



THE VIRTUAL REALITY SOCIETY OF JAPAN

筋電位と連動した筋電気刺激によるモーションインダクション

松原晟都¹⁾, 脇坂崇平²⁾, 青山一真¹⁾, 檜山敦^{1),2),3)}, 稲見昌彦^{1),2)},

- 1) 東京大学 情報理工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, matsubara@star.rcast.u-tokyo.ac.jp)
 2) 東京大学 先端科学技術研究センター (〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1)
 3) 理化学研究所 革新知能統合研究センター (〒 103-8904 東京都中央区日本橋 1-4-1)

概要: 外発的な運動に運動主体感を伴わせることで、パワーアシストや筋電気刺激トレーニングの効果の向上が期待できる。本研究では、前腕の自発運動時に筋電計測を行い、直後に筋電気刺激を与え、大きな運動に誘導するシステムを構築した。また、運動主体感と関係する運動と刺激のタイミングのずれの知覚について検証し、刺激の潜時を 120-200ms にした場合、運動と刺激が主観的に同時であると被験者が感じる傾向が明らかとなった。

キーワード: 人間拡張, 生体, 電気刺激

1. はじめに

1.1 背景

外部から人間の身体運動を誘発させることには、応用先が様々存在する。例えば、筋電気刺激 (electrical muscle stimulation, EMS) による筋肉トレーニングがある。これは、身体に電流を流すと筋肉が収縮するという性質を用いて筋疲労を誘発させるものである。Watanabe らは、筋電気刺激を用いて効果的に筋疲労を誘発する方法を研究している [1]。日常の身体活動量を増やすことにより、メタボリックシンドローム等、生活習慣病や生活機能低下のリスクを下げるができる。

Nishida らの研究 [2, 3] では、筋電位計と筋電気刺激を用いたデバイスを用いて、被験者への運動覚の共有が行われており、Pedro らの研究 [4] では、被験者へ手首の屈曲・伸展角度の教示が行われている。また、パワーアシストシステムの研究では、筋電位計を用いて人間の動きを検出し、モーターによって運動をアシストする研究が行われている [5]。

これらの外部から人間の身体運動を誘発させることにおいて重要な概念として自己主体感がある。自己主体感は、「ある行為を自分が引き起こしている、または生み出しているという感覚」[6]とされる。しかし、外発的な身体運動には、自己主体感が常には伴わず、強制的に動かされている感覚になることがある。自己主体感が伴えば、筋電気刺激による筋肉トレーニングの達成感の向上が見込める。他には、熟練者の運動を外発的な運動により教示するというようなスキルの伝達時に、自己の行為結果の予測と実際の環境の変化が一致することで、一連の動作の把握が容易になることが見込める。また、自己主体感が伴うと痛みの閾値が上昇するという報告 [7] があり、自己主体感を保持することは筋電気刺激の痛みの低減にもつながると考えられる。さらに、外部から誘発さ

れる運動に対し自己主体感を伴わせることができれば、自分が行っていない運動に対しても自分が行ったと感じるといような暗示効果が得られると考えられる。以上より、外部から誘発される運動に対する自己主体感について検証し、人間の認知機能について解明することは重要である。

本研究では、自己主体感のうち、特に自身の運動に着目したものを運動主体感と呼ぶ。

1.2 運動主体感

本研究では、外発的な運動に運動主体感を伴わせる第一段階として、運動主体感は自己の行為結果の予測と実際の環境の変化が一致する状態で生じられるという運動制御理論の仮説 [8] にのっとり、内発的な運動の増幅において検証を行う。具体的には、上腕二頭筋を振り上げようとするタイミングに合わせて筋電気刺激を与えることで運動主体感が保持されることを検証する。

Sato らは、ボタンを押すと音が流れる仕組みを用いて、ボタン押下からの遅延が大きいほど自己主体感が低下することを報告している [9]。また、Shimada らは、指が本来の動きから 200-250ms 遅らせた映像を見せたとき、指が遅れていると判別できると報告している [10]。このため、自分の行為からそのフィードバックまでの時間と運動主体感とは密接に関係しており、「一定の時間範囲」であれば運動主体感を損なわずに外発的な運動を与えることができると考えられる。

