

# Roboticians Want to Give You A [Third Arm](#)

ロボット開発者はあなたに第3の腕を提供したいと・・・

By [Dario Farina](#), [Etienne Burdet](#), [Carsten Mehring](#) & [Jaime Ibanez](#)

Illustrations by [Chris Philpot](#) (IEEE SPECTRUM, pp.23-27 and p.46, March 2023.)

## \* はじめに (紹介者記述) :

本報告は脊髄ニューロン信号の中で未知の帯域と云われている周波数帯域の信号を利用して骸骨型骨格 (exoskeleton) を制御できるかも知れない、と云う試みの報告である (元文には幾つかの図面が載っているが本紹介文では著作権を考慮して省かれています)。

## \* イントロ :

細心の注意が必要な技量が要求される外科医師がいるとして、彼/彼女には専門的能力と安定した信頼に足る両手が必要です。もし外付けの腕として "第三の手" が利用できるならそれらにも同じ能力が必要です。その場合、彼/彼女は元々備わった2本の手が手術用具を操作しながらも、更に新たに加わったトルソーの腕はその手術を手助けする役目を果たすことができます。別の場面としてある建設関連技術者について考えてみましょう、彼は溶接機で目的とする箇所に溶着するためのエクストラロボットハンドを使った作業をしているとしましょう。このような時、複数の目標を同時にこなすよう指示できる骸骨型骨格を装着している環境を考えることも可能になります。一方、作曲家が "out-there music" のための12本の指を持ったピアニストのための曲を作りたい、などと考えることも可能になりそうです。こんな筋書きはサイエンスフィクションだと考えるかも知れませんが、最近のロボット技術とニューロサイエンスの進展がそれらを夢では無くするような状況もあるようです。

以下は Imperial College London に属する我々とドイツ Freiburg 大学、ヨーロッパ・プロジェクト NIMA との共同研究成果の一部紹介です。研究の大枠は "augmentation" (拡張機能追加装置) がヒトの能力拡大をニューロサイエンスとニューロテクノロジーでどんなふうの実現出来るだろうか、ということで、そのような外付けの人造追加装置を「人間の脳が制御できるか」と云うことでもあります。更に、それが可能だとして「どの神経信号をどんな風に "コントロール" のために "使えばいいのだろうか" が最初の課題としてあがります。

## \* "Augmentation" (拡張機能追加装置) の現状 :

(原文では "extra limbs" が多用されていますが本紹介文では外付け "腕" で代表しています)

"第三の腕" に代表されるヒトへ追加装置はそれによって実際の仕事に従事して働く人々の能力を改善するだけでなく、元々の体に備わった能力では容易に遂行することが難しい仕事を実現可能にさせます。人体への付加装置には3つのレベルが考えられますが、[第一のレベル](#)は「元々に有している能力を強化する」もので、一言で言えば、「それらを装着することで更なる力を発揮できる」ようにします。[第二のレベル](#)では「人間の自由度を広げてくれる」ものですが、このレベ

ルでは3本目の腕や6本目の指を動かす能力を付加しますが、これはとても高価になります。

(例えば、もし付属外部装置をフットペダルで操作するとすれば、元々の足は“足としての機能”を失うことになるという課題をも伴います)。第三のレベルの外付け装置は(これはまだ熟している技術ではありませんが)人体に元々ある運動能力を失うことなく新たな自由度を与えてくれるものです。この範疇のシステムでは人々が元来に有している身体能力を減らすことなくこれまで利用されていなかった神経信号でロボットアームを制御しながら、元々の身体をも使うことができるものです。このレベルが現今私達が探求しようとしているものです。

第三次レベルの人工的装置は多分侵襲タイプのBMI(Brain Machine Interface)インプラントで達成できるでしょう。しかしそれを日常的に使うことが可能なためには頭蓋骨の外からピックアップした脳信号を使う非侵襲な手法で行える必要があります。多くの研究グループはそれを実現する方法として脳波形からの信号を利用する技術を試行錯誤して使えるようにしていますが、ここでは脳信号を取り出すために頭皮電極 (scalp electrode) が使われています。我々のグループでも同様な方法を採用してきましたが、別な方法も試みてきました。それは、筋肉で発生する筋電信号 (electromyography: EMG)を使う方法です。我々は10年以上の期日を掛けて皮膚表面のEMG電極が筋肉からの信号をどんな風に検出し、それらが脊髄ニューロン(spinal neurons)によって送り出される指令信号として解読されるかを明らかにしてきました。

