

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13373

研究課題名（和文）滑動感：ヒトの運動知覚に対する超高速情報の寄与

研究課題名（英文）The effect of high-speed information on human motion perception

研究代表者

中嶋 豊（Nakajima, Yutaka）

新潟大学・人文社会科学系・准教授

研究者番号：90513036

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、最大5000 Hzのリフレッシュレートを設定可能な高速プロジェクタを活用し、超高速情報により提示される運動知覚を滑動感と定義することで、こうした動きの知覚特性について検討した。その結果1)時空間密度が動きの連続性の知覚に与える影響については、空間密度の寄与が大きい可能性、2)時間密度（Duty比とリフレッシュレート）が知覚印象について与える影響については、本研究で用いた刺激の範囲では時間密度の違いの影響は小さい可能性、また、3)運動刺激とオノマトペの印象評定の相関から、運動情報だけではなくコンテンツ（刺激パターン）の影響を受けることを示唆する結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の方法におけるコマ打ち操作では、必然的に情報の時空間密度が低下する。そのため特に高速移動映像は離散的に表示せざるを得ず、動きの滑らかさについての詳細な検討が困難であった。本研究は、高速プロジェクタにより従来を遥かに超えた連続的な高速移動映像を提示することで、動きの滑らかさの知覚における空間密度の寄与を示した点に意義がある。また、本研究で得られた成果は、今後のディスプレイ開発におけるリフレッシュレート設計に対して寄与するだけでなく、映像コンテンツを作成する際の参考ともなり得ることから、ハード、ソフトの両者において映像提示技術へ寄与する点において社会的意義のあるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this project, we investigated the perception of motion presented with high temporal resolution using a high-speed projector with a refresh rate of up to 5000 Hz. The results showed that: 1) as for the effect of spatiotemporal resolution of movie image, the spatial resolution might contribute more than the temporal resolution for the perception of continuous motion; 2) The difference of temporal information (duty ratio and refresh rate) might have a less effect on the perceived impression for motion smoothness; and 3) The correlation between the impression rating of motion stimuli and onomatopoeia might be dependent on not only the motion information but also on the stimulus content (stimulus pattern).

研究分野：実験心理学

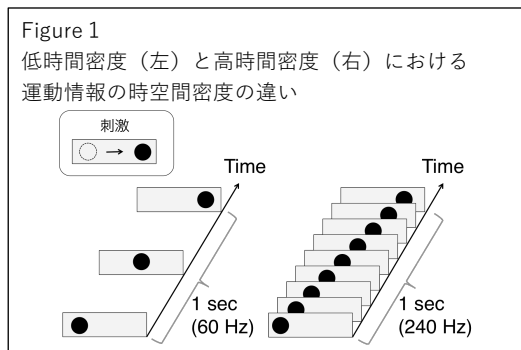
キーワード：運動知覚 高速情報処理 高速プロジェクタ 動きの滑らかさ

1. 研究開始当初の背景

映像提示技術の発展は Virtual Reality (VR) 技術の発展を促し、VR 技術はゲーム、産業場面、アミューズメント用途に進出するに至った。特に 2010 年頃より、主にゲーム用途 (3D 立体視による用途も含む) として、従来の 60 Hz よりも 1 秒あたりのコマ数の多い、高フレームレートの動画提示が可能なディスプレイが販売されるようになった。そのため、高時間解像度映像 (高速時間情報提示) に対するヒト視覚系の応答特性に関する研究が期待されている状況である (cf. 栗田, 2012)。

これまでヒト視覚系の時間情報に対する処理限界は臨界融合周波数 (Critical Fusion Frequency: CFF, 約 60 Hz) として知られていた。一方、CFF 以上の高速情報 (超高速情報) を持つ明滅刺激に対しても応答が見られることが報告されている (Bauer et al., 2009; Herrmann, 2001; Lyskov et al., 1998; Williams et al., 2004)。この点について、研究代表者も最大フレームレート 5000 Hz を持つ高速プロジェクタを用いることで超高速情報がヒトの知覚・認知に影響を及ぼすことを明らかとしている (Nakajima & Sakaguchi, 2015, 中嶋・阪口, 2016, Ishikawa et al., 2016, 平成 25 年度採択若手研究 B 「超高速情報に対するヒト視覚系の処理限界に関する心理物理学的検討」の成果)。

