

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03500

研究課題名（和文）3次元知覚と身体の相互作用の解明

研究課題名（英文）Interaction between 3D perception and self-body

研究代表者

繁樹 博昭（Shigemasu, Hiroaki）

高知工科大学・情報学群・教授

研究者番号：90447855

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）：3次元の知覚と自己身体の処理は互いに強く影響し合っているはずであるが、その相互作用は多様であり、明らかになっていない点も多い。本研究では、こうした多様な相互作用を3次元空間内の知覚と身体の適応的システムとして統一的に捉え、行動実験と脳機能イメージングのアプローチによって検討した。行動実験では、バーチャルリアリティ（VR）技術を用い、身体位置の操作に対して柔軟に身体知覚が変化すること、多感覚情報の統合の特性が対象までの奥行き距離に応じて変化することなどを明らかにした。fMRIによる脳機能イメージング研究では、身体運動を伴う体性感覚情報が視覚野においてどのように処理されているかを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3次元空間知覚と身体の間が多様な相互作用について、VRとfMRIの2つのアプローチを用いて多角的、総合的に検討している例はこれまでにない。本研究はこれらのアプローチを用いて、これまで十分に検討されてこなかったこうした相互作用の特性を明らかにしてきた点が本研究の学術的意義である。またこうした相互作用を明らかにすることにより、メタバースや実世界で拡張身体を駆使した際の空間知覚への影響や身体への影響が解明され、その特性に応じたVRやブレインテックの開発、リハビリテーションなどの医療への応用が可能となることが本研究の社会的意義である。

研究成果の概要（英文）：Although 3D perception and self-body processing should strongly influence each other, their interactions are varied and many aspects remain unclear. In this study, these interactions were investigated using behavioral experiments and functional brain imaging approaches, viewing the interactions as an adaptive system of perception and body in 3D space. In behavioral experiments, we used virtual reality (VR) technology and revealed that perceived body changes flexibly in response to manipulation of body position, and that the characteristics of multisensory information integration depend on the depth distance to the object. Functional brain imaging studies using fMRI revealed how somatosensory information involving body movements is processed in the visual cortex.

研究分野：実験心理学

キーワード：空間知覚 身体 体性感覚 自己受容感覚 3次元視 VR fMRI MVPA

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

私たちは3次元の環境内で自己身体を使って適応的に行動している。このことから、3次元の知覚と自己身体の処理は互いに強く影響し合っているはずである。しかし、その相互作用は多様であり、明らかになっていない点も多い。特に、身体情報を自由に操作することはこれまで困難であったことから、身体情報が3次元知覚に及ぼす影響については検討が不十分である。さらに、こうした相互作用によって、空間や身体の情報に脳内でどのように表現、変換されているかも明らかではない。

ラバーハンド錯覚は知覚フィードバック情報が身体位置の知覚に影響を及ぼすことを示す典型的な例であるが (Botvinick & Cohen, 1998), 多くは左右の2次元的な偏移の検討にとどまっておき、また研究代表者は奥行き方向においても自己受容感覚ドリフトが生じることを示しているが (内田・繁樹, 2019), 3次元の知覚と身体との相互作用という観点から見ると、あくまで多様な相互作用の一例に過ぎないといえる。一方、脳内の視覚情報処理においては、身体運動と空間知覚に関わる処理が背側経路、物体の認識に関わる処理が腹側経路という2つの経路に分かれるとされているが (Goodale & Milner, 1992), 物体の3次元構造の知覚が2つの経路でどのように処理されているかは未だ不明確である。研究代表者はこれまで両眼立体視による3次元知覚が背側経路と腹側経路においてそれぞれ物体間の奥行き差と物体内の奥行き構造の処理の機能的差異に対応づけられると仮定し、これらの知覚や脳活動の違いを検討してきたが、この単純な二分法的な分類と整合しない結果も多く、物体の奥行き構造に対応する処理は背側経路の方がより明確に現れており (Welchman, 2016), 研究代表者も背側経路のV3A野で奥行き構造に関連した活動を見出している (Li & Shigemasa, 2019)。この3次元構造の情報は背側経路が接続する運動出力系の処理に強い影響を及ぼすと考えられるため、本研究で検討する3次元知覚と身体との相互作用に関連すると考えられる。