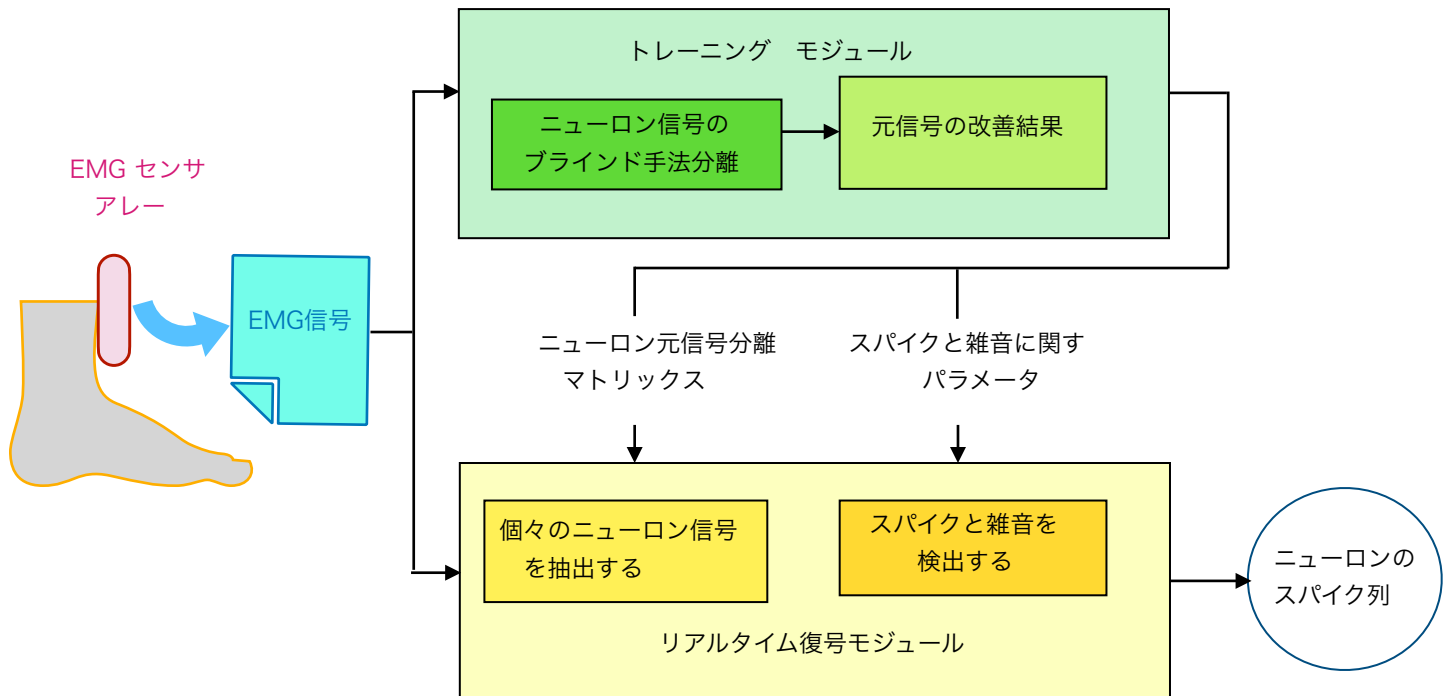
### \* 筋電信号を用いたシステムの基本と開発概要

電気信号は神経に作用するシステムの言語です。脳と末梢神経を通じて、何らかの電圧値 (閾値) になると数十ミリボルト程ですが、ニューロンの“発火”が(神経)細胞内に生じ、そしてその軸索を通して必要な活動を起こさせるための電位 (ポテンシャル) を送り出し、(軸索で繋がった) 接合部すなわちシナプスにあるニューロン送信部を解き放したり、多くのニューロンとも協働して他のニューロンが発火するための電位を作り出したりします。そのような電気パルスが脊髄中の運動ニューロンによって生じされると、それら (パルス) は軸索に沿って必要とする筋肉へと到達しますが、ここでは個々の筋肉繊維が目的とするシナプスへと繋がるよう交差していて、それらが信号をやり取りできるよう接触します (シナプス同士は微細な間隔をつくって化学的に繋がっている)。私達はこれらの電気信号を記録できますが、これらの電気信号は利用者の意図を符号化しているので、多様な制御目的に使うこともできます。

