



# 頭部搭載型ディスプレイの解像度品質が ユーザーの重心動揺に及ぼす影響

The effect of HMD's resolution on the user's body sway -evaluation using pre-calculated image-

三木萌花<sup>2)</sup>, 三輪光一郎<sup>1)</sup>, 木島竜吾<sup>2)</sup>  
Moeka MIKI, Koichiro MIWA, Ryugo Kijima

1)株式会社大都技研 (〒104-0031 東京都中央区京橋 3 丁目 1 番 1 号東京スクエアガーデン, miwa@daitogiken.com)  
2)岐阜大学工学部 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1, kijima@gifu-u.ac.jp)

**概要:** HMD の解像品質が十分であれば、ユーザは現実空間と同じ知覚を得るはずである。本研究では、重心動揺を指標とし、被験者実験により、解像度の低下の影響を調べた。結果は、周波数帯域制限は 0.228cpd 以上では影響を与えず、ジャギーが運動することで重心動揺が大きくなることを示した。  
**キーワード:** HMD, 解像度, 重心動揺

## 1. はじめに

### 1.1 研究背景

頭部搭載型ディスプレイ(HMD: Head Mounted Display)は、眼前に配置されたディスプレイと頭部の位置を検出するセンサからなるディスプレイのことであり、限られた解像度の画像をユーザーに提示する。どれほどの解像度があれば十分であるかを、刺激をうけたユーザの内部状態が、実空間にいる場合とどの程度似ているかを調べることで得られるのではないかと考える。

### 1.2 重心動揺

本稿では、人間の内部状態の指標として平衡をとりあげる。その理由は主に 3 点である。

第 1 に、視覚と平衡は強く関係づけられているため、視覚品質の影響が出る可能性が高い。平衡を保つことは、仮想空間の再現精度に強く関係がありそうである。平衡感覚は、視覚、前庭感覚、体性感覚の統合によるものであるが、例えば矢野らは、前庭迷路系と視覚情報が異なる場合、視覚情報が優位に働くことを報告している [1]。

第 2 に、重心動揺検査は臨床医学分野で使われ、疾患診断や心理学的検査などにも適用の幅が広がられている[2]。医学分野では両足直立での検査が一般的であるが、本稿では感度を上げるため片足直立を用いる。

第 3 に、重心動揺検査は、安価で容易であり、被験者は、重心動揺計上に直立するだけなので負担が少ない。

### 1.3 関連研究

平衡を指標として HMD に必要な解像度を算出した例がある。三輪ら[3]は、いくつかの画素を同じ色に揃えて擬

似的に大きな画素を作り、サイズを変化させて被験者実験を行った。その結果、COP の平均速度は HMD の換算視力[4]の対数に比例していること、それが裸眼状態に換算視力 0.66 で匹敵し、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。その後尾山ら[5]は類似の実験を行い、描画過程にアンチエイリアシングを加えることで、[3]と比べて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]であれば現実空間での平衡と同じ能力が得られるとし、平衡が向上したのは、ジャギーの変化による見かけの運動が減ったためであるとしている。

### 1.4 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、空間周波数帯域は狭くなる。それとともに、ジャギーや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(本論文ではこれらのレンダリングの副産物を広義のジャギーとして表現する)。本研究では、解像度の品質によって変化するパラメータがどれだけ人間の平衡に影響があるのかを調べる。

## 2. 実験 A

### 2.1 実験概要

2つの実験 A-1, A-2 を行なった。実空間を撮影した画像を、仮想空間における被験者視点から距離 1.5[m]のところに、水平画角 180[deg]、垂直画角 53[deg]の範囲で円筒状に配置し、HMD を用いて提示した。実験 A-1 では、テクスチャ画像をあらかじめ加工することで空間周波数

帯域を制限し、帯域制限とユーザーの平衡の関係を調べた。実験 A-2 では、レンダリングの際、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、解像度を下げた。擬似画素の色はHMDの解像度でレンダリングした画像から単純にサンプリングして決定した。これにより、空間周波数帯域制限とともに、ジャギーが提示画像に表れる。図 2.1 にテクスチャの配置と提示画像を示す。

