



重心動揺からみたリアリティと空間周波数帯域の関係

三輪光一郎¹⁾, 森本慶吾²⁾, 木島竜吾³⁾

Koichiro MIWA, Keigo MORIMOTO and Ryugo KIJIMA

1) 岐阜大学 自然科学技術研究科 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, x4525085@edu.gifu-u.ac.jp)

2) 岐阜大学 自然科学技術研究科 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, x4525091@edu.gifu-u.ac.jp)

3) 岐阜大学 工学部 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, kijima@gifu-u.ac.jp)

概要: 理想的な HMD は、実空間と同等の視覚情報を使用者に与える必要がある。過去の研究で筆者は HMD に必要な解像度を算出したが、ジャギー等による見かけの動きが結果に影響を及ぼしていると報告があった。そのため本研究では、空間周波数とジャギー等がそれぞれどれほど人間に影響しているかを明確にし、ジャギーや見かけの運動などが影響を及ぼした可能性が高いことを明らかにした。

キーワード: 頭部搭載型ディスプレイ 重心動揺 空間周波数

1. はじめに

1.1 研究背景

バーチャル・リアリティ (VR) のために用いられる頭部搭載型ディスプレイ (HMD: Head Mounted Display) は近年、大幅に性能が向上し普及してきている。しかし、実空間と同等の視覚情報を使用者に与えることはできていない。例えば、提示品質のうちで重要な変数である解像度は十分とはいえない [1]。

1.2 運動視と重心動揺

人間には感覚受容の限界があるので、物理刺激の再現度を 100[%] にまで引き上げずとも、ユーザーが現実と仮想空間の区別がつかないだけの品質の感覚提示を行うことは可能だろうと考える。むしろ、システムから刺激を受けた場合の人間の内部状態に注目し、これが実空間にいる場合と同等であれば、それは人間にとってリアルな仮想空間であるといえる。本研究では、人間の内部状態の指標として平衡をとりあげる。HMD などバーチャル・リアリティ用のディスプレイの大きな特徴は、運動視を通じて身体性を保持したまま仮想空間に入れることである。平衡を保つという一種のタスクパフォーマンスは、この点の再現精度に強く関係がありそうだからである。人間の平衡は視覚情報に大きく影響されるものであり [2], HMD に関してもそのレイテンシーと平衡の関係については知見がある [3]。医療分野においても重心動揺検査は比較的一般的であり、その面での知見が参考になる [4]。

1.3 関連研究

平衡を保つ、という観点から、HMD に必要な解像度を算出した例がある [5]。[5] では、いくつかの画素を同じ色に揃えることで、擬似的に大きな画素を作り、そのサイズを変化させて被験者実験を行った。その結果、足圧中心 (CoP: Center of Pressure) の平均速度は HMD の換算視力 [6] の対数に比例していること、それが裸眼状態に匹敵するのは換

算視力 0.66 の場合であり、対角画角 100[deg/eye] の HMD の画素数に換算すると、2631 × 2960 [px/eye] であった。その後 [7] でも類似の実験を行い、描画過程にアンチエイリアシングを加えることで平衡は向上すること、それにより同様の計算で、換算視力 0.26, 解像度 1035 × 1497[px/eye] という値を得た。平衡の向上を、ジャギーの変化による見かけの運動が減ったことであると理由づけている。図 1

1.4 本研究の目的

画素を大きくすると、提示可能な空間周波数の上限は下がり、周波数帯域は狭くなる。それとともに、ジャギー、その見かけの運動など、レンダリングの副産物も目立つようになる。本研究では、そのどちらが平衡に影響しているかを明確にするため、提示する空間周波数を直接制限することで、これらの副産物を排除し、純粋に空間周波数帯域とユーザの平衡の関係を調べる。

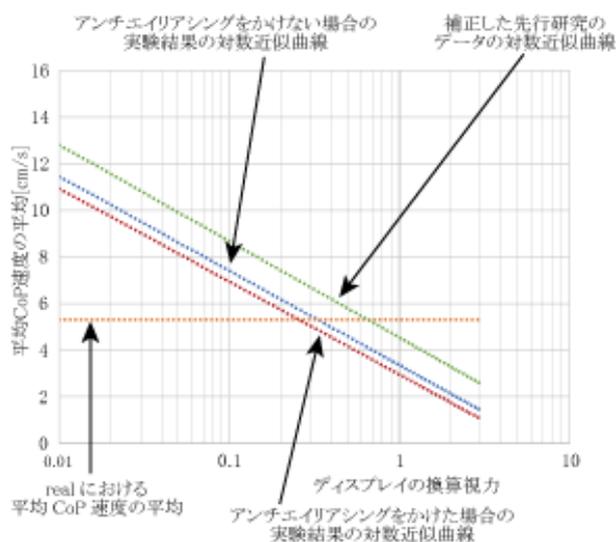


図 1: 先行研究の比較 ([7] から引用)