これらの先行研究は運動を伴わない条件下での応答特性を示したものであった。特に高フレームレートによって作成される動画は、時間的にも空間的にも情報密度が高く、現実世界の連続的な動きをほぼ再現している。本研究では時間、空間ともに密度の高い動きを高密運動と定義した (Figure 1)。上述のようなヒト視覚系の超高速情報に対する応答特性を考慮すると、時間と空間が同時に変化する動きの知覚についても、超高速情報の寄与があり、従来方式で提示された運動 (低密運動) と区別されて知覚される可能性は高い。

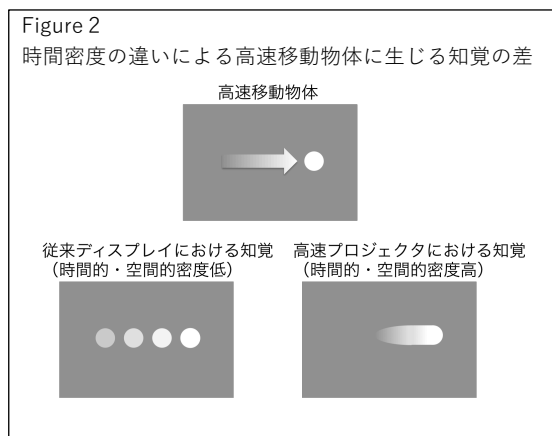


その例の一つとして、研究代表者は事前観察において、高密運動の見えに対する擬態語として「ぬるぬる」が用いられることを見出した。一般的に「ぬるぬる」は、何かに張り付く様な動きに対する擬態語であり、電気自動車のように「スーっと動く」のような滑らかさとは異なる。こうした表現の違いは「滑らかに動く」という知覚が、単に情報の時間密度の高さのみに依存しないことを示唆する。本研究では、こうした高密運動によって生じる運動の質的な知覚を「滑動感 (かつどうかん)」と名付けることとした。

本研究課題の核心をなす学問的問いは、超高速情報によって実現される高密運動をヒトが従来方式で提示される低密運動と弁別が可能であるか否か、また、高密運動の間においても知覚・認知的・質的な違いが存在する否か、を検討することであった。

2. 研究の目的

本研究では、高速プロジェクタを活用し、超高速情報の観点から動きの知覚・認知特性について検討することを特徴としている。時間密度と運動知覚の関係について、低い時間密度の運動刺激に対する速度の過大評価が報告されているが (Castet, 1994; Giaschi, & Anstis, 1989), こうした運動刺激では同時に空間密度も下がるため、現実とは大きく異なる離散的な仮現運動 (Figure 2 下段左) が提示される。このことは、動きの情報密度を操作すると仮現運動・連続運動といった動きの連続性が同時に変化するため、従来方法では、動きの情報密度を研究テーマとして扱うこと自体が不可能であるという限界があった。一方、この限界は、超高速情報を提示できる高速プロジェクタにより全て解決できる (Figure 2 下段右)。本研究の目的は、高速プロジェクタにより実現した高い時空間的連続性を持つ高密運動を観察する際に生じる、滑動感の知覚に対する超高速情報の寄与を明らかとすることであった。



3. 研究の方法

研究 1: 高密運動・従来運動の知覚の差異を決定付ける要因の特定

研究 1 (中嶋・宮下 2019; 中嶋, 2020) では、様々な時空間密度を持つ運動刺激を設定し、そ

これらの刺激に対して生じる動きの滑らかさ知覚について検討した。刺激としては円軌道上を移動（回転）する円状刺激を用いた。高速プロジェクタのリフレッシュレートを2160 Hzに設定し、刺激の移動（回転）速度は3 revolution/second (rps)とした。この時、円軌道を一周するための提示コマ数は最大で720コマであった。時空間密度を操作するにあたり、物体が運動する軌道径を固定し刺激サイズを変化させる条件（刺激サイズ4条件）、また刺激サイズを固定し物体が運動する軌道径を変化させる条件（軌道4条件）を設定した。映像1コマあたりの移動（回転）角度（degree/frame: dpf）は最小0.5 dpf（720コマ/周）、最大30 dpf（24コマ/周）であり、刺激サイズ、軌道条件ともに11条件ずつ設定した。なお、この操作はアニメーションにおけるnコマ打ち（同じ静止画をn回連続提示する技法）を元にしており、30 dpfの場合、60コマ打ちに相当する（Figure 3）。

