

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年3月31日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22300157

研究課題名（和文） 変位筋音信号と筋電位信号を用いた筋の二次元収縮様相の解明

研究課題名（英文） Consideration of two-dimensional mechanism of muscle contraction using a displacement mechanomyogram and an electromyogram

研究代表者

岡 久雄 (OKA HISAO)

岡山大学・大学医保健学研究科・教授

研究者番号：80116441

研究成果の概要（和文）：

本研究では、微小距離が計測できるフォトフレクタを5×5の格子状（50×50mm）に配置した変位筋音（MMG）アレイセンサを製作し、10kHzサンプリングが可能なMMGの多点計測技術および解析手法を提案した。すなわち、本アレイセンサを用いて上腕二頭筋の変位MMGの二次元的マップを描き、また筋線維の走行方向を考慮した伝搬速度等を算出する方法を提案した。また、等尺性随意収縮や電気刺激による単収縮を行った際の筋線維の収縮伝搬様相について報告を行った。

研究成果の概要（英文）：

In this study, the displacement MMG (mechanomyogram) array transducer within 50x50 mm, composed of 25 photo-reflectors which could measure micro-distance, was developed. The multichannel measurement with 10 kHz sampling and analysis of displacement MMG were proposed. Using this array transducer, the spatial propagation map of displacement MMG of biceps brachii was drawn and the propagation velocity considering the direction of muscle fiber was calculated. The propagation aspect of muscular fiber contraction was reported during an isometric voluntary contraction and twitch contraction by electro-stimulation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2011年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2012年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	13,400,000	4,020,000	17,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用生体工学・生体材料学

キーワード：筋音図, MMG, 筋電位, EMG, 筋収縮, アレイセンサ, 医療・福祉

1. 研究開始当初の背景

骨格筋は多数の運動単位によって構成され、随意収縮では各々の運動単位が独立に興奮する。皮膚表面で導出される筋電位信号、すなわち表面筋電図 EMG (electromyogram) はこれら活動電位の時間的、空間的な加算波

形である。この筋全体を伝播する筋電位の2次元的な発生様式は、C. J. DeLuca や T. Masuda らが開発した表面筋電位の多点計測によって解明できるようになり、(1) 神経・筋接合部帯の同定、(2) 運動単位の動員様式、(3) 神経・筋疾患の臨床診断など、臨床医学

やスポーツ科学で広く利用されるようになった。しかし、表面筋電図は筋線維表面を伝播する活動電位を表面電極によって記録しているに過ぎず、骨格筋をシステム関数とみなせば、筋電位信号は筋を収縮させる入力側の情報である。一方、筋収縮によって筋内圧力が増加し、圧力波が側方へ伝播すると皮膚表面が変形する。これを加速度計やマイクロフォン、変位計等で測定したものが、筋音図MMG (mechanomyogram) であり、筋の機械的な収縮機能を直接反映している。しかし、筋音信号の同時多点計測や解析技術は未開発なため、未だに臨床医学やスポーツ科学等の分野では十分に活用されていない。

2. 研究の目的

本研究では、入力信号である筋電位信号と出力信号である筋音信号を多点計測し、これらの解析から、筋の二次元的な収縮様相を解明する。さらに本手法を応用して、神経・筋疾患や高齢者のリハビリテーション、スポーツ科学等の分野への適用について検討する。

まず、(1)筋音信号の多点計測および解析技術を確立する。研究代表者らはこれまで、本科学研究費補助金 (H19~20 年度基盤 (C) 19500388) の助成を受けて、発光ダイオードとフォトダイオードを組み合わせたフォトリフレクタを利用して光反射型変位MMGセンサを開発した。本研究では、この計測技術を応用し、フォトリフレクタを格子状に配列して変位MMGアレイセンサを製作し、MMGの多点計測技術を確立する。また筋電位の多点解析法を参考にして、筋音の多点計測結果を解析し、筋音の伝搬する様子を二次元的に可視化する技術を開発する。

そして、(2)筋電位の多点計測・解析結果と比較することによって、神経・筋接合部帯の分布や運動単位の動員様式、筋線維の走行方向を考慮した筋収縮伝搬速度などを算出し、筋の二次元的な収縮様相を解明を試みる。

