

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K04502

研究課題名（和文）奥行き情報の矛盾が生み出す超立体感：「二重否定仮説」の検討

研究課題名（英文）Unordinal 3D effect created by inconsistency of depth information: Examination of the "double-negative hypothesis"

研究代表者

田谷 修一郎 (Shuichiro, TAYA)

慶應義塾大学・法学部（日吉）・講師

研究者番号：80401933

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は外界の3次元構造に関する事前知識が視覚に及ぼす影響について検討することであった。この目的に沿って大きく3つの研究を行った。研究1では観測で得られた視覚情報と事前知識との間の矛盾が視覚に及ぼす影響を検討した。この結果、事前知識と矛盾する視覚情報は、(1)外界推定のための事前知識を更新すること、および(2)外界の3次元構造推定や経験される立体感を左右することが示された。研究2では事前知識の個人差が3次元構造推定の個人差を生むことが示された。研究3ではある種の錯視（目の錯覚）が事前情報に依存した3次元構造の推定過程に由来することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

視覚は宿命的に曖昧で多義的な網膜像をもとにそれを生み出した外界の構造を一意に推定する一種の推論過程とみなせる。この推論において視覚系は過去の経験に基づいた外界構造の確率モデル（事前知識）を利用していることが長らく指摘されている。本研究の主な成果は臨界期を過ぎた成人もこの事前知識を経験によって更新すること、およびこのために経験に依存した外界推定（視覚）の個人差が生じることを示したものである。この成果は、映画やVR装置に利用される両眼視差に基づいた3D表現の改善や、両眼視差を用いない3D表現（e.g. 『新宿東口の猫』）の開発に役立つ可能性があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The aim of the study was to examine the effects of prior knowledge of the three-dimensional structure of the external world on vision. Three studies were conducted in line with this objective. Study 1 investigated the effects of discrepancies between visual information obtained from observations and prior knowledge on visual perception. The results showed that visual information that contradicts prior knowledge (1) updates prior knowledge for the estimation of the external world and (2) influences the estimation of the 3D structure of the external world and the experienced 3D impression. Study 2 showed that individual differences in prior knowledge produce individual differences in 3D structure estimation. Study 3 showed that certain visual illusions might originate from the estimation process of 3D structure, which depends on prior information.

研究分野：実験心理学

キーワード：奥行き知覚 感覚情報統合 知覚学習 奥行き手がかり 両眼立体視 立体感 錯視 アナモルフォー

1. 研究開始当初の背景

視覚は網膜像に基づいて外界の構造(大きさ、形、位置など)を推定する過程である。しかし、例えば外界が三次元空間であるのに対し網膜像はその二次元投影像である等の理由により、外界構造と網膜像の間には一対一の対応関係がない。つまりある大きさや形の網膜像を生み得る外界の構造物の候補は無限に存在するため、網膜像から外界における対象の大きさや形を一意に特定することはできない。この不良設定問題を解決するため、視覚系は経験によって学習した外界構造の確率的な偏りを利用していると考えられるが、そうであれば視覚はある種のヒューリスティックな推論であるとみなせる。

こうした見方はヘルムホルツ以来の長い歴史を持ち、数多くの研究が行われてきたが、視覚系が行なっていると考えられるこのヒューリスティックな推論については、さまざまな側面において未だ不明な点が多い。この見方に従えば視覚とは、網膜像を生み出したであろう外界の構造について、過去の経験に基づいて「ありそうな」解釈を試みるものである。先行研究は実際に視覚系がそのような方略に基づいて外界を推定する(網膜像から「見える」ものを一意に定める)ことを示してきた(e.g., Knill & Richards, 1996)。その一方、視覚系が「なさそうな」ものに遭遇した場合、つまり過去の経験から構築された外界の確率モデルに従う限り、それがヴェリディカルである可能性は低そうなものが「正しい」ということが明らかになったときの、視覚系の振る舞いについてはほとんど考察されてこなかった。加えて、推論に用いる外界の確率モデルが経験によって形成されるならば、知覚には経験の違いによる個人差が生じることが予測されるが、過去の知覚研究において個人差は多くの場合測定誤差として処理され、個人差そのものを測定の対象とすることは稀であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は外界の三次元構造に関する事前知識が視覚に及ぼす影響について検討することであった。とりわけ、事前知識において想定される外界構造の確率分布を裏切るような経験が視覚に及ぼす影響とその個人差に着目した。

