

学位論文題名

マルコフ確率場に基づく視覚情報処理モデルに関する研究

学位論文内容の要旨

近年、視覚情報処理研究の分野において、視覚情報処理を行う神経回路網がマルコフ確率場 (MRF) で表現できるとする仮説が支持を集めているが、MRFに基づいた視覚情報処理モデルの構築法が明らかでないこと、モデルの有効性が明らかでないこと、そして、モデルの挙動をシミュレートする上で膨大な量の計算を行わなければならないことが問題となっている。本研究は、具体的な視覚情報処理課題を対象に、MRFに基づく視覚情報処理モデルを実際に構築する方法と構築されたMRF視覚モデルの有効性とを明らかにすること、さらに、モデルに基づいて高速高精度の計算処理を行うアルゴリズムの開発を行うことを目的とするものであり、7章から構成される。

第1章は序論であり、本研究の目的と構成について述べた。

第2章では、MRF視覚モデルの理論的基盤として、MRF、ベイズ推定、標本状態配置生成アルゴリズムに関する理論的説明を行った。まず、MRFの概念と、その取扱いを容易にする表現について説明した。次に、観測対象（物理世界）および観測過程（光学的写像過程）の性質に基づいて視覚情報処理過程をMRFでモデル化し、ベイズ推定を適用して光学の逆プロセス（逆光学）の問題を解く方法について述べた。続いて、MRFで表現された逆問題に対して、シミュレーテッドアニーリングを伴ったギブスサンプラーにより最大の事後確率に対応する標本状態配置を生成する方法について述べた。また、MRFでモデル化された視覚の問題が連続値をとる場合の大局部的最小化法についても併せて考察を行った。

第3章では、具体的な視覚情報処理課題として、抽出基準学習機能をもつ輪郭線抽出機構を対象とする。網膜上の画像から外界の構造を獲得するには、輝度や色彩、運動、テクスチャなどの違いに着目して、光の2次元分布を妥当な部分要素に分割し、構造化を行なわなければならない。領域の境界を表現する輪郭線は、画像の構造を記述する上で最も基本となる表現の一つである。しかし、輪郭線抽出の問題に、強度過程と線過程とからなる結合型MRFを適用するにあたっては、線過程の局所状態配置の出現確率を規定するパラメータ（局所構造に関する輪郭線抽出基準）が未知であるため、この値を推定することが重要な課題となる。そこで、本章では、このパラメータ値を輪郭線画像の例から学習する機能を持つ輪郭線抽出モデルを提案する。まず、輪郭線抽出機能をMRFでモデル化する方法を概説した。次に、輪郭線抽出の基準を与えるパラメータを学習する機能のアルゴリズムを提案するとともに、学習の発散を回避する目的で導入された拘束条件付最適化についても説明を行なった。さらに、実画像を対象に輪郭線抽出の実験を行ない、モデルの性質および有効性の検討を行なった。また、学習アルゴリズムの般化能力についても併せて考察した。

第4章では、モデル化する視覚情報処理課題として、明るさ知覚機構を対象とする。明るさの知覚は、視覚情報処理における最も基本的なメカニズムであり、様々な明るさ知覚現象を総合的に表現できるモデルの構築が極めて重要な課題となる。しかし、従来のモデルは個々の現象しか説明できず、複数の明るさ知覚現象を統一的に説明できるモデルの創出が強く望まれている。そこで、本章では、複数の異なる錯視現象のみならず、その消失現象までも説明できるモデルを提案する。まず、明るさ知覚における充填過程の存在および役割について説明した。次に、この充填過程が行なっている処理の計算理論について説明した。さらに、計算理論に基づいて構築された充填過程の神経回路モデルを提案した。そして、計算機上

に構築された神経回路モデルを用いて、代表的な明るさの錯視であるマッハバンドとクレーカオブライエン効果の発生および消失のシミュレーションを行ない、提案したモデルが心理物理学的データを充分に表現できることを示した。

第5章では、MRFに基づいて構築された視覚モデルの挙動を、連続値において高速高精度でシミュレートすることを可能にする、新しいアルゴリズムの導出と性能について述べた。MRFモデルは視覚情報処理を始め、様々な問題の定式化に優れており、不連続を有する困難な問題に対しても大局的な最適解を与える統計的緩和法(ギブスサンプラー・アルゴリズム)が提案されている。しかしこの方法を連続値に拡張する際には、分配関数の計算に伴う膨大な計算量の問題があり、従来は少數離散値の問題にしか用いられていなかった。そこで、本章では、視覚情報処理で用いられるエネルギー関数の多くが強度過程に関して2次関数となることに着目し、ガウスマルコフ確率場(GMRF)に基づく連続値への拡張の提案を行う。まず、視覚情報処理に関する、連続値を取るMRFの分配関数の高速計算法について理論的な説明を行なった。次に、従来法との比較を行ないながら、本手法における初期値依存性、計算時間、および統計的状態推定への依存性について、実験的に検討した。最後に、2次元MRFに対する、本手法の適用可能性について考察した。

第6章では、具体的な視覚情報処理課題として、エッジに基づく両眼立体視機構を対象とする。MarrとPoggioによって提案された「第2のアルゴリズム」は、コントラストに依存しないことと、誤対応の問題を著しく軽減できる点で高く評価されたものの、非エッジ点での視差値の推定、そして、多重解像度法に起因する解像度間でのエッジ誤対応という問題が残されていた。そこで、本章では、多重解像度法を用いずにエッジ点での視差値を求める対応点検出処理と、視差エッジを保存しながら滑らかな面を確率的に推定する表面再構成処理と、表面再構成処理から対応点検出処理へのフィードバックにより誤推定を確率的に修復する処理とからなる両眼立体視モデルを提案する。まず、エッジに基づく両眼立体視機構が行なうべき情報処理の計算理論について述べ、この理論を結合型MRFに基づいて表現する方法について説明した。次に、MRFで表現された計算を、第2のアルゴリズムに倣ったモデルとしてインプリメントする方法について説明を行なった。さらに、ここで提案したモデルが持つ、誤推定修復機能などの代表的な性質について、実験により、その有効性を示した。最後に、生体の両眼立体視モデルとしての妥当性に関する考察を行なった。

