



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

Accuracy and Precision of Visual Stimulus Presentation in Modern VR HMD

立花良¹⁾, 松宮一道¹⁾

Ryo TACHIBANA and Kazumichi MATSUMIYA

1) 東北大学 大学院情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3-09, ryo.tachibana@tohoku.ac.jp)

概要 : VR HMD の普及によって VR 環境における知覚認知の心理学研究が増加する一方、HMD に視覚刺激を呈示する際の呈示時間の正確性や呈示遅延の安定性は明らかでない。本研究では、HTC や Oculus など近年主流の HMD を使用し、フレーム単位で厳密な視覚刺激呈示する際の正確性と精度を体系的に検討した。実験 1 では Black-to-White Test、実験 2 では Gray-to-Gray Test、実験 3 で VR Scene Test を行い、視覚刺激の呈示時間と呈示遅延を解明した。結果から、呈示時間の正確性は HMD によって異なる一方で、呈示遅延は共通して約 20 ミリ秒生じると判明した。本研究から、VR 心理実験に必要な視覚刺激呈示における正確性と精度の指標値を実証・提供した。

キーワード : 正確性と精度, 研究データ再現性, 心理学実験方法, HMD

1. はじめに

心理学や神経科学では、VR を利用した知覚認知研究がますます増加している。従来の実験室実験と比較し、日常生活における物理情報の複雑性や動的側面を反映できる高い生態学的妥当性 (ecological validity) を実現可能なためである [1]。特に視覚研究では、HTC や Oculus などのヘッドマウントディスプレイ (HMD) の普及によって、図形や画像など古典的な 2D 実験刺激や特定の視野角に限定されない幅広い実験が容易になっている。

しかし、VR 視覚研究が増加する中、VR HMD による刺激呈示がどこまで高い正確性と精度を持つのかは未解明のままである。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 [2]。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、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。一方で、VR 研究で使用される HMD が、これら頑健な視覚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。

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多く、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 や OpenSesame 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 [3]。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という報告がある [4]。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。

よって本研究では、心理学研究で普及している HTC や Oculus など VR HMD における視覚刺激呈示の正確性と精度について、Python 言語による実験制御用環境を用いて体系的に検討する。Python 系実験制御用ソフトウェアや CRT ディスプレイなどによる頑健な視覚研究環境に対して、近年の VR 研究環境がどこまで正確なのか、リフレッシュレートに基づく適切な呈示時間の精度や、具体的な呈示遅延時間を解明していく。また、行動科学研究で国際的に問題

となっている研究データ再現性危機の原因の1つである「方法における再現可能性課題 (実験環境の明確な情報、環境それ自体の正確性と精度など)」に対して、VR 行動科学実験をする際の環境および正確性と精度の実証データを、本研究は提供できる意義がある [5]。

2. 実験 1

実験 1 では、Black to White Screen Transition Test (黒白画面テスト) を行い、VR HMD 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。

2.1 実験方法

2.1.1 実験制御ソフトウェア

Python 2 および Python 3 の実験制御下における HMD の視覚刺激呈示を比較するため、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。

2.1.2 実験装置 (HMD と測定用装置)

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) 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。

2.1.3 実験刺激および実験手続き

視覚刺激として、VR 内における黒色全画面 (最低輝度画面) (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) (HTC Vive Pro, 116.80 cd/m²; Oculus Rift, 78.24 cd/m²) を使用した。

実験では Black to White Screen Transition Test を行った (図 1)。測定テストでは、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 ON/OFF 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。

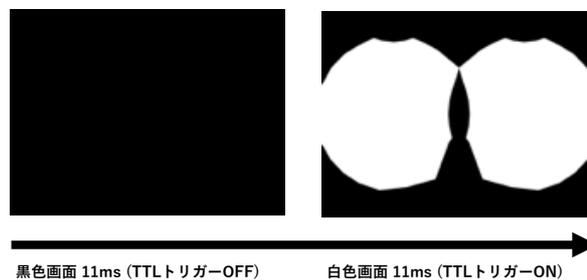


図 1. 試行の流れ. 図は呈示時間が 11.11ms の場合のもの。

2.2 実験結果

2.2.1 呈示回数

Oculus HMD における 11ms 呈示時間テストでは、Python 2 では 53/1000 回、Python 3 では 87/1000 回であり、正確なフレーム同期呈示ができなかった。これら以外の全条件では 1000/1000 回であり、正確なフレーム同期呈示が行えた。よって Oculus HMD では 1 フレーム (11.11ms) の視覚呈示は困難だと言える。