2. 実験

2.1 実験環境

本研究では、Oculus VR 社の Oculus Rift Development Kit 2(以下 DK2 と呼ぶ) を使用した。DK2 の単眼解像度と単眼画角は 960×1080 [px/eye], 100 [deg] である。重心動揺計には任天堂社のバランス Wii ボードを使用し、PC と Bluetooth で接続し、50Hz の周期で連続的に COP を記録した。また、ヘッドホンを装着し、ホワイトノイズを流すことで聴覚情報が実験結果に影響しないよう配慮した。また、被験者に提示する映像として実空間を撮影した画像を被験者の周囲 1.5m に水平画角 180 度、垂直画角 53 度の範囲で円柱状に配置した。画像は被験者の身長に合わせて仮想空間内の目線が実空間のそれと同等になるよう設置した。仮想空間内の環境を図 2 に示す。

2.2 提示画像の空間周波数

まず、円筒に貼るテクスチャ画像の 1 画素の視角を、概ね HMD の画素と同じとなるように設定した。この画像フーリエ変換し、帯域制限マスクを施した上で逆フーリエ変換することで、空間周波数帯域制限を行った。帯域制限に方形窓を使い一定の上限周波数で急激にゲインを 0 にすると、結果画像に輝度の波打ちが発生するため、周波数領域でのマスク画像に $\sigma=100$ [px] のガウシアン・ブラーを施した上で処理を行った。これはカットオフ周波数付近に 10[cpd] 程度の幅のスロープをつけることに相当する。

また、空間周波数を変化させるにあたり、画像の輝度やコントラストに変化はあるが、これは南部氏の報告による重心動揺に影響の出ない輝度、コントラスト内に収まっているため、考慮しないものとする。[8]

2.3 実験手順

被験者は HMD を装着し、重心動揺計上で利き足を用いて単脚直立姿勢を保つよう求められた。眼鏡をかけている場合には、一連の実験中は同じ眼鏡をもちいるようにした。計測は、単脚直立が安定したと被験者が判断した際の合図により開始し、30 秒間行った。被験者の軸足の移動、他の足の接地、転倒などにより計測は終了した。各被験者は、全ての試行をランダムな順番で、1 度づつ行った。被験者が

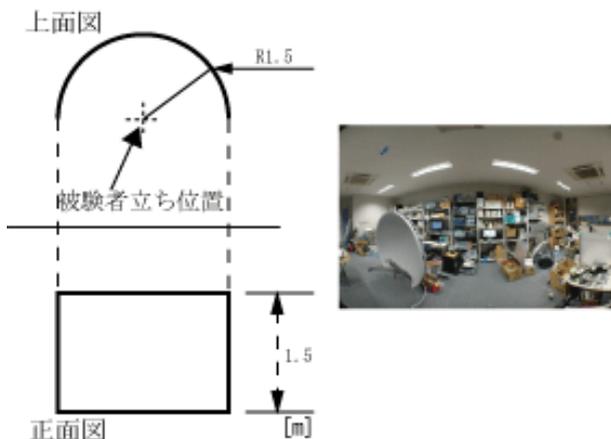


図 2: 仮想空間内のスクリーン (左) 提示画像 (右)

疲れや酔いを感じた場合には、十分な休息をとった。

2.4 評価手順

本研究では、50Hz の周波数で計測される COP の移動距離を足し合わせることで軌跡長を求めた。COP の軌跡長の評価方法として、転倒によって COP の計測時間にばらつきが生じるため、総軌跡長を計測時間で除すことにより正規化し、平均 COP 速度 (単位時間軌跡長) を算出した。この平均 COP 速度が小さいほど重心動揺は小さいといえる。また、被験者の転倒が実験結果に影響を与えないよう、転倒が生じた際には転倒を確認した 1 秒前までのデータを評価の対象とした。

