

筋電義手システムにおける無駄時間要素が操作性に及ぼす影響について

The Effects of Dead Time Elements in Myoelectric Prosthetic Hand

○中村達弘 (電通通信大学) 加藤龍 (電通通信大学) 横井浩史 (電通通信大学)

Tatsuhiko NAKAMURA, The University of Electro-Communication

Ryu KATO, The University of Electro-Communication

Hiroshi YOKOI, The University of Electro-Communication

Abstract: Compared with the Normal Hand, There are Additional Dead Time Elements in Myoelectric Prosthetic Hand. Driving Force Transmission by Wire and Stable Inference System of User Intension are Main Cause of it. So when Constructing the System for Every Daily Life, the Systems should be acceptable Dead Time Elements so as not to disturb the task execution. In this paper, the acceptable Dead Time in Myoelectric Prosthetic Hand is validated by two Response time Critical tasks execution with various conditions. By the Catch-ball task, short response time is not always leads to the Good Performances. But by the fMRI analysis, only the short response time could be satisfy the simultaneous activated regions. These results say that Myoelectric Prosthetic Hand response time should be determined according to the purposes that use it as only the tool or alternative hand.

Key Words: Myoelectric Prosthetic Hand, FMRI, Pattern Recognition, Dead Time Element

1. 諸言

厚生労働省の平成 18 年身体障害児・者実態調査によると、工業機械の安全性が向上し続けていることもあり減少傾向にはあるものの、依然として上腕切断者数は約 8 万人に及び⁽¹⁾、多くの人が手指機能を失う状況にある。このような切断者や先天的欠損者が手指機能を獲得するための装置として義手があり、その中でも残存する筋群から使用者の意図を推定する筋電義手は健常手と類似した操作性が実現しうるデバイスとして多くの研究機関において高機能化・安定性向上のための研究がなされている。^{(2),(3),(4)}

筋電義手はまず筋群への制御信号として出力された筋電位を運動意図にデコードし直したのち、外部駆動源により多指ハンドを推定意図に応じて制御するという過程を経る。このとき筋電義手は動作意図の一定以上の推定精度が担保されるまで筋電位を計測しつづけそののちに多指ハンドを制御するため、健常手による意図実現と比較した場合、付加的な無駄時間要素を含むこととなる。よって筋電義手を設計するに当たり、運動意図の推定精度と動作実現までの遅れ時間とのトレードオフを適切に設定しなければならない。

本稿においては、付加的な無駄時間要素による筋電義手への操作性への影響を筋電義手による応答性を要求されるタスクの実行とそのようなタスクの実行時における脳賦活状態の評価により検証し、筋電義手の設計仕様を確定させることを目的とする。

2. 多自由度筋電義手による無駄時間要素

多自由度筋電義手における無駄時間要素の付加は主に十分な駆動力を操作性を阻害しないように伝達する必要があることと多動作の意図推定の安定性を確保することに由来する。

2-1. 駆動力伝達による無駄時間要素

多自由度筋電義手の設計に当たり、「手先重量と可搬性」、「実現が可能な動作種類」が満足される必要がある。

鎌倉らによれば、手指の基本機能は、8 種類に分類され、把持機能 5 種 (Fitting, Grasping, Connecting, Tool, Gesture)、センシング機能 2 種 (Sensing, Passivity)、操作機能 (Manipulating) 1 種に大別される。これらの動作実現する場

合、十分な把持力を確保したままその占有体積および重量を欠損部位が占有していた領域に格納するのは困難となる。また、手先重量の増加は肘、肩、体幹部への負担が過大になってしまう。

本研究グループではこのような問題に対して干渉ワイヤ牽引機構を採用することにより十分な把持力と自由度を確保したまま手先の軽量化を可能とした。しかしながら、ワイヤのたるみや伸び、任意の伝達経路を実現するためのガイドチューブ内での経路長の変化により、駆動力伝達において無駄時間要素が存在する。

2-2. 動作意図推定における無駄時間要素

筋電位からの動作意図推定方法はさまざま提案させているがその多くはパターン認識手法による。対象筋電位を一定区間切り出してその区間の特徴を抽出し、事前に与えられた特徴と動作意図との対応関係を学習した識別機により新たなデータの特徴を離散パターンに分類する。事前に学習される動作意図としては、周波数特性に定常性のある、手指姿勢を維持した時の筋電位信号が選択される。

手指の任意姿勢から次の姿勢へ移る際に計測される筋電位波形を図 1 に示す。この際に計測される筋電位は主に以前の手指姿勢を維持するための信号、姿勢を変化させるために指令される信号、目的の手指姿勢を維持するために指令される信号が順次計測される。

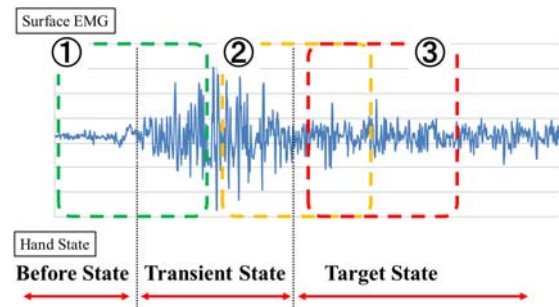


Fig1. Hand Motion and Surface EMG.

