

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）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：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23650263

研究課題名（和文）筋音と筋電位を同時測定する筋収縮ハイブリッドセンサの開発

研究課題名（英文）Development of Hybrid Transducer for Simultaneous measurement of Mechanomyogram and Electromyogram during Muscle Contraction

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、筋を収縮させる信号である筋電図（EMG）と、筋収縮した結果生じる筋の振動である筋音図（MMG）を同時測定するために、身体の不随意的動きに影響されない、光反射型変位 MMG センサに、EMG 測定電極を付加した筋収縮ハイブリッドセンサを開発し、動作中でも測定できるワイヤレス型システムとし、スクワット動作やエルゴメータ運動等に適用して、MMG と EMG から求められる筋収縮機能評価指標について検討した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, to measure an electromyogram (EMG) which is an input signal to muscles that will contract, and a mechanomyogram (MMG) which is a resulting output vibration from contraction simultaneously, the hybrid transducer of muscle contraction was developed, which was a displacement-MMG transducer using a photo-reflector with two EMG electrodes. It included a wireless transmission module and was free from the errors resulting from body movements or artifacts. The evaluation index of muscle contraction obtained from MMG/EMG ratio was examined applying it to the simultaneous measurement of MMG and EMG during a squat movement and an ergometer exercise etc.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,300,000	390,000	1,690,000

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，医療・福祉

1. 研究開始当初の背景

わが国の高齢化率，また医療費の抑制や福祉・介護の現状では，高齢者が安全で元気に社会生活を営む環境整備は急務である．転倒などで寝たきりにならぬよう，高齢者の健康，特に筋力の確保に着目する必要がある．現在，筋トレなどの健康増進やリハビリテーションプログラムが実施されているが，プログラム

の成果，すなわち筋収縮機能の向上を定性・定量的に評価する指標は十分に確立されていない．また高齢者のスポーツへの関心も高いが，トレーニング効果の評価においても同様である．

一般に，筋収縮機能を簡便に測定する方法は，最大筋力測定の外に，筋電図（EMG：ElectroMyoGram）が用いられ，筋ジストロフ

イ症や多発性筋炎などの臨床診断だけでなく、肩凝りや筋疲労、スポーツトレーニング効果の評価などに利用されている。一方、筋が収縮すると筋内圧力が上昇し、筋音図（MMG：MechanoMyoGram）と呼ばれる、骨格筋収縮に起因する微細な振動が、皮膚表面で記録できる。市販されているMMGセンサは圧電型加速度計で、被験筋を強固に固定、静止下で測定しなければならない。

2. 研究の目的

研究代表者らは科研費補助金（H19～20 基盤(C)19500388）を受けて、不随意的動き（アーチファクト）に影響を受けないで測定が可能な、光反射型フォトリフレクタ（発光ダイオードとフォトダイオード）MMGセンサを新規開発し、運動中でもMMG測定を可能とした（渡辺ら：バイオメカニズム 19, 23～33）。しかし、センサ自身は有線であったので、フィールドでの使用を考えるとワイヤレス化が求められていた。

一方、骨格筋をシステム関数と考えると、EMGは筋を収縮させる入力信号、MMGは筋自身の収縮機能を反映する出力信号と考えられる。本来、筋収縮機能を評価するためには、入力であるEMGと出力であるMMGを同時に計測・評価しなければならない。

本研究の目的は、(1)光反射型変位MMGセンサにEMG電極を付加した一体型の筋収縮ハイブリッドセンサを開発する、(2)運動中でも測定できるよう、一体型センサをワイヤレス化したシステムを構築する、(3)MMGとEMGの同時計測により得られる電気機械結合効率に基づく筋収縮機能評価指標を提案することである。

3. 研究の方法

(1)筋収縮ハイブリッドセンサの開発

MMG/EMG一体型の筋収縮ハイブリッドセンサの構造は、フォトリフレクタと表面EMG電極から構成される。こうしてMMGとEMGの同時計測が可能となり、測定対象筋の皮膚表面上に貼り付けて使用する。フォトリフレクタを用いた変位MMGセンサの開発は、H19～20年度基盤研究C（19500388）の支援を得て、ほぼ基本構想が完了しており、本研究ではどのようにしてEMG電極を配置して電氣的ノイズを避けながら計測するかを検討する。さらに簡便にセンサを貼り付け、また繰り返し使用できるよう、EMGの電極材料等の選定を行う。

