



視角提示におけるフレームレートと動体視力の関係

Relationship between frame rate of visual display and dynamic visual acuity

南部志門¹⁾, 海田力²⁾, 木島竜吾³⁾

Shimon NAMBU, Riki KAIDA, and Ryugo KIZIMA

1) 岐阜大学 自然科学技術研究科 (〒 501-1112 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, y4525058@edu.gifu-u.ac.jp)

2) 岐阜大学 自然科学技術研究科 (〒 501-1112 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, kaida.rk.dm@gmail.com)

3) 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: 現実空間に比べて仮想空間では動体視力が落ちる。単純には、HMD などのディスプレイでは、フレーム期間中は表示内容が変わらないため、運動する物体をパーストすると生じるブラーのためと考えられるが、被験者実験の結果はこの説明とは異なり、動体視力が視角速度とフレームレートの線形結合の関数であることを示した。これは静止視力における指標サイズのような仮想空間における動体視力の軸であると考えられる

キーワード: HMD, 動体視力, 視角速度, フレームレート

1. はじめに

1.1 分解視力

人間の視力(分解視力)は、静止した物体を見るさいに、いかに細かい部分までを知覚することができるかという能力のことである。したがって視力試験で変化させるパラメータは物の大きさである。HMD などのディスプレイは解像度を持つ。これは逆に、いかに細かい部分までを表示できるかという能力のことである。画素サイズが大きすぎる場合には仮想空間でユーザの視力試験を行うと、視力はディスプレイの解像度によって制限される。人間の視力と HMD の解像度は両者は物の大きさという変数を共有しているので、人間とは関係なく画素サイズから視力値を求めることができる。この換算視力 [1] は、HMD の性能指標の一つとして扱われている。人間の視力値と HMD の換算視力値が近い場合には、両者の特性を考えた仮想視力 [2] により、HMD を装着したユーザが仮想空間内で発揮できる視力を求めることができる。

1.2 動体視力

動体視力は、物の大きさは一定とし、いかに速い運動下で物体を知覚できるかという能力のことである。分解視力と同様、HMD を装着して動体視力検査を行えば、ユーザが仮想空間内で発揮できる動体視力の値が得られる。静止視力と同様、ユーザの動体視力に対して HMD の性能が低ければ、動体視力は低下するだろう。それを、分解視力の場合と同様に HMD の仕様から導き出すことができれば、運動表現に関する HMD の性能指標が得られる。本研究の目的は、この、いわば「HMD の動体視力」を得るための換算方法を求めることである

1.3 パーストブラー仮説

HMD を装着し、移動するランドルト環の方向を答えてもらう実験を考える。ディスプレイは毎フレーム変化する位置にランドルト環を表示することで運動を表現するが、1 フレーム期間中は視標は静止している。つまり、視標は時間離散的に運動する。一方で人間の眼球パーストはより滑らかに物体を追従しようとするだろう。すると、網膜上でのランドルト環の像には、1 フレームの視角の移動量分だけモーションブラーがかかるのではないかと予想する(図 1)。これをパーストブラーと呼ぶこととする。この仮説に従うと、ディスプレイの性能がユーザの動体視力より低い場合には、動体視力値は以下ように求められるディスプレイの表示期間を T [秒]、視標の視角速度を θ [分]、網膜上のブラーの量を β [分] とする。

$$\beta = T\theta \quad (1)$$

である。これがランドルト環のギャップを丁度埋める場合に視認限界が訪れると考えれば、分解視力の定義から

$$V = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{T\theta} \quad (2)$$

である。

2. 実験

2.1 実験環境

図 2 に実験環境の様子を示す。高リフレッシュレートで映像を提示するため、Texas Instruments 社製のプロジェクタ LightCrafter4500(以下、LC4500)を用いてスクリーンに映像を投影した。被験者は顎台に頭部を固定し、表示される物体を視線のみで追従することを求められた。

