

中山人間科学振興財団

ヒトとキカイの共進化

ウェアラブルロボット着用者の心理は量的に計測できるか

葭田 貴子

東京工業大学工学院

パワーサポート用の外骨格型ロボットスーツの着用時のように、ヒトと機械やシステムがハイブリッドに協調動作してヒトの身心の機能を拡張している状況において、ユーザであるヒト側から観察したときに、その体を制御している主体は主観的にヒトと機械のどちら側に帰属されているのだろうか。例えば自分自身の意思や意図とは関係なく機械側に動作主体があり、自身の身体を機械によって受動的に動かされているという感覚が強いのであろうか。あるいはヒトである自分自身の側に主体が帰属され、あくまで自身が体を動かして実施する行為の主体は自分であって、機械システムに操作されているわけではないという感覚が十分維持されているのだろうか。さらに、この種の機器を長期間使用し続けた時に、このような感覚は変容しうるのだろうか。このような問題意識の下、ヒトと機械がハイブリッドに人間の一つの身体に相乗りしており、相互に一つの身体を制御しあうような状況において、ユーザであるヒト側からみて自己の身体を通じた特定の行為の主体が自分自身と機械のどちら側に感じられるかを心理物理学的測定方法と fMRI による脳機能イメージングの併用で行うための研究を実施した。具体的には、ヒトが着たまま fMRI 内外で使用できるパワーアシストロボットスーツを超細径マッキベン人工筋肉で上肢用に制作し、その人と MRI 機器双方への安全性を確認した。fMRI 内でヒトが着用可能なパワーアシストシステム自体は他の研究室でも開発されている。しかし、ここでは使用するソフトアクチュエータが MRI 内の高磁場環境下でも十分稼働する性質を生かして、MRI スキャナ内と MRI スキャナ外の研究で兼用して使用でき、かつ、遠隔地の MRI 実験に耐えるよう、持ち運び可能で軽量・安価な使い捨てのものを制作した。ヒトの身体を通じた行為のみならず、思考など様々な精神活動に関して、本人にとっては他者ではなく自分自身が主体となって実施したと感じられるかという問題は、行為主体感ないし操作主体感感覚と呼ばれ(sense of agency)、近年ではレイグジステンスのようなヒトからみて物理的には自己の身体ではないロボットや CG アバターの身体を自己の身体の一部であるかのように錯覚させる技術の周辺や、身体リハビリテーションなど身体感覚の喪失と回復に関する身体性に関連した研究領域の周辺で盛んに研究されている。一連の研究を通じて、長期的にはこれら自己の身体ではない機器や映像の身体を、あたかも自己身体の一部であるかのよ

うにヒトに錯覚させることで、臨場感や没入感を高めたり、本来の身体機能にはない機能を拡張したり、あるいは失われた四肢の機能や感覚を取り戻したりといった技術につなげることを意図した。

はじめに、MRI 内外で受動的な運動条件を実現するために必要な MRI 対応空気圧アクチュエータを作成した。その概要を図 1 に示す。非磁場環境下である fMRI 室外のコンプレッサにより空気を供給し、減圧弁により加圧圧力をゲージ圧 0.3[MPa]に制限した空気を、2つの電磁弁によって制御する。この加圧圧力はすべての構成部品の使用圧力の範囲内である。電磁弁は全長 9[m]のナイロンチューブを介して fMRI 室内の掌側・背側それぞれのアクチュエータに接続されており、fMRI 室外の電磁弁を制御することで fMRI 室内のアクチュエータの動作を制御することが可能である。

