



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

Effects of HMD resolution and aliasing on user's balance

尾山拓也¹⁾, 木島竜吾¹⁾

Takuya OYAMA, Ryugo KIJIMA

1) 岐阜大学 自然科学技術研究科 (〒 501-1193 岐阜市柳戸 1-1, y4525023@edu.gifu-u.ac.jp)

概要: 頭部搭載型ディスプレイの画素サイズを変更してユーザーの重心動揺を計測した。解像度が減ると人間の平衡は悪化した。この原因を探るため、周波数帯域制限以外の要因のうち、影響が大きいと考えられるエイリアシングによるモアレの運動の影響を明らかにした。これをもとに人間の平衡が実空間にいるときと等しくなるために必要とする解像度の推定を行った。

キーワード: HMD, 視覚, 感覚・知覚

1. はじめに

1.1 研究背景

頭部搭載型ディスプレイ (Head Mounted Display:HMD) は、仮想空間を視覚的に提示する装置である。ユーザーに高い没入感を与える上で HMD の性能は非常に重要であり、その中でも HMD の解像度はいまだ十分ではないと考えられる。必要な解像度、つまりユーザーが裸眼と区別がつかないだけの解像度については、主に分解視力の観点から議論がある [1]。本稿では、ユーザーの平衡という観点から、必要な解像度について検討する。

1.2 物理忠実度と受容忠実度

実空間がユーザーに与える物理刺激 (V) と HMD がユーザーに与える物理刺激 (V') が、どの程度同一であるかを示す指標を物理忠実度 (V'/V) とする。物理忠実度=1 であれば、ユーザーは実空間と仮想空間の違いを認識できない。しかしながら物理忠実度 1 を目標とするのは過剰である。人間の弁別能や可聴域などには限界があり、それを超える情報は必要ないからである。

物理刺激の提示により、人間の内部状態は変化する (図 1)。その一部が知覚であるが、意識にのぼらない内部状態もある。実空間におけるユーザーの内部状態 (S) と HMD によってユーザーに引き起こされる内部状態 (S') についてどれほど一致しているかを表す指標を受容忠実度 (S'/S) とする。受容忠実度=1 であればユーザーは実空間と仮想空間の違いを認識することができない。これは物理忠実度=1 を満たすことよりはるかに容易である。

1.3 重心動揺

人間の内部状態そのものを直接計測することはできないため、外部からとらえうる指標を介して計測を行う必要がある。本研究では、その指標として人間の平衡に注目し、重心動揺により評価する。HMD が他のディスプレイと大きく異

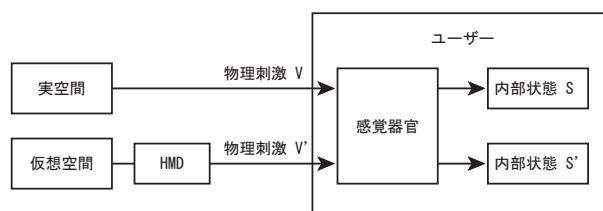


図 1: ユーザーが受ける物理刺激

なる点は、ユーザーが身体性を保持したまま仮想空間に入れるという点である。つまり運動視を高精度に再現することにより、ユーザーは実空間に居る時と同じように、動き回りながらものを見ることができる。

人間は自己運動の結果変化する視覚刺激を手掛かりの一つとして姿勢を保っている。したがって運動視の再現精度が低ければ平衡は悪化するだろうと考えられる。重心動揺を計測する理由は、それが HMD 特有の運動視の精度を反映するだろうと考えるからである。

本研究では、医学分野における身体動揺検査で用いられる足圧中心 (Center of Pressure:CoP)[2] を測定し、一定時間の CoP の軌跡長のかわりに、時間あたりの軌跡長さつまり CoP 平均速度により評価する。

1.4 アンチエイリアシング

アンチエイリアシングは画像のジャギーを軽減する処理である。3DCG の分野においても広く使われている手法であり、これによって解像度を上げることなく高い品質の映像を生成することができる。