1.3 目的

本研究では、運動を行う意図を、実際に運動が行われるより前に筋電位計により取得する。筋電位計を用いた方法は脳波計等と比較して簡便で非侵襲的であるという点で優れている。また、外発的な運動の生成には、実際に筋肉を収縮させる方法である筋電気刺激を用いた。

運動主体感を損なわずに外発的な運動を与えるパラメータの同定のため、上腕を曲げようとする意図を筋電位計によって検出し、筋電気刺激により本来の意図よりも大きく腕

Seito MATSUBARA, Sohei WAKISAKA, Kazuma AOYAMA, Atsushi HIYAMA and Masahiko INAMI

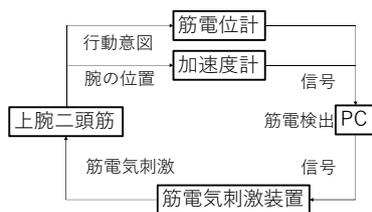
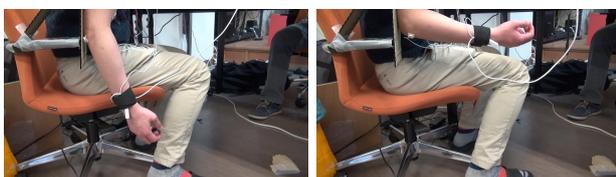


図 1: 提案装置のシステム構成図:上腕二頭筋から発生する電位を筋電位計によって測定し, PC 上で処理することで行為意図を検出する。検出した後に筋電気刺激発生装置に信号を送り, 信号を受け取った装置が上腕二頭筋部に電流を流す。



(a) 被験者に指示した振幅 (b) 装置作動時の振幅

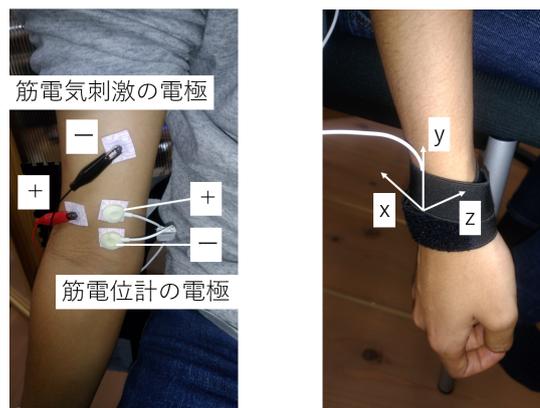
図 2: 実験時の腕の振幅

が曲がる装置を作成した。この装置のシステム構成図を図 1 に示す。実験の様子を図 2 に示す。被験者には, 図 2 (a) のようにほんの少し腕を曲げさせるように指示し, 適切に装置を作動させると図 2 (b) のように, 大きく腕が曲がるように誘導する。これにより, 運動が増幅され, 運動増幅感を提示することができる。以後, この運動の増幅をモーションインダクションと呼ぶ。

以上より本研究では, 運動主体感を損なわない, 腕の動きの検出から刺激までの時間の範囲を明らかとすることを目的とする。

2. 提案手法

まず, 上腕二頭筋の収縮により発生する電位を筋電位計 (biosignalsplus: サンプル周波数 1000Hz, ゲイン 1000, 測定範囲-1.5mV 1.5mV, 帯域 25-500Hz) を用いて測定し, Bluetooth 通信により PC に伝送する。PC 上で 20 フレームずつ筋電位の絶対値の平均を計算し, 実験中に設定する閾値より大きい場合に上腕を振る意図 (本研究では端的に「行為意図」と呼ぶ。) を検出したとする。直後または一定時間経過後に, 筋電気刺激装置 (2ms 矩形波パルス, 200Hz, 8mA) に絶縁シリアル通信を用いて信号を伝送し, 信号を受け取った装置が上腕二頭筋部に筋電気刺激を与え, 収縮させる。また, 加速度計を手首に装着する。筋電気刺激による電流の影響や行為意図を正確に検出するため, 一度刺激を与えた後に上腕二頭筋の力を抜き, 次の運動に備えるための時間を設定



