

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：82612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K09265

研究課題名（和文）先天性横軸形成障害に対する筋電義手の開発

研究課題名（英文）Development of myoelectric prosthesis for congenital transverse failure

研究代表者

高木 岳彦（Takagi, Takehiko）

国立研究開発法人国立成育医療研究センター・小児外科系専門診療部・部長

研究者番号：00348682

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）：先天的上肢欠損では、もともと手関節や手指を動かした経験はなく末梢までは神経が通っていたということではないが、可能な限り自分が手指を動かすと指令を加えたときに義手の手指を動かせるようにしたい。この問題を解決すべくパターン認識を含む個性適応型制御（AI技術）を搭載した筋電義手、ならびに特殊形成不全に対しては位置センサ搭載電動義手について開発を進め、実際に手関節の肢位によらず義手の手指の屈伸運動が可能であることを確認し、特殊形成不全においては位置センサ搭載電動義手を開発することで、残存する指を動かすだけで義手を作動可能となったため、乳幼児や小児でも容易に理解できる義手となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

手指欠損に対する足趾の移植は整容的に国内では受け入れ難く、新たな治療法を模索して筋電義手の研究の継続の必要性を感じていた。工学技術と末梢神経外科医としての技術を融合させて、より自分の手指のような感覚を感じられるような機能を有する装置を目指してきたが、先天性の欠損肢の場合、患者ごとに異なる表面筋電パターンを認識させて人の動きを義手が学習するシステムを搭載することで、また特殊形成不全の場合、位置センサ搭載電動義手を開発することで、小児でも容易に理解できる義手となり、機能面での改善を図ることでより受け入れやすいものとなったと考える。

研究成果の概要（英文）：The patients with congenital upper limb failures had no experiences in moving the wrist or fingers with the motor nerves. However, we would like them to move the prosthetic hand and fingers when they give the command to move the hand and fingers. To solve the problem, we developed myoelectric prosthetic hands equipped with individual adaptive control including pattern recognition (with AI technology) and electric prosthetic hands equipped with sensors that detect the position for special types of failures such as phocomelia. We confirmed that flexion and extension of the fingers of the prosthetic hands was possible regardless of the position of the wrist. In the case of phocomelia, the developed prosthetic hands made it possible to operate for even children can easily understand how to move.

研究分野：整形外科

キーワード：義手 上肢形成不全

1. 研究開始当初の背景

上肢の先天異常では通常、装具治療、手術治療で形態の改善を図る。例えば重症な母指形成不全において欧米では母指をあきらめて示指を母指化して手の機能を再建するが、われわれは母指の温存を希望する両親の期待に応えるべく足部の骨の移植や筋腱移行を行いながら母指の温存に努めて手術による再建を行っている(図1)。しかし完全に上肢が欠損の状態となっている場合、手術治療では限界がある。そこで手の機能を外部装置に置き換えて「動く手」を提供する義手、特に断端部に存在する筋の表面筋電位を感知して手を動かす筋電義手に着目し、より直感的な動作による義手操作を目指してユーザビリティの向上につなげたい。

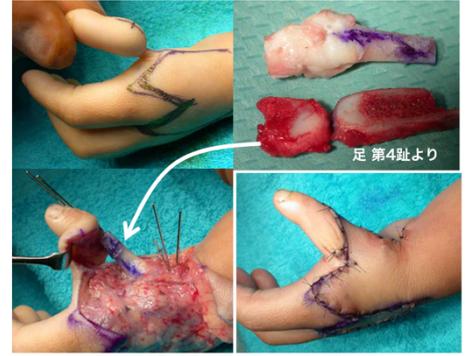


図1 母指形成不全(浮遊母指)の母指再建手術
欧米ではこの高度の低形成となった母指をあきらめて示指を母指化して手の機能を再建するが、われわれは母指の温存を希望する両親の期待に応えるべく足部の骨の移植や筋腱移行を行いながら母指の再建に努めている。

もともと手指を動かしていた筋も切断高位が近位に及ぶと欠損状態となる。しかしそれらの筋を支配していた神経は上位から走行しているため切断端として残存している。断端部に残されている他の筋にそれらの神経を移行させて手関節や手指の作用を持たせることで、直感的に手指を伸展すると指令をくだせばその筋が収縮するようになり、その表面筋電より義手の手指が伸展するようになる。これは

