

生体信号を利用した繰り返し運動における 非定常行動の抽出

家元真司[†] 戸田真志[†] 櫻沢繁[†]
秋田純一^{††} 近藤一晃^{†††} 中村裕一^{†††}

本研究の目的は、繰り返し行われる運動の中で、常に行われる定常な行動と、間違いや戸惑いなどを含んだ、たまにしか行われない非定常な行動を、生体信号を利用して抽出することである。我々は新しいインタフェースを作る際に、戸惑いや迷いなどができるだけ起こらないように工夫してきた。結果、インタフェースはよりわかりやすく、使いやすいものへと進化してきた。一方で、認知分野では、マイクロスリップのように戸惑いというテーマは非常にポピュラーなもので、行動心理の解析を目的とし、カメラやデータグローブなど多くの計測機器を利用して取得、解析を行ってきた。そこで、本研究では認知分野からみた戸惑いを、インタフェース研究へと応用するために、表面筋電位信号を利用して計測を行った。その結果、急停止などを行った際に、違う信号が出ていることがわかり、主動筋と拮抗筋に着目することで、それらを分類することが出来た。

Extraction of Nonsteady Action on Repetitive Exercise Using Biological Signals.

Masashi Iemoto[†] Masashi Toda[†] Shigeru Sakurazawa[†]
Jyunichi Akita^{††} Kazuaki Kondo^{†††}
and Yuichi Nakamura^{†††}

Purpose of our study is to separate nonsteady action and steady action using biological signals. When we make some new interface, we have to consider to usability. In the field of interface research, decreasing confusion was discussed since before. Thus, interfaces grow more use easily, more understand easily. In contrast, in the field of cognitive research, a lot of studies about confusion are researching as a popular theme such as microslip. They aimed to analysis behavior psychology. Thus they use video camera or motion-capture system as a method to observation and analysis of confusion. In this study, we acquire and analyze confusion using surface Electromyogram, and make new interface using confusion. As a result, when examinee does rapid motion change, Electromyogram confirm difference signal. Moreover, we focus relation of agonist muscle and antagonist muscle, we found the Electromyogram separate to nonsteady action and steady action using outlier analysis.

1. 序論

我々が何か新しいインタフェースを創ろうとするとき、我々はユーザの立場に立って考えなければならない。ユーザがどのようにそのインタフェースを利用するのかを想像し、ユーザが迷わず、わかりやすく使用できるように設計する必要がある。このように、インタフェース研究者はどういった人が戸惑うという行為を減らすことが出来るのかを日々研究を行って来た。実際、インタフェース研究の分野ではこの戸惑いを減らすという研究は古くからのテーマであり、長く議論されてきたものである。これらの研究では戸惑いなどができるだけ少なくなるインタフェースがいいものとされ、どうしたら使いやすくなるか、どうしたらわかりやすくなるかに重点を置いて研究がなされていた。しかしながら、インタフェースを使うときになぜ戸惑いが起こるのか、などの2つの関係性に着目した研究はほとんど行われていなかった。

背景的知識を全く持っていない人が初めて何か新しいインタフェースを触るときに、きっと使い方に戸惑ってしまうだろう。しかし、多くの人がほとんどの機能を理解して、使用している。これは、多くの人が、過去の経験から使い方を想像し、予測しながら操作しているためである。そこで、インタフェース研究者は、それらの人の行動の特徴をインタフェースへ利用しようと考えた。その結果生まれたのが、直観的インタフェースと呼ばれるもので、これには、我々が日常で行う行為や、動作をイメージしやすいもの、たとえば、「腕を振る」「腕を曲げる」「ボタンは押せる」「矢印は移動できる」といったものを利用している。この直観的インタフェースの開発によって多くのインタフェースが使いやすくなり、戸惑う回数も減らすことが出来た。

