

学位論文題名

Studies on Human-Oriented Intelligent
Assistive Device Systems

(人間指向型知的補助機器システムに関する研究)

学位論文内容の要旨

近年、老人化、福祉化社会のニーズに応え、メカトロニクス技術の進歩により、筋電義手、機能的電気刺激、パワーアシストのような、人間の運動機能を補助する機械システム、すなわち、補助機器システムが多く研究、開発され実用に供されてきた。工学的見地からすると、これらは大自由度を持ち、使用者からの生体信号を利用してその制御コマンドを発生させることが大きな特徴となっている。一方それらを利用する人間サイドの視点からすると、補助する機能の種類が複雑多様であり、今日のリハビリテーション現場にも見られるように、これらを十分に使い込むためには、補助機器システムの持つ諸機能を、人間が努力して学習し補助機器システムに適應しなければならぬ問題がある。このため使用者は相当複雑な運動技能を習得する必要がある、結果として長時間の訓練と精神的苦痛を余儀なくされている場合も少なくない。如何にしてこのような訓練時間と患者の苦痛を軽減するのかは、補助機器使用者の日常トレーニングやリハビリテーション臨床現場において、大きな課題として残されている。この問題を解決するために、補助機器システムも自らその使用者たる個人に適應していき、人間の習熟過程を容易にしうる、いわゆる人間指向型知的補助機器システムの研究開発が求められている。

人間指向型知的補助機器システムの研究開発において、まずその制御に関しては、人間の運動特性、特に生体信号に反映される運動の特徴、すなわち時間変化性、個人差、非線形性は考慮されねばならない。また、使用者と知的補助機器からなる統合システムの制御を考える場合、補助機器の知的制御と使用者の上位中枢系は人体と補助機器の相互作用を考慮する必要がある。システム設計論の立場からすると、このようなシステムは、それぞれが相互に作用し合う同時並列制御システムとなる。他方、人間-機械相互作用システム論の視点からすると、協調系を形成することが必要となる。さらに、訓練過程における試行錯誤を通して新しい補助機器システムの使い方を学習していく場合、使用者と知的補助機器は一つの相互作用を伴う相互適應系が構成される。

上述の使用者と補助機器が相互システムとして絡み合う相互適應系が実世界の日常生活 ADL (Activity of Daily Living) に役に立つための必要条件は、次の5つである。すなわち、1) 使用者と補助機器が相互に学習していく系の柔軟性—Adaptability; 2) 補助機器システムが環境変化への実時間反応性—Reactivity; 3) 現在の系の状況に基づき、適應を行うべく機能性—Situativeness; 4) 系の時間遅れやフィードバック信号のタイミングのあいまいさにも可対応性—Temporal Robustness; 5) 系からの応答が不十分の場合、使用者の指示情報の不当によるものか、それとも補助機器側の不備によるものかの可判別性—Relational Robustness.

本論文は、上述の必要条件を満たすような補助機器システムを実現することを目的として、対象相互適應系の各要素、及び要素間の関係を分析し、それらに基づいて人間指向型知的補助機器シ

テムを設計製作した基礎研究成果をコアとして、実現したシステムの有用性を検証するために、適応フィールドを筋電義手、機能的電気刺激、個人適応型筋電キーボードなどのリハビリテーション実践応用へ導入、評価した一連の応用研究成果をまとめたものである。

本論文では、まず使用者側が状況に応じ、教示または評価信号を機械側に与え、機械側がその外部信号に基づき、データ管理機構により、内部評価部を形成し、その内部評価部を用いて、識別機構を決定境界の時間変化に対応し、かつ決定境界を微調整させるようなオンライン学習法を確立した。

次に、認識動作に対する生体信号の情報量を反映する条件つきエントロピーに基づく情報量基準を提案し、これを用い、システムの固有の時間遅れや教示信号のタイミングのずれを情報処理の立場からの判断、調整のみならず、今まで解剖学的知識や経験による生体信号の検知部位やチャンネル数といった信号源も情報处理的選択できるようになる。

さらに、ある使用者から計測された生体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の提案を行った。到達度は使用者の学習進度を表現可能であり、それ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。

その三つの提案手法を主幹とするシステムの有効性を検証するために、筋電義手の制御、歩行の機能的電気刺激のスイッチング制御、及び個人適応型筋電キーボードの実用検証を行った。ここでは、筋電信号を生体信号の例として使用するのには、筋電信号が一般の生体信号の基本特性、非線形性、個人差及び時間変化性を有し、一般性が失われないと考えられるからである。

筋電義手への応用において、識別信号源は定常状態にある筋電信号であるが、動作筋肉の集約度より、識別動作数と比べ少ない筋電チャンネル数で認識を行う必要がある。オンライン学習法を構成する Teaching Unit, Adaptation Unit, Data Management Unit によって、3~4 個の筋電センサによる検知される表面筋電位信号を用い、健常者及び前腕切断者の識別実験を通して、10-20 分の実時間で、前腕 6~10 動作を 85%以上の正解率で識別できることが確認された。

機能的電気刺激への応用の場合、歩行の動的過程を表す筋電信号時系列から、電気刺激が必要とする瞬間の信号パターンを正確に検出しなければならない。それを実現するために、オンライン学習法における教示データセットの構成法に拡張を加えた。その拡張されたオンライン学習法を用い、大腿直筋、中殿筋、背筋群、ハムストリングに配置する 4 個の筋電センサの信号源から、立ち上がりのための刺激 on/off、歩行周期のための on/off 制御ができることが確認された。