さらに、(3)本手法を応用して、神経・筋疾患に伴う運動神経の消失・再支配、高齢者や術後患者の廃用性筋萎縮やリハビリテーション効果の評価、スポーツにおける筋力トレーニング効果の評価への可能性を探る。

3. 研究の方法

(1)多点計測用変位MMGアレイセンサの開発

多点計測のための変位MMGアレイセンサに使用するトランスデューサには、光反射型のフォトリフレクタを用いる。フォトリフレクタは波長950nmの発光ダイオードとフォトトランジスタから構成される。今回使用するフォトリフレクタは、H19~20年度科学研究費補助金を受けて、研究代表者らが開発した“光反射型変位MMGセンサ”に使用したフォトリフレクタよりも、さらに小型・軽量で、出力は2

~3mmの範囲で距離に比例する。筋音図の変位変化は最大でも1mm程度であることを考えると、本リフレクタを筋音センサとして使用することは十分に可能である。

アレイセンサの構成はフォトリフレクタを等間隔に、 $n \times n$ 個、合計 n^2 個を格子状に並べ、センサを筒型の可塑板に取り付ける。センサは皮膚から数mm離し、皮膚表面の形状に沿わせて設置する。また筋線維の走行方向や測定部位に合わせた構成も製作する。

予備実験から、隣接するフォトリフレクタ同士の干渉、測定精度などの基礎特性には十分注意を払わなければならない。さらに、筋線維の走行方向が、筋の長軸方向に対してほぼ平行である上腕二頭筋を用い、徐々に力発揮させたときの各センサの筋音信号を測定する。また上腕二頭筋の支配神経を経皮的に電気刺激し、得られる筋音の単収縮波形の潜時から、神経・筋接合部帯の推定や筋音の伝播速度の算出を行うことによって、筋音センサとしての有効性を確認する。このように、センサの基礎特性およびヒトにおける計測の確認を行った後、 n 行 \times n 列の変位MMGアレイセンサを設計する。

(2)変位MMGの多点計測技術および解析手法の確立

一列に配置したフォトリフレクタ (ラインセンサ) を、運動点を中心に筋線維方向に両側に配置して予備実験を行ったところ、測定位置によって変位MMG (d-MMG) の単収縮波形が異なり、また波形が伝搬している様子がわかった。これらは筋の収縮に伴う信号、すなわちシステム関数としてみれば出力信号に相当する。

一方、研究分担者の吉田らは、既に「格子状多点誘導表面筋電図に対する三次元テンプレート適用運動単位同定法」を提案し、運動単位活動電位の伝搬の様子を明らかにしている。本法は筋電位信号の基本波形を基に、多点電極で得られた随意収縮時の筋電位信号波形をテンプレートマッチングさせて、運動単位の伝搬の様子を二次元的に表示するものである。本手法を多点計測された随意収縮時や電気刺激時の筋音信号波形に適用して、筋音信号の二次元的な伝搬様相を解析し、さらに伝搬の様子を可視化するための、変位MMG二次元解析手法を確立する。本法によって、それぞれの測定点において、変位MMGの伝搬を運動単位毎に求めることができると考えている。

(3)二次元システム関数的な筋収縮メカニズムの考察

骨格筋は、随意収縮時には筋電位信号が、電気刺激時には刺激電位が入力信号であり、筋音信号が出力信号であるシステム関数と考えられる。研究分担者によって得られた多点電極配置による筋電位の計測結果と、本アレイセンサによる変位筋音信号の結果を照合さ

せることによって、筋のそれぞれの位置での収縮の様子を同定することができる。そして神経・筋接合部帯の分布や運動単位の動員様式など、筋電位と筋音信号から見た筋の収縮様相を考察することが可能になると考える。

筋音信号の計測に(1)で製作したアレイセンサと(2)で開発した解析手法を用いるが、筋電位信号の解析には、研究分担者が開発した「格子状多点誘導表面筋電図に対する三次元テンプレート適用運動単位同定法」を用いる。一方、ヒト骨格筋の筋線維配列は半羽状・両羽状配列、多腹配列、鋸配列など多様である。従って、筋線維の走向を形態的に確認する必要があり、また内部の筋収縮の様子を確認するために、ソフトウェア型の超音波画像診断装置(Mizoue Project Japan, MSDB04)を用いる。

