



# 頭部搭載ディスプレイに必要なリフレッシュレート -ユーザーの平衡計測に基づく推定-

尾山拓也<sup>1)</sup>, 太田泰樹<sup>1)</sup>, 木島竜吾<sup>1)</sup>

1) 岐阜大学 工学部 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, u3033040@edu.gifu-u.ac.jp)

**概要** : 頭部搭載ディスプレイのリフレッシュレートを数段階に変更して, ユーザーの重心動揺の計測を行なった. その結果リフレッシュレートを減少させるにつれて, 人間の平衡は悪化していった. 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目標とするリフレッシュレートの推定を行なった.

**キーワード** : 視覚, 生体, 平衡

## 1. はじめに

### 1.1 リフレッシュレート

リフレッシュレートはディスプレイの画像の更新頻度を表す数値である. 頭部搭載型ディスプレイ(HMD: Head Mounted Display)の性能は仮想現実(VR: Virtual Reality)体験の品質に直結するもので, HMD のリフレッシュレートが低い時にはHMDから得られる視覚情報が実空間での視覚情報と一致しない.

### 1.2 物理忠実度と受容忠実度

本研究では, 先行研究[1]で扱っていた受容忠実度の概念を取り入れる. HMD が表す仮想空間の実空間に対する再現度の高さを「物理忠実度」とする. 実空間が人間に与える視覚情報と, 仮想空間が与える視覚情報とについて, 次の関係が成り立つと考えられる.

$$\text{物理忠実度} = \frac{\text{仮想空間の情報量}}{\text{実空間の情報量}} \quad (1.1)$$

物理忠実度=1 の時, 人間にとって仮想空間は実空間と全く同じものとなるので, 仮想空間を観察している時にでも実空間との差異が判別できない.

物理忠実度≠1 の時, 人間の外部状態と内部状態は実空間にいる時とは別のものを示す. ここで外部状態とは, 得られる情報によって引き起こされる行動等を指し, 内部状態は知覚や酔い等人間の内部的な状態を指す. 「受容忠実度」を人間の内部状態に関して, 実空間を観察している時

と仮想空間を観察している時を比べる時の度合いとする. 受容忠実度は物理忠実度と同様に次のように表される.

$$\text{受容忠実度} = \frac{\text{仮想空間にいる人間の内部状態}}{\text{実空間にいる人間の内部状態}} \quad (1.2)$$

受容忠実度=1 であれば, 人間は仮想空間を観察していても実空間を観察している時と全く同じ内部状態となる. 物理忠実度=1 は現在の技術では不可能である. しかし人間の可聴域や認識できる色環といった分解能の面を考えると不必要である. そのため受容忠実度=1 にできればユーザーは実空間と仮想空間の区別がつかない.

### 1.3 人間の平衡

本研究では人間の内部状態を観察するために, 人間の平衡を取り上げ, 重心動揺実験を用いて測定する. 重心動揺検査では通常足裏の圧力中心(CoP: Center of Pressure, 図 1.1)を用いてその移動面積(図 1.2)や軌跡長を測定し, その

