

バーチャルリアリティを用いたリアルタイム通信における社会的知覚認知の 定量化

研究代表者

立花 良

東北大学大学院情報科学研究科 助教

1 背景と目的

近年バーチャルリアリティ（VR）はますます普及し、従来のデバイスや通信環境など技術開発研究の増加に加え、VR空間とアバターによるリアルタイムコミュニケーション研究が世界的に注目されている。お互いの顔・声・身体動作など円滑なコミュニケーションに不可欠な生体情報をリアルタイムで反映するVR空間とアバターを使用することで、利用者同士が物理的に離れた場所においても、1つの同じVR空間でコミュニケーションできるためである。また、利用者の生体情報の計測・制御・解析が3次元かつリアルタイムで可能なため、従来の2次元の実験環境よりも高い実験制御（Experimental Control）と生態学的妥当性（Ecological Validity）を達成でき、限定的な範囲で実施されていた基礎研究を大幅に改善できる重要性がある（Parsons, 2015）。これら利点から、基礎研究に加えて、コミュニケーションに疾患や困難を抱える発達障害や社交不安障害を持つ患者に対するVR遠隔医療や遠隔教育など応用研究も盛んであり、遠方地にいる患者の診察や行動療法が行えるVRコミュニケーション環境の実装準備が行われている。

こうしたVRコミュニケーション技術の普及に伴い、心理学においてもVRを活用した人間の知覚認知研究が注目され始め、「VRコミュニケーションは現実のコミュニケーションと何が異なるのか、現実の認知処理プロセスと比較しどのような差異があるのか、心身に害はないのか」という本質的課題が提起され、VR心理学研究での解明が国際的に推進されている。これまでの研究から、人間は社会的生物であり、他者とのコミュニケーションは、社会的知覚認知という情報処理プロセスによって可能になると解明されてきた。こうした社会的知覚認知には、社会性に必要な物理的情報（顔と表情、視線や身体動作方向）を高速に捉える人間の社会的知覚処理プロセス（social perception）と、その知覚情報から相手の意図や感情を円滑に理解するための社会的認知処理プロセス（social cognition）が存在すると判明しており、コミュニケーション能力の根本的解明の鍵とされる。現在準備が進むVRコミュニケーションツールやVR遠隔医療教育、それらの使用体制の構築では、この社会的知覚認知がどこまでVRで安全に再現・調整できるかが未実証であり、実装が大幅に遅れている社会問題がある。

こうしたVRにおける社会的知覚認知の心理学的および生理学的解明の課題に加えて、VR研究が増加する中、現在のVRによる実験環境（刺激呈示や反応取得など）がどこまで高い正確性と精度を持つのかは未解明な方法論的問題もある。知覚認知の中でも視覚研究では、CRTディスプレイによる視覚刺激呈示など、“Gold Standard”と呼ばれる高い正確性（呈示遅延の少なさやリフレッシュレートに基づく適切な呈示時間）および精度（呈示遅延や呈示時間の安定性）を持つ研究環境が国際的に認められている（Ghodrati, Morris, & Price, 2015）。CRTディスプレイでは画面輝度変化が極めて高速であり、刺激呈示する際には実質的に遅延が生じないためである。また近年の低遅延ゲーミングLCDや視覚研究専用LCDなども、遅延が数ミリ秒と短い。実験参加者に刺激呈示される際の遅延や、眼球運動測定など生体反応データ測定との同期遅延もミリ秒単位で調整した上で、厳密な実験が可能である。また聴覚研究では、低遅延ヘッドフォンやスピーカー、およびオーディオインターフェースを用いることで、参加者に与える聴覚情報の遅延と音の歪みを改善することが最低限求められる環境である。こうした取り組みにより、視覚や聴覚、および視聴覚情報を正確かつ安定的に統制することで、人間のコミュニケーションにおける情報処理プロセスを厳密に実証できる。一方で、VR研究で使用される装置、とりわけVR HMDが、これら頑健な研究環境と同等の正確性と精度を持つかは不明確であり、VR実験環境構築の指標となる具体的な刺激呈示時間の正確性や呈示遅延時間は実証されていない課題がある。

また、VR実験はUnityやUnreal Engineなどのゲームエンジンによる制御が主流であり、心理学や神経科学実験用ソフトウェアやライブラリで共通使用される刺激呈示関数やコード構造がないため、実験用ソフトウェアやプログラム環境によるVR刺激呈示の正確性と精度が未解明な問題もある。2D環境における心理学実験ではPsychoPyなどPython言語による専用ソフトウェア環境が充実しており、刺激呈示も高い正確性

と精度を持つ (Bridges, Pitiot, MacAskill, & Peirce, 2020)。実際に、Unity による刺激呈示は、実験制御で現在主流の Python 言語環境による刺激呈示よりも遅延が大きく、刺激呈示の正確性と精度が低い報告がある (Le Chénéchal & Chatel-Goldman, 2018)。そのため、科学研究で推奨される Python 環境での VR 実験の場合、刺激呈示は正確に可能なのか、どの程度の呈示遅延が生じるのか、世界的に実証が期待されている。

こうした研究背景をうけ、本研究ではバーチャルリアリティ空間におけるコミュニケーションで生じる、①社会的「知覚」の時空間情報処理プロセスの解明、②社会的「認知」の時空間情報処理プロセスの解明、③これらの正確な測定・解析手法の確立を目的し、研究①②ではその処理プロセス心理学および生理学的に解明および実験に必要な刺激データセットなどの構築し、研究③では情報工学的に VR における心理学実験環境の正確性や精度を実証した (Tachibana & Matsumiya, 2021)。

