

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：56401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18424

研究課題名(和文) 赤外光を用いた皮下筋変化計測および物体把持支援のパワーアシストグローブの開発

研究課題名(英文) Development of power assist gloves for gripping support and measurement muscle activity sensors using infrared light

研究代表者

吉岡 将孝 (Yoshioka, Masataka)

高知工業高等専門学校・ソーシャルデザイン工学科・助教

研究者番号：80805804

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、手および手首のパワーアシスト(以下、PA)実現のため、ワイヤ駆動によるPAグローブの開発および赤外光を用いた手に関する筋活動の計測および指角度推定を行った。まず、PAグローブでは装着者に適応するグローブと筋電位PAを行い、握力の16.7%アシストに成功した。また、人間の腱構造を模したワイヤサポートPAグローブを作成し、ペットボトルなどの把持を行うことが出来た。

赤外光筋活動センサでは筋肉の動きを赤外線反射光強度で推定する手法を提案し、照射角が角度、指の運動速度に関わらず指の角度との間に強い相関が見られ、指の角度を相関係数が最大で0.93の推定結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

手のパワーアシストを実現するためには、手の動きをなるべく阻害せず、強い把持力を有するアシストグローブが必要であると共に、動作の邪魔にならずに、手先の動きと発揮力を同時に計測出来るセンサが必要となる。本研究で開発した人間の腱構造を模したワイヤサポートは着脱が容易で、ワイヤの力を使用者に合わせた指関節駆動に変換できる手法であると考えられる。また、赤外光筋活動センサは筋電位センサに代わる新たな筋活動を計測できる手法であり、指の角度推定結果によりその有効性を示すことが出来た。また、光の変化を観測することから電氣的ノイズによる影響は少ないため、今後パワーアシスト以外での活躍も期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, in order to realize power assist (PA) of the hand and wrist, we developed a wire-driven PA glove, measured muscle activity of the hand using infrared light, and estimated the finger angle. First, with PA gloves, we performed gloves and myoelectric potential PA that are suitable for the wearer using a 3D printer, and succeeded in assisting 16.7% of grip strength. In addition, we were able to create PA gloves that imitate the tendon structure of humans and hold PET bottles.

In the infrared light muscle activity sensor, we proposed a method to estimate the movement of muscles from the reflected light intensity of infrared rays, and a strong correlation was seen between the irradiation angle and the finger angle regardless of the angle and finger movement speed. An estimation result was obtained with a maximum correlation coefficient of 0.93.

研究分野：工学系科学

キーワード：赤外光 筋活動センサ 重回帰モデル パワーアシスト ワイヤ駆動

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、日本含む先進国では少子高齢化が進み、要介護者人口の増加や重労働従事者の減少が問題となっている。そのため、福祉介護や医療分野では介護ロボットやパワーアシスト装置による支援が進められており、重労働においても機械化による作業従事者の負担軽減が行われている。特に、パワーアシスト装置は使用者の意図を読み取り、動作の支援を行うことから、介護動作や重たい荷物の重労働などの様々な分野で適応する事が出来ることから、研究・開発が進められている。そして、介護分野において、手の筋力が弱った障害者に対して物体把持や日常動作の支援およびリハビリテーションが行われている。その中でもパワーアシストグローブは、障害者の手に装着し動作させることから、これまで弱って持つことが出来なくなったものを自分の手で持てるようになる。これにより、使用者のリハビリテーションの意欲や QoL の向上に役立つと考えられる。さらに、健常者や重労働従事者がパワーアシストグローブを装着する事で、作業負担を軽減することが可能となる。しかし、パワーアシストロボットは足先から肘関節の連動動作を実現してきているが、手および手首のパワーアシストはまだ出来ていない。これまで手をサポートする補助器具は存在しているが、それらのほとんどは指先によるつまみ動作の補助や手を開閉させるリハビリテーションを行うものであった。そのため、その指先に発生させる力は 7-10N ほどのコップやペットボトルなどを把持出来る程度で、かつ開閉のみの単調動作であった。また、パワーアシストシステムを実現するためには、人の運動意図を抽出する必要がある。