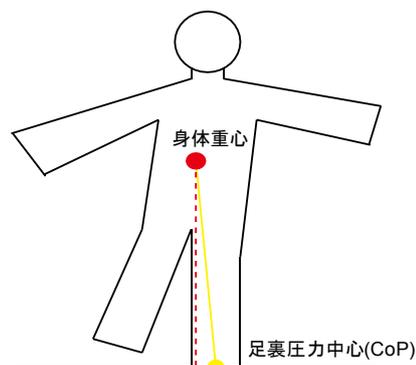


図 1.1: 身体重心と足裏圧力重心

Takuya OYAMA, Hiroki OTA, Ryugo KIJIMA

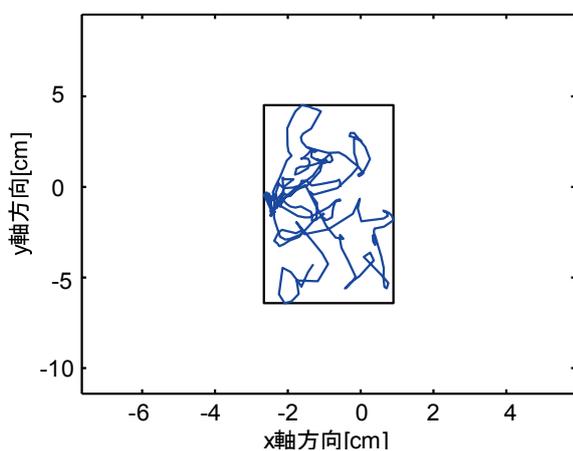


図 1. 2: CoP 軌跡の移動面積

特徴を観察する。本論文でもこの CoP を重心とし、重心動揺の軌跡を見る際はこれの軌跡を見るものとする。

#### 1.4 先行研究

河邑は HMD の表示遅れに注目し、重心動揺との関係を調べた[1]。HMD はセンサを用いて頭部位置や運動を捕捉し PC にてディスプレイに表示する画像を生成、表示している。単にこの処理を行っているデータ転送や処理にかかった時間などが原因で現在の頭部位置や運動とのズレが生じてしまう。Oculus VR 社の HMD である Development Kit 2(以下 DK2)ではこのズレの値は、回転方向に 26ms、並進方向に 34ms ほどである事がわかっている[2]。Oculus VR 社はこの問題を解決するため、遅れ補償機能を取り入れている。この処理では第一段階として、取得したセンサ値から線形の運動予測を行い、画像の生成とその画像が表示される時の適切な頭部位置の算出を行う。その後第二段階として、ディスプレイに画像を表示する直前に最新のセンサ値を取得し、画像生成前のセンサ値との差分を計算する。その値から画像がディスプレイに表示される時の正しい頭部位置等を再度予測し、画像を歪ませて表示するという事を行っている。これにより、回転方向は 1ms、並進方向は 23ms まで減少する。そこで河邑は HMD の極めて短い遅れが人間の受容忠実度を如何に変化させるか、重心動揺実験を用いて観察した。行った実験では 0ms から 66ms まで回転遅れを付加させて比較しており、結果として極めて短い遅れでも人間の重心動揺に影響を与える事、遅れ時間増大に伴い重心の動揺も単調に増加する事、実験では仮想世界のコンテンツと実世界を同一にしておく必要があることが確認されている。なお本論文では先行実験で扱われていた遅れを「表示遅れ」と呼ぶこととする。

#### 1.5 本研究の目的

本研究では、HMD のリフレッシュレートが人間の受容忠実度にどのような影響を与えるか明らかにする事を目的とする。それを観察するためにリフレッシュレートを数段階に変更して重心動揺の計測を行う。また HMD の表示

遅れとの関連性に注意を向け考察を進めるとともに、HMD が受容忠実度=1 を満たすために目標とするリフレッシュレートの算出と提案をする。

## 2. 実験

本研究では HMD を使用し、人間の重心動揺を計測する実験を BlockRoom と称する環境で行った。視野制限眼鏡を通して実空間を見た場合と、リフレッシュレートを段階的に変更した HMD を通して仮想空間を見た場合に分けて測定を行った。

### 2.1 実験環境

HMD は Oculus Rift DK2 を用い、視野制限眼鏡は DK2 のディスプレイおよびレンズ部分を外した物に重りをつけ、全体の重量を本来の物に近付けて使用した。Block Room は実空間上にブロックを配置した空間と、それと同じ状態を仮想空間に作成した 3D 空間である。重心動揺計は任天堂社のバランス Wii ボードを使用し、PC と Bluetooth で接続して、CoP データを 50Hz で送信した。

本研究で用いた HMD の Oculus Rift DK2 は 75Hz のリフレッシュレートを持っており、数段階のリフレッシュレートを出すためにソフトウェアを改変する必要がある。そこでセンサから取得したユーザーの頭部座標値などを一度保存し、その値を繰り返し使用するようにした。同じ値を繰り返し使用する事で描画する際に同じ画像が繰り返し作成され、リフレッシュレートが落ちているものと同様の動きをする。本研究では「描画更新レート」という言葉を使用し、描画更新レートを変更する事でリフレッシュレートが変更されているものとする。

