



空間認知支援のための筋電気刺激による手先動作誘導システム

A Hand Guidance System Using Electrical Muscle Stimulation
for Facilitating Spatial Perception

木村圭佑¹⁾, 鈴木健嗣²⁾

Keisuke KIMURA, and Kenji SUZUKI

1) 筑波大学 グローバル教育院 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, kimura@ai.iit.tsukuba.ac.jp)

2) 筑波大学 システム情報系 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, kenji@ieee.org)

概要: 空間知覚とは, 周囲の環境や自身との空間的な関係を認識する能力である. この能力は日常生活に不可欠であるが, 事故や病気によって脳が部分的に損傷した場合, その機能が損なわれる可能性がある. 空間的知覚の機能改善のためのリハビリテーションには, 通常, セラピストが患者の手の運動をガイドする作業支援が行われている. 本研究では, 空間知覚のリハビリテーションを支援するため, 電気刺激を用いた手先動作誘導を可能とするシステムを開発した. 本稿では, システムの概要を示すとともに, 3 つの異なる経路による目標座標への到達課題を通じて性能評価を行った結果について報告する.

キーワード: 動作教示, 身体認知, 作業支援

1. はじめに

本研究は, 空間認知を改善するリハビリテーションを支援することを目的として, 手先を 3 次元空間内の任意の方向に誘導するシステムを提案するものである (図 1). 空間認知とは, 自身の周囲において 3 次元空間中にある物体や自身の位置, 姿勢を認識したり, 地図に基づき空間の構造を把握したりする能力である. 例えば能動的なリーチング動作は, 行為者の視点から見た空間認知に基づき, 自身や対象への注意を移動させることで行う. このように, 所望の動作を実現するためには運動特性のみならず空間認知が重要な役割を果たしている. この空間認知が損なわれる病態に半側空間無視がある. 半側空間無視は高次脳機能障害の 1 つで, 大脳半球病巣と反対側の刺激に対して発見して報告したりその方向を向いたりすることが障害される病態であり, 急性期を除けば右半球損傷後に生じる左半側空間無視が大半を占める [1]. 障害物に気付かずぶつかる, 対話相手を誤認し辻褄の合わない会話をする, 車いすの片側のブレーキをかけ忘れ乗車時に転倒する, 食事の際に皿の半分の食べ物を残す, 更衣や化粧を片側のみ行うなどといった症状が, 患者に自覚なしに現れることから, 日常生活や社会復帰を阻害するばかりではなく, 脳損傷者のリハビリテーションにも支障をきたしている [2]. 半側空間無視の治療はトップダウンアプローチとボトムアップアプローチの 2 つに大別される [3]. トップダウンアプローチは意識的に無視空間に注意を向けさせるもので, セラピストによる声かけや視覚操作トレーニングが主流である. しかしながら, 重度の半側空間無視患者の場合は左側からの声掛けに対して右側ばかり探索してしまうなどの知覚転移により, トップダウンアプローチでは効果が期待で

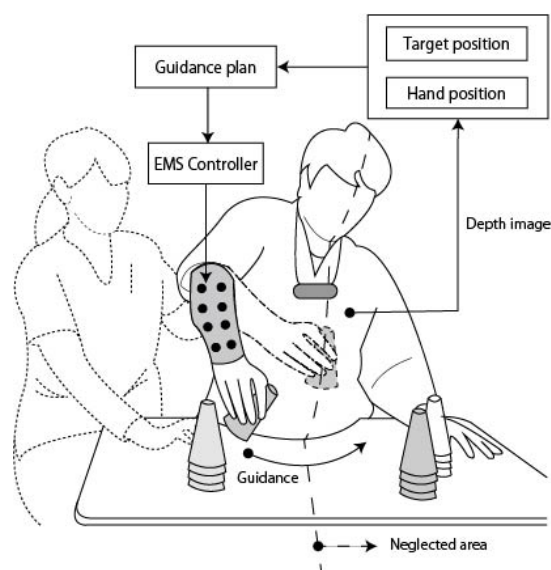


図 1: 概要図

きない [4]. そのため, トップダウンアプローチは軽度の患者に, ボトムアップアプローチは重度の患者に適用されることが多い. ボトムアップアプローチの 1 つである作業療法では, 視覚と体性感覚情報の統合に着目した訓練を行い, 非意識的な機能障害そのものの軽減を図ることで, 日常生活全般に効果の汎化が期待できる [5]. しかしながら作業療法はセラピストによる運動補助が一般的であり, 治療を補助する機器はまだ少ない. このことから長期継続的な実施が難しく, 介助者への負担も大きい.

