

人工の手—電動義手と最近の話題—

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

高木 岳彦

Takehiko TAKAGI



1. はじめに

先天性横軸形成障害に代表される先天性上肢形成不全や外傷性上肢切断については、実際に整容面での障害のほか、体の対称性を保持しづらい¹⁾、乳児期より上肢を用いて這うことや楽器の演奏等が困難であるなど、文化的な生活を営む上でも障害となる²⁾ため、古くから外科的治療の対象となってきた。

約100年前に考案された、前腕を橈骨と尺骨で二分して挟み機能を獲得するKrukenberg手術³⁾については、これまでも数多くの報告がある⁴⁾が、特に国内では外観上受け入れられにくい。また、手指欠損、手指切断に関しては、古くからマイクロサージャリー技術を駆使した足趾移植⁵⁾も行われているが、足趾を犠牲にするほか、本来手指のあるところに足趾がついていることによる外観上の問題はやはり避けられない。最近では、手の同種移植が先天性の欠損肢にも応用されるようになった⁶⁾が、免疫反応への対応は受け入れ難く、現実的に整容的に指の形の整った手を重視する国内では、欠損肢に足趾の自家移植や手の同種移植をルーチンに適用させるのは困難である。

当センターでは年間250例近くもの四肢の先天異常の手術を行い、国内有数の先天異常を扱うセンターとなっているが、このような先天性横軸形成障害に代表される先天性上肢不全や外傷性上肢切断については、手指機能を工学系の技術を用いて外部装置に置き換える電動義手にて克服可能である⁷⁾と考える。

今回、「人工の手」に着眼し、その可能性について、普段

先天異常手の手術治療に携わっている立場から述べていきたい。

2. Brain-machine interface (BMI) と nerve-machine interface (NMI)

近年、brain-machine interface (BMI) として脳と機械とをつなぐ技術が発達し、脳から直接情報を取り出し、運動機能に置換する方法が試みられている。障害者の神経機能を補助、補完することを目的としたもので、例えば、脳血管障害や筋萎縮性側索硬化症などの患者の脳から信号を取り、ロボットアームを使用してボトルをつかみ、口に近づけ、ストローを通して飲料を飲み、ボトルをテーブルに戻すことまでを可能にしている⁸⁾。脳内に電極を埋めさせる侵襲性のほか、生体適合材料などの基礎的技術の未熟さや識別すべき脳の情報量の膨大さなどの課題もあるが、当該患者の意志伝達手法としてのトピックとなっている。

これが切断肢の場合、このように脳から信号を拾わずとも、神経が切断端まで通っているためその信号を利用して、nerve-machine interface (NMI) として運動機能への置換が可能となる。末梢神経に直接電極を入れて信号を取り出すとなると侵襲を伴うため、末梢神経の支配する筋の表面筋電を利用して、その筋電位を取り出して義手を動かす筋電義手が着目されている。その場合、muscle-machine interface と形容すべきであるが、上肢機能は脳機能の重要な表出手段であり、この筋電義手という人工物で代用する技術を確立していくことは、社会貢献としても重要な意味をもつことになる⁹⁾。

しかしながら、先天性上肢形成不全ならびに外傷性上肢切断の患者にそのまま装着させてもすぐに習得できるものではなく、筋電分離訓練から基礎動作訓練、日常生活動作訓練ならびに就業動作訓練というリハビリテーションが重要になる^{10), 11)}。そのためには、義手をより早期から自分

■ 著者連絡先

国立成育医療研究センター整形外科
(〒157-8535 東京都世田谷区大蔵2-10-1)
E-mail. takagi-t@ncchd.go.jp

のものにするための技術的な工夫も必要になってくる。次に、効率よく義手操作を行うための戦略として取り組んでいる、target muscle reinnervation (TMR) による神経移行手術と学習型筋電義手 [AI (artificial intelligence) 義手] の開発について述べたい。

3. 外傷性上肢切断におけるTMRの実際—より直感的な筋電義手操作に向けて—

前腕高位であれば、手関節・手指や前腕の伸筋回外筋群は上腕骨外側上顆に起始部をもち、屈筋回内筋群は上腕骨内側上顆に起始部をもつため、これらの筋腹は肘関節部～前腕近位部に残存するので、その表面筋電で手関節や手指を動かすことは可能となる。これが上腕部となった場合、上腕二頭筋や上腕三頭筋のような主に肘屈伸の筋のみの残存となるため、これらの筋に手指の屈伸を代用せざるをえなくなる。

そこで、切断肢内の残存神経を手術によって残存筋の支配神経に移行して、神経再支配させることで効率良く筋電義手操作を行えるようにすればよい。こうして提唱された概念が、TMRである¹²⁾。例えば、切断肢に残存した手指伸展を司る橈骨神経を切断肢内の残存筋に移行させて、その筋に手指伸展の作用をもたせる。そうすることで、手指を伸ばすという指令を下せば、その筋が収縮して(その表面筋電を拾って)義手の指が伸展するようになる。もともと手指屈伸や手関節屈伸動作を司っていた神経断端を残存筋に移行させて、上腕切断などの高位切断でも肘屈伸のみならず、手指屈伸、手関節屈伸動作が可能となる。

