

令和元年6月27日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00211

研究課題名(和文)空間知覚における多感覚統合過程の影響

研究課題名(英文)Effects of multimodal integration on spatial perception

研究代表者

繁樹 博昭 (Shigemasu, Hiroaki)

高知工科大学・情報学群・准教授

研究者番号：90447855

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：空間知覚が複数の感覚情報の統合によって生じる影響について検討を行い、3次元知覚や自己身体の位置知覚が自己身体の視覚フィードバックの情報に依存して変化すること、自己の回転運動における前庭覚と視覚情報の統合において、情報間の不一致の度合や能動・受動運動の違い、不一致の予期に応じて、回転知覚における各手がかりの重み付けや空間定位、酔いの程度が異なること、また白質病変の程度が高いと酔いの程度が大きくなることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

バーチャルリアリティなどの技術の発展により身体や自己運動の情報を自由に変容させることが可能となる。こうした技術を用いて遠隔地のロボットの操作やVR空間内の作業等を適切に行うためには、自己身体のイメージや感覚フィードバックの変化により空間知覚がどのように影響を受けるかを明らかにし、その影響の特性をあらかじめ考慮しておく必要がある。本研究では、このような来るべき時代に先駆けて、拡張あるいは変調された身体の視覚的フィードバックや異なる感覚手がかりによって空間知覚がどのような特性を示すかを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Effects of the multimodal integration on spatial perception were investigated and the results showed that the three-dimensional perception and the proprioceptive body position perception were modulated depending on the information of visual feedback of self-body, and showed that the weight of vestibular and visual cue in the perception of self-rotation, spatial position perception and the extent of motion sickness dynamically changed depending on the degree of the incongruence of sensory cues, either active or passive movement, and the expectation of the congruence, additionally the extent of the sickness became severer when the degree of leukoaraiosis was high.

研究分野：実験心理学

キーワード：多感覚統合 フレイ 視覚 前庭覚 自己受容感覚 映像酔い 白質病変 奥行き知覚 ヘッドマウントディスプレイ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

#### (1) 自己の身体運動が視空間知覚におよぼす影響

われわれは3次元空間を適切に知覚することで、空間内の物体を掴んだり、道具を操作したり、移動したりすることができる。3次元空間は主に視覚情報によって知覚されるが、この視空間の知覚は自己身体の知覚によって影響を受けることが報告されている (Matsumiya and Shioiri, 2014; Harris et al., 2015)。通常は自己身体の知覚は視覚的な情報と大きく矛盾することはないが、模型の身体やヘッドマウントディスプレイ (HMD) によりバーチャルな身体を呈示することで、実際とは異なる位置や形状の身体情報を呈示することができる。このような特殊な場合でも自己の身体は柔軟に対応して知覚され、自己所有感覚が変化したり、自己受容感覚による身体位置知覚がドリフトしたりする (Botvinick and Cohen, 1998; Kiltner et al., 2012)。自己受容感覚のドリフトは同期した触覚刺激を呈示した例が多いが、能動的運動に同期した動きによっても生じる (Kalckert and Ehrsson, 2012; 川村・繁樹, 2016)。一方、拡張した自己身体の視覚フィードバックによる知覚が空間知覚を変調するかどうかについては、Volcic et al. (2013) が点光を自己の手の位置のフィードバックとして報告しているものの、未解明な点が多い。