2. 研究の目的

手のパワーアシストが出来ていない理由の一つに、動作を妨げずに、手先の動きの計測や発揮力の計測が難しい事が挙げられる。人の体は筋肉によって動いており、その筋肉の動きを筋電位センサや超音波センサで観測することで、指の動きを推定されている。しかし、指の筋肉の配置は複雑で筋電位センサではノイズに弱いため推定は難しく、超音波センサによる体内計測を行う装置は、大型でコストがかかり、日常生活を支援するパワーアシストには向いていない。そこで、本研究ではまずワイヤ駆動方式を採用した高出力パワーアシストグローブの開発を目指す。次に、生体親和性の高く、皮膚や脂肪を通る赤外光に着目し、指先を動かした時の筋肉の赤外光反射率の変化を見ることで、指の角度と力を計測する新たなセンサの開発を行う。

3. 研究の方法

ワイヤ駆動によるパワーアシストグローブの開発: 人の親指を除く指は3つの関節を有し、指に関する筋肉の多くは前腕部にあり、浅指屈筋腱および深指屈筋腱を引くことによって屈曲する。これらの腱は、指の骨にある十字靭帯によって支えられ、この十字靭帯は腱と皮膚の摩擦を減らす役割を持つと共に関節への動力の伝達を行っている。本研究ではこの腱と十字靭帯の構造を模することで、指の駆動を妨げないパワーアシストを行う。アシスト部は実験のために親指を除く示指のみとした。図1にパワーアシストグローブを装着する示指の動作の簡略的な原理図を示す。図1において指が曲げられるとき、ワイヤが牽引され、ワイヤ長が L_1 , L_2 , L_3 の順で短くなる。それにより、屈曲角度も θ_1 , θ_2 , θ_3 の順に小さくなり、指の屈曲動作を行う。

パワーアシストグローブ1号機では、まず把持動作を行うパワーアシストグローブの作成を目指すため、単調な握り動作を実現するための素材の違いやワイヤの張り方による出力の大きさに関して検討を行う。手袋をベースとして示指の腱に沿うようワイヤの配置を図2に示す。手袋の DIP, PIP, MP 関節に相当する部位にワイヤを通す事により、ワイヤを引いた時に指の腹側部の手袋のみ関節間の感覚が狭まる。そのため、手袋が指を曲げるように変形することで物体の把持が可能になる。手袋の素材として軍手と革手袋、ワイヤの素材として革紐と 0.3mm のピアノ線の2種類ずつ用意した。次にパワーアシストグローブ2号機では、装着部には3D プリンタを用いて人の指に適応する指カバー(図3)を作製し、人の指の構造と同様に示指の DIP, PIP, MP 関節に相当する部位に屈曲を行える構造にし、指カバーで覆われた部分は全体を支えるように設計する。指を入れる円形の部分は装着者によって大きさや形状を変更することができる。指の腹側部にはワイヤを通す部分を設け、ワイヤを引くと指カバーが指を曲げるように変形することで物体の把持が可能になる。3D プリンタで出力する指カバーのフィラメントには柔軟なゴム素材の熱可塑性エラストマー (TPE) を使い、指の屈曲時の抵抗を減少させ、装着感の向上を行う。最後にパワーアシストグローブ3号機では、1号機および2号機において、ワイヤを支える部分である十字靭帯の位置がずれることで力の伝達が変わってしまうことが確認された。