2 研究①および②

2-1 VR 心理学実験用の刺激データセットおよび眼球運動測定環境の構築

研究①および②では、VR 空間で他者や VR アバターに対して、ヒトがどのように社会性や感情を認識し行動するか検討するため、心理学的行動実験を行う。しかし、新型コロナウイルスの影響により、外部から多数の実験参加者を募集することが実質的に不可能な状態が研究期間に生じ、大規模な心理学実験は延期となった。一方、VR のようなダイナミックな状況において、現実と同様に感情や身体動作を再現するデータセットや、それらを使用して心理学実験が可能な環境が未整理だったため、VR コミュニケーションにおける社会性や感情など処理プロセスを網羅的に検討するための VR アバターデータセットの作成、および Python 言語による頑健な VR 心理学実験環境の構築を行った。VR アバターのデータセットは、ヒトの基本 6 感情 (怒り・悲しみ・喜び・嫌悪・驚き・恐怖) に基づいたジェスチャーごとに大規模分類・作成し、構築した Python 言語による VR 研究環境で動作可能なものの構築を目的とした。また VR コミュニケーション中における実験参加者の眼球運動測定も実験で使用可能にすることを目指した。これは、コミュニケーションにおいて他者の顔や身体動作に現れる社会性や感情をどのように見ているかを生理学的にも検討可能にするためである。

2-1-1 実験 1

2-1-2 方法

実験制御ソフトウェアとして、Vizard 6 (Vizard 6.3, Python 2.7.12, WorldViz, USA) および Vizard 7 (Vizard 7.0, Python 3.8.0, WorldViz, USA) を使用した。これらは同一の実験制御用 PC (Intel Core i7-10750H (2.6 Hz), Windows 10 operating system (64 bit), 16 GB RAM, NVIDIA GeForce RTX 2070 video card) で動作された。また、同じプログラムコード構造を保つため、Python 2 to 3 Conversion Tool (WorldViz, USA) によってコードを作成した。

データセット刺激の素材として、Adobe Mixamo (<https://www.mixamo.com/#/>) の 3D アバターおよび身体動作アニメーションを使用した。この素材は本研究における VR 実験環境と互換性があり、VR 心理学実験にも直接使用可能であった。Mixamo から、人型アバター 26 体 (女性 13、男性 13)、基本感情を想定した身体動作アニメーション (16 種類) を選択し、合計 416 種類のアバターアニメーションを使用した。これら全てのアバターおよびアニメーションを上述の Python 心理学実験環境でレンダリングし VR 空間で動作させた。

2-1-3 結果

構築結果から、全てのアバターアニメーションがソフトウェア上の設定空間座標で再現できた (図 1)。また、実験者および実験参加者の任意のタイミングでアバターと身体動作を切り替え可能となり、基本感情を VR 空間上で表出・理解する心理学実験手続きの構築も可能となった (※詳しい実験データおよびプログラムコードなどは、学術論文発表前のため非公開)。

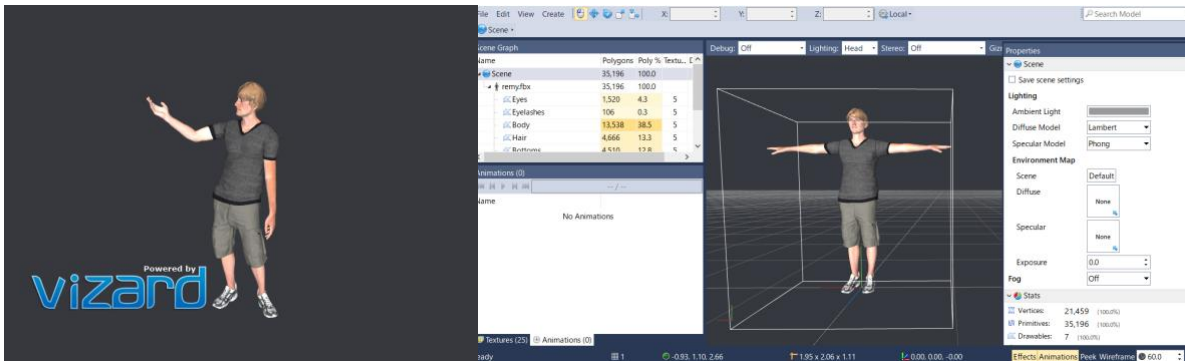


図 1. VR 心理学実験で使用可能なアバターおよびアニメーションの刺激例。

2-2-1 実験 2

2-2-2 方法

実験 1 と同様に制御ソフトウェアとして、Vizard 6 (Vizard 6.3, Python 2.7.12, WorldViz, USA) および Vizard 7 (Vizard 7.0, Python 3.8.0, WorldViz, USA) を使用した。眼球運動測定を VR 実験環境で構築・テストするため、Python2 環境では Eye Tracking Analytics Lab (WorldViz, USA)、Python3 環境では SightLab (WorldViz, USA) を眼球運動測定モジュールとして使用した。VR ハードウェアとして、眼球運動測定対応の Star VR One (StarVR, Taiwan; 210×130 degrees, 90 Hz refresh rate) を HMD として使用した。これらは実験制御用 PC (Intel Core i7-11700KF (3.6 Hz), Windows 10 operating system (64 bit), 32 GB RAM, NVIDIA GeForce RTX 3080 video card) で動作された。VR HMD のトラッキングは、VR ベースステーション (HTC, Taiwan; Steam VR Base Station 2.0) で行った。これらの環境で HMD を通して装着者の眼球運動測定を行い、正しく機能しているか検討した。眼球運動測定および測定中の確認は Vizard とそのサンプルコードで実施した。

