



HMD で提示されるバーチャル環境の 輝度および空間周波数と瞳孔径の関係

Relationship between Brightness and Spatial Frequency of Virtual Environments
Displayed on HMD and Pupil Diameter

溝口創太¹⁾, 松本啓吾¹⁾, 鳴海拓志¹⁾

Sota MIZOGUCHI, Keigo MATSUMOTO, and Takuji NARUMI

1) 東京大学大学院情報理工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1,
{mizooon, matsumoto, narumi}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: 瞳孔径は VR ユーザが経験する酔いの強度を測定する上で重要な指標として注目を集めている。しかし、HMD によって提示される映像の輝度や空間周波数と瞳孔径の関係は、酔いの測定において考慮すべきであるにもかかわらず十分に検証されているとはいえない。そこで本研究では、統制されたバーチャル環境を輝度や空間周波数を変化させながら提示することで、ユーザの瞳孔径に与えられる影響を検証する実験を行った。その結果、複雑なバーチャル環境においても輝度の増加に応じて瞳孔が縮小することが確認された。また輝度を変化させない条件下でのみ、ブラーによって瞳孔は縮小しづらくなることが示唆された。

キーワード: アイトラッキング, 瞳孔径, 輝度, 空間周波数

1. はじめに

アイトラッキング機能を搭載した HMD の増加に伴い、視線で操作するインタフェースや眼球情報をもとにしたユーザの状態推定など、眼球情報を活用したシステムの研究が積極的に行われている。特に瞳孔径や視線をもとに VR 体験中のユーザの酔いを推定する研究は [1] 盛んに行われており、中でも HMD 単体で得られる情報から VR 酔いを推定するシステムに注目が集まっている。他方、酔いの推定において特に重要とされている瞳孔径は酔い以外にも輝度 [2] や注意 [3], 認知負荷 [4] といった多様な要因に影響を受けて複雑に変動する。しかし、眼球情報を VR 酔いの推定に応用した既存の研究はこれらの要因を考慮せず、瞳孔と VR 酔いの関係にのみ注目しているという問題がある。酔い以外に一般的に瞳孔径に作用するとされる要因が、VR においても同様に瞳孔径に影響するか検証することは眼球情報を活用した VR 酔いの推定精度を向上させるために不可欠といえる。中でも輝度と空間周波数は現実の生活で瞳孔径に影響を与えることが確認されている上に、VR 体験中に HMD 単体でリアルタイムに計測可能であるため VR 酔いの推定にも応用がしやすい。そこで本研究ではこれらと VR 体験中のユーザの瞳孔径の関係を検証する。

2. 関連研究

瞳孔径に影響を与える要因の中でも光刺激を与えることで瞳孔が収縮する瞳孔対光反射 (pupillary light reflex: PLR) は古くから研究が進められ、そのメカニズムが明らかにな

れてきた [2]。VR においても輝度が瞳孔に与える影響は研究されており John, et al. は HMD を通して異なるグレースケールのスクリーンを見せることで、VR 環境において輝度から瞳孔径を予測する PLR モデルを個人に適用可能な形で確立した [5]。しかし、こうした研究では画面全体で輝度が統一されたグレースケール画像を用いて検証されており、一般的に体験される複雑なバーチャル環境で輝度変化が生じた場合の検証は十分にされていない。

視覚刺激の空間周波数もまた瞳孔径の大きさに影響することが報告されている [6]。加えて、空間周波数は VR 酔いの強さにも影響を与えることが分かっており、視野の周辺にブラーをかけることで VR 酔いが軽減されることが明らかになっている [7]。このように空間周波数は瞳孔径と VR 酔いのそれぞれに強く影響する重要な要因であり、アイトラッキングを使用した VR 酔いの推定を行う際は輝度とともに考慮することでその推定精度を向上させることができると考えられる。しかし、VR において空間周波数が瞳孔径に与える影響を検証した研究もまたこれまで十分にされてこなかった。

両眼視差を利用して立体映像を提示する VR ではバーチャル空間内の対象に視線を向けたときの両目の輻輳と、眼がディスプレイにピントを合わせようとする調節が一致しないことで現実では起こらない不快感や疲労が引き起こされることが知られており、輻輳調節矛盾と呼ばれている [8]。この輻輳調節矛盾のように、VR と現実では度々眼球運動が