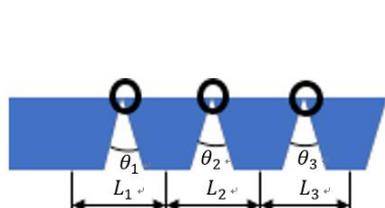


図1. 指のモデルと各関節の角度

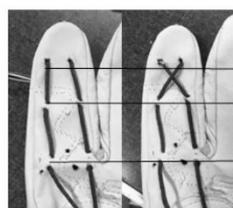


図2. ワイヤの貼り方の違い

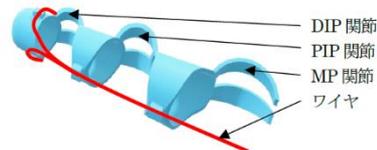


図3. パワーアシストグローブ2号機3Dモデル

人の指は3つの節があり、太さが異なるがその長さは3つともほぼ同じであり、このことから十字靭帯の位置を節の中心とすると、2つの十字靭帯の距離はどの関節とも同じ長さで設計することにより、その指に合った力の伝達ができると考えられる。腱構造部では図4に示す腱モジュールを作成し、先端に取り付けられたワイヤを引き、指の曲がり角度の変化を計測した結果、十字靭帯間の距離が指の節の平均値に近いほど、DIP関節、PIP関節は線形的に変化することが分かった(図5)。これにより、パワーアシストに適した腱モジュールは関節と関節の中心位置に十字靭帯を置くことにより、ワイヤの引っ張り量に比例関係の角度変化が得られる。したがって、この十字靭帯を再現したサポータを作製し(図6)、ワイヤのガイドとすることで指のパワーアシストを行う。ワイヤを支える十字靭帯部は柔軟性の高いゴムライク樹脂を使用し、指の背の部分で支えるようなサポータを作成している。そのため十字靭帯をそれぞれ独立させることにより、その人に合った位置にサポータが置けるようになっている。また、サポータは上部に調節用ねじがついており、使用者の指の太さに合わせて十字靭帯の締め付け度合いを調節するとともに、十字靭帯がワイヤから受ける力を分散する役割を持っている。

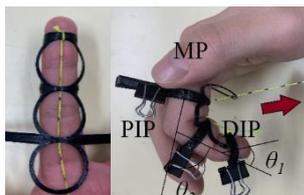


図4. 腱モジュール

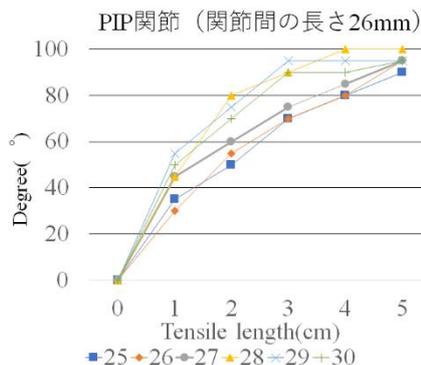


図5. 十字靭帯間の距離と曲げ角度の関係

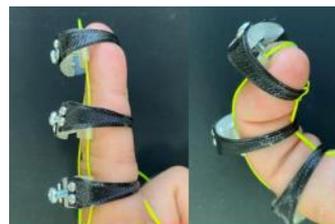


図6. ワイヤサポータ

赤外光を用いた手に関する筋活動の計測：近赤外光は波長がおおよそ $0.7\text{--}2.5[\mu\text{m}]$ の電磁波のことであり、環境光による影響が少なく、赤外線カメラやリモコンなどに利用されている。近赤外光は水分によって減衰することが知られており、皮膚の中に入り減衰しながら水分量の多い筋肉まで届いた後、その表面で一部反射する。このような特徴を利用して計測装置を作製する。近赤外線を用いる計測装置は腕内部を測定するものであるため、筋電位では計測できない領域の細かな動きまでの計測が期待できる。図7に示すように、赤外線LEDからの赤外光は皮膚を通して入射され、入射された光のうち、筋肉組織表面で反射された光と皮下組織の後方散乱光がフォトトランジスタで検出される。ここで、皮膚から筋肉組織表面までの距離 D を仮定すると、指の曲げ運動に伴って筋肉が収縮するとこの距離 D は狭まり、検出される光量が増加する。ここでは、距離 D が変化しても皮下組織中の後方散乱光よりも筋肉組織表面で反射される光強度が十分大きいので、結果としてフォトトランジスタで検出される光強度は筋肉の収縮率を表しているとみなせる。この原理により、手指の屈伸に伴って変化する反射光強度から筋活動を推定できる。赤外光は生体の光学窓 ($600\text{--}1300\text{nm}$) の波長域であり、生体を透過しやすく、皮膚から入射された赤外光は筋肉組織表面に届きやすい。以上のような手法を用いることで、手指運動に伴う関節角度変化や種々のパラメータを推定できると考えられる。本実験の赤外光センサには5つのセンサユニットが取り付けられており、同時に5箇所 (A~E) の赤外光の反射量を測定することができる(図8)。1ユニットは1つのフォトトランジスタと2つの赤外線LEDで構成されており、ユニット間の距離は $6[\text{mm}]$ として赤外光を通さないフィラメントを用いて固定治具を作成し、赤外線LEDおよびフォトトランジスタを取り付ける。使用する光源は赤外線リモコンなどに使われる波長 $940[\text{nm}]$ の砲弾型赤外線LED (OSIR5113A) を使い、検出器は同じく $940[\text{nm}]$ を中心に感度を持つ砲弾型フォトトランジスタ (L-51ROPT1D1) を用意し、光源-検出器間距離 d は $6[\text{mm}]$ とする。指の屈曲運動に関連する前腕部の浅指屈筋・深指屈筋の筋活動を計測することを目的として、感度が最も良い照射角度を評価するために、図8下に示す赤外光LEDの照射角度 α は、 $5, 10, 15[\text{deg}]$ の3種としたLEDを用意する。指に関する筋肉の動きと赤外光の関係性の求めるため、図9のように手指の屈伸動作の浅指屈筋・深指屈筋に相当する箇所、赤外線センサを装着する。

