

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：32714

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700599

研究課題名(和文) 携帯型深部腱反射定量化システムの開発

研究課題名(英文) A Portable Instrument for Characterizing Patellar Tendon Reflex

研究代表者

大瀧 保明 (Yasuaki, Ohtaki)

神奈川工科大学・創造工学部・准教授

研究者番号：50344693

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：膝蓋腱反射の叩打検査は脚気の検査としても知られているが、臨床診断において不可欠な診断手技である。本件では叩打検査において臨床医が視認している反射応答を数量化する方法を提案した。日常診療に携行可能で、既存の診察手技にそのまま適用可能な計測方法を目指した。検査手技の利便性を阻害せずに、叩打力と反射応答としての下肢の振り上がりを計測可能な携帯型装置を製作した。叩打力、筋電位、および慣性センサによる運動学的特長から、漸増する叩打力に対する反射応答の傾向を捉え近似関数により評価できることを示した。また、本装置を用いた徒手検査において反射誘発の十分な再現性、検出精度が得られることを示した。

研究成果の概要(英文)：A method for quantitative assessment for patellar tendon reflex (PTR) was investigated. Considering kinematic features of the PTR, integrated portable equipment was developed utilizing a multi-axes inertial sensor, a tap force sensor, and an EMG sensor. Relationships between tap forces and kicking movements of lower leg were evaluated for identifying a nature of patellar tendon reflex, which was expressed by an exponential function and delay parameters. The results demonstrated that the method quantifies reflex intensities and latencies reasonably, which is not easily characterized by the conventional scale, and potentially useful for assessing PTR in daily practice with the effortless handy device.

研究分野：生体医工学

キーワード：医用機器 膝蓋腱反射 センサ 運動計測 生体計測 携帯型装置

## 1. 研究開始当初の背景

腱伸張反射は筋の伸張をきっかけとして不随意に誘発される生理的運動応答であり、生体の運動生成を司る最も基本的な制御機構のひとつである。診察手技としては叩打による検査が一般的に行われ、目的とする筋の腱をハンマーで叩打して反射を誘発させる。医師はその筋収縮により生ずる運動を視認し反射の程度を判断する。脊髄、末梢神経系など、障害部位によって対応する筋群の反射異常の部位、程度に違いを生ずることから、反射の程度で障害部位の診断に広く活用されている。

脊髄反射、特に伸張反射については、従来、解剖学的、また電気生理学的な観点から評価が行われてきた。非侵襲的なアプローチによる研究では、筋電位の計測やトルクメータ、動力装置の利用による関節インピーダンスの計測によるものがある。これらは精緻な計測が行える一方で、装置としては大型化、複雑化する傾向にあり、そのままでは実験室外の診療の場へ導入するには至らない。また、筋電位にもとづく評価は、本研究でも重視するものであるが、結果として発揮される筋力に対しては常に一定の関係性が確保されるわけではなく、筋出力に対しては力学的な視点が必要であることが指摘されている。

前述のとおり、叩打による腱反射の検査手技は患者への負担が少なく、短時間で容易に実施できる方法である。診断初期の障害部位の識別に欠くことのできない手技である。しかし、その手軽さの一方で、診断は臨床医の視診に基づく定性的な評価であり、臨床医の主観や経験的知見に拠るところも大きい。診断基準に個人差を生ずることも指摘されている。すなわち、臨床医が視認している反射応答特性を適切に数量化する方法を明らかにし、臨床で容易に実施可能な計測手法を提案できれば、手技の信頼性と利便性の改善に結びつくことが期待される。

## 2. 研究の目的

現状の検査手技の利便性を阻害しない形で、叩打力や反射応答を簡便かつ十分な精度で計測し記録することが求められる。また、叩打に対する反射応答の出力特性から、健常例、症例に関して客観的な評価指標を確立することが必要である。本研究では、現状の検査手技に補完的に用いることができ、日常診療においても携行可能な診察支援機器の開発を目的とした。提案の装置を用いて、叩打力に対する反射応答の傾向から鑑別に有用な特徴抽出が行えるか検討を行った。