直観的インタフェースの開発により戸惑う回数を減らすことには成功したが、戸惑いを完全になくすことはできなかった。パソコンを使うときの場合を考えると、様々な場所でパソコンを使う機会があった若い人はパソコンを簡単に使うことが出来た。一方、ほとんどパソコンを使う機会がなかった人にとっては、パソコンを使うことはひどく難しいものであった。つまり、経験として予測できないものが混ざっている限り、インタフェースを操作するという点において、戸惑いをなくすことは非常に難しい問題であるといえる。

一方、認知系分野では、マイクロスリップに代表されるような、戸惑いを観測するというテーマはポピュラーなものとして、古くから多くの研究がなされている。これらの研究では、行動心理などの解析を目的としているため、被験者の体、または周辺

[†] 公立ほこだて未来大学
Future University-Hakodate

^{††} 金沢大学
Kanazawa University

^{†††} 京都大学
Kyoto University

に様々な機器を設置してデータの計測を行って来た。これにより様々な方面から戸惑った時にどのような変化が起こるかについての考察が行われてきたが、計測機器が大掛かりなものになってしまったため、そのままインタフェースへ応用するにはこの問題を解決する必要がある。

入島らの研究[1]では、予測を伴う場面での自転車運動時生体機能の変化について述べられている。この研究ではいくつかの生体信号を使い予測を必要とする場面において生体機能の変化に対する解析を試みている。予測を必要とする場面において、生体信号にいくつかの傾向がみられ、人は状況に合わせて様々な筋肉を使用していることが分かった。しかしながら、この研究においても様々な計測機器を用いているがゆえに、装置が大掛かりなものとなってしまう、インタフェースへの応用は難しいものとなっている。

2. 表面筋電位信号

本研究では、戸惑いを取得するために、生体信号、特に表面筋電位信号を利用する。表面筋電位信号は筋肉を伸縮する際に、脳から神経を通して流れる電気信号を皮膚表面に張った電極を利用して計測したものである。表面筋電位信号を利用するのは以下のような理由からである。

- 筋電位信号は動作の予測が可能である。
- 筋電位信号は、モーションキャプチャシステムやビデオ映像からは取得不可能な、力の変化が計測できる。
- 計測システムの小型化が可能である。
- インタフェースへの応用研究がいくつも行われている。

一つ目に、我々が何か動作を起こすと、筋肉が収縮する。その動作を起こす時に得られる筋電位信号には動作の方向や力の大きさなど様々な情報が含まれており、これを解析することで動作の予測が可能である。

二つ目に、たとえば、机の上におかれたボールを想定する。この時、多くの人はほぼ同じ動作でボールを持ち上げるだろう。しかしながら、もし、このボールが重かったり、または、軽かったりした場合、我々はそれに応じた力を入れてボールを持ち上げる必要がある。この時、同じような動作で持ち上げるのであれば、モーションキャプチャシステムやビデオカメラで撮影した映像からではボールの重さや力の入れ方の変化などを取得することは非常に難しい。しかしながら、筋電位信号の場合は、力を強く入れた場合は筋電位信号も強く反応し、力が弱かった場合筋電位信号も小さな値を示す。このことから筋電位信号から力の変化を計測することが出来ると考える。

三つ目に、筋電位信号は小さな電極で計測することが可能である。そのため、計測

機器もモーションキャプチャシステムやビデオカメラなどに比べて小型化が可能である。また、指の屈折動作を識別するために、すべての指に対して電極を張らなくても、前腕部分のみにだけ電極を張ることで指の屈曲を計測することが可能である。このことから、計測する場所も動作の邪魔にならない場所に設定できるので、日常の行為を邪魔することもなく、他のシステムに比べて場所を選ばない。

四つ目に、インタフェースへ利用する研究も多く行われている。筋電義手やパワーアシストロボットなど医療福祉を中心とした分野で開発が進められている。他にも、パソコンの入力インタフェースに利用するなど医療福祉分野以外での開発も進められている。

