



# 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推定 -

三輪光一郎<sup>1)</sup>, 木島竜吾<sup>2)</sup>

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

**概要:** 頭部搭載型ディスプレイを使った VR 体験で高い臨場感を得るには, 現実同等の高い解像度で映像を提示する必要がある. しかし, 現行の HMD ではそれを満たすことは不可能である. ではどれほどの解像度があればユーザーは満足できるのだろうか. 本研究では, 仮想空間と実空間で人が同じようにふるまうことのできる HMD の解像度をユーザーの平衡を指標に求めた.

**キーワード:** 頭部搭載型ディスプレイ 解像度 重心動揺 忠実度

### 1. はじめに

#### 1.1 研究背景

近年, 仮想現実感 (Virtual Reality : VR) が話題になってきている. その理由のひとつとして, 安価で VR 体験ができる頭部搭載型ディスプレイ (Head Mounted Display : HMD) が普及したことがあげられる. VR 体験の上で HMD の役割は, 高い臨場感を使用者に与えることである. HMD の性能で臨場感を生み出す要素として, 解像度が挙げられる. [2] 360 度を見渡せる HMD は空間固定型ディスプレイと比べ, プレやぼけが目についてしまう. そのため, 高い臨場感を得るには, 使用者に対し現実同等の映像を提示する必要がある.

#### 1.2 関連研究

ディスプレイの解像度が人間に与える影響として, 空間固定型ディスプレイについては既に調べられている. その中で, 畑田氏は視覚機能への負担が少ないとされている視距離 (2m 以上) を確保した状態で, 高い臨場感を生み出す最低条件として画素ピッチ視角 30 秒が必要であると報告している. [3] これを現在主流とされている HMD の視野角 (対角画角 100[deg/eye]) のディスプレイに画素を配置すると, 7973×8969[px/eye] となる. しかし, これほどの解像度を有する HMD は今のところ実現不可能である.

#### 1.3 物理忠実度と受容忠実度

HMD の性能評価として, 仮想空間から感覚器への刺激を与える HMD 等の装置を, 仮想空間から情報を得るシステムだと考える. このシステムが仮想空間の情報を人に忠実に伝えることができれば, 人は現実と同じように刺激を受けることができる. 人が現実から受容する感覚器入力 ( $V$ ) と, システムから受容する感覚器入力 ( $V'$ ) がどの程度同一であるかを物理忠実度 ( $V'/V$ ) (図 1) と呼ぶ. この物理忠実度を 1 にすることができれば, 人は実空間と仮想空間

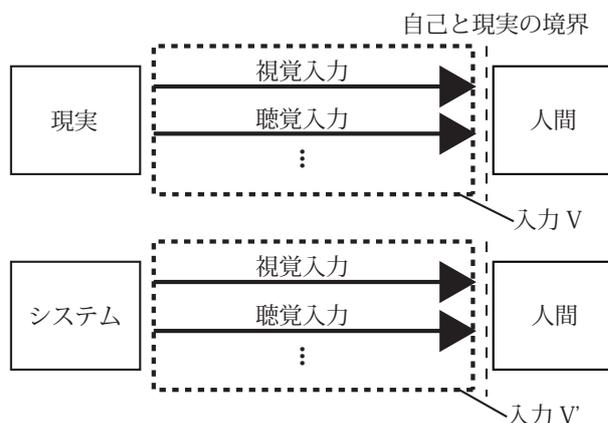


図 1: 現実とシステムを通じた仮想空間から人が受ける刺激の枠組み

の区別がつかなくなる.

しかし, 今現在仮想空間を提示するシステムの物理忠実度を 1 にすることは不可能である. そのため, 現実とは異なる刺激をシステムから受けた場合, 人は現実とは異なる内部状態を生じる. ここで, 実空間から刺激を受けた人の内部状態 ( $S$ ) とシステムを通じた仮想空間から刺激を受けた人の内部状態 ( $S'$ ) がどれほど同一であるかを受容忠実度 ( $S'/S$ ) と呼ぶ. この受容忠実度が 1, つまり感覚器入力人が人の感覚受容の限界以上であれば, 物理忠実度を満たしていなくても人は実空間と仮想空間の区別がつかなくなる. 需要忠実度を 1 にすることは, 物理忠実度のそれより遥かに満たされやすい基準である.