本研究の目的はさらに以下の3つに分類することができる。まず、観測で得られた視覚情報と事前知識との間の矛盾が視覚に及ぼす影響を検討することである(研究1)。つぎに、事前知識の個人差と三次元構造推定の個人差の関係について検討することである(研究2)。最後に、ある種の錯視(目の錯覚)が事前知識に依存した三次元構造の推定過程に由来するかどうかを検討することである(研究3)。

3. 研究の方法

<研究1>

(研究1-1)三次元構造を知覚する際に視覚系の依拠する事前知識に矛盾するような視覚刺激が提示された場合の視覚系の振る舞いについて検討した。まず、そのような矛盾を持つ刺激に感じられる「立体感」が、事前知識に即した刺激と異なるかどうかを検討した。実験刺激として、二つのビデオカメラを左右に並べて撮影したステレオグラム動画(自然映像刺激)と、加えてこれをソフトウェアで線画風に加工したステレオグラム動画(線画映像刺激)を作成した。実験では、例えばこれらの動画を経時的に対呈示し、どちらにより強い立体感を覚えるかの報告を参加者に求めた。

(研究1-2)事前知識に矛盾するような視覚情報に対する学習についても検討した。とくに、過去の経験と矛盾する情報を複数の文脈別に与えた場合に、これらの文脈を踏まえて学習が独立に行われるのか、あるいは一方の文脈で成立した学習内容が別の文脈にも一般化されるのかについて着目した。具体的な実験方法は下記の通りである。両眼網膜像差(左右眼間の水平方向の網膜像のずれ)と遠近法手がかりが異なる傾き(奥行き方向への回転)を示す平面のステレオグラムを学習刺激として呈示した。学習刺激のステレオグラムには参照枠が付されており、このため両眼網膜像差の示す奥行きが見かけの奥行きを強く規定した。つまり学習刺激に与えられた遠近法情報は奥行き手がかりとして働かず、単に平面の輪郭形状として解釈されたと考えられる(つまり実験参加者の主観的には「傾いた長方形」ではなく「さまざまな台形」が繰り返し呈示されたことになる)。実験参加者はこの学習刺激の見かけの傾きの評価を繰り返した。この学習フェイズの経験により、刺激面の輪郭形状を面の傾きとして解釈するために用いられる事前知識(四角形の形状についての確率分布)が再学習されると考えた。加えて、実験条件として平面の傾き軸を垂直軸と水平軸の二軸を設定することにより、学習の効果が傾き方向(文脈)に依存するかどうかを検討した。

<研究2>

視覚系の依拠する事前知識(外界の確率分布についての内的モデル)には各個人の経験に依存

した個人差があると考えられる。個人間の過去の経験の違いについて定量的に評価することは難しいが、各個人の身体特徴の違いが生み出す経験差については、その身体特徴を測定することで定量的に比較することができると考えた。具体的には、両眼網膜像差を生む左右眼間の瞳孔間距離 (IPD) に着目した。両眼網膜像差は有力な奥行き手がかりであるが、ある奥行き量を持つ外界の2点が生み出す両眼網膜像差の大きさは、その点までの視距離と観察者の瞳孔間距離の関数となる。つまり奥行き大きさと両眼網膜像差の大きさの間には一対一の関係がなく、網膜像差からの奥行き量の推定はやはり不良設定問題となる。このため網膜像差に基づいて奥行きをヴェリディカルに推定するためには、観察者は観察距離と IPD の情報を用いなくてはならない。このとき視距離を推定するためには、輻輳や垂直視差などのさまざまな奥行き手がかりを用いることができるが、IPD を明示的に知らせる手がかりは存在しない。しかし例えば他の視覚情報や他のモダリティからの感覚情報との組み合わせにより、ある奥行きを持つ物体がある大きさの両眼網膜像差をもたらすことを繰り返し経験すれば、視覚系は IPD の大きさに応じて奥行き推定のゲイン (特定の大きさの網膜像差から奥行きを算出する際の倍率) を較正できると予測される。もしこの仮定が正しければ、このゲインの大きさには IPD の大きさを反映した個人差のあることが予測される。この予測を確かめるために、同一距離に置かれたステレオグラムに知覚される奥行き量と、観察者の IPD の大きさの間の相関を調べた。特定の距離に置かれたステレオグラムを観察する際に生じる両眼網膜像差の大きさは観察者の IPD に依存せず一定である。このため、ステレオグラムに知覚される奥行き量には、上記ゲインの差を反映した個人差が生じると考えた。本実験の参加者は、ランダムドットステレオグラムに知覚される奥行き量を調整法によって報告した。また、参加者の IPD を瞳孔間距離計によって計測した。両眼網膜像差の幾何学 (e.g., Ono & Comerford, 1977) より、報告される奥行き量と参加者の IPD の間には負の相関が認められることが予測された。

