

研究報告

| | | | |
|------|----|---|---|
| 報告番号 | ※乙 | 第 | 号 |
|------|----|---|---|

主論文の要旨

論文題目 人の奥行き知覚特性と神経回路モデルの研究

氏名 藤井 真人

論文内容の要旨

本論文は、奥行き知覚に強い影響を与えると考えられている、陰影と両眼視差について、それらの視覚系における役割り、および脳の情報処理としての実現可能性について、実験と数理モデルにより検討したものである。陰影については、主に心理学的手法により、両眼視差については、脳の情報処理モデルを構成する手法により、脳における、それらの情報処理メカニズムに迫った。特に、本論文は、心理学、生理学、工学の観点から、総合的に検討を加え、研究を進めた点に特徴がある。

まず、視覚系の陰影に関する処理について、二つの心理実験を行なった。一つは、陰影が奥行き知覚へ与える影響を調べるものであり、他の一つは、陰影が物体の表面反射特性を知るための手がかりとして使われている可能性を調べるものである。従来の、陰影の情報処理についての検討は、ほとんどが奥行き知覚に関するものであった。しかし、それらの従来研究の中でも、陰影の、奥行き知覚への寄与は低く、着目している点が、周りに比べて飛び出ているか、窪んでいるか、がわかる程度の影響力であるとの指摘がされていた。そこで、本論文においても、まず、陰影の変化が、奥行き知覚にどの程度影響を与えるかを調べる心理実験を行なった。実験の結果は、従来研

究の指摘と同様に、陰影を大きく変化させても、奥行き知覚にほとんど影響を与えない、というものであった。

本論文では、このことを裏付ける工学的なアプローチとして、コンピュータビジョンにおける、陰影からの形状復元アルゴリズムを用い、輪郭線上の法線を境界条件として用いるだけで、陰影を使わなくても、3次元形状が復元可能なことを示した。本論文では、これらの結果を踏まえ、次の仮説を提案した。それは、「人間の視覚系は、陰影のみではかなり大まかな3次元形状の推定しか行なわず、もっぱら3次元形状の推定は、陰影以外の情報（輪郭線、テクスチャー、両眼視差など）により行なわれる。一方視覚系は、陰影以外の情報により推定した3次元形状と陰影から、物体表面の質感（表面反射率関数など）を推定する」、である。この仮説の後半部分は、計算論的検討から予測したもので、解が一つに決まらないという意味で不良設定問題となる、陰影からの表面反射特性の推定問題を、物体の3次元形状を既知とすることで、良設定問題にできるとの考察から得たものである。

上記仮説の後半部分を検証するために、3次元形状を既知として、陰影から表面反射特性を推定できるか否かを調べる、新たな心理実験を提案した。本実験では、3次元形状の手がかりとして、輪郭線を用いた。輪郭線は、先のコンピュータビジョンにおける検討においても、3次元形状復元に有効な情報であることが示されている。具体的な実験は、異なる輪郭線をもつ陰影画像の複数の対を、被験者に比較させ、表面の特性の最も似た陰影画像を選ぶように、被験者に求めるものである。実験の結果、表面反射特性を推定するために、陰影が利用されていることを否定しないデータを得ることができた。この成果は、視覚系における陰影の役割りとして、これまでとは異なる使われ方の可能性を示唆するものであり、視覚系の解明の新しい方向性を示した点に意義がある。また、本実験は、工学的アプローチと心理学的アプローチをつなぐ

