

3-4 人間の視覚情報処理機構の理解とその特性を利用したユーザにやさしい情報通信機器、映像呈示機器の開発

3-4 *Towards Understanding of Human Visual Information Processing and Developing Human-friendly ICTs and image presentation Devices*

番 浩志 相原 孝次 ウンダリ バユ ゴータマ

BAN Hiroshi, AIHARA Takatsugu, and BAYU Gautama Wundari

人間の視覚系は、外界から入力される光の情報をありのままに機械的に処理するのではなく、「文脈」に応じた解釈を加え、全体としてまとまりのある知覚・認知像を再構成する柔軟な情報処理機構である。例えば、複数の物体が重なりあって全てが見えないような場合にも、それぞれの物体の被遮蔽部を補完し、全体像を即座に把握することができる。よって、人間の視覚システムを支える仕組みを学ぶことで、より柔軟、より頑健、かつより低コストな情報通信機器、画像・映像呈示機器を開発することが可能となるかもしれない。また、この人間の視覚システムが備える柔軟さは、CiNetが目指すCiNet Brain開発の基礎を支える重要な知見ともなるだろう。本稿では、視覚情報処理経路の解明とその応用を目指したCiNetでの研究のうち、特に立体視の謎に迫ったいくつかの筆者らのグループの研究を紹介し、今後の展望について論じたい。

The human visual system can be viewed as a “flexible” information processor; it does not process the dynamic retinal inputs as they are, but rather it reconstructs a coherent and stable visual world by interpreting the contexts surrounding the target visual object. For instance, even when multiple objects are presented with partial overlaps in which one thing covers part of the other, the human visual system can effortlessly and immediately grasp the entire shape of each of the occluded objects by completing the missing parts. Therefore, understanding the mechanisms that support such flexibility in the human visual system may lead to developing novel ICT and image/movie presentation devices to be less energy consumption, more flexible, and more robust than the current ones. Elucidating the mysteries of the human visual system is essential for achieving one of our big goals, the CiNet Brain.

1 まえがき

私たちが眼にする光景は無数の物体が複雑に重なり合って構成されている。また、外界の情報は網膜で2次元平面に圧縮されている。それにも関わらず、人間は断片的で不完全な網膜像から豊かで滑らかな3次元(3D、立体)世界を即座に再構成し、3D物体を難なく同定できる。ヒト脳が備えるこの3D物体同定機構は、最新のロボットにも模倣が不可能なほど柔軟性に富み、高精度なものである。よって、3D物体知覚を実現する人間の脳の仕組みを解明することは、心理学・神経科学の基礎的な理解・発展に貢献するのみならず、マシン・ビジョンや次世代映像技術開発を目指す工学などの応用分野にとっても重要な学際的研究課題である。

しかしながら、従来の人間の視覚系研究では、3D視は他の視覚モダリティや物体同定などの機構とは切り離されて研究が進められてきた。例えば、我々人間の視覚系は3Dがデフォルトであるにもかかわらず、多くのヒト視覚fMRI研究では、縞模様、顔や建物といった2次元(2D)の画像が刺激として用いられてきたため、物体同定と3D処理メカニズムとの関係は無視され、「2D」物体の同定に関わる領野が腹側経路に沿って報告されている。逆に、3D視の研究では、複雑な物体形状を持たない、ごく単純な奥行き平面刺激のみが用いられ、背側経路の活動が着目される一方で、腹側経路の活動はほとんど調べられてこなかった。

しかしながら、3D視分野のこれまでの研究により、3D物体の同定には、腹側視覚経路の活動のみではなく、背側経路の活動も重要であること、背側・腹側両

経路の間に3D物体を処理するための情報連絡が存在すること、が示されてきている。では、背側と腹側のそれぞれの視覚野で処理された情報は、どこでどのように統合されるのだろうか。脳のどこかに3D物体の全ての情報を集約・統合した「3D表象」を担う領野が存在するのだろうか？そもそもなぜ、3D物体同定に関わる多くの機能分化した視覚野が存在するのか？これらの問いに答えるため、我々のグループでは3D物体に対する背側・腹側経路の複数の視覚野の活動を精緻に計測するいくつかのfMRI実験を遂行した。また、3D処理経路が様々な文脈にどのような影響を受けるのかを調べるfMRI実験や、安全で快適(酔わない)な3D視聴環境の手掛かりを得るための研究を進めた。本論文ではこれらの研究のいくつかを紹介するとともに、その将来の応用可能性について論じたい。

