

学位論文題名

視覚系の運動情報処理に関する心理物理学的研究

学位論文内容の要旨

本論文では、知覚される速度がどのように符号化されるのかという速度符号化の機構の問題に焦点をあて、この速度符号化の問題を解明するために、速度知覚の諸現象の詳細がどのようなものであるかを心理物理学の実験によって明らかにし、また、それら諸現象を統一にかつ妥当に説明できる理論を構築することを試みている。

本論文は3部14章から構成されている。

第I部は、先行研究の概観と問題の提起である。第1章では、視覚系の空間周波数特性、時間周波数特性、時空間的特性、および運動縞のコントラスト感度に関する先行研究の知見を概観している。第2章では、運動検出閾、運動刺激頂、速度弁別閾、仮現運動、運動残効、誘導運動、運動対比等の運動知覚に関する先行研究について詳述している。第3章では、視覚系の基本的な神経経路、大脳皮質における運動情報処理に関連する神経生理学的知見を概観している。第4章では、従来提案されている運動検出のモデルや速度知覚のモデルを概観している。第5章では、本論文が取り組むべき速度符号化の問題について具体的に説明している。

第II部では、速度知覚に関して著者自身が行った21種類の心理物理学の実験研究について報告している。第6章では、速度知覚に及ぼす輝度コントラストの影響を調べた2つの実験について述べている。実験1では運動する正弦波縞を用いて、実験2では緑と赤からなる複合縞を用いて、それぞれ速度マッチングの実験を行ない、いずれにおいてもテスト刺激の知覚速度が輝度コントラストの減少に伴って減少することを確認している。

第7章では、速度弁別が、速度それ自体に基づいてなされるのか、時間周波数に基づいてなされるのかに関して、2つの実験によって検討している。実験1では、比較的低速の条件において運動する正弦波縞の速度弁別閾を測定し、速度弁別が時間周波数ではなく速度に依存して変化することを明らかにしている。実験2では、やや高速の条件において同様の実験を行ない、速度弁別が速度ではなく時間周波数に依存して変化することを明らかにしている。この2つの実験の結果の違いは、低速と高速における速度符号化の過程の違いによる、と考察している。

第8章では、運動刺激の空間周波数の違いによって知覚速度がどのような影響を受けるかに関して、3つの実験によって検討している。実験1では、矩形波縞を用いて知覚速度に及ぼす空間周波数の影響について調べ、知覚速度が、離心度の違いにかかわらず空間周波数によって変動し、空間周波数の増加と共に増加することを確認している。実験2では、正弦波縞を用いて同様の結果を得ている。実験3では、テスト縞の見えのコントラストを一定に保った状態で実験2と同様の実験を行ない、同様の結果を得ている。これらの結果から、運動縞の知覚速度は時間周波数に基づいて符号化されると考察している。

第9章では、運動の検出にどの程度の時間が必要であるか、また、速度を一定の大きさに知覚するためにどれほどの時間が必要であるかについて、4つの実験によって検討している。実験1では、比較的低速の正弦波縞を用いて運動検出に必要な時間を測定し、運動の検出のためには一定の時間が経過した後、刺激が一定の空間距離を動く必要があることを見いだしている。実験2と実験3では、速度を一定の大きさに知覚するために必要な時間を継時比較法によって測定し、その結果、速度を一定の大きさに知覚するためには、一

定の時間が経過した後、刺激が一定の空間距離を移動する必要があることを見いだしている。実験4では、この空間距離が、テスト刺激の空間周波数に依存しないことを明らかにしている。

第10章では、速度対比に関する3つの実験について報告している。実験1と実験2では、誘導刺激の速度と方向を様々に組み合わせてテスト刺激の周辺に配置し、テスト刺激の知覚速度の変化を調べている。その結果、テスト刺激の知覚速度は、テスト刺激と誘導刺激が同じ運動方向の場合、誘導速度と共に減少し、誘導速度が更に大きくなると増加に転じるが、逆方向条件では誘導速度と共に増加し、それが更に大きくなると減少に転じることを明らかにしている。実験3では、これらの速度対比の効果が誘導刺激の空間周波数によって変動しないことを確認している。

第11章では、速度残効に関する5つの実験について記述している。実験1から実験3では、運動する矩形波縞を用いて、速度残効における離心度の影響や速度残効によって知覚速度が増加する条件等について検討している。その結果、離心度が大きくなると速度残効で見られる方向の特異性が顕著になること、速度残効によって知覚速度が増加する条件は低速で順応した後に同方向に高速のテスト刺激を呈示した場合であること、を見いだしている。実験4では、速度残効が40秒から60秒に至って限界に達し、それ以上ではほとんど効果が無くなることを明らかにしている。実験5では、テスト刺激の知覚速度が順応刺激の時間周波数ではなく、速度に基づいて変化することを確認している。

第12章では、運動順応下で速度の加速的変化がどのように検出されるかについて、方法の異なる2つの実験によって検討している。いずれの実験でも、運動順応下では、比較的短い時間の範囲内で、初速度の1.3倍から2.1倍に達した時点で速度変化が検出されること、また、運動順応下では、初速と順応速度が同じ場合に速度変化の検出閾が相対的に低くなること、このような順応の効果が順応刺激とテスト刺激の運動方向の同逆で異なること、等を明らかにしている。