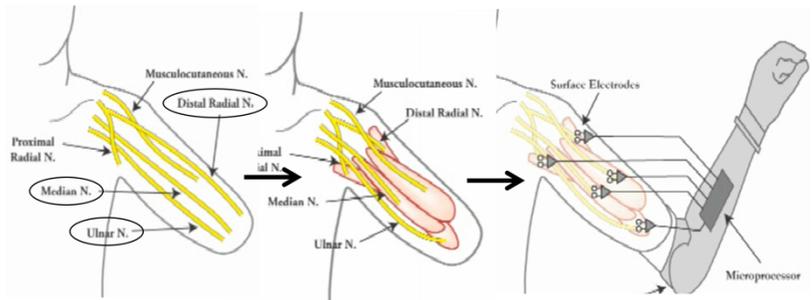


図2 TMRの概念図

断端部に残された筋に手指の運動を支配する神経を移行させてその筋に手指の作用を持たせることで、直感的に手指を伸展すると指令をくだせばその筋が収縮するようになり、その表面筋電より義手の手指が伸展するようになる。

Targeted muscle

reinnervation (TMR) と呼ばれる概念でわれわれも上腕切断の患者に適応してきたし、直感的な動作による義手操作を模索してきた(図2)。

2. 研究の目的

先天的な欠損の場合、もともと手関節や手指を動かした経験はなく、末梢までは神経が通っていたということはない。そのためもともと手関節や手指に走っていた神経を神経移行させて断端の筋に手指の動きを担わせることは現実的ではない。でもやはり可能な限り自分が手指を動かすと指令を加えたときに義手の手指を動かせるようにしたい。それらの問題を解決すべく 1. AI 技術を搭載した筋電義手、2. 特殊形成不全に対応した位置センサ搭載電動義手の2点に絞り開発を進めた。

3. 研究の方法

1. パターン認識を含む個性適応型制御 (AI 技術) を搭載した筋電義手

先天性手指形成不全患者の手関節屈伸、手指屈伸における超音波診断装置による筋収縮所見を確認し、さらに手関節3動作(安静・掌屈・背屈)を行い、それぞれの肢位で手指3動作(安静・握り[手指屈曲]・開き[手指伸展])を行う計9動作を表面筋電位をとり筋収縮の位置と筋収縮の強さをプロットして、各々の動作が独立して筋電信号を取得できるか確認した。

2. 特殊形成不全に対応した位置センサ搭載電動義手

特殊形成不全の一形態であるフォコメリア患者の手指屈伸動作を利用した位置センサ搭載電動義手を開発し、その使用状況を確認した。

4. 研究成果

1. パターン認識を含む個性適応型制御 (AI 技術) を搭載した筋電義手

欧米で普及している従来の筋電義手は、筋肉が収縮する際に発生する微弱な電流を、ソケット内側に配置した電極で採取し、ある閾値を超えると義手が動く、という仕組みであった。要するに人が義手の電極の直下にある筋を動かす訓練が必要で、義手に自分の動きを合わせて行く必要があった。でもやはり可能な限り自分が手指を動かすと指令を加えたときに義手の手指を動かせるようにしたかった。従来は人が義手の電極にある筋を動かす(義手に自分の動きを合わせる)訓練が必要であったが、患者ごとに表面筋電パターンが異なるため、そのパターンを認識させて、人の動きを義手が学習するシステムを搭載を検討した (AI を用いた『機械学習』の導入)。

○先天性手指形成不全患者の手関節屈伸、手指屈伸における超音波診断装置による筋収縮所見

先天性手指形成不全の患者はもともと手関節の屈伸は可能で手指が欠損しているため、手関節の屈伸によらない形で筋電義手の手指を動かせるかどうかを検討した。まずは予備実験として当該患者の手関節を屈伸させたとき、手指を屈伸させようとしたときで超音波診断装置を当て筋収縮を確認した。その結果、手関節の屈伸と手指屈伸では別の筋における収縮が認められ、生下時より手指の屈伸を行ってこなかった当該患者でも別の筋が働くことが理解できた。手関節屈伸と手指屈伸に働く筋は本来同様の起始部から出ているためほぼ同じ筋で作用する可能性があったが、これにより手関節の屈伸によらない力で筋電義手の手指を動かせる可能性が示唆された。

