



HMD の解像度品質がユーザの重心動揺に与える影響

-実時間レンダリングを用いた評価-

The effect of HMD's resolution on the user's body sway
- evaluation using realtime rendering -

浅野優¹⁾, 木島竜吾¹⁾

Yu ASANO, 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, z4525003@edu.gifu-u.ac.jp)

概要: 人間が仮想空間と実空間にて同様な体験をするためには、HMD の解像度は重要である。本研究では、解像度の変化がユーザの与える影響とそのメカニズムを、人間の平衡を指標として被験者実験により調査した。解像度の変化は、空間周波数帯域と副産物であるジャギーの運動を変化させる。解像度を低下させると、主にジャギーの運動が人間の平衡を悪化させることが判明した。

キーワード: HMD 視覚 感覚・知覚

1. はじめに

1.1 研究背景

仮想空間を提示するための装置として、頭部搭載型ディスプレイ (Head Mounted Display: 以下 HMD と記す) の性能向上は目覚ましいが、未だユーザは実空間と仮想空間を区別できる。つまり、HMD の性能は現実を十分模擬できるだけ高くはない。では、性能をどこまで上げれば十分なのかという問いに答えるのは容易ではないし、不十分な性能であってもどの程度の臨場感や没入感が得られるかについて十分に検討されているとは言えない。本稿では性能のうち解像度を取り上げるのだが、解像度が引き起こす現象のうち、ユーザはどのような手掛かりを用いて実空間と仮想空間を区別しているのかが明らかでなければならぬと考える。つまり、解像度の変化に伴って変動する因子の内、どの因子が大きく人間に影響を与えるのかを平衡という観点から検討する。

1.2 物理忠実度と受容忠実度

HMD の提示する仮想空間は、解像度やリフレッシュレート、視野角などの性能を上げることで実空間により近い視覚情報となる。そして仮想空間と実空間、それぞれの人間に与える物理刺激が現実のそれと全く同じになった場合、視覚において人間はそれらの区別がつかない。この状態を物理忠実度=1 とする。

$$\text{物理忠実度} = \frac{\text{仮想空間から受けた物理刺激}}{\text{実空間から受けた物理刺激}} \quad (1)$$

一方で、人間は提示される物理刺激を全て受容し利用しているわけではない。簡単な例としては、赤外線や超音波などの人間の知覚のできない情報は人間に影響を与えないことが挙げられる。逆に言うと、不完全な物理刺激であったとしても、人間が実空間から与えられる物理刺激と、提示されたその区別がつかなければ十分であろう。この状態を受容忠

実度=1 とする。例として解像度を取り上げる。人間の分解能で識別できる解像度には限りがあるため、分解視力と同程度まで HMD の解像度を上げれば、人間はそれらの区別がつかなくなるかもしれない。つまり、物理刺激は、人間の内部状態を変化させる。それが、感覚・知覚として意識に上るものもあるし、そうでないものもあるのだが、ここでは受容忠実度を次のように考える。

$$\text{受容忠実度} = \frac{\text{仮想空間にいる人間の内部状態}}{\text{実空間にいる人間の内部状態}} \quad (2)$$

人間の内部状態全てを計測することはできないので、現実的には、何らかの観察可能な指標を用いて受容忠実度を評価することになる。本稿では次に述べる重心動揺を指標とする。

1.3 重心動揺

人間の内部状態を測定する方法は様々なものがあるが、本研究では人間の平衡に着目し、重心動揺の計測を用いることにした。人間の平衡は内耳にある前庭器官によって得られる前庭感覚や、足裏から受容される体性感覚、視覚情報によって維持される。その中でも視覚情報は平衡を維持するために重要な役割を果たしている [1]。そのため、重心動揺を測定し各試行を比較することで、人間が受容する視覚情報の変化を評価することができる。さらに、重心動揺の測定は被験者にとって負荷が少ないこと、視誘導性自己運動感覚 (ベクシオン) の実験などでも重心動揺が計測されており、それらの知見と照らし合わせることが可能であること、といった利点もある。したがって、本研究では重心動揺の測定により、人間の内部状態を判別し、実空間と仮想空間がどれほど異なるのかを評価する。

人間の重心動揺を測定する場合、身体重心 (CoG: Center of Gravity) を測定することは困難であるため、一般的に足

裏の圧力中心 (CoP :Center of Pressure) を測定する [2]. 本研究においてもこの CoP を測定し, それにより重心動揺を評価する.