個人適応型筋電キーボードへの応用の場合、大入力自由度を実現するために、シングル識別動作をベースに、コーディングを行う必要がある。ここでは、シングル動作の誤認識率を考慮し、最小の動作の回数でキーの入力ができるホフマンコーディング法の導入することによって、3チャンネルの筋電位信号によって、64 個のキーコードを実現したことが確認された。

これらの 3 つの応用結果によって、提案手法により構成されるシステムは前述の分析によって明らかになった人間-補助機器系が持つべく 5 つの特性を有し、提案手法が相互適応系に有効であると結論付けることができる。

以下に本論文の構成を示す。本論文は 7 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、本論文が取り扱う相互作用、相互学習が存在する系に関する研究の背景、関連研究例、及び知的補助機器の制御において、そのような研究を取り上げる意義について述べている。

第 2 章では、相互適応系の各要素、及び要素間の関係の分析を行い、知的補助機器における相互適応系に必要な 5 つの特性を導出する。さらに、系の全体像を明らかにし、問題点の整理を行っている。

第3章は前章の分析に基づき、相互適用システムの根幹となる3つの方法の提案を行ったものである。本章は3節からなり、それぞれにおいて、3つの提案方法、すなわち、オンライン学習法、情報量基準及び訓練進行度の基本的な考えを述べ、定式化を行っている。

第4章から第6章の3章では、第3章の提案によって構築したシステムを筋電義手の制御、機能的電気刺激のスイッチング制御、及び筋電キーボードの実現への適用を記述したものである。それぞれの応用の特徴に応じて、検討が加えられ、実験目的、条件を明記した上に、実験結果を用い、相互適応系の性質を議論している。

第7章において、本論文によって明確にした問題点と、これらの問題点を提案手法によってどのように、どこまで解決できるかをまとめ、論文全体の総括を行う。さらに、知的補助機器の研究開発分野において、提案システムの将来展望も述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 真 野 行 生
副 査 教 授 長 嶋 和 郎
副 査 教 授 安 田 和 則

学 位 論 文 題 名

Studies on Human-Oriented Intelligent Assistive Device Systems

(人間指向型知的補助機器システムに関する研究)

従来の生体機能補助機器システムでは使用者が機器を使用するのに、複雑な設定と長い訓練期間が必要であり、使用者や、訓練を担当するセラピストにとって、大きな負担となっていた。このような訓練時間と負担を軽減することは、リハビリテーション臨床現場において、大きな課題として残されている。この問題を解決するために、補助機器システムも自らその使用者に適応していき、人間の習熟過程を容易にしうる、いわゆる人間指向型知的補助機器システムの研究開発が求められている。また、使用者と知的補助機器からなる統合システムの制御を考える場合、補助機器の知的制御と使用者の上位中枢神経系や人体と補助機器の相互作用を考慮する必要がある。

本論文は、対象となる使用者と生体機能補助機器、及び要素間の関係を分析し、それらに基づいて人間指向型知的補助機器システムを設計製作して、システムの有用性を検証するために、筋電義手と、機能的電気刺激のリハビリテーションでの実践応用へ導入し、評価した一連の臨床研究の成果をまとめたものである。本論文の主要な成果は次の3点に要約される。

(1) 相互適応系の各要素、及び要素間の関係の分析を行い、知的補助機器における相互適応系に必要な5つの特性、すなわち、1) 使用者と補助機器が相互に学習していく系の柔軟性—Adaptability ; 2) 補助機器システムが環境変化への実時間反応性—Reactiveness ; 3) 現在の系の状況に基づき、適応を行うべく機能性—Situatdness ; 4) 系の時間遅れやフィードバック信号のタイミングのあいまいさにも対応可能—Temporal Robustness ; 5) 系からの応答が不十分の場合、使用者の指示情報の不当によるものか、それとも補助機器側の不備によるものかの判別可能—Relational Robustness, を導出したこと。

(2) 相互適用システムの根幹となる3つの方法、すなわち、使用者側が状況に応じ、教示を機械側に与え、機械側がその外部信号に基づき、データ管理機構により、識別機構を決定境界の時間変化に対応し、かつ決定境界を微調整させるようなオンライン学習法; 認識動作に対する生体信号の情報量を反映する条件つきエントロピーに基づく情報量基準; さらに、ある使用者から計

測された生体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進行度の提案を行ったこと。

(3) 以上の提案によって構築したシステムを筋電義手の制御および、機能的電気刺激のスイッチング制御へ適用し、これら臨床応用によって、提案手法が相互適応系に有効であると結論つけることができたこと。

公開発表にあたって、副査の安田和則教授から、複数動作を識別するために、少数のチャンネルの筋電位信号からの情報抽出法について質問があった。申請者は情報抽出の質問に対し、複数筋の運動情報を少数(2チャンネル)の筋電位信号から分離するため、Fast Fourier Transformation と移動平均操作によって得られた平滑化した周波数域において、高次元の特徴ベクトルの抽出を行っている」と回答した。次いで、副査の長嶋和郎教授から、生体機能補助機器システムにおける知能のあり方について質問があった。申請者は本研究によって実現されたシステムにおいて、機械側に学習機能が備えているが、人間との相互作用によって、その機械システムが使用者の特性に追従することができ、人間と機械のインタアクションによって知能が生まれたと回答した。最後に、主査の真野行生教授から、視覚以外の感覚情報をフィードバックに利用及び予想される効果について質問があった。申請者は国内外の研究例を紹介し、特に身障者の機能回復の場合、触覚、圧覚などの感覚フィードバックは安定かつ頑丈な機能補助の実現にとって、重要であると回答した。

本論文はリハビリテーション現場の臨床応用上高く評価され、今後の更なる実用化が期待される。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、申請者が博士(医学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。