1.5 先行研究

本論文の直接的な先行研究は三輪による実験である [3]。部屋の中にブロックを複数個配置したコンテンツを用意し、そのコンテンツの解像度を変更して重心動揺にどのような

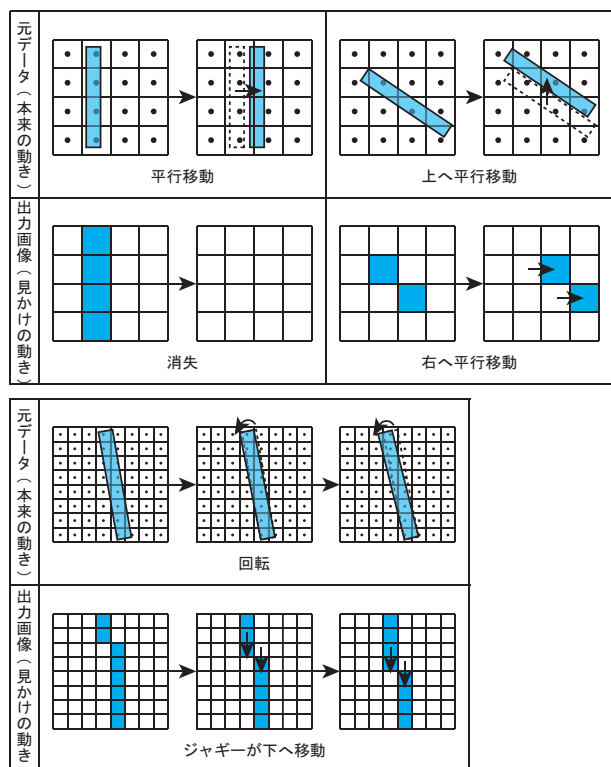


図 2: 見かけの動きが発生する例

影響を与えるか調べた。仮想空間および比較のための実空間には、BlockRoom[4] とよばれる格子状のメッシュが描かれたブロックを積み上げた空間を構築し、レンダリングされた画像からポイントサンプリングした色で矩形の画素領域を塗りつぶすことにより、擬似的に大きな画素を作り解像度を下げている。

この手法の副作用は2つある。1つ目は、ブロックに描かれたメッシュ線は細く、ポイントサンプリングによりこの線がとり逃されれば、低解像度画像内では、とぎれとぎれの線画が表示されることである。2つめは、高い空間周波数成分を含む元画像から単純にサンプリングすることによる、エイリアシングの発生である。これは単にジャギーを生むばかりではなく、ユーザーの頭の動きによってジャギーが変化し、ジャギーがあたかも運動しているかのような表示を生じる。

本論文ではこれを「見かけの動き」と呼ぶことにする。見かけの動きが発生する例を図2に示す。本来は静止した世界を観察しているという実験の設定に、不要な見かけの動きが加わり、それによりユーザーの姿勢が影響を受けている可能性がある。[3]では1画素の視角の対数と、重心動揺指標であるCoP速度が負の比例関係にあると結論づけ、その延長線と実世界を裸眼で観察している場合のCoP速度の交点が、重心動揺の観点から見て必要なHMDの解像度であるとしている。上記の副作用によりユーザーの平衡が不当に悪化していたとすれば、必要な解像度はより低くなる可能性がある。



図 3: 実験環境 (左) と仮想空間上の市松 Block Room(右)



図 4: Oculus Rift DK2(左) と視野制限眼鏡 (右)

1.6 研究の目的

本研究ではHMDの画素サイズを擬似的に変更し、解像度とユーザーの重心動揺の関係を調査する。これは運動視という観点から、解像度と受容忠実度の関係をもとめることに相当する。先行研究の欠点であった、ジャギーの「見かけの動き」を抑制するため、低解像度画像を生成する際にアンチエイリアシングを行い、その効果を確認する。最終的にはユーザーの受容忠実度を満たす解像度、つまり身体性保持に必要な解像度を算出する。

