

## 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 5 月 20 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560422

研究課題名（和文）筋活動解析のための光・電気・振動一体型センサの開発

研究課題名（英文） A development of optical・electrical・vibrational integrated sensor for analysis of muscular activity

研究代表者

木本 晃（KIMOTO AKIRA）

佐賀大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：80295021

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、生活の質(QOL)の向上を目指し、筋活動モニタリングのための光・電気・振動多点同時測定システムを確立することである。そのために、光・電気・振動一体型センサを提案した。生体の同一空間内において、光・電気及び振動特性の同時測定を可能とするものである。本研究課題において、提案センサを確立し、実際に、筋活動計測を試み、筋活動解析及びモニタリングの可能性を示唆した。また、今後の様々な応用計測のための基礎特性が得られた。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this research is to improve the quality of life and is to develop simultaneous measurement system of optical, electrical and vibrational properties at multi-positions for monitoring of muscular activity. An optical, electrical and vibrational integrated sensor was proposed. Simultaneous measurement of optical, electrical and vibrational properties at same position of the living body is possible by the proposed sensor. In this study, the proposed sensor was developed. The measurement of the muscular activity was actually tried. As a result, it was suggested that the analysis and monitoring of the muscular activity are possible by the proposed sensor. In addition, the fundamental properties for several applications were obtained.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：筋活動、積層型センサ、筋電、筋音、NIRS

## 1. 研究開始当初の背景

高度福祉社会において、生活の質(QOL)の向上を図ることが重要な課題の一つであり、医用工学技術の更なる研究開発が必要とされる。現在、高度QOLを目的とした様々なセンサ及びセンシングシステムが盛んに研究

開発されている。その一環として、筋活動の把握・解析やモニタリング技術の開発が要望されており、近赤外センサによる筋酸素化状態測定(NIRS)や電位測定用センサによる筋電図(EMG)や振動センサによる筋音図(MMG)などの研究が盛んに行われている。これらの

システムは、それぞれのセンサの特徴を生かし、センサにより得られた情報を用いて筋活動解析やモニタリングを行うものである。さらに、それぞれのセンサにより得られる情報を複合的に利用して、診断能力を向上させようとする研究開発も行われつつある。その場合に、複数の異なるセンサを生体の複数の位置に設置する必要があるゆえ、生体に制約を与える部分が増えることや同一部位での測定は困難である。このような状況を踏まえ、本研究の目的は、生体内の同一空間内の光・電気及び振動特性を同時に測定する単一センサを開発することで、筋活動解析及びモニタリング能力の向上を図ることである。すなわち、提案センサにより、近赤外センサ、電位センサ及び振動センサにより同一部位での3種類の情報を同時に検出することができるゆえ、より詳細な筋活動解析及びモニタリングが可能となる。これまでに、生体電気インピーダンスイメージング手法を確立し、一定の成果を得た。それをもとに、圧電素子をもとにした電気及び超音波統合型センサを提案し、生体モデルによる実験を試み、本手法の有用性を示した。さらに、それらのセンサを複数配置した電気及び超音波特性イメージングシステムを確立し、有用性を示した。次に、光・電気統合型センサによる2種類のパラメータ検出を試み、提案センサの有用性を示した。

本研究では、これらの研究成果をもとに、光・電気・振動一体型センサを提案する。本センサは、近赤外発光あるいは受光素子の表面に透明導電性電極を有する圧電(Polyvinylidene fluoride :PVDF)フィルムを塗布した構造である。本センサにおいて、PVDFフィルム及び透明電極が光を透過させるゆえ、発光及び受光素子により、対象の光特性を測定する。同時に、それぞれの表面に塗布された透明電極により電位を、PVDFフィルムにより振動を測定しようとするものである。よって、提案センサにより、一般に、別々のセンサで測定される測定対象の近赤外・電位及び振動特性の測定を同一のセンサでかつ同時に測定することが可能である。また、それらの測定値から同一部位における筋酸素化状態や筋電図及び筋音図を同時に得ることが可能となる。さらに、複数の提案センサを用いることで同一空間内での3種類のイメージングを同時に行うことが可能であるゆえ、詳細な筋活動やモニタリングをしようとするものである。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、生活の質(QOL)の向上を目指し、筋活動モニタリングのための光・電気・振動一体型センサを確立することである。提案センサは、生体の同一空間内において、