1.4 先行研究

三輪ら [3] は, ひとつかたまりにした画素を同じ色で塗ることで, より大きな仮想画素を作り出す手法を用いて疑似的に HMD の解像度を下げ, 被験者実験を行って重心動揺を計測した. 仮想画素サイズを大きくするほど, 重心動揺が大きくなることを見出した. この実験では, 大きな仮想画素の色は, 一旦 HMD の解像度でレンダリングした結果画像から仮想画素の中心にある画素の色を取り出すポイントサンプリングによって決定されていた. 画素が大きくなると, 表現できる空間周波数帯域は狭くなるのだが, ポイントサンプリングにエイリアシングつまりジャギーが発生し, 頭を動かしたときやオブジェクトが移動したときに, 本来とは異なる形状の画素が動いているように見える現象が生じる. 本稿ではこれをジャギーの運動と呼ぶ (図 1). すなわち, 平衡の悪化の原因は, 少なくとも提示周波数帯域の限定とジャギーの運動の 2 種類あると考えられる. 尾山ら [4] は, MSAA によるアンチエイリアシングを用いることでジャギーの発生を抑制して [3] と同様の実験を行い, 平衡悪化の程度が抑えられることを示した. これにより, ジャギーの運動は平衡悪化の原因の一つであることが判明したのだが, アンチエイリアシングでは完全にジャギーを抑制できないことから, 帯域制限とエイリアシングの寄与の度合いを評価するには至らなかった. シーンをレンダリングし表示するプロセスは, サンプル・アンド・ホールドの一種である. レンダリングつまりサンプリングの前にナイキスト周波数を超える帯域をカットすればジャギーの運動は消えるが, 表示つまり短径窓によるホールドによる折り返しにより, 再びナイキスト周波数を超える成分が現れる. これにより画素が大きければ, ユーザは画素の形を知覚することになる. この一種の網戸効果が平衡悪化に寄与している可能性もある.

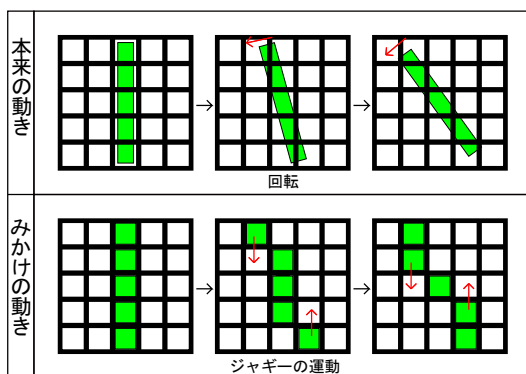


図 1: ジャギーの運動の例

1.5 本研究の目的

本研究では, 解像度変化の人間への影響を, 平衡を指標として評価し, 上で述べた 3 つの要因つまり空間周波数帯域制限, ジャギーの運動, 画素に形状があることの寄与を明らか

にする. 第 1 に, 仮想画素を使わず, FFT, iFFT により高解像度ながら帯域制限のかかった画像を提示することで, 純粋な帯域制限の影響を計測する. 第 2 に, 帯域制限を行なった上で大きな仮想画素形状を生成し, 実験を行う. 第 3 に, 仮想画素のレンダリングにポイントサンプリングを用い, エイリアシングつまりジャギーの運動が発生した状態での実験を行う.

2. 実験

2.1 実験環境

実験に使用する HMD は, Oculus VR 社の Oculus Rift DK2 を用いた (図 2). 実空間を観測する際には HMD の重量や視野角を再現するために, DK2 のディスプレイとレンズ部分を外し, 重りを取り付けて作成した視野制限眼鏡を用いた.

実験は市松 BlockRoom と称する空間で行った. 市松 BlockRoom は市松模様の直方体のブロックで構成されている空間である. コンテンツの違いによる重心動揺への影響を考え, 実空間と仮想空間に同様の空間を用意した. 重心動揺計には任天堂社のバランス Wii ボードを用いた.



図 2: Oculus DK2(左) と視野制限眼鏡 (右)

2.2 実験手順

被験者には HMD, または視野制限眼鏡を装着し, センサーの方向を向いた状態で重心動揺計の上に乗ってもらった.(図 3) 重心動揺実験は両足立ちで行うことが一般的だが, 視覚情報の変化による重心動揺への影響をわかりやすくするため, 片足立ちの状態での測定した. この時, 軸足は利き足で靴下は履いたまま行った. また, 眼鏡をかけている被験者は全ての試行で眼鏡をかけたまま行った. 周囲の音の影響を無くするため被験者にヘッドフォンを装着させ, 測定中はホワイトノイズを流し続けた. 計測は 30 秒間行い, 途中で被験者がバランスを崩して軸足が動いた場合, また 軸足以外の接地が見られた場合には転倒したとみなし, その時点で計測を終了した. 疲れや慣れの影響をなくするために各試行はランダムな順番で行い, 各試行間には 10 分以上の休憩をはさんだ.