近年では位置トラッキングや広視野のヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display, HMD) などのバーチャルリアリティ (VR) 技術の発展により、身体の視覚情報をリアルかつ自由に操作することが可能となってきた。また、脳機能イメージングにおいて、単にどの領域が賦活するかを分析するのではなく、脳内で知覚や運動出力の情報をどのように符号化しているかを脳活動のパターンを解析することで明らかにできるようになっている。このように、VRの技術やfMRIの分析法の発展により、これまで検討が困難であった点を実験的に検討することができるようになり、これらを空間知覚と身体との相互作用の解明に活用することができる。

2. 研究の目的

本研究では、こうした背景から、3次元空間の知覚と身体との多様な相互作用を行動実験と脳機能イメージングのアプローチによって検討した。

(1) VR技術を用いた研究では、3次元空間内の移動情報や身体への視覚フィードバックを操作し、自己身体知覚の変容や自己身体運動の空間知覚への影響について明らかにすることを目的とした。

(2) 脳機能イメージングの研究では、視覚野における3次元の処理が身体運動出力の処理に関連するかについて、多ボクセルパターン解析 (Multi Voxel Pattern Analysis, MVPA) の手法を用いてfMRIにより検討し、把持運動などの身体運動出力に伴う対象の3次元構造知覚の処理が視覚野においてどのように関わっているかを明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 行動実験では、3次元情報や身体への視覚フィードバックを自由に操作できるVR技術を用い、これまで十分に検討できなかった身体と空間知覚の相互作用に着目して検討した。具体的にはHMDに自己身体を示すバーチャルな手を実身体と異なる位置に呈示し、手を動かしたときのバーチャルな手の移動を操作したときの身体位置の知覚を検討する実験や、実物体に手で触ることによる体性感覚による知覚とHMD上に視覚刺激を呈示したときの知覚の統合過程を検討する実験を実施した。

(2) 脳機能イメージングの実験では、対象の特性の知覚に関連した処理について、視覚野内のどの領域がその処理に関わっているかをMVPAを用いて検討した。実験参加者は3TのMRIスキャナ内でスクリーンに呈示された3次元刺激を観察、あるいは実物体を把持し、対象の3次元特性を判断する課題を行った。事前に同定した視覚野の各領域において、課題中に測定した脳活動のパターンを機械学習し、知覚対象の3次元特性を判別した。領域ごとに判別精度を算出し、各領域でどのような処理を行っているかを明らかにした。

4. 研究成果

・VR による行動実験

(1) HMD を用いて VR 空間上における手の位置の視覚フィードバックを操作し、手の動きを実際より大きく見せることで、視覚上の身体位置のずれが手の動きの方向によって異なるときの身体位置の知覚への影響を検討した。実験の結果、ずれの向きが左右に変化する場合、自己受容感覚ドリフトの向きも左右に変化することが示された。ずれの向きが前後に変化する場合は、ずれの向きが変化する位置を基準にすると身体の知覚位置のずれの向きが変化している傾向が見られることから、前後方向のずれにおいても、身体の知覚に影響を及ぼしていることが示唆された。このことから、従来の研究で示されたような一方向のみの身体位置知覚の変化だけでなく、動きに応じて異なる方向にずれが生じる場合でも運動方向に依存した知覚位置のずれが生じ、VR 空間で操作する身体の実実と異なる動きに柔軟に適応し、その動きや位置に応じて知覚される身体位置の変化が生じることが示唆された(中島・繁樹, 2022)。

