

さくら い けん ぞう  
櫻 井 研 三

学位の種類 博士(文学)  
学位記番号 文第210号  
学位授与年月日 平成16年3月4日  
学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学位論文題目 人間の視覚における奥行表現の多様性

論文審査委員 (主査)

教授 畑山俊輝 教授 仁平義明  
教授 海野道郎  
教授 行場次朗

## 論文内容の要旨

人間は視覚情報から3次元空間内の様々な物体の形状を復元し、それらの構造を推定することで、空間内での適切な行動を可能にしている。本論文は外界の3次元構造の推定において、人間の視覚系が採用している奥行表現について検討した。

本論文の構成は以下の通りである。第1章では、視覚的奥行が本論の主題であり、奥行表現の全体像に基礎および応用研究の視点から接近することと、そのための3つの仮説について述べた。第2章では、基礎領域での視覚研究における奥行視の諸理論を取り上げ、現在の中心的枠組の1つであるMarr(1982)の視覚理論の問題点を明らかにした。第3章では、応用領域での奥行視研究の例として仮想現実研究を概観し、その問題点とされている「臨場感」の構成要素を奥行の問題を中心に論じた。第4章では、既知の視覚現象を再分類した上で、視覚系は複数の奥行表現を採用し、その切り替えを行なうとする考えを示した。第5章では、複数の奥行表現が存在する例として視覚ファントムに着目し、静的観察事態での奥行知覚に実験的検討を加えた。第6章では、観察者の自己運動が奥行表現を切り替える例として頭部運動に連動した運動視差からの奥行知覚を取り上げ、動的観察事態での奥行知覚に実験的検討を加えた。第7章では、奥行表現を切り替える要因として刺激の既知性を取り上げ、運動視差ディスプレイ上での凹面顔錯視の生起を実験的に示した。第8章では、個々の視対象の奥行表現の段階からより高次の空間表現へと視覚情報処理が進む過程に注目し、仮想現実システムを用いて実験的検討を加えた。最後に、第9章では、上記の論点を整理した上で、視覚系が複数の奥行表現を用いることで処理の負担を軽減し、より効率の良い視覚情報処理と奥行の再構成を行なっている可能性について論述した。各章の具体的な内容を以下に述べる。

第1章「視覚的奥行：接近法と仮説」では、最初に、外界の物体形状の復元と空間の3次元構造推定における視覚的奥行を本論の主題として位置づけ、以下の2点に沿って、その問題に取り組むことを明示した。第1点は、奥行表現の解明を中心とした視覚的奥行研究の重要性について、基礎研究と応用研究の立場から焦点をあてることである。静的および動的な観察事態での奥行知覚の問題を議論するため、基礎研究の立場からはMarr (1982) の計算論アプローチを、また、応用研究の立場からは仮想現実を取り上げた。第2点は、複数の奥行表現を前提とした視覚的奥行に関する新たな理論的枠組みを提出することである。このため、代表的な視覚現象の奥行のみえについて現象的分類を行ない、以下の3つの仮説を掲げた。

仮説1：視覚系は複数の奥行表現で外界の対象の形状や空間構造をとらえる。

仮説2：複数の奥行表現は安定性と立体性という2つの基準で分類できる。

仮説3：対象に関する新たな情報はある奥行表現を他の奥行表現に転移させる。

次に、それぞれの仮説と本論後半の実験研究の概要を述べた。仮説1は、錯視をはじめとする様々な視覚現象における奥行のみえの違いに基づいている。この点が見逃されてきた理由として、基礎領域では奥行手がかりの分類が、応用領域では実体鏡の技術が偏重されてきたことが指摘された。仮説2は、安定性と立体性という2つの次元を想定することで、奥行の現象的分類を明確化する。錯視図形のみえの分析から、奥行反転の有無が「安定性」の、奥行の量的な測定可能性が「立体性」の基準となることが示された。仮説3は、対象や観察者が環境内を動き回る状況では、同一の対象に対する奥行表現が変化することを指摘する。動物の擬態の効果がその動物自身や観察者の動きで失われる場合、「奥行間転移」と呼ぶ奥行表現の変化があると考えられる。本論の後半では、これらの3仮説に述べられた多様な奥行表現と奥行間転移に関する4つの実験的研究を詳述する。それらの実験の主題は、第1に、輝度やテクスチャーの勾配で誘導される視覚ファントム、第2に、観察者の頭部運動による運動視差から知覚される奥行と運動のトレードオフ、第3に、運動視差ディスプレイの凹面顔錯視、第4に、仮想現実システムによる対象の位置関係把握である。