2.3 評価方法

重心動揺を測定することによって, CoP 軌跡を得ることができる (図 4). CoP 軌跡長は, 重心動揺の影響を表す代表的な数値である. CoP 軌跡長を試行時間で割ることで CoP 速度が算出され, この大小が重心動揺の大小を表す.



図 3: 実験環境 (左) と仮想空間上の市松 BlockRoom (右)

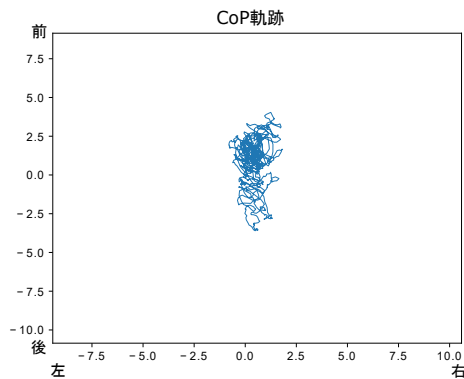


図 4: CoP 軌跡の例

2.4 実験 1: 提示空間周波数帯域の制限が重心動揺に及ぼす影響

HMD の解像度に合わせてレンダリングした画像を FFT により周波数領域の画像に変換し、高周波成分を除去し、iFFT により空間領域の画像に戻して提示した。つまり、画素数は HMD の画素数のまま、周波数帯域制限を行った。結果を図 5 に示す。グラフの横軸中で real は実空間を観測する試行、virtual は帯域制限を行わない HMD 本来の解像度による実験、他は空間周波数帯域の上限值 [cycle/deg] である。

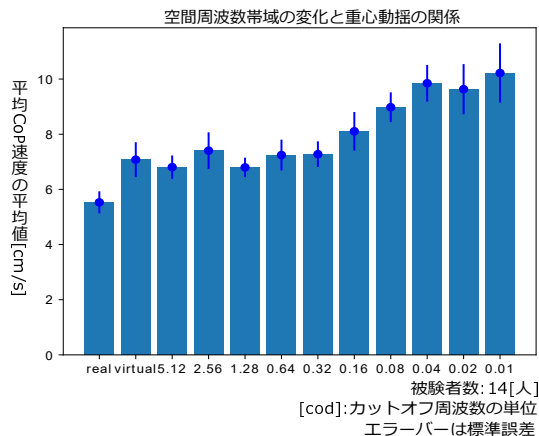


図 5: 実験 1 (帯域制限) の結果

2.5 実験 2: 解像度変化が重心動揺に及ぼす影響

実験 1 で生成した高解像度狭帯域画像をポイントサンプリングすることで、大きな仮想画素を提示し、解像度を疑似的に変化させた。これは画素の大きな HMD を持ち理想的なレンダリングを行った場合に相当する。面積解像度は DK2 の解像度 (960×1080 [pix/eye]) を基準に 1/1 から 1/100 まで 6 段階用意した。結果を図 6 に示す。グラフの横軸で、real は実空間を観測した際の重心動揺、他は HMD 本来の面積解像度に対する提示解像度の比である。

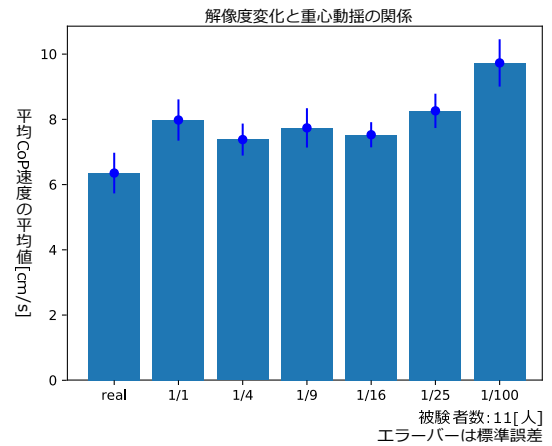


図 6: 実験 2 (画素サイズ, ジャギーなし) の結果

2.6 実験 3: エイリアシングの大きい状態での解像度変化が重心動揺に及ぼす影響

帯域制限をせずレンダリングした高解像度画像から、単純にポイントサンプリングすることで、大きな仮想画素を提示した。つまり、画素サイズは大きくなり、ジャギーの運動も発生している状態での実験を行った。結果を図 7 に示す。横軸の定義は実験 2 と同じである。

