

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22992

研究課題名（和文）皮膚電気刺激による筋肉収縮を活用したウェアラブル歩行支援デバイス

研究課題名（英文）Development of wearable EMS walking support device

研究代表者

竹井 裕介（Takei, Yusuke）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：00513011

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：高齢者の日常生活に潜む健康リスクの一つとして転倒が挙げられる。筋肉の衰えに伴って歩行時の足の挙上量が小さくなり、つまずきやすくなることが原因とされている。本研究では「筋肉電気刺激用の起毛電極」と、「電気刺激中の筋肉収縮をモニタリングする筋音センサ」を衣服に実装し、それを身に着けた装着者の下肢の動作（歩行時や段差を乗り越える際の足の挙上動作など）を感知し、動作に応じて必要な筋肉に電気刺激を行い、行動を支援するスマートウェアを実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本デバイスは、装着者自身の筋肉をアクチュエータとして利用するため、外部アクチュエータが不要である。そのためシステム全体の重量は非常に軽量である。また、下肢に限定される既存の行動支援システムに対して、歩行時の腕振り動作など上半身を含む従来よりも広範にわたる行動支援の可能性がある。また従来からの行動支援システムでは外部アクチュエータの継続的な使用により装着者の筋力低下が懸念されるのに対して、筋肉電気刺激は筋力増進に効果があるため、本デバイスの継続的な使用により筋力の維持・増進が見込まれ、基礎体力底上げによる本質的な高齢者の転倒予防やQOL向上にも貢献すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research, 1) raised electrodes for electrical muscle stimulation and 2) muscle sound sensors for monitoring muscle contraction during electrical stimulation were fabricated. These sensors and electrodes are mounted on clothing to detect the wearer's lower limb movements (e.g., when walking or raising the leg when climbing over a step), and electrical stimulation is applied to the necessary muscles to support walking movements.

研究分野：センシングシステム

キーワード：筋肉 筋音 MEMS 電気刺激 テキスタイル電極

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高齢者の日常生活に潜む健康リスクの一つとして転倒が挙げられる。筋肉の衰えに伴って歩行時の足の挙上量が小さくなり、つまずきやすくなるのが原因とされている。近年、モータやバネなどの外部アクチュエータによる様々な行動支援システムが開発されているが、高齢者が屋外で日常的に装着することを想定しておらず、重量や装着時の違和感が大きな課題であった。一方、近年、皮膚電気刺激により筋肉を刺激することで筋力が向上することを利用したトレーニングデバイス(EMS デバイス)が活況を呈している。こうしたデバイスでは電気刺激の電圧と周波数を調整することで、筋収縮状態を変化させている。しかし、こうしたEMS デバイスを行動支援デバイスとして活用することは、電気刺激中の筋収縮状態をモニタリングする方法がなかったため、フィードバック制御が行えず困難であった。本研究では、筋肉の機械的信号である「筋音」に着目し、皮膚電気刺激による行動支援デバイスの実現に取り組んだ(図1)。

表1に、従来の歩行支援システムと本提案の比較を示す。本提案は、デバイス装着者自身の筋肉をアクチュエータとして利用するため、外部アクチュエータが不要である。そのためシステム全体の重量は、衣服の重量と同じ500g程度と非常に軽量である。また、自身の筋発揮力以上の力が発生することがないため、モータのように過剰な力を発揮して身体にダメージを与えることのない安全なシステムである。また、下肢に限定される既存の行動支援システムに対して、本提案システムでは軽量な特徴を活かしてシャツにも展開可能であり、歩行時の腕振り動作など上半身を含む従来よりも広範にわたる行動支援の可能性がある。また従来の行動支援システムでは外部アクチュエータの継続的な使用により装着者の筋力低下が懸念されるのに対して、筋肉電気刺激は筋力増進に効果があるため、本デバイスの継続的な使用により筋力の維持・増進が見込まれ、基礎体力底上げによる本質的な高齢者の転倒予防やQOL向上にも貢献すると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、皮膚電気刺激による筋肉収縮を活用した、ウェアラブル歩行支援デバイスの実現である。本デバイスは衣服の上に印刷形成された「皮膚電気刺激用の起毛電極」と、同じく衣服の上に実装された「電気刺激中の筋肉収縮をモニタリングする筋音センサ」から構成される(図1(左))。装着者自身の筋肉をアクチュエータとして利用するため、モータ等の外部アク