2 3D 視覚機能分化の謎に進化から迫る 種間比較 fMRI 研究

人間の3D知覚の特性を理解し、立体視にはなぜ腹側・背側に分かれた複数の視覚野の働きが必要なのかを明らかにするためには、3D視が可能な人間に近い霊長類の脳と人間の脳との比較が有効である。本実験では、筆者らが開発した視覚刺激と実験パラダイム[1][2]を利用し、2つの3D手掛かりを統合する際のサルと人間の脳活動の類似・差違を調べるfMRI実験を行った。

我々人間がモノを立体に見る際には様々な手掛かりを利用している。このうち、両眼視差手掛かり(左右眼像のズレ)が最も強力で有効な手掛かりであると言われているが、実際には人間は両眼視差が利用できないような場合でも、運動、陰影、傾き、模様などの勾配、遮蔽、視対象のサイズの違い、知識、なども有効に利用して即座に豊かな立体構造を把握することができる。では、両眼視差手掛かりとそれ以外の奥行き手

掛かりは、脳のどの部位でどのように統合されるのだろうか。

番らは、この疑問に答えるために複数のfMRI脳機能イメージング実験を遂行してきた[1]-[4]。これらの研究では、単一あるいは2つの奥行き手掛かりを付与したランダム・ドット・ステレオグラム刺激に対するfMRI脳活動を計測した。例えば、Ban et al., 2012 Nat Neurosci [1]では、ランダム・ドット・ステレオグラム(図3参照)刺激と運動視差手掛かり(例えば、電車の窓から外の風景をみたとき、近くにみえる物体と遠くにみえる物体が遠く速度が異なり、その違いから奥行きが知覚されることを思い起こしていただきたい)を組み合わせて、様々な実験条件を用意し、それらの条件に対する脳活動の比較を行った。特に、両眼視差のみ、あるいは運動視差のみの単一の手掛かり刺激に対するデコーディング成績と2つの手掛かりが同時に呈示された場合の成績をモデルに当てはめることで、2つの異なる立体視の手掛かりが「融合」されている脳部位の同定を試みた。その結果、解析対象とした10以上の視覚野のうち、背側視覚野V3B/KOにおいてのみ、2つの手掛かりが統合されていることを突き止めた[1]-[4]。

しかしながら、サルの電気生理学的研究では、従来、奥行き手掛かりはMT野やその周辺の主運動手掛かりを処理する領域によって統合されていることが報告されている[5]。さらに、V3B/KOは霊長類に共通して同定されておらず、人間でのみ報告されている視覚野である。では、人間とサルとで立体視手掛かりを統合する部位が異なるのは、fMRI脳機能イメージングと電気生理学的計測法の研究手法の違いを反映した結果であろうか、あるいは種の違い、すなわち進化を反映したものであろうか。この謎を解明するため、研究代表者はベルギー KU Leuven、ケンブリッジ大、ハーバード大の研究者らと共同fMRI研究を実施した。具体的には、上に挙げた既に発表済みの人間のfMRI研