- 1, Before State Surface EMG + Transient State Surface EMG
- 2, Transient State Surface EMG + Target State Surface EMG
- 3, Target State Surface EMG Only

しかしながら、事前に教示される筋電位特徴と意図された手指姿勢との関係は事前姿勢と目標姿勢のときのみであり、その過渡領域を一部でも含む筋電位信号は教示されない。過渡領域を含む筋電位信号の特徴を新たにオンラインで獲得すると推定すべき状態が増大し、より長期に観測される特徴の比較的安定した手指姿勢の推定を阻害する恐れがある。そのためこの過渡領域時の誤作動を防ぐため推定結果に対して一定以上に確信が得られる筋電位信号が観測されるまで、動作の決定を保留するなどの措置を行う必要がある。

3. 許容する無駄時間の測定実験

どの程度の無駄時間要素が筋電義手の操作性に影響し、その実現が困難となりまた健常手との違いが存在しうるのかを検証するために応答性が要求されるトスされるボールの筋電義手によるキャッチと等速落下する物体への筋電義手による目標位置での把持するときの脳賦活部位の検証をFMRI環境下で行った。

3-1. トスされるボールのキャッチ

健常者において、健常手と複数条件の無駄時間要素(0ms, 100ms, 200ms, 300ms, 400ms)を動作意図推定に挿入した筋電義手によりトスされるボールのキャッチタスクを行った。

20代健常者5名に対し右腕前腕部に筋電位センサを前腕3ヶ所(橈側手根屈筋, 総指伸筋, 長橈側手根伸筋), 上腕2ヶ所(上腕二頭筋, 上腕三頭筋)に配置し、橈側手根屈筋に対する閾値制御により動作意図を推定する。健常手・義手ハンドの第3指に曲げセンサを配置し手指の動作タイミングを計測する。

図2に示すボールの投射機により各条件において30球行いその成功率を算出する。なお、健常者が筋電義手を装着する場合、前腕手指からさらに10cm程度延長された状態となるため、十分な操作練習時間と義手操作なしの状態でのトスボールの捕球動作の練習を行わせた。

3-2. キャッチ実験の結果

各被験者における各実験条件のタスク成功率の違いを図3に示す。すべての被験者において健常手によるタスク成功率は93%以上であった。筋電義手装着によるタスク成功率は最大でも70%であり、また条件や被験者によっては20%以下の試行が存在した。健常手と比較して低い成功率に終始した。本実験で使用されるボールの投射機はボール自体の偏心によりキャッチされる高さでの位置の分散が大きい。このことに加え摩擦条件の悪い筋電義手によってタスク達成が困難となっていることが考えられる。

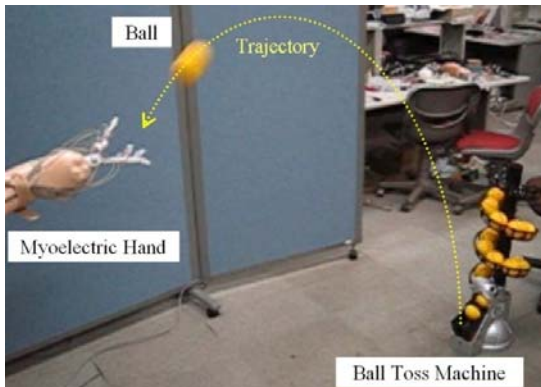


Fig2. Toss Ball catch by Myoelectric Prosthetic hand

成功率の推移は2パターン存在する。被験者A,Dにおいて0msの条件以降成功率が下降するが、400msの条件において一定の改善が見られた。被験者C,Eにおいては無駄時間が長くなる実験条件になる度に成功率が改善し400msにおいて最高の成功率(C:47%, E:53%)を記録した。このことから、応答性がよいことが必ずしもタスクパフォーマンスの改善にはつながらないことがわかる。又、条件0msや100ms, 200msでの義手操作練習の際、それぞれの遅れを被験者が認知できていなかった。この認知できていない遅れが被験者の義手動作の調整を困難にしていること、400msの被験者が明らかに認知できた遅れの場合その調整が可能になったことが考えられる。