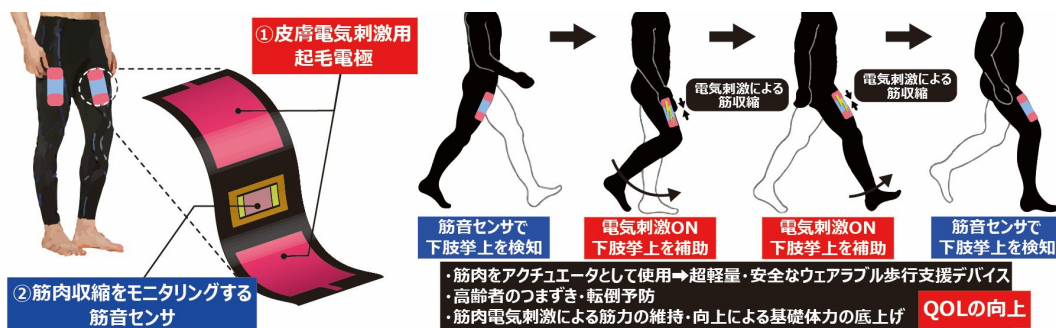


Fig. 1 Outline of this research (Left) Configuration of wearable walking support device. (Right) Assist in raising the lower limb by contracting muscles through electrical stimulation.

Table 1: Comparison of conventional walking assistance systems and this study.

	 サイバーダイ ン HAL <a href="https://www.cyberdyne.jp">https://www.cyberdyne.jp</a>	 本田技研 歩行アシスト <a href="https://www.honda.co.jp/walking-assist/">https://www.honda.co.jp/walking-assist/</a>	 今仙技研 ACSIVE <a href="https://www.imasengike.n.co.jp/product/acsive/">https://www.imasengike.n.co.jp/product/acsive/</a>	 本提案 皮膚電気刺激型 スマートウェア
アクチュエータ	× モータ	× モータ	バネ	○ 筋肉
重量	× (12kg)	× (2.7kg)	○ (1.1kg)	○ (0.5kg)
制御性	○	○	×	○ (筋音センサによるフィードバック)
サポート部位	(下肢)	× (大腿)	× (大腿)	○ (全身)