電気刺激から得られる関節角度応答に着目した先行研究

には、指で楽器を弾かせる試み [6]、人々の運動覚体験を融合するデバイス [7]、人差し指先の軌道制御 [8] などがあるが、いずれも本研究の提案手法とは異なっている。

そこで本研究では、筋電気刺激により移動方向の指示を回転・並進に分別し、逐次的にこれらを提示することで3次元空間における手先の誘導が可能であることを明らかにする。これにより半側空間無視の患者に対してボトムアップアプローチによる空間認知の改善を支援するためのシステム構築を目指す。セラピストの負担軽減や患者個人の日常生活動作練習の機会が増加することが期待される。

2. 提案手法

筋電気刺激とは脳から神経を通して運動神経に送られる電気信号の代替に、皮膚に装着した電極から電気的なパルス信号を入力することで筋肉を収縮させる方法である。筋肉に電気刺激を与えると関節角度が変化するため、これが作業療法におけるセラピストの運動補助のように患者本人の運動を誘発するトリガとなると考えた。本研究では前腕の背屈運動に関わる長掌筋、掌屈運動に関わる長橈側手根伸筋、回内運動に関わる円回内筋、回外運動に関わる回外筋の4つの筋肉に電気刺激を与える。状況によってどの筋肉に刺激を与えるかの選択は、装着者が首から下げるハンドセンサカメラ (Leap Motion) で検出される掌の中心の現在座標 P_h ・手先の姿勢 θ_h と目標座標 P_t との差によって処理を行う。誘導手順を示す。手先の誘導は手首部の回転運動 $R(\pm\phi)$ と、手の甲もしくは掌方向への回転運動 $R(\pm\psi)$ を同時もしくは逐次的に操作することで実現する。誘導にあたっては前腕の中心を中心とする円筒座標系を仮定する。ここでは、誘導方向をカメラ面と平行に限定し、さらに円筒座標系の軸はカメラ面と垂直に交わっているものと仮定する。回内・回外運動に対する回転運動を R_1 、背屈、掌屈運動に対する回転運動を R_2 とする。手先を装着者からみて右に誘導する必要がある場合について示す。まず手の甲の面の垂直ベクトルが、同じカメラ面と平行な面に含まれる目標座標を向くまで、回内・回外の主動作筋を刺激する ($R_1(\pm\phi)$)。回内・回外運動が完了したら、掌の中心座標と目標座標が近づくように背屈の主動作筋を刺激する ($R_2(+\psi)$)。目標座標に到達した瞬間に誘導を終了する。手先を左に誘導する必要がある場合は手の甲に代わって掌を ($R_1(\pm\phi)$)、背屈に代わって掌屈 ($R_2(-\psi)$) を用いる。目的のシステムには副次的に「着脱が容易であること」「軽量であること」が求められる。

3. システム構成

本システムはカメラ、電極、マイクロプロセッサ、パルス生成機器、電極セクタ、リレー、電源、カメラ、PCで構成する。アームスリーブと導電性布を利用することで着脱が容易で軽量の電極を設計した。電気刺激の振幅は10-40V、周波数は0-120Hz、パルス幅は0-800usの範囲で変更可能である。

