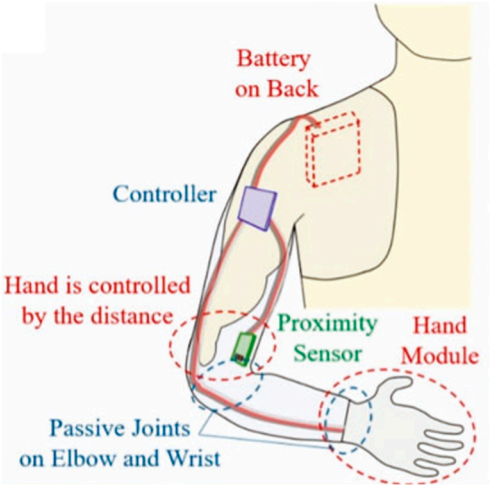
63　先天性上肢欠損に対する操作性向上を考えたAI義手開発	高木　岳彦

【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。

【方法】1. 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。

【結果】1. AI 技術を搭載した筋電義手：超音波診断装置により、手関節の屈曲と手指屈曲では別の筋における収縮が確認され、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。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ところ、各々独立した筋収縮力、筋電の位置を確認した。さらに、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。2. 特殊形成不全に対応した位置センサ搭載電動義手：この電動義手は下の図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、バッテリで構成され、その重量はソケットを含めて 480 g 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。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ところ、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。

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



（J Hand Surg Eur Vol. 2024 Mar;49（3）:375-6 より引用）

63. 先天性上肢欠損に対する操作性向上を考えたAI義手開発

高木　岳彦

国立成育医療研究センター 小児外科系専門診療部 整形外科

Key words：筋電義手，機械学習，電動義手，位置センサ，先天性上肢欠損

緒　言

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［2］が、我々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［3］。しかしながら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。

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Targeted muscle reinnervation（TMR）と呼ばれる概念で我々も上腕切断の患者に適応してきた［4］し、直感的な動作による義手操作を模索してきた。

しかし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。

方法および結果

1．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の搭載を検討した（AI を用いた『機械学習』の導入）。

1）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（図 1）。その結果、手関節の屈曲と手指屈曲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。手関節屈曲と手指屈曲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。

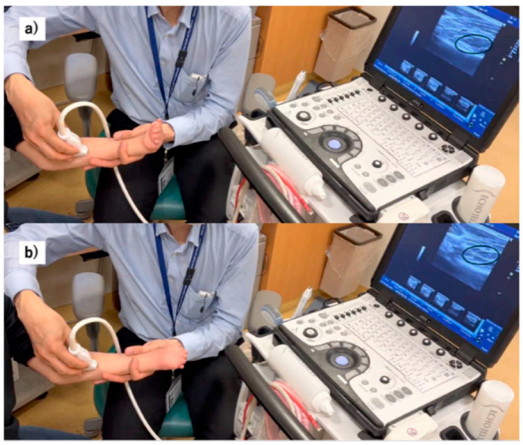


図 1. 先天性手指形成不全患者の手関節屈曲、手指屈曲における超音波診断装置による筋収縮所見
a）手関節を屈曲させた時の筋収縮所見。
b）手指を屈曲させようとした時の筋収縮所見。
それぞれ別々の筋が働いており（黒楕円）生下時より手指の屈伸を行ってこなかった当該患者でも別の筋が働くことが理解できた。これにより手関節の屈伸によらない力で筋電義手の手指を動かせる可能性が示唆された。

2）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（図 2、3）。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、実際の所見では概ねこの傾向に従った。

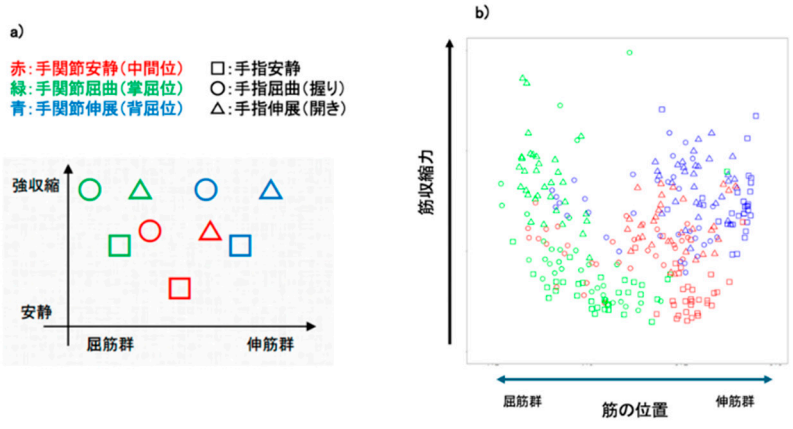


図 2. 先天性手指形成不全患者の手関節屈伸、手指屈伸における表面筋電位による筋収縮所見
a） 理想的には 9 動作各々筋の位置、筋収縮力ともに別々にプロットされるのがよい。例えば安静（赤□）では筋の位置は屈筋群伸筋群の中間の位置に筋収縮のほぼないところにプロットされ、それが背屈されると右上のほうに移動する（青□、青△）ようになる。
b） 実際の所見では概ねこの傾向に従った。