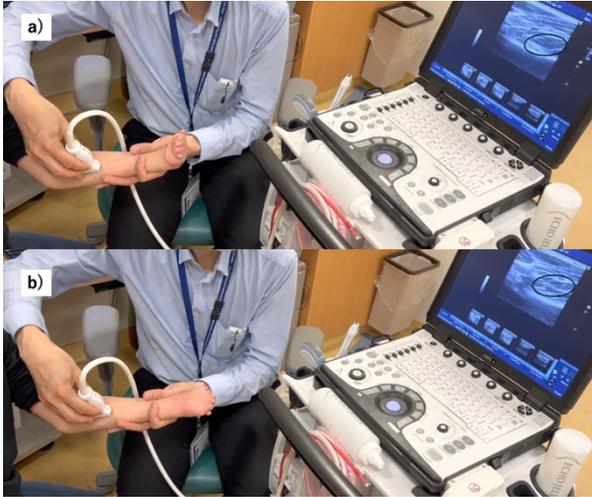


図3. 先天性手指形成不全患者の手関節屈伸、手指屈伸における超音波診断による筋収縮所見

a) 手関節を屈伸させた時の筋収縮所見
b) 手指を屈伸させようとした時の筋収縮所見
それぞれ別々の筋が働いており（黒楕円）生下時より手指の屈伸を行ってこなかった当該患者でも別の筋が働くことが理解できた。これにより手関節の屈伸によらない力で筋電義手の手指を動かせる可能性が示唆された。

○先天性手指形成不全患者の手関節屈伸、手指屈伸における表面筋電図による筋収縮所見

この定量評価をすべく当該先天性手指形成不全患者に対し手関節3動作（安静・掌屈・背屈）を行い、それぞれの肢位で手指3動作（安静・握り[手指屈曲]・開き[手指伸展]）を行う計9動作を表面筋電位をとり筋収縮の位置と筋収縮の強さをプロットした。理想的には9動作各々筋の位置、筋収縮力ともに別々にプロットされるのがよいが、概ねこの傾向に従った。

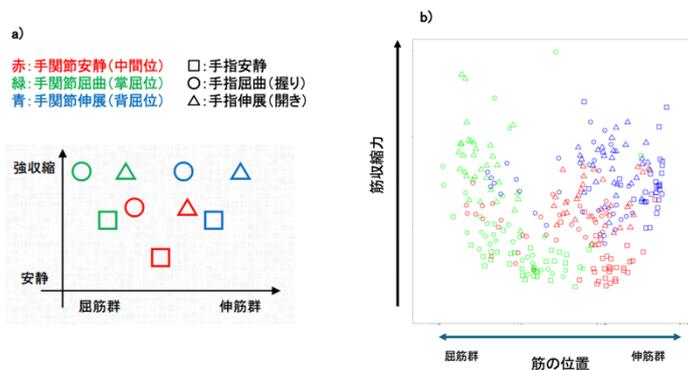


図4. 手関節屈伸、手指屈伸における表面筋電位による筋収縮所見
a) 安静（赤□）では筋の位置は屈筋群伸筋群の中間の位置に筋収縮のほぼないところにプロットされ、それが背屈されると右上のほうに移動する（青□、青△）ようになる。
b) 実際の所見では概ねこの傾向に従った。

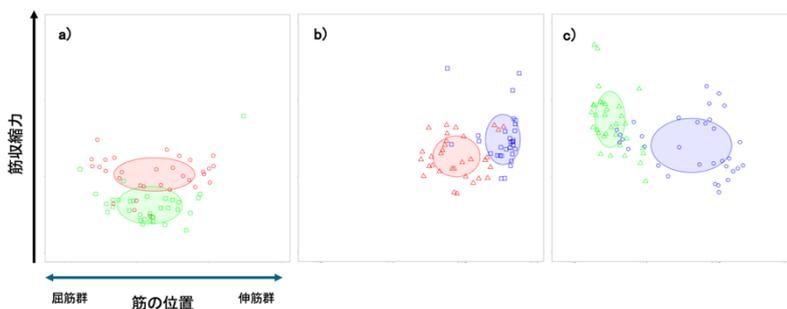


図5. 類似する動作同士の表面筋電位による筋収縮所見

a) 手関節安静-手指屈曲（赤）と手関節屈伸-手指安静（緑）
b) 手関節安静-手指伸展（赤）と手関節伸展-手指安静（青）
c) 手関節屈伸-手指伸展（緑）と手関節伸展-手指屈曲（青）

