

氏 名	大 坂 和 久
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 5 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気及通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	2 次元手動制御系における運動制御機能の 異方性に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 竹田 宏
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 竹田 宏 東北大学教授 山本 光璋 東北大学教授 星宮 望 東北大学助教授 佐藤 光男

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 言

生体は、高度な情報処理、極めて効率的な物質・エネルギー変換を生体活動の中で実現するなど、現在の科学技術レベル人工的に実現し得るよりもはるかに緻密かつ精巧な機能を獲得、発展させてきている。人間の自由で複雑な随意運動を考えた場合、目的や状況に応じた運動の時間的・空間的パターンの形成と知覚的・予測的制御の神経機構の解明は重要な問題であり、このような運動・行動制御の神経メカニズムの解明は、新世代ロボットのあるべき姿に示唆を与えるものと期待される。

主として視覚情報に依存した人間の随意運動での中枢神経系における情報処理過程に関する研究は優れた成果を上げている。しかし、人間が 3 次元空間において所望の運動を遂行するためには、視覚情報や腕に関する体性感覚情報のみならず、目標位置の変化等の外界の変化や、頭部の運動に伴う視覚情報の変化等の自己状態の変化を常に把握していなければならない。そのために、人間はさまざまな異種感覚情報から外界や自己状態を知覚し、適応的に運動司令を発しているものと考えられるが、随意運動における人間の適応性に関しては未だ十分に明らかにされていない。

そこで、本論文では、極性反転要素を制御対象とする補償型 2 次元手動制御系における人間オペレータの制御特性を解析することにより、人間の視覚情報と体性感覚情報という異種感覚情報の統合機能を解明することを目的とする。

第2章 2次元手動制御系の構成と解析

本章では、本論文で用いた補償型2次元手動制御系と実験方法を説明し、あわせて実験結果に対する解析方法について述べた。

2次元手動制御系は、目標入力、表示部、人間オペレータ、操作部、および制御対象より構成される。人間オペレータ、すなわち被験者は目標入力に手を追従してもらう、いわゆるトラッキング動作を行なう。目標入力は、2次元一様ランダム・ステップ信号を用いた。表示部は、実験系の全体を統括するパーソナル・コンピュータ用の14インチ高解像度グラフィック・ディスプレイを用いた。表示方法は、偏差信号と原点を画面上に表示する補償型表示方法を用いた。表示部の座標系は、画面の左右方向をx軸、垂直方向をy軸とする。操作部は、主としてタブレット型座標入力装置(デジタル)を用いた。制御対象、すなわち被験者が操作するディジタイザのスタイラスペンと画面上の偏差信号を表す視標の動きの対応関係は、無反転・上下反転・左右反転・両方反転という4種類のものを用いた。スタイラスペンを右上に動かした場合、無反転を制御対象とした時は画面上の視標も右上に動くのに対し、上下反転の時は視標は右下に動き、左右反転の時は左上、両方反転の時は左下に動く。

解析方法は、実験により得られる時系列データから、閉ループ伝達関数行列、コヒーレンス関数、および平均絶対値誤差を計算した。

被験者は各制御対象に対して、1試行2分34秒を1分程度の休息をはさみながら1日5試行行ってもらった。

第3章 人間オペレータの制御特性の異方性

本章では、実験から得られる結果について述べ、2次元手動制御系における人間オペレータの制御特性には、制御対象の反転方向に対する異方性があることを明らかにした。

無反転および両方反転を制御対象とした時の解析結果から、x方向の特性(x成分)とy方向の特性(y成分)の間には顕著な差が見られない。すなわち、人間オペレータは空間的に均一な制御を行っていることがわかった。