光・電気及び振動特性の同時測定を可能とするものであり、筋活動診断の能力向上を図ろうとするものである。本研究課題では、提案センサを確立し、実際に、筋活動計測を試み、本手法の有用性を評価するとともに提案センサを用いた応用生体計測について検討する。

## 3. 研究の方法

図1に提案する一体型センサとしての積層型センサの概略図を示す。また、図2に提案センサの写真を示す。黒色のアクリル角柱(15×15×10 mm<sup>3</sup>)の中心にフォトダイオード(PD、ピーク波長 850 nm)、または、ピーク波長 750 nm と 850 nm のマルチ発光ダイオード(LED)と 810 nm のLEDをそれぞれ埋め込んだ。アクリル柱の表面には、透明電極を有するPVDFフィルムとステンレスフィルムを積層化したものを貼り付けた。また、測定の際に、周囲からの光を遮断するためにアクリル角柱の周囲を厚さ 0.5 mm の黒色のシリコンゴムで覆った。さらに、それぞれの素子と計測器との接続は、極細同軸ケーブルを用いて接続することで、素子への負荷の軽減を図った。ステンレスフィルムで電位を、PVDFフィルムで振動測定が可能である。よって、ステンレスフィルム及びPVDFフィルムで筋電(EMG)及び筋音測定(MMG)を、LED及びPDにより筋の光吸光度の測定(NIRS)をそれぞれ行うことが可能である。図3に提案センサを用いた筋活動測定システムを示す。図3に示すようにそれぞれのアクリル柱のPVDFフィルム表面に貼り付けた透明の導電性ゲルとその周囲に貼り付けた両面テープにより、生体に固定(位置A, B)した。なお、センサを貼り付ける前に、市販の皮膚前処理剤で皮膚表面抵抗を低減させた。それぞれの提案センサを用いてEMG、MMG、及びNIRSの測定を同時に行った。EMGは、それぞれのステンレスフィルムで得られる電圧の差電圧として測定した。MMGは、それぞれのPVDFフィルムに生じる電圧を測定した。NIRS測定は、LEDを1 kHzで発光強度を変調し、筋を透過した光をPDでI-V変換し、電圧を測定した。3波長のLEDは、250 ms間隔で切り替え、それぞれの受光電圧を測定した。それぞれの測定値を、ノイズ除去のためにフィルタに通し、増幅した後、サンプリング周波数 10 kHzのデジタルストレージスコープでA-D変換し、パソコンに取り込んだ。実験に用いた増幅及びフィルタの設定を表1に示す。また、測定時には、生体の別の部分(今回は鎖骨)に皿電極を貼り付け、基準電位とした。

実験として、左前腕の肘から8 cm(位置B)及び11 cmの位置(位置A)にLED及びPDを有する提案センサをそれぞれ配置した。実験は、以下のように行った。まず、被験者(42歳男

性)に椅子に座ったもらい、安静状態(Rest)として、リラックスした状態で手のひらを上に向けて手首から肘までを机の上においた。ひじの角度は 40 度とした。実験は以下の 2 種類の実験を行った。

(1) 25 %MVC の負荷を手につけ、2 分間続けた(Work)。その後、3 分間休憩した(Rest)。これを 1 セットとし、負荷を 40 %MVC、60 %MVC として同様の実験を行った。EMG、MMG 及び NIRS の測定は Work 及び Rest のそれぞれの状態の開始から 1 分あるいは 1 分 30 秒後の 10 秒間の測定を行った。

