

Studies on Electromyogram to Motion Classifier

(筋電位からの動作識別器に関する研究)

学位論文内容の要旨

本論文では、表面筋電位信号からの動作認識、および電動義手の制御問題を研究対象としている。

この問題は、人間-機械系が有する特性を考慮したパターン認識問題と位置づけられる。一般的なパターン認識問題と比較した場合、人間からの情報を識別対象とし、識別結果から機器の制御を行うような人間-機械系におけるパターン認識問題は、対象の個別性と時変性という二つの特徴が強調される。個別性とは、身体的特性や技能といった個性と呼ばれるものであり、時変性とは個性の時間的変化を意味する。この個別性と時変性の強さが、識別器内に、対象に関する特定の知識の埋め込むことを困難にする。したがって、人間-機械系におけるパターン認識では、多くの知識を学習によって獲得する必要がある。このような背景の下、本論文では、学習能力の改善、特に時変性に対する追従能力の向上が主問題であるとの認識を示している。また個別性に付随した問題として、認識機構の妥当性を評価するためには、人間-機械系全体の評価に加え、人間そのものの識別容易性を評価する必要があることを指摘している。

本論文では、人間-機械系のパターン認識における諸問題の中で、特に個別性と時変性の強い課題として、表面筋電位信号からの動作認識問題を取り上げている。表面筋電位とは、筋収縮時に筋繊維状を伝わる電位を、体表から計測した信号である。表面筋電位の特性として、多数の筋繊維からの重畳信号であるため解析が困難であること、信号-運動間の関係が人によって大きく異なるという高い個別性、そして運動学習による強い時変性が挙げられる。1970年代から盛んに行われている表面筋電位の識別研究では、効果的な解析手法や、表現能力の高い識別器の適用が提案されてきている。しかしながら、時変性の問題や、識別の容易性すなわち使用者の技能にまで言及した報告は少ない。本論文では従来研究を踏襲した上で、時変性については学習に必要な情報を常時監視・管理する機構によって対応し、使用者の技能評価については、心理学・体育学の知見から動作の再現性を定量化することで実現を図っている。

実験を通じて、学習用情報の管理機構による識別能力の改善が確認されている。特に、識別すべきパターン数の増加や、表面筋電位計測位置のずれに対して、頑健であることを明らかにしている。さらに、技量評価によって、使用者ごとに提示できる機能が異なることや、訓練時のプラトーの検出、識別性能が不十分である場合のボトルネックの判定が可能であることを確認している。また実験結果から、操作者と機械との相互作用による、信号-運動間の変化について考察し、識別を容易とする写像関係を使用者が創出し、識別装置が追従していることを確かめている。

上記の結果から、本論文で構築している諸理論が、人間-機械系のパターン認識課題に有効であると結論づけている。

本論文は8章から構成されている。

第1章では導入として、本論文における問題領域を明確化している。まずパターン認識問題における人間-機械系の特性について議論し、従来のパターン認識問題に加えて考慮しなくてはな

らない問題について指摘している。次に本論文で中心的に取り扱う表面筋電位信号からの動作認識問題を概説している。最後に、人間-機械系のためのパターン認識問題において構築すべき理論を提案し、表面筋電位信号からの動作認識に適用する場合の具体的方法論について言及している。

第2章では、以降で設計する表面筋電位信号からの動作識別器の枠組みを提示する。解析、識別、情報管理の処理ごとに、その入出力関係を記述している。

第3章では、以降の章で基礎となる解析、識別、管理手法を設計している。表面筋電位の解析としては、ガボール変換による周波数情報を用いている。識別器としては階層型のニューラルネットワークを用いている。また、管理手法として使用者からの教示信号によって学習用パターンの手動追加機構を設計している。6種の前腕動作の識別実験を行い、管理機構を持たない従来手法と比較し、有効性を検証している。

第4章では、ガボール変換では識別が困難である表面筋電位の立ち上がり信号の識別を、ウェーブレット変換を用いて行っている。1チャンネルの信号から、母指の曲げ伸ばし動作が識別可能であることを確認している。

第5章では、3章で提案した機構について解析能力と学習速度の改善を図り、5名の被験者を通じて6~10種の前腕動作識別実験を行っている。被験者によって可能な識別動作数が異なる点や、トレーニングの繰り返しによって識別結果が改善される点、結果が悪い被験者ほど教示回数が多く学習パターン数が増加している点を指摘、使用者の運動技能を評価することの重要性と、不要なパターンが生成され、識別に悪影響を与えている可能性について議論している。