(2)ワイヤレスセンサシステムの構築

福祉・介護やスポーツ科学など、様々なフィールドや動作中でも簡便に測定できるよう、MMGとEMG信号をワイヤレスで送信するシステムを構築する。通信方式は市販の無線方式を採用することによって開発期間を短縮し、

通常のノートパソコンでも簡便にシステム構成できるようにする。

(3)電気機械結合効率に基づく筋収縮機能評価指標の提案

同時計測されたMMGとEMG信号から、電気機械結合効率MMG/EMGを算出すると、筋収縮機能の違いを明らかにすることができる。この結合効率に基づいた筋収縮機能評価指数を新たに提案する。さらにMMG/EMGの振幅比だけでなく、周波数成分比、特にMPF（Mean Power Frequency）比なども加味することによって、よりトータルに筋収縮のパフォーマンスを評価できると考える。

(4)臨床・福祉・スポーツ科学分野などへ応用の可能性を検討

高齢者が安全で元気に社会生活を営むためにも、転倒などで寝たきりにならぬよう、筋トレなどの健康増進プログラムやリハビリテーションプログラムは大変重要である。若年者と高齢者では、速筋線維と遅筋線維の動員様式が異なることは既に報告されている。本評価指標は廃用性筋萎縮における筋収縮機能評価が可能であり、また本研究をさらに発展させて、筋線維タイプ別（速筋と遅筋）の収縮機能評価が可能になれば、福祉・介護領域における貢献は多大であると考えられるので、この領域への適用の可能性を検討する。

(5)本研究を遂行するための研究体制

研究代表者は、これまで局所筋機能測定のためのプローブ開発や各種生体計測装置の開発を行ってきた。本研究ではこれまでの研究成果およびMMGの予備実験に基づき、研究全般の計画と推進を図り、被験者を使った実験を実施する。研究分担者（北脇）は医用生体工学を専門とし、研究代表者と共同で研究を行ってきた。本研究では、研究協力者と共に、変位MMG/EMG一体型センサの開発およびワイヤレスシステムの構築、さらに実験データの採取を担当する。研究分担者（岡本）は神経生理学を専門とする医師であり、これまで研究代表者と共同研究を進めてきた。本研究では神経生理学的観点から得られた実験結果について検討し、筋の収縮機能を考察する。

4. 研究成果

(1)MMG/EMGハイブリッドセンサ

①ハイブリッドセンサの構造

変位計測に用いたのはフォトリフレクタ（TCRT1010, Vishay Semiconductors）である。発光部は950nm、受光部はフォトトランジスタで、サイズは7mmL×4mmW×2.5mmHである。本来は1mmにピーク動作距離を持つON-OFFセンサであるが、図1に示すような距離-出力特性を持つ。これを3次多項式で近似して変換に用いた。フォトトランジスタの暗電流と増幅回路ノイズのため、距離分解能

は約 $10\mu\text{m}$, ダイナミックレンジは $1\sim 8\text{mm}$ である. リフレクタには Daylight blocking filter が内蔵されており, 予備実験を行ったところ遮光しなくても使用することが可能であることを確認した (ダイナミックレンジの範囲内では, 暗所での測定結果と 0.9994 の相関係数).

図 2 に MMG/EMG ハイブリッドセンサの構造と使用法を示す. センサ部は $45\text{mmL}\times 16\text{mmW}\times 12\text{mmH}$, 重さ約 2.5g である. EMG 電極は $\phi 8\text{mm}$ の Ag-AgCl, 電極ペーストと両面テープで皮膚に貼り, 双極誘導 (Ref 電極は別途貼付) とした. センサは対象とする筋腹上に両面テープで接着するが, 反射光の効率を上げるために $\phi 7\text{mm}$ の白色光沢シールを皮膚上に貼付した. センサ出力 (MMG と EMG: ケーブル途中に EMG プリアンプを挿入) は送信ロガーユニット (OE-WES ユニット, 追坂電子機器) に接続された. 受信ユニットはパソコンに接続され, 2.4GHz 帯でデータ送信される.