異なることが確認されており、現実で確認された輝度や空間周波数による瞳孔径の変化が、同様に VR で再現されるかどうかを検証する必要がある。

3. 実験

本実験の目的は、異なる輝度や空間周波数のもと HMD を通してグレースケール画像とバーチャル環境を提示した際に瞳孔径に与える変化を検証することである。

3.1 参加者

本実験は 18 人の学生（性別：男性 13 名・女性 5 名，平均年齢：23.2 歳， $SD = 1.81$ ）を対象として，参加者内計画で実施した。参加者は全員視覚に障害を持っていなかった。また参加者の内メガネを使用していた者が 5 人，コンタクトレンズを使用していた者が 6 人，いずれも使用していなかった者が 7 人であった。

3.2 手続き

実験参加者は事前に実験についての説明を受け，同意書に記入した。その後体調に関するアンケートとして Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ) [9] に回答した。続いて参加者は椅子に座った状態でヘッドマウントディスプレイ (HTC VIVE Pro Eye) を装着し，アイトラッキングのキャリブレーションを行った。その後，6 分半にわたる VR 映像の視聴を 1 分間の休憩をはさんで 2 回繰り返した。2 回目の映像視聴後，参加者は再び VRSQ に回答した。

映像の構成は，13 条件にわたって 30 秒間の映像提示を繰り返すというものであった。各条件の映像では，前半 10 秒間は画面全体の輝度値が 0 の黒い待機画像が提示される。その後 20 秒間，条件に対応するグレースケール画像もしくはバーチャル環境が提示された。用意された 13 条件は 4 種類のグレースケール画像と，輝度と空間周波数を 3 パターンずつ組み合わせて変化させた 9 種類のバーチャル環境である。条件の順番は最初にグレースケール画像群あるいはバーチャル環境群の一方がランダムな順番ですべて提示された後，もう一方がランダムな順番で提示されるというものであった（図 1）。実験条件の順番は参加者間でカウンターバランスをとった。また，参加者は 1 回目の視聴と 2 回目の視聴でそれぞれ異なる条件の順番を体験した。

参加者に提示されたバーチャル環境は図 2 のような室内空間である。参加者は映像提示中周囲を見渡すことはせず，常にバーチャル環境内のクッションに重なる位置に表示されている十字型の注視点へ視線を向けるように指示された。

3.3 実験条件

3.3.1 グレースケール画像

グレースケール画像を提示する条件は 4 種類用意された。それぞれ画面全体の輝度値が 63, 127, 191, 255 の画像を提示された。各条件は GS_63 条件，GS_127 条件，GS_191 条件，GS_255 条件と呼ぶこととする。

3.3.2 バーチャル環境

バーチャル環境を提示する条件においては輝度変化 3 パターン，空間周波数変化 3 パターンの組み合わせによって実現する 9 種類が用意された。輝度変化では用意されたバー

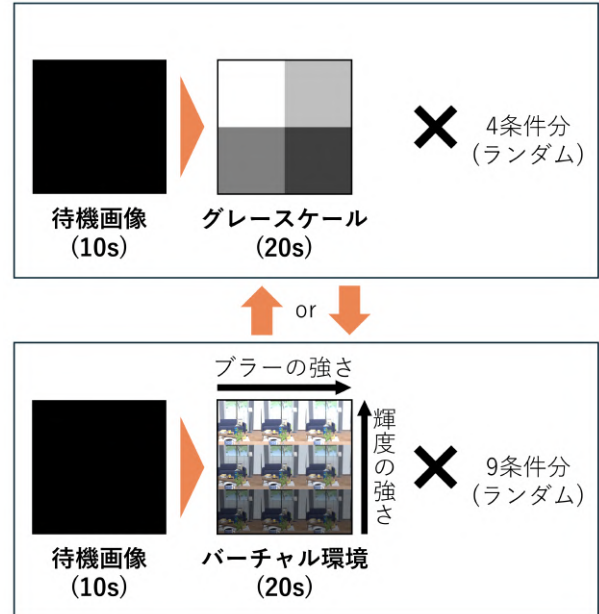


図 1: 参加者に提示された映像のフロー。10 分間の待機画像を提示後，20 秒間条件に対応するグレースケール画像あるいはバーチャル環境が提示されるという流れを繰り返す。