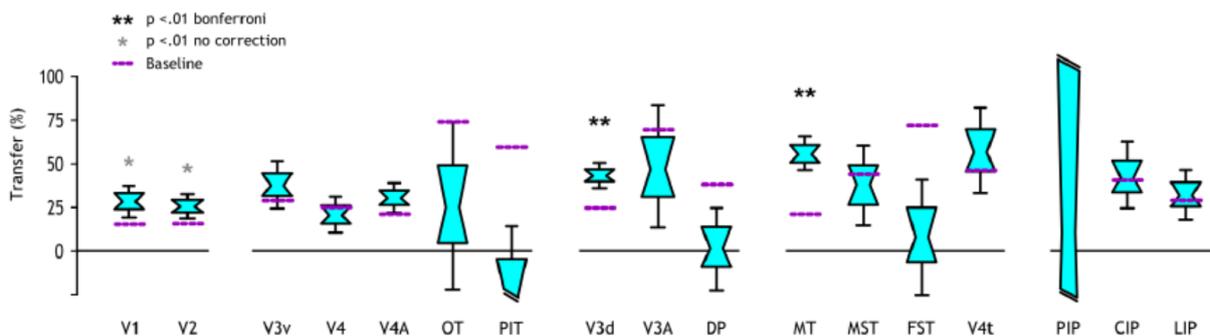


図1 異なる奥行き手掛かり同士の汎化度合いを示した図
人間ではV3B/KO野であったが、サルではMT野でのみ、奥行き手掛かりの統合が確認された。上の図では、V3dなどの関与も示唆されたが、他の解析も含め、4つの検証基準を全てクリアしたのはMT野のみであった。