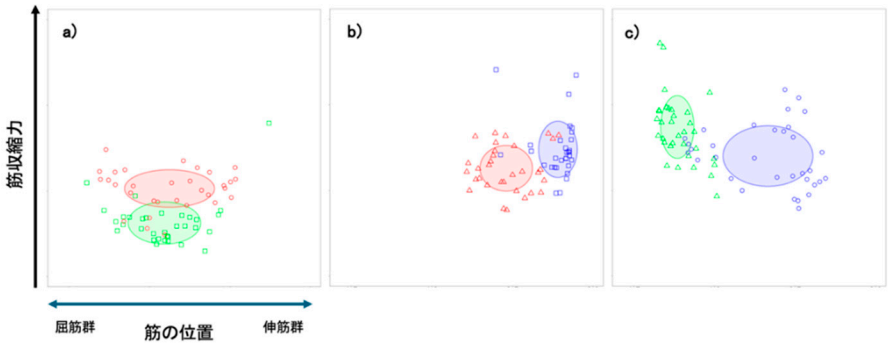


図 3. 先天性手指形成不全患者の類似する動作同士の表面筋電位による筋収縮所見

a） 手関節安静-手指屈曲（赤）と手関節屈曲-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） 手関節屈曲-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。

3）筋電義手開発～AI 技術を搭載した AI 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（図 4）。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。

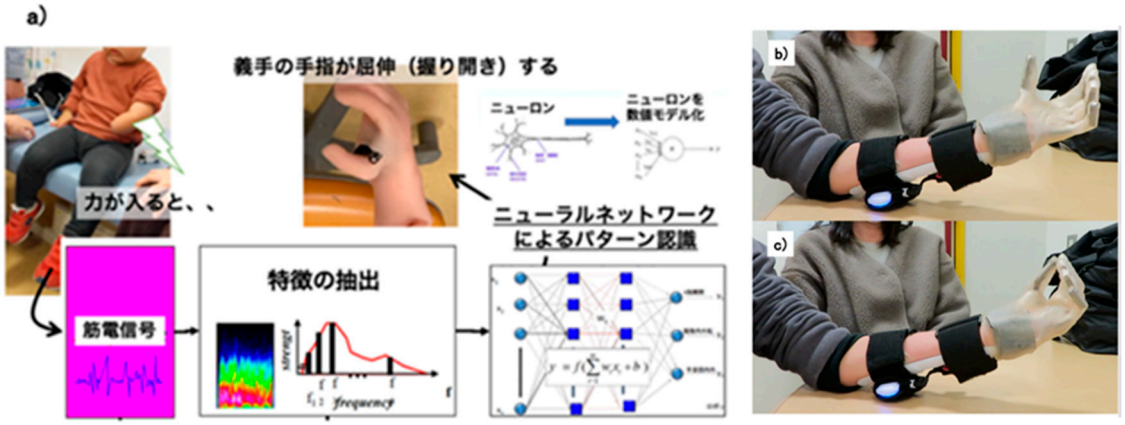


図 4. 先天性手指形成不全患者の手指屈伸動作に伴った筋電義手手指屈伸運動

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］

中枢の上腕、前腕欠損よりも末梢の手関節、手指欠損患者が多くを占める現状が明らかとなったが、これら末梢の欠損に対しては既存の筋電義手のモーター駆動部が大きすぎて小児には使用できなかったり、そもそも手指欠損に対応できる義手がなかったりと技術的に解決されていないことが問題となっていた。種々の形成不全にも対応できるようなセンサを工夫した電動義手や、一部手指が残存していれば残存関節機能を活用した能動義手を開発することを目標とした。

例えばフォコメリアと呼ばれる胸部あるいは上腕骨に直接手部が付着する病態を有する形成不全［5］に対しては上肢全体の高度な形成不全こそあるものの手指の動きは保持されていた。そのためこの動きに対して近接センサを使用して動作意図を検出する機構を搭載した義手を開発し玩具の把持を含めた義手の手指屈伸動作を検討した。

1）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 5 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、バッテリで構成され、その重量はソケットを含めて 480 g 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。

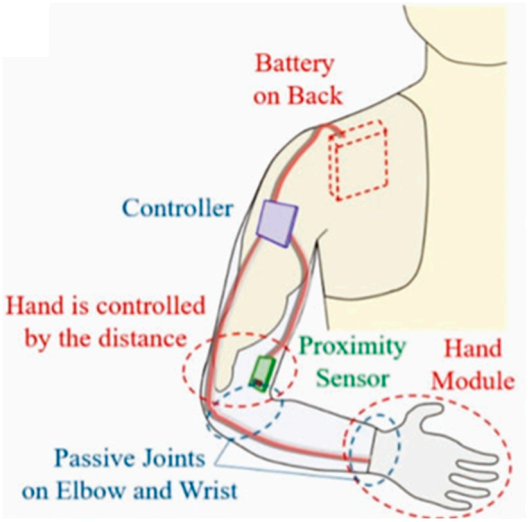


図 5. 今回開発した手指屈伸動作を利用した位置センサ搭載電動義手（［1］より引用）

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 6a、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 6c、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ながら紐を通したり、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 6e）。