### 2.2 実験手順

被験者は HMD 及び視野制限眼鏡を装着し、裸足の状態で重心動揺計に単脚で立つ。通常人間の重心動揺を計測する際は両足を揃えて直立するが、Kelly ら[3]によると両足直立は高い安定性を示す事がわかっているため、視覚から得られる情報の差による影響が反映されやすい単脚直立を採用した。被験者はヘッドホン装着し、ホワイトノイズを流す事で外音の影響を避けた。被験者はそれぞれの試行を 30 秒間、無作為で決めた順に一度ずつ行った。試行中にバランスを保てなくなった場合は転倒したと見なし、試行を中断し、その時点で計測を終了した。

### 2.3 評価方法

身体の左右の動揺を x 軸、前後の動揺を y 軸とした座標系を設定して出力すると、試行毎に CoP 軌跡が得られる。本研究では 50Hz の周期で出力される CoP の移動距離を足し合わせ、試行時間で除すことにより平均 CoP 速度(単位時間軌跡長)を算出して用いた。中断した際には浮かせた足の接地による重心の移動や軸足の移動が実験結果に影響を与える事を考慮し、中断前一秒間の記録を棄却して実験

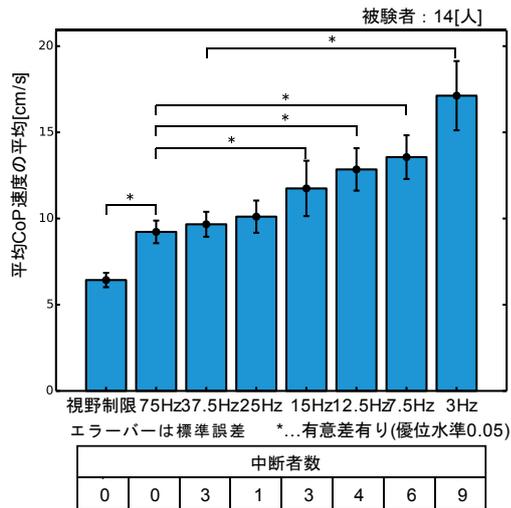


図 2.1: 試行パターンと平均 CoP 速度の平均値

データとして評価した。

#### 2.4 描画更新レートの差による重心動揺への影響

描画更新レートを変化させて重心動揺の実験を行い、人間の平衡にどのような影響を与えるか調べた。実験条件とする描画更新レートは 3.0Hz から 75Hz までの 7 種類を用いた。

被験者は 20 代の男性 14 人である。視野制限眼鏡を使用した場合の重心動揺も並べて図 2.1 に示す。描画更新レートを落とすにつれ、重心動揺の平均 CoP 速度は単調に増大した。Holm 法により多重比較を行ない、どの試行間に有意差がみられるかを調べた。最も高速な 75Hz と有意差があるのは 25Hz 以下であり、それより速いレートとは有意差がみられなかった。

### 3. 議論

#### 3.1 矩形面積平均で見たときの CoP 軌跡の比較

本研究では平均 CoP 速度をもって人間の平衡に与える影響を見てきた。平均 CoP 速度による評価は重心動揺検査でよく用いられる手法であるが、CoP 軌跡を矩形で囲い全被験者の面積値の平均で比較する手法も一般的である。二種類の評価方法で比較を行い同一の結果を得る事ができれば、実験結果はより正確な結果と考えられる。