< 研究 3 >

視覚系による外界の推定が一種のヒューリスティクスであるということは、多くの場合その推定はベリディカルとなるが、稀に (内的な確率モデルにしたがえば発生する可能性が低いような網膜像が与えられた場合)、その推定は事実を裏切ることになる。こうして発生する推定と事実の食い違いとは、具体的には画像平面上 (網膜像上) に描かれた像の大きさや形状の物理的特徴と、それらから知覚されるもの (推定された外界) の「ずれ」である。このような「ずれ」は錯視と呼ばれることになる。錯視と呼ばれる現象を生み出すメカニズムは多岐に及ぶと考えられるが (e.g., Shapiro & Todorovic, 2017)、そのうちの少なくない一群は、このような事前知識に基づいた外界構造の推定に由来すると考えられる。この仮定が正しければ、そうした機序に由来する錯視の現れ方には、観察者の持つ事前知識 (内的モデル) の違いを反映した個人差があると予測できる。さらに、この予測に従えば、(共通するメカニズムによって生じる) 錯視の強度 (錯視量) を多くの個人で測定した場合、異なる錯視間の錯視量に相関が見られるはずである。この予測を確かめるため、5つの異なる幾何学的錯視の錯視量を参加者調整法によって測定する実験を行った。

4. 研究成果

< 研究 1 >

(研究 1-1) 自然映像刺激と線画映像刺激に対して評価される「立体感」には個人差のあることが示された。つまりある実験参加者は自然映像刺激の方に一貫して大きな立体感があると評価する一方、線画映像刺激の方に一貫して大きな立体感があると評価する参加者もいた。この結果から、「立体感」を評価する際に、何を評価基準に用いているかは、個人によって異なる可能性があると考えられる。「立体感」は素朴には知覚される奥行き量の違いを反映するように思われるが、もしそうであれば情報の少ない線画刺激に自然映像よりも強い立体感を覚えると評価する参加者がいたことは説明できない。ひとつの可能性として、「立体感」と日常的に呼ばれるものは、従来の心理実験によって測定される奥行き量とは異なる感覚表象 (例えば事前知識に反する感覚が得られたことに付随するある種の驚きなど) に与えられる素朴概念なのかもしれない。ただし、本実験で確認された立体感の個人差が感覚・知覚の違いに由来するものか、課題に対する解釈に由来するものかについては明らかではない。例えば自然映像刺激により高い立体感を感じると報告した観察者は、単に自然映像の方が線画より現実場面に近いということの評価基準としていたのかもしれない (実際にそのような内観報告を行う参加者もいた)。立体感を計測する実験方法の妥当性については今後の検討課題である。

(研究 1-2) ステレオグラム面に知覚される傾きが、両眼網膜像差と遠近法手がかりの示す傾きに対する重み付き線形和となることを仮定し、学習の前後でそれぞれの手がかりに割り当てられる重みを測定した。この結果、学習フェイズの後では、遠近法手がかりに割り当てられる重みが有意に小さくなることが示された。この重みづけの変化は学習フェイズにおいて「目に映るほとんどの四角形は台形である」という経験を繰り返すことにより、遠近法に対する信頼性が低下したことを反映していると解釈できる。また、学習の効果は、学習の際に経験した回転軸方向のみならず、それと直行する回転軸方向にも一部転移することが示された。その一方で学習の効果は学習した回転軸における傾き評価において、学習しなかった回転軸よりも大きく現れるこ

とも示された。上記の結果より、視覚系は奥行き形状の推定に用いる事前知識を学習によって更新し得ること、およびこの事前知識には、一般性を持つもの（回転方向に依存せず適用されるもの）と、文脈に依存したものの存在することが示されたと考える。