ものであり、脳の機能を探るための一つの方法論として、その可能性を示した点でも意義がある。

次に、両眼視差抽出について、生理学で知られている視覚情報処理の知見を基に、視覚系の階層的な処理にならった、両眼視差抽出の神経回路モデルの研究を行なった。まず、第1次視覚野、第2次視覚野に存在する、両眼視差に感度をもつ細胞をモデル化し、エッジという画像特徴により、両眼視差を抽出する細胞モデルを構築した。細胞モデルとしては、生理学的知見を多く取り入れ、かつパターン認識に優れた性能を示す、ネオコグニトロンと呼ばれる神経回路モデルの、細胞モデルを活用した。本論文においては、ネオコグニトロン型細胞モデルに、エッジを認識する機能を負わせ、両眼で最適な視差をもって、エッジが入力されたとき、強く反応する特性を実現した。形が比較的単純な物体をカメラで撮影した画像を用い、本神経回路モデルのシミュレーション実験を行なった結果、両眼視差抽出において障壁となる誤対応が、ほとんど生じないことを確認した。また、本神経回路モデルで抽出された、まばらだが確からしいエッジ点での視差を基に、視差が抽出できなかった箇所への補間を行なったところ、良好な形状が復元できることもわかった。しかし、ここまで述べた手法においては、両眼視差抽出の手がかりがエッジのみであり、極めてまばらな点でしか視差情報が得られないこと、また、視差が抽出できなかった領域への補間法が、物理的性質をなんら反映するものではない、といった課題があった。

そこで、これらの点を改善するための研究を行なった。まず、両眼視差の抽出される点がまばらであることを改善するために、心理学および生理学による知見に基づき、画像特徴として、線を追加した。ただし、線を追加し、なるべく多くの箇所で両眼視差を抽出しようとする、誤対応も増加し、それに対する処理も必要となる。本論文では、誤対応除去のための処理として、計算論的観点から Marr が提案した、適合性、

連続性、一意性の拘束条件を適用することとした。これらの仕組みを加えた上で、本論文で提案した神経回路モデルで中心的働きをする、ネオコグニトロン型細胞モデルの、視差抽出能力を定量的に評価した。その結果、工学的に両眼の相関を直接計算する方法に比べると性能は落ちるが、生体での実現可能性の高いモデル間の比較においては、ネオコグニトロン型細胞モデルが、高い性能を有することを示すことができた。

一方、視差を抽出できなかった箇所へ、視差を補間する方法としては、まばらで、ノイズを含む観測データから、元の入力データを推定する上で有効な標準正則化理論に基づき、形状復元アルゴリズムの研究を進めた。本論文では、標準正則化理論に基づくアルゴリズムに、①より滑らかな表面を復元するために、両眼視差が抽出された点にどれだけ忠実に推測データを当てはめるかを、その点での両眼視差抽出の信頼度を基に決めるメカニズムと、②平らな面を復元するために、繰り返し計算の1ステップごとに、面の凹部を減らす操作を加えることで、アルゴリズムを改良した。凸面からなる物体を用いたシミュレーション実験により、改良アルゴリズムが凹部を劇的に減らし、かつ滑らかな面を復元できる手法であることを示した。

本論文の最後に、ここまで述べてきた、両眼視差抽出機能と、補間機能をともに備え、かつ、画素レベル以下の解像度まで両眼視差の表現が可能な、ポピュレーションコーディングを組み込んだ、神経回路モデルを構築した。本モデルは、主に以下の特性と機能をもつ。①視覚野における両眼視差に感度をもつ細胞の、生理学的知見にできるだけ忠実なモデル化、②誤対応を除去する機構の組み込み、③画素サイズ以下の解像度の両眼視差表現の実現、④両眼視差を抽出できなかった箇所への両眼視差の補間機能、である。本モデルの大きな特徴は、厳密な意味においては両立しない、誤対応除去のための一意性の拘束条件と、集団で情報表現するポピュレーションコーディングを、同時に実装させた点にある。球状の連続的な面が知覚されるランダムドット

ステレオグラムを用いたシミュレーション実験により、一意性の拘束条件とポピュレーションコーディングが同時に機能し、かつ視差の抽出できなかった箇所への補間機能もうまく働いた結果、滑らかな表面形状が再構成できることを示した。Marr も述べているように、同じ機能の実現方法は、数多く考えられるが、本論文では、上記で述べたような両眼視差抽出の統合的な機能を、脳の情報処理としての実現可能性を考慮して、実現した。

本論文で得られた結果は、人の奥行き知覚に関する脳機能の一部に光を当てるだけの成果ではあるが、心理学、生理学、工学的観点から総合的に検討を加え、脳内での実現可能性に照らして導いた心理実験結果と神経回路モデルであることを考えると、脳機能解明に向けた、一つの重要なステップを刻むものであると言える。