加係数、粘性最大値及び粘性最小値である。運動解析にあたり、式(1)、(2)における個人パラメータは、 J 、 a_r 、 b_r 、 B_{rM} 、 B_{m} 及び K の 6 種となるが、 J は被験者の身長と強い相関関係を持つことから、身長により推定することで定数化し、 B_{m} は個人による差が乏しいことからこれを定数とする。これにより、個人の運動パラメータは 4 種とする。

この運動の全期間 (10 秒間) を、マーカ平面に対して垂直方向 120cm の距離に備え付けた CCD カメラにより解像度 VGA (横 640×縦 480 pixel)、フレームレート 20Hz によって撮像し、このデータを USB 接続されたコンピュータで記録した。

(2) 膝関節運動解析用ソフトウェア

膝関節運動解析用ソフトウェアは、1) 被験者からの測定データの取得、2) 運動の解析 (マーカの追跡)、3) 運動パラメータの推定、4) 結果の表示、の 4 項目を一連の動作として 1 つのアプリケーションとして開発を行った。本ソフトウェアの開発には Microsoft 社製 Visual C++6.0 を用いた。膝関節運動機能評価に特に重要となる 2) 運動の解析手法について以下に示す。

保存された動画像から膝関節運動を解析するため、まず動画像からそれぞれのフレームにおけるマーカの中心座標を式(3)により導出する。

$$(x_c, y_c) = \left(\frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}, \frac{y_{\max} - y_{\min}}{2} \right) \quad (3)$$

但し、 (x_c, y_c) はマーカの中心座標、 x_{\max} 及び x_{\min} はそれぞれ x 座標の最大値及び最小値、 y_{\max} 及び y_{\min} はそれぞれ y 座標の最大値及び最小値を示す。

次に、フレーム毎に求められたマーカの中心座標から膝関節の中心座標を導出する。運動は膝関節を中心とする円運動を行うものと仮定し、任意の 3 フレームのマーカ中心座標をそれぞれ (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) とすると、膝関節の中心座標 (x_0, y_0) は式(4)、(5)より導出される。

$$x_0 = \frac{Y_{32}(P_2 - P_1) - Y_{21}(P_3 - P_2)}{2(X_{21}Y_{32} - X_{32}Y_{21})} \quad (4)$$

$$y_0 = \frac{2X_{21}Y_{32}(P_2 - P_1) - Y_{21}\{X_{21}(P_3 - P_2) + X_{32}(P_2 - P_1)\}}{2Y_{21}(X_{21}Y_{32} - X_{32}Y_{21})} \quad (5)$$

但し、 $X_{21}=x_2-x_1$ 、 $Y_{21}=y_2-y_1$ 、 $X_{32}=x_3-x_2$ 、 $Y_{32}=y_3-y_2$ 、 $P_1=x_1^2+y_1^2$ 、 $P_2=x_2^2+y_2^2$ 、 $P_3=x_3^2+y_3^2$ とする。

最後に、この膝関節の中心座標(x_0 , y_0)を用いて膝関節角度 θ を式(6)により導出する。また、膝関節角速度及び角加速度はフレーム間の時間差を Δt とし、時間積分法によりそれぞれ導出する。

$$\theta = \cos^{-1} \frac{y_1 - y_0}{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}} \quad (6)$$

4. 研究成果

(1) 提案システムの概略

本研究で開発したシステムによる測定結果の一例を図2に示す。

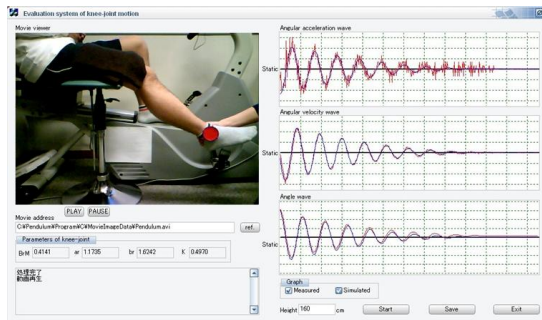


図2 測定結果 (表示の一例)

図2左中央のファイル選択部により、撮像した動画を選択することにより、対象の動画が画面左上で再生され、同時に運動解析が内部的に実行される。画面右下の Graph 部内の Measured にチェックが入っていれば解析終了後、画面右部に運動波形が赤い線で表示される(上より角加速度、角速度、角度波形を示す)。

さらに、運動波形表示後画面下部の身長入力部に被験者の身長を入力し、右下の Start ボタンを押すことにより、被験者の運動パラメータの推定演算が開始され、その結果が画面左中央部に表示される。この時、Graph 部内の Simulated にチェックを入れると、推定したパラメータ結果から運動を逆演算した結果が青い線で表示される。

(2) 演算処理時間

本システムによる被験者の膝関節運動機能解析のために必要な演算処理時間は、CPU: Athlon64 3200+ 2GHz、主記憶: 2GB のコ

ンピュータを用いて平均 67 秒であった。この演算時間の詳細は、マーカ追跡処理に約 42 秒、またパラメータ推定処理(線形計画法である polytope 法)に約 4 秒、その他演算処理に約 21 秒であった($n=108$)。