(1) 電気刺激, 筋電計 (2) 加速度計

図 3: 被験者への電極と加速度計の装着図

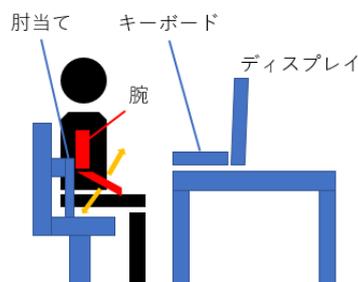


図 4: 実験環境

する。具体的には, 加速度計を用いて腕が下に向いていることを検出し, この状態で 800ms 経過したのちに次の行為意図を検出することとする。

筋電気刺激に慣れていない状態では, 身体に電流を流すと驚愕反応が起きることで運動主体感が著しく損なわれる。また, 筋電気刺激を十分に行っていない場合では, 筋肉が大きく動きすぎること運動主体感を損なうと考えられる。以上より, 本研究では筋電気刺激に十分に慣れ, ある程度筋疲労した状態において実験を行う。

3. 実験

3.1 提案手法によるモーションインダクションの確認

被験者は健康男性 10 名であった。なお, 本実験は東京大学情報理工学系研究科倫理委員会の承認を得て実施し, 被験者は本実験の参加に関する十分なインフォームドコンセントを受け同意書に署名した上で, 実験に参加した。

事前にウェットティッシュを用いて, 電極を貼付する上腕二頭筋部, 肘部を拭いた。その後, 筋電気刺激装置及び筋電位計を上腕二頭筋部につけ, 筋電位計の参照電極を肘に装着した。また, 加速度計は手首に装着した。この様子を図 3 に示した。また, 被験者を椅子に座らせ, 前方にディスプレイとキーボードを置いた。図 4 にこの実験環境を示した。

被験者に 10 秒間の筋電気刺激を 20 回程度行い, 驚愕反応が起こらなくなることを確認した。次に, 筋電気刺激を用いず筋電位を計測し, 安静時に行為意図を検出しない閾値を

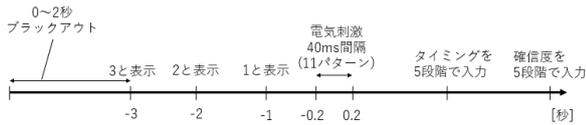


図 5: 本実験のシーケンス図。被験者に提示したタイミングから 200ms 前～200ms 後に筋電気刺激を与え、その刺激が早かったか遅かったか報告させた。

被験者ごとに設定した。この時、筋電気刺激が行為意図とは関係なく流れてしまうことがあること、腕の力をできるだけ抜いて筋電気刺激による筋肉の動きに抵抗しないことを被験者に伝えた。行為意図を検出し、筋電気刺激によって上腕二頭筋を 30 度程度曲げさせる試行を 100 回行い、装置の使用に慣れさせた。刺激を自分が引き起こしている感覚を運動主体感とし、刺激に対しそれがなかった場合にキーボードのスペースキーを押下して報告するように指示した。

報告の割合は平均して 1 割以下であった。また、行為意図の検出から最大限早く筋電気刺激を与えるまでの時間の平均は 48.3ms で、標準偏差は 20.1 であった。以後、行為意図の検出から筋電気刺激を与えるまでの時間のことを detection-stimulus interval(DSI) と呼ぶ。

3.2 意図検出から刺激までの適切な時間の評価の実験

3.2.1 準備

DSI を調べたいデータの範囲内に収めるために、実験の練習を行った。行為意図を検出すると筋電気刺激を与える状態で、黒背景に白文字 (28pt, MS ゴシック体) で画面に 1 秒ごとに 3, 2, 1, 0 とカウントダウン表示し、0 になる瞬間に腕を振るよう指示した。試行ごとに、自分の動かしたタイミングより刺激が「早い」、「少し早い」、「一致」、「少し遅い」、「遅い」の 5 段階でキーボードを用いて報告させ、その後確信度を、確信がある方が 5、ない方が 1 の 5 段階でキーボードを用いて報告させた。試行と試行の間に、被験者が全体を通してリズムをとるのを防ぐため、刺激感時間間隔を 0～2 秒の間でランダムにした。この試行を 0 になるタイミングから 5 回連続で ± 100 ms 以内に行為意図の検出が行われるようになるまで行った。その後、被験者が視覚刺激と比較してしまうことを防ぐため、0 の表示をやめ、1 の表示が出続ける状態にした上で、0 が出ているタイミングに腕を振らせる試行を行い、0 が出ているタイミングから 5 回連続で ± 100 ms 以内に行為意図の検出が行われるようになるまで行った。