#### 1.4 重心動揺

人の内部情報を直接把握することはできない. そのため, 本研究では人間の平衡を指標とし, 重心動揺を用いることとした. 理由として, 人の平衡感覚は視覚情報に大きく影響される. [4] そのため, HMD の映像の影響が重心動揺に表れやすいと考えた. また, 重心動揺の計測として, 足圧

中心 (Center of Pressure : COP) の計測を行う。COP の計測は環境の構築と計測が容易であり、これまでの重心動揺検査にも COP の計測が用いられてきた。[5]

### 1.5 本研究の目的

人間の受容を満たすディスプレイの解像度は、テレビのように空間固定型で視角の狭いものについては検討されているが、HMD に関しては未だ明らかにされていない。そのため、本研究では、HMD の解像度によって人間の内部状態が変化するか明らかにすることを目的とし、人間の受容を満たす HMD の解像度を明らかにする。内部状態を観察する指標として人間の平衡をとりあげ、重心動揺の計測により調べる。

## 2. 実験

### 2.1 実験環境

実験に用いた環境概要を図 2 に示す。

本研究では Oculus VR 社の Oculus Rift Development Kit 2(以下 DK2 と呼ぶ：図 3) を使用した。DK2 の単眼解像度、単眼画面角は  $960 \times 1080$ [px/eye],  $100$ [deg] であり、これは現在家庭用 HMD として販売されている他製品と比べたとき、標準的な値だといえる。また、DK2 と同じ視野角をもつ視野制限眼鏡を作成した。外観を図 3 に示す。視野制限眼鏡には DK2 の外枠をそのまま使用し、DK2 と同じ質量となるように眼鏡上部におもりを取り付けた。この眼鏡を被験者に着用してもらうことで DK2 から仮想空間を見たときと等しい感覚で現実空間を見ることが出来る。

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 の周期で連続的に重心位置を記録した。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考慮した。



図 2: 実験環境



図 3: Oculus Rift DK2(左) 視野制限眼鏡 (右)

被験者に提示する映像として、見た目が限りなく同一な空間 (以下 Block Room と呼ぶ) を実空間と仮想空間に用意した。Block Room には、被験者が空間把握できるようにするため、ブロックのメッシュが視野の広範囲に映り込み、ブロック同士の重なりがあるよう設計した。

### 2.2 解像度を下げる手法

解像度の変更には、目的の解像度に沿って一定領域の左上 1 ピクセルをその領域内に拡大することによりモザイク処理をかけた。また、モザイク処理を施す際に、通常の DK2 とは、

1. クロマ補正をかけていない
2. 1 フレームの遅れが生じる

という違いが生じた。

1 について、表示素子の映像はレンズを通して目に入射するのだが、レンズの色収差を事前に補正するため、ディスプレイに出力される映像はクロマ補正がかけられている。クロマ補正がかかっている場合、左上の 1 ピクセルの色情報が意図していないものになる場合がある。これを回避するため、クロマ補正がかからないよう変更した。

2 について、本実験では、1 フレーム前の画像を取り出して、これにモザイク処理をかけて表示している。そのため、仮想空間の映像には DK2 の基本性能である約  $1$ [ms] の遅れに加え、1 フレーム (約  $13.3$ [ms]) の遅れがある。

### 2.3 実験手順

図 2 に示した通り、被験者に DK2 もしくは視野制限眼鏡を装着してもらい、裸足で重心動揺計に正面を向き単脚直立をしてもらった。単脚直立時の軸足は、各被験者ごとに利き足で行う。眼鏡をかけている被験者には、眼鏡を装着して実験を行うか、着脱して実験を行うかあらかじめ決めてもらい、各被験者ごとに同じ視力で計測を行った。