実験は恒常法により実施し、1データポイントにつき20試行実施した。参加者の課題は、提示された運動が連続的な運動として知覚されたか、もしくは離散的な運動として知覚されたかを判断し回答することであった（2肢強制選択法）。回答結果から心理測定関数を求め、連続的に知覚される条件と離散的に知覚される移動角度条件の弁別閾（回答率が0.5となる条件）を推定した。以上の手続きにより、フレームレート（時間密度）と空間密度が運動の滑らかさの知覚に与える影響を検討した。

研究2: 滑動感の違いを生み出す時空間情報の解明

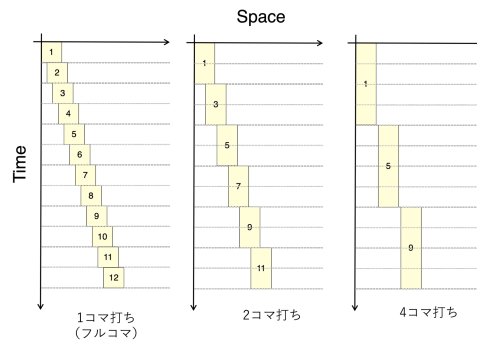
研究2では運動刺激を直接的に比較することで、動きが最も滑らかに知覚できる条件について検討した。また、「ぬるぬる」をはじめとした、滑らかな動きを表現するオノマトペの印象評定と運動刺激に対する印象評定の相関から、「ぬるぬる」と知覚される運動情報の同定を試みた。

研究2a（中嶋・入山, 2022）では刺激は研究1と同様の円状刺激が円軌道を移動する映像を用いた。高速プロジェクタのリフレッシュレートを720 Hzに設定し、研究1と同様のコマ打ちの方法により、120コマ相当の運動刺激を作成した（6コマ打ちに相当）。この時、1コマは同一の6枚の静止画から構成されている。この6枚全てを提示すればDuty比（画像1フレームあたりの提示時間比率：短いほど一瞬のみの提示となる）は100%（6/6）となり、1枚のみを提示すればDuty比は17%（1/6）となる。この方法により、Duty比を100%、83%、67%、50%、33%、17%の6段階で設定した（Figure 4）。

実験では異なるDuty比を持つ刺激を組み合わせ合計15通り（ $6C_2$ ）提示した。参加者の課題は、シェッフェの一対比較（中谷の変法）により、15の刺激対それぞれに対して、どちらの刺激の方がより滑らかに知覚されるかを7件法で判断することであった。さらに上記のDuty比を持つ運動刺激を観察しながら11の質問項目に回答することで印象評価を行なった（「快適-不快」「爽やかな-うっとうしい」「自然な-人工的な」「親密な-疎遠な」「鋭い-鈍い」「静的な-動的な」「滑る-粘つく」「なめらかな-粗い」「重厚な-軽快な」「速い-遅い」「やわらかい-かたい」）。同様に「ぬるぬる」「すーっと」「かくかく」という動きの滑らかさを表すオノマトペについても同一の質問項目を用いて印象評価を行なった。

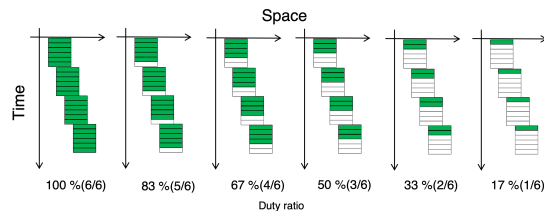
研究2b（中嶋・入山, 2023）では、一対比較、印象評価の手続きは同じだが、提示する刺激を変更して実験を実施した。運動刺激として、画面中央の注視点の上下に配置された正方形が、左右に往復運動する刺激を用いた。往復の位相は正反対とし正方形は直線軌道を移動した。高速プロジェクタのリフレッシュレートを960 Hzに設定し、研究1、研究2aと同様のコマ打ちの方法により、60コマ相当、80コマ相当、120コマ相当の運動刺激を作成した（それぞれ、16コマ打ち、12コマ打ち、8コマ打ちに相当、フレームレート条件）。研究2aと同様にDuty比を設定し、60コマ相当では100、75、63、50、38、25、13%の7段階、80コマ相当では100、75、50、25、8%の5段階、120コマ相当では100、88、75、63、50、38、25、13%の8段階を設定した。