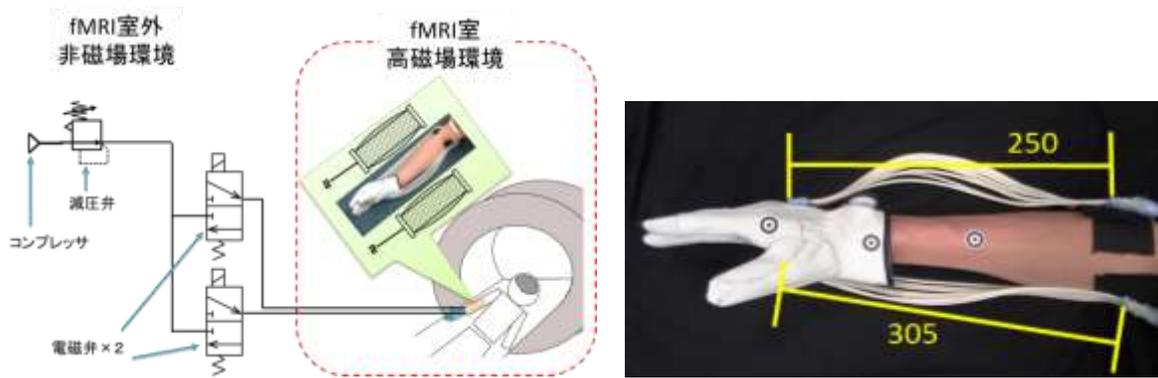


図 1. MRI 対応空気圧アクチュエータと周辺機器概要

MRI 対応空気圧アクチュエータの寸法は掌側のアクチュエータ・背側のアクチュエータ共に全長 305[mm](実収縮部長 295[mm])である。アクチュエータに使用している細径マッキベン人工筋はゲージ圧 0.3[Mpa]で加圧することにより収縮する。アクチュエータによる掌屈・背屈動作の動作原理は、掌側・背側どちらか一方のアクチュエータを加圧し、もう一方を無加圧状態にすることで、手の平もしくは手の甲どちらかにのみアクチュエータの収縮による力が加わり、手の掌屈・背屈動作が実現される。無負荷状態のアクチュエータを加圧して収縮させた際のアクチュエータの全長は掌側、背側共に 245[mm](収縮長さ 60[mm],マッキベン収縮率約 20%)であった。

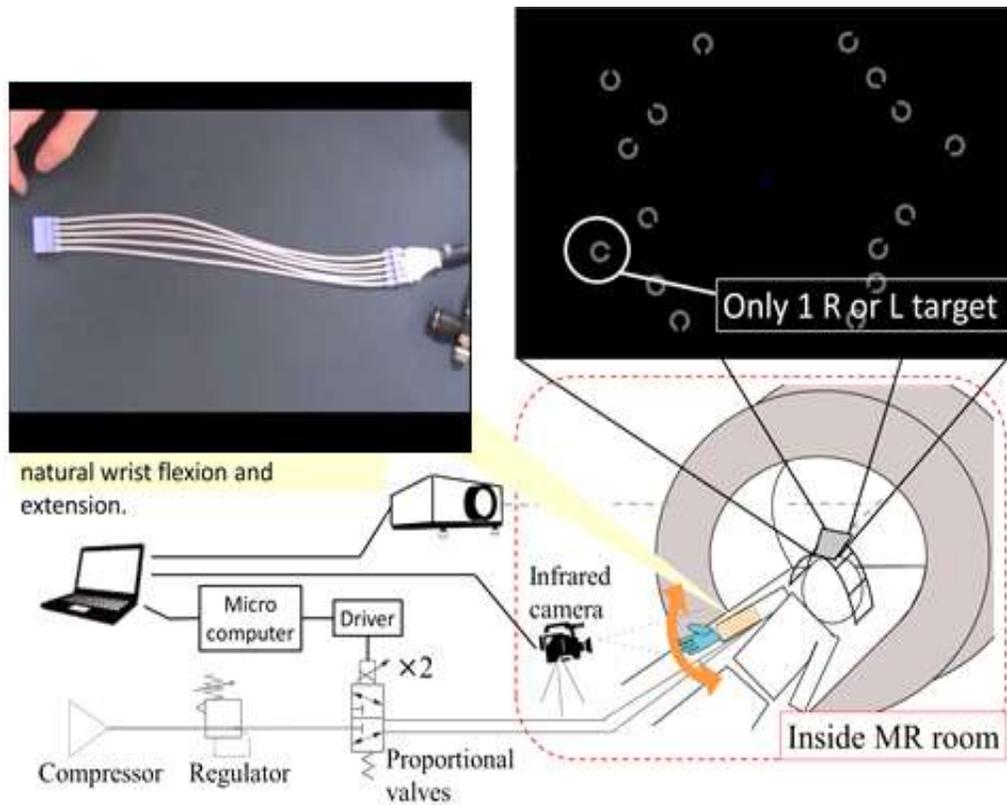
アクチュエータを動作させた際の被験者の手首関節の運動に対する影響を考える。中立位（初期位置）を  $0[^\circ]$  としたとき、プロメテウス解剖学アトラス解剖学総論/運動器系第2版によると、ヒトの最大掌屈角度は  $60\sim 80[^\circ]$ 、最大背屈角度は  $40\sim 60[^\circ]$  とされている。実際に図7のようにMRI対応空気圧アクチュエータを装着し、アクチュエータへの加圧は行わずに、細径マッキベン人工筋を肘側固定部側から引っ張り、手側固定部・肘側固定部間の長さで掌屈角度・背屈角度の関係を測定した。測定結果はそれぞれ図9、図10のようになった。ただし角度に関しては、正の値は掌屈角度・負の値は背屈角度を表している。これらの結果と、無負荷時のアクチュエータ最大収縮時の全長をふまえると、アクチュエータによる手首運動の掌屈・背屈角度は関節の可動域内であることがわかり、研究対象者へ影響を与えないと考えられる。アクチュエータにより生成される使用上最大収縮力は  $120[N]$  である。またアクチュエータによる掌屈・背屈動作は動作開始から終了までの時間が  $1000[ms]$  程度になるようにスピードコントローラ等を用いてアクチュエータの収縮速度を調整しているため、掌屈・背屈角速度や掌屈・背屈角加速度は研究対象者が日常生活で行っている掌屈・背屈動作時と同程度であり、研究対象者への負担は小さいと考えられる。これまでこの機器が被験者の手腕を関節の可動域外に駆動したり、被験者に恐怖感を与えるような加速度で急加速したことはない。被験者の自然な手腕の運動軌道を妨げないのがこの種の空気圧アクチュエータ式の外骨格型ウェアラブルロボットの特徴といわれており、その装着感は柔らかく、ユーザの意思や意図に応じて動作している限りは、ヒトの身体動作に馴染むような動作感が特徴的である。