図 2: 参加者に提示されたバーチャル環境の様子。参加者は常にソファに置かれたクッションに重なるように表示される十字マークを見るように指示された。

チャル環境を無加工のまま提示する NormalBright 条件，NormalBright 条件から各画素値を 0.5 倍する Dim 条件，NormalBright 条件から各画素値を 1.5 倍する Bright 条件が設けられた。空間周波数変化では用意されたバーチャル環境を無加工のまま提示する NoBlur 条件，NoBlur 条件にカーネルサイズ 11 のガウシアンブラーをかける LightBlur 条件，NoBlur 条件にカーネルサイズ 21 のガウシアンブラーをかける StrongBlur 条件が設けられた。今後輝度変化と空間周波数変化を組み合わせた条件は「[輝度の条件名]_[空間周波数の条件名] 条件」と呼ぶこととする。例えば Bright 条件と StrongBlur 条件を組み合わせた場合 Bright_StrongBlur 条件となる。

3.4 評価項目

3.4.1 平均瞳孔径の減少量 [mm]

各条件について，直前の待機画像提示中の瞳孔径の平均値から条件映像提示中の瞳孔径の平均値を引いた値を平均

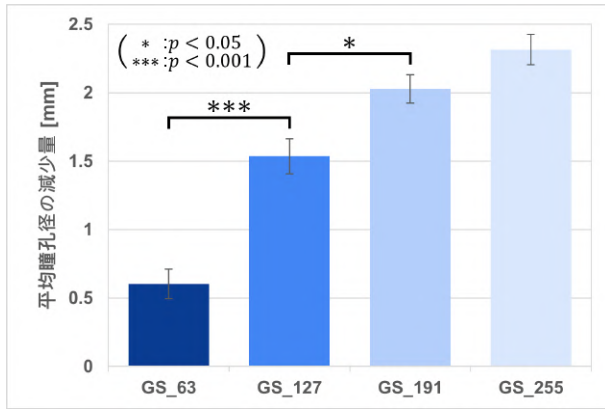


図 3: グレースケール画像の各条件における平均瞳孔径の減少量.

瞳孔径の減少量として評価した。平均値の算出においては、瞳孔の最大反応時間 [10] を考慮し、映像開始後 0.5 秒経過した時点から映像終了までの範囲を参照した。なお、平均瞳孔径の減少量については長時間目を瞑ってしまい映像視聴中のほとんどで正常に計測できなかった 1 人の参加者を除いた 17 人分のデータをもとに分析を行った。

3.4.2 VRSQ

実験中に発生した VR 酔いは映像視聴前後の回答から得られた VRSQ のスコアによって評価した。

3.5 仮説

本実験において以下の仮説を立てた。

- H1 グレースケール画像において輝度が高いほど平均瞳孔径の減少量は大きくなる。
- H2 バーチャル環境において輝度が高いほど平均瞳孔径の減少量は大きくなる。
- H3 バーチャル環境においてブラーが強いほど平均瞳孔径の減少量は小さくなる。

4. 結果

4.1 グレースケール画像の条件間の比較

グレースケール画像の各条件における平均瞳孔径の減少量は図 3 に示した通りである。シャピロ・ウィルク検定の結果、正規性が確認できた ($p = 0.171$)。次に一元配置分散分析を行った結果、条件間に有意差が認められた ($p < 0.001$)。下位検定として Bonferroni 法を使用した多重比較のもと対応のある t 検定を行ったところ、GS_191 条件と GS_255 条件以外の全ての組み合わせ間で有意差が認められた ($p < 0.05$)。GS_191 条件から GS_255 条件にかけても減少量は大きくなる傾向が見られており、仮説 H1 が支持される結果となった。

4.2 バーチャル環境の条件間の比較

バーチャル環境の各条件における平均瞳孔径の減少量を図 4 に示した。シャピロ・ウィルク検定の結果、正規性が確認できなかった ($p < 0.05$)。次に整列ランク変換を施した参加者内二元配置分散分析を行った結果、輝度とブラーの強さの交互作用が有意であった ($F = 4.63, p < 0.01$,