2. 実験

2.1 実験環境

実験環境の様子は図3の通りである。使用したHMDはOculusVR社のRift DK2(図4左)である。また、実空間を観察する際に視野角の差異や重量による影響を無くすために視野制限眼鏡(図4右)を使用した。視野制限眼鏡はDK2のディスプレイとレンズ部分を外して実空間が観察できるようにしたものである。視野制限眼鏡の上部に重りをつけ、DK2本来の重量に近づけてある。この視野制限眼鏡をつけて実空間を見ることは、性能が十分に高いHMDを使用した場合と同じである。

実験は市松BlockRoomと称する空間で行った。これは先行研究[3]で用いていたBlockRoomと同じように、テクスチャを貼ったブロックを複数配置したものであるが、[3]では白地に細い黒のメッシュを描いたテクスチャを使っていたのに対し、白と黒の割合が1対1の市松模様テクスチャに変更してある。被験者はHMDまたは視野制限眼鏡とヘッドホンを装着して重心動揺計に乗り、片足立ちを行った。

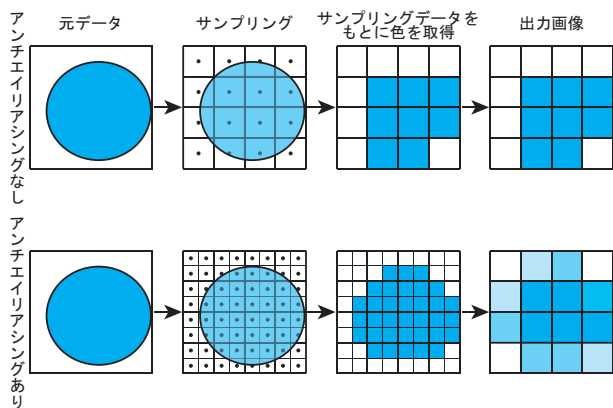


図 5: 解像度の変更及びアンチエイリアシングの手法

2.2 解像度とアンチエイリアシング

擬似的に画素サイズを拡大するために、HMDの画素数に合わせてレンダリングされた画像をシェーダーへ変更し、HMDに出力した。単純なポイントサンプリングでは、擬似画素の中央の色をサンプリングし、擬似画素全体を塗ることで、モザイク処理を行った。アンチエイリアシングをかける方法では、擬似画素を 2×2 の4つの小領域に分割し、それぞれの小領域の中心の点の色を取得し、それらの平均の色で擬似画素を塗りつぶした。つまり、 2×2 のMSAA (Multi-Sample Anti-Aliasing)を行った(図5)。

2.3 実験手順

被験者はHMDまたは視野制限眼鏡を装着し、重心動揺計の上で30秒間単脚直立を行った。測定中はホワイトノイズを流すことによって外音による影響を無くした。評価は、CoP総軌跡長を算出し、計測時間で除すことにより時間正規化を行い、平均CoP速度を算出した。この量の大きさが、重心動揺の大きさである。

2.4 実験：解像度とアンチエイリアシングの有無が重心動揺に及ぼす影響

被験者に提示した映像の例を図6に示す。面積解像度はDK2の実性能(960×1080 [pix/eye])を基準に1/1から1/100まで6段階用意し、それぞれの解像度に対してアンチエイリアシングの有無を用意した。面積解像度1/Nとは、擬似画素の大きさが実画素の \sqrt{N} 倍になっていることを意味する。また実空間を視野制限眼鏡をつけて提示する試行(real)と、閉眼で行う試行(close)を行った。各解像度を換算視力[5]として評価するため、以下の式により各面積解像度の換算視力を算出した(表1)

$$\text{換算視力} = \frac{1}{1 \text{ピクセルあたりの視角} [\text{min}]} \quad (1)$$

実験結果を図7に示す。全ての試行をHolm法により多重比較した結果、解像度の違いが平衡に影響を及ぼすことが確認された。また有意差は持たないが、アンチエイリアシングをかけることによって平衡が向上する傾向が見られた。