3. 予備実験

戸惑いを検出するに当たり、戸惑った時の特徴を調査した。その結果、人が戸惑う際には動作の急激な変更や速度変化が観測されることが分かった。そこで、本研究では繰り返し行われる動作のうち、本来目的としている動作が行われている状態を定常運動、ある動作が繰り返し行われる中で、定常運動以外の動作、たとえば、急停止や急な速度変化が起こったときの状態を非定常上運動と定義する。そのうえで、単純な繰り返し動作の中での定常運動と非定常運動において、筋電位信号にどのような違いが現れるのかを検証した。

3.1 急停止動作実験

急停止動作実験は以下の環境で行った。(図1参照)

- 被験者：健常な成人男性
- 計測点：6点（上腕二頭筋×2点、上腕三頭筋×3点）
- 一試行：5回の屈伸動作
- ライトが光った場合のみ急停止を行う×24試行、オレンジライトが光った場合のみ急停止を行う×10試行

全ての動作はメトロノームに合わせて行い、メトロノームの速度は1分間に60打のスピードで行った。

実験の手順は以下のように行った。(図2参照)

1. 被験者は腕を机の上に伸ばした状態にする。
2. 被験者はメトロノームに合わせて腕を屈伸させる。
3. 5回の屈伸が終わったら腕を停止させる。
4. 実験者がライトを光らせたなら、実験者は腕を光らせた時点でいったん停止し、

その後、屈折を再開させる。この時も停止する時間はわずかで、メトロノーム速度に合わせて運動を行う。

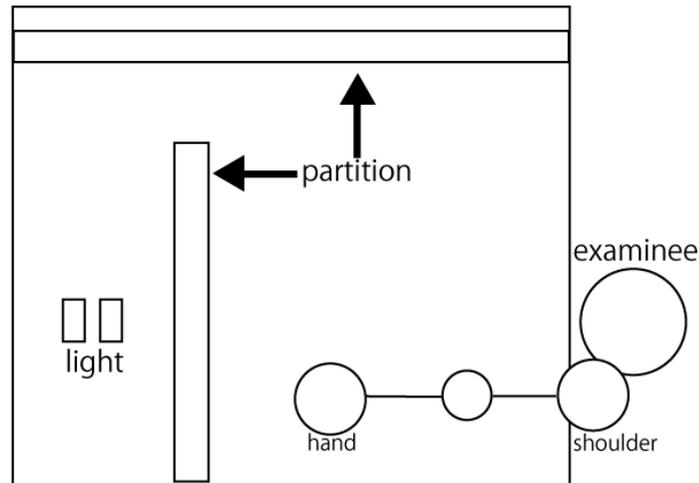


図 1 急停止動作実験 実験環境

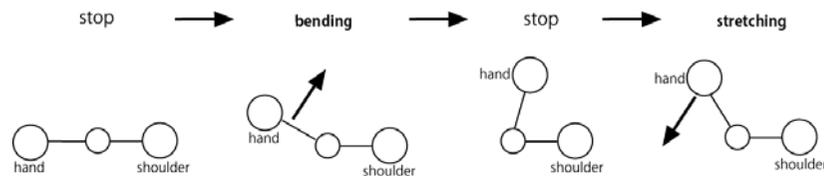


図 2 急停止実験フロー

実験は以下のルールに沿って行う。

- A) ライトが光った場合のみ急停止を行う。

被験者はメトロノームの速度に合わせて屈伸運動を繰り返し、実験者がライトを光らせた場合被験者は光った時点で停止する。

- B) オレンジライトが光った場合のみ急停止を行う。

被験者はメトロノームの速度に合わせて屈伸運動を繰り返し、実験者がオレンジライトを光らせた時のみ、被験者は光った時点で停止する。ただし、レッドライトが光った場合は停止をせずに屈伸運動を続ける。

3.2 実験の結果と考察

前半の実験において、24 試行の間に 57 回の急停止を行った。後半の実験において、10 試行の間に 36 回の急停止を行った。(表 1 参照)

表 1 実験回数

	試行回数	屈伸運動の回数	急停止の回数
前半の実験	24 試行	240 回	57 回
後半の実験	10 試行	100 回	36 回
合計	34 試行	340 回	93 回