(2) 40 %MVC の負荷を手につけ、50 秒間保持したときの EMG、MMG 及び NIRS の連続測定を行った。

これらの測定は、1 日 1 回、3 日間行った。測定は、温度 25 °C、蛍光灯(210 lx)下で行った。

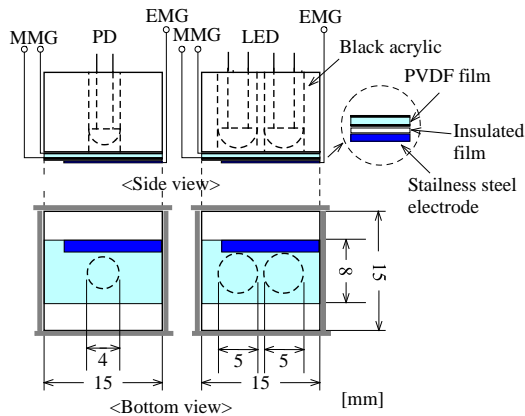
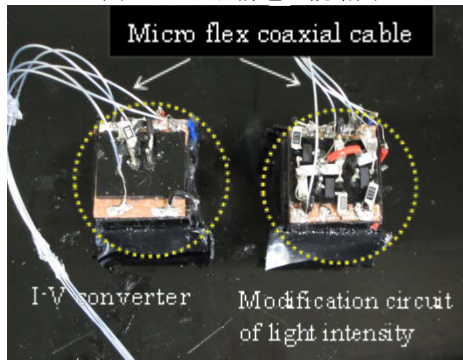
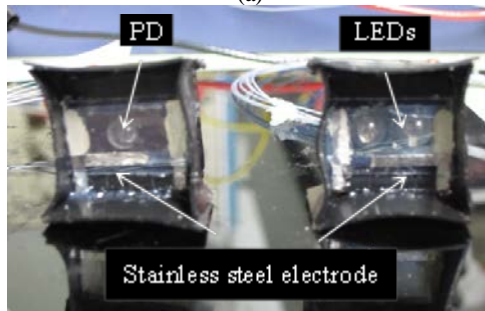


図1 センサ構造の概略図



(a)



(b)

図2 提案センサ(a)上面図(b)底面図

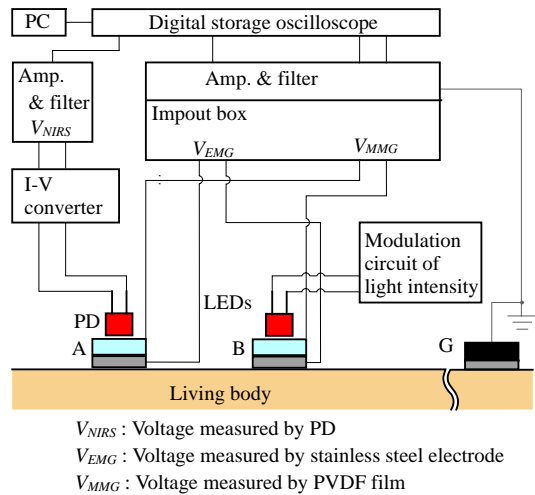


図3 測定システムの概略図

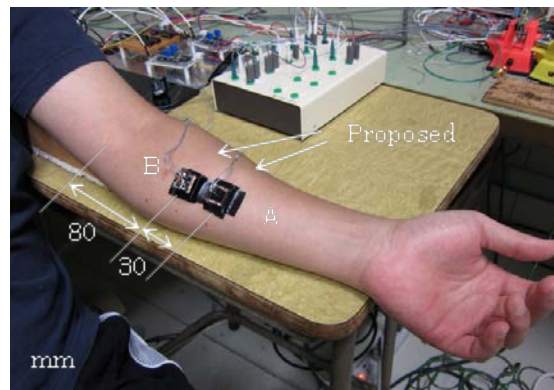


図4 センサ設置

表1 フィルター及び増幅率の設定

		EMG	MMG	NIRS
Filter	Low cut	150	0.08	950
	High cut	3000	300	1050
[Hz]				
Amplification gain		5000	2000	10000

#### 4. 研究成果

図5に筋活動におけるEMGとMMGの測定結果を示す。縦軸は測定された電圧の絶対値の10秒間の積分値の3回の平均値と最大誤差を示す。結果から、負荷の増加に伴い、EMGとMMGの電圧は増加することがわかる。よって、提案センサによって測定されたEMG及びMMGから前腕の筋活動の変化の測定が可能であることがわかる。位置A及びBでのMMGの違いは現れなかった。図6にNIRS測定による酸素化( $\Delta\text{HbO}_2$ )及び脱酸素化( $\Delta\text{Hb}$ )ヘモグロビンの相対濃度変化( $\Delta C$ )を示す。基準として、0秒での測定値を用いた。縦軸は、 $\Delta C$ の平均と最大誤差を示した。 $\Delta\text{Hb}$  and  $\Delta\text{HbO}_2$  は3種類の波長それぞれで測定した電圧の実効値から修正 Lambert-Beer 則から導出した。導出に用いた平均光路長は 15