## 2.2 実験環境

HMDにはOculus Rift DevelopmentKit 2(OculusVR社, 単眼解像度 960×1080[pix]) (以下 DK2 と呼ぶ) を使用し, PC(Windows10 Home, Intel Corei5-7500 CPU 3.4GHz, 16GBRAM)により駆動した。重心動揺計(バランス Wii ボード, 任天堂社)からPCはBluetoothにより周期 50Hz で連続的に重心位置を記録した。

研究室内の風景を XPERIAX Performance (SONY 社) のメインカメラ(センサ:Exmor RS formobile, レンズ:G)に REYNOX 社のワイコン DCR-731(対角倍率 0.71 倍, 水平倍率 0.75 倍)を取り付けて撮影し, 複数枚の画像をステッチングすることで, 水平画角 180 度のパノラマ画像を作成した。画像は各被験者の身長にあわせて仮想空間内の視点位置が実空間のそれと同等になるよう設置した。

## 2.3 提示画像

円筒に張り込むテクスチャ画像に周波数帯域制限を行うため, ガウシアンブラーを用いた。これはガウス分布に従うカーネルと原画像を畳み込み積分してボケを付加する方法である。x[pixel]は当該画素からの距離,  $\sigma$  [pixel]はガウス分布の広がりを示す標準偏差とすると, カーネルは,

$$f(x, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.1)$$

ガウス関数のフーリエ変換はガウス関数であり, 周波数特性は右肩下がりのローパスフィルターとなる。

標準偏差  $\sigma$  が大きくなるほど, 平滑化の効果も大きくなる。また, ガウス関数のフーリエ変換もまたガウス関数であり, 周波数特性は右肩下がりのローパスフィルターとなる。画像の空間周波数の単位は, 1 度あたりに表現できる白黒のパターンの本数(cpd:cycle/degree)で表す。

ガウス関数のフーリエ変換もまたガウス関数である。空間(角)周波数  $\omega$  [rad/pix]として, コントラストゲイン F は,

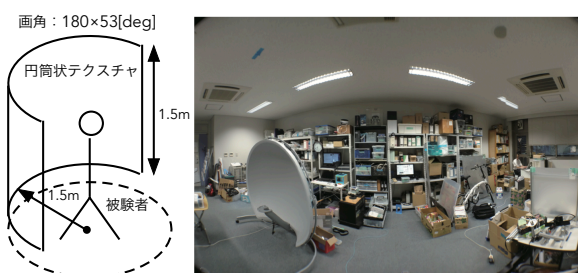


図 2.1 : 仮想空間内の配置と使用した風景テクスチャ

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\omega^2 \sigma^2}{2}\right) \quad (2.2)$$

となる。

本論文では, コントラストが最大値の 1/2 となる時点のカットオフ周波数  $\omega_c$  [rad/pix]とした。DC 成分のゲインは  $F(0)=1/\sqrt{2\pi}$  であるから,  $F_c(\omega)=1/2\sqrt{2\pi}$  より,  $\omega_c = \sqrt{-2\ln(1/2)}/\sigma$  となり,

$$F_c(\omega) = \frac{1}{2} F_{max}(\omega) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \quad (2.3)$$

サイズ D[pixel], 視角:A[degree]の画像の場合, 1 度あたりの画素数 D/A[pix/degree]から, 視角を単位としたカットオフ周波数  $f_c$  [cpd]は,

$$f_c = \frac{\omega_c D}{2\pi A} = \frac{\sqrt{-2\ln\left(\frac{1}{2}\right)} D}{2\pi\sigma A} \quad (2.4)$$

である。

実験 2 では実験 A-2, B-2 では, 画像の周期の定義を 2 画素で 1 周期であるとしてカットオフ周波数を求めた

## 2.4 実験手順

被験者は, DK2 と外音遮断のためホワイトノイズを流したヘッドフォンを装着して重心動揺計の中心に, 靴下を着用して利き足で片足直立する。眼鏡をかけている被験者は, 装着するか否かを決め, 全ての実験を同じ視力で行った。被験者の片足直立の安定を判断する合図により 30 秒間の計測を行なった。軸足の移動や軸足以外の接地がみられた場合, 計測を終了した。各被験者ごとにランダムな順序で試行を 1 回ずつ行い, 被験者が疲れや酔いを感じた場合, 十分な休息をとった。