(2) 視覚の現象として検討されてきたアモーダル補完について、アクティブタッチによる触覚情報が視覚的補完に貢献するかを検討した。VR 空間における標的刺激の欠損部と位置合わせした凹凸のある実物の板を触覚刺激として用いた。触覚刺激がアモーダル補完に及ぼす影響の評価は、触覚刺激と合わせて HMD に 3 次元の視覚刺激を呈示し、呈示されていた部分的に遮蔽された単語が何であったかを実験参加者が回答する課題を行い、単語の正答率を指標とした。実験の結果、触覚刺激がアモーダル補完に及ぼす明確な効果は見られなかった。また、この課題では見えない部分が手前で遮蔽しているような条件より、奥にあるほうが単語の正答率が高かった。この結果より、アモーダル補完は 3 次元的な視覚的奥行き知覚や触覚的奥行き知覚によらず、文字の segmentation の情報のみに基づく可能性があること、触覚情報自体による促進的な効果は見られず、アモーダル補完がモダリティに特異的に処理されることが示唆された(Takeichi, Taniguchi, & Shigemasa, 2023)。

(3) 視触覚統合時の各感覚モダリティの重み付けについて、これまで注目されてこなかった自己から対象までの奥行き距離の要因も操作し検討した。実験参加者は実物の棒を把持し力触覚により太さを判断する課題と、VR 上の棒を観察し視覚により太さを判断する課題を行った。各課題では単独モダリティによる標準刺激の太さに対して、視覚または力触覚情報を 10% 増減した刺激を付加して感覚情報間に不一致を生じさせ、比較刺激の太さの大きさを判断した。この課題を刺激の呈示距離を変えて行い、標準刺激の太さ知覚との主観的等価点を算出した。実験の結果、力触覚の判断課題では視覚の影響が見られなかったが、視覚の判断課題では触覚の影響が見られ、かつ触覚の重み付けが距離条件によって変化した(図 1)。本刺激による太さ知覚では、距離に依存して網膜像が変化する視覚情報よりも距離に依存しない触覚が優位であり、また、その影響の大きさは距離によって変わることが示された。これは、視覚による大きさの恒常性の効果に対して、触覚刺激の不一致の相対的關係が重み付けに影響を及ぼしていることを示唆する(吉良・竹市・繁樹, 2023)。

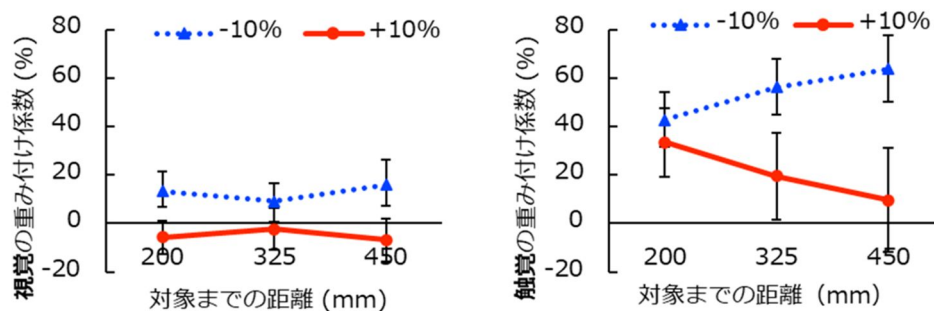


図 1 視触覚統合における各モダリティの重み付け係数 (左: 触覚判断, 右: 視覚判断)

・fMRI による脳機能イメージング実験

(1) 視覚以外の感覚情報による対象の空間特性の情報は視覚皮質で処理されているのか、また処理されている場合、その処理が空間特性の知覚にどのように関わっているかは明らかではない。そのため、視覚入力がない場合に、体性感覚や身体運動によって得られる対象物の方位の情報が視覚皮質の各領域においてどのように処理されているか検討した。実験の結果、実物の棒状のオブジェクトを遮蔽されて見えない状態で把持したとき、その方位が fMRI による視覚皮質の脳活動から判別した結果、視覚入力による処理は行われていないにも関わらず、物体の方位は判別できることを明らかにした。さらに、視覚皮質内の領域ごとの検討から、空間的処理や運動

出力の処理に関わる背側経路にあたる V3 野の背側部 (V3d) では、賦活のパターンが棒状の刺激の把持の仕方に依存し、身体運動の違いに依存した処理を行っていること、頭頂間溝 (IPS) の領野は視覚入力自体よりも体性感覚や運動出力に関わる方位の処理をおこなっていることを示した (Threethipthikoon, Li, & Shigemasa, 2022).