Figure 3
刺激操作（コマ打ち）の概念図。



注)横軸が空間、縦軸が時間を示す、右方向へ運動する物体の時空間プロット。コマ打ち数（連続提示されるコマ数）が大きくなるにつれて、コマ間の移動距離（実験では移動角度）が大きくなり、空間密度と時間密度が低下する。

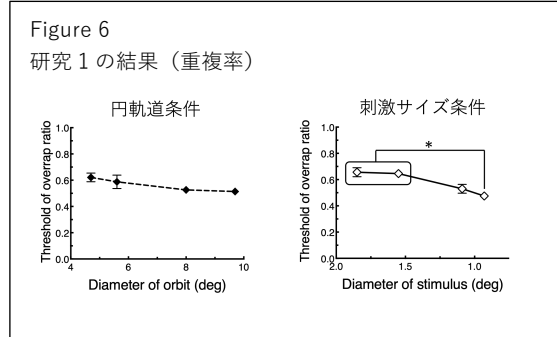
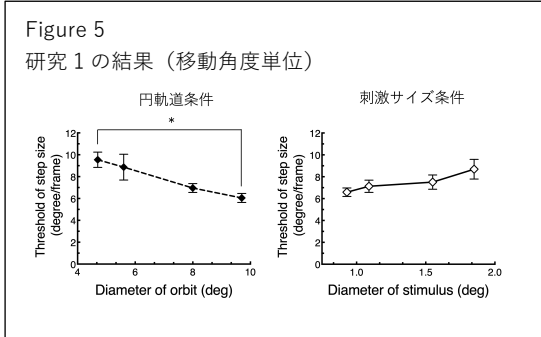
Figure 4
Duty 比操作の概念図。



注) 6コマ打ち提示（一番左：Duty比100%）のコマのオンオフの比率を操作することで、Duty比を操作した。なお、設定できるDuty比の種類はコマ打ち数に依存する。

4. 研究成果

研究 1 について、物体の運動が連続的に知覚される移動角度の閾値を参加者ごと、条件ごとに算出し平均値を求めた。その結果、条件全体を通じて 6 dpf から 10 dpf 程度であることが示された (Figure 5)。この数値を時間周波数に換算すると、180 Hz (6 dpf) から 108 Hz (10 dpf) であり、比較的大きな幅があることになる。一方、移動角度、軌道径、刺激直径から、連続提示される 2 コマ間で円状刺激が重複して提示される面積を、円状刺激の面積に対する比率であらわした重複率を算出すると、全ての条件において 0.6 ± 0.1 の範囲となった (Figure 6)。研究 1 では、動きの連続性の判断には時間情報の密度 (時間周波数) とともに空間情報の密度 (コマ間の刺激の重複率) が重要であることを示唆する結果を得た。



研究 2a の一対比較について、各刺激対に対する反応を参加者ごとに集計し、各 Duty 比条件において、知覚される動きの滑らかさについての平均評価値を算出した。その結果、Duty 比 17% 条件の平均評価値が大きく、Duty 比 17% 条件は他の条件との差分が大きい一方、その他の条件間の差分は小さい傾向が見られた。分散分析では Duty 比条件の主効果は有意であったものの、有意差が見られたのは 17% 条件と 50% 条件との間のみであった。このことは、Duty 比に違いがあるにもかかわらず、それぞれはほぼ同等に知覚されることを示唆する。また研究 2a の印象評定の結果についても、条件ごと参加者ごとに集計し平均値を求めた。その結果、運動刺激に対する印象は Duty 比条件間で類似していた。オノマトペ 3 条件については条件ごとに違いがみられた (Figure 7)。これら評定の結果から各 Duty 比条件と各オノマトペの対応について、相関係数を求めたところ、「ぬるぬる」は全ての Duty 比条件との間に有意な正の相関が見られ、「かくかく」「すーっと」では 50% 条件との間に、それぞれ有意な負の相関、有意な正の相関が見られた (Table 1)。