第2章「基礎領域での奥行視研究：視覚的奥行の理論」では、最初に、従来の奥行視の理論とその奥行手がかりの一般的分類を取り上げた。代表的な奥行手がかりの分類の1つは、Kaufman (1974) によるものであり、奥行手がかりが両眼視でのみ獲得可能なものか、単眼視でも獲得可能なものかで分類された。さらに、その単眼的奥行手がかりのなかで運動情報を含まないものを、絵画的奥行手がかりとした。もう1つの、広く知られている奥行手がかりの分類は、Sekuler & Blake (1990) によるものである。彼らの分類による手がかりの1つは、眼筋の運動感覚にもとづく動眼の手がかりであり、もう1つは網膜像それ自体に含まれている様々な情報からなる視覚的手がかりである。しかし、どちらの分類も刺激側の要因としての奥行手がかりの分類であり、知覚の現象的な奥行としての分類はなされていないことが、問題点として明らかになった。

次に現在の視覚研究の枠組でもあるMarr (1982) の視覚理論を検討して、その問題点を明らかにした。彼の視覚理論によれば、視覚系が対象の最終的な3次元構造を復元するまでに3段階の処理が行なわれ、それぞれに対応した脳内表現が形成される。第1段階の原始スケッチでは網膜像から対象の最小要素を検出し、第2段階の2<sup>1</sup>/<sub>2</sub>次元スケッチでは対象に関する観察者中心の凹凸を検出する。さらに最終段階の3次元モデルは物体中心の対象の記述であり、空間知覚と連続性を持つ最も高い水準の脳内表現である。しかし、最終的な3次元モデルのより具体的な脳内表現に関しては諸説があり、単一の奥行表現を到達点とする考え方では、現象的な複数の奥行のみえを説明できない。また、静止状態での視覚だ

けを対象としていて、動的な観察事態が理論の中に含まれていないことも後年に批判された点である。

第3章「応用領域での奥行視研究：仮想現実の構築と問題点」では、最初に仮想現実研究の歴史を概観した。仮想現実、またはバーチャルリアリティ（virtual reality：VR）と呼ばれる技術は、視覚・聴覚・触覚等の感覚情報を合成して物理的には存在しない仮想環境を構築し、その中に観察者が没入したように感じさせることを可能にした。最初の仮想現実システムはSutherland(1970)により製作され、それは現在のシステムと同様に、3次元位置検出装置、頭部搭載型ディスプレイ、3次元入力装置、3次元CGを備えていた。その後、アメリカ航空宇宙局（NASA）のエイズ研究所で仮想インターフェイス環境ワークステーションが開発された（Fisher, 1990）。この技術が製品化され、市販された際に使用された名称がバーチャルリアリティである。

次に、視覚に限定した仮想環境の構成要素を奥行の観点から論じた。仮想現実の構成要素を考える際の指標となるのが、Zeltzer（1992）のAIPキューブという分類概念である。この分類法では自律性（autonomy）・相互作用性（interaction）・臨場性（presence）を主要な構成要素とし、それぞれを直交する軸に当てはめた立方体として表現した。しかし、視覚環境に限定するとこの分類は必ずしも適切ではないため、両眼立体視、観察者の運動による運動視差、対象の運動からの構造復元などの奥行手がかりと深く関わる要素を、仮想視覚環境の3つの構成要素として取り上げた。それらは、観察者を取り囲んだ仮想環境に入り込める没入性（immersion）、観察者の自由な動きに対応して画像が変化する相互作用性（interaction）、対象を含む仮想環境が空間的な広がりを持つ3次元性（3-dimensionarity）である。

最後に、仮想現実研究の最大の問題である「臨場感」について、測定方法、身体イメージ、酔いの3つの観点から取り上げた。第1の測定方法については、現在も決定的なものはない。回避行動のような客観的指標や、質問紙による主観評価が試みられている一方で、恒常性の度合いのような知覚の特性を生かした測定基準が提案されている。第2の身体イメージについては、仮想環境の自己身体が現実環境のそれとは一致しない場合、両者のずれをどの様にして修正するのかが、遠隔帰属や外在化の問題として取り上げられた。これらは古典的なプリズム順応研究のテーマでもあり、身体イメージの変化と新たな視覚環境への順応過程は、能動的な身体運動により促進されることが指摘された。第3の酔いについては、モダリティ間の一貫性との関係が指摘された。臨場感の改善には、画質や音質の改善よりも、むしろ同一対象に関する複数の感覚の時空間情報の一致、すなわちモダリティ間の一貫性が大きな効果をもたらすことが示唆されている。これらの議論から、臨場感を向上させる鍵は奥行表現の多様化にあると考えられる。現在の仮想現実では視覚環境の奥行表現の選択肢が限られており、その選択肢を増やすことで臨場感を高める可能性がある。