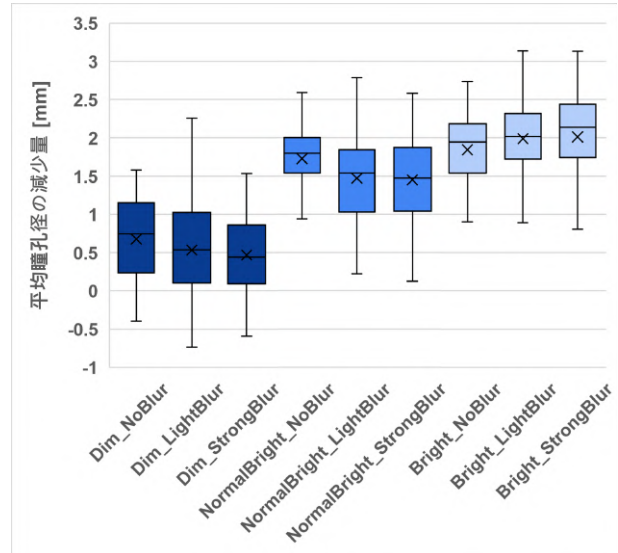


図 4: バーチャル環境の各条件における平均瞳孔径の減少量

$\eta_p^2 = 0.123$)。また、輝度の主効果が有意であった ($F = 158, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.828$)。輝度の単純主効果を求めるため、空間周波数が NoBlur 条件のデータに限定した上でフリードマン検定を行ったところ、輝度の条件間で有意差が認められた ($p < 0.001, r = 0.514$)。下位検定として Bonferroni 法を使用した多重比較のもとウィルコクソンの符号順位検定を行ったところ、Dim_NoBlur 条件と NormalBright_NoBlur 条件、Dim_NoBlur 条件と Bright_NoBlur 条件の間にそれぞれ有意差が認められ ($p < 0.001$)、仮説 H2 が支持される結果となった。NoBlur 条件で統一されたバーチャル環境の各輝度条件における平均瞳孔径の減少量は図 5 に示した通りである。

一方、空間周波数については主効果が認められなかった。しかし、図 4 を見ると、ブラーの強さが瞳孔径の減少量に与える影響は、輝度条件によって変化する傾向がみられる。輝度条件が統一されたバーチャル環境の各空間周波数条件における平均瞳孔径の減少量に対してフリードマン検定を行ったところ、NormalBright 条件下においてのみ有意であった ($p < 0.05, r = 0.206$)。下位検定として Bonferroni 法を使用した多重比較のもとウィルコクソンの符号順位検定を行ったところ、NormalBright_NoBlur 条件と NormalBright_StrongBlur 条件の間に有意差が認められた ($p < 0.05$)。また、NormalBright_NoBlur 条件と NormalBright_LightBlur 条件の間の差は有意傾向であった ($p = 0.06$)。以上から、輝度変化のない NormalBright 条件に限り仮説 H3 が支持される結果となった。

4.3 VRSQ

”Total”スコアについて映像視聴前 ($M = 2.78, SD = 4.17$) と映像視聴後 ($M = 5.32, SD = 5.69$) の間でウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、VR 酔いの有意差は認められなかった ($p = 0.352$)。

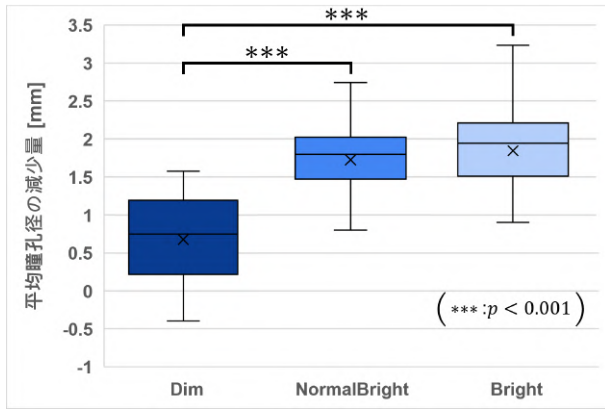


図 5: NoBlur 条件で統一されたバーチャル環境の各輝度条件における平均瞳孔径の減少量

5. 考察

VRSQ のスコアに有意差が認められなかったことから、以下の考察では参加者の VR 酔いが瞳孔径に影響を与えた可能性を除いて議論を行う。

グレースケール画像については、先行研究 [5] で確認されている通り、画面全体の輝度が大きくなるにつれ瞳孔は縮小し、輝度 0 の時と比べた時の瞳孔径の減少量が拡大することが確認できた。また条件間の減少量の差に注目すると、瞳孔径と輝度は単純な線形関係にあるのではなく、輝度の増加につれ瞳孔径は減少しづらくなる傾向が見られた。先行研究 [5] では VR における輝度を入力として瞳孔径を予測する PLR モデルにおいて線形モデルやそれに近い指数モデルが有効であることが報告されているが、本実験の結果では似たような線形性は確認できなかった。