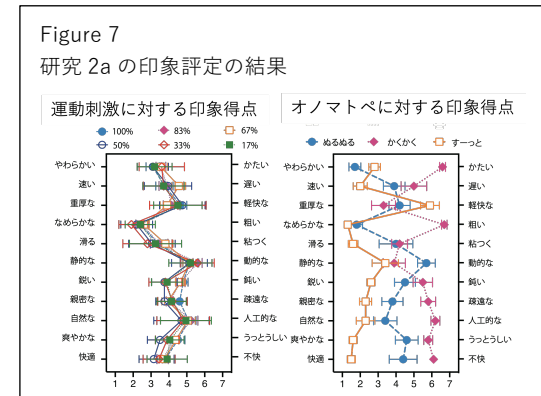


Table 1: 運動刺激とオノマトペの印象評定の相関 (研究 2a)

Duty比	オノマトペ		
	ぬるぬる	かくかく	すーっと
100%	0.74	-0.41	0.44
83%	0.68	-0.36	0.36
67%	0.70	-0.35	0.20
50%	0.63	-0.61	0.66
33%	0.62	-0.44	0.56
17%	0.71	-0.45	0.49

p < .01 p < .05

研究 2b についても、研究 2a と同様の分析手法により結果を集計した。一対比較の結果、各フレームレート条件における Duty 比の違いには有意な差が認められず、またフレームレート条件間においても一貫した傾向が見られなかった。印象評定の結果は、研究 2a と類似していたが、各運動刺激と各オノマトペとの相関係数を求めると、主にフレームレート条件ごとに傾向が異なり、60 コマ相当と 120 コマ相当では主に「すーっと」との間に、80 コマ相当では主に「ぬるぬる」との間に有意な正の相関が見られた (Table 2)。

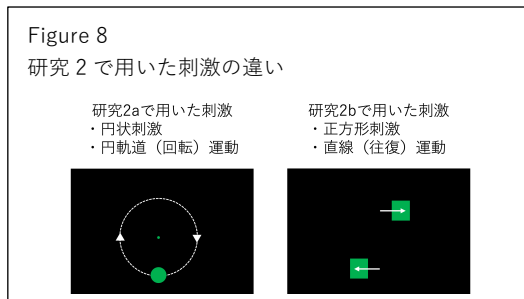
Table 2: 運動刺激とオノマトペの印象評定の相関 (研究 2b)

	60 p-fps			80 p-fps			120 p-fps		
	ぬるぬる	かくかく	すーっと	ぬるぬる	かくかく	すーっと	ぬるぬる	かくかく	すーっと
100%	.42	-.45	.73	.66	-.34	.53	.56	-.65	.75
88%	-	-	-	-	-	.56	.56	-.59	.83
75%	.51	-.36	.6	.24	.18	.03	.62	-.51	.69
63%	.53	-.58	.76	.72	-.47	.63	.49	-.54	.69
50%	.53	-.27	.42	.52	-.16	.42	.48	-.38	.55
38%	.48	-.47	.71	.62	-.53	.54	.29	-.25	.5
25%	.67	-.6	.74	-	-	-	.27	-.38	.57
13%	.58	-.46	.7	-	-	-	.67	-.47	.66
8%	-	-	-	-	-	-	-	-	-

** p < .01 * p < .05

注)p-fps (pseudo-fps) は、コマ打ちによって作成した動画像を、1秒あたりの静止画枚数で示した単位 (擬似フレームレート, N fps 相当の動画の意)。

研究2の結果からは、本研究で設定した Duty 比においては、その知覚的差分の一貫した傾向を見出すことは難しいことが示された。この点について、全ての刺激比較対において、回答が0（二つの刺激に差がない）と回答した参加者が数名みられたことから、一対比較の手法では、今回の刺激間の違いを判断することが困難であった可能性が示された。また、運動刺激とオノマトペとの印象評定の相関は見られたものの、研究2aと2bではその傾向が異なった。その要因として、用いた刺激の違いが挙げられる（Figure 8）。2aで用いた刺激は、円状刺激が円軌道を運動し、2bで用いた刺激は正方形が直線的に往復運動をするものである。これらの刺激の特徴は曲線や角・直線に対する感覚間協応（ブーバ・キキ効果, Ramachandran & Anstis, 1990）とも対応がとれる。つまり、研究2aは曲線的な情報であったため、「ぬるぬる」との相関、2bは角・直線的な情報であったため、滑らかな動きの中でも「すーっと」との相関が見られたものと解釈できる。以上の結果は、動きの滑らかさの判断には、運動における時空間情報だけではなく、コンテンツ（パターン）の寄与があることも示唆する。