HMD上で運動する視標をパーストするとき

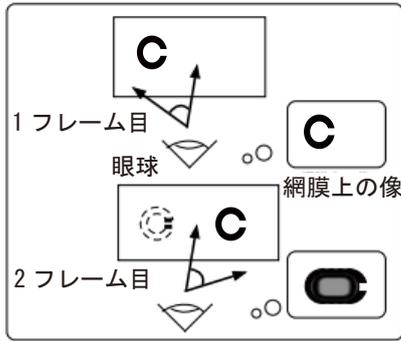


図 1: HMD上で運動する視標をパーストする場合

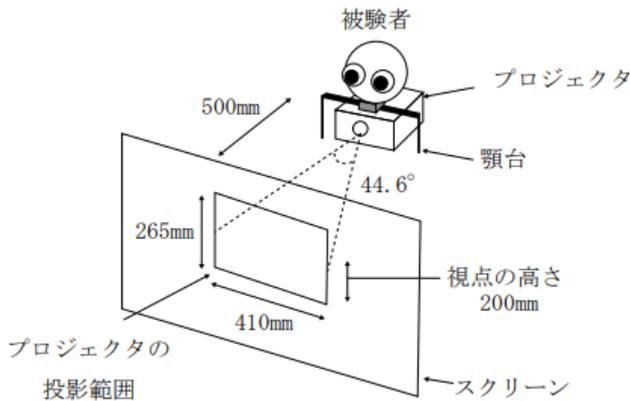


図 2: HMD上で運動する視標をパーストする場合

2.2 実験手順

被験者はまず、トレーニングのため、円視標が画面左から右に移動するアニメーションを、3回観察した。その後、同じ速度で、スクリーン半分までは円指標、それ以降は1文字のスネレン視標が移動する画像を見せ、視標を答えてもらう実験試行を行った。トレーニング、試行ともに被験者がマウスをクリックすることで1回の運動を開始させた。ある速度、指標サイズ、フレームレートに関する試行は連続して5回行ったが、毎回スネレン視標の文字をランダムに変更した。視角速度は10[deg/sec]刻み、範囲10~60[deg/sec]の6種類、プロジェクタのフレームレートは、60, 120, 180, 240, 360[Hz]の5種類、スネレン視標の大きさは視力値にして、0.15, 0.20, 0.25の3種類を用いた。したがって一人の被験者あたり合計450回の回答を行った。

2.3 実験結果

被験者は、14人(男性13人、女性1人、年代は20代前半)、その分解視力値は0.6から1.5の範囲であった。図3,4,5に実験結果を示す。エラーバーは、標準誤差である。