本研究では、まず複雑な筋線維配列を持つ大腿直筋の収縮様相を考察するために、超音波画像を用いて筋線維配列を確認した後、変位MMGアレイセンサを設置し、筋線維配列を考慮して必要なフォトリフレクタ(複数の測定点)を選択する。そして、随意収縮の場合、および大腿神経を経皮的に電気刺激して単収縮を誘発した場合の、それぞれの変位MMGを計測する。また多点計測用筋電計ユニットで測定・解析した運動単位別活動電位の伝搬の様子と比較して、筋電位と筋音信号から見た筋の収縮様相を明らかにする。

(4) 臨床診断やリハビリテーション、スポーツ科学への適用の可能性を探る

表面筋電位の多点計測法を用いた、廃用性筋萎縮症、筋ジストロフィ症に伴う運動神経の消失・再生、筋線維の脱神経支配・再支配の評価に関しては、数多くの研究報告がある。本研究では、開発した変位MMGおよび筋電位の多点計測技術・解析手法を用いて、理学療法やリハビリテーションを専門とする研究分担者の市橋を中心に、神経・筋疾患に伴う運動神経の消失や再支配、高齢者や術後患者の廃用性筋萎縮やリハビリテーション効果の評価、スポーツにおける筋力トレーニング効果の評価などへの適用の可能性について検討する。ヒトへの適用に当たっては、倫理委員会での承認、並びに被験者へのインフォームドコンセントを厳重に行って実施する。

(5) 本研究を遂行するための研究体制

研究代表者は、研究全般の計画と推進を図り、また研究分担者らと協力して臨床およびフィールド実験を実施する。研究分担者(北脇)は、変位MMGアレイセンサおよび計測システムの構築、実験データの採取と解析を担当する。また連携研究者(岡本)は筋収縮機能の神経生理学的考察を担当する。研究分担者(吉田)は、変位MMGの解析プログラムの開発、および運動学的考察を担当する。さらに研究分担者(市橋)は、本法による臨床診断、リ

ハビリテーション、スポーツ科学分野への適用の可能性について検討する。

4. 研究成果

(1) 変位MMGアレイセンサ

フォトリフレクタ(TCRT1000, VISHAY)を、フレキシブル基板上に10mm間隔で、5×5個配列したd-MMGアレイセンサを図1に示す。基板の周辺と中央には、フォトリフレクタを皮膚面から8mmの位置に保てるように、9本の銀柱が設置されている(将来はEMG電極とする)。

フォトリフレクタからの信号は、チャンネル毎にDC~142Hz(LPF, -6dB/oct)のフィルタを通した後、1列ごとにマルチプレクサで切り替えて、サンプリング周波数50kHzでPCに記録される。このため、一点の筋音信号に対する実質的なサンプリング周波数は10kHzとなる。

各リフレクタ間の漏洩光の影響を低減するために、図2に示すように、5個をセットとして順に点灯・サンプリングするようにした。なお、フォトリフレクタには昼光阻止フィルタが内蔵されている。

(2) 上腕二頭筋での単収縮およびランプ波形の測定

実験の同意を得た健康な男性被験者(20歳代)に対し、図3に示すように、利き腕となる右上腕二頭筋の皮膚上にアレイセンサを湾曲させて設置し、d-MMGの単収縮波形およびランプ波形を記録した。肘関節は60度で固定し、電気刺激は同筋の運動点に対し、3msの負極性パルス、繰り返し周波数は1Hz、刺激強度は1.7mAとした。5秒間測定されたd-MMG波形から、少なくとも3個の単収縮波形の平均波形を求めた。