第III部では、数学的モデルによるシミュレーションを実行し、その結果を実験結果と比較しながら総合的考察を行なっている。第13章では、様々な知覚速度の実験結果を説明するモデルとして、2つの時間周波数チャンネルの出力の比率が知覚速度を決定するという原理を仮定した数学的モデルを提案し、このモデルの妥当性を検討している。このモデルでは、時間周波数が速度に比例的に変化すること、ローパスとバンドパスの特性をもつ2つの時間周波数フィルターの振る舞いとしてガウス関数を基本関数とすること、を前提としている。速度弁別のシミュレーション実験では、弁別感度として2つのフィルターの感度差の二乗和の平方根の逆数を時間周波数の関数として求めて、実験結果に近似した結果を得ている。空間周波数の効果、速度対比、速度残効に関するシミュレーション実験においては、基本関数の他に影響関数を仮定し、各影響関数に基づいて影響を受けた場合に、2つの時間周波数フィルターに基づく知覚速度の比率がどのように変化するかを調べている。その結果、空間周波数の効果と速度対比に関してはいずれも実験結果に類似した結果を得ている。また、いずれにおいても、ローパス・フィルターを仮定せずにバンドパス・フィルターの振る舞いのみで結果を説明できるが、速度残効においては、方向の特異性を説明するためにローパス・フィルターの影響を考慮しなければならないことを指摘している。

第14章の「総合的考察」では、本研究において行われた心理物理学の実験とシミュレーション実験の結果に基づいて、速度符号化の機構に関する総合的考察を行っている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 阿 部 純 一

副 査 教 授 菱 谷 晋 介

副 査 教 授 小 野 芳 彦

学 位 論 文 題 名

視覚系の運動情報処理に関する心理物理学的研究

本論文は、知覚速度の大きさがどのようにして決められているのかという視覚系の速度符号化の機構の解明を目指したものである。

第I部では、運動知覚に関する先行研究の概観し、問題を提起している。第1章では、視覚系の空間周波数特性等の基本的特性に関する先行研究を概観している。第2章では、運動検出閾をはじめとする様々な運動知覚に関する先行研究について詳述している。第3章では、視覚系の運動情報処理に関する神経生理学的知見を概観している。第4章では、運動検出や速度知覚のモデルを概観している。第5章では、本論文が取り組むべき速度符号化の問題を具体的に説明している。

第II部では、速度知覚に関して行った21種類の心理物理学の実験研究について報告している。第6章では、速度知覚に及ぼす輝度コントラストの影響を調べる実験を行ない、知覚速度が輝度コントラストの減少に伴って減少することを確認している。第7章では、速度弁別が何に基づいてなされているかについて検討し、速度弁別が高速では時間周波数に依存して変化することを明らかにしている。第8章では、速度知覚に及ぼす空間周波数の影響を調べ、知覚速度が刺激の空間周波数と共に増加することを確認している。第9章では、速度知覚における時間要因について検討し、速度を一定の大きさに知覚するための制約条件を明らかにしている。第10章では、速度対比に関する基本的特性について検討し、知覚速度に及ぼす周辺刺激の影響について明らかにしている。第11章では、速度残効の基本的特性について検討し、離心度による違い、知覚速度が増加する条件、残効の時間的推移、等について明らかにしている。第12章では、運動順応下の加速度の検出について検討し、順応下では、初速と順応速度が同じ場合に速度変化の検出閾が相対的に低くなること、等を明らかにしている。

第III部では、数学的モデルによるシミュレーションを実行し、その結果を実験結果と比較しながら総合的考察を行なっている。第13章では、2つの時間周波数チャンネルの出力の比率が知覚速度を決定するという原理を仮定したモデルを提案し、速度弁別、空間周波

数の効果、速度対比、速度残効の実験のシミュレーションを行なっている。いずれも、実験結果に近似した結果を得ているが、空間周波数の効果と速度対比に関しては、ローパス・フィルターを仮定しなくともバンドパス・フィルターの仮定のみで結果が説明できることを明らかにしている。第14章の「総合的考察」では、本研究で示された心理物理学の実験とシミュレーションの結果に基づき、速度符号化の機構に関する総合的考察を行っている。

本論文の実験研究の成果としては、速度弁別に低速と高速に応じた2種類の心理過程の存在が考えられること、知覚速度が空間周波数と共に増加すること、速度が一定に知覚される上での時間的空間的制約があること、等を明らかにしたことを挙げることができる。また、速度対比や速度残効という現象の性質を明確にしたこと、運動順応下で速度変化がどのように検出されるかその様相を明らかにしたこと、等も挙げることができる。また、理論面に関しては、速度符号化の過程において時間周波数に感受性の高いチャンネルが少なくとも2つ以上関与していることを明らかにしたこと、さらに、速度対比と速度残効における部分的な方向特異性の違いが2種類のチャンネルの逆方向に対する関与の違いによって説明できることを示したことを挙げることができる。以上の中でも、特に、速度対比と速度残効に関する実験的知見については、従来報告が少なく、統一的な見解が得られていない状況にあったため、速度知覚過程の理論化において今後大きな役割を果たすことが期待される。また、この知見は、著者自身による速度知覚過程のモデル化に生かされ、2種類の時間周波数チャンネルの出力の関係という原理によって速度知覚の諸現象を統一的に説明しようとする試みに結実している。この理論的提案についても、本論文の独創性を示すものとして高く評価できる。

本論文は、速度知覚の様々な現象の性質を数多くの心理物理学の実験によって明確にした点において、当該領域における従来の研究に見られない学問的価値を有しているといえる。また、それらの現象の背後にある速度符号化の過程について数学的モデルを作成し、そのシミュレーション結果と実験結果とを比較検討することを通して、速度符号化の心理過程について従来にない理論的考察を行った点において、当該領域における独創性を認めることができる。また、本論文の成果は、当該研究領域にとどまらず、広く運動知覚研究全般に対しても一定の貢献をなすものと評価できる。

以上により、本委員会は、本論文の著者田山忠行氏に博士(文学)の学位を授与することが妥当であるとの結論に達した。