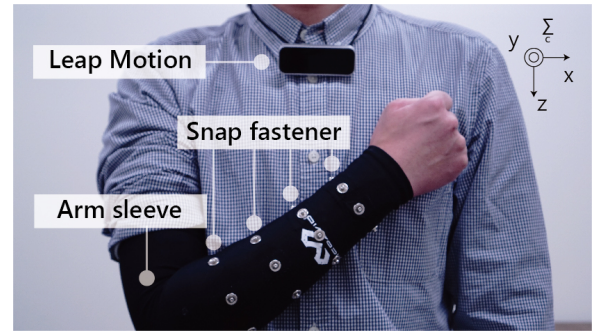


図 2: ハードウェア構成

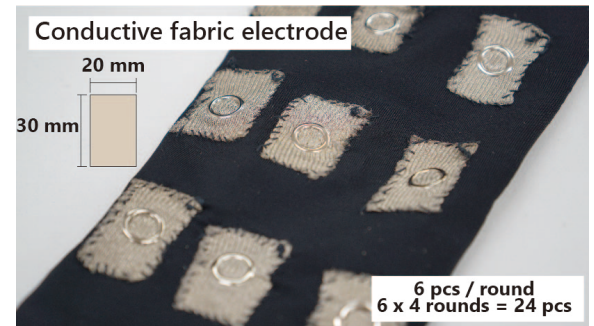


図 3: 導電性布の電極部

3.1 ハードウェア

図 2 にハードウェアの構成を示す。電極には湿らせた導電性布を使用する。電極 1 つあたりの大きさは 30mm x 20mm である。これを伸縮性の高いアームスリーブ (McDavid 製, M6566) に 24 個枚並べて内側に縫合する (図 3)。電極を前腕全体を覆うように配置することで個人が電気刺激する位置を容易に選択できるようにした。導電性布、アームスリーブを挟み込むようにスナップボタンを取り付ける。導電性布と外側に露出するスナップボタンが導通し、これを通じて筋肉に刺激を与えることができるようになる。回路とスナップボタンとの接続には導電コードを用いる。導電コードはスナップボタンの径に対応しており、容易に着脱できる。導電コードのもう片方はオーディオミニプラグであり、回路上のオーディオミニジャックに対応させることで容易に着脱できる。

3.2 電気刺激生成回路

図 4 に回路の構成を示す。パルス生成機器には Raspberry Pi Zero W を使用し、回路全体を制御するマイクロプロセッサの役割も兼ねている。電極セクタにはデマルチプレクサ (HD14051BP) を使用し、マイクロプロセッサからの入力により電気刺激を出力する電極を選択可能にする。リレーにはフォトカプラ (TLP521-4) を使用し、刺激の制御信号と電極に入力する刺激電位を電氣的に絶縁することで制御回路の破損を防ぐ。電源には定格 3.7V のリチウムイオンポリマー電池を DC/DC コンバータ (LM2733) により昇圧したものを使用する。

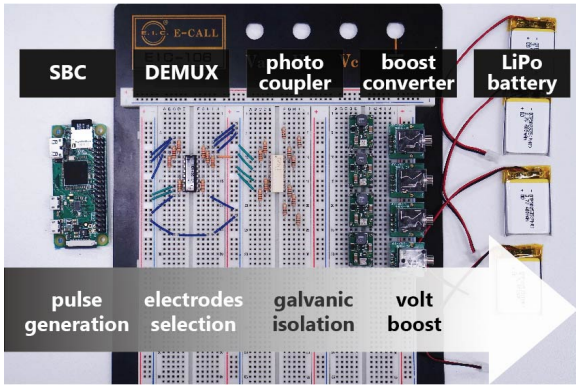


図 4: 回路構成

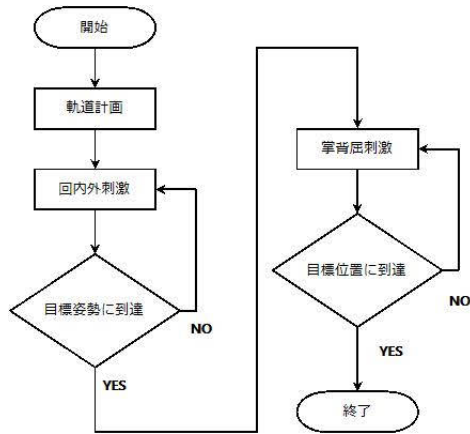


図 5: ソフトウェア構成

3.3 ソフトウェア

図 5 にソフトウェアのフローチャートを示す。カメラで検出した掌の中心の現在座標 P_h ・手先の姿勢 θ_h 、接続した PC で取得する。PC 内で回内外刺激、掌背屈刺激の開始時刻と終了時刻を判断する。Raspberry Pi Zero W には予め Websocket 通信のサーバが立てられており、クライアントとなっている PC は刺激の情報を送信する。サーバ側では受信した情報をもとに電気刺激を出力する電極を選択し、実際に電気刺激を行う。