また、グレースケール画像だけでなく一般的なバーチャル環境においても、輝度の増加に応じて瞳孔が縮小することが確認できた。空間周波数についてはブラーの強さ単体による瞳孔の変化は確認できなかったが、輝度との交互作用が確認された。特に NormalBright 条件下でブラーをかけることで瞳孔が縮小しづらくなることが確認され、その効果はブラーの強さに応じて強まることが示唆された。ブラー処理によって映像の細部を構成する高い空間周波数成分が減少し、視界全体の大まかな様相を構成する低い空間周波数成分の情報が残されていた。注意は瞳孔径に影響する重要な要因の一つであり、注意が視界内で広く分散することで瞳孔径が拡大することが分かっている [3]。このことからブラー処理によって視界全体に注意が分散したことが瞳孔径の収縮を阻害したと考えられる。一方で Dim 条件や Bright 条件のように極端な輝度の操作が施された場合、ブラー以外の要因によっても視野が見えにくくなることで空間周波数が瞳孔に与える影響が弱まったと考えられる。

これらの結果から輝度と空間周波数は VR においても瞳孔径に影響を与える要因となり、特に空間周波数の影響は輝度によって変化することが示唆された。今後 VR において瞳孔径を測定する際は、これらの要因を考慮し適切な補正をかけた上で議論を行う必要があると考えられる。

6. 結論

本研究では一般的に体験される複雑なバーチャル環境で輝度と空間周波数の 2 要因を変化させることで、これらが瞳孔径に与える影響を検証した。その結果、視野全体に輝度の統一されたグレースケール画像を提示した場合、輝度の増加に応じて瞳孔が有意に縮小した。バーチャル環境においても同様に輝度の増加に応じて瞳孔が有意に縮小した。また、輝度変化を加えなかった条件でのみ画面全体にブラーをかけることで瞳孔が縮小しづらくなることが示唆された。今後はより細かい輝度変化やブラーの種類を設けて検証することで、輝度と空間周波数の組み合わせが瞳孔径に与える影響についてより詳細を明らかにする必要がある。

謝辞 本研究の一部は JST ACT-X(JPMJAX22AG), JST さきがけ (JPMJPR22S9) の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] Rifatul Islam, et al. Cybersickness prediction from integrated hmd's sensors: A multimodal deep fusion approach using eye-tracking and head-tracking data. *2021 IEEE international symposium on mixed and augmented reality*, pp. 31–20, 2021.
- [2] Carina Kelbsch, et al. Standards in pupillography. *Frontiers in neurology*, Vol. 10, No. 129, 2019.
- [3] Howard Hock, et al. The effect of spatial attention on pupil dynamics. *Journal of Vision August*, Vol. 10, No. 87, 2010.
- [4] Jackson. Beatty. Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological bulletin*, Vol. 92, No. 2, 1982.
- [5] Brendan John, et al. An evaluation of pupillary light response models for 2d screens and vr hmds. *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology.*, No. 19, pp. 1–11, 2018.
- [6] Kazuhiko. Ukai. Spatial pattern as a stimulus to the pupillary system. *JOSA A*, Vol. 2, No. 7, pp. 1094–1100, 1985.
- [7] Yun-Xuan Lin, et al. How the presence and size of static peripheral blur affects cybersickness in virtual reality. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, Vol. 17, No. 4, pp. 1–18, 2020.
- [8] Anke. Huckauf. Virtual and real visual depth. *Proceedings of the 2nd symposium on Applied perception in graphics and visualization.*, pp. 172–172, 2005.
- [9] Hyun K Kim, et al. Virtual reality sickness questionnaire (vrsq): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment. *Applied ergonomics*, Vol. 69, pp. 66–73, 2018.
- [10] C. J. Ellis. The pupillary light reflex in normal subjects. *British Journal of Ophthalmology*, Vol. 65, pp. 754–759, 1981.