なお、実験は岡山大学大学院医歯薬学総合研究科倫理委員会の承認を得て行われた。

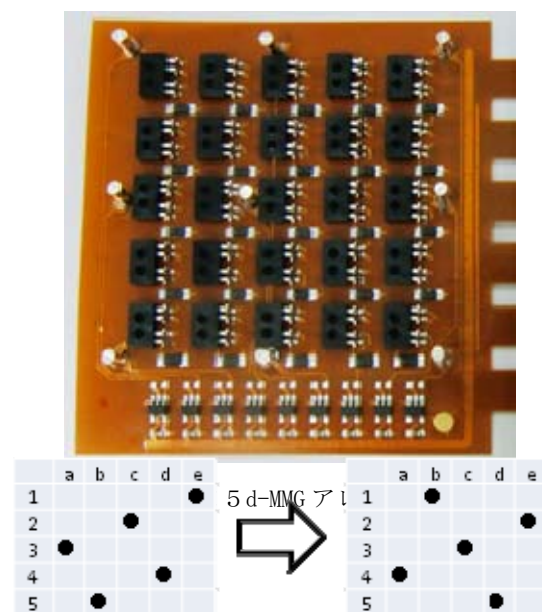


図2 アレイセンサの点灯・サンプリング制御

(3) 実験結果および考察

予め、アレイセンサに配置した25個のリフレクタの電圧-距離校正曲線を求めておく。そして測定された電圧を1-8mmの距離に変換した。図4は計測された5×5のd-MMG単収縮波形(平均波形)である。横軸は経過時間(0~1秒。t=0は電気刺激開始時)、縦軸は皮膚表面からセンサまでの距離である。刺激開始後、100ms程度で単収縮波形の最大値が現れ、約200msで波形が収束していることがわかる。

図5は電気刺激開始後、25, 50, 75, 100, 125, 150 msの単収縮波形を三次元的に描画したものである。電気刺激を行った運動点に近い内側-近位点から収縮が始まり、徐々に遠位、外側へと収縮が伝搬していく様子がわかる。同様に、等尺性随意収縮において弱収縮~中~強収縮を行った時のd-MMGを、三次元的に描画することができた。

図6はランプ収縮波形である。数秒かけて最大収縮になるまでのうち、2~4秒間のd-MMG波形を、三次元的に描画したものである。内側・近位の位置から筋収縮が起こり、最終的に中央部が最も大きく収縮している様子がわかる。これはd-MMGのDC成分(基線成分)のみであるが、そのAC成分(DC成分の変動分)についても、筋収縮に関する多くの情報を含んでいるので、今後、詳細に解析する必要がある。

このようなアレイセンサが開発できたことによって、筋収縮の伝搬の様子がより詳細に検討できるようになった。

(4) まとめ

本研究では、小型のフォトリフレクタを利用した5×5の変位筋音アレイセンサを開発し、皮膚表面の変位筋音図を多点で同時計測することに成功した。そして筋音波形の伝搬の様子を可視的に表示することができた。また超音波エコーによる皮下の構造変化(筋の収縮の様子)の測定結果と合わせて、より詳細に筋収縮過程を検討できるようになった。今後は臨床診断やリハビリテーション、スポーツ科学分野への適用を図るべく、予備実験を通して可能性を探っていく。

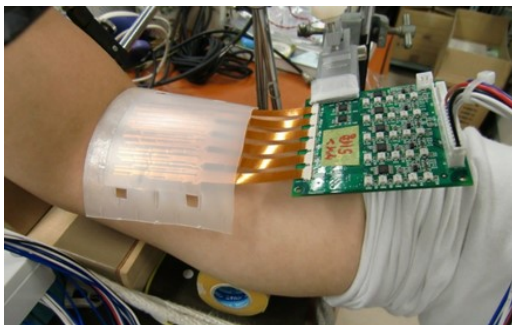


図3 d-MMGアレイセンサの設置

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

①岡久雄, 誘発収縮時の筋音図特性, バイオメカニズム学会誌, 査読無, Vol. 37, No. 1, 2013, 26-31

②岡久雄, 北脇知己, 岡本基, 市橋則明, 吉田正樹, 変位筋音図の計測と小型変位MMGセンサの開発, バイオメカニズム21, 査読有, 2012, 219-230

③小西有人, 服部託夢, 中村英夫, 市橋則明, 岡久雄, 吉田正樹, 運動時の筋の変動に対応可能な筋電信号計測法の開発 ~筋線維走行方向の推定~, 生体医工学, 査読有, Vol. 50, 2012, 675-680