3.2.1 筋電位信号の特徴

ある一試行の結果を以下に示す。(図 3 参照)

この施行において、被験者が腕を曲げた時、上腕二頭筋が強い反応を示している。一方、腕を伸ばした時には上腕三頭筋が強く反応している。これは腕を曲げるときは上腕二頭筋が主動筋となり、腕を伸ばす時には上腕三頭筋が主動筋となっているためである。対照的に、急停止運動を行った時は上腕二頭筋と上腕三頭筋の両方が強い反応を示している。これは主動筋の動作を拮抗筋が反応することで停止させようとしていると考えられる。

このような両方の筋電位信号が反応するという傾向は、他の試行中でも確認ができた。特に後半の実験においてこの傾向が強くなり、なおかつ、実験後に被験者に「前半の実験と後半の実験のどちらがより難しかったですか。」という質問をしたところ、後半のほうが難しかったという回答が返ってきました。このことから、より複雑で迷いやすいタスクほどこの傾向がみられると考えられる。

ほとんどの信号は同様の傾向がみられたのだが、いくつかの信号において、違った反応が現れた。(図 4 参照) この傾向は実験者がライトを光らせていないときや、被験者が急停止を行っていないときに見られた。これらの反応は急停止を行った時の反応に似ており、両方の筋肉が反応しているものであった。そこで、それらの反応が現れている前後や実験状況を同時に撮影したビデオ映像から調査したところ、被験者が急

停止動作を行った、次の動作においてこれらの反応がよくみられることが分かった。
 このことから、これらの反応は一見急停止を行っていないように見えるが、筋肉の動作としては急停止を行おうとしていたと考えられる。