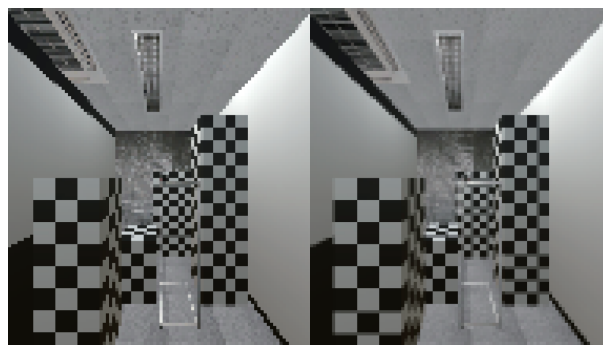


図 6: 提示する映像の例 (1/100(左)と1/100_AA(右))

表 1: 試行パターンと換算視力

試行名	解像度 [px/eye]	1[px] 当たりの 視角 [min]	換算 視力	アンチ エイリア シング
real				
1/1	960×1080	4.15	0.241	なし
1/1_AA	960×1080	4.15	0.241	あり
1/4	480×540	8.30	0.120	なし
1/4_AA	480×540	8.30	0.120	あり
1/9	320×360	12.5	0.080	なし
1/9_AA	320×360	12.5	0.080	あり
1/16	240×270	16.6	0.060	なし
1/16_AA	240×270	16.6	0.060	あり
1/25	192×216	20.8	0.048	なし
1/25_AA	192×216	20.8	0.048	あり
1/100	96×108	41.5	0.024	なし
1/100_AA	96×108	41.5	0.024	あり
close				

3. 議論

3.1 目標とされる解像度の算出

図8はx軸にHMDの換算視力の対数、y軸に平均CoP速度をプロットしたグラフである。点線は対数近似曲線である。アンチエイリアシングの有無にかかわらず、解像度を落とすと重心動揺が大きくなっていること、またアンチエイリアシングありの場合は、なしの場合よりも重心動揺が抑制され、グラフの高さが低くなっているが、両者の近似曲線はほぼ平行であることがわかる。対数近似曲線は以下の式であった。

$$y = -1.756 \ln(x) + 3.3641 \quad (2)$$

$$y = -1.731 \ln(x) + 2.9572 \quad (3)$$

受容忠実度=1であれば、重心動揺の大きさは実空間を観察した場合と等しくなる。従って図8のグラフと実空間を観察していたときの平均CoP速度 5.2907 [cm/s]が交わる点、受容忠実度=1となるHMDの換算視力である。アンチ