得られた COP 軌跡から, 総軌跡長を求め, これを計測時間で除すことにより平均 COP 速度(単位時間軌跡長)を算出した。この値が小さいほど平衡は保たれている。

## 2.5 実験 A

実験 A-1,A-2 の試行パターンを表 2.1 に, 被験者に提示した画像例を図 2.2 に示す

### 2.5.1 実験 A-1 (帯域制限)

被験者は 20 代 13 名である。結果を図 2.3 に示す。Holm 法による多重比較を行なった結果, 各試行間に有意差は見られなかったが, カットオフ周波数 0.228~0.114[cpd]間において重心動揺が増加した傾向がみられた。この周波数は現在の HMD の性能を下回る。

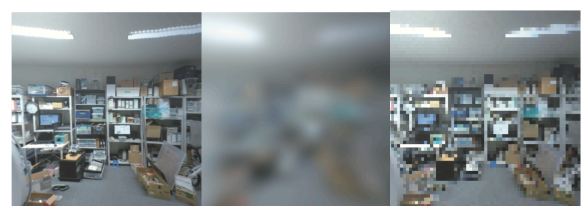


図 2.2 : 実験 A: 被験者からみた仮想空間(左:5[cpd], 中央:0.333[cpd], 右:0.0570[cpd])

表 2.1 : 実験 A の試行パターン

実験 A-1		実験 A-2	
標準偏差 σ[pixel]	カットオフ 周波数 [cpd]	1 画素あたり のピクセル数 [pixel]	カットオフ 周波数 [cpd]
3	1.83	1×1	5.00
6	0.913	3×3	1.67
12	0.457	4×4	1.25
24	0.228	5×5	1.00
48	0.114	6×6	0.500
96	0.0570	7×7	0.333

### 2.5.2 実験 A-2 (ジャギー)

被験者は 20 代 12 名である。結果を図 2.4 に示す。この実験では、画像の周期の定義を 2 画素で 1 周期であるとし、式 2.3 よりカットオフ周波数を求めた。Holm 法による多重比較の結果、5.00[cpd]-0.333[cpd]、5.00[cpd]-1.00[cpd]、1.67[cpd]-0.333[cpd]、5.00[cpd]-0.500[cpd]間に有意差がみられた。

### 2.6 実験 A の比較

実験 A の比較を図 2.5 に示す。実験 A-2 では実験 A-1 より広帯域な状態から重心動揺が増加し、ジャギーの運動が人間の平衡を悪化させることを示した。周波数帯域制限が平衡を悪化させるのは、0.1[cpd]付近以下であるから、概ね 0.1[cpd]から 3[cpd]までの両者の乖離は、ジャギーに