遮蔽された物体の把持運動には、力触覚、自己受容感覚、運動計画、視覚的ワーキングメモリなどの多くの要因が関わっていると考えられるため、視覚皮質の方位の処理にどの要因が影響するかについて検討する必要がある。そこで、これらの要因を操作するため、実際に物体を把持する条件 (Direct Grasp)、物体がなく把持運動のみをする条件 (Air Grasp)、把持運動をしない条件 (Non-Grasp)、把持をするまで物体の方位が分からない条件 (Uninformed Grasp) の 4 条件を設け、詳細に検討した。fMRI による実験の結果、V1 野、V2 野は把持運動の準備に関わる処理に関連し、V3 野は背側側の V3d では把持運動における力触覚フィードバックを統合する処理、腹側側の V3v では不足している視覚情報をイメージする処理にそれぞれ関連することが示された (図 2)。網膜像の視野が再現されている V3 野の領野内で腹側、背側間で差が見られたことは、V3 野では上下視野の処理に機能的な違いがあることを示唆している (Threethipthikoon, Li, & Shigemasa, 2023)。

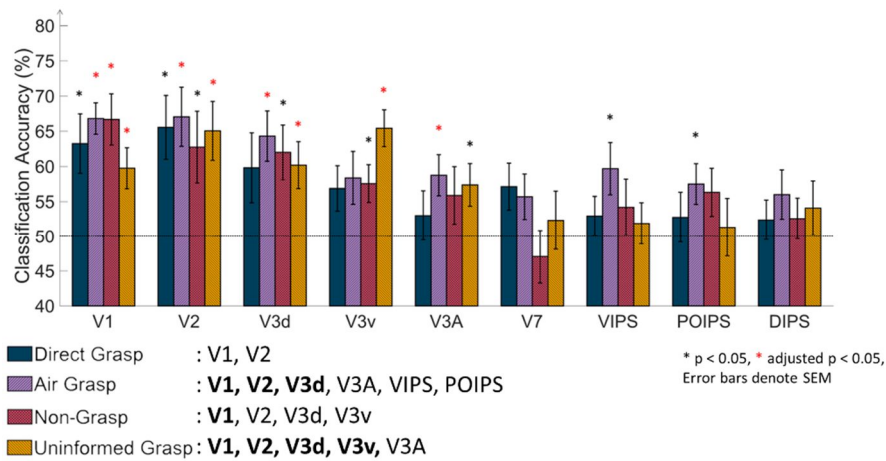


図 2 各視覚領野における物体の方位の判別精度

奥行き手がかりに依存しない物体の表象が視覚野のどの領野で処理されているかについても検討を行った。両眼網膜像差と線遠近法の手がかりによって定義された凸面、凹面の刺激を呈示し、各領野の処理が奥行き手がかり間で異なるのか、共通するのかについて、MVPA の手法により検討した。3次元情報の処理が奥行き手がかり間で共通している場合は、各手がかり呈示時の脳機能画像で機械学習した凸面/凹面の判別器で別の手がかりによる脳機能画像の凹凸の判別が可能となるはずである。fMRI による実験の結果、頭頂間溝 (IPS) の領野において判別精度が高く、奥行き手がかりの情報によらない一般的な 3次元の表象は IPS 野において処理されていることが示唆された (Li & Shigemasa, 2021)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Takeichi Hiroshige, Taniguchi Keito, Shigemasu Hiroaki	4. 巻 14
2. 論文標題 Visual and haptic cues in processing occlusion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Psychology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpsyg.2023.1082557	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 Sekiguchi, H., Yamaka, K., Takeuchi, S., Futatsubashi, G., Kadota, H., Miyazaki, M., Nakazawa, K.	4. 巻 11
2. 論文標題 Acquisition of novel ball-related skills associated with sports experience.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-91120-7	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 Kanayama Noriaki, Hara Masayuki, Kimura Kenta	4. 巻 11
2. 論文標題 Virtual reality alters cortical oscillations related to visuo-tactile integration during rubber hand illusion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-80807-y	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 Yang Jiajia, Yu Yinghua, Shigemasu Hiroaki, Kadota Hiroshi, Nakahara Kiyoshi, Kochiyama Takanori, Ejima Yoshimichi, Wu Jinglong	4. 巻 11
2. 論文標題 Functional heterogeneity in the left lateral posterior parietal cortex during visual and haptic crossmodal dot surface matching	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Brain and Behavior	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/brb3.2033	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 Li Zhen、Shigemasu Hiroaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Unique neural activity patterns among lower-order cortices and shared patterns among higher-order cortices during processing of similar shapes with different stimulus types	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 i-Perception	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/20416695211018222	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 -