非侵襲神経信号取得に関する技術革新は20年前における一つの発見から生じましたが、初期においてはEMGからの情報を得るには筋肉か神経繊維に侵襲した電極を使うしかありませんでした。私達が実現した高密度電極は複数箇所における良質な標本化を実現し、それらを同定して、更に目的とする作業に含まれる脊髄運動ニューロンの比較的広い領域をアクティブ化して復号可能にしています。しかもそれをリアルタイムで実現しているので脊髄からの信号に基づいた非侵襲BMIシステムを将来的には開発できると考えています。

私達の現行モジュールはトレーニングモジュール（教師モジュール）とリアルタイム復号モジュールとの二つの部分で構成されています。

（次の添付図は紹介者が原図を参考にして作図したものです）



（参考図） 原文で紹介されている非侵襲 EMG を用いたシステムの構成図

被験者の皮膚に取り付けられたEMG電極グリッド（2次元アレー）で開始するにあたり、彼等は先ず筋肉を緩めた状態にして、観測者（装置運用者）は記録されたEMG信号をトレーニングモジュールへ入力します。このモジュールは、個々の運動ニューロンパルス（EMG信号を構成していて、スパイクとも呼ばれているものです）を同定する作業を実施しますが、これはとても難しい仕事になります（当該パルス信号がグリッドメッシュの”どれ”から出ているかを探す訓練？）。トレーニングモジュールでは、どのように、EMG信号と推定されたニューラル・スパイクが、関係付けられたかが解析されます。具体的には：ひと組のパラメーターの中からEMG信号とneural spikeを見つけ出して関係付けるものですが、そのひと組みのパラメーターを見つける目的はそれ以降に必要な更に簡単な数学的処方に供するためのもので、具体的にはEMG信号を個々のニューロンから出たスパイク列と関係付けるよう変換する機能を含んでいます。

必要なパラメーターが手に入ったところで復号モジュールは新たなEMG信号を得ることが可能になり、個々の運動ニューロンの活動（内容）をリアルタイムに取り出すことができるようになります。トレーニング・モジュール（の動作）には多くの計算時間が必要なのでそれをリアルタイム制

御で使うことは時間がかかり過ぎますが、通常は、使う時に固定したユーザーの体上の箇所ではEMG電極グリッドを一度動作させるだけで済みます。それに対して、復号（解読）アルゴリズムはとても効率的で、どんなに遅くとも数 msec の遅延で済みます。この（遅延時間なら）大方の個人用ウェアラブルBMI器具として十分利用可能と予想しています。私達は我々が開発したシステムの正確性を、利用者の筋肉に挿入した侵襲型EMG電極で得られた結果と比較して、遜色無いと評価しています。

このリアルタイム方式を実現するためには、脊髄運動ニューロンからの信号を抽出して別付のロボット・アームを制御する技術を開発することが鍵でした。ニューロンからの信号を調べながら我々は一つのことを気がつきましたが、“そこには本質的に特別な帯域信号がある”ということでした。低周波数の信号部分は（ほぼ、7 Hz以下）筋力へ変換される部分なのですが元信号成分にはさらに高い成分が含まれていて、13Hzから30Hzなのですが、その周波数は筋肉を制御するには高すぎ、利用されてはいないようです。我々にも脊髄ニューロンがこの高い周波数を何の目的で送っているのかは解らないのです、多分（筋肉運動に）更なる付加的な適応が必要になった時の冗長性なのではないかとも考えられます。ともあれ、人間は、筋肉運動のために、脊髄の中で必要とする以上の豊富な神経繊維を用意しておいたということなのかもしれません。

この発見で私たちは「このスペア周波数で何ができるだろう」と考えました。その中でも特にその付随的に付いているニューラル情報を取り出して、それをロボットアームのコントロールに使えるんじゃないかとの考えました。しかし、私たちが、被験者は実際使っている筋肉の他に、取り出した補助的な信号から別な動きをコントロールするようなことが本当に出来るのだろうか、というような心配をするに至るのは当たり前のことでした：と云うことでそれを見極めるために実験装置を設計してみました。