## 3. 研究の方法

### (1) 携帯型装置の開発

下腿部に簡便に装着して利用する携帯型

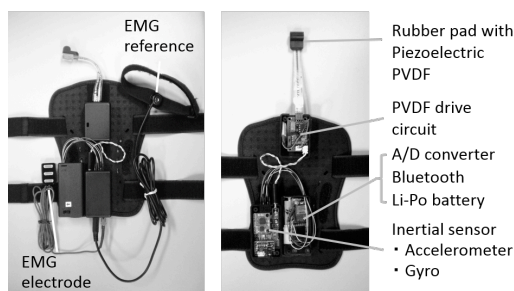


図1 携帯型計測装置の外観と構成

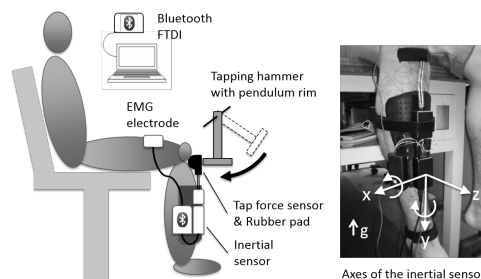


図2 実験装置の概略(左)と下肢に装着した携帯型装置の計測軸方向(右)

計測装置を試作した。検査手技の利便性を阻害せずに、叩打力と反射応答としての下肢の振り上がりを計測可能な携帯型装置とした。

携帯型計測装置の外観図を図1に示す。搭載される計測回路は腱叩打力を検出する部分、脚の振り上がりの運動計測部分、筋電位の計測を行う部分からなる。装置は全て、柔らかな布製の下腿用ブレース上に固定した。叩打検出部分は感圧センサと叩打用ゴムパッドからなり、膝蓋腱の至適な叩打位置に合わせて配置する仕様となっている(図中、ブレースから上方に伸びているのが叩打検出部分)。あらかじめ叩打位置に合わせて叩打パッドを配置することで、反射誘発の確実性を高めるとともに、任意の叩打用ハンマー(打腱器)を用いた検査で叩打力の測定が行える利点がある。感圧センサにはPVDF (Flexi Force, Nitta, Japan)を利用した。下肢の振り上がりは慣性センサモジュール(IMU 5DoF, SparkFun Electronics, USA)を採用し、加速度センサ3軸と角速度センサ(ジャイロ)2軸で下腿部の伸展、および内外転方向の運動を評価した。生理学的な重要性から、装置は筋電位も同時に計測できるものとした。筋電位の計測には、乾式アクティブ電極による筋電位センサ(ID3PAD, Oisaka Electronic Equipment, Japan)を用いた。基準電位を得るリファレンスケーブルも接続される。また、センサ駆動回路、計測回路、および送信部も小型化して、センサとともに下腿部に装着する仕様とした。センサからのアナログ信号は12bitのA/Dコンバータでデジタル化し、Bluetoothによる無線シリアル通信(ZEAL-C02, ADC Technology, Japan)によって計測データをリアルタイムでPCに送信で

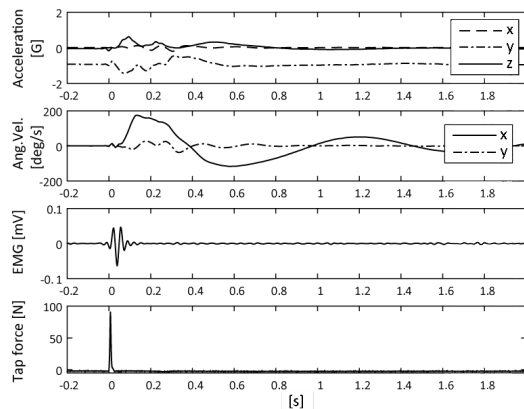


図3 携帯型装置による計測波形の一例（上から、加速度、角速度、筋電位、叩打力）

きるようにした。電源はリチウムポリマー電池を用い、昇圧を行って計測装置全体で電源を共有した。電源を含めた装置の総重量は168gである。装置から送信されるデータはサンプリング周波数 750Hz 相当で記録される。その後、サンプリング周波数 500Hz 相当にダウンサンプリングして解析用データとした。

## (2) 実験方法

健康成人男性 6 名（平均年齢 21.5 歳）を被験者として実験を行った。本件は神奈川県立工科大学倫理委員会の承認を得た。実験に際しては十分な説明を行い、被験者の同意を得た。膝蓋腱叩打により伸張反射を誘発し、下腿の振り上げ動作を計測した。図 2 に実験装置の概要を示す。被験者は専用の台上に座位をとり、下腿は自由な運動可能な状態で下垂とした。被験者は下腿部に前述の携帯型装置をベルクロで装着し、大腿直筋の筋腹に筋電位センサをサージカルテープで固定した。リファレンス電極は足関節に取り付けた。慣性センサによる加速度と角速度の軸方向は図中に示すとおりである。