このようなアクチュエータを着用したまま、被験者の掌屈・背屈運動を画像処理によってリアルタイムに視覚ディスプレイに反映させ、ランドルト環やCGの手腕といった視覚オブジェクトを操作するために、被験者の指先にマーカを取り付け、その抽出を行う映像情報処理システムも作成した。これをMRIスキャンルーム内外で共用で実現する目的で、赤外カメラとOpenCVによる画像解析を用いた、簡易な2Dトラッキングシステムを導入した。Point Grey社製USB3.0カメラFL3-U3-13S2C-CSおよびIMAC社製フラットダイレクトリング光源IDR\_F110/60°を三脚に取り付ける。この三脚を、被験者の足下方向直線上、5ガウスラインの外側の位置に設置し、被験者の手首を撮影する。光源の電源には、IMAC社製アナログパルス調光電源IDP-30DV

が使用された。また、実験者および実験 PC が存在する fMRI 室外と被験者および USB3.0 カメラの存在する高磁場環境下の fMRI 室との間は、直接電氣的な信号線で接続することはできないため、Icron 社製 2 ポート USB3.0 マルチモードファイバエクステンダ USB 3.0 Spectra 3022 を使用することで、一度光信号への変換を設けた。被験者の装着する MRI 対応空気圧アクチュエータの人差し指先端には、市販のモーションキャプチャ用の球形の再帰性反射材マーカ(ライブラリー社)が接着されていた。マーカは 2 センチ程度の球形の発泡スチロール球と反射材を組み合わせたもので、反射材は 3M 製反射トランスファーフィルム 7610 である。USB3.0 カメラにより取得された映像は、120fps で  $800 \times 600$ [pixel] のサイズであった。指先に取り付けられた再帰性反射マーカのみが、その他被写体と比べて高い輝度値を有した。この特徴を利用し、Microsoft Visual Studio C++ 2013 環境において OpenCV 3.1.0 を利用し、以下の 4 つのプロセスによってトラッキングを行った。

