

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 大山英明

本論文は「人間の視覚フィードバック制御における座標変換学習モデルに関する研究」と題し、6章からなる。人間の柔軟な手先位置・姿勢制御における適応能力を説明するためには、逆運動学の学習能力が不可欠である。本論文は、従来人間上肢逆運動学の学習モデルのもつ問題点を明らかにし、上肢運動制御系の座標変換学習の計算論的な研究を進め、従来の学習モデルの弱点を回避した新たな逆運動学学習モデルを提案し、その有効性を実証したものである。

第1章は序論で、ニューロコンピュータをはじめとする人間の機能の持つ情報処理方式に基づいて情報処理システムを構築することが人間の解明のみならず、将来的には工学的見地からも重要であり、そのためには運動学習機構の解明が緊要であることを主張して、本論文の具体的な目標が、上肢の逆運動学の学習に関する従来研究の問題点を明らかにし、それを回避した新しい学習モデルを提案することであることを述べ、本研究の目的と立場と意義を明らかにしている。

第2章は、「人間の上肢逆運動学問題解法システムの学習モデルと問題点」と題し、人間の上肢の逆運動学学習モデルについて、従来研究の問題点を明らかにしている。逆運動学の学習モデルとして、直接逆モデリング、Jordan によって提案された順逆モデリング、川人によって提案されたフィードバック誤差学習則の三つが良く知られている。しかし、直接逆モデリングは、学習のために神経回路への入力信号を複雑に切り替える必要があり、オンライン学習が難しいという難点がある。一方、順逆モデリングではバックプロパゲーションを前提とし、かつ順モデルを構成する神経回路への教師信号の複雑な切り替えが必要である。このような学習のための特別な信号の切り替え機構が実際の生体にあることは現在の生理学的な知見に反しているため、直接逆モデリングや順逆モデリングは生体モデルとしては不適切であるといえる。そのような問題点を解決するため、本論文での第一の目標として、川人の座標変換ゲイン学習モデルの考え方を発展させ、その持つ教師信号の複雑さや学習型制御器に特別な構造が必要であるといった弱点を解決し、現在得られている生物学的知見から存在が確認されている機構のみを用いて、存在の不確かなバックプロパゲーションや切り替え機構を前提としない、所謂“もっともらしい”フィードバック制御器の座標変換学習モデルを提案することであるとしている。

第3章は「視覚フィードバック制御器の座標変換学習モデル」と題し、生体モデルとして“もっともらしい”視覚フィードバック制御器の学習モデルを提案し、数値実験による評価を行っている。その中で、現時点において構造的にも機能的にも生物学的に問題がないモデルとして以下の二つを提案している。第一の学習モデルは、外乱ノイズとフィードバック制御器の線形結合を利用するものである。過去に加えられた外乱ノイズは位置誤差と負の相関があり、また、フィードバック制御器の現在の出力を過去の出力の教師信号として利用できることから、過去の外乱ノイズとフィードバック制御器の出力の線形結合によって、フィードバック制御器の教師信号を構成できる。それにより、フィードバック

ク制御器は上肢のヤコビ行列の疑似逆行列(Moore-Penrose の一般化逆行列)を学習できる。第二の学習モデルは、手先位置誤差の二乗和をスカラーの評価関数とし、その増減の情報を罰／報酬とする一種の強化学習によってフィードバック制御器の座標変換を学習するものである。関節角ベクトルの変化量と評価関数の時間変化信号との積を利用した教師信号により、制御器は手先位置誤差の二乗和関数の最急降下方向に正定対称行列を乗じた方向を学習できる。これらの提案した学習モデルは、フィードバック制御器への入力信号を切り替えたり、順運動学モデルへの教師信号を切り替えたりといった、複雑な信号の切り替えを必要とせず局所的な座標変換を学習でき、しかも有効であることを数値実験で明らかにしている。

第4章は「時間遅れを考慮した視覚フィードバック制御器の学習モデル」と題し、観測時間遅れを考慮して学習モデルを修正した方式を提案している。すなわち、フィードバック制御器の座標変換ゲインの学習モデルについて、人間の視覚に基づく運動制御に必然的に付随する0.1から0.4秒程度の観測時間遅れをも考慮した修正法を提案し、生体に存在が認められている範囲の操作でありながら学習が可能であることを数値実験で示し、その有効性を検証している。

第5章は「モジュラー型神経回路による逆運動学モデル学習」と題し、本論文の第二の目標である不連続な逆運動学関数を正確に近似できる神経回路システムの提案である。すなわち、上肢の逆運動学モデルは一般に不連続関数であるが、その不連続な逆運動学関数を、モジュラー構造を持った神経回路を用い正確に近似する手法を提案し、数値実験によりその動作を確認している。提案した逆運動学モデルは複数のエキスパートによって構成されている。各エキスパートは神経回路によって構成され、逆運動学関数の連続部分を近似する。エキスパートは、手先の目標位置・姿勢に応じて適切に選択される。各エキスパートは不連続関数を近似する必要がなくなり、全体として高精度の逆運動学関数の近似が可能となる。また全てのエキスパートの出力を利用しても適切な逆運動学解が得られなかった場合には、大域的探索手法を用いて、正確な逆運動学解を得ることができ、その解を利用してエキスパート生成器は新しいエキスパートを生成する。このようなモジュラー型神経回路システムを提案するとともに、従来の学習モデルでは困難であった逆運動学関数の正確な学習が可能となることをシミュレーションで示している。

第6章は結論で、本論文をまとめ、今後を展望している。

以上これを要するに、本論文では、現在までに提案されていた従来の学習モデルが有する問題点である、バックプロパゲーション、フィードバック制御器への入力信号の切り替え、順運動学モデルへの教師信号の切り替えといった実際の神経系で用いられる可能性の少ない方式を用いず、視覚座標系から運動指令への座標変換を有効に学習可能な学習モデルが存在することを構成的に示しており、計算論的神経科学の発展に寄与するところが大きい。また、従来モデルでは困難な不連続性に対応し逆運動学関数の正確な近似を実現したモジュラー構造を持つ神経回路と大域的な探索機能を導入した逆モデル学習法とを提案し、従来法では困難であった上肢逆運動学の学習に成功しており、神経工学の発展に寄与できると考えられ、計測工学及び神経工学に貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。