腱叩打は実験条件の再現性を確保し、叩打のばらつきを抑制するため、振り子式の治具にとりつけた叩打ハンマーを用いた。振り子の初期角度で叩打力を調整し、ハンマーを自由落下させることにより膝蓋腱を打撃した。叩打力の強度として 3 種類（弱：30 度位置、中：60 度位置、強：90 度位置からの叩打）を設定した。それぞれ、30 N、60 N、90 N 程度の叩打力である。叩打後、下肢の運動がほぼ停止するまでの約 5 秒間を計測した。被験者が叩打による疼痛や不快感を感じたものについては、データを解析から排除した。また、光学式 3 次元モーションキャプチャーシステム (VICON512, Oxfordmetric, UK) との同時計測を別途行って、慣性センサを用いた下肢の運動計測に対する検証を行った。

## (3) 解析方法

叩打の衝撃力に対する圧電フィルムの出力傾向は、あらかじめ較正実験を行って調べ

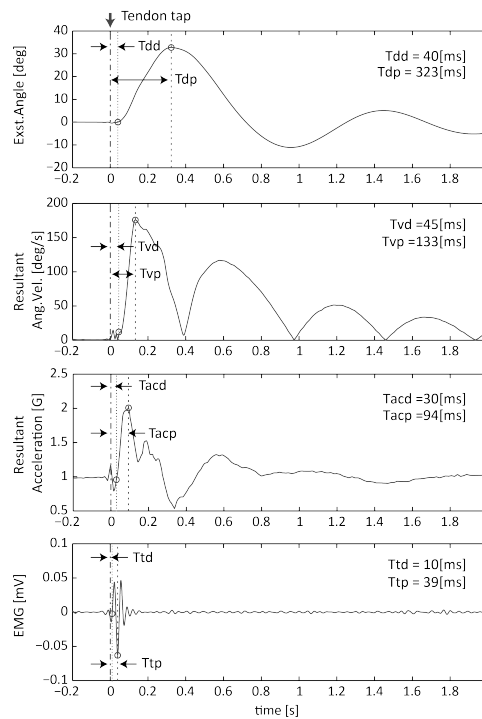


図4 携帯型計測装置により得られる下肢振り上げ動作に対する時間遅れの評価（上から、振り上げ角度、合成角速度、合成加速度、筋電位）

た。ロードセル (MRDT-200N, Showa Sokki, Japan) を配した打撃装置を用いて較正実験を行い、極めて直線性の高い較正式を得た。携帯型センサにより得られる計測波形の一例を図 3 に示した。上から加速度、角速度、筋電位、叩打力を示している。叩打のタイミングはインパルス状の叩打力の立ち上がり時点として検出可能である。叩打力の大きさは最大値で評価した。

つぎに、叩打から反射応答までの時間遅れを評価した。図 4 に対象とする信号の時系列波形と、時間遅れの定義区間を示した。横軸は叩打の瞬間からの経過時間を示している。叩打から筋電位立ち上がりまでの経過時間 (T 波潜時)  $T_{td}$ 、叩打から合成加速度の立ち上がりまでの経過時間  $T_{acd}$ 、叩打から合成角速度立ち上がりまでの経過時間  $T_{vd}$  を評価した。また、同様に叩打から各信号ピーク値までの経過時間として、筋電位ピーク時間  $T_{tp}$ 、合成加速度ピークまでの  $T_{acp}$ 、合成角速度ピークまでの  $T_{vp}$  を評価した。

一方、慣性センサで計測された下肢の 3 次元運動から、下肢の振り上げ角度を初期姿勢から相対角度変位として求めた。角度の計算は加速度センサより抽出した重力成分による姿勢計算と、短時間の角速度積分による。さらに、下肢に剛体リンクモデルを仮定し、被験者の実測の体節長と体重から体節ごとの重心位置、質量、慣性モーメントを求めた。矢状面内 2 次元の単振り子としてモデル化して、振り上げ動作における伸展トルクを求めた。運動方程式における粘性項、弾性項は