④M. Yoshida, The muscle fiber direction estimation method by the pseudo-unipolar record, 10th International Workshop on Biomedical Engineering, 査読有, 2011, 1-4

〔学会発表〕(計20件)

①H. Oka, Y. Konishi, T. Kitawaki, N. Ichihashi, M. Yoshida, Development of Multichannel Array Transducer of Displacement Mechanical-Myogram, The 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC' 13), 2013/7/3-7, Osaka (Japan)

②北脇知己, 小西有人, 岡久雄, 服部託夢, 市橋則明, 吉田正樹, フォトリフレクタを用いた5×5変位筋音アレイセンサの開発, 第33回バイオメカニズム学術講演会, 2012/12/15-16, 東北大学(仙台)

③H. Oka, Y. Konishi, T. Kitawaki, M. Okamoto, N. Ichihashi, M. Yoshida, DEVELOPMENT OF A 5×5 DISPLACEMENT-MMG ARRAY TRANSDUCER, XIX Biennial Conference of the International Society of Electrophysiology and Kinesiology (ISEK 2012), 2012/7/19-22, Brisbane (Australia)

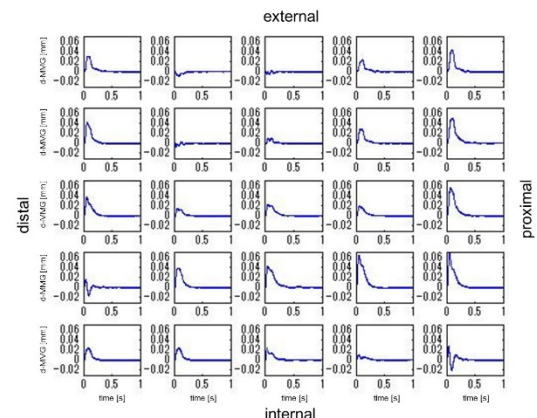


図4 5×5 d-MMGアレイセンサで測定した25点の単収縮波形

④小西有人, 藤長武士, 北脇知己, 岡本基, 市橋則明, 吉田正樹, 岡久雄, MMG-EMGハイブリッドセンサの開発, 第 13 回日本電気生理運動学会 (JSEK), 2012/3/4, 大阪電気通信大学 (大阪)

⑤小西有人, 岡久雄, 服部託夢, 中村英夫, 吉田正樹, 市橋則明, 筋線維走行方向の推定に用いる信号のパラメータの検討, 第 34 回日本生体医工学会中国四国支部大会, 2011/10/22, 徳島大学 (徳島)

⑥ M. Yoshida, Y. Konishi, H. Nakamura, T. Hattori, H. Oka, N. Ichihashi, The muscle fiber direction estimation method by the pseudo-unipolar record, 10th International Workshop on Biomedical Engineering, 2011/10/5-7, Kos Island

(Greece)

⑦H. Oka, Y. Konishi, T. Hattori, T. Kitawaki, M. Okamoto, N. Ichihashi, M. Yoshida, Measurement of two dimensional propagation of displacement MMG, 計測自動制御学会第 26 回生体・生理工学シンポジウム, 2011/9/20-22, 立命館大学 (滋賀)

⑧ Y. Konishi, T. Hattori, H. Nakamura, M. Yoshida, H. Oka, N. Ichihashi, Study for availability of estimation procedure of muscle fiber direction, 計測自動制御学会第 26 回生体・生理工学シンポジウム, 2011/9/20-22, 立命館大学 (滋賀)

⑨H. Oka, T. Hattori, T. Kitawaki, M. Okamoto, N. Ichihashi, M. Yoshida, Two Dimensional Propagation of Displacement