次に、制御対象が上下反転であるか左右反転であるかにより、人間オペレータの制御特性に違いが現れるかどうかを比較してみた。ここで、反転のかかっている軸の成分、すなわち上下反転時のy成分あるいは左右反転時のx成分のことを「反転成分」と呼び、反転のかかっていない軸の成分、すなわち、上下反転時のx成分あるいは左右反転時のy成分のことを「非反転成分」と呼ぶことにする。上下反転と左右反転の反転成分同士および非反転成分同士を比較した結果、いずれの特性も上下反転時より左右反転時の方が劣化している。すなわちゲインが低下し、むだ時間および非線形性が増加していることが明らかとなった。このことは、人間オペレータの制御特性には、上下反転であるか左右反転であるかによって異なる性質、すなわち反転方向に対する異方性が存在するということを示すものである。また、この性質は工学的システムにおいては出現する可能性が小さいものであり、視覚入力に適当な座標変換行列を作用させるという情報処理が人間オペレータにとって困難であるということが異方性が存在するひとつの原因と考えられる。

第4章 制御特性の異方性と異種感覚情報の統合機能

本章では、人間オペレータが示す制御特性の異方性と関係の中樞神経系の部位を特定し、異方性は脳の両側性と密接に関係するという仮説を提案した。

中樞神経系での情報処理過程において異方性が生じる原因として、主に、(1)視空間の形成を司る部位の特性、(2)身体空間の形成を司る部位の特性、(3)上肢の機構学的・力学的特性、(4)中樞神経系のうち上肢の筋-骨格系に運動司令を発する部分の特性、(5)中樞神経系のうち異種感覚情報の統合に関係する部分の特性の5つの部位が考えられる。このうち、人間の視空間や身体空間の知覚には歪みがあるが、無反転・両方反転のときにx方向とy方向の特性に差異が出現しないことから判断して、(1)、(2)の部位が原因であるとは考えられない。また、操作部にジョイスティックを用いた実験を行なっても異方性が存在したので、(3)が異方性の原因ではない。次に、左手で学習した運動が異方性を保ちながら右手に転移したので、異方性の原因は(4)の部分に主として存在するのではなく、それ以前の情報処理過程に存在する可能性が強い。

制御特性の異方性は、工学的なマニピュレータ・システムでは生じさせないことができる性質である。人間の場合に異方性が生じるのは工学的システムにおける座標変換行列に相当する部分を構成する部位、すなわち登頂連合野を含む異種感覚情報の統合を司る部位に関係があると考えられることは、極めて妥当であると思われる。

極性反転のある制御対象をうまく制御するためにの一つの方法として、反転の施された視空間を中樞神経系において再び反転し直すこと（視空間の再反転）によって反転の影響をキャンセルすることが考えられる。そこで、制御特性に異方性が生じるのは、視空間の再反転の容易さが上下反転と左右反転とでことなるためであると説明することができる。本論文では、人間オペレータの制御特性の異方性は、脳の両側性によってもたらされるという仮説を提案する。すなわち、上下反転に対する視空間の再反転は、右脳左脳それぞれの中で再反転が行われるのに対し、左右反転に対する視空間の再反転は、左右両脳間での情報の連絡を脳梁を通じて緊密に行われなければならない、それだけ時間がかかる。このような情報処理の複雑さの違いや、それに要する時間の違いが異方性となって現れるのではないかという仮説である。

第5章 入力信号の振幅の影響と学習効果が制御特性の異方性に及ぼす影響

本章では、目標入力信号の振幅と学習効果が異方性に与える影響について検討することにより仮説の検証を行なった。

学習効果が異方性に与える影響から、伊香のことを明らかにした。左右反転と上下反転のそれぞれの非反転成分は、学習が進めば無反転時とほぼ同じ線形性を示すのに対し、反転成分は学習が進んでも無反転時よりも非線形性が強い制御動作を行っていることを明らかにした。そして、反転成分における非線形性は視空間の再反転における極性反転処理の影響であるという仮説を提唱した。また、反転成分の異方性はある程度学習が進んでも存在するのに対し、非反転成分の異方性は学習により消失する傾向にあることを明らかにした。そして、本来、極性反転処理の影響を受けないはずの非反転成分に前半の試行で異方性が現れるのは、視覚情報が極座標系で表現されている可能性