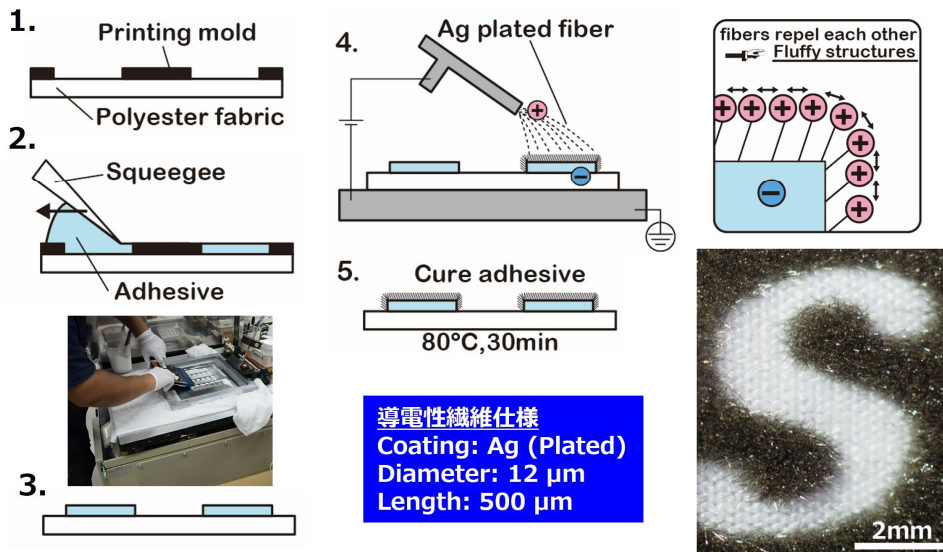


Fig. 2 Fabrication process of textile electrodes for EMS smart wear



Fig. 3 Fabricated textile electrodes for EMS smart wear

チューエータが不要で、自身の筋力以上の発揮力が発生しないため、軽量で安全な行動支援方法である。高齢者のつまずき・転倒による骨折と、その後の日常生活 QOL の著しい低下を防ぐとともに、電気刺激による筋力の維持・向上による基礎体力の底上げに貢献することを目指す。

本研究では上記の「筋肉電気刺激用の起毛電極」と、同じく衣服の上に実装された「電気刺激中の筋肉収縮をモニタリングする筋音センサ」を衣服に実装し、それを身に着けた装着者の下肢の動作（歩行時や段差を乗り越える際の足の挙上動作など）を感知し、動作に応じて必要な筋肉に電気刺激を行い、行動を支援する（図 1(右)）。

### 3. 研究の方法

本研究では、「A：筋肉電気刺激用の起毛電極検討および作製」、「B：電気刺激中の筋肉収縮をモニタリングする筋音センサの検討および作製」、「C：筋肉電気刺激を活用した動作補助の検討および実証実験」の 3 つの研究項目に取り組んだ。以下各項目について要点を述べる。

#### A：筋肉電気刺激用の起毛電極検討および作製

本研究では静電植毛技術を活用して、衣服の上に筋肉電気刺激用の電極を形成する。この電極は、皮膚との接触抵抗が低いため導電性ゲルやクリームの塗布が不要であり、ウェア型のデバイスを着用するだけで効果的に電気刺激が行えるという特徴を持つ。

#### B：電気刺激中の筋肉収縮をモニタリングする筋音センサの検討および作製

本研究では、筋肉を電気刺激により収縮させ、動作補助のアクチュエータとして活用する。その際、筋肉がどの程度収縮したか定量的に把握し、筋肉電気刺激信号発生回路にフィードバックする必要がある。しかし、筋収縮モニタリングに「筋電」を用いた場合、50 V の筋肉電気刺激電圧と 1 mV の筋電を、皮膚表面に貼付した電極で同時に計測することになり実質的には不可能であった。そこで本研究では、筋肉の機械的信号である「筋音」に着目し、皮膚電気刺激中の筋収縮状態を計測する。ヒトの皮膚に寄り添うように配置可能なフレキシブルな筋音センサとして、厚さ 5 μm のフレキシブルなシリコン薄膜の表面に、微小変位を電気抵抗変化として検出可能な圧電抵抗層を形成し、筋音によって生じる皮膚表面の微小な歪みが計測可能であることを確

認する。

#### C：筋肉電気刺激を活用した動作補助の検討および実証実験

本研究では、大腿四頭筋への筋肉電気刺激によるヒトの歩行補助を目指す。筋音センサ等による下肢挙上動作の検出および下肢挙上量の推定、筋肉電気刺激信号（電圧、周波数）と下肢挙上量の関係などについて検証を行う。

### 4．研究成果

#### A：筋肉電気刺激用の起毛電極検討および作製

起毛電極の作製工程を図2に示す。まずスクリーン印刷で、布上に形成したい起毛電極パターンと同じ形状の接着剤パターンを印刷する。その後、アクリル芯の導電性銀メッキファイバーを吹き付けることで、印刷した接着剤パターンの上のみに、銀メッキファイバーが植毛される。本研究では、銀メッキ繊維を500 μmから3 mmの長さにカットし、それを接着剤層に吹き付け、植毛することで、導電性を有するテキスタイル電極を形成した。特に、本研究では、銀メッキファイバーを吹き付ける際に、布上の接着剤層を負に、銀メッキ繊維を正に帯電させることで、効率的な接着剤層への銀メッキ繊維の植毛を実現した。また、接着剤層に植毛された銀メッキ繊維同士は正に帯電しており、お互いに反発するため、繊維同士が一定の距離を保った「ふわふわ」の起毛電極の形成が行える。図3（左）にポリエステル製のコンプレッションスポーツウェアの布表面に試作した筋肉電気刺激用起毛電極を示す。図3（右）は、起毛電極の拡大写真である。接着剤層に植毛された銀メッキ繊維が互いに反発し、ふわふわとしたポリウムのある構造であることが確認できる。