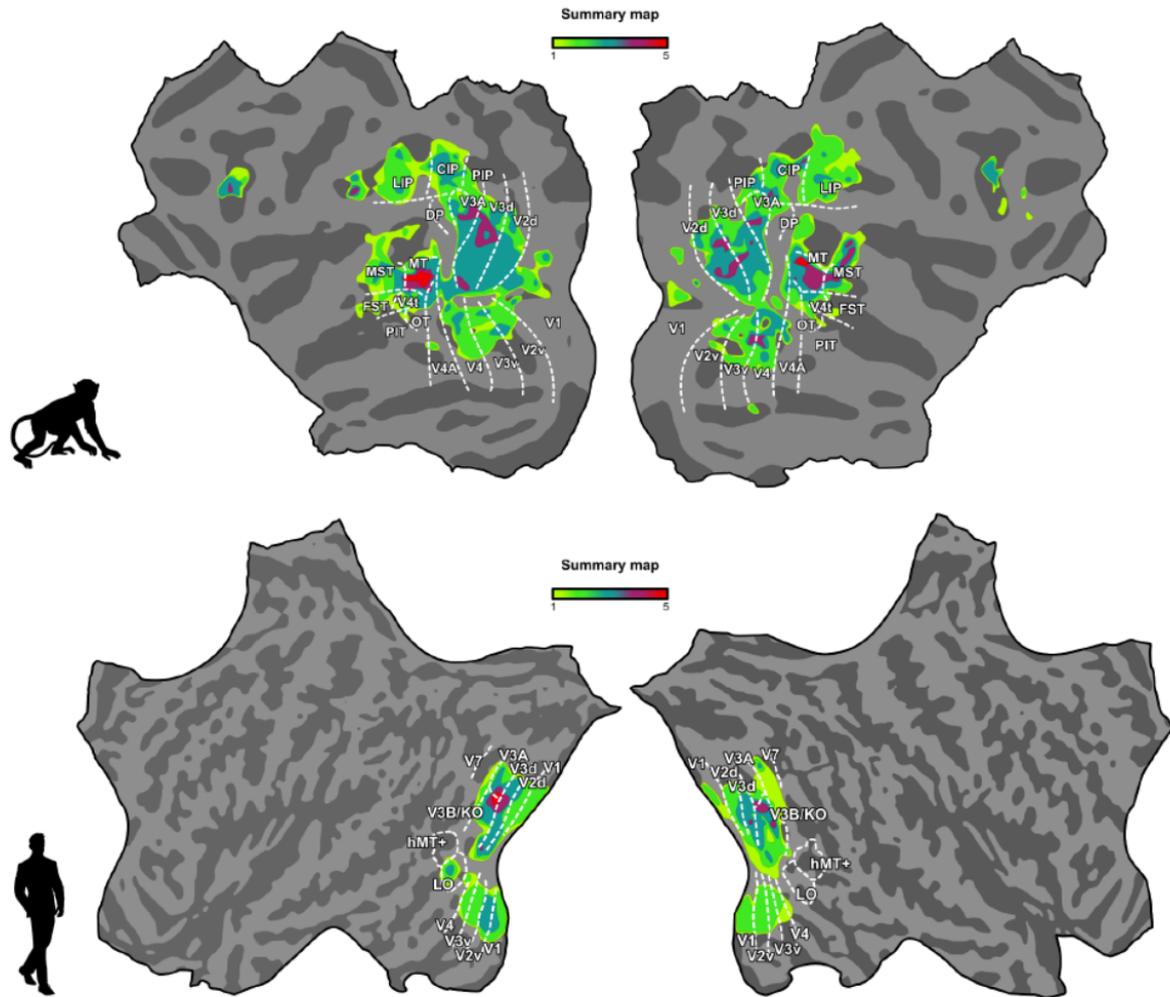


図2 サルと人間の立体視手掛かり統合部位の違い。緑から赤に沿って、より手掛かり統合への寄与度が高くなることを示す。

究と全く同じ実験パラダイム、視覚刺激、解析手法を用いてサルのfMRI脳活動を計測し、人間の脳活動との比較・検討を行った。ここで、人間の計測はNICTの研究者(番 浩志)が担当したが、サルの計測については、ベルギー KU Leuven 大学及びハーバード大学が実施した(番はこの計測に関与せず)。その後、番が開発した機械学習法に基づいたデータ解析のパイプラインを適用することで、人間とサルのそれぞれの脳はどこでどのように3D手掛かりが融合されているのか、あるいは融合されていないのか、を調査した。

その結果、従来から報告されている電気生理学な研究結果と同じく、fMRI脳イメージング計測においても、サルの場合はMT野で奥行き手掛かりが統合されていることが明らかになった[6]。すなわち、人間とサルの脳活動の違いは、脳の立体視情報処理機構の進化(あるいは退化)を反映したものであった。この結果は、脳の研究で得られた知見を応用する際に、従来の動物実験で得られた知見も重要であるが、やはり人間そのものをしっかりと計測することが必要であることを示している(決して従来の電気生理学的な研究成果を否

定するわけではない)。一方で、人間(V3B/KO野)とサル(MT野)とで責任領域の違いはあるものの、種の違いを超えて立体視の手掛かりが同じ様式で統合されていることが明らかになったのは特筆すべき発見で、当該分野の重要な知見となるだろう[6]。

今回発見された人間に特有な立体視情報処理経路の特性をうまく利用することで、より人間にやさしい3D映像呈示技術などの開発が可能となるかもしれない。また、V3B/KO野に着目し、なぜ人間ではその領域が発達する必要があったのかを調べることで、立体視情報処理経路の進化の謎に迫ることができるかもしれない。

3 3D 視覚情報処理に「文脈」が及ぼす影響を調べる fMRI 研究

なじみのある(よく知っている、ごく最近接触したことがある、など)物体に対しては、その物体の検出や知覚が促進されることが示されている。一方、他の研究では、なじみのある物体が他の物体の知覚を抑制す

る(邪魔をする)ことも報告されている。このように視対象の処理はその対象に関する知識などの「文脈」によって大きく影響を受けることが知られている。では、3Dの知覚は文脈によってどのような影響を受けるのだろうか。その効果を調べるfMRI実験を実施した。研究手続きや解析手法は研究代表者らがこれまでに実施したfMRI研究[7][8]を踏襲した。また、文脈として、立体構造として可能であるか(錯視などの研究でも利用され、エッシャーの絵やペンローズの三角形などに代表される、いわゆる可能・不可能図形)、立体構造がよく知っているものであるか(顔と不規則な凹凸構造)、の2つを利用した視覚刺激を利用した。なお、本研究は香港大学心理学部の研究者らとの共同で実施した。