図4b) より以上の動作のみを抽出してみたところ、それぞれの筋活動がほぼ異なっていることが確認できた。

1. 筋電義手開発～パターン認識を含む個性適応型制御技術を搭載した義手の構築～

以上の結果より手関節の肢位によらず独立して手指屈伸運動が可能であることが確認された。その上で、従来は人が義手の電極にある筋を動かす（義手に自分の動きを合わせる）訓練が必要であったが、患者ごとに表面筋電パターンが異なるため、人の動きを義手が学習する（義手が自分の動きに合わせる）AI 技術を搭載した筋電義手を開発し、実際に手関節の肢位によらず義手の手指の屈伸運動が可能であることを確認した。具体的にはこの筋電義手に手指の屈伸運動の筋電パターンを覚えこませ、いざ筋電義手を装着した際に「指を握る」と指令を加えたときに手指屈曲の表面筋電位が発生しそれにより実際の義手の手指が握る動作に入ることになる。そうすることで、義手そのものに人の筋電位を人のくせを学習させてしまいそのくせをもって義手が動くので、機能面でもよりこのタイプの義手が自分にフィットしたものとなることが示唆された。

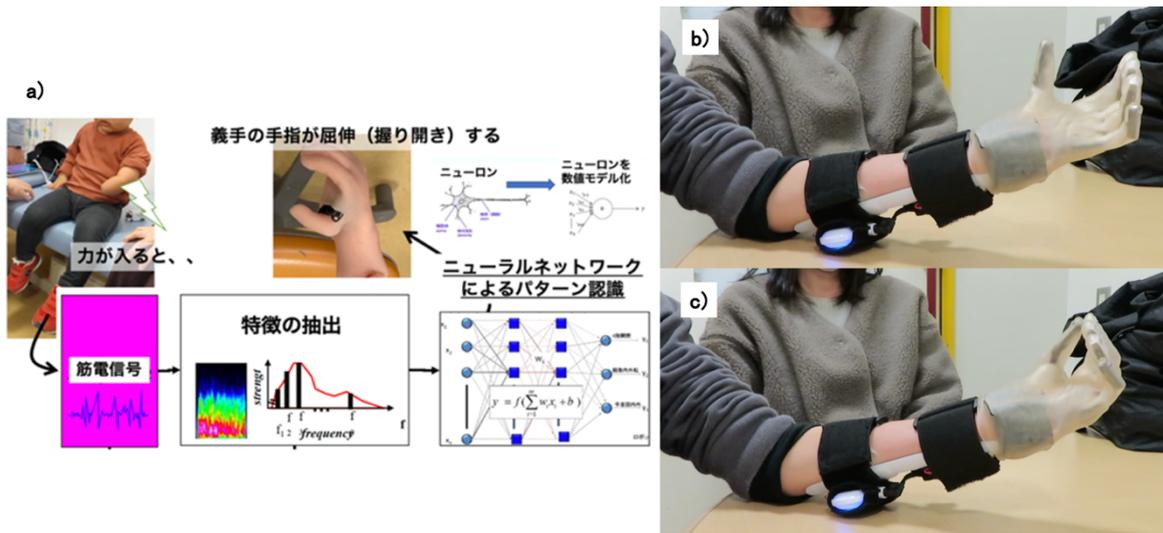


図 6. 先天性手指形成不全患者の手指屈伸動作に伴った筋電義手手指屈伸運動

- a) AI義手の仕組み。筋電信号が入るとその特徴を抽出し、ニューラルネットワークによるパターン認識を行って実際の筋電義手の手指が屈伸する。
- b) 先天性手指形成不全患者にまず手指屈伸運動をこの義手に覚えこませ、「指を伸ばす」と指令を加えたときに義手の手指が伸展した。
- c) 同様に「指を曲げる」と指令を加えたときに義手の手指が屈曲した。そうすることで、義手そのものに人の筋電位を人のくせを学習させてしまいそのくせをもって義手が動くので、機能面でもよりこのタイプの義手が自分にフィットしたものとなることが示唆された。