また作製した起毛電極が、市販のゲル電極と比較して、筋肉電気刺激に対する優位性があるか確認するために、電極の繰り返し脱着による、皮膚との接触抵抗の変化の計測を行った。今回の実験では、比較を容易にするために、起毛電極、ゲル電極ともに、70 mm 角の正方形の形状の2枚の電極を25 mm 離して、配置した。実験では、ヒトの皮膚の代わりに、標準化されたヒトの皮膚試料として皮膚ファントム（導電性ゴム）を使用した。実際に使用する状況を想定し、起毛電極およびゲル電極は、導電性クリーム等を塗らずに直接皮膚ファントムに接触させた。皮膚ファントムに接触させた電極は、上方よりz軸電動ステージに固定されたフォースゲージを用いて、一般的なコンプレッションスポーツウェアの着圧である2 kPaの押しつけ圧力を印可し、繰り返し脱着による接触抵抗の変化を計測した。ゲル電極は、脱着試行回数が増えるにつれて、皮膚ファントムとの接触抵抗が単調に増加する結果となった。これは、繰り返し脱着によって、ゲル電極の粘着性が減少するためと考えられる。それに対して起毛電極は、30回の繰り返し脱着を通じて、ほぼ一定の接触抵抗を示した。1~13回目の脱着までは、ゲル電極のほうが低い接触抵抗を示しているが、14回目以降は起毛電極よりも高い接触抵抗を示す結果となった。EMSデバイスにてゲル電極で筋肉へ電気刺激を与えることを考えた場合、日々、繰り返し使用する度に