2-2-3 結果

測定結果から、参加者の眼球運動が正常に測定されることが確認できた (図 2)。眼球運動測定を行う従来の VR 実験環境では Unity や Tobii 社製のジュールにより、多くの測定や実験が行われていたが、本研究からより頑健で汎用性の高い VR 心理学実験および眼球運動測定が可能な実験環境を構築できたと言える。また、実験 1 で作成した VR アバターやアニメーションとも互換性があるため、コロナウイルスの影響により実施できなかった大規模な VR 心理学実験を実施するための研究環境を構築できた。(※詳しい測定データおよびプログラムコードなどは、学術論文発表前のため非公開)。



seconds	point x	point y	point z	pupil diameter	flag
0.00	-3.01	1.01	0.76	3.15	-
0.02	-3.01	1.01	0.76	3.20	-
0.03	-3.01	0.98	0.79	3.22	-
0.04	-3.01	0.99	0.81	3.20	-
0.06	-3.01	1.00	0.80	3.24	-
0.12	-3.01	1.01	0.69	3.22	-
0.13	-3.01	1.01	0.76	3.25	-
0.14	-3.01	1.01	0.73	3.22	-
0.15	-3.01	0.99	0.80	3.27	-
0.17	-3.01	0.99	0.75	3.20	-
0.18	-3.01	0.99	0.75	3.19	-
0.19	-3.01	0.98	0.76	3.24	-
0.20	-3.01	0.97	0.75	3.24	-
0.21	-3.01	0.99	0.77	3.23	-
0.22	-3.01	0.98	0.77	3.21	-
0.23	-3.01	0.97	0.76	3.22	-
0.24	-3.01	0.96	0.76	3.20	-
0.25	-3.01	0.95	0.76	3.20	-
0.27	-3.01	0.94	0.75	3.19	-
0.28	-3.01	0.95	0.77	3.17	-
0.29	-3.01	0.92	0.77	3.21	-
0.30	-3.01	0.94	0.80	3.17	-
0.31	-3.01	0.93	0.82	3.18	-
0.32	-3.01	0.91	0.78	3.19	-
0.33	-3.01	0.94	0.79	3.17	-
0.34	-3.01	0.94	0.79	3.20	-
0.35	-3.01	0.93	0.80	3.17	-
36.68	0.15	2.21	2.08	3.44	-
36.69	0.16	2.30	2.09	3.45	-
36.70	-0.42	4.20	3.99	3.65	-
36.71	-0.44	4.29	3.99	3.50	gaze ended: David
36.72	-0.46	4.26	3.99	3.52	-
36.73	-0.39	4.32	3.99	3.60	-
36.75	-0.45	4.25	3.99	3.60	-
36.76	0.10	2.20	1.98	3.37	-
36.77	0.12	2.35	2.07	3.36	gaze started: David
36.78	0.05	2.20	1.97	3.35	-
36.79	-0.48	4.14	3.99	3.46	-
36.80	-0.31	4.34	3.66	3.47	-
36.81	0.03	2.22	1.96	3.36	-
36.82	0.05	2.23	1.93	3.43	gaze started: David
36.83	-0.01	2.10	1.91	3.22	-
36.85	-0.56	4.28	3.98	3.31	-
36.86	-0.53	4.34	3.77	3.44	-
36.87	-0.46	4.34	3.78	3.35	-
36.88	-0.45	4.34	3.77	3.35	-
36.89	-0.44	4.34	3.75	3.32	-
36.90	-0.76	4.24	3.97	3.29	-

図 2. VR 実験における眼球運動測定例. 上図は実際に VR 空間上で眼球運動が測定されている状態であり、緑色の点が参加者の注視領域（見ている箇所）を表している. 下図 2 つは測定開始以降の時系列に沿った VR 空間上 (x, y, z 座標) の眼球運動測定データを表している.

3 研究③

3-1 VR 心理学実験における正確性・精度・測定方法

本研究では VR 研究に必須となる刺激呈示の正確性を実証でき、研究成果は当該分野の一流国際学術誌 *Behavior Research Methods* (IF 6.2, 5YearIF 7.0, Journal Rank Q1) に採択され、国際的研究成果を出すことができた。近年 VR を利用した研究は世界的に増加しているが、視聴覚刺激における呈示遅延や視聴覚間

のズレ (SOA) の確認と調整が必須となる知覚認知研究において、最新の VR 環境がどこまで正確で安定した呈示を実現できるかは未解明であった。よって本研究では、近年主流の VR 実験環境における視聴覚刺激呈示の正確性と精度をミリ秒単位で解明できる精度測定実験を実施した。一連の実験結果から、視覚呈示遅延が安定して約 20ms (SD<1ms) に対して聴覚は最大約 40ms (SD<4ms) と大きく、また SOA は約 20ms または 40ms (SD=3ms) であり、非 VR 実験環境と比較し正確性が低い、呈示遅延の調整によって 5ms 以下に改善可能であると実証した。また、本研究により、こうした正確性や精度を実際の VR 心理学実験環境と同期させ実証する測定・解析方法それ自体を提供できた。これらは、本研究から今後の VR 心理学および神経科学実験における基本的な科学的指標値となるため、VR 研究への学術的および技術的貢献を達成できたと言える。

3-1-1 実験 3 VR 心理学実験における視覚刺激呈示の正確性と精度①

3-1-2 方法

Python 2 および Python 3 の両実験制御下における HMD の視覚刺激呈示を検討するため、実験 1 と同様に Python 2 の制御条件の場合は、Vizard 6 (Vizard 6.3, Python 2.7.12, WorldViz, USA) で実験制御を行い、Python 3 の制御条件の場合は Vizard 7 (Vizard 7.0, Python 3.8.0, WorldViz, USA) を使用した。これらは実験制御用 PC (Intel Core i7-10750H (2.6 Hz), Windows 10 operating system (64 bit), 16 GB RAM, NVIDIA GeForce RTX 2070 video card) で動作された。また、同じプログラムコード構造を保つため、Python 2 to 3 Conversion Tool (WorldViz, USA) によってコードを作成した。

視覚刺激は、HTC Vive Pro (HTC, Taiwan; 2880×1600 pixel resolution (1440×1600 per eye), 90 Hz refresh rate) と Oculus Rift (Facebook Technologies, USA; 2160×1200 pixel resolution (1080×1200 per eye), 90 Hz refresh rate) の HMD に呈示された。