2. 特殊形成不全に対応した位置センサ搭載電動義手

1. フォコモリア患者の手指屈伸動作を利用した位置センサ搭載電動義手開発

1970年代から80年代にかけて、義手は電動化されてきたが、特に乳幼児や小児に対しては、その重さや操作性の悪さから普及しなかった。しかし、技術の発達に伴い、義手の小型化・軽量化が進んできたため、近接センサによって制御される新しい電動義手を開発した。この電動義手は図7に示すようにソケット、受動アーム、ロボットハンド、コントローラ、近接センサ、バッテリーで構成され、その重量はソケットを含めて480gとなった。患者が直接接触することなく、残存する指を動かすだけで作動可能となったため、乳幼児や小児でも容易に理解することができる義手となった。

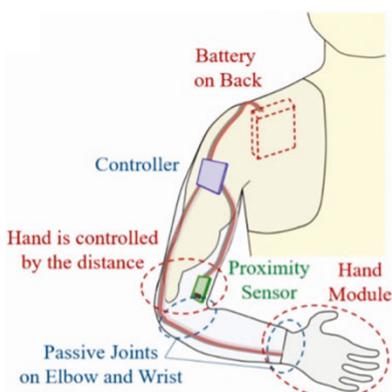


図 7. 今回開発した手指屈伸動作を利用した位置センサ搭載電動義手 (Yamanoi Y, Takagi T, Yokoi H. J Hand Surg-Eur 2023 より)

2. 位置センサ搭載電動義手の使用状況

肩は低形成であったが、指の動きは良好であった（図 8a, b）。初めて義手を装着したとき、残存指を動かすことに抵抗されたため、ソケットのセンサーの周囲に大きな穴を開け、介助を受けながら義手の操作をマスターするように促した（図 8c, d）。一度メカニズムを理解すると、義手で物を掴んだり、義手でお菓子の袋を持ち健側の手で口に運んだり、義手でビーズを持ち紐を通したり、両手でトレイを持ったりと、両手での協調動作を促すことがこれにより可能となった（図 8e）。