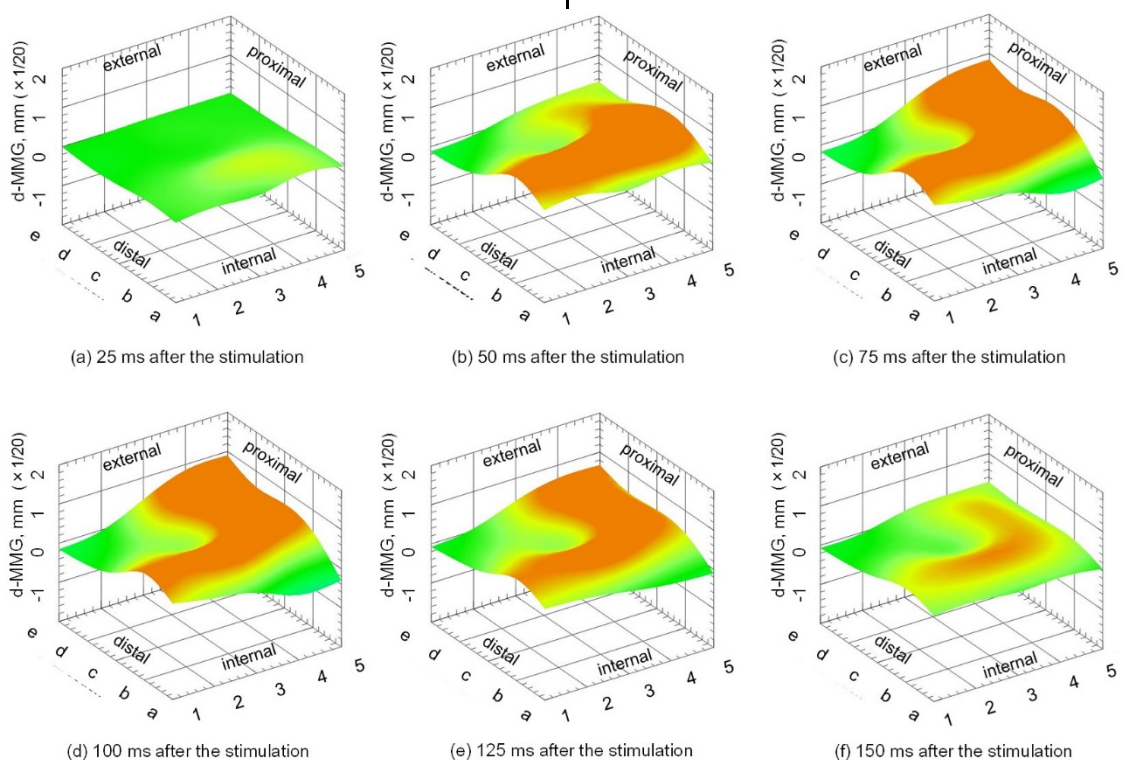


図 5 電気刺激開始後, 25, 50, 75, 100, 125, 150 ms の単収縮波形

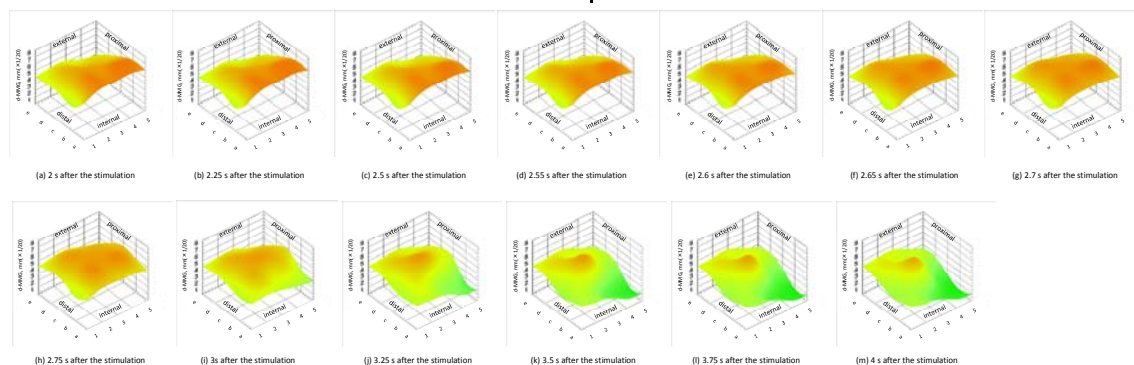


図 6 ランプ収縮開始後, 2 ~ 4 秒後の単収縮波形

Mechanomyographic Signal, The 5th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering, 2011/9/13-19, Budapest (Hungary)