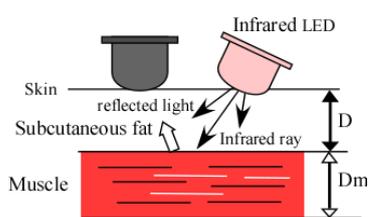


図7. 赤外線筋活動センサの原理

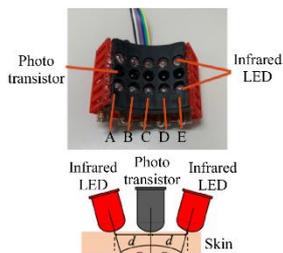


図8. 赤外線筋活動センサ

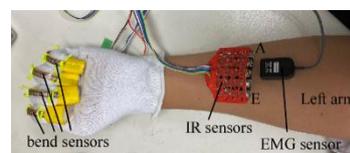


図9. 測定環境

4. 研究成果

素材の違い・ワイヤの張り方による把持力の違い：パワーアシストグローブ1号機（図10）における素材の違いおよびワイヤの貼り方の結果を図11に示す。被験者A-Cのそれぞれのパワーアシストグローブの握力を見比べてみると、革手袋のピアノ線でクロスさせるの組み合わせが1番大きな力が出ていることがわかる。また、革手袋と軍手の時の握力を比べると、全体的に革手袋の方が大きな力が出ていることがわかる。そして、革紐とピアノ線を比べるとピアノ線の方が大きな力を伝達できたことから、ワイヤの張り方で比較すると、力の大きさの違いが顕著には出ていないが(b)クロスの方が強い。次に、可動範囲の比較した場合握力の強さでは(b)クロスの方が優れていたが、可動域で見た際は(a)ストレートの方がより深く曲がることがわかった。このことから、革手袋、ピアノ線、張り方は(b)クロスの組み合わせが強い力を出すことがわかった。しかし、小さいものを把持するときなどは(a)ストレートの張り方が望ましく、今後実際に物を持った時の力の分散も確認する必要がある。



図10. パワーアシストグローブ1号機

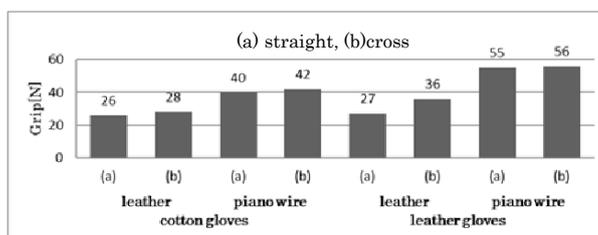


図11. 素材の違い・ワイヤの張り方による把持力の違い

3Dプリンタを用いた装着者に適応するパワーアシストグローブと筋電位パワーアシスト：パワーアシストグローブ2号機（図12）を用いてグローブの握力の計測、それと同時に把持動作のときの筋電位の計測を行う。測定器具としてひずみゲージによる握力計、腕の尺側手根筋のIEMGを測定するための筋電センサ、IEMGの波形の状態を確認するオシロスコープを用いる。実験はグローブを手指、筋電センサを腕に装着し、Arduinoのシリアルモニタに表示される計測値を見ながら目標握力60Nになるように握力計を把持する。まず、被験者が力を一切入れずに、握力計を握った時のグローブ単体の最大アシスト力を測定する。次に、グローブと筋電センサを装着したまま、パワーアシストされた状態で複数回把持する動作を行い、把持した時のIEMGと握力の時間経過による値の変化を測定する。まず、グローブ単体の最大握力を測定した結果は36Nであり、これは十分な握力を得られた。次に、図13に複数回把持する動作を行い被験者の握力がパワーアシストされていない時（図13左）とサーボモータによるパワーアシストがされている時（図13右）のIEMGと握力の関係を示す。図13のIEMGを比べると、被験者自身の把持動作ではパワーアシストがある状態（図13右）よりも波形の最大値が全体的に大きくなっている。しかし、パワーアシストがある状態では波形の最大値が少し小さくなっている。ここでパワーアシストがなく、被験者自身の把持状態とパワーアシストされた把持状態のIEMGを比較し、150[mV]を最小値として、最大値までの平均変化量を計算した。パワーアシストがなく、被験者自身の平均変化量が648.4[mV]であり、パワーアシストされた状態での平均変化量は540.4[mV]であった。これより、パワーグローブを装着すると把持動作の際の筋電信号の量が16.7%減少したことから、アシストできていることがわかる。