②ハイブリッドセンサの基礎特性

ハイブリッドセンサは皮膚上に貼付して使用するが, 外乱振動に対する MMG 出力の影響について検討した. センサを加振器上に両面テープで貼付し, 振動周波数を $\text{DC}\sim 200\text{Hz}$ まで変化させたときの出力特性を図 3 に示す. 100Hz 以下では十分な周波数特性が得られることがわかった.

(2)ハイブリッドセンサによるMMG/EMG計測

実験に同意を得た 20 代男性 2 名において,

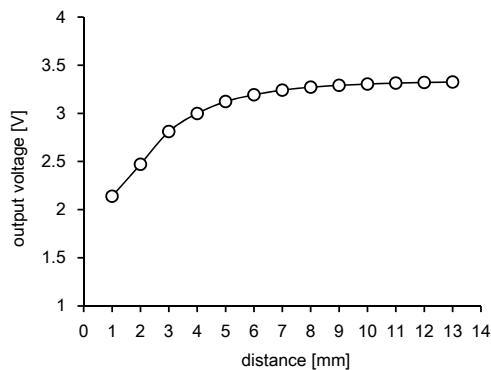


図 1 フォトリフレクタの距離-出力特性

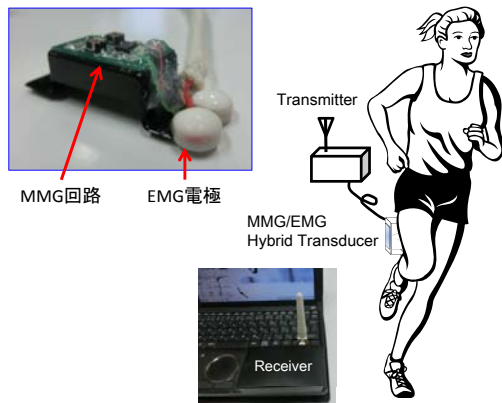


図 2 MMG/EMG ハイブリッドセンサ

右脚 (利き足) に, 本センサを 4 個貼り付け, 両手は胸の前で組んだままで, スクワット動作 (膝関節屈曲が浅い (部分的) 場合と深い場合) を行った. エルゴメータ (Wattbike) 運動 (遅い速度 ($60\text{rpm}30\text{W}$ と $60\text{rpm}80\text{W}$), 速い速度 ($90\text{rpm}30\text{W}$), さらに他動的にペダルを回した場合の実験を行った. センサはいずれの場合も大腿直筋, 外側広筋, ハムストリングス, 腓腹筋 (外) に貼付した. また関節角度を算出するために, 右肩峰, 右大転子, 右膝蓋骨外, 右足首外踝, 右第 5 中足骨頭に反射マーカーを貼り付け, モーションキャプチャーで撮影して, 股関節, 膝関節, 足関節角度を求めた.

一般に, 変位 MMG には筋の側方膨大に伴う大きな皮膚表面の変形 (DC 成分) と, 大きな変形に重畳する微細な振動 (AC 成分) が含まれる. 今回は変位 MMG の DC 成分に着目した. また EMG から積分筋電図を算出した. 実験にあたって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.

①スクワット動作

図 4(a) にスクワット動作の実験姿勢を示す. 部分的スクワットでは膝関節屈曲角度 (伸展 0 度) が約 75 度, 深いスクワットで約 100 度である. 図 5 に被験者 A の (a) 部分的スクワット, (b) 深いスクワットの実験結果 (膝関節角度, 大腿直筋の変位 MMG および積分 EMG) を示す. 膝関節が屈曲を始めると大腿直筋 EMG が増加し始め, 最大屈曲で EMG も最大値となるが, 大腿直筋の変位 MMG はやや遅れて増加 (筋は膨らむ) しはじめ, 膝関