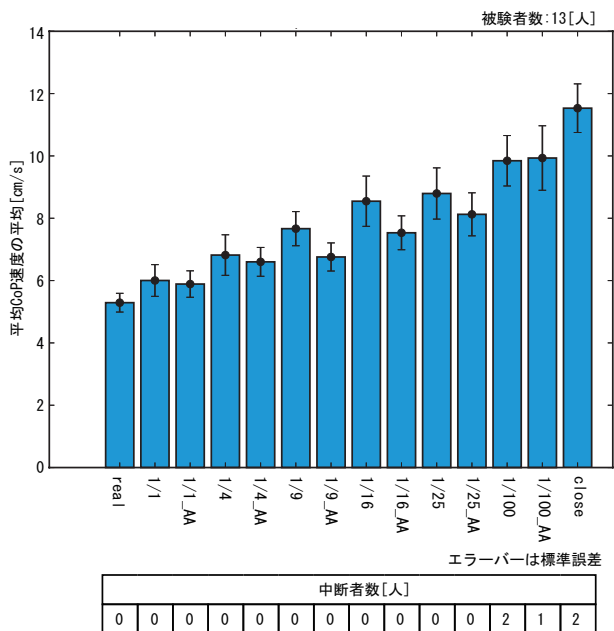


図 7: 試行パターンと平均 CoP 速度の平均値

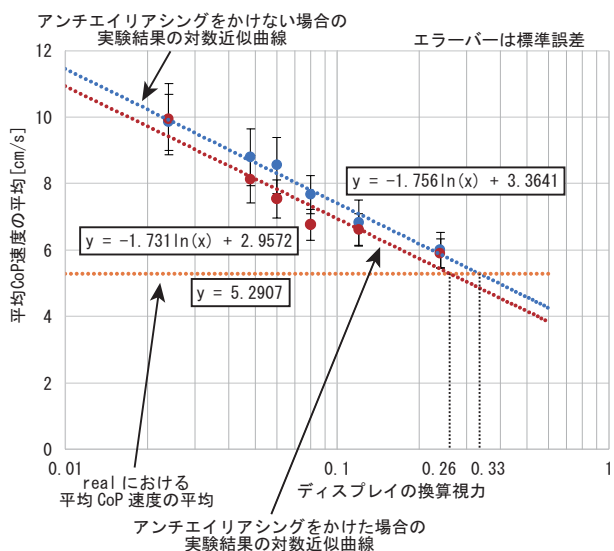


図 8: ディスプレイの換算視力と平均 CoP 速度の平均値

エイリアシングをかけなかった場合、この値は 0.33, かけた場合 0.26 となった。

3.2 アンチエイリアシングが平衡に及ぼす影響

単純なポイントサンプリングからアンチエイリアシングをかけた画像に変更し、HMD を装着して観察した結果、以下の改善が感じられた。

第 1 に、エッジ位置が正しく安定して表示されることである。アンチエイリアシングをかけない場合、エッジ付近の画素には黒から白への急激な変化つまり見かけのエッジが現れるが、その位置は画素の離散化により正しいものではない。この見かけのエッジは頭の動きにつれ、画素サイズ範囲で振動する。これに対しアンチエイリアシングをかけた場合には、エッジの本来の位置を概ね保つように色が数ピクセルに渡り段階的に変化する。エッジはその分不明瞭になるが、推測

されるエッジ位置は安定している。これにより被験者の平衡が向上したと考えられる。

第 2 に、ジャギーの見かけの運動が軽減されることである。擬似画素の大きさを増大させると、ジャギーが目立つようになるばかりでなく、頭部の小さな運動により、ジャギーがエッジに沿って高速に流れる現象が発生する。アンチエイリアシングにより、はっきりとした白黒のジャギーは、数ピクセルに渡る濃淡に軽減されるとともに、1 方向への流れは、完全に消えるわけではないが、相当軽減された。

アンチエイリアシングをかけたことで、重心動揺は小さくなったのであるから、ポイントサンプリングの場合には、被験者は不安定なエッジ位置やジャギーの見かけの運動に影響され、重心動揺はあるべき値よりも大きくなっていったと考えられる。したがって、解像度を議論する際には、ジャギーの見かけの運動は不純物であると考えてよく、アンチエイリアシングによって最大限除くべきであろう。

先行研究 [3] でも、上と同様の手順により必要な HMD の換算視力を求め、0.66 と結論づけている。これは細線を使ったコンテンツの場合、ジャギーの見かけの運動がより大きく、重心動揺がさらに不当に大きくなったためであると考えられる。従って、現時点の結果から、受容忠実度 1 を満たす HMD の換算視力は 0.26 であると結論づける。

4. 結論

受容忠実度の指標として、重心動揺つまり人間の平衡を取りあげ、HMD の解像度とエイリアシングがそれに与える影響を明らかにした。実験結果から受容忠実度=1 を満たすために必要な HMD の解像度を算出すると、アンチエイリアシングをかけない場合、換算視力 0.33, と算出されるのに対し、アンチエイリアシングをかけた場合、換算視力 0.26 であった。視野角 100[deg/eye] を仮定し画素数に換算すると、各々、1330 × 1497[pix/eye] および 1035 × 1165[pix/eye] であった。両者の差は、エイリアシングにより生まれるジャギーの見かけの運動の影響であると考えられる。

参考文献

- [1] 畑田豊彦：マルチメディアと視覚特性, 日本写真学会誌 vol. 59, no. 1, 1996.
- [2] 山本昌彦：重心動揺計の適応と実際, 日本耳鼻咽喉科学会会報, vol. 119 no. 7, 2016.
- [3] 三輪光一郎：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-, 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2018.
- [4] 河邑壮馬：HMD の遅れが人間の平衡に与える影響, 日本バーチャルリアリティ学会論誌, vol. 21, no. 1, pp. 101-108, 2016.
- [5] 前田太郎：知覚系の視点から見た 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.