図12. パワーアシストグローブ2号機

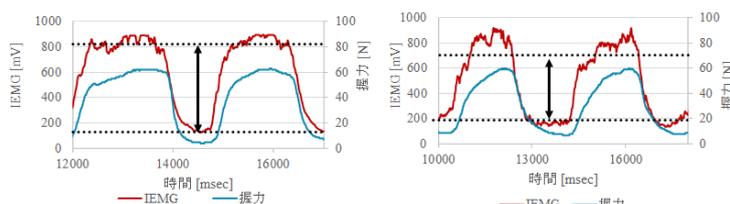


図13. 2号機による筋電位を用いたパワーアシスト制御（左図：アシストなし、右図：アシストあり）

腱構造を模したパワーアシストグローブ：人間の腱構造を模したパワーアシストグローブを開発するために腱構造を模したワイヤサポータ、それを装着するためのグローブ、そして、ワイヤを牽引するための牽引機構を作成し、人間の腱構造を模したパワーアシストグローブを作成した。図14にパワーアシストグローブで物を掴んでいる様子を示す。その結果、ペンやペットボトルなど日常的に手にしている物は掴むことが出来たが、ペンを掴み、字を書くといった細かい動きは再現することが出来なかった。今後、このパワーアシストグローブを用いてパワーアシスト制御を行い、アシスト性能の有効性を検証する必要がある。



図14. パワーアシストグローブ3号機

指の動きと赤外光の関係：指の動きと赤外光の関係および切削角度の異なる3種のセンサで指の形状による筋活動の変化のばらつきを確認する。図15に、切削したLEDを用いた測定の結果として(a)に中指・薬指の角度、(b)、(c)、(d)にそれぞれ照射角度5、10、15[deg]の10試行した時の赤外光反射によるフォトフレクタの電圧の時間変化及び平均を示す。手を"グー"の形にする10秒前を基線としている。照射角度5[deg]では、"グー"の形にする時に減少し、緩やかに増加し、"チョキ"の形にするとともに上昇、そして再び"パー"の形にした際に減少していることがわかる。次に、照射角度10[deg]では、"チョキ"の形にした際に大きく上昇し、"パー"の形にした際に減少し、薬指の角度の変化と似た形が得られた。そして、照射角度15[deg]では、"グー"の形の状態で緩やかに上昇し、"チョキ"の形にした際に大きく減少し、中指と角度の変化に似ている結果となった。また、どの照射角度においても時間の経過と共に基線のずれが発生し、動作をする前とした後ではフォトトランジスタの出力にばらつきが見られた。

筋電位と赤外光センサの比較：表面筋電位は動かそうとする筋肉の強さに応じて、振幅が大きくなる性質を持っている。したがって、指に関する筋肉の表面筋電位と赤外光センサとの比較を行った結果を図16に示す。図16(a)は指の角度変化を表し、手を開いている状態を0度として、開始5秒のタイミングで指を5秒間曲げていき、約5秒間握りの状態を維持し、15秒過ぎたところで手を開いているのがわかる。また、黒枠で示した部分が強く握っている期間である。次に、図16(b)は中指に関する表面筋電位を表している。握っている期間で筋肉が力を発揮しているため、その振幅が大きくなっていることが見られた。

赤外線LEDの照射角度は照射された赤外光が皮下組織を通り、筋肉に当たりフォトトランジスタに跳ね返るまでの焦点距離が関係しており、照射角度が浅いより深いところに照射することになる。手に関する筋肉は、複数の筋肉が相互に作用して指を動かしており、筋肉同士が重なって三次元いるため、照射角度によって関連する指の動きが違ってくると考えられる。動作の前後において基線がずれる要因として、皮下組織の水分量の変化にも影響を受けることから、手を開く"パー"の動作から手を握る"グー"の動作において、手の方の水分が計測点より肘側に移動していき、その影響から緩やかな電位変化として現れる。また、筋肉が発揮できる力は収縮のみであるため、収縮した筋肉が元の形に戻るためには、伸ばす必要がある。赤外光で筋肉の形状を見ると、指の動きに対してヒステリシスをもった変化を見せると考えられる。