両眼視差は、左右の網膜に映る像のズレを意味し、最も重要な奥行き手掛かりのひとつであり、現実の3D視覚世界で様々なタスクをこなす際に重要な手掛かりである。実際、視差情報は、把持、カモフラージュの解除、表面反射率の推定にとって重要であることが示されているが[9]-[11]、ヒト心理学研究では両眼視差のみから奥行き間隔を判断することの不正確さも指摘されている[12][13]。また、両眼視差情報の脳内処理メカニズムを調べた研究では、背側及び腹側皮質の階層的な複数の視覚野によって両眼視差から奥行きが再構築されることを示した研究が多く報告されている[14]-[17]が、こうした研究の知見は、日常世界で一般的に目にするものとはほど遠い非常に単純化したパターン(ランダム・ドット・ステレオグラムなど)の観察とテストを通じて得られたものであった。

電気生理学的な計測手法を用いた研究では、細かな視差を弁別するタスクと、ノイズの中から荒い奥行きを検出するタスクとで担当する視覚領域が異なることが示されてきた。人間においても、背側視覚経路と腹側視覚経路のそれぞれに沿って、ノイズからターゲット刺激の視差を粗く検出する反応と、細かい奥行き情報を検出する反応との解離が報告されている。ここで、これらの研究では上に述べたとおり、単純化した刺激しか用いられてこなかったため、奥行き検出タスクの違いによって担当する脳の部位が異なるのは、刺激が単純過ぎること、あるいは極端過ぎることにより見かけ上得られたアーチファクトである可能性も拭いきれない。もし、より複雑あるいはリアルな刺激を用いた場合、脳活動はそれほど単純に分離できるようなものではないのではないだろうか。いくつかの先行研究では、3Dの凸形状を用いて、その識別には、おそらく輪郭の分割と曲率の詳細を識別する必要から、腹側及び背側の視覚野(V7、POIPS)両方の活動が必要とされることを示した。さらに、V3とV3Aは単純化した幾何刺激を用いた先行研究ではあまり顕著に現れない領域

であったが、3Dの傾きと曲率の処理に重要な役割を果たすことも明らかになった[7]。これらの結果は、従来の研究では3D知覚に対する高次の脳領域間の相互作用の重要性が見過ごされてきたことを示唆している。このような相互作用が心理行動的な指標に反映される可能性を考えると、これは見過ごせない研究テーマである(例えば、上に述べたとおり、奥行きの知覚感度は、その物体がなんであるかを知っていることで影響を受ける)。このことを調べる1つの方法は、立体刺激に対する神経応答が、物体の形状情報(実世界でありえる形状か、不可能な形状なのか)の変化によってどのように影響を受けるか、その効果を定量的に計測することであろう。そこで我々は、3D物体情報の文脈を付与する—すなわち、物理的妥当性を操作する(いわゆる可能・不可能図形)、あるいは3D物体情報に知識の影響を組み込む(顔の形状とランダムな凹凸形状との比較など)ことによって作り出した複数の3D形状を視覚刺激として用い、それらの刺激に対するfMRI脳活動を計測することで上の疑問に答える研究を実施した。

ここで、この仮説は突拍子もないものではないことを強調したい。実際、多くの視覚特徴の知覚や検出が物体の文脈に影響されることが示されている。例えば、人種は顔刺激の輝度判定を変調させ、物体の自然な色(バナナは黄色、など)はその物体の絶対的な知覚色に影響を与える[18]。さらにMurrayらの2002年の報告によると、ヒト第一次視覚野の応答は、高次物体処理領域の活動によって調節されることを示している[19]。