重心動揺の計測は、被験者が単脚直立になった状態で安定したと判断した際に合図をもらうことで開始し、30 秒間で計測を終了した。被験者の転倒や軸足の移動、軸足以外の箇所の接地が生じた際には、それらを転倒とみなし、その時点で計測を終了した。各被験者に対し全ての試行を 1 度ずつ計測した。この時、被験者が疲れや酔いを感じた場合、十分な休息をとった。また、被験者ごとにランダムな順序で試行を行うことで、慣れや疲れの影響が実験結果に表れないよう考慮した。

## 2.4 評価手順

重心動揺の計測により COP の軌跡を得ることができる。本研究では 50Hz の周期で計測される 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

実験では、表 1 に示す 8 つの試行を行う。HMD は全て DK2 を使用し、仮想空間のコンテンツには Block Room, 実空間は視野制限眼鏡を通した Block Room に統一した。Real は実空間で視野制限眼鏡を装着した状態、Close は DK2 を被り、閉眼状態の重心動揺を測定した。実際に被験者に提示した DK2 の映像例を図 4 に示す。

表 1: 実験の試行パターン

試行名	DK2 の解像度	換算視力 [6]
Real		
1/1	960×1080[px/eye]	0.240
1/9	320×360[px/eye]	0.080
1/25	192×216[px/eye]	0.048
1/100	96×108[px/eye]	0.024
1/225	64×72[px/eye]	0.016
1/400	48×54[px/eye]	0.012
Close		

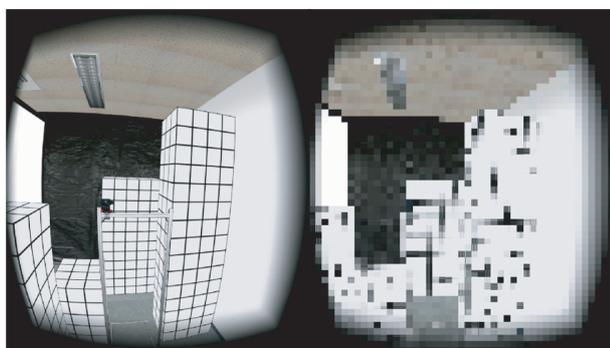


図 4: 解像度の違う仮想空間の Block Room (1/1(左)1/400(右))

被験者は 20 代 13 名である。結果を図 5, 表 2 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、Real は他の試行

すべてと有意差があった。また、Close は 1/25 から 1/400 には有意差がなかった。

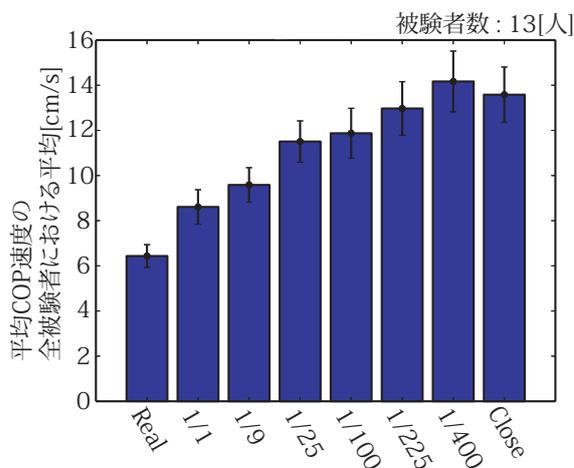


図 5: 試行パターンと平均 COP 速度の平均値

表 2: 実験: 試行パターンと平均 COP 速度の平均値

	平均値 [cm/s]	標準偏差
Real	6.43	1.82
1/1	8.61	2.75
1/9	9.58	2.75
1/25	11.5	3.30
1/100	11.9	3.99
1/225	13.0	4.28
1/400	14.2	4.85
Close	13.6	4.42

## 3. 議論

実験結果から判明したのは以下の 3 点、

1. HMD の解像度を下げていくとそれに伴い重心動揺（平均 COP 速度）は単調に増加する
2. 極端に解像度の低い HMD (64×72[px/eye] 以下) と閉眼の重心動揺に大きな差がみられない
3. DK2 (960×1080[px/eye]) の性能では受容忠実度を満たすことができない