計測系に不具合の生じた被験者D以外のボルトスから筋電義手の動作開始までの経過時間を各被験者、各条件について図4に示す。すべての被験者において設定した条件間の無駄時間の差100ms以下の条件下での差異(約50ms)しかなかった。このことは義手操作練習の際に認知できなかった無駄時間の差異が応答性を要求されるタスクの実行時においては認識され、タスクに合わせてある程度の調整が行われていることが分かる。

3-3. 脳賦活状態の検証実験設定

筋電義手の動作開始の遅れに対する脳機能活動の差異をFMRIにより検証する。健常肢に対して約120ms動作の開始が遅れる義手に対し、付加的に0ms, 200ms, 400ms, 600msの遅れを与えた条件(120ms, 320ms, 520ms, 720ms)にて筋電義手を操作させ、等速落下するボールにつけられたマーカーの位置と筋電義手の人差し指につけられたマーカーをそろえるように把持させた。(図5)

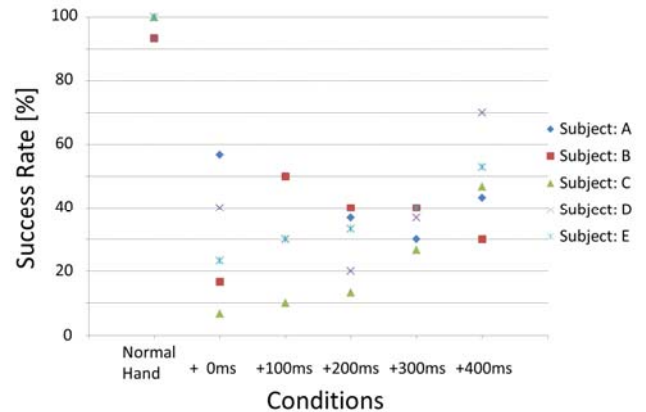


Fig3. Toss Ball catch: Success Rate per each Conditions

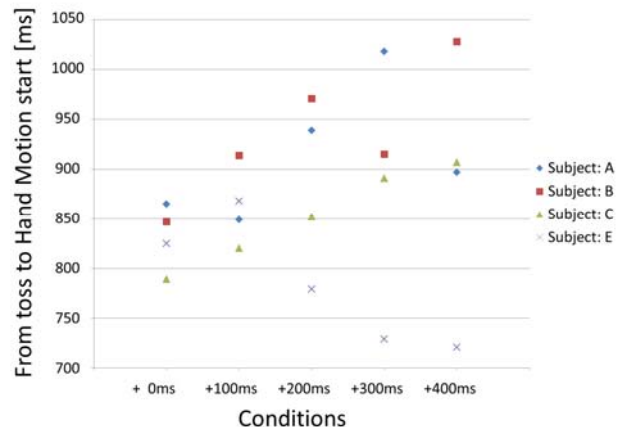


Fig4. Toss Ball catch: Success Rate per each Condition

20代健常者女性に対し右腕前腕部に筋電位センサを3ヶ所（橈側手根屈筋，総指伸筋，長橈側手根伸筋）配置して筋電義手の脱力および把持状態を十分にトレーニングさせた。また筋電義手に圧力センサを計6カ所（各指末節骨の指腹と掌）配置し，いずれかの圧力センサが反応した場合に触覚情報として左腕上腕に電気刺激（Russian Waveform :Carrier 4kHz, Burst 100Hz ,Duty 100%）を与える。各実験条件において6セッションであり，各セッションにてタスクを実行した。解析にはSPM2⁽⁵⁾を用いた。タスクのパフォーマンスは等速落下するボールのマーク位置と筋電義手のマーク位置の位置誤差によって評価する。

3-4. 脳賦活状態の検証実験の結果

本タスクのパフォーマンスは全ての実験条件において差が見られずその誤差は小さかった。このことより本タスクは筋電義手で実現は可能であることが分かる（図7）。

脳の賦活領域においては，すべての実験条件において筋電義手を動作させる左側部の一次運動野と一次体性感覚野に有意な賦活が見られた（図6）。このことから，健常肢の動作とそれに伴う感覚情報が同時に得られている状態が存在すると考えられる。条件120msと720msにおいて，右側（感覚フィードバック側）に手領域の一次体性感覚野に賦活が見られ，それ以外の条件では有意な賦活は見られなかった。両条件(120ms,720ms)において筋電義手を制御する運動野領域とそれに対する感覚野領域において同時に賦活する条件が確保されていることから，これは健常肢動作における賦活領域と同じである。しかし条件720msにおいては前頭前野において有意な賦活が多数観測されているため，何らかの高次認知機能を使用し，試行錯誤的にタスクを実行していることが考えられる。このため本来の健常肢動作において賦活しない領域が賦活しているため望ましくない。