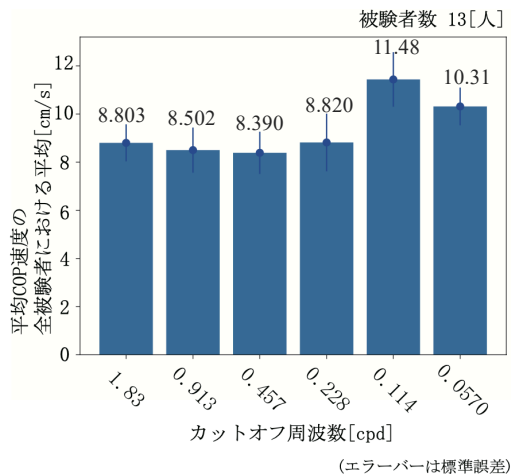


図 2.3 : 実験 A-1 の平均 COP 速度の平均値

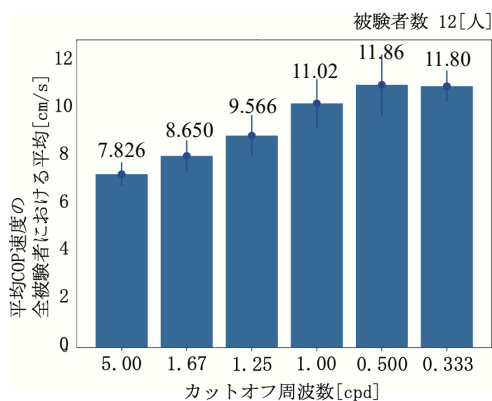


図 2.4 : 実験 A-2 の平均 COP 速度の平均値

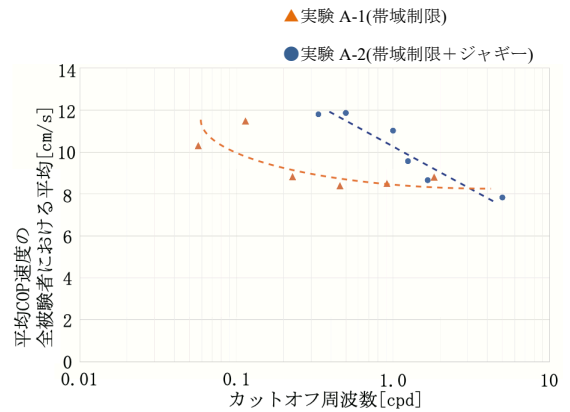


図 2.5 : 平均 COP 速度の全被験者における平均の比較

よるものと考えられる。また、両者の近似曲線は、約 3[cpd]で交わっているため、この周波数以上ではジャギーの影響は軽微であると考えられる。実験 A-2 において画素が小さくなると、ジャギーは発生しているが幅は概ね 1 画素であり、面積は小さくなり、この交点付近では視認できてはいても、平衡を悪化させる力はないのであろう。人間の平衡で評価するならば、カットオフ周波数 3[cpd]程度が、人間の受容を満たす解像度であるといえる。これは、画角 100 度の HMD においては 600 画素程度に相当する。

## 3. 実験 B: コンテンツを BlockRoom に変更

### 3.1 実験概要

比較のため、実験 A と同じ実験 B を、コンテンツを先行研究で使用されていた市松 BlockRoom を撮影した画像に変更して行った。実験に用いた仮想空間の環境を図 3.1 に示す。画像は Unity で構築した市松 BlockRoom を視線を 1 度づつ回転させながら描画した結果から切り出した 1 度幅の縦長ストライプを張り合わせて生成した。ただし垂直画角は 120[deg]と実験 A よりも広い。また、実験手順はそれぞれ実験 A と同じとし、試行パターンを表 3.1 に示す。

### 3.2 実験結果

被験者は実験 B-1 が 13 名、実験 B-2 が 12 名である。結果を図 3.2~3.3 に示す。また、Holm 法による多重比較の結果、実験 B-1 では 0.913~0.0570[cpd]間、実験 B-2 では 3.20~0.500[cpd]、1.25~0.500[cpd]間に有意差がみられた。

### 3.3 考察

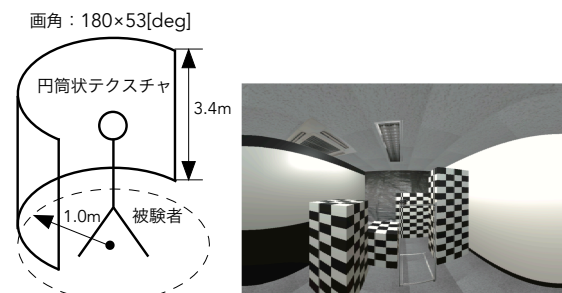


図 3.1 : 仮想空間内の配置と使用した風景テクスチャ

表 3.1 : 実験 B の試行パターン

実験 B-1		実験 B-2	
標準偏差 $\sigma$ [pixel]	カットオフ 周波数 [cpd]	1 画素あたり のピクセル数 [pixel]	カットオフ 周波数 [cpd]
0.657	1.83	1.56×1.56	3.20
1.314	0.913	3×3	1.67
2.628	0.457	4×4	1.25
5.256	0.228	5×5	1.00
10.512	0.114	10×10	0.500
21.024	0.0570	15×15	0.333