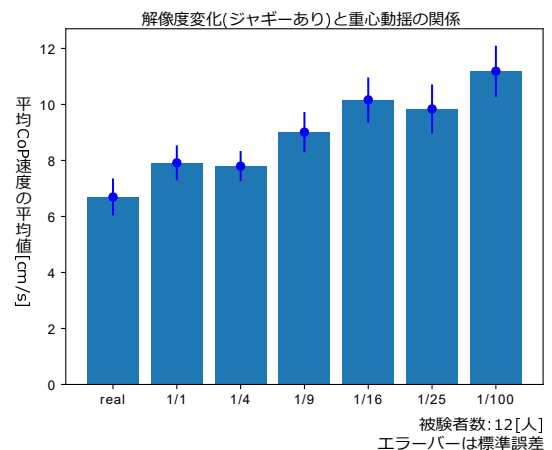


図 7: 実験 3 (画素サイズ, ジャギーあり) の結果

3. 議論

各実験の結果を、横軸を空間周波数、縦軸を平均 CoP 速度としてプロットした (図 8)。

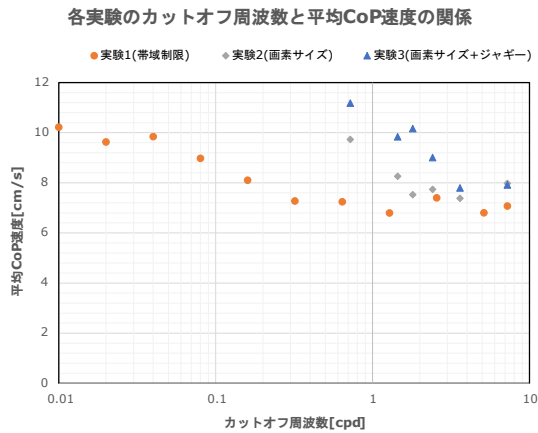


図 8: 各実験結果のプロット

3.1 空間周波数帯域の制約の影響

実験 1 では、使用した HMD 本来の状態から cutoff 周波数を下げてゆくと重心動揺は大きくなっていった。しかし、0.32[cpd] までの帯域制限の試行に有意差はなかった。つまり、重心動揺という観点からは、空間周波数 0.16-0.32[cpd] 以上の提示ができれば十分である。

3.2 純粋な解像度変化の議論

実験 2 では、画素の大きな HMD と理想的なレンダリングの組み合わせを模擬した。HMD 本来の状態から解像度を低下させてゆくと重心動揺は大きくなったが、面積解像度を 1/25 に低下させるまでの試行には有意差は無かった。したがって、平衡という観点からみると、現在高性能とされている HMD の解像度は人間の受容を満たしていると言える。

帯域制限と解像度低下の違いは、解像度低下時に大きな画素が眼前に固定されてみるかどうかである。実験結果は、帯域制限と比べはるかに大きな平衡悪化をしめしており、この影響は非常に大きいことがわかる。

3.3 ジャギーの運動の影響

実験 3 では、前置フィルタを用いずに大きな仮想画素をレンダリングし、ジャギーとその運動が発生している状態で実験を行なった。実験 2 と同様、解像度低下は平衡の悪化をまねいた。

解像度を低下させた場合（実験 2）よりも、それに加えジャギーの運動が発生している場合（実験 3）の方が平衡の悪化幅は大きかった。特に、実験 2 では 1/25 から平衡の悪化が確認できるのに対し、実験 3 では 1/4 の試行から重心動揺が増加し始めていた。したがって、高周波の折り返しによるジャギーの運動の影響は小さくないと言える。

4. 結論

本研究では、HMD の画素の大きさが変わった時に、人間に与える影響を、人間の平衡つまり重心動揺を指標として被験者実験を行い、評価した。画素サイズを変更すると、定時空間周波数の帯域、画素の視認性、副次的に生じるジャギーの運動が変わる。その各々の影響を分離して観察した。その結果、解像度に関しては現在高性能とされている HMD は、

平衡という意味では人間の受容を満たしていることが判明した。また、画素サイズ変化が内包する要素のうち、空間周波数帯域の変化よりも、画素の視認性およびジャギーの運動の変化のほうがより人間の平衡に大きな影響を与えることが判明した。

参考文献

- [1] 上原大生, 松井倫子, 宮下徹也: 視覚の誘導が重心動揺に与える影響, 第 49 回日本理学療法学会大会 抄録集 Vol.41, No.2, 1615, 2014.
- [2] 江依法, 長崎幸雄, 松岡敏男, 古田善伯, 木村英紀: 自然立位姿勢時の身体動揺と重心動揺間の関係, 体力化学 Vol.52, pp.533-542, 2003.
- [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推定-, 日本バーチャリアリティ学会大会論文集 Vol.23, 33B-2, 2018.
- [4] 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, 日本バーチャリアリティ学会大会論文集 Vol.24, 6C-05, 2019.