図 3.1 および図 3.2 に二種類の評価方法による結果を並べた。描画更新レートが減少するにつれて重心動揺の結果は同様に悪化している事がわかった。しかし矩形面積による評価でも 75Hz から 15Hz までは有意差が生じなかった。矩形面積平均は 75Hz が 30.526, 37.5Hz は 34.487, 25Hz は 37.344, 15Hz は 45.525(全て単位は  $\text{cm}^2$ )であった。また矩形面積での評価は描画更新レートが落ちるほど標準誤差が大きくなっている事がわかる。これは CoP 軌跡をそのまま矩形で囲うため、低い描画更新レートでは瞬間的な動揺の影響が出やすいためだと考えられる。二種類の評価がほぼ同一の結果を示したため、実験結果は概ね正しいと考えられる。

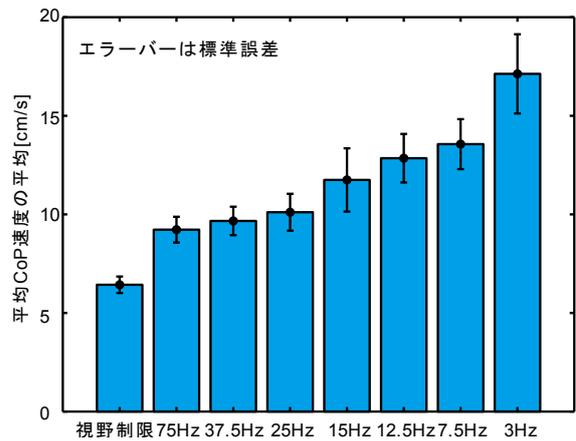


図 3.1: 平均 CoP 速度で比較

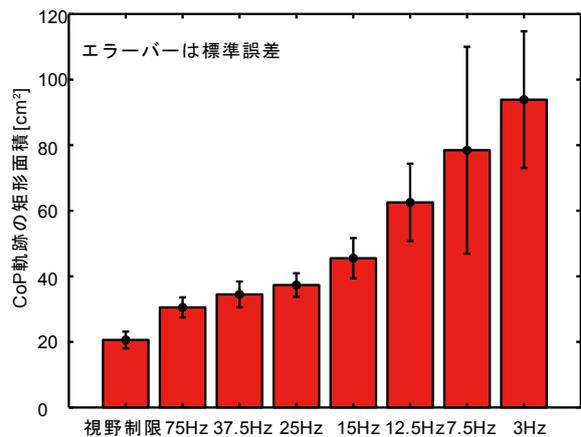


図 3.2: CoP 軌跡の矩形面積で比較

#### 3.2 先行研究との比較

リフレッシュレートはディスプレイの画像の更新頻度を表す数値だが、更新してから次に更新するまでの時間は同じ画像を見ていることになる。例えば DK2 のリフレッシュレートは 75Hz であり、約 13.3ms 毎に画像を更新しているのでその間は画像が変わることはない。描画後、遅れ補償がフレームの中心を予測して補正しているとすると、画像を更新してから約 6.67ms は早く、残りの約 6.67ms は遅れていることになる。このためフレームの中心で平均すると遅れは 0 と考えることができる。この遅れを「見かけの遅れ」と呼ぶこととする(図 3.3)。描画更新レートを 37.5Hz にした時、見かけの遅れは約 6.67ms となる。

本研究の主眼は描画更新レートが人間の平衡に与える影響を重心動揺実験を用いて観察する事であるが、描画更新レートを下げた事で見かけの遅れが発生しており、見かけの遅れが人間の平衡に影響を与えたとも考えられる。

#### 3.3 目標とされる HMD のリフレッシュレートの算出

描画更新レートを落とすと比例的に人間の平衡も悪化したことから、受容忠実度=1 を満たすためにはリフレッシュレートを向上させる必要がある事がわかる。そこで本研究の結果を使用して実際に受容忠実度=1 を満たすために目標とされるリフレッシュレートを予測した。本研究の