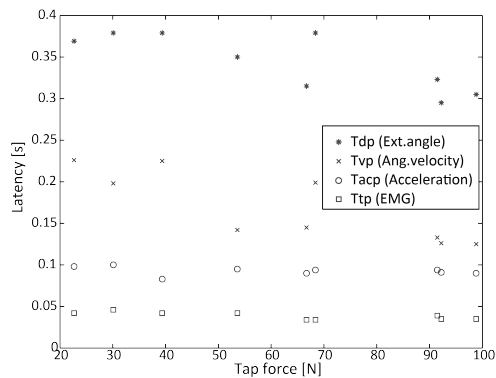


図5 叩打力の大きさに対する反射応答の時間遅れの傾向

文献値を用いた。複数回の叩打に対して、叩打力の変化に対する反射応答の傾向を評価した。

#### 4. 研究成果

叩打力に対する時間遅れの傾向を図5に示す。筋電位、加速度については叩打力に対する有意な相関性は認められなかった。時間遅れの値は、先行研究による生理学的知見に沿うものであった。角速度、加速度については、叩打力が増加するほど、時間遅れは減少する傾向であった。これは、振り上げ動作が下肢の重量といった物理的因子が支配的な機械的遅れの性格にあつて、伸展トルクの増加によって短時間に最大伸展することを反映したものと考えられた。図6に叩打力の増加に対する下肢の振り上げ角度の傾向を示した。叩打力が増加するにしたがい振り上げ角度は増加するが、一定の叩打強度で指数関数的に漸近する傾向があつた。これは健康被験者では共通した特長であつた。図中に示す指数関数による近似を非線形最小二乗法により得た。先行研究によって、痙性の症例では、より弱い叩打から急激に応答が得られる傾向があることから、近似式の係数によって鑑別に有用な指標が得られる可能性がある。

本研究では、叩打による膝蓋腱反射の定量化を目的として、携帯型の計測装置の開発を行った。容易に携行可能で、検査手技の利便性を阻害せず、叩打力と反射応答を計測可能なハンディな支援機器として提案した。計測データをもとに下肢の振り上げの運動学的特長、また動力学演算から関節トルクを推定した。被験者に対する標準化を行って、漸増する叩打力に対する反射応答の傾向を近似関数の係数により評価できることを示した。現在の視認による診断手技の情報化、定量化による医学的意義は高いと思われる。

高齢者が要介護状態に陥る要因では、骨粗しょう症や脊椎脊髄疾患に起因する運動器疾患が高い比率を占めることを報告している。骨粗しょう症に対しては骨密度測定器が普及しているが、脊椎脊髄疾患に対しては神

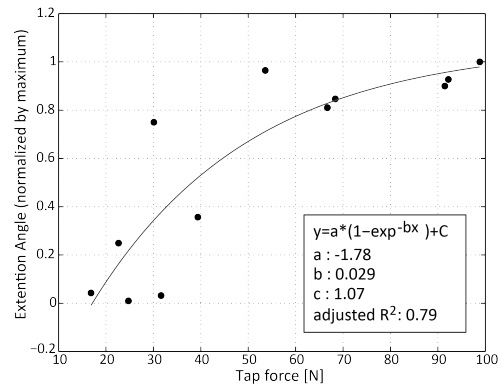


図6 叩打力の大きさと下肢の振り上げ角度における指数関数的関係

経機能の簡便な定量化法がないのが実情である。本研究の成果は日常の臨床診断や住民健診などで神経筋機能を簡便に定量評価できる検査機器の開発に応用が期待される。

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

- ① Yasuaki Ohtaki, Naotaka Mamizuka, Characterization of Patellar Tendon Reflex Utilizing Portable Instrument, Proceedings of JSME-IIP/ASME-ISPS Joint International Conference on Micro-mechatronics for Information and Precision Equipment, June 16<sup>th</sup>, 2015, Kobe, Japan.
- ② Naotaka Mamizuka, Yasuaki Ohtaki, A Handy Device for Patellar Tendon Reflex Test, IEEE EMBS Special Topic Conference on Healthcare Innovation & Point-of-Care Technologies, October 9<sup>th</sup>, 2014, Seattle, USA.
- ③ 真行寺 裕一, 大瀧 保明, 馬見塚 尚孝, 膝蓋腱反射における下肢の運動力学的解析, 日本機会学会第23回バイオフロンティア講演会講演論文集, pp.141-142, 2012年10月6日, 青森県弘前市.

#### 6. 研究組織

研究代表者

大瀧 保明 (Yasuaki Ohtaki)  
 神奈川工科大学・創造工学部・准教授  
 研究者番号: 50344693