#### (2) 前庭覚が視空間知覚におよぼす影響、および酔いへの影響

前庭覚は視覚情報と同様に自己運動感覚をもたらす。それぞれの運動情報が一致しない場合の自己運動知覚についてはすでに多くの検討が行われているが (たとえば Tanahashi, Ujike and Ukai, 2012)、これまでの研究ではベクション強度や自己運動方向の知覚について検討した研究が多く、ターゲットの空間的な定位を指標とした検討はほとんど行われていない。空間的位置の情報は前庭情報と視覚情報の統合過程における各感覚情報の寄与を検討することが可能なため、定量的にそれぞれの情報の重み付けを検討するのに有効な方法である。ヘッドトラック機能をもつ HMD に呈示する視覚刺激を操作し、実際の身体の回転により生じる前庭刺激と独立に視覚刺激を呈示することで、こうした空間定位を検討する実験が可能となる。この操作によって、乗り物酔いが生じやすい状況のように、視覚刺激は静止しているが前庭刺激は自己運動の知覚をもたらす条件や、映像酔いが生じやすい状況のように、視覚刺激は自己運動の知覚をもたらすが前庭刺激は静止している条件、さらにはそれぞれの移動速度が異なる組み合わせの条件を同一の実験環境において設定することができる。

#### (3) 多感覚統合における脳領野神経結合および、その知覚特性との相関

研究分担者の朴啓彰客員教授は白質病変と運動行動の関係についてこれまで精力的に検討してきた (たとえば Nakano et al., 2014)。一連の研究のうち、ドライビングシミュレータを用いた予備実験により、白質病変の程度の高い被験者はドライビングシミュレータを操作したときの酔いの程度が健常者よりも高くなるという結果を得ている。この結果は、白質病変によって各感覚情報を統合する脳領域間の結合に障害があると互いに一致しない多感覚情報に対して柔軟に適應する機能が低下し、それが酔いをもたらしている可能性を示している。

### 2. 研究の目的

われわれが生活する3次元環境の空間知覚は自己身体の知覚と密接に関連しており、自己の身体運動に伴う体性感覚や前庭覚などの感覚情報は視覚的な空間表象に影響を及ぼす。またこれらの感覚情報が一致しない場合は酔いや疲労などの問題を生じる場合がある。本研究はこうした多感覚統合による空間知覚や酔いなどの生体への影響について心理物理実験および脳機能イメージングにより検討することを目的とした。

特に、(1) 自己の身体運動が視空間知覚におよぼす影響を検討する実験では、自己身体の運動とその視覚的フィードバックが一致しない状況を設定し、両眼視差による奥行き視や自己受容感覚ドリフトへの影響を検討、(2) 前庭覚が視空間知覚におよぼす影響、および酔いへの影響を検討する実験では、視覚誘導性自己運動感覚と前庭覚が一致しない状況や能動運動/受動運動の違いを設定し、各手がかりの重み付けの特性や物体の空間定位の特性、および酔いによる生体への影響を検討、(3) 多感覚統合における脳領野神経結合および、その知覚特性との相関を検討する実験では、健常者や白質病変を有する者の多感覚情報統合の特性を検討した。またこれらの空間知覚の基礎をなす視覚における3次元知覚のメカニズムについて、3次元構造の一般的表象がどの脳領野で処理されているか、および順応パラダイムによる3次元の面の処理特性についても検討した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 自己の身体運動が視空間知覚におよぼす影響

自己の手の視覚フィードバックにより空間知覚が変容するかを検討するため、HMD に呈示するバーチャルな手と現実の手との類似性、および手の長さを操作した上で、実験参加者に目標物までの到達運動課題を繰り返し行わせることで手の視覚情報に順応させ、その後に物体間の奥行き距離判断課題を行った。両眼視差から奥行きへのスケールリングの特性が自己の手の到達距離に依存して決まるのであれば、手の視覚フィードバックを操作することにより絶対距離に

応じた奥行き知覚の特性が変化するはずである。

自己受容感覚による自己身体位置知覚が視覚フィードバックに及ぼす影響を検討する実験では、バーチャルな手に同期して運動する刺激を水平方向または前後方向に偏位させ、自己受容感覚ドリフトが身体の運動方向と偏位方向の相互作用によって差が生じるかを検討した。また、手の前後運動における網膜サイズの変化の有無の効果も検討した。

