論文の内容の要旨

論文題目	奥行き情報の空間的補完に関する視覚計算論
学　位 申請者	満倉　英一

ヒトは左右両眼像から得られる情報を脳の視覚神経系で処理することで，物体の色や奥行などを知覚する．左右両眼像のずれである両眼視差量は重要な奥行き情報を与えるが，均一色の紙や壁のようなパターン内部（以降「不定領域」と呼ぶ）では左右像の対応点候補が無数存在するため，両眼視差量を一意に決定することができない．したがって不定領域では，奥行きや面が知覚されないはずである．しかしながらヒトは不定領域に対しては，特徴的な奥行きである平坦な面を知覚することが視覚心理物理実験によって明らかにされている．一方で，この奥行知覚特性を説明する視覚数理モデルの検討は行われていない．

そこで本研究では不定領域におけるヒトの奥行知覚を記述・説明する視覚数理モデルの構築を目的とする．具体的には，視覚心理学的知見と神経生理学的知見に矛盾しない数理モデル（提案モデル）を構築し，提案モデルの解析結果から予想される視覚特性と実際の視覚特性を照合する．必要であれば観測された視覚特性を説明するために，数理モデルを拡張する．

心理物理実験の結果から，ヒトが不定領域で平坦な面を知覚し，知覚される面はガウス曲率がゼロ（K＝0）なる面として記述できることが示唆されている（Ishikawa & Geiger, 2006）．また不定領域内の面は，両眼視差量が一意に定まる領域（以降「確定領域」）の情報が空間的に伝播することで確定されることがわかっている（Georgeson & Yates, 2007）．したがって，不定領域における面情報を補完する視覚数理モデルに課される要件は，空間的情報伝播によって結果的に平坦な面を出力することである．しかしながら，面補完の既存数理モデルはこの要件を満たしていない．

そこで本研究ではまず，ガウス曲率を評価するエネルギー関数を定義した．次に繰り返し計算によってガウス曲率をゼロに漸近させる時間発展方程式を導出した．しかしながら，結果的に得られた方程式は１２９項から構成されており，この方程式の神経生理学的妥当性を評価することは困難であると判断した．

上記の問題を解決するために本研究では，ガウス曲率に替わる平坦性評価量を見出すことを目的の一つとした．種々の考察結果として，レベルセット曲率κとフローカーブ曲率μが同時にゼロであることは，ガウス曲率がゼロであることの十分条件であることを証明した．そこで，これらκとμを評価する新たなエネルギー関数を定義し，同時に，繰り返し計算によってκ^2とμ^2を減少させる時間発展方程式（提案モデル）を導出した．導出された方程式は２項の和で構成されることがわかった．この方程式は空間的伝播によって奥行き情報を補完するアルゴリズムを表現している．実際に平坦な面を出力するかどうかを確認するために，提案モデルの数値シミュレーションを実行した．結果として，これまでに確認されている平坦な面を出力することが確認された．

提案モデルは面の初期値に依存して補完面の形状が変化する．したがって同様の特性がヒトの視覚特性としても観測される可能性がある．具体的には，凹面として確定される視覚刺激をヒトに提示し（前刺激），その後に不定領域で構成される刺激（後刺激）を提示すると，ヒトは後刺激に対して凹面を知覚することが予測された．逆に前刺激が凸面であれば，後刺激の補完結果として凸面が知覚されるはずである．この予測の妥当性を確認するために，視覚心理物理実験を実施した．なお，前刺激が後刺激の知覚に与える時間的な影響を測定するために，前刺激と後刺激の間にISI（Inter-stimuli Interval; 0～1000ms）を挿入した．実験の結果，ISIが0～200msであればモデル予想と矛盾しない知覚特性が観察された．一方，ISIが200ms以上のときはモデル予想と逆の結果，すなわち前刺激が凹面であれば凸面が補完結果として知覚されることがわかった．この視覚特性は本研究の実験ではじめて明らかにされた特性である．

上記のISIに依存して変化する面補完を説明するために，ISI中における面表象の変化を数理モデルとして表現する．問題を簡単にするために，奥行値ではなく面形状を表現する新たな変数φを導入することにした．具体的には２次元空間の全点でφ＝＋１である場合は凹面を，φ＝－1である場合には凸面を表現するようにφを定義した．なお，空間的に異なる値をφに設定することで鞍点やその他の面形状を表現できる．本研究では，前刺激に対する順応効果が，ISI中の面表象の変化の要因であると仮定する．さらにISI中でも平坦面が表象されるようにφの値が変化していると仮定する．次に，これら２つの仮定を満たすφの時間発展方程式を導出した．この時間発展方程式に従って値φを更新すると，前刺激が凹の場合，ISI中の面表象が変化した．具体的には，相対的に短いISIの場合は前刺激と同じ面形状が，長いISIの場合は前刺激とは異なる面が（前刺激が凹の場合は凸形状が）ISI中の面表象となることがわかった．この面表象はISI後に提示される後刺激に対する面補完の初期値であることから，上記の結果はISI依存性の面補完特性を表現することを意味する．

以上のように本研究では，①レベルセット曲率κとフローカーブ曲率μを用いてヒトの奥行き情報補完特性を表現し，②空間的情報伝播による奥行き補完の数理モデルを導出した．また，③面知覚特性を測定する心理物理実験を実施した結果，未知の視覚特性を発見し，④新たに発見した視覚特性を再現するために，ISI中の面表象の変化を表現する数理モデルを導出した．