2.5 実験結果

実験では、表 1) に示す 6 つの思考を行った。画像の空間周波数を 2 画素で 1 周期であると考えた場合、DK2 の空間周波数は約 5[cpd] である。そのため、1 ではそれと同等の画像が被験者に提示されるよう元画像の空間周波数を変化させた。そこから空間周波数を 5~1.13 まで変化させ、重心動揺を測定した。実際に被験者に提示した映像例を図 3 に示す。

表 1: 実験の試行パターン

	空間周波数 [cpd]	換算視力
1	5.00	0.167
2	2.53	0.084
3	1.90	0.063
4	1.43	0.047
5	1.27	0.042
6	1.13	0.037



図 3: 空間周波数上限の異なる仮想空間の様子 (左 1, 右 5)

被験者は 20 代 9 名である。結果を図 4 に示す。エラーバーは標準誤差である。それぞれの試行間において Holm 法による多重比較を行ったところ、有意差はなかった。

3. 結論と展望

実験結果は、空間周波数帯域制限の影響がないことを示している。したがって、先行研究である [5][7] における画素サイズが、帯域制限としてユーザの平衡に影響を及ぼしたのではなく、レンダリングの副産物であるジャギーやその

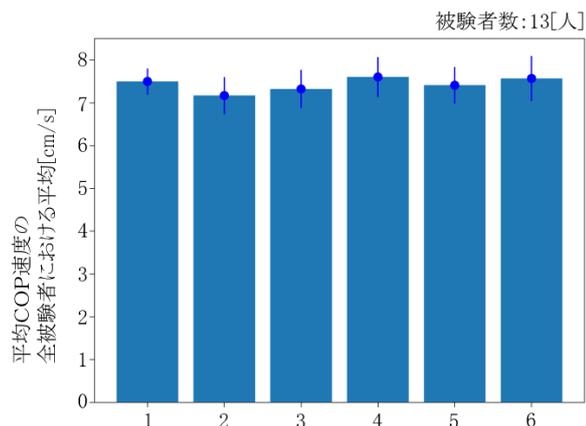


図 4: 試行パターンと平均 COP 速度の平均値

見かけの運動などが影響を及ぼした可能性が高いことを示唆している。ただし、本実験で提示したコンテンツは、研究室内部の写真であり、[5][7]のような鋭いエッジと明瞭な形状、コントラストのものとは相当異なること、半円筒に貼った2次元テクスチャを提示したため、隠蔽関係の変化などの3次元の手がかりが削除されていること、などの点で相違がある。今後はこれらの相違を考慮した上で、画素サイズを変更する実験と、帯域制限の実験の設定を近づけ、比較する必要がある。またより低周波領域での知見 [9] との比較検討も必要である。

参考文献

- [1] 畑田豊彦：高臨場感を生み出す視覚特性，映情学技法，pp.7-11, 1988.
- [2] 清水俊宏，三橋哲雄：視覚情報と身体運動の相互作用，映メディア誌 Vol.48,no.8, pp.965-970, 1994.
- [3] 河邑壮馬，木島竜吾，加藤竜登：頭部搭載型ディスプレイの時間遅れが人間の平衡感覚に及ぼす影響，日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 Vol.19, pp.397-400, 2014.
- [4] 終幸伸：支持基底面積と重心移動域の実測とその比較，理学療法学第23巻2号，pp229-234,2008.
- [5] 三輪光一郎，木島竜吾：頭部搭載型ディスプレイに必要な解像度-ユーザーの平衡計測に基づく計測-，第23回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，2018.
- [6] 前田太郎：HMDの処方箋 ～含有成分と使用上の注意～ 視覚系の視点から見たHMD，日本バーチャルリアリティ学会 Vol.3,no.2, pp.11-17, 1998.
- [7] 尾山拓也，木島竜吾：HMDの解像度及びエイリアシングがユーザーの平衡に及ぼす影響，第24回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，2019.
- [8] 南部志門，木島竜吾：平衡計測実験におけるコントラスト，表示輝度，足元条件がHMDをつけたユーザーの平衡に及ぼす影響，第24回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，2019.
- [9] Senqi Hu, et al. : Effects of spatial frequency of a vertically striped rotating drum on vection-induced

motion sickness, Aviat Space Environ Med, pp.306-311, 1997.