第4章「奥行の現象的分類：複数の奥行表現と表現間の転移」では、本論の3つの仮説の根拠を、様々な錯視図形における奥行のみえの違いをもとに示した。最初に、複数の奥行表現の存在を示す例として、ルビンの壺にみられる「図地反転」、メテリの透明視やカニツアの主観的輪郭図形にみられる「面の形成と層化」、クレーター錯視にみられる「奥行連続面の形成と奥行反転」、ランダムドットステレオグラムにみられる「観察者中心の面方向の安定」という4つの現象的特徴について整理した。

次に、上記の例から、視覚的奥行は立体性という軸によって重層奥行と立体奥行に、また、安定性という軸によって単安定奥行と双安定奥行にわけられ、これらの組み合わせで合計4種類の奥行表現に分類できることを示した。視覚的奥行には、複数の面の順序、すなわち重なり関係のみを示すものがある

り、それらの順序が一義的な場合と反転する場合とがある。前者を単安定重層奥行、後者を双安定重層奥行とする。また別種の視覚的奥行として、一定の大きさとして測定可能な奥行を持ちながら、その前後関係あるいは方向が一義的な場合と反転する場合がある。前者を単安定立体奥行、後者を双安定立体奥行とする。対象間の位置関係にかかわる空間知覚は、このうちの単安定立体奥行と連続性を有する、より高次の段階の視覚的奥行であると考えられる。

最後に、ある奥行表現から他の奥行表現への移行を奥行間転移と呼び、それを引き起こす要因を検討した。双安定奥行から単安定奥行への奥行間転移の決定因として、両眼立体視への観察条件の変化、観察者の運動、トップダウン処理の関与があげられた。重層奥行から立体奥行への奥行間転移の決定因としては、視覚情報の勾配、2次元平面上の位置手がかりの衝突と消失があげられた。また、単安定立体奥行から高次の奥行表現への転移の決定因として、観察者の能動的運動があげられた。

第5章「輝度やコントラストの変調で誘導される奥行表現」では、視覚ファントムのみえが最大となる遮蔽帯の輝度を求める一連の実験をおこなった。視覚ファントムは縦の誘導縞が横長の黒い遮蔽帯の上につながっているように見える錯視現象であり (Tynan & Sekuler, 1975; Gyoba, 1983)、奥行をとまなう一種の補完知覚でもある。これと同様の刺激布置で誘導縞の平均輝度、すなわち灰色の遮蔽帯上に逆相の縞が知覚される縞誘導効果 (GI) という明るさ錯視も報告されており (McCourt, 1982)、2つの錯視が同一のものであるかどうか議論されてきた。しかし、視覚ファントムでは遮蔽帯上に縞が重なる重層奥行や、縞が盛り上がる立体奥行が知覚されるのに対し、縞誘導効果では奥行を伴う誘導縞の連続性は知覚されないという違いがある。両者の刺激パタンの差異は遮蔽帯の輝度であるため、それを連続的に変化させることで奥行が生起する様子をとらえることができる。

実験1では、遮蔽帯の輝度変化によって静止視覚ファントムと縞誘導効果が入れ替わるように観察されることを示した。誘導刺激として方形波縞を用いた場合、視覚ファントムは暗所視では知覚されにくい、刺激をサイン波縞にすることで明瞭にファントムが観察された。しかも、縞の黒い部分につながる従来の黒ファントムに加え、遮蔽帯の輝度を縞の最高輝度と同じに設定することで、縞の白い部分が遮蔽帯上に盛り上がってつながる白ファントムが生じることが明らかになった。このことから視覚ファントムが一種の奥行誘導であることが示唆された。遮蔽帯輝度が誘導縞の平均輝度と一致した場合には、ファントムは知覚されず、縞誘導効果が観察された。

実験2では、知覚ファントムのみえが最大となる遮蔽帯の最適輝度が、誘導縞のコントラストの変動にともなって変化するかどうかを検証した。誘導縞のコントラストを3段階に変化させ、それぞれのコントラストにおいて、ファントムが最も明瞭に知覚される遮蔽帯輝度を測定した。その結果、遮蔽帯の輝度が誘導縞の最大・最小輝度と一致する場合にファントムのみえが常に最大となることが明らかにされた。