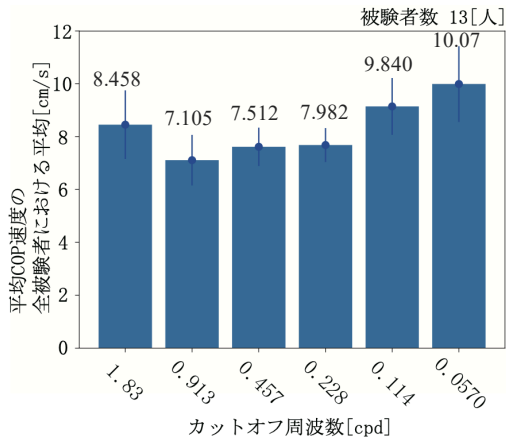


図 3.2 : 実験 B-1 の平均 COP 速度の平均値

実験 B の結果を図 3.4 にまとめた。近似曲線の交点は、カットオフ周波数約 3.0[cpd]付近で交わる。これはジャギーに関して人間の受容を満たす解像度はカットオフ周波数 3.0[cpd]程度であるという考察の裏付となる。

コンテンツの違いが重心動揺に与える影響を有意水準 0.05 の t 検定により求めた結果、実験 A-1, B-1 の有意差はなかったが、実験 A-2, B-2 では、カットオフ周波数 1.25[cpd], 1.00[cpd]で有意差がみられ、コンテンツの違いにより重心動揺が変化する可能性を示した。1.57[cpd]を除いて BlockRoom 画像のほうが重心動揺は小さかったが、これはコントラストの強さ、水平垂直方向のエッジの明瞭さによる視覚の手がかりが豊富なためと考えられる。

#### 4. 結論

以下の 3 点が判明した。

1 点目は、空間周波数帯域制限で重心動揺は増加するが、低いカットオフ周波数(0.228~0.114[cpd])の場合のみであり、現在の HMD による平衡への影響はないだろう。

2 点目は、解像度性能において、空間周波数帯域よりジャギー量が重要であるといえることである。実験で得た値の近似曲線より、人間の受容を満たす解像度はカットオフ周波数約 3.0[cpd]であった。

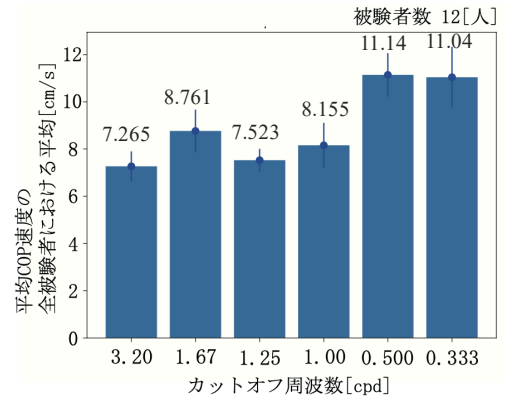


図 3.3 : 実験 B-2 の平均 COP 速度の平均値

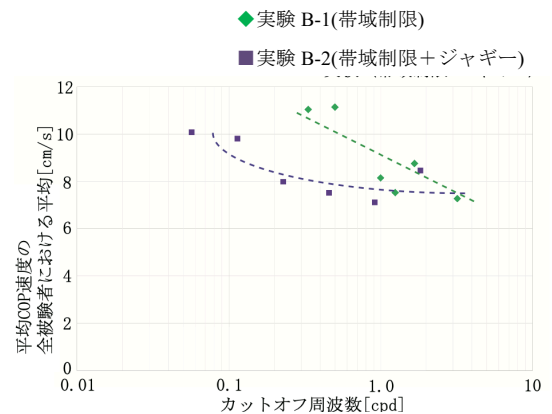


図 3.4 : 平均 COP 速度の全被験者における平均比較

3 点目は、コンテンツの違いによって実験結果の傾向は変わらないが、重心動揺の分量は変化することである。比較のためには、標準的なコンテンツが必要である。

#### 参考文献

- [1] 矢野澄男, 清水俊宏: 覚情報による身体動揺-臨場感の計測-, 会誌「光学」30 巻 5 号, pp.316-322, 2001.
- [2] 山本昌彦, 吉田友英: 6.重心動揺計を用いた体平衡機能検査-重心動揺検査・電気性身体動揺検査-, Equilibrium vol.70(3), pp.135-144, 2011.
- [3] 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.
- [4] 前田太郎: 知覚系の支視点から見た HMD/HMD の処方箋~含 有成分と使用上の注意, 日本バーチャルリアリティ学会 vol.3 no.2, pp.119-125, 1998.
- [5] 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.