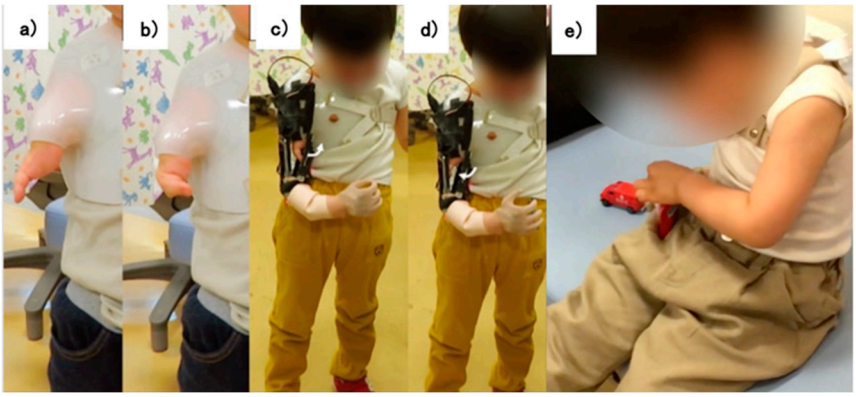


図 6. 位置センサ搭載電動義手の使用状況（［1］より引用）
a、b）残存指の屈伸は良好。
c、d）残存指を屈曲させて位置センサに近接させることで手指屈曲、伸展させて離すことで手指伸展が可能となった（白矢印）。
e）義手でお菓子の袋を把持して健側の手でつまみ口に運ぶことが可能であり、両手での協調運動を促せた。

考　察

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させて、手の力の入れ具合によってその筋活動を識別して、その個人の筋電の特徴に合わせて、そのまま義手が動いてくれる。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、機能面でもより義手が自分にフィットしたものとなる。ただしこのような筋電義手は上腕、前腕欠損に良い適応となるが、実際には末梢の手関節、手指欠損患者が多く、また形成不全の形態も多様である。

そこで、特殊形成不全に対しては電動義手を使用することで、把持と両手の協調運動を習得することができた。最新の位置センサにより、従来の電気義手よりもはるかに小型・軽量な義手を製作することが可能になり、乳幼児でも使用できる可能性がある。さらに、近接センサを使用することで、機械的なスイッチやレバーを使用するために残存指を力強く動かす必要がなくなり、操作がより直感的でわかりやすくなる。これにより、従来よりもはるかに低年齢層での電動義手の使用が可能になるかもしれない。

現実的には海外は筋電義手の普及率が異なるために日本と比べて市場が大きくなるが、全般的に上肢形成不全に対する義手市場は小さいと言える。解決へのアプローチは機構を共通化することである。手の機構部において指の対立・回転に対する機構が共通化可能である。手の機構部のほかにも、筋電センサシステム、装飾用グローブ、支持部などの部品がモジュール化され，組み合わせを自由に行うことによって、電動義手、筋電義手、能動指義手、装飾義手すべての種類の義手が製作可能となってくる。さらにはモジュールを構成する機能部品は一般流通化されているモーターやセンサ，接手などを転用することにより低価格化にも貢献できる。今後は、持続的に利用が可能なように人の成長と発達に寄り添いながら社会生活を支える義手の開発へ繋げ、社会実装に向けて進めていきたい。

共同研究者・謝辞

本研究の共同研究者は、東京理科大学工学部電気工学科の山野井佑介嘱託助教、電気通信大学大学院情報理工学研究科機械知能システム学専攻横井研究室の横井浩史教授、矢吹佳子研究員である。

文　献

1) Yamanoi Y, Takagi T, Yokoi H. Novel prosthesis with proximity sensor for upper extremity phocomelia. J Hand Surg Eur Vol. 2024 Mar;49(3):375-6. PMID: 37882659 DOI: 10.1177/17531934231209645

2) Buck-Gramcko D. Pollicization of the index finger. Method and results in aplasia and hypoplasia of the thumb. J Bone Joint Surg. 1971 Dec;53(8):1605-17. PMID: 5121802

3) Takagi T, Seki A, Takayama S. Functional and Cosmetic Reconstruction of Floating Thumb: A Thumb-preserving Technique. Tech Hand Up Extrem Surg. 2021 Feb 22;25(4):239-44. PMID: 34779421 DOI: 10.1097/BTH.0000000000000341

4) Takagi T, Ogiri Y, Kato R, Kodama M, Yamanoi Y, Nishino W, Masakado Y, Watanabe M. Selective motor fascicle transfer and neural-machine interface: case report. J Neurosurg. 2019 Feb 22;132(3):825-31. PMID: 30797219 DOI: 10.3171/2018.10.JNS181865

5) Goldfarb CA, Manske PR, Busa R, Mills J, Carter P, Ezaki M. Upper-extremity phocomelia reexamined: a longitudinal dysplasia. J Bone Joint Surg Am. 2005 Dec;87(12):2639-48. PMID: 16322613 DOI: 10.2106/JBJS.D.02011