条件(320ms,520ms)においては前頭前野での賦活は見られないものの感覚野領域（右側）に賦活が見られず同時に賦活するという条件が満たされていない。

このため脳賦活領域が健常肢動作における賦活状態と同等の条件を満たすためには筋電義手動作が少なくとも120ms以内の時間的な遅れで動作する必要があると考えられる。

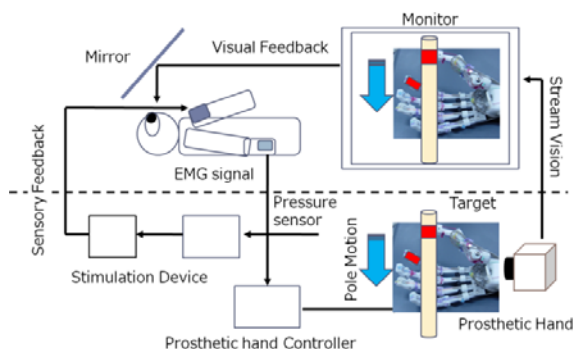


Fig5. Maker grasp : fMRI setting

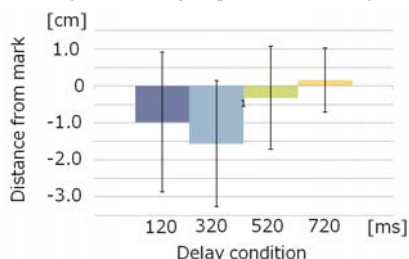


Fig6. Maker grasp Performance : Marker Distance

4. 結論

本稿では無駄時間要素を複数条件で設定した筋電義手による応答性の要求されるタスクの実行とそのようなタスク実行時の脳賦活領域を検証した。

応答性の要求されるタスクの成功率は必ずしも応答性の良い筋電義手が高いわけではなく，実行時にその時間的なずれを認知が可能であるような条件のときその差異を調整して実行が可能であることが確認された。

脳賦活領域の検証においてタスクパフォーマンスはすべての条件化において差異がみられないものの，無駄時間が短い設定においてのみ健常手にみられる運動野と体性感覚野の同時賦活がみられ，また過度に無駄時間が長い条件では前頭前野の賦活が起きてしまうことが分かった。

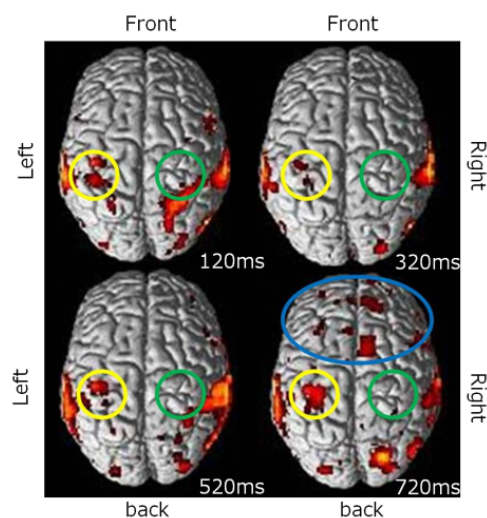


Fig7. Maker grasp Performance : Activated Region

謝辞

本論文における筆者らの研究は文部科学省「脳科学研究戦略推進プログラム」ブレイン・マシン・インターフェース (BMI) の開発，研究開発拠点整備事業（課題 A）からの援助を受けて行われた。

参考文献

- (1) 厚生労働省，平成18年身体障害児・者実態調査，2006.
- (2) Wiste, T.E., Dalley, S.A., Withrow, T.J., Goldfarb, M.; Design of a multifunctional anthropomorphic prosthetic hand with extrinsic actuation; Rehabilitation Robotics, 2009. ICORR 2009. IEEE International Conference on 23-26 June 2009 675-681
- (3) Wiste, T.E., Dalley, S.A., Withrow, T.J., Goldfarb, M.; Design of a multifunctional anthropomorphic prosthetic hand with extrinsic actuation; Rehabilitation Robotics, 2009. ICORR 2009. IEEE International Conference on 23-26 June 2009 675-681
- (4) J.L.PONS, E.ROCON, R.CERES, D.REYNAERTS, B.SARO, S.LEVIN, W.VAN, MOORLEGHEM; The ANUS-HAND* Dextrous Robotics Upper Limb Prosthesis: Mechanical and Manipulation Aspects; Autonomous Robots 16, 143-163, 2004
- (5) <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>