2007年にKuikenらにより肩離断患者への“targeted reinnervation”がLancet誌に報告され¹²⁾、その後、いくつかの神経移行パターンが紹介されている¹³⁾。また、上腕切断の場合、上腕二頭筋長頭、上腕三頭筋長頭を各々肘屈曲・伸展のために温存し、正中神経を上腕二頭筋短頭、橈骨神経を上腕三頭筋外側頭、尺骨神経を上腕筋に移行する方法が報告されている^{13), 14)}。

しかしながら、ここで大きく2点の問題点が出てくる。1点目は、正中神経などの主要な太い神経と細い筋枝とを縫合するが、径に全くのミスマッチが生じる¹⁵⁾ことである。もう1点は、例えば正中神経には何本かの神経束が含まれるが、円回内筋、橈側手根屈筋、浅指屈筋などを支配する運動線維や、前骨間神経線維として深指屈筋、長母指屈筋などを支配する運動線維、さらには知覚線維が含まれることである。これらをひとまとめに細い筋枝に縫合するため、目的の運動線維が入るか否かは分からないのが実情である。他の主要神経である橈骨神経、尺骨神経についても同

様に考える。

そこでわれわれは、この中の神経束を分けて選択的に移行すれば径も合うようになる上に、目的の神経線維の移行も可能となると考え、selective motor fascicle transferとして主要神経内にあるいくつかの神経束より知覚線維を除外し、運動線維のみを抽出し、この運動線維をさらに分けて移行する方法を考案した¹⁶⁾。そうすることで例えば、正中神経であれば手指屈曲を主に司る前骨間神経線維と前腕回内を主に司る円回内筋線維とを分けて各々上腕二頭筋長頭、上腕筋に移行させ、橈骨神経であれば手指伸展を主に司る後骨間神経線維と前腕回外を主に司る回外筋線維とを分けて各々上腕三頭筋外側頭、内側頭に移行させれば、上腕の筋のみで肘の屈曲・伸展のほか、前腕の回内・回外、手指の屈曲・伸展の計6動作を行うことが可能となり、これについての長期経過例を報告してきた¹⁷⁾。

基本的には腕神経叢損傷などにおける交差神経縫合術と同様、受傷後1年以内が適応と考えるが、さらに手術後神経支配が達成されるまでは半年～1年かかると推定される。その間にバイオフィードバック訓練などが必要であるが、神経支配が達成されて複数動作が可能となる段階となっても、前項に述べた先天性の形成不全肢と同様、まずは装飾義手でソケットに慣れさせ、重さに慣れさせる必要がある。その後少ない動作数から筋電義手動作を確実にこなせるようにしていくことが重要であると考えている。

4. 学習型筋電義手(AI義手)の実際—より直感的な筋電義手操作に向けて—

このような神経移行術を行うことで義手操作の効率性を上げる工夫をしてきたが、先天性上肢形成不全の場合、外傷性上肢切断(後天性)と異なり、末梢にもともと神経が通っていたわけではなく、神経の走行については未知である。そのため、もともと末梢に走っていた神経を移行させて断端の筋に手指の動きを担わせることができず、先天性上肢形成不全患者におけるTMRについては慎重にならざるをえないのが現状である。しかし、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。

従来の筋電義手は、切断端の表面上に置かれた筋電信号を検知して義手の開閉を可能にしている。筋が収縮する際に発生する微弱な電流(表面筋電位)を、ソケット内側に配置した電極で採取し、義手の開閉(屈伸)を可能とする。筋電信号の閾値が設定されているため、電極の直下にある筋電信号がその閾値を超えると義手が閉じる(屈曲する)ようになり、もう一方の電極の直下にある筋電信号がその閾

値を超えると義手が開く(伸展する)という仕組みになっている。そのためには、義手の電極の直下にある特定の筋をうまく動かしていく訓練が必要で、義手に自分の動きを合わせていく必要があるが、実際の手の動きは複雑であり、それを表現するには限界がある。

そこでより直感的な動きを筋電義手にもたせるために、患者が「握る」とイメージした時に切断端に通う神経より生じる筋電パターンの特徴をマイクロコントローラに学習させ、義手の「握る」という動きを生み出すことで、直感的に「握る」とイメージしたときに義手が握る動作を行えるようなパターン認識に基づいた筋電義手の開発が行われてきた。安静、握る、開くの3パターンを始めに義手に学習させることで、その個々人の筋活動に合わせて、どういう筋活動をしたときに握り、どういう筋活動をしたときに開き、ほとんど筋活動がなければ安静にするというパターンを認識して学習してくれるので、自分の意思がより反映されて、その結果、義手を動かすやすくなり、さらには多くの動作が理論上可能となる。つまり、従来型の「義手にその人の動きを合わせる」から「義手がその人の動きに合わせて」ようになる。これにより、従来型の筋電義手よりも習熟時間の短縮につながる可能性がある。