number of subjects:14, errorbar:standard error

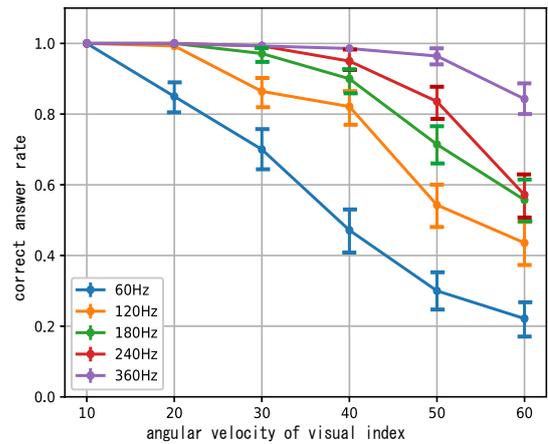


図 3: チャートの視力値 0.25 の視標を使用した実験結果

number of subjects:14, errorbar:standard error

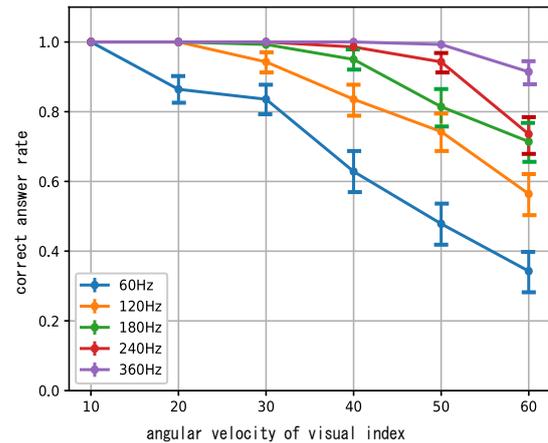


図 4: チャートの視力値 0.20 の視標を使用した実験結果

2.4 考察

正答率 8割を視認可能/不可能の境界とし、横軸に視標を視認できた最高の視角速度を、縦軸に更新レートをとり、プロットした(図6)。眼科などで行われる視力検査では、正答率 6割を視認限界としているが、今回の実験では、一部の文字(T, L)がパーストブラーの影響を受けづらく、これが正答率を押し上げるため、より高い閾値を用いた。

図6にはパーストブラーモデルによる理論値(点線)の直線と、実験値の最小二乗法による直線フィット(実線)を示した。フレームレートが上がると、動体視力の実験値も上昇している。つまり、この実験条件ではディスプレイのフレームレートは不十分であり、ユーザよりもディスプレイの性能が動体視力値を制約していることがわかる。同一フレームレートで比較すると、実験値の方は理論値よりはるかに高い視角速度で視認できていることがわかる。つまり、単純なパーストブラーモデルは、ディスプレイを用いた時の動体視力を説明できない。

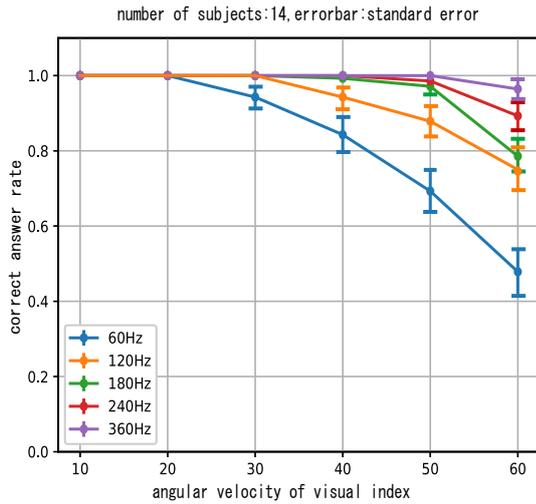


図 5: チャートの視力値 0.15 の視標を使用した実験結果

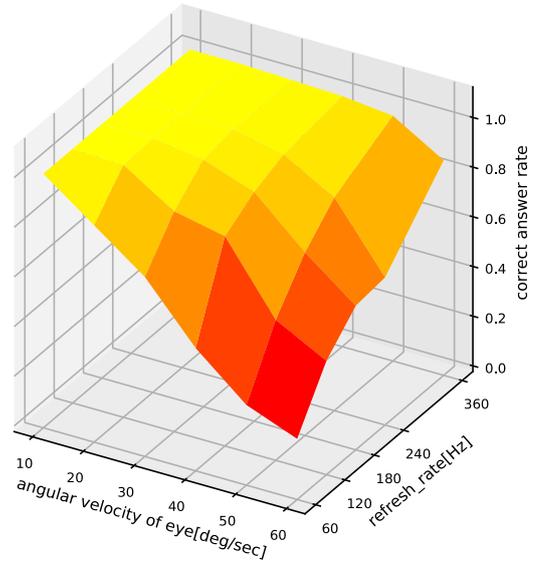


図 7: 正答率と、視角速度およびフレームレートの関係 (スネレン指標の視力値 0.25)