実験3では、2次刺激を誘導縞とした場合の遮蔽帯の最適輝度を求めた。その結果、コントラスト変調による誘導縞の場合には、コントラストの低い部分の縞が上下につながって見え、帯輝度変化はファントムのみえに影響を与えないことがわかった。この結果は、遮蔽帯輝度が誘導縞の平均輝度と一致して刺激パターン全体に輝度変化が存在しない条件、すなわち、縞誘導効果が生起しない刺激条件下でも、奥行を伴う視覚ファントムが知覚されたことを意味する。視覚ファントムは輝度変調という明るさの勾配ばかりでなく、コントラスト変調、すなわち縞の濃淡というテクスチャーの勾配でも誘導されることから、ファントムの生起にはテクスチャーの変化から奥行をとらえる高次の視覚処理が関与していることが示唆された。

以上の実験から、古典的視覚ファントムには明るさの知覚をベースとする縞誘導効果と奥行誘導効果  
が関与しているのに対し、縞誘導効果が発生しない2次刺激によるファントムにはテクスチャーの知覚  
をベースとする奥行誘導効果のみが関与していることが示唆された。この点は、動的遮蔽が生じるラン  
ダムドットをファントムの誘導刺激にすると、運動部分に挟まれた遮蔽帯が盛り上がり知覚されると  
いう観察結果とあわせて考察された。

第6章「自己運動によるランダムドット幾何曲面の復元における奥行間転移」では、奥行間転移を引  
き起こす要因として観察者の自己運動に注目し、頭部運動による運動視差から知覚される奥行と運動の  
トレードオフに関する一連の実験を取り上げた。平面の動画像を頭部運動に連動させることで頭部の動  
きに伴って生じる運動視差をシミュレートし、見かけ上の奥行を観察者に感じさせることができる  
(Rogers & Graham, 1979)。視覚系は網膜像の位置の時間的変化、つまり運動網膜像差を検出・計算  
して、対象の奥行を復元するからである。その際に生起する奥行と運動のトレードオフは、2次元平面  
上(重層奥行)の運動と3次元の奥行(立体奥行)という2種類の知覚の間の転移を示すと考えられる。

実験4では、左右の頭部運動に連動して垂直のサイン波状奥行面をシミュレートするランダムドット  
パターンにおいて、知覚された奥行の量と同時に、知覚された運動の有無と種類について被験者に報告さ  
せた。その結果、知覚された奥行量がシミュレートされた奥行量よりも小さい場合には運動が知覚さ  
れ、奥行と運動の間にトレードオフの関係が存在することがわかった。

実験5では、同じランダムドットパターンから知覚される奥行量と運動量を測定し、それらの間のト  
レードオフを量的に測定した。単眼視用の運動視差刺激を両眼視すると、両眼視差情報との拮抗により  
知覚される奥行量が減少し、減少した奥行量は運動量にトレードオフされると予想された。その結果、単  
眼視条件よりも両眼視条件において知覚された奥行量は小さく、反対に知覚された運動量は大きかった。

実験6では、前後の頭部運動に連動して垂直と水平のサイン波状奥行面をシミュレートするランダム  
ドットパターンについても同様の測定をして、トレードオフがあるかどうかを調べた。この場合も、単眼  
視条件よりも両眼視条件において知覚された奥行量は小さく、反対に知覚された運動量は大きかった。

これらの結果は、網膜像の位置変化という単一の視覚入力を、奥行と運動という別種の知覚に変換す  
る機構が、視覚系に存在することを示唆している。すなわち、視覚系は網膜像の位置変化の情報を立体  
奥行に変換するが、残りの変換されなかった成分は運動成分として処理され、重層奥行として知覚され  
る平面上の2次元運動として知覚されると考えられる。

第7章「凹面顔錯視における形状復元での奥行間転移」では、奥行間転移を引き起こす要因として刺  
激の既知性に注目し、凹面顔錯視(hollow-face illusion)に関する2つの実験を取り上げた。凹面顔錯  
視は、お面の裏側のように凹んだ顔を両眼視しても凸面に見えてしまう、頑健な奥行反転現象である  
(Gregory, 1970)。しかし、ランダムドットステレオグラムのように左右各眼の点对点の対応から復元  
された凹面顔は視差情報のとおり知覚され、凹面顔錯視は生起しない(Georgeson, 1979)。そこで、  
同様に点对点の対応から復元される凹面顔を運動視差ディスプレイ上にシミュレートし、凹面顔錯視が  
生起するかどうかを検討した。