刺激呈示の正確性と精度を測定するため、測定専用装置 Black Box Toolkit (BBTK) (Black Box Toolkit v2 Elite, United Kingdom, 36 channels; 6 kHz sampling rate) と色彩輝度計 (コニカミノルタ CS-150) を使用した。HMD へ視覚刺激がされた際の画面輝度変化を測定するため、光センサーを使用した (BBTK opto-detector sensor, United Kingdom)。測定データは BBTK データ用ホスト PC (Intel Core i7-7Y75 (1.6 Hz), Windows 10 operating system (64 bit), 8 GB RAM) に保存された。

視覚刺激として、VR 内における黒色全画面 (最低輝度画面) (RGB: 0, 0, 0; HTC Vive Pro, 6.65 cd/m²; Oculus Rift, 0.42 cd/m²) および白色全画面 (最大輝度画面) (RGB: 255, 255, 255; HTC Vive Pro, 116.80 cd/m²; Oculus Rift, 78.24 cd/m²) を使用した。

実験では黒白画面測定テストを行った (図 3)。テストでは、黒白全画面が HMD に交互に 1,000 回呈示された。各画面呈示のオンセットと同時に TTL トリガーが送信され、HMD における画面輝度変化とトリガーの出力が BBTK によって測定された。これにより、HMD 上に実際に刺激が呈示された時間とプログラムされたトリガー時間の比較 (i. e., 呈示時間の正確性と呈示遅延の有無と精度の解析) が行われた。各画面の呈示時間は、11.11, 22.22, 33.33, 44.44, および 99.99 ms (HMD の 1, 2, 3, 4, 9 フレーム分) であった。これら 5 つの呈示時間条件を Python 2 および 3 の制御条件、HTC HMD および Oculus HMD 呈示条件で測定するため、合計 20 テスト (2 つの Python × 2 つの HMD × 5 つの呈示時間) が行われた。

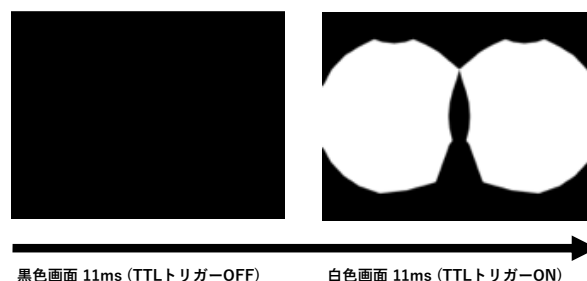


図 3. 測定テストにおける 1 試行の流れ。図は呈示時間が 11.11ms の場合の例。

3-1-3 結果

測定テストにおける全結果（各条件における呈示回数・呈示時間・呈示遅延）は表 1 および図 4 の通りであった。とりわけ、VR 心理学実験において重要となる呈示遅延に関しては、平均 18ms ($SD < 1ms$) の遅延（正確性：トリガー時間に対して実際に HMD に刺激呈示がされるまでの遅延時間）が生じるとわかった。一方で標準偏差（呈示遅延の精度）は平均 1ms 以下であり、安定した精度であった。これら呈示遅延は、両 HMD および Python2 および 3 によって変化せず一貫して生じた。

表 1. 各テストにおける呈示回数・平均呈示時間 (ms)・平均遅延時間 (ms).

テスト条件			呈示された回数	呈示時間 (ms)		遅延時間 (ms)	
環境	HMD	時間		Mean	SD	Mean	SD
Python 2	HTC Vive Pro	11.11	1000/1000	10.68	0.11	18.43	0.13
		22.22	1000/1000	21.85	1.06	18.50	0.62
		33.33	1000/1000	32.95	0.71	18.46	0.50
		44.44	1000/1000	44.05	0.10	18.42	0.14
		99.99	1000/1000	99.58	0.12	18.41	0.14
	Oculus Rift	11.11	53/1000	399.04	481.46	7201.93	6437.44
		22.22	1000/1000	13.33	0.36	17.74	0.16
		33.33	1000/1000	24.47	0.08	17.74	0.18
		44.44	1000/1000	35.55	0.10	17.77	0.16
		99.99	1000/1000	91.35	2.25	17.71	0.31
Python 3	HTC Vive Pro	11.11	1000/1000	10.81	0.10	18.58	0.14
		22.22	1000/1000	21.84	0.38	18.51	1.22
		33.33	1000/1000	32.96	0.09	18.45	0.50
		44.44	1000/1000	44.05	0.37	18.48	1.14
		99.99	1000/1000	99.62	0.71	18.42	0.31
	Oculus Rift	11.11	87/1000	235.18	123.06	8838.85	5577.82
		22.22	1000/1000	13.32	0.37	17.83	0.35
		33.33	1000/1000	24.43	0.37	17.81	0.16
		44.44	1000/1000	35.55	0.10	17.78	0.16
		99.99	1000/1000	91.04	0.71	17.88	0.25

HTC HMDにおける11ms呈示の測定波形。
 ピンク波形がTTLトリガーON/OFF、青色波形が視覚刺激 (HMDの輝度変化)