fMRI計測実験の結果、物体の文脈(可能・不可能図形、すなわち、物理的なもつともらしさ)が、両眼視差で定義された奥行きの弁別感度や脳活動に影響を与えることが示された[20][21]。具体的には、ノイズに埋もれたターゲットの奥行き位置を判断する課題(SNR課題)と、コヒーレント刺激間の微細な視差を識別する課題(特徴課題)の両方において、ありえない物体(特にありえない三角形刺激)や意味のない凹凸形状に対する検出閾値が低かった(すなわち、なじみのない図形に対する奥行き判断成績の方が優れていた)。さらに、このような奥行き弁別課題を遂行中の脳活動に文脈がどのように反映されるかを調べた結果、V1、V2、V3、V3A、V3B、V7とLOCといった多くの視覚野において、もっともらしい三角形刺激とありえない三角形刺激に対する反応パターンが異なることが明らかになった。すなわち、これら複数の脳領域に文脈の影響が反映されていることが示された。また、顔形状の文脈は、紡錘状回の活動に反映されていることが明らかになった。紡錘状回は顔に選択的に応答する領域であることが示されていたが、今回の研究結果から、その領域の応答には立体情報も含有していることが示

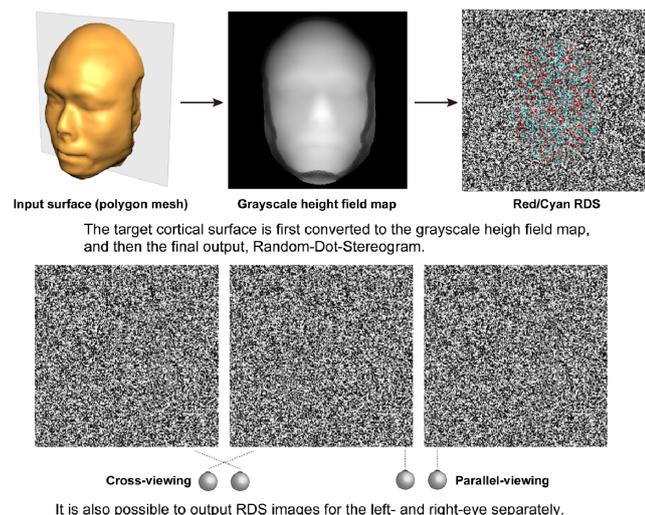


図3 文脈つき(上の場合、顔の形状)ランダム・ドット・ステレオグラム刺激の例

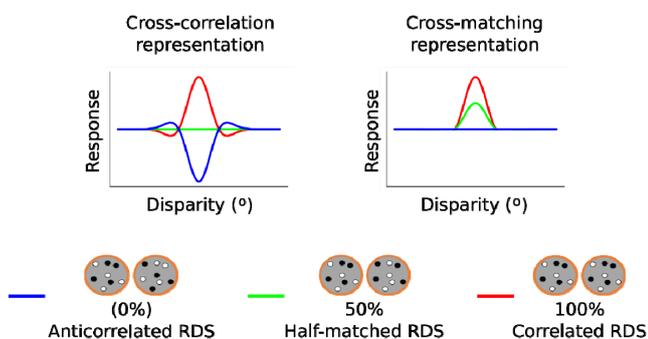


図4 視覚刺激の操作例(下)とその刺激に対する神経応答の2つのモデル(上左右パネル)

唆された。

これらの結果を説明する1つの仮説として、なじみのある(あるいは知識として知っている)立体形状にはトップダウン処理が多く関与するため、細かな処理がスキップされてしまい、その結果弁別成績が悪くなるのに対し、新規形状はボトムアップに処理する以外に全体を知覚する手段がないため、細かな処理が適用された結果、弁別課題の成績が優れたのではないかと予想している。あるいは、新規形状に対しては暗黙の注意の影響があったのかもしれない。いずれにしても今回の結果は、観察者に奥行き形状を詳細に把握してもらいたい場合には、その形状をなじみのないものにした方がよいと結論づけられる。将来的に何らかの製品のデザインに応用できるかもしれない。

4 両眼視差情報を処理するfMRI脳活動と計算モデルとの比較実証研究

立体視の研究で最も一般的に利用される、白黒ドットから構成されるランダム・ドット・ステレオグラム(RDS; Random Dot Stereogram)刺激を用いてRDSに