トラッキングシステム全体としての遅延を評価する為、トラッキング点として USB3.0 カメラの映像上の異なる 2 点で交互に点滅する LED 光源を使用し、トラッキング点の切り替えが被験者への視覚刺激提示モニター上での視覚刺激の変化に反映されるまでの時間を計測した。行動実験における実験環境では、視覚刺激提示モニターとして Iiyama 製モニタを使用し、その遅延は 73.3[msec]であった。一方、本実験における実験環境では、視覚刺激提示プロジェクタとして DLA-G150CL を使用し、その遅延は 196[msec]であった。この 196[msec]という遅延の値は、我々の想定外のものであり、実験の開始から 5 名分の被験者のデータ獲得が済んだ段階で判明したが、実験環境の制約上解消は困難だった。Franck らによると、手による入力に対する視覚的フィードバックの遅延が 80msec 以下の場合、遅れていることが知覚できない(Franck et al. 2001)。したがって行動実験環境下では、遅れは知覚されることなく十分なりアルタイム性が確保されていたといえる。対して、本実験における実験環境下の遅延 196[msec]は知覚可能な遅延であったと考えられるが、Kobayashi らの報告によると、自分が操作するランドルト環のような視覚対象の探索において、操作遅延が 60[msec]の条件と 210[msec]の条件における探索の速さはほとんど変化していない(Kobayashi et al. 2014)。したがって、動作遅延は知覚される可能性があるが、今回対象とする自

分が操作する対象が早く見つかるという現象は、十分再現可能であると判断し、実験を続行した。



このような実験装置を用いて、MRI スキャナ内を模した MRI スキャンルーム外での心理物理学的測定実験と、それを模した fMRI 実験を実施した。

被験者は本学の大学生及び大学院生の 17 名であった。被験者は全員右利きであり、視力(矯正視力を含む)、触覚、運動機能に異常はみられなかった。本研究は東京工業大学疫学研究等倫理審査委員会の承認を得たものであり、すべての被験者は実験者よりインフォームドコンセントシートを用いた実験内容の説明を受け、内容を理解して実験に協力することに同意した。またすべての被験者は、0.5[Hz]で行う手首の周期的な掌屈・背屈動作に慣れるために、実験前に 0.5[Hz]のビープ音を聞きながら掌屈・背屈動作を 1 分間程度練習した。

被験者はMRI装置スキャナのベッドに仰向けに横たわり、頭部にはヘッドコイルを設置した。被験者の右手にはMRI対応空気圧ウェアラブルロボットが装着されており、右手はアクリルとABS樹脂、ポリカーボネードで構成された腕台のうえに置いた。また右手には被験者右手動作をトラッキングするために右手人差指先端にマーカー(球体の再帰性反射材)が設置された。被験者は左手に緊急用のブザーを持ち、身体に異常が起きたと感じた場合、あるいはアクチュエータが破損した場合など実験に支障をきたす状況になった際にブザーを押して、実験をいつでも中断して被験者の安全を確保できるようにした。撮像中にMRI装置のコイル収縮等により生じる騒音を低減するため、またMRI室外のオペレーターとコミュニケーションが取れるように、被験者には耳栓とヘッドホン装着した。体動による撮像画像へのノイズを低減するために、クッション・タオルを用いて被験者の頭部と腕を固定し、被験者はなるべく頭部や肩部、足を動かさないように、また掌屈動作を行う際も腕台に設置されたスポンジに右肘を置き、肘はなるべく動かさないように行うよう指示された。

実験刺激はMRI室外のPCにより、Microsoft Visual Studio 2013 C++で作成されたプログラムを実行することで提示され、プロジェクタにより被験者頭頂方向に設置されたスクリーンに投影された。被験者は頭部に設置されたヘッドコイルに取り付けられたミラーを介してスクリーンに投影された映像を観測した。プロジェクタの解像度は800×600、リフレッシュレートは60Hzであり、視角にして20.1×15.1[°]の範囲に視覚刺激が投影された。

将来的には被験者の手腕を模したCGがリアルタイムに動作するものを提示する実験に移行する予定であるが、ここでは手腕の代わりにランドルト環刺激が動き回るものを視覚刺激とした研究を報告する。今回周辺視への刺激提示を行うにあたり、池田(1975)による網膜の区分における周中心窩(perifovea)として分類される網膜位置への刺激提示を行った。ランドルト環は固視点から7[°]の同心円を基準として水平方向に5[°]の振幅で動作させる。提示したランドルト環の大きさは視角にして全体が45.7[°]、切れ目が9.1[°]であり、これは一般的なランドルト環を用いた中心視における静止視力で考えると0.11に相当する。ランドルト環の提示サイズの決定に際して、今回の実験では理想的にはランドルト環は0.5[Hz]の周期運動を行うため、その平均角速