2.2.2 呈示時間

Oculus HMD では全条件で平均 9ms 呈示時間が短くなった。一方 HTC HMD では全条件において呈示時間通りの視覚刺激呈示がされ、呈示時間は正確であった。両 HMD で標準偏差は 1ms 以下であり安定していた。Python 2 および 3 における差はなかった。

2.2.3 呈示遅延

全テストにおいて、平均 18ms ($SD = <1ms$) の呈示遅延 (呈示の正確性: 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) が生じていた (表 1) (図 2)。一方で標準偏差は呈示時間と同様に平均 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). 結果は Python2 環境のもの。

テスト条件	HMD	時間	呈示された回数	呈示時間 (ms)		遅延時間 (ms)	
				Mean	SD	Mean	SD
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

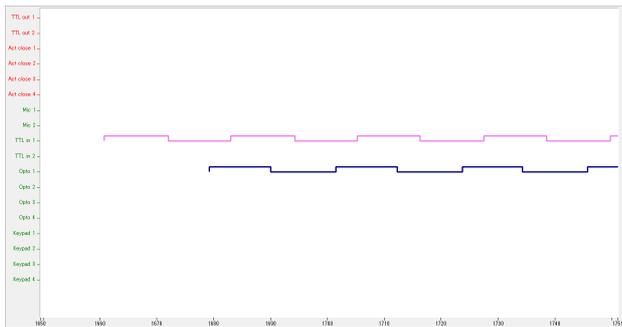


図 2. 測定結果の波形例. 波形は 11ms 条件のもの. 図は BBTK の測定結果であり、縦軸は測定チャンネル、横軸は測定時間を表す. ピンク色波形が TTL トリガー ON/OFF、青色波形が HMD の輝度変化.

3. 実験 2

実験 2 では Gray to Gray Screen Transition Test (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。

3.1 実験方法

実験刺激を除き、実験 1 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% Gray to Gray Test を実験 1 と同様に 20 テスト実施した (図 3)。

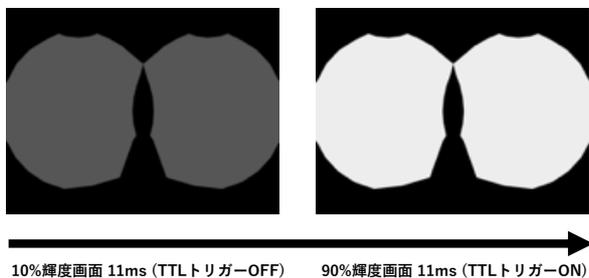


図 3. 試行の流れ. 図は呈示時間が 11.11ms の場合のもの.

3.2 実験結果

3.2.1 呈示回数

実験 1 の結果と同様であり、Oculus HMD における 11ms 呈示時間テストでは、Python 2 では 1/1000 回、Python 3 においても 1/1000 回であり、正確なフレーム同期呈示ができなかった。これら以外の条件では 1000/1000 回であり、正確なフレーム同期呈示が行えた。

3.2.2 呈示時間

実験 1 と同様の結果であり、Oculus HMD では全条件で平均 9ms 呈示時間が短くなる一方、HTC HMD では全条件において呈示時間は正確であった ($SD = <1ms$)。Python 2 および 3 における差はなかった。

3.2.3 呈示遅延

全テストにおいて、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。これらの結果は実験 1 と一致しており、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 1) と、中間階調色間で輝度値が変化する場合は、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). 結果は Python2 環境のもの.

テスト条件	呈示された時間	呈示された回数	呈示時間 (ms)		遅延時間 (ms)	
			Mean	SD	Mean	SD
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

4. 実験 3

実験 3 では VR Scene Screen Transition Test (VR 画面テスト) によって、一般的なディスプレイテストで使用される黒白色および中間階調色などレンダリング負荷の低い画面テストに対して (low rendering workload)、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。

4.1 実験方法

実験刺激を除き、実験 1&2 と同じであった。実験 3 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。実験ではこれらの視覚刺激による VR Scene Test (Black to VR-Scene) を実験 1&2 と同様に 20 テスト実施した (図 4)。

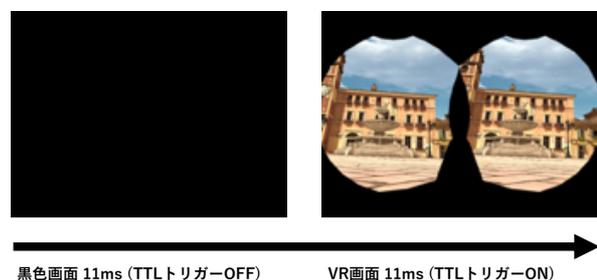


図 4. 試行の流れ. 図は呈示時間が 11.11ms の場合のもの.