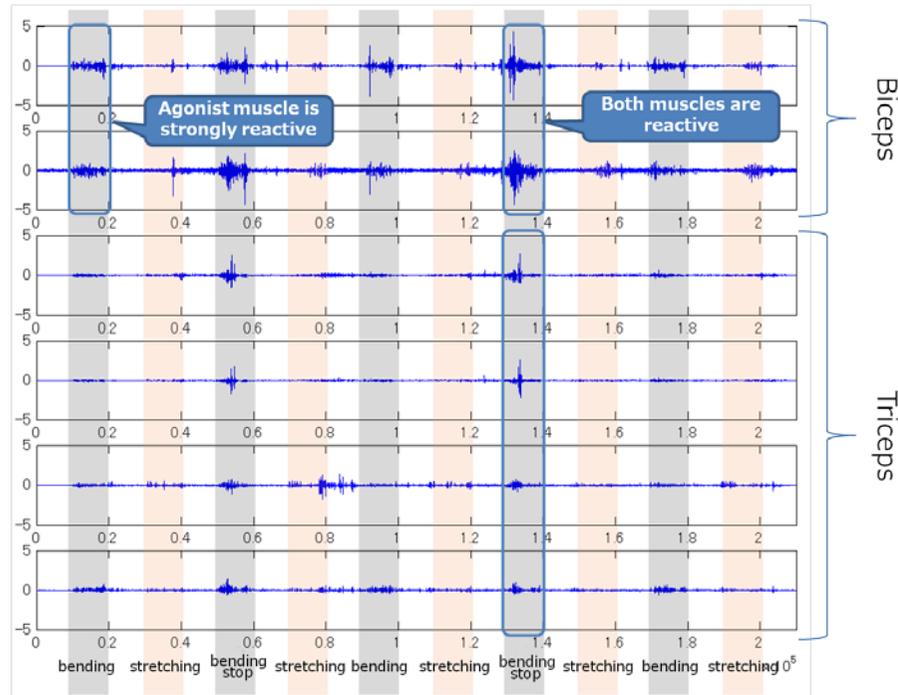


図 3 急停止実験結果 1

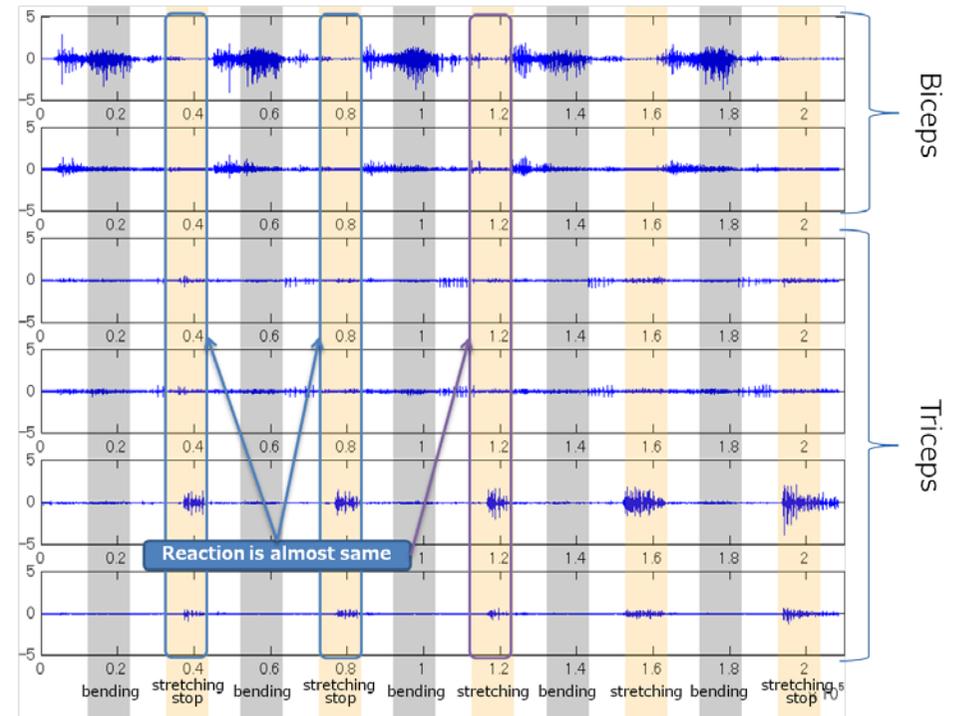


図 4 急停止実験結果 2

3.3 非定常行動の抽出

急停止動作が行われたときに、定常動作を行っているときとは違った反応が現れていることが分かったので、その特徴を利用して定常行動の中から非定常行動の抽出を行う。分離には多次元ベクトルでの外れ値を利用して分離を行う。

まず、それぞれの筋肉を一つのベクトルとみなす。この実験においては計測点が 6 点であるので、6 次元のベクトルが計測データの数だけ存在する。このときデータ数を n とする。

$$v_{ni} \begin{pmatrix} n = 1, 2, 3, \dots, n \\ i = 1, 2, 3, \dots, 6 \end{pmatrix}$$

次に計測点ごとに、それぞれの基準軸からの角度 θ の平均 μ と標準偏差 σ を求める。

$$\mu = \frac{1}{n} \sum \theta_x = \frac{\theta_{x1} + \theta_{x2} + \dots + \theta_{xn}}{n}$$

$$\sigma = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\bar{\theta} - \theta_x)^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\mu - \theta_x)^2}$$

これより、各測定点の1ベクトルに対して、平均±3σの中に含まれたものは全て0を代入し、それ以外のデータは角度をそのまま代入している。
これを急停止実験に適用したものを以下に示す。(図5参照)