3.2.2 実験

筋電気刺激を画面上のカウントダウンに合わせて、0 になる瞬間から 40ms ごとに 200ms 前～200ms 後で刺激を与えた。条件ごとに 10 回ずつ計 110 回の試行をランダムイザド・オーダーで行った。試行ごとに、自分の動かしたタイミングより刺激が「早い」、「少し早い」、「一致」、「少し遅い」、「遅い」の 5 段階でキーボードを用いて報告させた。その後確信度を、確信がある方が 5、ない方が 1 の 5 段階でキーボードを用いて報告させた。このシーケンスを図 5 に示

表 1: 実験 1 の確信度

確信度の回答	1	2	3	4	5
報告回数	10	64	273	428	215
割合 (%)	1	6.5	27.6	43.2	21.7

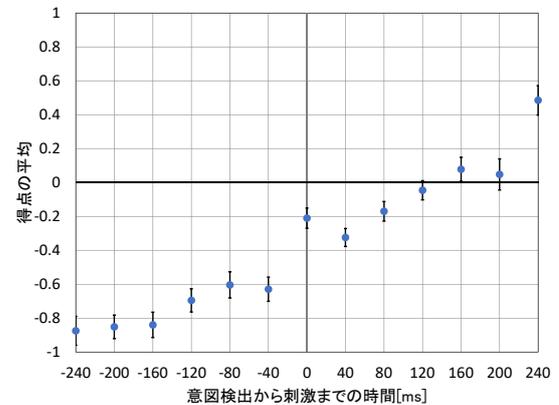


図 6: DSI とずれの知覚の関係 (被験者 9 名の平均): エラーバーは標準誤差。行為意図検出と刺激が同時の場合、ずれを知覚する割合が低下した。120ms から 200ms 程度までの間で得点が 0 に近く、適切な筋電位検出から筋電気刺激までの時間であると示唆された。

す。また、行為意図の検出が刺激よりも早かった場合、検出の時刻から刺激までの時間を筋電図から DSI を導出し、刺激が行為意図の検出よりも早かった場合、1 つ前の行為意図検出の時間と同じであると推測して DSI を導出した。この DSI と被験者の回答の関係を調査した。

3.2.3 結果

被験者のうち、1 名が遅いと感じた回数が 0 であり、回答方法を間違えたと判断されたため、結果から除外し、9 名のデータについて解析を行った。確信度について表 1 に示した。次に、「早い」、「遅い」が選択された回数が少なく、被験者ごとに閾値が異なると考えられたため、「早い」、「少し早い」を -1 点、「一致」を 0 点、「遅い」、「少し遅い」を 1 点とカウントして集計した。結果、すべての被験者に対して DSI が大きくなるにつれ得点が高くなる傾向がみられた。

被験者 9 名の試行を合わせて解析したものを図 6 に示した。行為意図検出から 280ms 以前、以後のデータについてはデータ数が少なかったため表示しなかった。

3.2.4 考察

表 1 について、1, 2 と答えた割合が全体で 10% 以下であり、被験者はある程度確信をもって回答したことがうかがえた。

図 6 より、120ms から 200ms 程度までの間で得点が 0 に近く、適切な DSI であることが示唆された。DSI が 0 のときずれの知覚の程度が低い原因は、0 のタイミングを表示しないように設定したが、被験者が画面に表示されるカウント

ダウンによる0の推定による影響を完全には排除することができず、一致すると感じるが多かったと考えられた。また、刺激が行為意図検出よりも早かった場合、被験者は早いと感じることが示唆された。

また、図6において、DSIが50ms付近での得点が-0.3であり、30%程度の試行で早いと感じたことが示唆された。しかし、モーションインダクションの確認時においてもDSIが約50msであったが、刺激を自分が引き起こしていないと報告した割合は10%以下であった。このことから、運動主体感のほうか時間のずれの知覚より許容範囲が広いことが示唆された。さらに、運動主体感を損なわないのにも関わらず、刺激が運動より早く来ていると感じることがあることから、筋電気刺激によりリアクションタイムを短縮することができる可能性が示唆された。