実証実験のきっかけとして被験者はスペアのニューラル周波数帯資源をコンピュータのカーソル制御として使うことにしました。神経回路網のメカニズムとアルゴリズムは複雑なものとなりましたが、実験のセットアップそのものは簡単です。各々の被験者はスクリーンの前に座り、私達は彼らの脚にEMGシステムを取り付けます：その装置は4x10cmのパッチに64個の電極がついていて向こう脛を持ち上げる動作には支障がないよう取り付けられました。脛骨筋(tibialis)が私達の実験にとっての駆動源でした：脛骨筋は皮膚の近くで大部分を覆っておりその筋繊維は脚に沿って伸びています：それで、脛骨筋に神経刺激を与える脊髄運動ニューロンの活動を復号する（“同定”する）のにとっても適しているのです。

私達は被験者に脛骨筋を引き締め、基本的にピンと張った状態を保つよう頼んだが、それは具体的には脚が動かないように”くるぶしから下”を着けて踏ん張ることです。実験の間中、私達は取り出されたニューラル信号の中に生じる変化に注目していました。私達はこれらの信号を、筋肉

の引き締め制御に使われている低周波数と、スペア周波数である $\beta$ バンドに含まれる20Hz近辺の周波数成分に分離し、それぞれの信号成分を（コンピュータスクリーン上の）カーソルの水平と垂直（移動）制御に結びつけました。私達は被験者にカーソルをスクリーンの中で全ての場所を動き回すよう依頼しました。その時、それをどうやったら出来るかについては勿論何にも指示しませんでしたし、そんなことが出来るはずもないことでした。彼らは、自分が試みている結果を見ながら自分で修正する以外にできる事はないので、そうする以外方法は無かったのです。

顕著なことには、彼等が何をしているかがきちんと分からなくても被験者達は、モニタースクリーンの中のカーソルの位置を振り回す作業を数分で終えてしまうことができたのです。一つの神経指令信号で始まって（それは前角脛骨筋への接触になる神経信号です）、次にはコンピュータの垂直カーソル位置を定めるための第二の神経信号を作り出しますが、それは筋肉を制御することとは全く関係無い独立な作業として実現できることがわかりました。私達はとても驚き、何と容易にこの大切な第一ステップを成し遂げ、その結果、自然の運動課題（natural motor task）へと導く神経制御チャンネルを見つけることができたのです。しかし、分かったことは実際の利用に向けては余りにも少ないということだけです。次のステップはもっと確実な信号を見つけることができるか、そして人々がロボットアームを制御することができるかどうかということで、勿論それは自然な筋肉活動をしながらということが前提です。

私達は、脳がカーソルコントロールのような高度な芸当をどういう風にも実施できるのかということをもっと理解したいと思っています。カーソル移動作業に伴うもう一つのデータ採取として、私達はユーザの脳の中で何が起きているのかを調べようとしてしました：特に、活動に際して自発的制御がどんな風に関連しているのだろうか、ということを知りたい：ということで更に進んで次の発見があったのです：筋肉に到達する $\beta$ バンドの神経信号に偶然何らかの変化が生じると、それは脳レベルでの似たような変化に強く関連しているのです。既に述べたことですが、 $\beta$ 神経信号は未だ神秘と言えるような領域に属していて筋肉活動にどんな役割を担っているかは知られていないのだし、それ以上にその信号が（役割のある信号として）実際発生しているのかも明らかでは無いのです。私達の試みからは以下のことが示唆されました：被験者（volunteers）は脳活動を目的に適応(modulate)させるよう学ぶがその（生じさせる適応変調の）内容はと云えば $\beta$ 信号として筋肉へ送り届けられるものなのだといってもいいでしょう。この重要な発見からこれらの $\beta$ 信号の後ろに隠れているメカニズムの解明”に繋がる何かを見つけることができるはずだと考えています。

### \* 将来への課題・展開

ところで、私達はこれらの装置をImperial College London に設置していますが、エクストラロボットアームと云う新たな技術を導入して、MUlti-limb Virtual Environment ; MUVEと名付

けました。その他、様々な可能性の中でもMUVEは軽量の4本アームを持った装着型ロボットアームに可能性がありそうで、ここでは「仮想現実」でシミュレートされたシナリオ（仮想現実空間）の利用が描き出せそうだと考えています。私達はこのシステムを世界中の研究者にオープンして利用されるよう計画しています。

私達の制御技術をロボットアームやその他の体外デバイスに繋ぐと云うことは次のステップとして極自然なことでありますし、実際その目標に向かって積極的にチャレンジしています。しかしながら、現実の挑戦では（外付け）ハードウェアを付けることよりは（複数）外付けする予定のロボット装置を間違いなく（これだと）決めて複雑な操作を正確に実行させる環境を実現することの方が重要なことです。