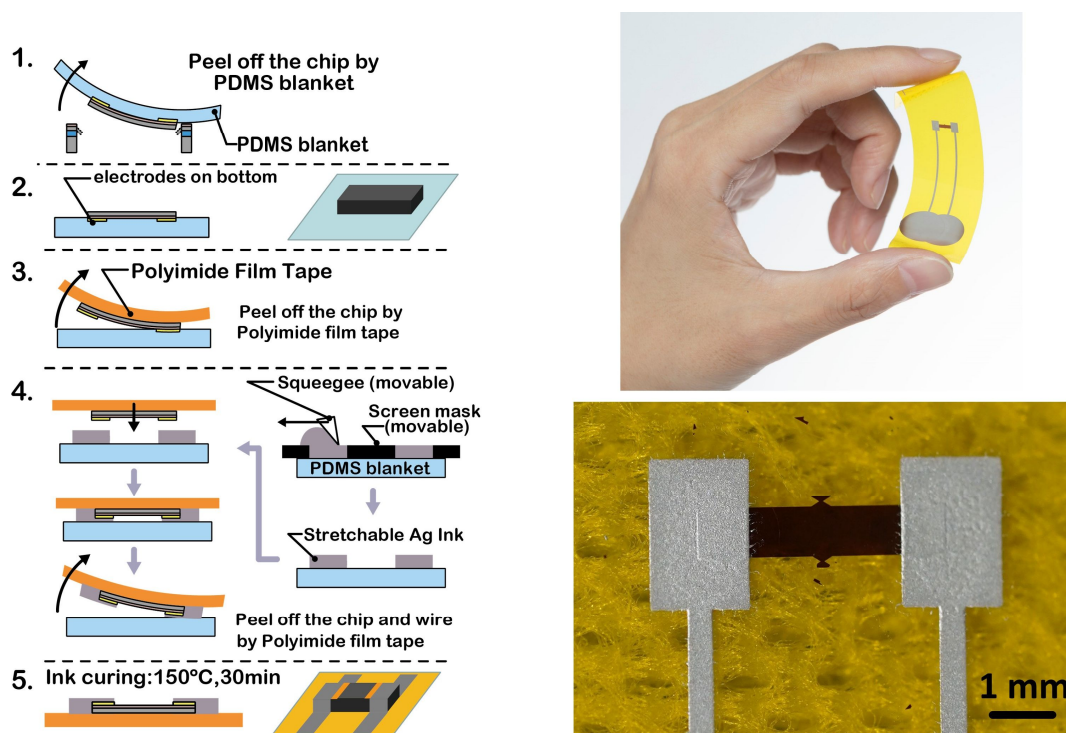


Figure 4: (a) Process overview of face-up ultra-thin Si chip wiring batch mounting on polyimide film tape adhesive surface.



Figure 5: Compact terminal with integrated accelerometer and circuitry for generating muscle electrical stimulation signals

皮膚との接触抵抗が変わり、その抵抗に応じて印可する電圧を調整するのは、ユーザビリティを大きく損ねることとなる。それに対して、本研究で作製した起毛電極のように、一定の接触抵抗を維持していれば、いつでも同じ電圧を印可すれば、同じ強度の筋肉電気刺激を行うことが可能となり、定量的なトレーニングや、治療が可能となる。

#### B：電気刺激中の筋肉収縮をモニタリングする筋音センサの検討および作製

本研究では、シンプルなスクリーンオフセット印刷技術を用いて、厚さ  $5\ \mu\text{m}$  の極薄ピエゾ抵抗 Si 素子と銀インクによる印刷配線を一括でフレキシブルフィルム基板上への実装を実現した。このプロセスは、特別な MEMS 製造装置（露光装置、現像装置、エッチング装置、蒸着装置、スパッタ装置、チップマウンタなど）を必要とせず、電極がチップの上面に形成される「Face-up チップ」および電極がチップの下面に形成される「Face-down チップ」双方に適用可能である。

近年、フレキシブルハイブリッドエレクトロニクスの研究が盛んに行われており、厚さ  $50\ \mu\text{m}$  以下の曲げても割れない極薄 Si 素子がフレキシブル基板上に実装されている。ただし、実装部品には電極形成面が上面か下面かで「Face-up」と「Face-down」の2種類に分けられ、これらの種類に応じて実装方法や配線方法を適切に選択する必要がある。これに対して我々は「Face-up」と「Face-down」2種類の電子素子が混在していても、フレキシブル基板上に一括で実装・配線することができる、スクリーンオフセット印刷技術を活用した新しいプロセスを提案する。このプロセスでは、極薄 Si 素子と伸縮性導電性インクをシリコーンゴム製のブランケットを介して接着フィルムに転写する。

図4（左）にスクリーンオフセット印刷を用いたポリイミドフィルムテープへの「Face-up」Si チップと配線の転写工程を示す。また図4（右）は「Face-up」の極薄 Si 素子をポリイミドフィルムテープ状に実装・配線したものである。