また、被験者10人に対して意図に関わらない外発的な運動に対する運動主体感について予備実験を行った。モーションインダクションを行う状態で4~6秒に一回程度腕を振るよう指示し、行為意図を検出せずに筋電気刺激を行い、刺激を自分が引き起こしている感覚がなかった場合に報告するよう指示した。結果、20回中平均して4回報告がなされなかった。報告の頻度から、筋電位の増大以前に脳による予測が行われており、そのタイミングから筋電位の増大までにモーションインダクションが行われたと示唆され、予測が行われている範囲内であれば運動主体感が伴うと示唆された。

4. おわりに

本研究では、筋電位計と筋電気刺激を用い、行為意図を検出し、そのタイミングに応じて筋電気刺激を行うシステムを構築した。また、行為意図から筋電気刺激が行われる時間(DSI)と運動主体感には密接な関係がある仮説のもと、DSIと刺激と運動のタイミングのずれの知覚について検証し、運動主体感を損なわずにモーションインダクションを行うためのDSIについて考察を行った。

その結果、DSIが120ms~200ms後のタイミングで刺激を与えると筋電気刺激のタイミングと自分の運動が一致したと感じられることが明らかとなった。

提案手法の改善策として、行為意図の検出手法の改善があげられる。筋電気刺激を与えるごとに安静時の筋電位を測定し直し、動的に閾値を決定する方法が考えられる。また、筋電気刺激の電流値、波形、刺激時間、電極位置等を調整することがあげられる。これらを改善することで機械への信頼感が増し、運動主体感の向上が見込める。

また、モーションインダクションの確認時に、DSIは50ms程度であったのに運動主体感は損なわれなかった。また、意図に関わらない外発的な運動に対する予備実験において筋電位の増大よりも早い刺激でも運動主体感が損なわれない可能性が示唆された。以上より、運動主体感を損なわずにリアクションタイムを短縮することができる可能性が示唆された。

今後は以上の事柄について実装、評価し、さらなる改善を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は、JST CREST (JPMJCR16E1)の支援によるものである。

参考文献

- [1] Kohei Watanabe, Shuhei Kawade and Toshio Moritani: Effect of electrode position of low intensity neuromuscular electrical stimulation on the evoked force in the quadriceps femoris muscle, BMC research notes, Vol. 10, No. 1, pp 300, 2017.
- [2] 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.
- [3] Jun Nishida, Shunichi Kasahara and Kenji Suzuki: Wired muscle: Generating faster kinesthetic reaction by inter-personally connecting muscles, ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies, 2017.
- [4] Pedro Lopes, Alexandra Ion, Willi Mueller, Daniel Hoffmann, Patrik Jonell and Patrick Baudisch: Proprioceptive interaction, Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, pp 939–948, 2015
- [5] Tomohiro Hayashi, Hiroaki Kawamoto and Yoshiyuki Sankai: Control method of robot suit HAL working as operator's muscle using biological and dynamical information, Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on, pp 3063–3068, 2005.
- [6] Shaun Gallagher: Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science, Trends in cognitive sciences, Vol. 4, No. 1, pp. 14–21, 2000.
- [7] 今井亮太, 大住倫弘, 森岡周: 腱振動刺激による運動主体感の錯覚が痛み閾値に与える影響, 日本理学療法学会大会 Vol. 42, Suppl. No. 2, (第50回日本理学療法学会大会抄録集), pp 0308, 2015.
- [8] Sarah-Jayne Blakemore, Daniel M Wolpert and Christopher D Frith: Abnormalities in the awareness of action, Trends in cognitive sciences, Vol. 6, No. 6, pp 237–242, 2002.
- [9] Atsushi Sato and Asako, Yasuda: Illusion of sense of self-agency: discrepancy between the predicted and actual sensory consequences of actions modulates the sense of self-agency, but not the sense of self-ownership, Cognition, Vol. 94, No. 3, pp 241–255, 2005.
- [10] Sotaro, Shimada, Yuan Qi and Kazuo Hiraki: Detection of visual feedback delay in active and passive self-body movements, Experimental brain research, Vol. 201, No. 2, pp 359–364, 2010.