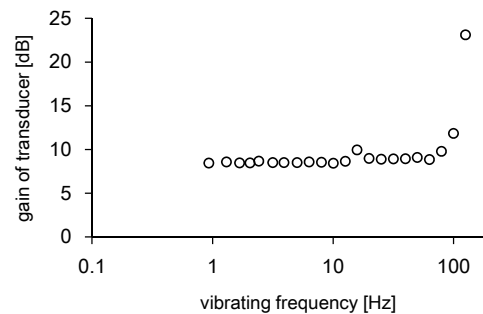
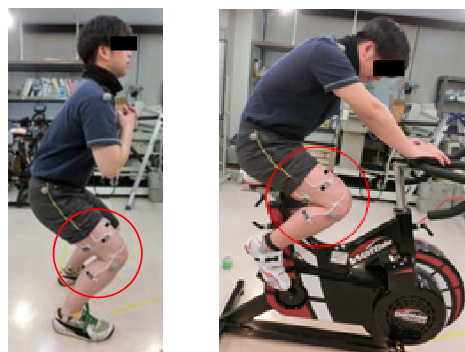


図 3 ハイブリッドセンサの周波数特性



(a)スクワット動作 (b)エルゴメータ運動

図 4 スクワット動作とエルゴメータ運動

節の伸展が始まると EMG と共に MMG は減少し、立位姿勢に戻る直前にもう一度 MMG は増加、減少する。これに呼応して EMG もわずかに増加、減少する。この傾向は深いスクワットでも同様である。しかし膝関節屈曲角度が大きくなる深いスクワットでは、EMG の振幅が約 2 倍になり、それに呼応して MMG の振幅も 2 倍弱になっている。

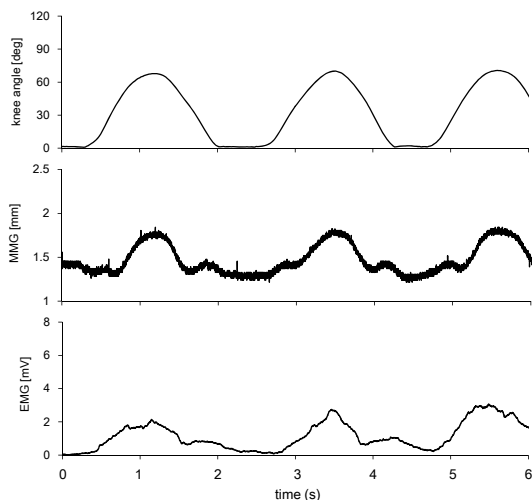
大腿直筋は大腿四頭筋の中で最も主力的な筋かつ唯一の二関節筋で、膝関節の伸展時（同時に股関節の屈曲）に作用する。従って膝関節屈曲相では受動的に筋断面が変化して EMG は発火しないが、今回は股関節の屈曲もかなり大きく、膝関節屈曲相で EMG が発火（エキセントリック収縮）したと考えられ、伸展相では本来の膝関節の伸展を行っていると考えられる。立位直前に EMG, MMG 共に変化するのは最終的な股関節伸展（立位姿勢）と関係しているのであろう。大腿四頭筋である外側広筋も膝関節伸展時に作用し、股関節の安定を保つ働きがあるが、同様な結果を得

た。

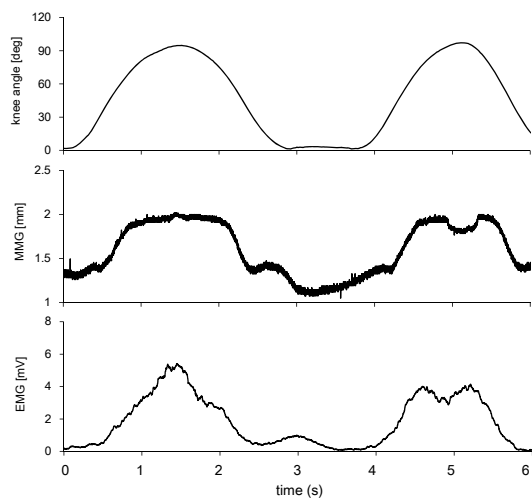
②エルゴメータ運動

図 4(b) にエルゴメータ運動時の実験姿勢を示す。使用したエルゴメータはトレーニング用インドアバイクなので、足底部は専用靴でペダルに完全に固定される。図 6 は左脚をペダルから離し、他動的にクランクを回した場合（60rpm, 30W）の被験者 A の右脚腓腹筋の実験結果である。同図より、右脚の変位 MMG は膝関節屈曲角度に同期した波形が得られているが、積分 EMG はほとんど見られない。すなわち、MMG は筋断面の形状変化を測定していることから、腓腹筋が他動的に伸縮を繰り返しているだけであることがわかる。