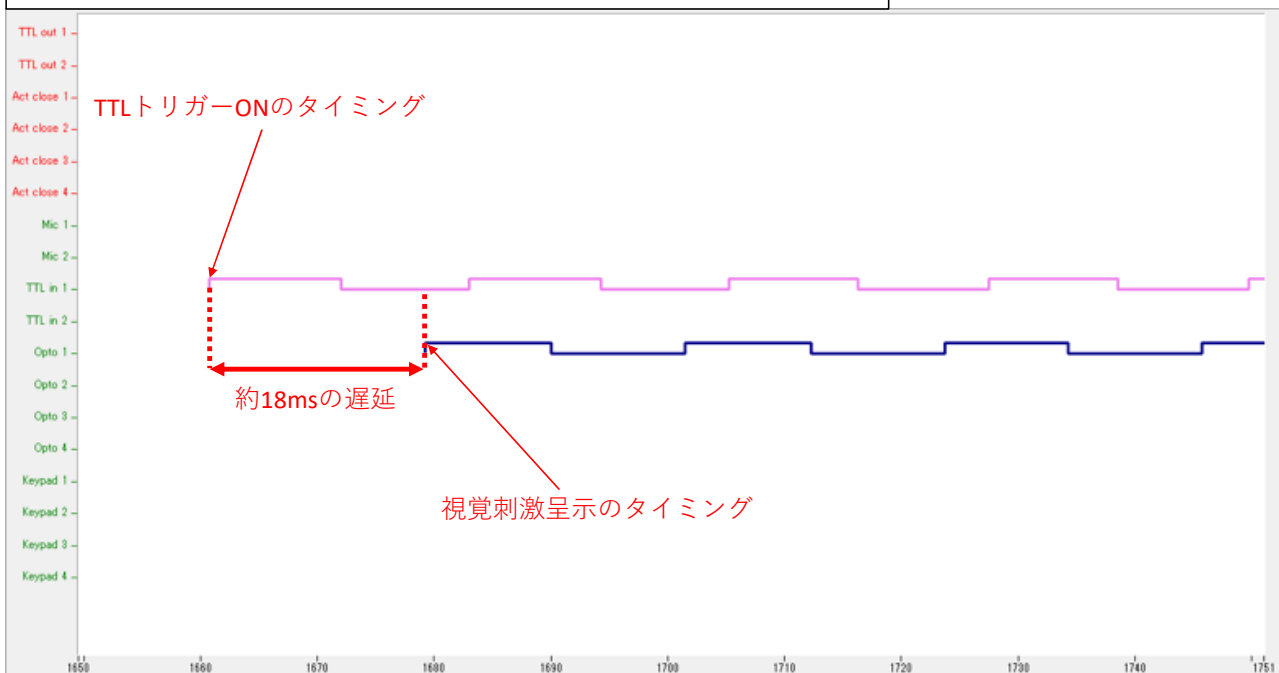


図 4. 測定結果の波形例.

3-2-1 実験 4 VR 心理学実験における視覚刺激呈示の正確性と精度②

実験 4 では中間階調色画面テストによって、遅延が大きくなりうる中間階調色間における視覚刺激の呈示時間および呈示遅延の正確性と精度を検討した。

3-2-2 方法

実験刺激を除き、実験 3 と同じであった。実験 2 では、中間階調色である 10%輝度画面 (HTC Vive Pro , 11.68 cd/m²; Oculus Rift, 7.82 cd/m²) および 90%輝度画面 (HTC Vive Pro , 105.12 cd/m²; Oculus Rift, 70.42 cd/m²) を視覚刺激として使用した。これらの刺激による 10% - 90% 測定テストを実験 3 と同様に実施した (図 5)。

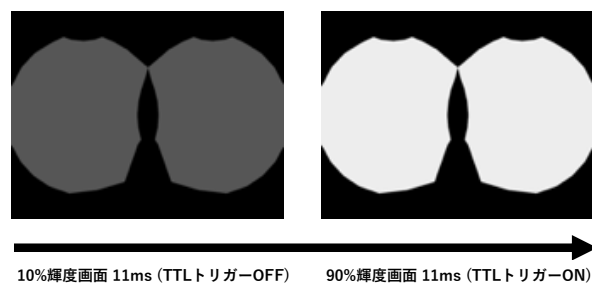


図 5. 1 試行の流れ. 図は呈示時間が 11.11ms の場合のもの.

3-2-3 結果

全テストにおいて実験 4 を支持する結果であり、平均 18ms ($SD = <1ms$) の呈示遅延が生じており、両 HMD および Python のバージョンによって変化せず一貫して生じた。よって、黒白画面のように輝度値が最小値から最大値まで変化する場合 (実験 3) と、中間階調色間で輝度値が変化する場合には、HMD における視覚刺激呈示の正確性と精度は同様であると言える (表 2)。

表 2. 各テストにおける呈示回数・平均呈示時間 (ms)・平均遅延時間 (ms).

環境	テスト条件		呈示された回数	呈示時間 (ms)		遅延時間 (ms)	
	HMD	時間		Mean	SD	Mean	SD
Python 2	HTC Vive Pro	11.11	1000/1000	10.28	0.09	18.54	0.11
		22.22	1000/1000	21.41	0.12	18.53	0.15
		33.33	1000/1000	32.52	0.07	18.55	0.10
		44.44	1000/1000	43.63	0.12	18.51	0.19
		99.99	1000/1000	99.16	0.12	18.63	0.43
	Oculus Rift	11.11	1/1000	22202.25	0.00	3549.27	594.83
		22.22	1000/1000	13.06	0.10	17.89	0.14
		33.33	1000/1000	24.18	0.37	17.92	0.19
		44.44	1000/1000	35.28	0.08	17.69	0.12
		99.99	1000/1000	90.75	0.00	17.96	0.11
Python 3	HTC Vive Pro	11.11	1000/1000	10.27	0.06	18.55	0.10
		22.22	1000/1000	21.40	0.12	18.50	0.15
		33.33	1000/1000	32.51	0.06	18.54	0.11
		44.44	1000/1000	43.62	0.12	18.56	0.10
		99.99	1000/1000	99.00	0.06	18.47	0.08
	Oculus Rift	11.11	1/1000	22202.25	0.00	3593.54	599.90
		22.22	1000/1000	13.22	0.08	17.86	0.16
		33.33	1000/1000	24.34	0.37	17.78	0.11
		44.44	1000/1000	35.46	0.37	17.72	0.21
		99.99	1000/1000	91.00	0.00	17.79	0.13