近年、AIとして注目される機械学習は、多くのデータ(経験)から統計的に法則を見つけ、出力に反映する。その概念を筋電義手に組み込んで、義手そのものに人のくせを学習させておき、そのくせをもってその人が握ると義手の「握る」という動きが生み出されることで、直感的に「握る」とイメージしたときに義手が握る動作を行えるようになる。手の姿勢、手指の力の入れ具合(例えば屈曲、伸展のような)をパターンに分けて、出ている筋活動を識別して義手を動かすというものなので、その個々人の筋電位の特徴に合わせて最適化してくれる。

このような「AI義手」とも呼ぶべき学習型筋電義手は、意思伝達の難しい小児でも、訓練に時間をかけず思い通りに義手を動かせる可能性が出てくるが、まず義手に学習させるところで安静、握る(手指屈曲)、開く(手指伸展)を想像して動かさなければならない。適応年齢については、症例を重ねながら検討していきたいと思っている。

謝 辞

2010年より国立成育医療研究センターの高山真一郎先生の統括のもと、工学系研究者との共同研究を進めているが、義手開発の技術協力には、電気通信大学・横井浩史教授、矢吹佳子先生、山野井佑介先生、横浜国立大学・加藤龍准教授ならびに横井研究室、加藤研究室の方々に多大な

るご指導とご支援を頂いており、ここに深謝する。

利益相反の開示

高木岳彦：【研究費・寄附金】一般社団法人日本損害保険協会交通事故医療特定研究助成金、テルモ生命科学振興財団研究開発助成金、武田科学振興財団助成金、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)研究成果展開事業、社会還元加速プログラム(SCORE)チーム推進型

文 献

- 1) 伊藤英明, 越智光宏, 河津隆三, 他: 先天性右前腕欠損の幼児に対し電動義手を処方した1症例. 日職災医誌 **55**: 55-9, 2007
- 2) Beasley RW. Hand and finger prostheses. J Hand Surg Am **12**: 144-7, 1987
- 3) Krukenberg H. Über Plastische Umwertung von Amputaionstumpfen. Ferdinand Enke, Stuttgart, 1917
- 4) Garst RJ. The Krukenberg hand. J Bone Joint Surg Br **73**: 385-8, 1991
- 5) Cobbett JR. Free digital transfer. Report of a case of transfer of a great toe to replace an amputated thumb. J Bone Joint Surg Br **51**: 677-9, 1969
- 6) Amaral S, Kessler SK, Levy TJ, et al: 18-month outcomes of heterologous bilateral hand transplantation in a child: a case report. Lancet Child Adolesc Health **1**: 35-44, 2017
- 7) 高木岳彦. 筋電義手の現状と未来—より直感的な筋電義手操作に向けて—. 日手会誌, in press
- 8) Hochberg LR, Bacher D, Jarosiewicz B, et al: Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm. Nature **485**: 372-5, 2012
- 9) 横井浩史, 矢吹佳子, 關 達也, 他: 筋電制御型の義手. バイオメカニズム会誌 **38**: 39-46, 2014
- 10) 陳 隆明, 柴田八衣子, 溝部二十四, 他: 乳幼児に対する筋電義手装着訓練プログラムの検証. 総合リハ **37**: 239-44, 2009
- 11) 溝部二十四, 陳 隆明, 柴田八衣子, 他: 義手の訓練方法のポイントと指導のコツ: 筋電電動義手. 義装会誌 **29**: 240-5, 2013
- 12) Kuiken TA, Miller LA, Lipschutz RD, et al: Targeted reinnervation for enhanced prosthetic arm function in a woman with a proximal amputation: a case study. Lancet **369**: 371-80, 2007
- 13) Souza JM, Cheesborough JE, Ko JH, et al: Targeted muscle reinnervation: a novel approach to postamputation neuroma pain. Clin Orthop Relat Res **472**: 2984-90, 2014
- 14) Dumanian GA, Ko JH, O'Shaughnessy KD, et al: Targeted reinnervation for transhumeral amputees: current surgical technique and update on results. Plast Reconstr Surg **124**: 863-69, 2009
- 15) Kuiken TA, Barlow AK, Hargrove L, et al: Targeted Muscle Reinnervation for the Upper and Lower Extremity. Tech Orthop **32**: 109-16, 2017
- 16) Takagi T, Ogiri Y, Kato R, et al: Selective motor fascicle transfer and neural-machine interface: case report. J Neurosurg Feb **132**: 825-31, 2019
- 17) 柳澤 聖, 高木岳彦, 渡辺雅彦: 上腕切断に対する Selective motor fascicle transfer —長期経過例の検討—. 日手会誌 **38**: 1018-21, 2022