図 7 は同様に被験者 A の右脚腓腹筋の実験結果であり、(a) 遅くて軽いペダル動作：60rpm, 30W, (b) 遅くて重いペダル動作：60rpm, 80W, (c) 速くて軽いペダル動作：90rpm, 30W である。同図より、膝関節屈曲相では、腓腹筋 EMG があまり発火せず、膝関節が伸展し始めると EMG が増加し始め、膝関節の屈曲相になると減少することがわかる。負荷を大きくした場合でも、サイクル数を上昇させた場合でも同様であった。MMG は膝関節最大屈曲で最大値を示すものの、膝関節が滑らかに伸展しているにもかかわらず、もう一度 MMG が増加、減少する箇所がみられる。これは負荷やサイクル数を変化させるとさらに顕著になった。下腿三頭筋は足関節屈筋でペダル押しに作用し、その一つである腓腹筋（速筋）は足関節の底屈と膝関節の屈曲に関与し、すなわち足首を伸ばし膝の屈曲を補助する。しかし、今回の現象に同期した腓腹筋 EMG の発火は見られない。この点については今後さらに検討したい。また、負荷を増加、サイクル数を上昇させると EMG は増加する傾向にあるが、MMG 振幅はほとんど増加しなかった。



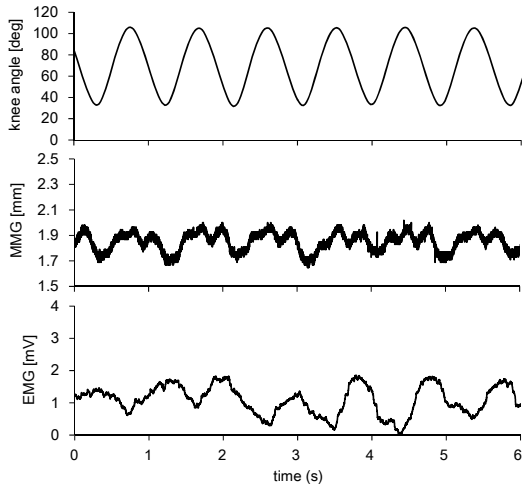
(a) 部分的スクワット動作（大腿直筋）



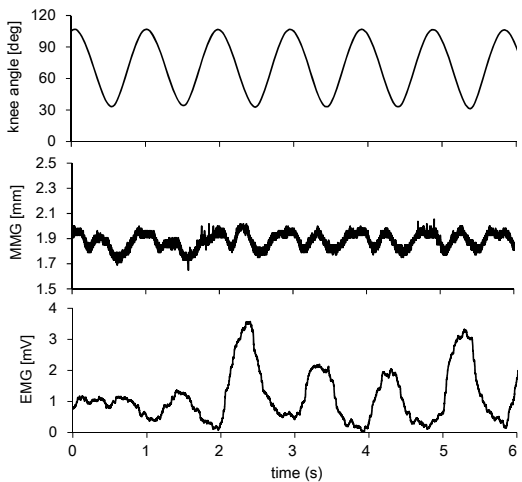
(b) 深いスクワット動作（大腿直筋）

図 5 スクワット動作時の MMG と IEMG

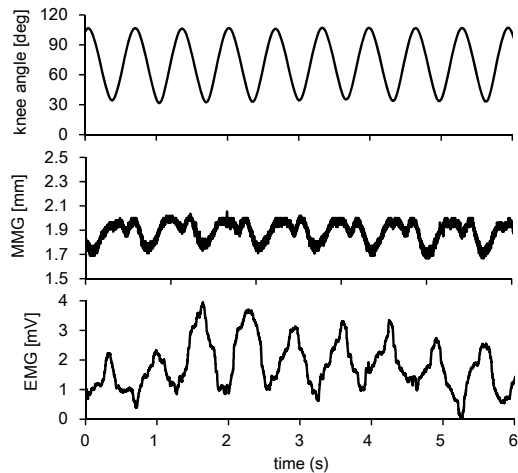
一方、膝関節最大屈曲のとき大腿直筋 MMG は最大値を示し、伸展相に入ると EMG が大きく増加した。これはペダル一回転中、クランク角が 90 度のとき有効な踏力の最大値となるが、実際の運動では 10~20 度遅れて実際