第7章は結論であり、本論文のまとめを行うとともに、計算論的モデルに対する本論文の成果が、視覚情報処理過程に関する研究に与えた効果について述べた。

本研究では、以上の検討から、輪郭線抽出機構、明るさ知覚機構、両眼立体視機構に対するMRF視覚モデルの構築法、ならびに、MRF視覚モデルが、

- (i) 異なる複数の視覚情報処理過程に対する共通のモデルとして有効なこと
- (ii) 物理世界に関する拘束条件を学習により獲得できること
- (iii) 入力信号および近傍の状態に従って分布が変化する雑音信号源を持つ神経回路網で実現可能であること

などの性質を持ち、初期および中間視覚に関する情報処理過程のモデルとして優れていることを明らかにした。さらに、MRF視覚モデルの挙動を、連続値において高速高精度でシミュレートするアルゴリズムを開発し、解の最適性と処理の高速性とを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主査 教授 永井信夫
副査 教授 栄内香次
副査 教授 北島秀夫
副査 教授 下澤樞夫

学位論文題名

マルコフ確率場に基づく視覚情報処理モデルに関する研究

近年、視覚情報処理研究の分野において、表現の柔軟性ならびに生体との機構的類似性等の観点から、視覚情報処理を行う神経回路網がマルコフ確率場（MRF）で表現できるとする仮説が支持を集めている。しかし、これまでの研究では、MRFに基づいた視覚情報処理モデルの構築法が明らかでないこと、モデルの有効性が明らかでないこと、そして、モデルの挙動をシミュレートする上で膨大な量の計算を行わなければならないことが問題となっており、これらの問題の解決が待たれている状況にある。

視覚情報処理モデルの研究は、人間がもつ視知覚機能をモデル化することによる工学的応用基盤の提供を意図するものであり、具体的モデルの構築法、モデルの有効性、高速高精度計算法などが重要な研究課題である。視覚のMRFモデルは、視覚情報処理過程を確率性を持つ相互作用近傍からなる場によってモデル化したものである。MRFは、画像が持つ情報の局所的性質を表現する上で柔軟性に優れており、さらに、解剖学や電気生理学において発見されている神経結合の局所性の点からも妥当なモデルであることが知られている。視知覚機能の一般的モデルを工学的に応用するには、処理モデルの具体的構築法とその有効性を明らかにすること、さらに、実際に利用できる性能を持った計算処理アルゴリズムの開発を行うことといった極めて困難な問題に直面する。本研究は、具体的な処理課題を対象とすることによって、MRFに基づく視覚情報処理モデルを実際に構築する方法と構築されたMRF視覚モデルの有効性とを明らかにすること、さらに、モデルに基づいて高速高精度の計算処理を行うアルゴリズムの開発を行うことを目的としたものである。

本研究の特徴は、複数の具体的視覚情報処理課題への適用によって視覚のMRFモデルの汎用性を明らかにしている点、同モデルにおいて物理世界に関する拘束条件を学習できることを実証している点、ならびに、連続値統計緩和処理が入力信号と近傍状態に依存す

る雑音信号源で構成できることを実証している点にある。

本論文では、MRFを基盤とすることにより、従来では実現できなかった初期および中間視覚情報処理過程の統一的モデルの構築をめざしている。本論文の内容は、輪郭線抽出機構、明るさ知覚機構、高速高精度計算法、両眼立体視機構に関する研究結果をまとめたものであり、その主要な成果は以下に要約される。

- (i) 輪郭線抽出という具体的問題を対象に、MRFに基づいてモデルを構築し、実画像を用いてその有効性を明らかにしている。さらに、このモデルがもつ学習機能により、例題から輪郭線抽出基準を獲得できることを、理論的ならびに実験的に示すと共に、学習された抽出基準の汎用性（汎化能力）についても実験的に検証している。
 - (ii) 従来の研究では異なるモデルで説明されていたマッハバンドおよびクレイクオブライエン効果という2種類の代表的明るさ錯視、ならびに、その消失現象を統一的に説明する計算の理論を提案するとともに、神経回路モデルを構築し、計算理論とモデルの妥当性を実験的に検証している。
 - (iii) 視覚情報処理における、不連続を伴った2次関数の正則化演算に要する多大な計算負荷を大幅に軽減する高速高精度計算法を導出している。さらに、この、入力信号と近傍状態に依存する雑音信号源で構成できる計算処理の原理を説明するとともに有効性の実験的検証を行っている。
 - (iv) エッジに基づく両眼立体視の問題を定式化するとともに、従来のモデルにおける補間の問題と多重解像度法に起因するエッジ誤対応の問題とを同時に解決する、仮説・検証ネットワークを構築し、計算理論とモデルの妥当性を実験的に検証している。さらに、このネットワーク構造と視覚大脳皮質の構造的・機能的類似性も示している。
- これを要するに、著者は、MRFを基盤とする複数の視覚情報処理課題に対する統一的モデル構築の試みを展開し、人間がもつ視知覚機能の工学的応用を行う上で有益な新知見を得ており、視覚情報工学および電子工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。
- 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あるものと認める。