< 研究 2 >

ランダムドットステレオグラムに知覚される（調整法によって報告された）奥行き量の大きさと、観察者の IPD の間に負の相関のあることが示された。この負の相関は網膜像差の幾何学にもとづく予測と定性的には一致する。しかし報告された奥行き量と IPD の間に求められた回帰曲線の傾きは、幾何学の予測する傾きよりも大きかった。つまり、幾何学の予測するよりも IPD が知覚奥行き量に及ぼす影響は大きかった可能性がある。このことは、奥行き推定に用いられたと考えら得るゲイン（各実験参加者の報告した奥行き量と実験において設定した観察距離より算出）と、実際の IPD（瞳孔間距離計を用いた計測値）を比較することでも確かめられた。この結果を生み出した原因について、可能な説明のひとつは、推定された視距離にもまた IPD の違いに基づく個人差が発生しており、この距離推定の個人差が知覚奥行き量に影響したというものである。視距離の推定に利用され、IPD による個人差の生じ得る奥行き手がかりとして、垂直網膜像差と両眼の輻輳が考えられる。このうち、垂直網膜像差の影響については、予測される結果と本研究で得られた結果が一致しないために排除することができると考えた。一方輻輳の及ぼした影響については本研究の結果からは明らかではなく、今後の検討課題である。

< 研究 3 >

三次元空間の知覚は、二次元網膜像について比較的可能性の高そうな解釈を行うある種のヒューリスティクスであると見做せる。このことは裏を返せばこのヒューリスティクスの依拠している外界の状態についての確率が低いような場面の解釈に視覚系は至ることができないということである。そのような状況では、知覚（外界構造についての解釈）と実際の外界構造の間には乖離が生じることとなり、ある種の錯視はこの乖離を指すのではないかと考えられる。この仮説が正しければ、錯視の現れ方は観察者の事前知識に依存するはずである。また、この事前知識が観察者の過去の経験に依存することが上記研究 1・2 から示され、錯視量には個人間で相関が認められることが予測される。

実験の結果はこの予測を支持し、いくつかの三次元構造の解釈に由来すると考えられる幾何学的錯視の錯視量の間には正の相関が認められた。一方で、従来奥行き（三次元空間）知覚との関連が指摘されてきた（つまりメカニズムが共通すると目されてきた）錯視同士の間において相関が小さい組み合わせのあることも示された。本研究の成果は、錯視量の個人差についての分析が、錯視のメカニズム解明に役立つ可能性を示すものである。

また、上記の心理実験とは別に、ある種の錯視図形がアナモルフォーズとみなせることについての理論的考察も行なった。アナモルフォーズとは、特定の位置から観察した場合にのみ、その網膜像が意図した形で投影されるように形を歪ませて描いた像をさす。従来錯視とアナモルフォーズは異なる現象と捉えられてきた。しかし、視覚系による蓋然性に基づいた外界構造推定の観点からは、ある一群の幾何学的錯視とアナモルフォーズは本質的に同一の現象と見なし得る。このことについて、理論モデルと実物体の模型を用いたシミュレーションによって検討した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shuichiro Taya & Masayuki Sato	4. 巻 8:11063
2. 論文標題 Orientation-specific learning of the prior assumption for 3D slant perception	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-018-29361-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 田谷 修一郎	4. 巻 34
2. 論文標題 「新宿東口の猫」はなぜ立体的に見えるのか？	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Vision	6. 最初と最後の頁 84-87
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.24636/vision.34.3_84	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shuichiro Taya	4. 巻 30
2. 論文標題 Do observers use their own interpupillary distance in disparity scaling?	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 41-49
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10043-022-00780-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田谷修一郎
2. 発表標題 幾何学的錯視の錯視量と両眼間距離の相関についての検討
3. 学会等名 日本視覚学会2018年夏季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田谷修一郎
2. 発表標題 恒常性スケーリングの誤適用はミュラー・リヤー錯視を説明するか？ 錯視量の個人差に基づく検討
3. 学会等名 錯覚現象のモデリングとその応用 第13回 錯覚ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田谷修一郎
2. 発表標題 錯視量の相関にもとづく幾何学的錯視の分類
3. 学会等名 第38回日本基礎心理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田谷修一郎
2. 発表標題 アナモルフォーズとしての幾何学的錯視
3. 学会等名 日本視覚学会2023年冬季大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------