

論文内容の要旨

博士論文題目 Studies on Kinetic Human-Machine Interaction Using User's Biological Signals

氏名 爲井 智也

(論文内容の要旨)

本論文の目的は、ユーザーのモーション・表面筋電信号といった生体情報を用いた、機械との動的なインタラクションの実現を提案することである。表面筋電信号とは、皮膚表面で計測される筋活動に因果関係のある電位で、運動単位 (MU: Motor Unit) の活動電位を時間的・空間的に重ね合わせたものにあたる。中枢神経からの随意信号を非侵襲で比較的容易に記録できることから、従来から神経生理学や臨床医学、スポーツ工学といった分野で計測・解析が行われてきた。先に述べたように筋電は運動の原因である脳からの運動指令を含むため、筋肉の収縮よりも先に観測することができる。これに加え、近年では計測機器の性能の向上や普及化といった要素も後押しし、筋電を利用したパワーアシストや義手、機器操作デバイス等のヒューマンインターフェースの研究が盛んに行われるようになった。しかし、運動に用いる部位を著しく限定したものや運動範囲を平面に拘束したもの、静的運動時の使用に限ったものが多く、動的な運動時における使用や運動空間の制約という点では実社会での使用に向けて向上の余地が多く残されている。そこで本論文では、筋電計測装置とモーションキャプチャという二つの非侵襲計測機器の情報からユーザーの力覚や触覚を実時間で推定することにより、機械とのインタラクションを実現する方法を提案する。

まず、ユーザーの生体情報をリアルタイムで通信することにより、センサを持たない機械に仮想的な力覚・触覚を持たせる新しい知能機械の設計アプローチを提案した。本アプローチは制御対象に依存しないため、幅広いロボット・機械に適用することができる。本アプローチの有用性を検証するために、センサを持たない産業用ロボットマニピュレータ、表面筋電 (EMG) 計測装置、モーションキ

ャプチャーシステムからなるシステムを構築して実験を行った。ユーザーの EMG と姿勢情報からリアルタイムでユーザーの発揮した手先の力を推定することでロボットに力覚／触覚を持たせ、直感的かつ動的なインタラクションを実現した。更に、応用例としてユーザーとロボットが協調して鉛直方向への重量物の持ち上げ・下げ作業を行うタスクも実現した。

次に、ユーザーとロボットによる重量物の協調把持作業の 3 次元への拡張を試みた。しかし、タスクの前に推定器のパラメータを学習しておくという従来の方法では、筋肉の協調パターンの時間変化による EMG 値の変化により、タスク時には推定精度が著しく悪化してしまう。この問題を解決するため、ユーザーの生体情報に応じて方策関数を改善する強化学習の導入を提案した。強化学習を用いることによって、(1) タスクを行いながらオンラインで推定器のパラメータの調整が可能である、(2) センサの出力等の明示的な教師信号がなくても学習（センサを持たないロボットへの適用）が可能である、という利点がある。また、生体情報を用いた強化学習は、将来的に、ユーザーの意図や運動能力、個性に合わせて適応的にアシストを行う運動学習支援システムへの応用が期待される。

(論文審査結果の要旨)

近年、センサーやアクチュエータ、制御工学の発展により、補助動力付自転車やセグウェイなど、人間の能力を補助する機械が一般家庭にも導入されるようになった。介護補助や歩行補助のためのパワードスーツの開発も進んでおり、ヒューマンインタフェースを持つロボットは、今後ますます一般家庭に普及することが予想される。

しかし現在開発が進んでいるものの多くは、限定的な機能しか有しない。その一因は、ユーザの意図を正しく理解するためには数多くのセンタが必要とされるからである。本論文はこの問題を解決するため、ロボットの力覚・触覚センサではなく生体情報、具体的には表面筋電位およびモーションキャプチャシステムを利用して制御を行うことを提案し、その可能性を実際に示したものである。

第 3 章では、表面筋電位およびモーションキャプチャシステムにより、ユーザの意図通りにロボットを制御可能であることを示した。まず、ユーザの手の動きに合わせてロボットアームが動くタスクを実現した。通常、ロボットアームは人間が力を加えても動かないが、ここで提案するシステムではユーザの手の動きに合わせて柔軟に動かすことができた。次に、ユーザとロボットアームの協調動作を実現した。ここでは重い荷物を持ち上げることを想定し、一方の端を持つユーザの動きを感知して、ロボットアームはもう一方の端を持ち上げることができた。しかしこのタスクは、ユーザの手の動きが単純な 1 次元の場合には成功したが、3 次元空間を動かす場合には失敗した。

第 4 章では、前章で失敗したタスクを実現するため、生体情報からユーザの力を推定するためのモデリングに強化学習を導入した。これにより、モデルのパラメータを適応的に設定することが可能になり、3 次元空間を動かす場合のタスクでも成功を収めた。

以上をまとめると、本論文は、表面筋電位およびモーションキャプチャシステムを利用してロボットを制御する可能性を実例を挙げて示し、かつその性能向上に機械学習の手法が有効であることを示したものであり、今後のロボットのヒューマン・インタフェース開発に寄与するものである。したがって、博士(工学)の学位に値するものと認められる。