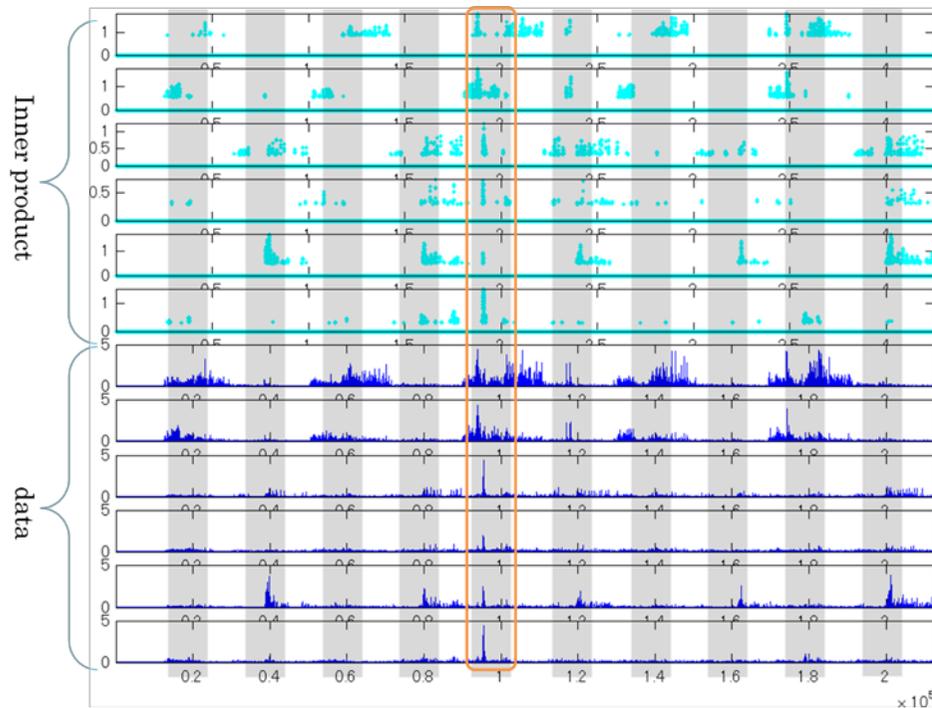


図5 提案手法の解析結果

赤い枠で囲まれている範囲がこの試行中で急停止を行った場所である。この場所で

はほかの定常な運動を行っている場所に比べて、すべての計測点において違う反応を示している。これは他の試行中でも同様に確認できた。

4. 実験

予備実験では上腕二頭筋と上腕三頭筋の二つの筋肉のみで、なおかつ屈伸運動という非常に簡単な動作における定常行動と非定常行動の分離を行って来た。そこで、より複数の筋肉が関わる運動でも同様の結果が得られるのかを検証するためにさらに実験を行った。

4.1 カード実験

カード実験は以下の環境で行った。

- 被験者：健康な成人男性
- 計測点：5点（上腕二頭筋、上腕三頭筋、尺側手根屈筋、橈側手根屈筋、腕橈骨筋）
- 一試行：20枚10組の1セット
- 1セットを一試行とし、20セット20試行

全ての動作はメトロノームに合わせて行い、メトロノームの速度は1分間に60打のスピードで行った。

実験の手順は以下のように行った。(図6参照)

1. 被験者は机の上の指定地点に手を置き、静止させる。
2. 実験者は両手にあるカードを同時に被験者の前へめくる。
3. 被験者は後述するルールに沿って提示されたカードの正しい方を選択し、カードへ腕を伸ばしタッチする。
4. 被験者は選択後、腕を指定地点へと戻す。
5. 1～4をカードがすべてなくなるまで繰り返す。

これらの実験は全てメトロノームの速度に合わせた行われ、たとえ被験者が選択を間違ったとしても実験者は常に同じタイミングでカードを提示し続ける。

カードの選択は以下のルールにのっとり行われた。なお、ルールは上位にあるものほど優先される。

- A) どちらも同じカードの場合、2枚のカードの間を触る。
- B) どちらも数字のカードの場合、大きい数字のほうを触る。
- C) どちらかがWildと書かれたカードの場合、2枚のカードの間を触る。
- D) どちらかがSkipと書かれたカードの場合、必ずSkipのカードを触る。