3-3-1 実験 5 VR 心理学実験における視覚刺激呈示の正確性と精度③

実験 3 では VR Scene Screen Transition Test (VR 画面テスト) (図 6) によって、一般的な視覚刺激呈示よりもレンダリング負荷の高い複雑な VR 空間を視覚刺激とした場合に (high rendering workload)、呈示時間および呈示遅延の正確性と精度が変化するかを検討した。

3-3-2 方法

実験刺激を除き、実験 3&4 と同じであった。実験 5 では、VR 空間 (VR Scene “piazza.osgb”, WorldViz, USA: HTC Vive Pro, 31.67 cd/m²; Oculus Rift, 23.74 cd/m²) を視覚刺激として使用した。また、実験 1 で用いた黒色全画面も同様に視覚刺激として使用した。

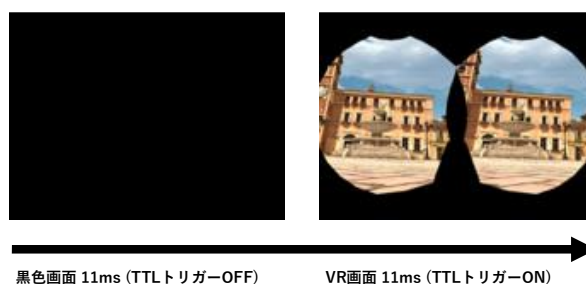


図 6. 1 試行の流れ。図は呈示時間が 11.11ms の場合のもの。

3-3-3 結果

実験 3&4 の結果と一致し、全テストにおいて、平均 18ms ($SD = <1ms$) の呈示遅延 が一貫して生じた。また Python2 および 3 においても、同様に差がなかった。よって、レンダリング負荷が少ない単純な黒白画面や中間階調色画面における呈示遅延と比較し、レンダリング負荷の高い複雑な VR Scene 呈示の場合でも、HMD や Python のバージョンに依存して視覚刺激の呈示遅延が変化することはないと判明した (表 3)。

表 3. 各テストにおける呈示回数・平均呈示時間 (ms)・平均遅延時間 (ms)。

テスト条件			呈示された 回数	呈示時間 (ms)		遅延時間 (ms)	
環境	HMD	時間		Mean	SD	Mean	SD
Python 2	HTC Vive Pro	11.11	1000/1000	10.65	0.12	18.44	0.10
		22.22	1000/1000	21.77	0.10	18.42	0.13
		33.33	1000/1000	32.88	0.12	18.40	0.12
		44.44	1000/1000	43.98	0.09	18.42	0.17
		99.99	1000/1000	99.57	1.76	18.43	0.11
	Oculus Rift	11.11	1/1000	22202.25	0.00	1696.11	406.95
		22.22	1000/1000	13.34	0.12	18.03	0.20
		33.33	1000/1000	24.49	0.04	17.95	0.15
		44.44	1000/1000	35.56	0.11	17.94	0.13
		99.99	1000/1000	91.14	3.52	17.98	0.09
Python 3	HTC Vive Pro	11.11	1000/1000	10.64	0.12	18.55	0.55
		22.22	1000/1000	21.76	0.11	18.43	0.19
		33.33	1000/1000	32.91	1.41	18.43	0.16
		44.44	1000/1000	43.96	0.36	18.44	0.12
		99.99	1000/1000	99.51	1.06	18.75	1.19
	Oculus Rift	11.11	1/1000	22202.25	0.00	2777.78	509.34
		22.22	1000/1000	13.34	0.12	18.06	0.14
		33.33	1000/1000	24.45	0.10	17.91	0.19
		44.44	1000/1000	35.68	2.56	18.03	0.18
		99.99	1000/1000	91.20	3.16	18.01	0.15

3-4-1 実験 6 VR 心理学実験における聴覚刺激呈示の正確性と精度①

VR 視覚刺激呈示制御と同様に、VRHMD のヘッドフォンにおける聴覚刺激の正確性と精度を検討した。聴覚刺激は視覚刺激よりも制御が難しく遅延も大きくなる。また、VR においては立体音響によってコミュニケーション中などの 3D 音声呈示されるため、遅延や音声時間の正確性がどのくらいかを実証する必要があった。よって視覚刺激呈示と同様に測定テストを行い検討した。

3-4-2 方法

刺激を除き、基本的に実験 3・4・5 と同じであった。この実験では、聴覚刺激として純音 (440 Hz sine wave; 44.1 kHz sampling rate; 16 bit depth) を使用し、純音テスト (Pure Tone Sound Test) による基本的な聴覚刺激呈示の正確性と精度を検討した。測定テストでは視覚刺激は呈示せず、無音と純音を交互に呈示した。テスト中、無音および純音の呈示オンセットと同時に TTL トリガーが BBTk に送信された (図 7)。

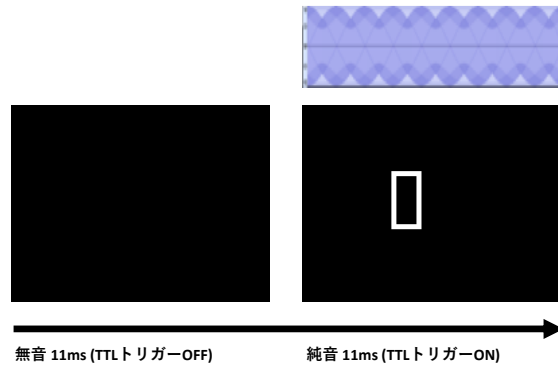


図 7. 1 試行の流れ. 図は呈示時間が 11.11ms の場合のもの.

3-4-3 結果

結果から、11.11ms および 22.22ms では、呈示時間が大きく乱れ、正確な刺激呈示はできないとわかった。呈示時間が正確となる 33.33、44.44、99.99ms 呈示時間において、38ms または 57ms の呈示遅延があるとわかった (表 4)。標準偏差 (*SD*) は約 3ms と視覚刺激よりも大きい安定していた。

表 4. 各テストにおける呈示回数・平均呈示時間 (ms)・平均遅延時間 (ms).