実験7では、第1に、左右の頭部運動に連動したランダムドットパターンの運動視差ディスプレイ上に  
シミュレートされた凹面顔が幾何曲面よりも奥行反転を起こすか否か、第2に、顔の全体的知覚が困難  
になる倒立顔では正立顔の場合より奥行反転が減少するか否か、の2点を検証した。その結果、幾何曲  
面はシミュレートされた通りに知覚されたが、凹面顔は奥行反転して凸面顔に知覚された。その奥行反

転の生起率は、凹面顔が正立している場合よりも倒立している場合で低かった。

実験8では、顔の各部分の知覚と奥行反転の生起率との関係について、ドット密度を変化させて調べた。低い密度では顔の各部分の詳細な知覚が困難となり、反対に高い密度では容易となる。凹面顔錯視の生起が顔の部分の検出とそれに基づく全体的知覚と関係するのならば、低いドット密度ではシミュレートされた奥行の通りの凹面顔として知覚され、高いドット密度では奥行が反転して凸面顔として知覚されると予想された。その結果、低いドット密度では凹面顔の奥行は反転せず、中・高密度の場合に反転して凸面顔として知覚された。

この結果は、視覚系が、頭部運動による運動視差からの奥行曲面の復元過程で、点对点の対応以外の方略も用いていたことを示している。そこでは顔という形状の既知性の高さが自己運動よりも強力な制約条件となり、みかけの奥行方向を決定したと考えられる。倒立顔条件で凹面顔錯視が生じにくかったのは、顔が倒立したことで全体的知覚の成立が阻害されたためと考えられる。このことは、倒立顔においては眼・鼻・口などの顔の部分が独立に処理される傾向があるという、顔の再認実験から得られた知見と一致している。また、低ドット密度でも凹面顔錯視が生じにくかったことから、視覚系は顔の局所的な特徴を検出すると、同時に処理が進行している運動網膜像差からの全体的な奥行表面の復元において、凸面としての制約条件を付加することが示唆された。陰影パターンによる凹面顔錯視の現象と考えあわせると、視覚系には、輝度の勾配や運動から「顔」の特徴を検出する機構が奥行知覚の機構とは独立に存在すると考えられる。

第8章「能動的運動により獲得される高次の奥行表現」では、位置関係把握課題における能動的観察の優位性を、仮想現実を利用して示した2つの実験を取り上げた。視覚的奥行を研究するための道具として仮想現実システムをとらえると、観察者が自由に動きながら両眼立体視を体験できる点が重要な特徴としてあげられる。この特徴を利用することで、両眼立体視で獲得できる奥行表現と動的観察で獲得できる奥行表現を比較し、両者を組み合わせた、より高次の視覚的奥行について検討できる。

実験9では、被験者の能動的観察がより正確な対象位置の把握を可能にすることを明らかにした。仮想3次元空間内の観察者の周囲には、色と形状が異なる5つの対象が配置された。被験者に与えられた課題は、それらの対象と自己の位置関係を観察して記憶し、次に仮想空間内から対象が消された状態でそれらの方向を再生して答えることであった。記憶する際の観察条件として、被験者が自分で身体及び頭を回転させて空間を観察する能動的観察条件、実験者による椅子の回転によって空間を観察する受動的観察条件、身体及び頭は動かさずに自分が回転した場合に生じる動的映像を呈示される静止観察条件の3条件が設定され、それぞれ4試行を行なった。実験の結果、能動的観察条件の被験者は1試行目から対象位置の把握ができていたのに対し、静止観察条件の被験者は4試行目でも対象位置の把握が不完全であった。

実験10では、能動的観察条件の優位性が特定の筋運動の記憶に依存したものかどうかを検証した。腕か足による身体回転と観察か再生の課題を組み合わせる4条件を設定し、他の条件は前実験と同一にして成績を比較した。その結果、腕による身体回転の成績と足のそれとの間に違いはみられず、能動的観察条件の優位性は特定の筋運動に依存しないことが示唆された。

これらの結果から、対象の単安定立体奥行を復元できる両眼立体視でも、観察者が静止した状態ではより高次の視覚的奥行である対象間の位置関係は把握できないのに対し、自己運動を伴う能動的観察では、対象そのものの奥行を復元するだけでなく、対象間の位置関係も把握できることが明らかになった。