(3) 妥当性の検討

本システムによる運動解析結果の妥当性を検討するために、本システムによって導出した運動波形と、従来の加速度センサによって得られた運動波形との比較を行った。この比較のため、被験者には従来法である加速度センサと提案法で必要なマーカの両方を取り付け、この運動を計測かつ撮像し、加速度センサを用いた従来法で測定ノイズの混入が見られなかった運動波形に対して本システムによる運動解析結果と比較した。

比較対象は、22~26 歳までの膝関節に疾患を持たない健常な男女 36 人の被験者データとし、運動パラメータの推定のため得に重要となる提案法及び従来法の運動角速度波形初期 5 周期について、その振幅比と周期比の積を一致指数 P として比較を行った。この一致指数 P を式(7)に示す。

$$P = \prod_{i=1}^5 \left(\frac{M_{Ai}}{N_{Ai}} \times \frac{M_{Fi}}{N_{Fi}} \right) \quad (7)$$

但し、 M_{Ai} 、 M_{Fi} はそれぞれ提案法による i 周期目の最大振幅及び周期を示し、 N_{Ai} 、 N_{Fi} はそれぞれ従来法による i 周期目の最大振幅及び周期を示す。従来法及び提案法による角速度波形の一例を図3に示す。

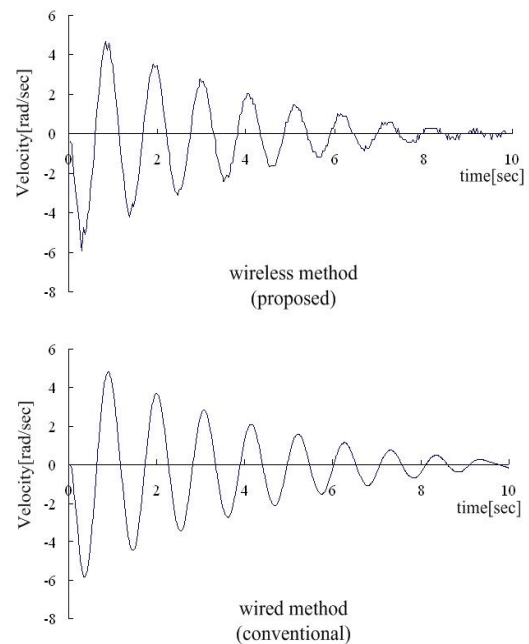


図3 運動解析結果の一例

本システムによる運動解析結果は、従来法と比較して若干波形に乱れが見られる。これは、提案法によるサンプリング周波数（動画像フレーム周波数：20Hz）が従来法（加速度センサによるサンプリング周波数 100Hz）に比べ低いことと、マーカの追跡において足の角度によってはマーカが完全に円形に映らないため、その中心軌跡の演算結果に乱れが生じる事が原因であると考えられる。

しかし、一致指数 P の平均は 1.009（誤差 0.9%）という高い精度を得られた。これにより、提案する膝関節運動機能解析手法に用いる CCD カメラは、汎用の安価な Web カメラで代用ができることが示唆され、膝関節運動機能の遠隔診断や、システムのより小型化に応用できると考えられる。

(4) 結語

本研究では、膝関節運動を非侵襲・無負荷で解析し、その運動機能を定量的に評価することのできるシステムの開発のため、その試作システムを構築し、本システムによる運動解析結果の妥当性の検討を行った。膝関節運動の機能を無線で解析・評価することのできるシステムは他に類がなく、本システムを応用することにより、どこでも・誰でも簡単に膝関節の状態を把握することができるようになり、効率的なトレーニング法の検討や、予防医学への貢献が可能となるシステムとなるであろうと考える。

今後の予定として、研究当初からの目標である膝関節に痙縮等の疾患を持つ患者に対しても運動解析・評価をすることができるシステムの開発と、より高速な運動解析アルゴリズムの検討が挙げられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

(1)

Isao KAYANO, Kazuaki JIKUYA, Masami GOTO, “Development of real-time analyzing system for evaluation of knee-joint motion”, World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering Proc., Vol.14, pp.63-66, 2006, 査読有.

[学会発表] (計 3 件)

(1)

茅野功, 井上寛之, 佐藤洋一郎, 早瀬道芳, “動画像による健常者の膝関節運動機能解析法の検討”, 電子情報通信学会 2009 年総合大会, Mar.2009, 愛媛.

(2)

井上寛之, 茅野功, 佐藤洋一郎, 横川智教, 早瀬道芳, “汎用 Web カメラを用いた膝関節運動解析システムの開発”, 電子情報通信学会 2008 年総合大会, Mar.2008, 福岡.

(3)

Isao KAYANO, Kazuaki JIKUYA, Masami GOTO, “Development of an analyzing system for evaluation of knee-joint motion using video images”, 22nd SICE Symposium on Biological and Physiological Engineering, Jan.2008, China.

6. 研究組織

(1)研究代表者

茅野 功 (KAYANO ISAO)

川崎医療福祉大学・医療技術学部・講師

研究者番号：70390242