今後の課題としては，ISI依存性知覚を説明するために変数φを導入せずに奥行値そのものの時間発展方程式を導出することと，知覚の確率的な挙動を示す数理モデルを構築することが上挙げられる．

別紙2

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名　満倉　英一

審査委員主査　佐藤　俊治

委員　阪口　豊

委員　工藤　俊亮

委員　長岡　浩司

委員　栗原　聡

本論文はヒトの視覚特性である奥行き補完の性質を再現する数理モデルの構築と，奥行き補完に関する新たな視覚心理実験の実施と結果の考察を目的とした研究について論じたものであり，６つの章から構成されている．

第１章は序論であり，研究背景と研究目的を記している．左右両眼像の空間的ずれである両眼視差量は重要な奥行き情報を与えるが，均一色の紙や壁のようなパターン内部では左右像の対応点候補が無数存在するため，両眼視差量を一意に決定することができない．本論文ではこのような領域を「不定領域」と呼んでいるが，外界には不定領域が多数存在している．そこで本研究では，不定領域におけるヒトの知覚特性を再現する視覚数理モデルの構築を第１の目的としている．また，構築する数理モデルの性質を考察することで新たな視覚心理実験を実施し，モデル予測の妥当性評価と，未知の視覚特性を見出すことを第２の目的としている．

第２章では奥行不定領域に関する既存研究の調査結果をまとめている．視覚心理実験の結果から，ヒトは空間的な情報伝播によって不定領域内の奥行を補完していることと，補完の結果として知覚される面の形状はガウス曲率K＝0（平坦な面）として特徴づけられることを示した研究を紹介している．また，神経生理学的観点からも調査をおこない，不定領域では面の曲率を符号化する細胞が奥行き補完に寄与していることを示した研究を紹介している．以上の調査結果から数理モデルが満たすべき要件として，補完は空間的情報伝播により実現されていること，補完結果として平坦な面が出力されること，補完過程では曲率情報が用いられていることを設定している．一方，既存の数理モデルはこれらの要件を満たしていないことを指摘している．

第３章では前述の要件を満たす数理モデルの構築をおこなっている．まず，繰り返し計算によってガウス曲率をゼロに漸近させる時間発展方程式を導出した．本論文では，この方程式は１２９項から構成されているために数値計算が困難であることと，各項を神経回路網素子や結合強度として解釈することが困難であることからモデル式としての採用は困難であると主張している．既存研究ではガウス曲率Kによって補完特性が記述できると結言しているが，本論文ではガウス曲率のみが面補完特性を記述しうる唯一の量であるとは限らないことを主張している．そこでガウス曲率に替わる量として，レベルセット曲率κとフローカーブ曲率μを導入している．詳細は本論文の付録に記載されているが，$\kappa=\mu=0$はガウス曲率$K=0$の十分条件であることを示す新たな定理を与えている．これらκとμを評価する新たなエネルギー関数を定義して最急降下法を適用すると，２項からなる時間発展方程式が導出された．この方程式を用いた補完は，空間的情報伝播によって実行されることから，奥行き補完モデルを表現する式として提唱している．次に，補完結果として平坦な面が得られることを確認するために数値実験を実施している．その結果，不定領域内で補完された面はヒトの知覚と無矛盾な平坦な面であることを示している．

第４章では，提案モデルが予測する知覚特性が，ヒトでも観測されるか否かを確認する視覚心理実験の実施と結果の考察が記している．提案モデルは最急降下法を適用することで導出されているため，面の初期形状に依存して補完面の形状が変化する．したがって同様の特性がヒトの視覚特性としても観測される可能性を予測している．具体的には，凹面として確定される視覚刺激をヒトに提示し（前刺激），その後に不定領域で構成される刺激（後刺激）を提示すると，ヒトは後刺激に対して凹面を知覚することを予測している（逆に前刺激が凸面であれば，後刺激の補完結果として凸面が知覚される）．心理実験の結果，前刺激提示と後刺激提示の間に挿入されるISIと呼ばれる時間が0～200msであればモデル予想に反しないことを示している．一方，ISIが200～400msの場合はモデル予測とは逆の特性が観測された（前刺激が凹であれば後刺激の補完結果は凸面が知覚された）ことを報告している．

第５章では，ISI中の面表象を数理モデル化することで，前章で明らかにした知覚特性の再現を試みている．本章では問題を簡単にするために，符号によって面の凹凸を表現するパラメータϕを導入している．また本研究の仮定として，前刺激の呈示が奥行き知覚の順応効果を生じさせ，この順応効果が後刺激の知覚に影響を与えるとしている．次に，順応効果をϕのエネルギー関数として表現し，ϕの時間発展方程式を導出している．数値実験の結果，ISIの長短に依存してISI中の面表象が変化することを示している．ISI中の面表象は後刺激に対する面補完の初期値とみなせることから，定性的にISIに依存した奥行き補完特性が説明できたと主張している．

第６章では結論を記している．本研究の成果として，ヒトの奥行き補完特性と無矛盾な結果を生じさせる数理モデルが構築できたことと，ISIに依存して変化する奥行き補完特性を発見できたことが記されている．本研究の問題点としては，ISI依存性知覚を再現するために，問題を簡単化したことを挙げている．また，知覚は確率的に変化することから，数理モデルにも確率的な挙動を示す要素を導入する必要性を述べている．

以上要するに，本研究ではヒトの奥行き補完特性と無矛盾な数理モデルを導出し，モデル予測に基づく視覚心理実験を実施することで新たな視覚特性を発見しており，学際的な視覚研究の成果として意義があると判断できる．よって，本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める