重回帰モデルによる指先動作推定：赤外光筋活動センサを入力とした手指の角度の重回帰モデルを作成し、手指屈伸時における筋活動から指の曲げ角度を推定した。図17(a)、(b)に照射角度5[deg]の時の人差し指の角度と重回帰分析によって推定した人差し指の角度の比較を示す。表1に照射角度を変えた時の実際の手指角度と推定の手指角度の相関係数をそれぞれ示す。ここで θ_i が示指の角度、 θ_r が薬指の角度である。これにより、指の運動速度に関わらず指の角度との間に強い相関が見られ、指の角度を相関係数が最大で0.93の推定結果が得られた。

本研究では、パワーアシストシステム構築のために、筋肉の動きを赤外線の反射光強度で推定する手法を提案した。今後は、より定量的な筋活動評価手法へ発展させ、パワーアシストグローブ制御のためのフィードバック信号への応用を検討する。

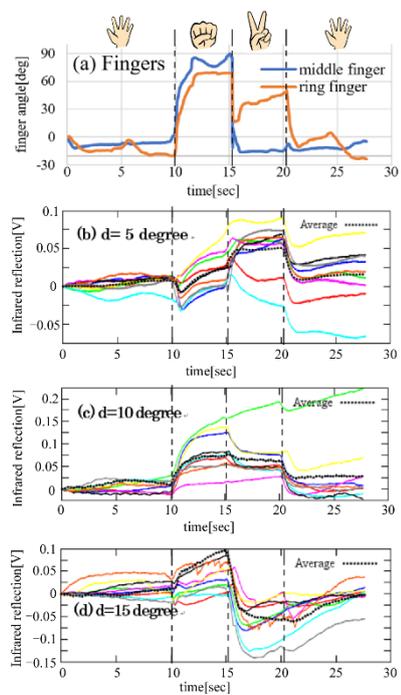


図15. 指の動きと赤外光

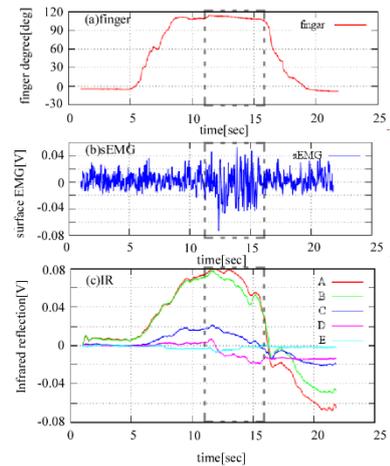


図16. 筋電位と赤外光センサの比較(10度)

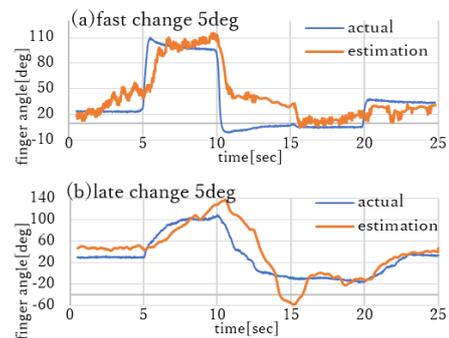


図17. 赤外光筋活動センサを用いた薬指の角度推定

表1. 照射角度を変えた時の指角度(θ_i :薬指, θ_r :示指)と推定の手指角度の相関係数

Infrared Finger	5deg	10deg	15deg
θ_i	-0.49	0.79	0.88
θ_r	0.9	0.93	0.78

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 濱口岳登, 門田伊弘, 宮田剛, 吉岡将孝
2. 発表標題 赤外光を用いて筋活動から指先運動推定を目指す研究
3. 学会等名 計測自動制御学会四国支部学術講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱口岳登, 門田伊弘, 宮田剛, 吉岡将孝
2. 発表標題 指先動作推定のための赤外光を用いた筋活動センサに関する研究
3. 学会等名 日本福祉工学会第22回総会・第23回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱口岳登, 高松裕大, 北村瞭, 吉岡将孝
2. 発表標題 赤外線センサにおける筋活動の特徴抽出
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱口岳登, 山添健太, 吉岡将孝
2. 発表標題 赤外線センサを用いたパワーアシストグローブの開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱口岳登、高松裕大、北村瞭、吉岡将孝
2. 発表標題 赤外線筋活動センサを用いたパワーアシストグローブに関する研究
3. 学会等名 LIFE2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉岡将孝、濱口岳登
2. 発表標題 体内照射型赤外光筋活動センサによる指先動作の推定
3. 学会等名 ロボティクスシンポジウム2021
4. 発表年 2021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
---------	---------