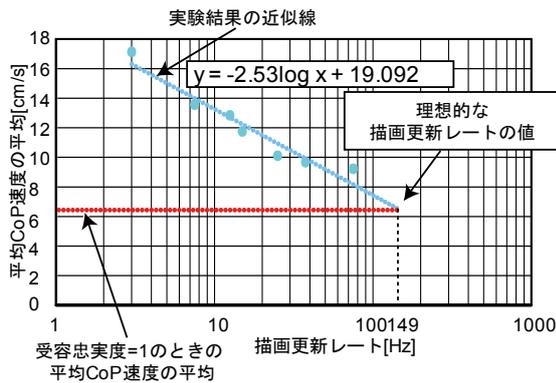
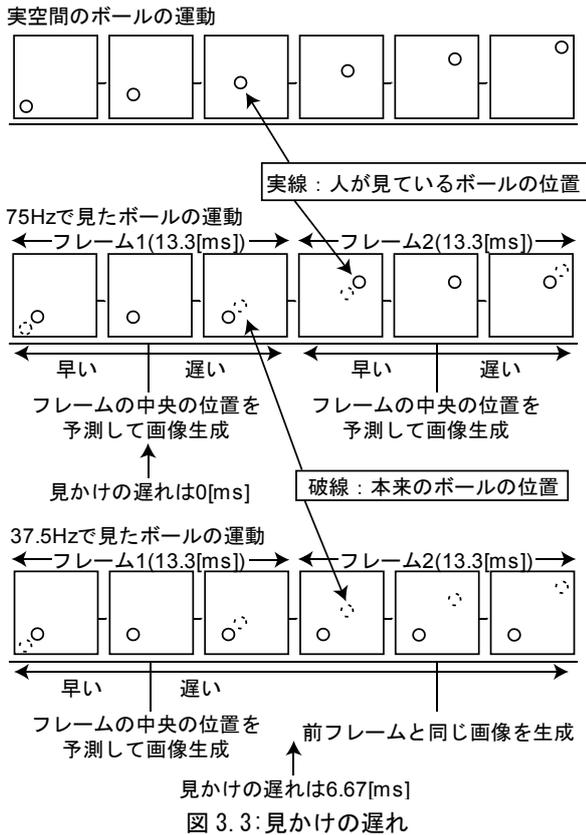


図 3.4: 目標とする描画更新レートの算出

結果から x 軸をリフレッシュレート, y 軸を平均 CoP 速度の平均として対数近似で式 3.1 を算出した。

$$y = -2.53 \log x + 19.092 \quad (3.1)$$

これと本研究の結果と照らし合わせる(図 3.4). 受容忠実度=1 となる時, 実験 1 の仮定から人間の平衡は視野制限眼鏡を装着している時と同一となる. 視野制限眼鏡を装着している時の平均 CoP 速度の平均は 6.431cm/s で式 3.1 に代入すると, 受容忠実度=1 を満たすために目標とされるリフレッシュレートは約 149Hz という結果が得られた。

#### 4. 結論

本論文では,1.2 節で述べた受容忠実度の考え方に基づき,HMDの描画更新レートがユーザーの平衡に与える影響を調べた.単脚直立の重心動揺検査を用いて実験を行ったところ,描画更新レートを低下させるにつれ,単調にユーザーの平衡をあらわす平均 CoP 速度は悪化した.描画更新レートの低下は平均の遅れ時間をも増大させる.従ってユーザーの平衡の悪化は,この平均遅れの増大と,画像の変化がまばらになることの両方の影響を受けていることになる.描画更新レートと平均 CoP 速度を片対数グラフにプロットするとおおむね直線にのっていた.そこで,この近似直線を外挿したところ視野制御裸眼の場合と匹敵する平均 CoP 速度が得られるのは,149Hz の場合であった.したがってユーザーの平衡という受容忠実度指標を用いた場合,現実との差がなくなる必要リフレッシュレートは,本実験では 149Hz であった。

#### 参考文献

- [1] 河邑壮馬,木島竜吾: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文誌 21(1),101-108,2016.
- [2] 宮島健人,木島竜吾:Oculus Rift DK2 の回転方向動特性評価,日本バーチャルリアリティ学会論文誌 21(1),131-140,2016.
- [3] Kelly J.W., Riecke B, Loomis M.J., Beall A.C. : Visual control of posture in real and virtual environments. Perception & Psychophysics 2008, 70(1), 158-165.