#### C：筋肉電気刺激を活用した動作補助の検討および実証実験

上述の研究項目 A で作製した電気刺激用起毛電極および、研究項目 B で作製した筋音センサを統合し、歩行補助を目的とした大腿四頭筋を電気刺激可能なスマートウェアを作製した。歩行時の膝から下の振り上げ動作を補助するために、加速度センサにより歩行時の下肢の動きを計測し、適切なタイミングで電気刺激を行い、筋音センサで筋収縮を定量的に評価し、電気刺激信号発生回路にフィードバックを行う。図5に、加速度センサおよび筋肉電気刺激信号を生成するための回路を統合した小型端末を示す。本端末は、裏面にスナップボタン（凹部）を備え、スマートウェアの起毛電極から引き出した配線の末端のスナップボタン（凸部）に嵌めることで、電氣的な接続をとる。また端末には6軸の加速度センサが内蔵されており、歩行時の下肢の振り上げを検出し、電気刺激信号を発する。本端末を起毛電極スマートウェアに接続し、歩行実験を行った。歩行動作解析にはマーカレスモーションキャプチャシステムを用いて、下肢の振り上げ量の評価を行った。被験者3名（健康成人男性）に対して評価を行ったところ、優位に振り上げ量が増えていることを確認した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nguyen Thanh-Vinh、岡田 浩尚、竹井 裕介、武居 淳、一木 正聡	4. 巻 -
2. 論文標題 A BAND-AID TYPE SENSOR FOR WEARABLE PHYSIOLOGICAL MONITORING	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems	6. 最初と最後の頁 1432-1435
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nguyen Thanh-Vinh、岡本 有貴、竹下 俊弘、竹井 裕介、岡田 浩尚、Khoa Nguyen、Hoang-Phuong Phan、一木 正聡	4. 巻 -
2. 論文標題 HIGHLY SENSITIVE LOW-FREQUENCY ACOUSTIC SENSOR USING PIEZORESISTIVE CANTILEVER	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of The 35th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems	6. 最初と最後の頁 841-844
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Takei Yusuke、Nomura Ken-ichi、Horii Yoshinori、Zymelka Daniel、Ushijima Hirobumi、Kobayashi Takeshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Fabrication of Simultaneously Implementing “Wired Face-Up and Face-Down Ultrathin Piezoresistive Si Chips” on a Film Substrate by Screen-Offset Printing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 563 ~ 563
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/mi10090563	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Takei Yusuke、Takeshita Toshihiro、Yoshida Manabu、Kobayashi Takeshi	4. 巻 58
2. 論文標題 Evaluation method for muscles, measuring mechanomyogram induced by electrical muscle stimulation using lead zirconate titanate-based acoustic sensor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SLLD11 ~ SLLD11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1347-4065/ab3e52	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 竹井裕介
2. 発表標題 圧電AEセンサを用いた筋肉の特性評価方法に関する研究
3. 学会等名 第36回 強誘電体会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹井 裕介
2. 発表標題 フレイル早期発見の筋質センサの開発
3. 学会等名 第3回センシングシンポジウム「人間中心のIoT社会の実現に向けたセンシング技術」（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹井 裕介
2. 発表標題 MEMSセンサが切り拓く新たな生体計測
3. 学会等名 2021年度新技術導入・活用研究会（第4回）（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹井 裕介
2. 発表標題 フレイル早期発見のためのパッチ型筋質センサの開発
3. 学会等名 令和3年度 第3回メドテックマッチング 若手研究者による革新的診断機器開発への挑戦：がん・免疫・リハビリ分野の応用
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹下 俊弘、山下 崇博、竹井 裕介、ZYMELKA Daniel、小林 健
2. 発表標題 Development of lamination sealing method for ultra-thin PZT MEMS device
3. 学会等名 IEEE ISAF2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nguyen Thanh-Vinh、岡田 浩尚、竹井 裕介、武居 淳、一木 正聡
2. 発表標題 A BAND-AID TYPE SENSOR FOR WEARABLE PHYSIOLOGICAL MONITORING
3. 学会等名 The 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹井裕介
2. 発表標題 ACTIVE MUSCLE SENSING SYSTEM
3. 学会等名 VANJ CONFERENCE 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹井裕介
2. 発表標題 アクティブ筋音センシングスマートウェアの開発
3. 学会等名 JIEP最先端実装技術シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 竹井裕介
2. 発表標題 EMSスマートウェアの開発
3. 学会等名 令和元年度第6回地域連携公開セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹井裕介
2. 発表標題 アクティブ筋音センシング
3. 学会等名 JASIS201（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹井裕介
2. 発表標題 アクティブ筋音センシングデバイスの開発
3. 学会等名 EbHW 第3回ヘルスケア効果計測セミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹井裕介
2. 発表標題 MEMSセンサを用いた生体計測
3. 学会等名 計測・センシング技術学会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹井 裕介、野村 健一、堀井 美徳、ZYMELKA Daniel、牛島 洋史、小林 健
2. 発表標題 スクリーンオフセット印刷を用いた極薄MEMSのフィルム実装
3. 学会等名 第36回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹下 俊弘、吉田 学、竹井 裕介、小林 健
2. 発表標題 静電植毛技術を用いた立体アクティブ起毛電極の開発
3. 学会等名 第36回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関