⑩岡久雄, 小西有人, 北脇知己, 岡本基, 市橋則明, 吉田正樹, フォトリフレクタを用いた変位筋音センサの開発とその応用, 第22回バイオメカニズム・シンポジウム, 2011/7/26-27, 阿蘇ファームランド (熊本)

⑪岡久雄, 北脇知己, 岡本基, 市橋則明, 吉田正樹, 骨格筋収縮における筋音信号の伝搬, 第50回日本生体医工学会大会, 2011/4/29-5/1, 東京電機大学 (東京)

⑫岡久雄, 服部託夢, 北脇知己, 岡本基, 市橋則明, 吉田正樹, 変位筋音図の2次元計測と波形の伝搬様相, 第12回日本電気生理運動学会, 2011/3/11, 東京工業大学 (横浜)

⑬小西有人, 服部託夢, 吉田正樹, 岡久雄, 市橋則明, 仮想単極誘導法を用いた差動信号の時間遅れによる筋線維方向推定法, 第12回日本電気生理運動学会, 2011/3/11, 東京工業大学 (横浜)

⑭岡久雄, 服部託夢, 北脇知己, 岡本基, 市橋則明, 吉田正樹, 変位筋音図の二次元伝搬特性の計測, 電子情報通信学会MEとバイオサイバネティックス研究会, 2011/3/7-9, 玉川大学 (町田)

⑮岡久雄, 北脇知己, 岡本基, 市橋則明, 吉田正樹, 骨格筋収縮における変位筋音波形の伝搬計測, 第31回バイオメカニズム学術講演会, 2010/11/6-7, 静岡大学 (浜松)

⑯石井圭, 北脇知己, 岡久雄, 変位筋音図による骨格筋の疲労特性評価, 第33回生体医工学会中国四国支部大会, 2010/9/24, 岡山大学 (岡山)

⑰ Y. Konishi, A. Yamaguchi, T. Hattori, H. Nakamura, M. Yoshida, Estimation of muscle fiber direction by matrix electrode, The XVIII Congress of The International Society of Electrophysiology and Kinesiology, 2010/6/16-19, Aalborg (Denmark)

⑱ H. Oka, K. Ishii, CONTRIBUTION OF MUSCLE FIBER COMPOSITION TO FFC-MMG IN MUSCLE TRAINING/FATIGUE, The XVIII Congress of The International Society of Electrophysiology and Kinesiology, 2010/6/16-19, Aalborg (Denmark)

⑲ S. Watanabe, T. Kitawaki, H. Oka, TETANIC PROGRESSION OF A MECHANOMYOGRAM OBSERVED USING THE SIGMOID FUNCTION, The XVIII Congress of The International Society of Electrophysiology and Kinesiology, 2010/6/16-19, Aalborg (Denmark)

⑳ H. Oka, T. Kitawaki, S. Watanabe, ESTIMATION OF STARTING FREQUENCY IN

TETANIC PROGRESSION FROM TWITCH CONTRACTION, The XVIII Congress of The International Society of Electrophysiology and Kinesiology, 2010/6/16-19, Aalborg (Denmark)

[その他]

ホームページ等

「筋音信号による筋の機能の評価」

http://www.okayama-u.ac.jp/user/fhs/kyouin_meibo/dm/DM/oka/research_03.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡久雄 (OKA HISAO)

岡山大学・大学医保健学研究科・教授
研究者番号: 80116441

(2) 研究分担者

吉田正樹 (YOSHIDA MASAKI)

大阪電気通信大学・医療福祉工学部・教授
研究者番号: 30174949

市橋則明 (ICHIHASHI NORIAKI)

京都大学・医学(系)研究科(研究院)・教授
研究者番号: 50203104

北脇知己 (KITAWAKI TOMOKI)

岡山大学・大学院保健学研究科・准教授
研究者番号: 40362959

服部託夢 (HATTORI TAKUMU)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教
研究者番号: 80549220

(3) 連携研究者

岡本基 (OKAMOTO MOTOI)

岡山大学・大学医保健学研究科・教授
研究者番号: 80144757

小西有人 (KONISHI YUTO)

岡山大学・大学医保健学研究科・技術職員
研究者番号: 70613553