4. 評価実験

4.1 実験設定

図 6 に関節角度の定義を示す。

本システムにより装着者の手先位置を 3 次元空間中の任意の位置に誘導する際の、誘導性能に関する評価実験を行う。

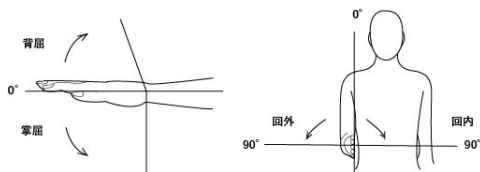


図 6: 関節角度の定義

ここでは、初期位置から目標位置までの到達にかかる時間を計測し、評価する。実験参加者の右腕に本システムを取り付け、机に座った状態で右手が左右、上下の動作が含まれるよう、右手前から左上へ誘導を行う。誘導の開始地点として図 2 に示すカメラ座標系における (-150, 350, 150) の座標、および目標地点として (80, 350, -200) の座標を設定した。以下の 3 つの経路で誘導する。

(A) 右から左に誘導したのち下から上に誘導:

掌を上に向けた状態、すなわち回外角度が 90 度の状態を初期姿勢とする。まず回外角度が 0 度になるまで回内運動を行う。次に、掌の中心座標の X 成分が 80 に達するまで掌屈運動を行う。次に回内角度が 90 度になるまで回内運動を行う。最後に掌の中心座標の Z 成分が -200 に達するまで背屈運動を行う。

(B) 下から上に誘導したのち右から左へ誘導:

掌を左上に向けた状態、すなわち回外角度が 45 度の状態を初期姿勢とする。まず回外角度が 90 度になるまで回外運動を行う。次に、掌の中心座標の Z 成分が -200 に達するまで掌屈運動を行う。次に回外角度が 0 度になるまで回内運動を行う。最後に掌の中心座標の X 成分が 80 に達するまで掌屈運動を行う。

(C) 右下から左上へ直線的に誘導:

掌を上に向けた状態、すなわち回外角度が 90 度の状態を初期姿勢とする。まず、掌の中心座標を通る垂直ベクトルが (80, 350, -200) に達するまで回内運動を行う。次に掌の中心座標の X,Z 成分がそれぞれ 80,-200 に達するまで掌屈運動を行う。

手順の項目数では C が少ないため目標地点に到達するまでの経過時間は少ないと考えられる。しかし、最初の回内運動で決まる回内角度が正確でないと A や B と比べて経過時間が長くなることも考えられる。なお、実験参加者は上肢に障害のない男性 1 名で、実験時は視覚的なフィードバックを排除するため閉眼にて行う。

4.2 実験結果

実験の様子を図 7, 図 8, 図 9 に示す。各経路 2 回ずつ行った結果、誘導には経路 A で 13.66 秒, 10.92 秒, 経路 B で 12.91 秒, 13.66 秒, 経路 C で 7.46 秒, 9.05 秒かった。平均を比較すると、まず下から上に誘導する経路 B が誘導に最も多くの時間を必要とし、次に経路 A, 直線的に誘導した経路 C が最も短い誘導時間になった。

5. 考察

手先誘導実験について、実験結果より、回内外運動の精度が確保されている場合、目標位置までの軌道を上下左右方向に分解した誘導 (経路 A,B) よりも直線的な誘導 (経路 C) の方がかかる時間が短縮されることが分かった。装着者が誘導に反して異なる方向へ手先を動作させることも可能であるが、パラメータが適切に調整されていたことで装着者がシステムを提示した誘導意図を正しく理解できたため、カメラを