[学会発表] 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Thanaphop Threethiphikoon, Zheng Li, Hiroaki Shigemasu
2. 発表標題 Orientation representation for visually occluded action in V3d
3. 学会等名 Vision Sciences Society (VSS) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡田凌・繁樹博昭
2. 発表標題 オプティックフローによる自己運動方向弁別における呈示視野の影響
3. 学会等名 電子情報通信学会 ヒューマン情報処理研究会 (HIP)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shigemasu, H. & Kaizuka, R.
2. 発表標題 Proprioceptive drift by virtually split arm
3. 学会等名 The European Conference on Visual Perception (ECPV) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 繁樹博昭
2. 発表標題 VRで知覚・運動の特性を明らかにする
3. 学会等名 第20回日本VR医学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 繁樹博昭
2. 発表標題 身体位置の視覚フィードバックが身体感覚及び運動出力に及ぼす影響
3. 学会等名 第42回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeichi, H., Taniguchi, K., & Shigemasu, H.
2. 発表標題 Modality Specificity of Amodal Completion
3. 学会等名 The 37th Annual Meeting of the International Society for Psychophysics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kanayama, N., Hara, M., & Kimura, K.
2. 発表標題 Rubber hand illusion related EEG oscillation in real and VR environment.
3. 学会等名 Neuroscience 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横田文, 関口浩文, 門田宏
2. 発表標題 脳画像を用いたジャグリング課題の学習能力の予測に関する検討
3. 学会等名 四国体育・スポーツ学会/日本体育学会四国地域
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島翔, 繁樹博昭
2. 発表標題 VR空間上の身体知覚における視覚的な身体位置のずれの向きの影響
3. 学会等名 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会/日本バーチャルリアリティ学会VR心理学研究委員会/映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉良勇飛, 竹市博臣, 繁樹博昭
2. 発表標題 バーチャルな視覚刺激を伴う把持による太さ知覚の視触覚統合 対象までの距離の影響
3. 学会等名 日本基礎心理学会第42回大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 日本視覚学会	4. 発行年 2022年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 360
3. 書名 図説 視覚の事典	

1. 著者名 繁樹博昭 (分担執筆)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 500
3. 書名 VR / AR技術における 感覚の提示、拡張技術と最新応用事例	

〔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
研究分担者	門田 宏 (Kadota Hiroshi) (00415366)	高知工科大学・情報学群・准教授 (26402)	
研究分担者	金山 範明 (Kanayama Noriaki) (90719543)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員 (82626)	
研究分担者	竹市 博臣 (Takeichi Hiroshige) (60242020)	国立研究開発法人理化学研究所・情報システム本部・専任技師 (82401)	

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
---------	---------