対するfMRI脳活動計測実験を実施した。ここで、左右眼それぞれのRDS刺激に含まれるドットの白黒コントラストをパラメトリックに反転させることで、左右眼像の相関を操作し、その相関値の変化が脳活動に及ぼす変化を計測した。さらに、両眼への入力像の「相関」から立体を検出する計算モデルと両眼像の「マッチング」から立体を検出する計算モデルの2つのモデルを構築し、それら2つの重み付け線形和で各視覚野のfMRI脳活動パターンをどの程度説明できるのかを検討した。なお、本研究は大阪大学大学院・生命機能研究科の研究者らと共同で実施した。

本研究成果は、画像のマッチングなどを行う際に、対応点の計算に齟齬が生じる可能性を低減する新しい画像処理システムに応用できるかもしれない。あるいは、本研究で見つけた2つの処理モデルは、CiNet Brainを支えるネットワーク構造として利用できるかもしれない。

5 映像酔いを防ぐデザイン

最近、インターネット上の動画投稿サイトなどが若者を中心に多くの人気を集め、長らくTVの独占状態が続いていた映像視聴機器市場がPCやスマホへと移行しつつある。こうした新しい映像視聴サイトの隆盛にとともに、映像酔いや3D酔いの問題がとりざたされることが多くなった。人間は映像視聴中に、視野が不規則に揺れると、不快感を訴える。従来の研究では、この不快感を低減させるために映像の揺れ(あるいは揺れの知覚)をどう防ぐかに関する研究が多く実施されてきた。しかしながら、視界の位置や視界デザインの影響はほとんど調査されてこなかった。

我々は、いくつかの予備実験を経て、視野の一部が遮蔽されていたり、分断されていたりする場合(のぞき窓から映像を視聴する、乗り物から外の風景をみる、など)に不快感が増幅することを突き止め、その不快感を低減させる手掛かりをつかむための研究を進めた。その成果は、酔いにくい映像呈示機器への開発へとつながるかもしれない。

謝辞

本研究は科学研究費補助金(17H04790、21K18572、21H00968)の補助を受けて実施された。今回紹介した共同研究の機会を与えていただいた共同研究者のみなさまに感謝を申し上げます。また、研究実施にあたり、実験参加者の募集からデータ取得にいたるまで、研究全般を支えていただいた村上奈緒美氏、林美保氏に感謝を申し上げます。