- E) どちらかが Reverse と書かれたカードの場合、必ず逆のカードを触る。
- F) Drawtwo と書かれたカードは数字の 2 と同じ扱いとする。

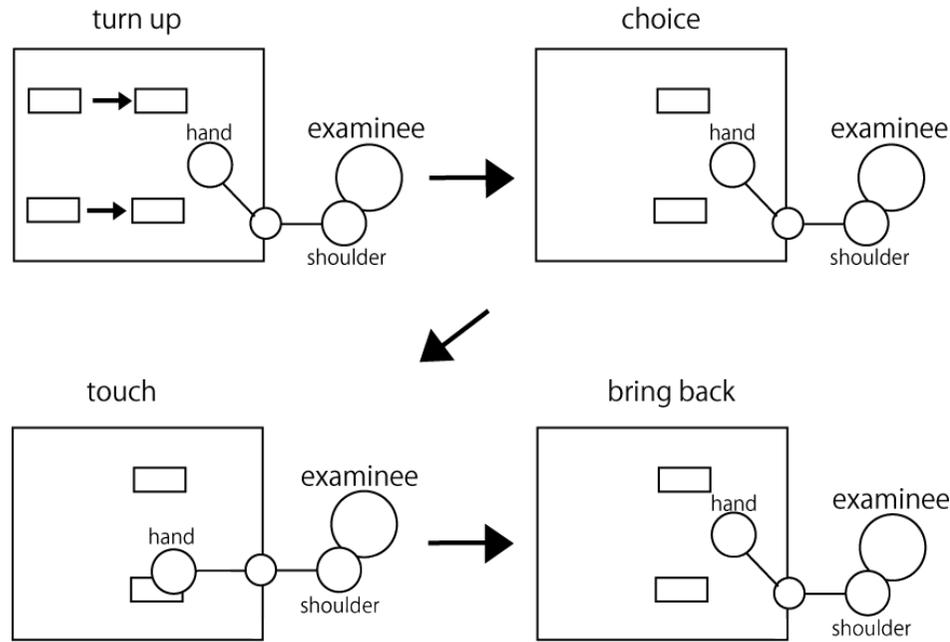


図 6 カード実験フロー

4.2 実験の結果と考察

同時に撮影したビデオ映像から確認できた誤答は、36回であった。この時、右のカードが正しいにもかかわらず他の場所へと手が伸びたものを右への誤答とし、同様に左への誤答、真ん中への誤答とする。これらの誤答回数は以下ようになった。(表 2 参照)

表 2

	右への誤答	左への誤答	真ん中への誤答	誤答合計回数	合計選択回数
実験	10回	14回	6回	36回	200回

この実験において、同時にとったビデオカメラ映像から、明らかに速度変化が起きたもの、または、起動変化が起こったものを戸惑った場所としている。そのうえで、急停止実験と同様に戸惑った場所とそれ以外の場所で筋電信号に違いがみられた。

4.3 非正常行動の抽出

急停止実験において行った解析と同様のものをカード実験に対しても行った。以下はある一試行に適応したものである。(図 7 参照)