#### (2) 前庭覚が視空間知覚におよぼす影響、および酔いへの影響

実験参加者はHMDを装着した状態で回転椅子に座り、実験者が被験者の椅子を回転させた後、ターゲットの位置をポインティングする課題を行った。酔いについて検討する実験では、シミュレータ酔いの指標として標準的に用いられる Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) を用いた。視覚情報による回転の動きの呈示は、物理的な回転と一致しない、前庭刺激とは異なる視覚情報も設定した。

#### (3) 多感覚統合における脳領野神経結合および、その知覚特性との相関

白質病変のレベルの違いによって視覚と前庭覚の情報の不一致による酔いへの影響が異なるかを検討するために、回転椅子に座った状態でYaw回転させ、リアルタイムに Motion Sickness Susceptibility Questionnaire (MSSQ) をボタン押しで反応してもらい、事後にSSQのアンケートを使用した。白質病変の程度の診断は高知検診クリニックの脳ドックにおいて研究分担者の朴啓彰客員教授が行った。

#### (4) 3次元視の処理メカニズムの検討

両眼視差による方位に依存しない、および奥行き手がかりの違いに依存しない半円柱状の凸面、凹面の表象が脳のどの視覚領野で担われているかを検討するために、MRI画像を用いて Multi Voxel Pattern Analysis (MVPA) により凸面、凹面を判別する機械学習を行った。同様の手法を用いて、3次元方位の表象についても検討した。

また、両眼視差で定義されたPlaid状の奥行き構造を持つ刺激を用いて、順応のレベルが局所的な両眼視差の処理によるか、より高次な面の処理によるかを心理物理実験により検討した。

### 4. 研究成果

#### (1) 自己の身体運動が視空間知覚におよぼす影響

HMDに呈示するバーチャルな手と現実の手との類似性、および手の長さを操作した結果、手のモデルの長さにより3次元空間知覚が変容し、かつ現実の手との類似性に依存してその変容の特性が異なることを示した(山根・繁樹, VRSJ2017; Shigemasa and Yamane, ECV2017)。リーチングによって対象の距離知覚が変容し、奥行きのスケーリング知覚の特性も変化した。球のような抽象的な形状による手の位置のフィードバックは実際の手と類似したバーチャルな手に比べて空間知覚の変化の個人差が大きくなり、視覚フィードバックの特性によって空間知覚への影響が異なるという結果が得られた。また、この空間知覚の変化が奥行き方向への到達運動でのみ生じるかを検討するため、運動方向による影響を比較した結果、運動方向によらず手の知覚位置および空間知覚が同程度に変化することを示した。

同期した手の運動による視覚フィードバックが自己受容感覚による身体位置知覚に及ぼす影響について検討した結果、前後方向の運動は左右方向の運動よりも偏位によるドリフト量が小さいことを示した(内田・繁樹, 2019)(図1)。この原因として、左右方向の偏位の方が前後方向よりも網膜座標上の位置の大きな変化を生じること、前後の位置の違いの方が左右の位置の違いよりも自己受容感覚の手がかりの影響が大きい可能性があること、前後の位置の違いは左右の位置の違いよりも身体中心からの距離がより大きく変化することが考えられる。一方で、運動方向の違いや前後運動による距離に応じた網膜サイズの変化の有無は身体位置知覚に及ぼす影響は小さいことが示された(内田・繁樹, 2019; Shigemasa and Kawamura, 2016)。自己受容感覚ドリフトを検討した先行研究においても運動の同期の重要性が示されており、運動方向に応じて同期した視覚フィードバックが得られれば、運動方向の違いや網膜像の変化の矛盾などの他の要因に関わらず、ドリフト量への影響は変わらないと考えられ、こうした特性はバーチャルリアリティによる身体感覚の効率的な変調に適用することができる。