cm とした。また、それぞれの波長の吸光係数は S. J. Matcher らの論文(1995)で報告されている値を用いた。結果から負荷をかけることで  $\Delta Hb$  は増加し、 $\Delta HbO_2$  は減少した。逆に、安静状態に移行することで  $\Delta Hb$  は減少し、 $\Delta HbO_2$  は増加した。結果は筋活動により酸素が消費されることと相関があり、提案センサにより筋活動の酸素情報を得ることが可能であるといえる。また、提案システムにおける NIRS 測定が蛍光灯下でも十分可能であることが分かった。よって、提案センサにより EMG, MMG and NIRS の同時測定が可能であり、負荷によりそれらの測定値が変化することからより詳細な筋活動解析が可能であることが示唆される。図 7 に提案センサにより 50 秒間の筋活動における EMG, MMG, NIRS の連続測定の結果を示す。EMG と MMG は測定電圧の絶対値で示した。NIRS 測定により計算された  $\Delta Hb$  と  $\Delta HbO_2$  は 1 秒間の測定値の平均値で示した。結果から、図 5 及び図 6 の離散測定と同様に同一部位で 3 種類の異なるパラメータが提案センサにより得られることがわかる。また、3 回の連続測定の結果は同様の変化の傾向を示したことから提案センサにより筋活動解析の可能性が示唆された。しかしながら、負荷が手に掛けられ