である。

1. について、実験を行った 960×1080[px/eye] から 48×54[px/eye] 間では、解像度を下げると重心動揺は増加した。つまり、HMD の解像度は重心動揺に影響を与えることがわかる。これらを実空間での重心動揺と比較した場合、解像度が下がると受容忠実度も下がることがわかる。

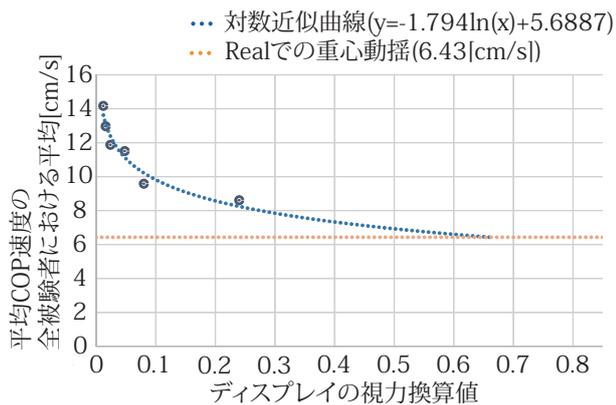


図 6: ディスプレイの視力換算値と平均 COP 速度の平均値

2. について, 1/25 から 1/400 では Close との有差が見られなかった. 1.5 節にある通り, 人間は映像の傾きを検知することで反射的に重心を保つことができる. その報告からすると, 視覚情報が得られない状態 (閉眼) との有差がない場合, 映像の動きや傾きが知覚できていないと考えられる. 人が視覚情報の動きを知覚するには  $192 \times 216$  [px/eye] 以上の解像度が必要である.

3. について, 1/1 と Real を比較したときに, 有意差があるのは, DK2 の解像度が人間の受容を満たしていないためだと考えられる. もちろん, 人間の受容を満たしていない要因は解像度だけではなく, 映像の遅れもあげられる [5]. しかし, 解像度が受容忠実度に大きな影響を与えているのは確かである. よって, 受容忠実度を満たすために必要な解像度を求める.

図 6 に, HMD の換算視力と平均 COP 速度をプロットし, x 軸方向の対数近似曲線を示す. この近似曲線を延長し, Real の平均 COP 速度の平均値である  $6.43$  [cm/s] となる視力および解像度を求めると, 視力  $0.66$ , 解像度  $2631 \times 2960$  [px/eye] となる. (対角画角  $100$  [deg/eye]) よって, 解像度  $2631 \times 2960$  [px/eye] の HMD が受容忠実度を満たすために必要であると考えられる.

## 4. 議論

### 4.1 結論

本論文では, HMD の解像度によって受容忠実度にどのような影響があるのかを重心動揺の計測を用いて明らかにした. Oculus Rift DK2 の性能である,  $960 \times 1080$  [px/eye] から, 解像度を 1/400 まで落とした  $48 \times 54$  [px/eye] の範囲で計測を行った. 結論, HMD の解像度が人間の重心動揺に影響をあたえること, 受容忠実度を満たすことができる HMD の解像度 ( $2478 \times 2974$  [px/eye]) が明らかになった. 後者においては, 空間固定型ディスプレイで臨場感を与えるとされている解像度とは異なる値であった. これにより, 現在の高性能とされる HMD でも受容忠実度を満たすことのできる解像度を持たないことが明らかとなった.

### 4.2 今後の展望

HMD の解像度は人間の平衡に影響を与えることが明らかとなった. さらに, HMD の受容忠実度を満たすことのできる解像度が明らかとなった. これは, 空間固定型ディスプレイの指標と比べた場合に大きく異なる. この解像度が HMD の品質評価の指標として利用されることが期待できる.

### 参考文献

- [1] 広瀬通孝: パーチャル・リアリティ, 産業図書, 2003.
- [2] 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.
- [3] 畑田豊彦: マルチメディアと視覚特性, 日本写真学会誌, pp. 173-178, 1996.
- [4] 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.
- [5] 河邑壮馬: 頭部搭載型ディスプレイが人間の平衡に及ぼす影響, 岐阜大学大学院工学研究科応用情報学専攻修士論文, 2016.
- [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.