環境	テスト条件		呈示された回数	呈示時間 (ms)		遅延時間 (ms)	
	HMD	時間		Mean	SD	Mean	SD
Python 2	HTC Vive Pro	11.11	1/1000	22219.75	0.00	37.50	0.00
		22.22	224/1000	168.56	107.01	17033.58	9979.78
		33.33	1000/1000	33.76	4.50	37.67	2.87
		44.44	1000/1000	44.41	4.93	37.76	2.87
		99.99	1000/1000	99.96	1.45	37.74	2.94
	Oculus Rift	11.11	2/1000	11090.50	2610.00	4298.75	4244.00
		22.22	229/1000	164.60	109.62	16779.58	9992.74
		33.33	1000/1000	34.19	4.53	57.50	3.16
		44.44	1000/1000	46.01	6.71	57.95	2.83
		99.99	1000/1000	103.79	2.54	58.12	3.30
Python 3	HTC Vive Pro	11.11	2/1000	11089.88	1959.88	6572.88	6538.63
		22.22	227/1000	166.02	107.14	16867.94	10061.45
		33.33	1000/1000	33.67	4.59	37.76	2.89
		44.44	1000/1000	44.49	4.93	37.77	2.85
		99.99	1000/1000	99.96	1.14	37.87	2.92
	Oculus Rift	11.11	1/1000	22210.50	0.00	56.25	0.00
		22.22	223/1000	169.83	109.85	17161.99	10012.18
		33.33	1000/1000	33.64	4.47	56.19	2.75
		44.44	1000/1000	44.58	4.92	57.08	2.81
		99.99	1000/1000	100.48	3.36	57.58	2.16

3-5-1 実験 7 VR 心理学実験における聴覚刺激呈示の正確性と精度②

基本的な聴覚刺激である純音に加え、VR 心理学実験などで使用されるリアルな生活音 BGM や複雑な音声コミュニケーション刺激などの場合、呈示遅延が変化するか検討した。

3-5-2 方法

刺激を除き、基本的に実験 6 と同じであった。この実験では、聴覚刺激として複合音 (“piazza” (“07035152. wav”; BBC Sound Effects: <https://sound-effects.bbcrewind.co.uk/search?q=piazza>; 44.1 kHz sampling rate; 16-bit depth) を使用し、複合音テスト (Complex Sound Test) による複雑な聴覚刺激呈示の正確性と精度を検討した。実験 6 と同様に、測定テストでは視覚刺激は呈示せず、無音と複合音を交互に呈示した。テスト中、無音および複合音の呈示オンセットと同時に TTL トリガーが BBTK に送信された (図 8)。

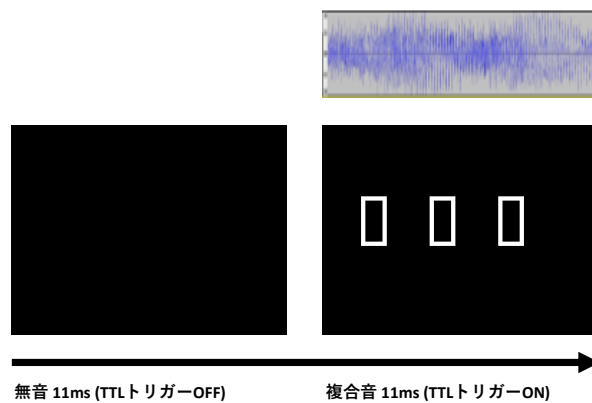


図 8. 1 試行の流れ。図は呈示時間が 11.11ms の場合のもの。

3-5-3 結果

結果は実験 6 と同様であった。11.11ms および 22.22ms では呈示時間が大きく乱れ、正確な刺激呈示はできなかった。呈示時間が正確となる 33.33、44.44、99.99ms 呈示時間において、同様に 38ms または 57ms の呈示遅延があるとわかった (表 5)。標準偏差 (SD) も同様に約 3ms と安定しており、複合音においても刺激呈示の正確性と精度は変化しないと判明した。

また、これまでの実験に加えて、視覚刺激と聴覚刺激を同時に呈示する視聴覚刺激呈示の正確性と精度の測定テストを同様に実施したところ、視覚刺激および聴覚刺激を独立して呈示する場合と同じ結果であった (詳細データなどは、本研究成果である学術論文 ”Tachibana, R & Matsumiya, K. (2021). Accuracy and Precision of Visual and Auditory Stimulus Presentation in Virtual Reality in Python 2 and 3 Environments for Human Behavior Research. *Behavior Research Methods*, 54, 729–751. <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01663-w>”に記載)。そのため SOA (視覚刺激と聴覚刺激呈示のズレ) は約 20ms または 40ms ($SD=3ms$) であり、高性能の液晶ディスプレイやスピーカーを用いる非 VR 実験環境と比較して正確性が低い、呈示遅延の調整によって 5ms 以下に改善可能であることも。

表 5. 各テストにおける呈示回数・平均呈示時間 (ms)・平均遅延時間 (ms).