第6章では、5章で指摘された問題点をふまえて、不要な学習パターンを自動で削除する機構を提案し、使用者の運動技能をその再現性から評価する方法論を提示している。自動削除機構は、出力の連続性から現在の識別状態を評価し、各学習パターンに還元することで実現されている。技能の評価手法は、学習パターンによって生成されるクラスターの時間変化を定量化することで、実現している。実験を通じて、被験者の運動学習に評価値が追従することを確認し、評価値に基づいて使用者と識別器からなる系全体におけるボトルネックの検知が可能であることを示している。

第7章では、識別能力の改善と時変性への対応能力の強化を目的として、学習パターンの自動追加機構を提案している。自動追加機構は、識別器が識別不能と判断した表面筋電位について、前後の出力から妥当な識別結果を推定し、学習パターンとすることで実現している。6章までの手法と比較して、識別器が識別不能と判断する機会が減少することを確認している。また、生成された学習パターン集合のクラス関係を考察することで、自動追加処理が決定領域近傍の不要な複雑化を抑制していることを指摘している。さらに、表面筋電位の検出地点を意図的に移動させても追従可能であることを確認し、6章で提案した自動削除機構の必要性について確認している。

第8章では、論文全体を概して議論し、総括を行っている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 嘉 数 侑 昇
副 査 教 授 大 内 東
副 査 教 授 大 森 隆 司
副 査 教 授 和 田 充 雄

学 位 論 文 題 名

Studies on Electromyogram to Motion Classifier

(筋電位からの動作識別器に関する研究)

一般に、筋電義手や機能的電気刺激などの福祉機器の制御手法として、人間の表面筋電位信号を入力信号として、対象アクチュエータに所期の動作コマンドを出力させるメカニズムは、知的マン・マシンインターフェイスの観点からもその有用性への期待が大きい。その期待の大半は、より豊富な動作コマンドのセットを可能にするインターフェイスの実現にある。しかしながら、例えば筋電義手の場合、従来の研究では2～6種の単純な動作コマンドの出力のみにとどまっております。いかにこのセットを大きくするかは重要な課題である。

本論文では、上述メカニズムのインスタンスとして表面筋電位信号を入力とし、意図したアクチュエータの動作を出力させ得るパターン識別問題を設定し、種々の解法を展開しこれらを知的マン・マシンインターフェイスとしてそのシステム化を図ったものである。特に、訓練を通じた人間の側のシステムへの馴れの現象の存在を明らかにし、インターフェイスにおける写像関係の変化としてこれに対処する手法を開発している。すなわち、新しく考案した使用者の訓練到達度に基づくテンプレートとしての識別用辞書データの自動更新機構を設計し、その有効性 および適用限界を明らかにしている。本論文の主要な成果は次の4点に要約される。

(1) 一般的なパターン認識問題と、表面筋電位信号からの動作識別問題を比較、人間の運動学習能力による識別用情報（表面筋電位信号）の変化について言及し、識別器に必要な辞書データに時変性があることを指摘していること。さらにこの時変性はマン・マシンインターフェイスにおけるパターン認識問題において広く存在する可能性を示したこと。

(2) 辞書データの時変性に対応するため、識別器外部および内部評価 に基づく辞書データ管理機構を設計し、管理機構は決定境界の時間変化に対応しかつ決定境界の微調整を行っていることを明らかにしたこと。

これによって従来よりも多くの動作（最大で前腕 10 種）が2チャンネルの信号から識別可能となりその有効性を検証したこと。

(3) ある使用者から計測された表面筋電位信号の識別容易性を議論するため、信号の再現性に基づく訓練到達度を提案している。到達度は使用者の学習進度を表現可能であり、かつ入力信号の情報量からの影響を受けづらいことが示されている。また、本訓練到達度を考慮することにより、識別器の性能が不十分である場合に、その原因が識別器にあるのか使用者にあるのかの判定が可能であることを明らかにしたこと。

(4) 展開した理論及微、開発したシステムを実際のリハビリの現場を通してその有用性を検証したこと。

これを要するに著者は知的福祉機器研究開発分野における生体信号のパターン認識手法が内包する問題点を明確にし識別対象の時間変化に着目した新しい認識手法および識別対象の評価手法を提案したものであり、医療福祉工学、情報工学の発展に寄与するところ大である。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。