第9章「総合考察と結論：多様奥行表現の意味」では、視覚系が多様な奥行表現をもつと同時にそれらの表現間で転移が生じる意味を考察し、奥行視の機序を解明する上で残された問題を整理した。章の前半では、4種の奥行表現をボトムアップ処理で獲得する場合に想定される負荷の重さの違いを考慮しながら、多様奥行表現の利点を、視覚情報処理の負荷軽減の観点から立体性と安定性および奥行間転移の3点に焦点を当てて考察した後、多様奥行表現と2種類の立体視の生態学的妥当性について言及した。

最初に、多様な奥行表現は、情報処理の負荷を軽減するための視覚系の巧妙な計略であることを指摘した。負荷の異なる奥行表現を組み合わせれば、効率の良い視覚情報処理と奥行の再構成を行なうことができるからである。第1に、立体性に関する勾配の処理と段差の処理の負荷の違いを検討し、勾配の処理の負荷の重さを指摘した。第2に、安定性に関する複数の網膜像差の処理と単独の勾配の負荷の違いを検討し、複数の網膜像差の処理が重いことを論じた。第3に、奥行間転移と観察者の自己運動との関係を議論した。実際には3次元形状を持つ対象も特定方向から見ると2次元の平面的な対象として知覚される場合があるが、観察者が常に自己運動をして視点を移動させれば、そのような偶発のみえを回避できる。すなわち、一旦は重層奥行表現で処理された外界の対象でも、観察者の自己運動により再処理され、立体奥行表現へと転移させられるのである。この自己運動は同時に、対象間の位置関係の把握も促進する。

次に、多様奥行表現と2種類の立体視の生態学的妥当性について考察した。特定の視方向からの観察だけでは偶発のみえを回避できないが、自分が動けば他者に存在を知られる点が自己運動を基盤とした奥行知覚のジレンマである。このジレンマを解決するため、視覚系は2種類の網膜像差を利用していると考えられる。両眼網膜像差に基づく両眼立体視と自己運動による運動網膜像差に基づく単眼立体視を比較すると、どちらの場合にも単安定立体奥行の確保が可能でありながら、前者は身体運動を必要としないのに対し、後者は必要とするという違いがある。身体運動を必要としないことは、捕食行動の高い成功率や樹上生活での移動時の安全性にもつながる。両眼立体視は、自己運動せずに単安定立体奥行の獲得を可能にした、単眼立体視の代替機能とも考えられよう。

章の後半では、初期視覚における奥行復元のシナリオの問題点について再考した上で、多様奥行表現の考えを物体認知研究の視点不変性問題へ適用できる可能性と、仮想現実感研究の臨場感問題への寄与を議論し、視覚的奥行を解明する上での今後の課題を整理した。

最初に、初期視覚における特徴検出を基盤としたボトムアップ処理を中心とする奥行復元のシナリオの問題点を、再度指摘した。視覚処理の到達点となる奥行表現が多様であると同時に、それらの奥行表現を獲得する道筋も単一ではないはずである。第7章で述べた運動視差ランダムドットの凹面顔錯視の実験結果は、特徴検出を基盤としたボトムアップ処理以外の道筋による奥行復元のシナリオも考慮しなければならないことを示している。刺激の既知性が立体奥行を単安定にするという事実は、奥行復元過程でトップダウン処理が行なわれている証左である。また、視覚系は処理負荷の重い単安定立体奥行をトップダウン処理による軽い負荷で獲得しているとも考えられる。

次に、物体認知研究における論争に対する多様奥行表現の適用を議論した。物体を認知する際にどの方向から見ても認識できる、視点不変性と呼ばれる特徴を実現する脳内表現について、一般円筒理論と景観補間説の理論的対立がある。この議論が収束しない理由の1つは、視覚情報処理の結果として得られる奥行表現を単一のものとする前提で議論しているためかもしれない。本論の枠組みに照らしてみると、一般円筒理論は立体奥行表現と、対象の2次元画像を保持する景観補間説は重層奥行表現と親和性が高い。奥行表現が多様であるなら、視点不変性を支える脳内表現も複数存在すると考えれば無理がない。