があり、そのため視覚情報を x, y 成分に分離することが困難だからであるという仮説を提唱した。

また、入力信号の振幅が異方性ら与える影響から、以下のことを明らかにした。入力信号の振幅を小さくした場合、反転成分の異方性はあまり大きな影響を受けないのに対し、非反転成分の異方性は小さくなることを明らかにした。そして、この結果を仮説に基づくモデルを使って説明できることを示した。すなわち、振幅が小さい場合、固視微動等の影響で視覚情報は時分割的に脳の両半球に投射されると考えられ、この時、左右反転時の視空間の再反転は、振幅が大きく片半球にしか視覚情報が投射されないときに比べ、両脳間の情報交換を緊密に行う必要がなくなる。その結果、上下反転と左右反転の時の情報処理経路の差が小さくなり、異方性が小さくなると考えることができる。

第6章 加齢および一側性脳機能障害が制御特性の異方性に及ぼす影響

本章では、加齢および一側性脳機能障害が制御特性の異方性や、異種感覚情報の統合機能に与える影響について考察した。性が加齢により損なわれていくことを意味するものである。また、大脳基底核や視床部に障害がある脳卒中後遺症による片麻痺患者には異方性が小さいにもかかわらず平均絶対値誤差が大きい例が8名中5名いることがわかった。この結果を、本論文で提案した仮説に基づく一側性脳障害者の脳機能モデルを用いて説明することができることを示した。

また、2次元手動制御系における制御特性の異方性に着目することにより、従来臨床的な検査が行われていなかった。異種感覚情報の統合機能という脳の高次機能を定量的に評価するための臨床神経学的運動機能検査装置として本システムを広く応用できる可能性があることを示した。

第7章 結 言

本章では、本研究の内容を総括し、今後の課題について述べた。

審 査 結 果 の 要 旨

近年、生体制御特に自由で巧妙な随意運動を司る中枢神経系の情報処理機構に関する研究は、多関節知能ロボットの開発とも関連して極めて重要な研究課題であるが、現在まだその成果は十分挙げられていない。著者は、2次元手動制御系において人間オペレータの制御特性に異方性が存在することを明らかにし、異方性と人間の随意運動における視覚と体性感覚の統合機能、更に脳の両側性との関連について研究した。本論文は、それらの成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は緒言である。第2章では、視覚情報を入力する補償型2次元手動制御系の構成と実験方法、および実験で得られたデータの解析方法について述べている。

第3章では、2次元手動制御系において、制御対象の極性を上下および左右に反転させたときの人間オペレータの制御特性が異なること、すなわち制御特性の異方性が存在するという興味ある事実を、実験により始めて明らかにしている。

第4章では、実験条件の変化が異方性に与える影響を考察することにより、異方性は視覚と体性感覚という異種感覚情報の統合を司る部位の特性による可能性が強く、脳の両側性と密接な関係があるという仮説を提案している。これは、随意運動制御機構の解明に重要な示唆を与えるものである。

第5章では、まず学習効果が異方性に与える影響を検討することにより、中枢神経系における情報処理過程に関する考察を行っている。次に、入力信号の振幅が異方性に与える影響を明らかにし、それは脳の両側性を仮定したモデルを用いて説明できることを示している。

第6章では、加齢や中枢神経系疾患が異方性や異種感覚情報の統合機能に与える影響を検討している。すなわち、一般に加齢とともに統合機能の適応性や可塑性が低下すること、および疾患により異方性が認められない場合もあることを明らかにし、患者の示す異方性を説明するモデルを提案している。また2次元手動制御系は、異種感覚情報の統合機能を定量的に評価するための、臨床神経学的検査装置として優れたものであることを示している。

第7章は結言である。

以上要するに本論文は、2次元手動制御系における人間オペレータの制御特性の異方性と、人間の随意運動における異種感覚情報の統合機能に関して興味ある新知見を加えたもので、生体電子工学、システム制御工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。