テスト条件			呈示された 回数	呈示時間 (ms)		遅延時間 (ms)	
環境	HMD	時間		Mean	SD	Mean	SD
Python 2	HTC Vive Pro	11.11	1/1000	22210.25	0.00	12667.24	6414.96
		22.22	224/1000	169.12	112.49	19095.79	21744.54
		33.33	1000/1000	34.26	4.37	37.70	2.88
		44.44	1000/1000	45.12	5.20	37.71	2.88
		99.99	1000/1000	100.48	1.08	37.53	2.95
	Oculus Rift	11.11	1/1000	22210.50	0.00	13086.18	6418.87
		22.22	775/1000	33.80	22.69	5340.25	19528.81
		33.33	1000/1000	34.16	4.87	58.09	3.09
		44.44	1000/1000	44.68	4.78	57.65	2.85
		99.99	1000/1000	100.59	0.12	60.57	0.13
Python 3	HTC Vive Pro	11.11	1/1000	22200.25	0.00	12774.30	6415.19
		22.22	226/1000	167.38	106.69	18369.50	21639.96
		33.33	1000/1000	34.32	4.52	37.72	2.87
		44.44	1000/1000	45.13	5.20	37.70	2.88
		99.99	1000/1000	100.47	1.02	37.81	2.95
	Oculus Rift	11.11	1/1000	22210.50	0.00	13359.58	6419.42
		22.22	778/1000	33.63	22.58	5267.11	19401.75
		33.33	1000/1000	33.83	4.71	57.32	2.74
		44.44	1000/1000	44.77	4.74	57.13	2.87
		99.99	1000/1000	100.65	0.12	61.35	0.15

4 まとめ

本研究①および②から、VR コミュニケーションにおける社会的知覚認知処理プロセスを検討するための刺激データセットと実験環境、眼球運動測定 of 構築を達成できた。さらに研究③の方法論研究では、これらの実験環境によって大規模な VR 心理学実験を正確かつ安定に行うために必要な正確性・精度・測定解析手法をも実証できた。とりわけ研究③の方法論研究においては計画以上の成果が得られ、研究成果は当該分野の一流国際学術誌 *Behavior Research Methods* (IF 6.2, 5YearIF 7.0, Journal Rank Q1) に採択されている。本研究課題の領域である実験心理学における Journal Rank では世界 4 位 (148 本中)、VR も含む心理学および情報科学における Journal Rank では世界 1 位 (13 本中) である。実験結果から明らかのように、VR 刺激呈示において、視覚刺激では約 18ms、聴覚刺激では最低でも約 38ms の遅延があり、11ms や 22ms の聴覚刺激が呈示時間通り正確にできないことを解明した。よって、心理物理学などに見られる 30ms 以下などの極めて短い呈示時間制御を要する知覚処理プロセスを検討するには注意が必要である。視覚および聴覚刺激の呈示で生じる遅延に関しては、遅延分をフレーム数分速く呈示するようプログラムすることで 5ms 以下に抑えることが可能である。このように、視覚および聴覚において数十 ms の遅延があるものの、一般的な心理学実験はもちろん VR における社会性を検討するための心理学実験にも十分対応可能であるといえる。これらの研究成果①②③は、今後の VR 心理学および神経科学実験における基本的な実験環境および指標値となるため、VR を始め、心理学・神経科学・情報工学といった多方面への学術的貢献を達成できたといえる。

5 終わりに

本研究計画における課題・展望として、研究①②で実施予定であった社会的知覚および認知処理を検討するための大規模 VR 心理学実験の実施が上げられる。本研究期間中、コロナウイルス感染拡大の影響により、実験室に実験参加者を集めて行う心理学実験の実施ができなかった。助成していただいた電気通信普及財団には当初の研究計画変更を許可していただき、方法論研究に注力することで研究を遂行できた。特に研究③の成果は、先述の通り一流学術誌に採択され、本研究助成から国際的な研究成果を出すことができた。電気通信普及財団および全ての関係者に、深く御礼申し上げる。

本研究期間内に止むを得ず中断した心理学実験については、コロナウイルス感染拡大が収束次第実施していき、研究成果は国際学術誌に順次投稿していく予定である。

【参考文献】

- Bridges, D., Pitiot, A., MacAskill, M. R., & Peirce, J. W. (2020). The timing mega-study: comparing a range of experiment generators, both lab-based and online. *PeerJ*, 8(1), e9414–29.
- Ghodrati, M., Morris, A. P., & Price, N. S. C. (2015). The (un)suitability of modern liquid crystal displays (LCDs) for vision research. *Frontiers in Psychology*, 6(85), 403–29.
- Le Chénéchal, M., & Chatel-Goldman, J. (2018). HTC Vive Pro time performance benchmark for scientific research. ICAT-EGVE 2018, Limassol, Cyprus. fahal-01934741f.
- Parsons, T. D. (2015). Virtual Reality for Enhanced Ecological Validity and Experimental Control in the Clinical, Affective and Social Neurosciences. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 120–19.
- Tachibana, R. & Matsumiya, K. (2021). Accuracy and precision of visual and auditory stimulus presentation in virtual reality in Python 2 and 3 environments for human behavior research, *Behavior Research Methods*. 54, 729–751. <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01663-w>

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Accuracy and Precision of Visual and Auditory Stimulus Presentation in Virtual Reality in Python 2 and 3 Environments for Human Behavior Research.	<i>Behavior Research Methods</i> . 54, 729–751. https://doi.org/10.3758/s13428-021-01663-w	2021年7月
VRを用いた心理学実験環境構築と精度.	第6回坂本勉記念神経科学研究会, 6(1)	2021年3月
VR実験における聴覚刺激: VizardとPsychoPyによる制御と時間精度	第11回東京若手心理学者の会	2021年3月
バーチャルリアリティによる心理学実験はどこまで正確か: Python言語環境とVRヘッドマウントディスプレイによる視聴覚刺激制御の時間精度	日本心理学会第85回大会	2021年9月
VRヘッドマウントディスプレイによる視覚刺激呈示の正確性と精度	第26回日本VR学会	2021年9月

VR 実験における視聴覚刺激呈示の正確性と精度：方法論研究からの再現性向上	日本基礎心理学会第40回大会オンライン若手セッション	2021年11月
自動反応アームを用いた反応時間データの測定方法	第7回坂本勉記念神経科学研究会	2022年2月
VRによる視聴覚実験：刺激呈示評価テストからみる正確性と精度	第12回多感覚研究会	2022年2月
「反応時間測定」を測定する：正確な反応時間取得による実験データ再現性向上.	第19回日本認知心理学会	2022年3月
視聴覚刺激と反応時間の精度評価方法	第12回東京若手心理学会	2022年3月