さらに、多様奥行表現の臨場感問題への寄与について、奥行表現の能動的選択の可能性、および視空間の安定性の2点から考察した。前者については、観察者が空間内を自由に移動できる状態より多くの奥行表現を能動的に選択できるほど、すなわち奥行間転移の可能性が高いほど、視覚的奥行の臨場感は高くなるのが、第8章で述べた能動的観察の優位性の例から指摘できる。後者については、観察者自身の頭部運動による運動網膜像差から知覚される奥行と運動のトレードオフが、オプティックフローのような視覚刺激から奥行と運動をバランスよく取り出して視空間の安定性に寄与する視覚機能の発現であると考えられる。また、複数の異なる奥行面での点の運動を統合する場合に、2次元平面上の運動と3次元奥行面とのトレードオフ、すなわち重層奥行と立体奥行の間の転移が不完全であると、視覚系は対象の剛体性の仮定を棄却し、視空間の安定性を維持すると解釈できる。

次に、初期視覚段階での重層奥行の直接符号化について考察した。高次の認知的処理に先行して、視覚系はかなり初期の段階から奥行構造の復元を行なっていると考えられる。視覚系は運動・輝度・テクスチャー等からの奥行復元において、勾配を含まない視覚情報が入力された場合には重層奥行、すなわち、2つの平面の重なりを出力し、勾配を含む情報が入力された場合には立体奥行、すなわち、量的な奥行を持った表面形状を出力すると考えられる。タイプの異なる奥行情報が独立に処理されている可能性は、奥行残効と呼ばれる現象に関するいくつかの研究報告でも指摘されており、今後のさらなる実験的な検証が必要とされる。

最後に、人間の視覚系には立体性と安定性の基準で分類できる複数の奥行表現があることと、それらの奥行表現を生み出す要因として、立体性に関しては視覚情報の段差と勾配が、安定性に関しては観察者の自己運動と刺激の既知性があげられることの2点を結論とした。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、人間の視覚系が内的に産出し、利用している複数の奥行表現について新たな理論的枠組みを提出し、その枠組みにもとづく奥行表現分類法の有効性について実験的検討を行ったものである。

第1章「視覚的奥行：接近法と仮説」では、まず、基礎的研究としてMarr (1982) の計算論アプローチを、また応用研究の立場からは仮想現実的視空間を取り上げ、物体形状の復元と空間の3次元構造推定において利用される複数の視覚的奥行表現の特質を明確にすることがきわめて重要であることを説いた。次に、複数の奥行表現は安定性 (stability) と立体性 (solidity) という二つの直交する軸で分類できるという新たな理論的枠組みを提出し、それぞれの分類に入る奥行表現の特色と、視対象に関する新たな情報を付与することにより、ある奥行表現が他の奥行表現に転移する可能性を示した。

第2章「基礎領域での奥行視研究：視覚的奥行の理論」では、従来の奥行視研究の外観とそれらの問題点の考察を行った。取り上げられたのは、Kaufman (1974) やSekuler & Blake (1990) の奥行手がかりの一般的分類法と、Marr (1982) の計算理論における3段階の奥行表現である。従来の分類法は、視覚刺激側の要因に依拠したものであり、奥行き知覚の現象的側面に着目した分類が不十分である点や、人間が利用する奥行き表現が必ずしも完全な3次元座標系を備えていないこと、動的な観察事態が理論の中に含まれていない点などを指摘した。

第3章「応用領域での奥行視研究：仮想現実の構築とその問題点」では、仮想現実的視覚空間を創出する技術や視覚理論的基盤を考察した。その中で最大の問題は「臨場感」であるが、それを増強するには、画質の改善よりも、むしろ同一対象に関する複数の感覚の時空間情報の一致、すなわちモダリティ



間の一貫性が大きな効果をもたらすことを示唆しており、そのためには仮想現実的視空間内でも奥行表現の多様化が実現されることが重要な鍵になることを指摘した。

第4章「奥行の現象的分類：複数の奥行表現と表現間の転移」では、視覚的奥行は立体性という軸によって重層奥行と立体奥行に、また、安定性という軸によって単安定奥行と双安定奥行にわけられ、これらの組み合わせで合計4種類の奥行表現に分類できることを具体的に示した。単安定・重層奥行表現の典型例には透明視や主観的輪郭が、双安定・重層奥行表現には図地反転図形などが、単安定・立体奥行表現の典型例にはランダムドットステレオグラムなどが、双安定・立体奥行表現には陰影や運動、テクスチャーの勾配を手がかりにしてなされる形状復元などの諸現象を取り上げた。また、ある奥行表現から他の奥行表現への移行を奥行間転移と呼び、それを引き起こす要因を考察した。双安定奥行から単安定奥行への奥行間転移の決定因として、単眼視から両眼立体視への観察条件の変化、観察者の運動、トップダウン処理の関与などがあげられた。重層奥行から立体奥行への奥行間転移の決定因としては、視覚情報の勾配、2次元平面上の位置手がかりの衝突と消失などがあげられた。また、単安定立体奥行からさらに高次の奥行表現への転移をもたらす要因として、観察者の能動的運動があげられた。