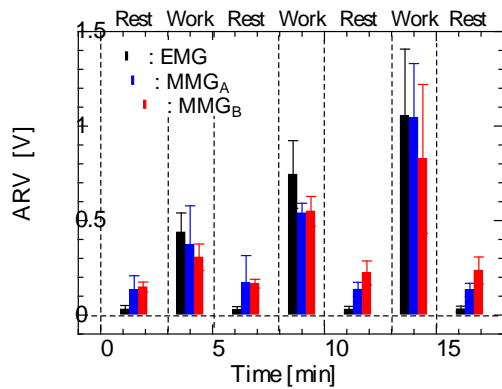


図5 負荷の違いによるEMGとMMGの測定結果

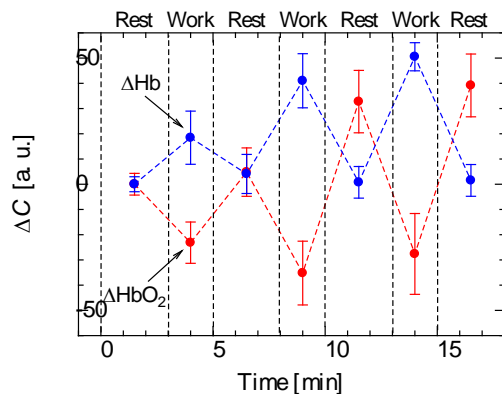


図6 負荷の違いによるNIRSの測定結果

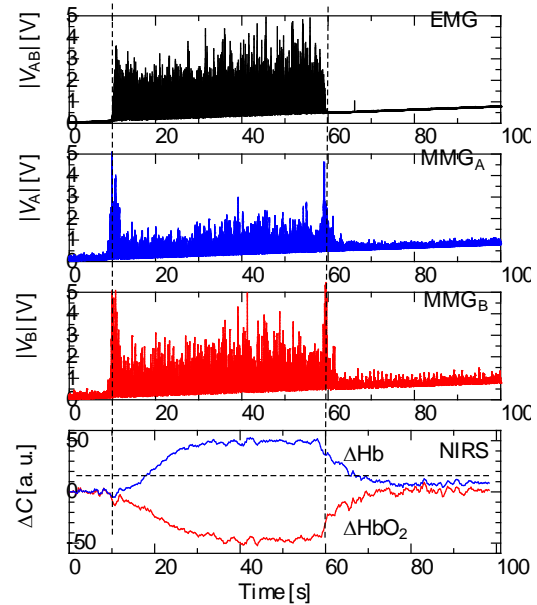


図7 EMG, MMG及びNIRSの連続測定結果

たとき、MMG において大きな変化が現れたことから、測定精度は測定状態により強く影響されることがわかる。次に、提案センサによる NIRS 測定から得られた筋の  $\Delta HbO_2$  と  $\Delta Hb$  が実際に前腕の筋の血流の影響により引き起こされたものであるかどうかを検証した。実験として、カフにより血流を制御したときの提案センサによる  $\Delta HbO_2$  と  $\Delta Hb$  の変化を調べた。実験は、以下のように行った。カフにより上腕に圧力  $190 \pm 105$  mmHg で 50 秒間血流を閉塞し、その後、開放したときの NIRS 測定を行った。実験結果を図 8 に示す。測定値は 1 秒間で測定した  $\Delta HbO_2$  と  $\Delta Hb$  の平均値でそれぞれ示した。結果から、測定値のばらつきは大きいですが、血流閉塞により、 $\Delta Hb$  が増加( $\Delta HbO_2$  は減少)し、解放後に減少(増加)していることがわかる。また、100 秒後には、 $\Delta HbO_2$  と  $\Delta Hb$  とも初期値に近い

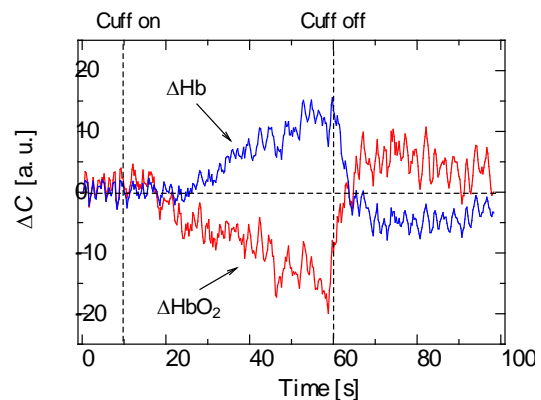


図8 カフによる血流変化におけるNIRSの測定結果

ていっていることがわかる。このことは、血流閉塞により、酸素化ヘモグロビンの流入が減少し、脱酸素化ヘモグロビンが増加することが考えられる。このことから、提案センサの NIRS 測定により、血流の $\Delta\text{HbO}_2$ と $\Delta\text{Hb}$ の変化を捉えていると言える。実験は、200 lx程度での蛍光灯下で行ったが、700 lxでの測定も行い、NIRS 測定が十分可能であることを示した。

これまでの実験は EMG 測定においてステンレス電極により行ったが、ステンレス電極の場合、光測定に影響を与えるため、その電極サイズや位置に制限を受ける。それらの制限を解消するために透明電極での測定が可能であるかどうか検討した。図9に電極構成を示す。今回、透明電極として酸化亜鉛(GZO)電極を用いた。実験として安静時と40%MVCの負荷を手に120秒かけたときの110秒からの10秒間の電圧の絶対値の積分値を測定した。結果を図10に示す。結果は3回の測定結果の平均と最大誤差で示す。結果からステンレス電極と比較してGZO電極で得られる電圧値は小さかったがGZO電極によりEMG測定が可能であることがわかった。よって、EMG及びMMGの測定が透明電極で可能となり、光測定との積層化における電極構成や大きさなどを自由に設定できることがわかった。しかしながら、EMG測定のために電極表面に貼り付けた導電性ゲルにより、GZO電極が剥がれることから、GZO電極を繰り返し測定に利用することは困難であった。そこで、別の透明電極材料である酸化インジウムスズ(ITO)により製作したときの繰り返し測定による電極の安定性について検討した。実験として、まず、製作したITO電極にEMG測定に用いる導電性ゲルの貼付け・剥離を繰り返し、電極の表面抵抗を測定した。結果として、導電性ゲルの貼付け・剥離の繰り返しによる抵抗の変化がないことから、繰り返し測定が可能であることがわかった。また、実際に、図5の結果と同様の実験を行ったところ、ITO電極においても同様の傾向の結果が繰り返し得られたことから、透明電極によるEMG測定の可能性を示すことができた。