図 9: 経路 C の手先誘導結果

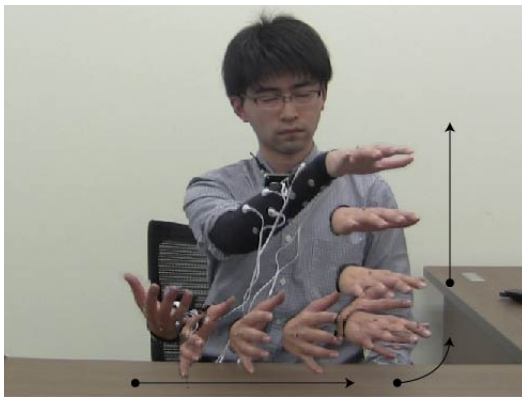


図 7: 経路 A の手先誘導結果

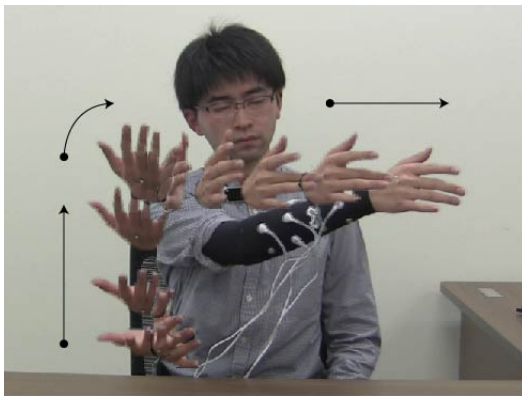


図 8: 経路 B の手先誘導結果

用いたフィードバックのみで誘導方向が力覚的に提示できたと考えられる。

誘導性能は使用したカメラのハードウェアの性能に依存し、今回用いたカメラの場合、まず、初期状態として掌がカメラに向いていないと手先を適切に検知できないという課題があった。このため、誘導開始時はこの姿勢を装着者が意図的に行う必要がある。また、回内外角度が0度に近い姿勢にある場面では、カメラからの情報で右手と左手を正しく判定することができず、目標位置まで掌背屈運動で誘導する方向が反対になる可能性があった。今回はそのような場面では右

手・左手関係のない掌の中心の現在座標 P_h のみを参照して誘導することでシステム全体の機能制限を回避することができた。

6. まとめと今後の展望

本研究では、高次脳機能障害を持つ人々の空間認知を支援することを目的として、筋電気刺激を用いて手先の誘導手法を提案するとともに、2自由度の運動を組み合わせた手先誘導アルゴリズムおよび、システム開発、性能評価のために実施した実験について述べた。これにより、開発したシステムを用いて装着者の右手先を3次元空間中の目標位置に、任意の軌道で誘導できることが明らかになった。

今後の展望としてはデバイスのポータブル化と前後方向へ手先を誘導する手法の検討が挙げられる。本システムにおける電気刺激回路は小型のマイクロプロセッサで制御されており、また、比較的計算量の多い手先の位置・姿勢検出の処理系とは無線で通信されているので、ポータブル化は容易に実現できると考えられる。加えて、前後方向にも手先を誘導する手法を取り入れることで、本システムは上下左右方向の平面内であった誘導を拡張することを考えている。

参考文献

- [1] 網本 和：夢幻の空間—半側空間無視の評価と治療の考え方，ヒューマン・プレス，2019.
- [2] 前田 真治：半側空間無視，高次脳機能研究（旧 失語症研究），Vol. 28, No. 2, pp. 214–223, 2008.
- [3] 沼尾 拓，網本 和：半側空間無視の視覚・運動感覚からの治療アプローチ（特集 半側空間無視），理学療法ジャーナル，Vol. 51, No. 10, pp. 883–891, 2017.
- [4] 太田 康介，成田 秀美：身体図式の生成を促す介入により食事と対人交流が改善した半側空間無視症例，作業療法ジャーナル，Vol. 49, No. 8, pp. 869–872, 2015.
- [5] 青木 幸平，木島 隆：半側空間無視患者のADL回復に体性感覚情報の統合が有用であった症例，関東甲信越ブロック理学療法士学会，Vol. 31, pp. 108, 2012.
- [6] Emi Tamaki, Takashi Miyaki, and Jun Rekimoto : PossessedHand: Techniques for Controlling Human Hands Using Electrical Muscles Stimuli, Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 543–552, 2011.
- [7] Jun Nishida and Kenji Suzuki : BioSync: A Paired Wearable Device for Blending Kinesthetic Experience, Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 3316–3327, 2017.
- [8] Oliver Beren Kaul, Max Pfeiffer, and Michael Rohs : Follow the Force: Steering the Index Finger towards Targets Using EMS, Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp. 2526–2532, 2016.