【参考文献】

- 1 Ban, H., Preston, T.J., Meeson, A., and Welchman, A.E., "The integration of motion and disparity cues to depth in the dorsal visual cortexm," Nature Neuroscience, vol.15, no.4, pp.636-643, 2012.
- 2 Dekker, T., Ban, H., van der Velde, B., Sereno, M.I., Welchman, A.E., and Narandini, M., "Late development of cue integration is linked to sensory fusion in cortex," Current Biology, vol.25, no.21, pp.2856-2861, 2015.
- 3 Dovencioğlu, D., Ban, H., Schofield, A.J., and Welchman, A.E., "Perceptual Integration for Qualitatively Different 3-D Cues in the Human Brain". Journal of Cognitive Neuroscience, vol.25, no.9, pp.1527-1541, 2013.
- 4 Murphy, A., Ban, H., and Welchman, A.E., "Integration of texture and disparity cues to surface slant in dorsal visual cortex," Journal of Neurophysiology, vol.110, Issue 1, pp.190-203, 2013.
- 5 Nadler, J. W., Barbash, D., Kim, H. R., Shimpi, S., Angelaki, D. E., and DeAngelis, G. C., "Joint representation of depth from motion parallax and binocular disparity cues in macaque area MT," Journal of Neuroscience, vol.33, no.35, pp.14061-14074, 2013.
- 6 Armendariz, M., Ban, H., Welchman, A. E., and Vanduffel, W., "Areal differences in depth cue integration between monkey and human," PLoS biology, vol.17, no.3, e2006405, 2019.
- 7 Ban, H. and Welchman, A.E. "fMRI Analysis-by-Synthesis Reveals a Dorsal Hierarchy That Extracts Surface Slant," Journal of Neuroscience. vol.35, no.27, pp.9823-9835, 2015.
- 8 Goncalves, N. R., Ban, H., Sánchez-Panchuelo, R. M., Francis, S. T., Schluppeck, D., and Welchman, A. E., "7 tesla fMRI reveals systematic functional organization for binocular disparity in dorsal visual cortex," Journal of Neuroscience, vol.35, no.7, pp.3056-3072, 2015.
- 9 Watt, S. J. and Bradshaw, M. F. "Binocular information in the control of prehensile movements in multiple-object scenes," Spatial Vision, vol.15, pp.141-155, 2002.
- 10 Julesz, B., "Foundations of cyclopean perception," Cambridge, MA: MIT Press, 1971.
- 11 Blake, A. and Bühlhoff, H. "Does the brain know the physics of specular reflection?," Nature, vol.343, pp.165-168, 1990.
- 12 Norman, J. F., Todd, J. T., and Orban, G. A., "Perception of three-dimensional shape from specular highlights, deformations of shading, and other types of visual information," Psychological Science, vol.15, no.8, pp.565-570, 2004.
- 13 Tittle, J. S., Todd, J. T., Perotti, V. J., and Norman, J. F. "Systematic distortion of perceived three-dimensional structure from motion and binocular stereopsis," Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, vol. 21, no.3, pp.663-678, 1995.
- 14 Welchman, A. E., "The human brain in depth: How we see in 3D," Annual Review of Vision Science, vol.2, pp.345-376, 2016.
- 15 Preston, T. J., Li, S., Kourtzi, Z., and Welchman, A. E., "Multivoxel pattern selectivity for perceptually relevant binocular disparities in the human brain," Journal of Neuroscience, vol.28, no.44, pp.11315-11327, 2008.
- 16 Uka, T., Tanabe, S., Watanabe, M., and Fujita, I., "Neural correlates of fine depth discrimination in monkey inferior temporal cortex," Journal of Neuroscience, vol.25, pp.10796-10802, 2005.
- 17 Tsao, D. Y., Vanduffel, W., Sasaki, Y., Fize, D., Knutsen, T. A., Mandeville, J. B., et al. "Stereopsis activates V3A and caudal intraparietal areas in macaques and humans," Neuron, vol.39, Issue 3, pp.555-568, 2003.
- 18 Hansen, T., Olkkonen, M., Walter, S., Gegenfurtner, K. R. "Memory modulates color appearance," Nature Neuroscience, vol.9, no.11, pp.1367-1368, 2006.
- 19 Murray, S. O., Kersten, D., Olshausen, B. A., Schrater, P., and Woods, D. L., "Shape perception reduces activity in human primary visual cortex," Proceedings of the National Academy of Sciences, U.S.A., vol.99, pp.15164-15169, 2002.
- 20 Wong, N. H., Ban, H., and Chang, D. H. "Human depth sensitivity is affected by object plausibility," Journal of Cognitive Neuroscience, vol.32, no.2, pp.338-352, 2020.
- 21 Chou, I. W., Ban, H., and Chang, D. H., "Modulations of depth responses in the human brain by object context: Does biological relevance matter?," eNeuro, vol.8, no.4, 2021.

番 浩志 (ばん ひろし)

未来 ICT 研究所
 脳情報通信融合研究センター
 脳情報通信融合研究室
 主任研究員
 博士 (人間・環境学)
 視覚情報処理、心理学、神経科学
【受賞歴】
 2020 年 HKU Social Sciences Outstanding Research Output Award (Basic Research) (香港)
 2018 年 Poster Presentation Award, Social and Affective Neuroscience Society (US)
 2017 年 Best Presentation Award, ヒト脳機能イメージング研究会

相原 孝次 (あいはら たかつぐ)

未来 ICT 研究所
 脳情報通信融合研究センター
 脳情報通信融合研究室
 研究員
 博士 (身体教育学)
 視覚情報処理、心理学、神経科学

Bayu Gautama Wundari (ウナダリ バユ ゴータマ)

未来 ICT 研究所
 脳情報通信融合研究センター
 脳情報通信融合研究室
 研究員
 博士 (工学)
 視覚情報処理、心理学、神経科学