私達はこの技術がどんなふうにもこの技術を使う人々の神経活動に影響するかについても研究を進めています。例えば、このような「第三の腕」を使うと云う経験をしたあと、半年後にどんなことが彼/彼女に起こるのだろうか？脳が自然に有している柔軟性が（「第三の装置」を）嫌がったりしないで、一層直感的にコントロールする能力を獲得したり適用できるようなことが起こるのだろうか？（「第三の腕」のような）特殊ディジットを使いこなすための占有領域を脳内に持つような人が（後世になって）生まれたら彼/彼女は特殊な才能の持ち主になることだろう。あるいは、私たちが開発したシステムの利用者は時間を掛ければその機器使用の器用さを身につけることが可能なのだろうか？私達はこのような外付け装置をコントロールするのにどの位の認知上の負荷が必要になってくるのか心配しています。人々が、「第三の腕」を使おうとした時、研究室でセットアップした時のような強い意図を注がないと使えないならこの技術は有益なものではないでしょう。しかし、一方、人々が日常のサンドイッチを作るような気楽さでこの技術にアクセスできるなら、日々、日常の動作に組み込むのに適しているだろうとも。

私達研究グループは他にも様々な制御機構で同様な神経科学的な疑問に応えようとしています。国立 Siena大学の Domenico Prattichizzoと研究仲間は手首に装着した6本指のソフトロボットを発表しています。この器具は対象物を安全に掴む力が無い人に、それを可能にする器具です。利用者はEMG電極の付いた帽子を被り、両眉を上げることで指にコマンドを送っています。MITのHarry Asadaのグループはエクストラ・ロボットリムの実験をしています。ここではエクストラ・リムをコントロールするために使うトルソーに組み込まれた筋肉の活動を検出するために、EMGを使ったウェアラブルスーツが組み込まれています。

私達のシステムについては2つの現実的な質問が出ていて、①人間の自然な活動と同時にロボットアームを神経科学的な制御対象として実現可能なのか？と云う疑問と、②利用者が他の作業に集中しながらでも稼働（運用）できるシステムなのか？どちらかの質問に関してでも「NO」であるなら（この手法では）具体的な技術を得られないでしょう。しかし、それでも私達は運

動制御 (motor control) に関する神経科学的研究に際して興味深い新たな手法を手にする事は出来るだろうと考えています。どちらの質問に関しても「yes」なら私達は”人間能力の拡張”に関して新たな時代に入ったと言えるかも知れません。ともかく、現時点では、生物学的な(本来の)指と新たに加わった(6本目の)指が絡まってしまってしまうことだって考えられるのだが、そうならないことは証明されていない・・・。

#### \* 要約紹介者のコメント

NPO Wireless Brain Network も協賛し、2023年12月7日(木)に実施された電気学会群馬支所主催・前橋工科大学共催の講演会「インベンションからイノベーションへ～技術ロードマップとバイオデザイン～」では講師の中村 亮一氏(メディアライト合同会社 代表社員)から自らが進めているバイオロボットの開発とその実用化とその敷衍について貴重なお話をしてくれました。バイオ技術ロボットの実用化のための”デザイン思考”の重要性から観て研究開発のための”種”をどう見つけるかの考え方について「企業存続・継続」視点を基調として示唆に富んだ講演でした。

中村氏の講演に触発されて、今回のNPO WBN 技術紹介では”ロボット技術研究の種”になるかも知れない記事をIEEEの広報誌“SPECTRUM”の中から選んで紹介しました。バイオ支援ロボットとしては本文中にも第一世代、第二世代とさまざまなロボットが開発されて実有用に供されていますが中村氏が指摘しているように敷衍して発売企業が潤っている例はほとんど無いのが現状です。ここで紹介した原理とその実用化の将来が明るいとは言えないかも知れませんが、研究者の志を鼓舞する”種”として紹介する価値はあるかと思つての記事です。

ほん文中、紹介者はニューロサイエンスやバイオロボットに関する専門家では無いため、科学用語を英語そのまま表記したりカタカナで表記していて、記事内容の表現の統一性に欠けていますが、ご容赦下さい。

(記事紹介者：NPO Wireless Brain Network 会員 Horikoshi J.)

。