第5章「輝度やコントラストの変調で誘導される奥行表現」では、視覚的補完現象の一つであるファントム錯視を取り上げ、重層奥行から立体奥行の移行を実験的に確認した。ファントム錯視は縦の誘導縞が横長の黒い遮蔽帯の上にもりあがってつながっているように見える現象であるが (Gyoba, 1983)、帯輝度が補完された縞の奥行感を決定づけることを確認した。さらに、ファントム錯視がコントラスト変調、すなわち縞の濃淡というテクスチャーの勾配でも誘導されることを新たに見出し、ファントムの生起にはテクスチャーの変化から奥行をとらえる高次の視覚処理が関与していることを示す実験的知見を提供した。

第6章「自己運動によるランダムドット幾何曲面の復元における奥行間転移」では、奥行間転移を引き起こす要因として観察者の自己運動に注目し、頭部運動による運動視差情報が与えられると、知覚される奥行と運動のトレードオフが生じることを示す一連の実験を展開した。左右の頭部運動に連動して垂直のサイン波状奥行面をシミュレートする動的ランダムドットパターンにおいて、知覚された奥行の量とともに、知覚されたドットの運動量を測定したところ、奥行量が小さい場合には運動量が大きいことがわかった。これらの結果は、視覚系は網膜像の位置変化を立体奥行に変換するが、残りの変換されなかった成分は運動成分として処理し、その結果、重層奥行として知覚される平面上の2次元運動が観察されることを明らかにした。

第7章「実装された制約条件による奥行間転移：凹面顔と幾何曲面の比較」では、双安定から単安定に奥行間転移を引き起こす有力な要因として刺激の既知性に注目し、凹面顔錯視を素材とする実験を行った。ランダムドットの対応から復元される凹面顔を運動視差を用いたディスプレイ上にシミュレートし、凹面顔が奥行反転を起こすか否か、倒立顔では正立顔の場合より奥行反転が減少するか否か、ドット密度がどのような影響を与えるかなどの点を検討した。その結果、凹面顔は高い確率で奥行反転が生じて凸面顔が知覚されるが、そのような錯視の生起率は正立顔のほうが倒立顔よりも高く、またドット密度が高いほど錯視が強くなることが判明した。これらの結果から、視覚系は顔の局所的な特徴を検出すると、運動視差による全体的な奥行表面の復元過程において、凸面としての制約条件をトップダウン的に付加することを示唆した。

第8章「能動的運動による高次奥行表現の獲得」では、仮想現実的視空間システムを利用して、対象を観察して自己との位置関係を記憶し、後に対象の位置を再生して答える課題を被験者に行わせた。その結果、対象の単安定・立体奥行を復元できる両眼立体視でも、観察者が静止した状態では対象間の位

置関係は把握困難であるのに対し、自己運動を伴う能動的観察では、対象そのものの奥行を復元するだけでなく、対象間の位置関係も正確に把握できることが明らかになり、より高次の奥行表現が形成されることを明らかにした。

最終章の第9章「総合考察と結論：多様奥行表現の意味」では、視覚系が多様な奥行表現をもつと同時に、それらの表現間で転移が生じるとする情報処理論的および生態光学的意義を考察した。その主要な点は、以下の通りである。視覚系はその時点で課せられた課題によって、相応の奥行表現を生成・利用することで情報処理の軽減をはかっている。重層奥行表現で処理された外界の対象を、必要があれば自己運動情報を利用して再処理し、立体奥行表現へと転移させることが可能である。トップダウン処理を効かせることにより、視覚系は処理負荷の重い単安定・立体奥行を軽い負荷で獲得することができる。そして、観察者が空間内を自由に移動できる状態でより多くの奥行表現を能動的に選択できるほど、すなわち奥行間転移の可能性が高いほど、視覚的奥行の臨場感は高くなることを示唆した。

以上のように本論文は、人間の視覚における多様な奥行表現を見通しよく捉える新しい理論的枠組みを提出し、奥行き表現間の転移をもたらす諸要因について有益な実験的知見をもたらしたものである。また、本論文で展開された理論や実験的知見は、臨場感の高い仮想現実的視空間を創出する応用研究にも豊富な示唆を提供している。よって、本論文の提出者は、博士（文学）の学位を授与されるに十分な資格を有するものと認められる。