4.2 実験結果

4.2.1 呈示回数

実験 1 および 2 の結果と同様であり、Oculus HMD における 11ms 呈示時間テストでは、Python 2 では 1/1000 回、Python 3 においても 1/1000 回であり、正確なフレーム同期

呈示ができなかった。これら以外のテスト条件では1000/1000回であり、正確なフレーム同期呈示が行えた。

4.2.2 呈示時間

実験1および2と同様に、OculusのHMDでは全条件で平均9ms呈示時間が短くなり、HTC HMDでは全条件において呈示時間は正確であった。Python2および3における差はなかった。

4.2.3 呈示遅延

遅延に関しても実験1および2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増減することはないと言える(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). 結果はPython2環境のもの。

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
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

5. むすび

本研究は、近年主流となっているHTCおよびOculusのVR HMDにおける視覚刺激呈示の正確性と精度について、最新の研究用Python言語環境を用いて検討した。結果から、刺激呈示時間はHTCのHMDでは正確な一方、OculusのHMDでは、呈示時間がプログラムした時間よりも約9ms短くなった。呈示遅延に関しては、どちらのHMDでも一貫して約18msの遅延が生じる判明した。近年の低遅延LCDでは遅延は10ms以下のため、こうしたLCDを用いる視覚研究よりも刺激呈示の正確性は低いため注意が必要である。一方、呈示時間および呈示遅延における偏差はどちらも全テストで1ms以下のため、視覚刺激呈示における精度は非常に安定している。

実験1, 2, 3の結果から明確なように、各HMDにおける呈示時間や呈示遅延は一貫して安定しており、Python2および3によるバージョンの違いや、実験刺激の違い(レンダリング負荷の違い)は、呈示の正確性や精度に影響しないと言える。特にHTC HMDでは、Oculus HMDが11ms(1フレーム分)の刺激呈示が困難な一方で、どの呈示時間テスト条件でも安定した視覚刺激呈示が可能であった。そのため、知覚実験に見られるような100ms以下の刺激呈示も

適切に制御できると言える。

Oculusの呈示時間が短くなる原因は“Asynchronous Space Warp”(Oculus HMDにおけるモーションスモーキング: 1フレームごとに2-2.5msの黒画面が挿入される)が自動機能するためである。SteamVRでモーションスモーキングのON/OFF環境設定が可能なHTCと比較し、Oculusでは基本的に自動適用される(Oculus開発サポートに確認済み)。低スペックの実験環境やミリ秒単位の視覚刺激呈示が不必要な研究であればOculusの有用性はあるが、厳密な刺激呈示時間を要する場合は注意が必要である。

約18ms生じる呈示遅延に関しては、刺激呈示において、2フレーム分(90Hzであれば22.22ms)速く視覚刺激を呈示するようコーディングすることで、遅延時間を4ms以下に抑えることが可能である。これによりVR HMDによる視覚実験においても低遅延LCDと同等の遅延時間を実現できると言える。

本研究から、近年主流のVR HMDにおける視覚刺激呈示における具体的な呈示時間・呈示遅延の正確性と精度を実証できた。今後は、視覚刺激に加えてVR実験における聴覚や触覚刺激呈示について解明することが課題である。

謝辞 本研究は公益財団法人電気通信普及財団(J190003004)およびJST さきがけ(JPMJPR16DB)の研究助成支援を受けた。

付録 本研究内容の詳細は、参考文献 [5] Tachibana & Matsumiya (2021) で確認可能。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Le Chénéchal, M., & Chatel-Goldman, J. (2018). HTC Vive Pro time performance benchmark for scientific research. *ICAT-EGVE 2018*, Limassol, Cyprus. fffal-01934741f.
- [5] 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*, (in print)