2aで用いた刺激は、円状刺激が円軌道を運動し、2bで用いた刺激は正方形が直線的に往復運動をするものである。これらの刺激の特徴は曲線や角・直線に対する感覚間協応（ブーバ・キキ効果, Ramachandran & Anstis, 1990）とも対応がとれる。つまり、研究2aは曲線的な情報であったため、「ぬるぬる」との相関、2bは角・直線的な情報であったため、滑らかな動きの中でも「すーっと」との相関が見られたものと解釈できる。以上の結果は、動きの滑らかさの判断には、運動における時空間情報だけではなく、コンテンツ（パターン）の寄与があることも示唆する。

引用文献

- Bauer, F., Cheadle, S. W., Parton, A., Muller, H. J., & Usher, M. (2009). Gamma flicker triggers attentional selection without awareness. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(5), 1666-1671.
- Castet, E. (1994). Effect of the ISI on the visible persistence of a stimulus in apparent motion. *Vision Research*, 34(16), 2103-2114.
- Giaschi, D., & Anstis, S. (1989). The less you see it, the faster it moves: shortening the "on-time" speeds up apparent motion. *Vision Research*, 29(3), 335-347.
- Herrmann, C. S. (2001). Human EEG responses to 1-100 Hz flicker: resonance phenomena in visual cortex and their potential correlation to cognitive phenomena. *Experimental Brain Research*, 137(3-4), 346-353.
- Ishikawa, M., Ishii, I., Sakaguchi, Y., Shimojo, M., Shinoda, H., Yamamoto, H., Komuro, T., Oku, H., Nakajima, Y., & Watanabe, Y. (2016). Dynamic Information Space Based on High-Speed Sensor Technology. In T. Nishida (Ed.), *Human-Harmonized Information Technology* (Vol. 1, pp. 97-136). Springer Japan.
- 栗田泰市郎. (2012). ディスプレイの時間応答と動画表示画質. *VISION*, 24(4), 154-163.
- Lyskov, E., Ponomarev, V., Sandstrom, M., Mild, K. H., & Medvedev, S. (1998). Steady-state visual evoked potentials to computer monitor flicker. *International Journal of Psychophysiology*, 28(3), 285-290.
- 中嶋 豊 (2020) 映像における時空間的重なりが動きの連続性知覚に与える影響. 日本心理学会 第84回大会
- 中嶋 豊・入山 凧沙(2022). 動きの滑らかさ知覚と Duty 比の関係. 映像情報メディア学会技術報告, 46(13), 13-16.
- 中嶋豊・入山 凧沙(2023). 映像フレームレートと Duty 比が動きの滑らかさ知覚に与える影響. 映像情報メディア学会技術報告, 47(12), 33-36.
- 中嶋 豊・宮下優衣 (2019). 高時間解像度による映像提示が運動知覚に与える影響. 日本視覚学会 2019年冬季大会
- Nakajima, Y., & Sakaguchi, Y. (2015). Transient twinkle perception is induced by sequential presentation of stimuli that flicker at frequencies above the critical fusion frequency. *Attention, Perception & Psychophysics*, 77(8), 2711-2727.
- Nakajima, Y., & Sakaguchi, Y. (2016). Perceptual shrinkage of a one-way motion path with high-speed motion. *Scientific Reports*, 6, 30592.
- Williams, P. E., Mechler, F., Gordon, J., Shapley, R., & Hawken, M. J. (2004). Entrainment to video displays in primary visual cortex of macaque and humans. *Journal of Neuroscience*, 24(38), 8278-8288.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 中嶋豊, 入山凧沙	4. 巻 46
2. 論文標題 動きの滑らかさ知覚とDuty比の関係	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会技術報告	6. 最初と最後の頁 13-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 中嶋豊, 入山凧沙	4. 巻 47
2. 論文標題 映像フレームレートとDuty比が動きの滑らかさ知覚に及ぼす影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会技術報告	6. 最初と最後の頁 33-36
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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2件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中嶋豊
2. 発表標題 映像における時空間的重なりが動きの連続性知覚に与える影響
3. 学会等名 日本心理学会第84回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中嶋豊, 宮下優衣
2. 発表標題 高時間解像度による映像提示が運動知覚に与える影響
3. 学会等名 日本視覚学会2019年冬季大会
4. 発表年 2019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
---------	---------