度は  $5^\circ / \text{sec}$  となることが期待された。ここで、Brown らによる中心窩から  $10^\circ$  ]の周辺視において  $5^\circ / \text{sec}$  で水平方向に動くランドルト環の切れ目可知覚視角の測定結果によると、この切れ目可知覚視角が  $6.2^\circ$  であることが示されている (Brown, B. 1972)。この報告を基に、 $9.1^\circ$  の切れ目を持つランドルト環であれば、今回の呈示条件下において切欠き方向を十分知覚可能であると判断した。ランドルト環は切れ目が右向きもしくは左向きのものが用いられ、妨害刺激となるランドルト環は切れ目が上向き、下向きとそこから  $\pm 45^\circ$  回転したものが用いられた。妨害刺激として、実験者による手首掌屈・背屈運動の 20[s] の軌跡が事前に 60 通り作成され、これがランダムに再生された。

被験者は画面中央の十字を固視しながら、出来るだけ早く正確に右もしくは左のランドルト環を探し左手のボタンで方向を解答するよう指示された。なお、ターゲットは右手手首運動に追従することを知らされた。最初に introduction cue が 5~6.7[s] 提示される。固視点の色は緑か赤で、緑であればその試行が Active 試行であり、赤ならば Passive・Simple 試行であることを知った。introduction cue が 4.7~6.7[s] 提示された後、Move cue として青色の固視点が提示された。Move cue が提示されたタイミングで、Active 試行ではアクチュエータが無加圧となり被験者は自ら手首の掌屈・背屈反復動作を開始した。この時被験者は指の屈曲・屈伸を行わず無理のない範囲で片道 1[s] 程度の掌屈・背屈反復運動を行うよう指示された。一方 Passive・Simple 試行では、move cue が提示されても被験者は特に何もせずリラックスした状態で、ウェアラブルロボットに掌屈・背屈反復運動を任せるよう指示された。また、半分の割合でこの試行は Simple 試行であり、move cue が提示されてもアクチュエータが無加圧となるのみで手首の掌屈・背屈運動は能動的にも受動的にも生成されなかった。Move cue の提示から 0.3~2.3[s] 後に 3.3 項で示した実験刺激が呈示され視覚探索が開始された。被験者は、固視点を視野の中央にとらえ、目を動かさず周辺視でターゲットの探索を行い、ターゲットを発見したら切欠きの方向を左手の解答ボタンで答えるよう指示された。左手による回答があるとその正誤に関わらず、あるいは視覚探索の開始から 20[s] が経過した場合、アクチュエータにより背屈動作が生じて手は初期状態に戻り次の試行に移っ

た。なお、introduction cue と move cue の提示時間は合わせて 7[s]となるよう調整してあり、move cue の提示時間が 0.3~2.3[s]の間でランダムであるのは、move cue の提示から手首運動の反応までに 300[ms]程度の反応時間を要することと、覚刺激の呈示のタイミングでターゲットが動いている方向に偏りが出ないように統制する為であった。実験刺激として提示される赤・緑・青・灰色の固視点は fMRI 本実験の環境下で交照法により主観的等輝度になるよう調整された。

これらの刺激生成・制御と同じ PC、プログラム、PC とシリアル接続されたマイコン(Mbed LPC 1768)を使用してロボットの駆動制御も行われた。プログラムは画面のリフレッシュレートである 60Hz に垂直同期するように設定されているが、さらに PC は MRI 装置からの撮像に伴う 2Hz のパルスを受信しこれを優先して同期を行うことで、撮像タイミングと実験刺激・ロボットの駆動制御の同期が常に保たれるようにした。

以上の実験を実施したが、研究助成期間が 1 年未満と比較的短く、研究助成期間内にデータの解析を完了させることができず、本報告書作成時点で結果の解析が続行中である。特に、fMRI 実験データに関して、実験で被験者が制御した手とは反対側の小脳に予期せぬ賦活を認めたため、現在これをシードとした数種類の脳内ネットワーク解析を複数実施中である。なお、アクチュエータの強度不足が原因で、実験途中にしばしば予期せず破損することが判明したため、被験者がこれらの装置を長期間着用し、その身心が機械に適応していく様相を記録するような実験はまだ途上である。使用したマッキベン人工筋肉の提供元(株)S-Mustle が強度の高い人工筋肉の量産体制に入ったが、本研究報告書執筆時点においては品質が安定しておらず、本研究計画が意図する長期間使用実験の用途を十分満たさないと判断され、これについては後日改めて人工筋肉の品質が安定次第研究再開する予定である。