#### (2) 前庭覚が視空間知覚におよぼす影響、および酔いへの影響

HMDを用いて視覚情報と前庭覚情報を独立に操作し、検討を行った。実験の結果、身体の回転知覚は各情報間の不一致の度合いに応じて重み付けが動的に変化し、差が小さい場合は視覚優位、差が大きい場合は前庭覚優位となる傾向が見られた。各感覚情報が不一致の場合の酔い

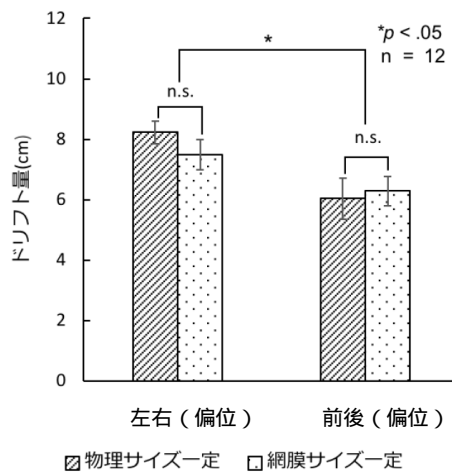


図1

の影響については、前庭刺激の回転情報が視覚刺激の回転情報を上回った際に特に酔いの程度が大きくなることが明らかとなった。自己運動を能動的に決定するか受動的か、感覚情報の不一致を予期できるかどうかについて検討した結果では、能動的に自己運動反応を行う条件において感覚情報の強い予期により感覚不一致の効果が強く、酔いの程度が大きくなることを示した（佐野・繁樹, VRSJ2018）。

前庭覚を構成する半規管と耳石器の動特性に着目した視覚誘導性自己運動感覚の実験系をVR空間内に構築し、特に半規管が反応しないと考えられる1 Hz以下の低周波数で振動するような視覚刺激を用いて実験を行った。また、回旋眼球運動の解析を高い空間分解能で行うことができる解析手法を確立し、眼球運動と酔いの関係について検討した（村山・棚橋, VSJ2019）。

視野外に対象があるときの音源定位や物体の定位も検討し、対象が視野内に存在した時の位置や運動の影響により音源定位には腹話術効果と同様のバイアスを生じること（中野・繁樹, VRSJ2017）、自己の回転運動により対象が視野外に位置した場合の物体の定位では、前庭覚、体性感覚の感覚情報を伴う運動の場合に、より定位の精度が上がることを示した（Shigemasa and Nakano, 2019）。

これらの多面的なアプローチにより、前庭覚情報と視覚情報が統合した場合の空間知覚および酔いへの影響について詳細に検討し、その特性を明らかにすることができた。

### (3) 多感覚統合における脳領野神経結合および、その知覚特性との相関

HMDと回転椅子による映像酔いの実験を白質病変の実験参加者と健常者で比較検討した。実験の結果、白質病変のレベルが高い群（L2）はレベルが低い群（L0）よりも有意に酔いの程度が大きくなることを示した。このことから、白質病変は皮質間の神経連絡の処理の不全により多感覚情報の矛盾による影響がより強く生じることが示唆された。

### (4) 3次元視の処理メカニズムの検討

MVPAの手法で分析したfMRI実験により、方位によらない半円柱状の凸面/凹面の一般的表象がV3Aにおいて処理され、奥行き手がかりに依存しない表象が頭頂間溝（IPS）によって処理されていることが示唆された（Li and Shigemasa, VSS2018; VSS2019）。また、対象の3次元構造の方位の違いによって知覚-運動協応に関連するIPSの活動パターンが異なり、呈示した視覚刺激の3次元の方位を識別可能であることを示し、IPSが対象の視覚情報に対する把持などの手の運動出力への処理に関連することが示唆された（Threethipthikoon, Li and Shigemasa, APCV2019）。

両眼視差によって定義されたPlaid状の奥行き構造を持つ刺激に対する順応が局所的な低次の両眼視差レベルではなく、高次元面の処理のレベルにおいて順応が生じていることを明らかにし、両眼視差から奥行き構造への多層的な処理の特性を示した（He and Shigemasa, 2018）。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計2件)