(a) 遅くて軽いペダル動作 (60rpm, 30W) 80W



(b) 遅くて重いペダル動作 (60rpm, 80W)



(c) 速くて軽いペダル動作 (90rpm, 30W)

図7 ペダル動作時の MMG と EMG

の踏力が発揮され、その後必要以上の踏力（無効な踏力）を発生しつつ、270 度前後でそれらは有効な引き上げ力に変わっていく

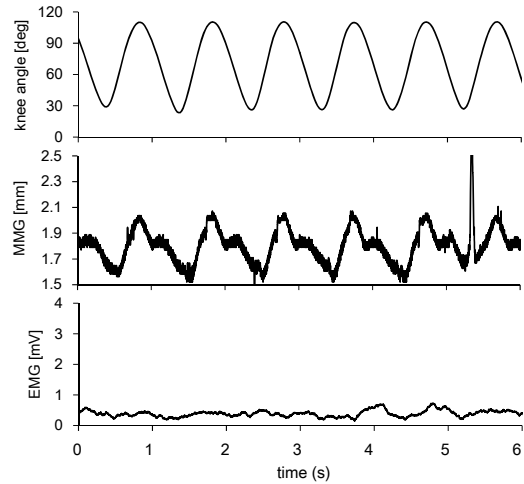


図6 他動的にペダルを回転させた場合

という報告と一致した。

(3)まとめ

本研究ではフォトリフレクタを用いたワイヤレス型 MMG/EMG ハイブリッドセンサを新たに開発し、その基礎特性を述べると共に、スクワット動作、エルゴメータ運動を行ったときの MMG と EMG の同時計測を行った。従来、運動下では測定できなかった MMG が測定でき、しかも同時計測された EMG との関係を考察することが可能になった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計2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, pp. 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, pp. 219-230.

〔学会発表〕 (計6件)

①岡久雄，小西有人，北脇知己，岡本基：ワイヤレス型MMG/EMGハイブリッドセンサの開発，電子情報通信学会・MEとバイオサイバネティクス研究会，2013/3/13-15，玉川大学（町田）。

② H. Oka, Y. Konishi, T. Hattori, T. Kitawaki, M. Okamoto, N. Ichihashi, M. Yoshida: Development of Displacement-MMG and EMG Hybrid Transducer, The 27th Symposium on Biological and Physiological Engineering (BPES2012), 2012/9/19-21, 北海道大学（札幌）。

③H. Oka, Y. Konishi, T. Kitawaki, M. Okamoto, N. Ichihashi, M. Yoshida: DEVELOPMENT OF A HYBRID TRANSDUCER OF DISPLACEMENT-MMG WITH

EMG ELECTRODES, XIXth Congress of the International Society for Electrophysiology and Kinesiology (ISEK 2012), 2012/7/19-21, Brisbane (Australia).

④H.Oka, Y.Konishi, T.Kitawaki, M.Okamoto, N.Ichihashi, M.Yoshida: Simultaneous measurement of displacement-MMG and EMG, 第51回日本生体医工学会大会, 2012/5/10-12, 福岡国際会議場 (福岡) .

⑤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, 2012/3/4, 大阪電気通信大学 (大阪)

⑥岡久雄, 北脇知己, 岡本基, 小西有人, 服部託夢, 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, 2011/7/27, 阿蘇ファームランド (熊本) .

[その他]

ホームページ等

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

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

北脇 知己 (KITAWAKI TOMOKI)

岡山大学・大学医保健学研究科・准教授

研究者番号: 40362959

(3) 研究協力者

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