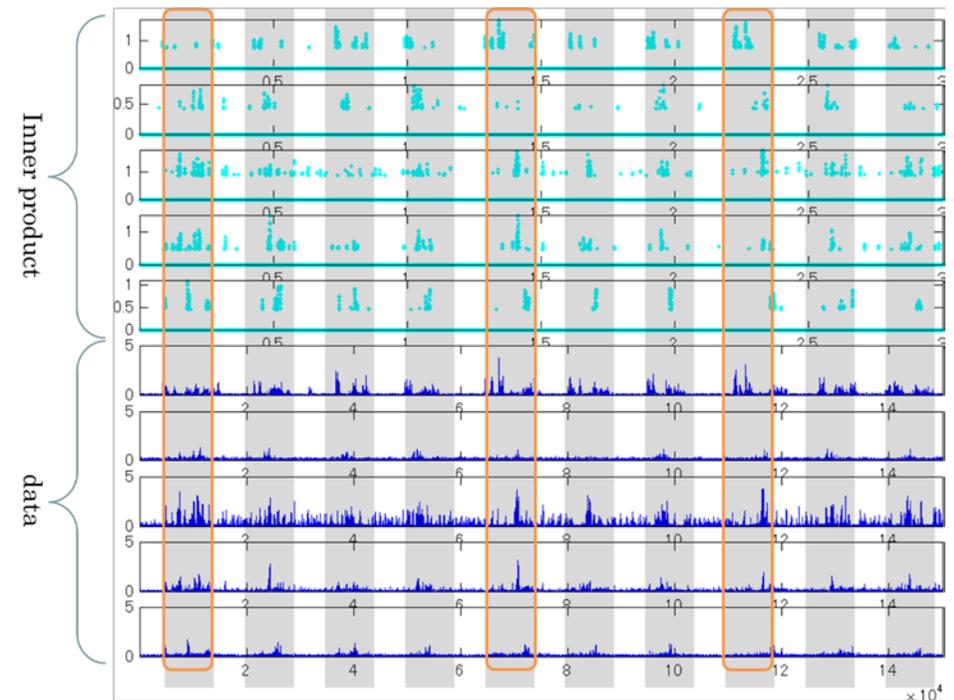


図 7

赤い枠で囲まれている範囲がこの試行中で戸惑った場所である。この場所では他の定常な運動を行っている場所に比べて、多くの計測点において、内積値が違う反応をしている。これは残りの試行の中でもほぼ同様の結果が得られた。

また、2つの実験を通して、急な動作変化が加えられた場合、複数の筋肉が一時的に強く反応するという結果が得られた。これは主動筋をほかの筋肉を利用して無理矢

理停止させようとするためであると考えられる。よって、この主動筋とそれを停止させる筋肉に着目することでより簡単に戸惑いを計測することが可能になると考えられる。

しかしながら、一部の筋電位信号では戸惑った時とほぼ同様の信号が現れているにも関わらずビデオ映像上は変化がないものも見られた。また、同じ戸惑っている場合においても、悩んだ末に急いで腕を伸ばした場合と、とりあえず動き出した後で行動を修正する場合では違った信号が現れている。現在は本来想定している動作を定常行動として、それ以外を非定常行動としているため、これらはどちらも非定常行動として観測される。

5. 結論

本研究では、認知研究で行われていると戸惑いをインタフェースへと応用するために表面筋電位信号を利用して取得し、解析を行った。その結果、急停止実験を通して、繰り返し行われる動作において、定常動作と非定常動作では筋電位信号に明らかな違いがあることが確認でき、分離が出来た。同様に、カード実験のように複数筋が関わり、なおかつ、ある程度の複雑なタスクにおいては定常行動と非定常行動の分離が可能であった。

しかしながら、ビデオ映像では変化がない動作における特殊な信号や、非定常行動の中での種類の違う行動ごとの分離などについて、細かな分類などを行わなければインタフェースへの応用は難しいと考える。

今後はビデオ以外の指標による戸惑いの明確化をしつつ、インタフェースへの応用を考える。

参考文献

- 1) 入島和代, 木竜徹, 守屋高於, 水野康文: 予測を伴う場面での自転車運動生体機能の変化, 電子情報通信学会技術研究報告, 101(533), pp.97-104, 2001-12-14
- 2) 栗原一貴, 鈴木一郎, 梶山博史, 久保寺秀幸, 谷江博昭, 和田直晃, 佐々木正人, 中村仁彦: ビヘイビアキャプチャシステムによるマイクロスリップの計測, 日本機械学会, 2002-06
- 3) ReedES, PalmerC, and SchoenherrD: On the Nature and Significance of Microslips in Everyday Activities, *Journal of Ecological Psychology*, pp.51-66, 2009.
- 4) 安田哲也, 小林春美: 作業の熟達におけるマイクロスリップ生起時間の変化, 生態心理学会, Vol.4, No.1, pp.25-30, 2009
- 5) 栗原一貴: マイクロスリップの HumanComputerInteraction 研究への応用, 生態心理学会, pp.7-13, 2009
- 6) 朝生信一, 佐々木智典, 橋本洋志, 石井千春: 周波数成分を考慮した EMG 信号による電動車駆動, 電通論 C, Vol.127, No.12, 2007