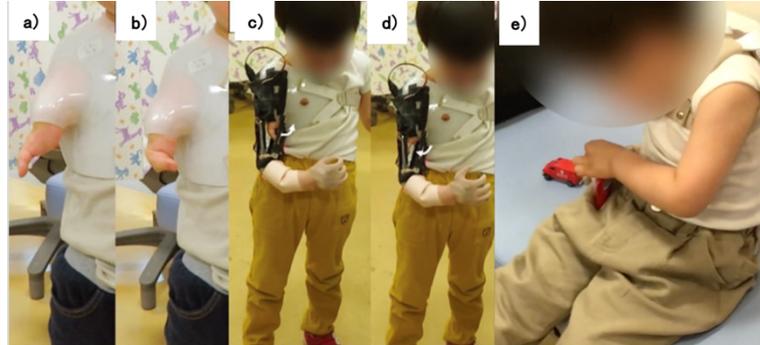


図 8. 位置センサ搭載電動義手の使用状況（Yamanoi Y, Takagi T, Yokoi H. J Hand Surg-Eur 2023 より）

a, b) 残存指の屈伸は良好。

c, d) 残存指を屈曲させて位置センサに近接させることで手指屈曲、伸展させて離すことで手指伸展が可能となった（白矢印）。

e) 義手でお菓子の袋を把持して健側の手でつまみ口に運ぶことが可能であり、両手での協調運動を促せた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 中尾聡一郎, 平井太智, 小野祐真, 山野井佑介, 黒田勇幹, 矢吹佳子, 東郷俊太, 姜銀来, 加藤龍, 高木岳彦, 石原正博, 横井浩史. | 4. 巻 40 |
| 2. 論文標題 先天性上肢欠損のための歯車機構を用いた幼児用義手の手先具の開発 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 日本ロボット学会誌 | 6. 最初と最後の頁 903-914 |
| 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 高木岳彦 | 4. 巻 52 |
| 2. 論文標題 人工の手 電動義手と最近の話題 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 人工臓器 | 6. 最初と最後の頁 1446-1450 |
| 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 無 |
| 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 Yamanoi Yusuke, Takagi Takehiko, Yokoi Hiroshi | 4. 巻 49 |
| 2. 論文標題 Novel prosthesis with proximity sensor for upper extremity phocomelia | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Hand Surgery (European Volume) | 6. 最初と最後の頁 375 ~ 376 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/17531934231209645 | 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 矢吹佳子, 井上祐希, 黒田勇幹, 溝口恒雄, 高木岳彦, 高山真一郎, 横井浩史 | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 2自由度回転対立機構を用いた小児用能動義指の開発と成果 | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 日本機械学会論文集 | 6. 最初と最後の頁 - |
| 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 高木岳彦 | 4. 巻 39 |
| 2. 論文標題 筋電義手の現状と未来 より直感的な筋電義手に向けて | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 日本手外科学会雑誌 | 6. 最初と最後の頁 387-391 |
| 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 - |

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 3件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 高木岳彦, 武谷博明, 林健太郎, 稲葉尚人, 阿南揚子, 関敦仁, 高山真一郎. |
| 2. 発表標題 小児用AI義手開発とさまざまな形成不全に対する義手適応の可能性 |
| 3. 学会等名 第65回日本手外科学会学術集会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高木岳彦, 柳澤聖, 吉田進二, 児玉三彦, 加藤龍. |
| 2. 発表標題 上肢切断患者に対するより直感的なAI筋電義手操作に向けた神経移行術 ~ 選択的神経束移行術とNerve-machine interface ~ |
| 3. 学会等名 第33回日本末梢外科学会学術集会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高木岳彦 |
| 2. 発表標題 Nerve-Machine Interfaceと末梢神経外科 ~ より効果的な筋電義手操作のために ~ |
| 3. 学会等名 第43回末梢神経を語る会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高木岳彦, 横井浩史 |
| 2. 発表標題 小児用のAI義肢開発 ~より直感的な筋電義手操作に向けて~ |
| 3. 学会等名 第124回日本小児科学会学術集会(招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高木岳彦 |
| 2. 発表標題 上腕骨開放骨折後切断症例に対するAI義手 -神経の選定と再支配、より効率的な多自由度筋電義手操作のために- |
| 3. 学会等名 第47回日本骨折治療学会学術集会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高木岳彦 |
| 2. 発表標題 小児用のAI義手開発とさまざまな形成不全に対する電動義手適応の可能性 ~より直感的な義手操作のために~. |
| 3. 学会等名 第13回日本手関節外科ワークショップ(招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高木岳彦, 高山真一郎, 関敦仁, 江口佳孝, 阿南揚子, 中川誉之, 福田良嗣, 稲葉尚人, 林健太郎, 秋葉絢子 |
| 2. 発表標題 先天性上肢形成不全に対する義手開発 |
| 3. 学会等名 第32回日本小児整形外科学会学術集会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takagi Takehiko |
| 2. 発表標題 Prostheses & upper limb deficiencies. |
| 3. 学会等名 8th Middle East Pediatric Orthopaedic Society (MEPOS) conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takagi Takehiko, Yamanoi Yusuke, Yokoi Hiroshi |
| 2. 発表標題 Phocomelia and the motor-powered hand prosthesis |
| 3. 学会等名 2023 World Symposium on Congenital Malformations of the Hand and Upper Limb (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takagi Takehiko |
| 2. 発表標題 Current concepts for congenital missing hands -surgeries and prostheses- |
| 3. 学会等名 16th National Pediatric Orthopedic Surgery Conference 2023 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高木 岳彦, 関 敦仁, 高山 真一郎 |
| 2. 発表標題 先天性上肢形成不全とAI義手 - その可能性と現状 - |
| 3. 学会等名 第66回日本手外科学会学術集会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 高木 岳彦 |
| 2. 発表標題 先天性上肢形成不全と義手 - その可能性と現状 - |
| 3. 学会等名 第34回日本末梢神経学会学術集会 |
| 4. 発表年 2023年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| AIホスピタル～国立成育医療研究センターの取り組み～ https://www.youtube.com/watch?v=vLXlIpm3198&t=137s |
|---|

| 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 |
|---------|---------|
|---------|---------|