内田 裕基、繁樹 博昭、バーチャルな身体の運動方向、偏位方向およびサイズが自己受容感覚ドリフトに及ぼす影響、日本バーチャルリアリティ学会論文誌、査読有、24巻1号、2019、61-67

DOI: 10.18974/tvrsj.24.1\_61

He, S. and Shigemasa, H. Relationship of Depth Adaptation Between Disparity-Specified Plaids and Their Components, i-Perception, 査読有, Vol.9, No.5, 2018

DOI: 10.1177/2041669518799763

### 〔学会発表〕(計15件)

Shigemasa, H. and Nakano, Y. Effects of self-motion on the spatial representation out of the visual field. The European Conference on Visual Perception (ECP), 2019年

Li, Z, and Shigemasa, H. Common representation of convex-concave shapes from different cues. Asia Pacific Conference on Vision (APCV), 2019年

Threethipthikoon, T, Li, Z. and Shigemasa, H. Generalized Representation of 3D Object Orientation in Human Visual Cortex. Asia Pacific Conference on Vision (APCV), 2019年

Li, Z, and Shigemasa, H. Generalized representation of shapes from different cues in parts of IPS areas. Vision Sciences Society (VSS), 2019年

村山 茂也、棚橋 重仁、Roll運動刺激により誘発される映像酔いの重症度と回旋眼球運動の関係、日本視覚学会2019年冬季大会、2019年

Shigemasa, H. and Uchida, Y. Effects of the direction of hand motion and the perspective cue on proprioceptive drift. The European Conference on Visual Perception (ECP), 2018年

Li, Z, and Shigemasa, H. Generalized Representation of Stereoscopic Surfaces in V3A. Vision Sciences Society (VSS), 2018年

佐野 稜太、繁樹 博昭、自己運動の予期が感覚矛盾によって生じる VR 酔いに及ぼす影響、第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会、2018 年  
内田 裕基、繁樹 博昭、バーチャルな身体の運動方向、偏位方向およびサイズが自己受容感覚ドリフトに及ぼす影響、第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会、2018 年  
佐藤僚馬、棚橋重仁、人の視野における自己運動情報の処理特性、立体映像技術研究会、2018 年  
Shigemasu, H. and Yamane, S. Modification of stereoscopic depth scaling by reaching movement and its visual feedback. The European Conference on Visual Perception (ECVP), 2017 年  
中野 由童、繁樹 博昭、視野外の視覚表象が音源定位に及ぼす影響、第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会、2017 年  
佐藤僚馬、棚橋重仁、三次元視空間内に呈示された視覚刺激が自己運動感覚に及ぼす影響、第 30 回 VR 心理学研究委員会、2017 年  
山根 祥、繁樹 博昭、自己身体の視覚フィードバックが 3 次元空間知覚に及ぼす影響、第 21 回日本バーチャルリアリティ学会大会、2016 年  
Shigemasu, H. and Kawamura, T. Effects of visual feedback of virtual hand on proprioceptive drift. The European Conference on Visual Perception (ECVP), 2016 年

〔図書〕(計 2 件)

繁樹 博昭 他、朝倉書店、基礎心理学実験法ハンドブック、2018、16-19/456-457  
繁樹 博昭 他、技術情報協会、VR / AR 技術の開発動向と最新応用事例、2018、25-35

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：棚橋 重仁  
ローマ字氏名：TANAHASHI Shigehito  
所属研究機関名：新潟大学  
部局名：大学院自然科学研究科  
職名：助教  
研究者番号(8桁)：00547292

研究分担者氏名：朴 啓彰  
ローマ字氏名：PARK Kaechang  
所属研究機関名：高知工科大学  
部局名：地域連携機構  
職名：客員教授  
研究者番号(8桁)：60333514

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。