今回の実験においては3波長発光のために2つの発光素子を用いたが3波長発光が可能な1つの発光素子によりセンサの小型化を行った。実験として、図5及び図6と同様の実験を行い、同様の結果を得ることができたことからセンサの小型化を図ることができた。NIRS測定に関しては、発光素子と受光素子をそれぞれの別の素子により製作していたため、皮膚に配置した受光素子を有する積層型センサでのNIRS測定だけであったが、3波長発光と受光素子が一体化された素子により積層型センサを製作することで各積層

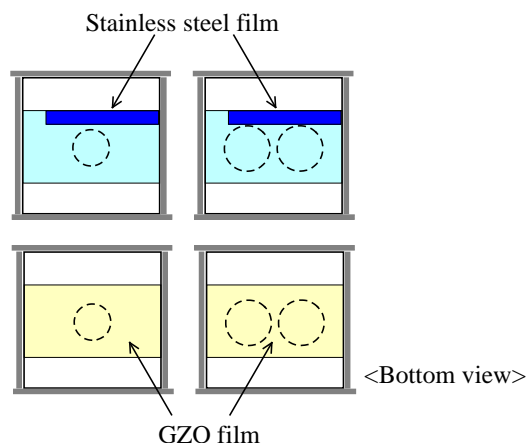


図9 ステンレス電極及び透明電極(GZO)のセンサ構造

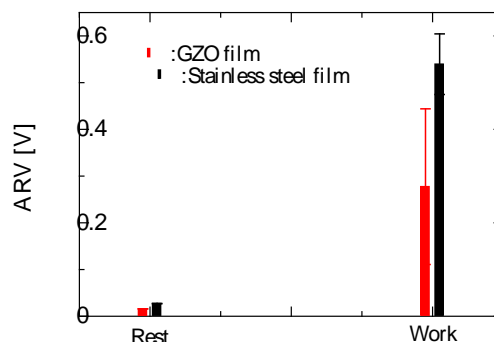


図10 ステンレス及び透明電極(GZO)によるEMGの測定結果

型センサによりNIRS測定を可能にすることで情報量を増やす予定である。

今回、被験者一人による繰り返し再現性の評価をした。また、複数の被験者(20歳から40歳までの男女10名程度)での測定や実際に応用計測に向けた一例として、口腔筋の測定を試みた。結果として、測定精度が不十分であり、筋解析までに至ることはできなかった。この原因として、皮膚とセンサの接触状態が大きく影響することがわかった。したがって、接触状態を如何に安定にするか、あるいは、如何に補正するかが実際の応用面での今後の課題である。

以上、本研究課題の結果から、今後の応用計測のための基礎データが得られた。すなわち、光・電気・振動測定を可能とする積層型センサを開発し、同一部位で同時に3種類の筋活動の測定が可能であることからより詳細な筋活動解析及びモニタリングの可能性を示した。提案センサによる応用として、スポーツ科学及び医療福祉のための筋活動解析をはじめとして脳計測への展開を考えている。そのための技術的な解決として、測

定精度の向上、多点計測化及びウェアラブル化を図る予定である。測定精度に関しては、接触の改善、補正方法などを検討する予定である。ウェアラブル化に関してはマイコンを用いた無線化することで実現する予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 木本 晃、山田裕司、EMG・MMG・NIRS 測定のための積層型センサの検討、平成 25 年電気学会全国大会講演論文集、査読無、1-106、2013、p. 133、2013.3.20～22、名古屋大学
- ② 山田 裕司、木本 晃、筋活動解析のための複合センサの開発、平成 24 年度電気関係学会九州支部連合大会(第 65 回連合大会)講演論文集、査読無、07-2P-10、2012.9.24～25、長崎大学
- ③ Akira Kimoto、Yushi Yamada、A proposal of layered sensor for analysis of muscular activity、Proceedings of 2012 IEEE Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA2012)、査読有、pp.219-222、2012.5.18～19、Budapest  
DIO: 10.1109/MeMeA.2012.6226661
- ④ 木本 晃、筋活動解析のための EMG・MMG・NIRS 測定システムの提案、電気学会研究会資料、査読無、IM-12-020、pp.17-20、2012.3.9、新潟県民会館

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

[その他]

ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

木本 晃 (KIMOTO AKIRA)

佐賀大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：80295021

(2)研究分担者

( )

研究者番号：

(3)連携研究者

( )

研究者番号：