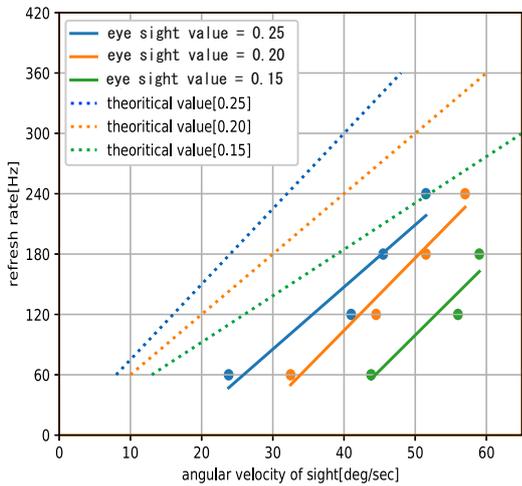


図 6: 実験結果から求めた、動体視力とフレームレートのグラフ

実験結果から求めた、フレームレートと動体視力のグラフ (図 6) を見ると、フレームレートが向上すると、動体視力もそれに向上することがわかる。しかし、理論値と比較すると、はるかに高い視角速度で視認できていることがわかる。これは、ブラーが最小ギャップの 2 倍以上の場合でも濃淡の差などから文字を予測できるだろうと考えられる。

2.4.1 各視力値における 3 次元グラフ

より詳細に、速度による視力の低下の様子を観察するため、正答率を縦軸にとって 3 次元グラフをプロットした (図 7, 図 8, 図 9)。底面の 2 つの軸は視角速度とフレームレートである。パーストブラーモデル (式 2) では、視角速度 θ とフレーム期間 T の積が視力を支配する軸であり、フレームレート $f=1/T$ であるから、 θ/f が一定の直線 (原点から伸びる直線) 上では正答率は一定になるはずであるが、前節の結果はこれを否定するものであった。ところが視線を水平に起き、グラフを回転させて見ると、ある方位から見

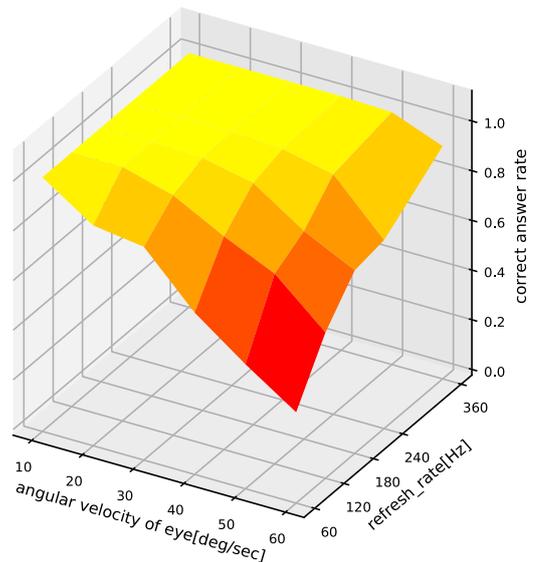


図 8: 正答率と、視角速度およびフレームレートの関係 (スネレン指標の視力値 0.20)

た場合にその稜線がよく一致する角度があった。底面 $f-\theta$ 平面において視線に垂直な直線である

$$\phi = \frac{1}{2} - \frac{f-60}{600} + \frac{\theta-10}{100} \quad (3)$$

を横軸にとり、正答率をプロットしたグラフ、つまり図 7-9 を上式で示される平面に平行投影したグラフを図 10-12 に示す。

いずれのグラフも、 ϕ の値が上がるにつれて、正答率が下がることを示している。また、 ϕ の値が小さい領域では正答率はほぼ 1 であり、ある限界点を越えると次第に下がってゆくことがわかる。指標の視力値 (0.25, 0.20, 0.15) に対し、限界点 ϕ は (0.48, 0.52, 0.65) であり、指標サイズが小さくなると限界点 ϕ もさがっていた。

正答率は 1 つのパラメータ ϕ により支配されている。し

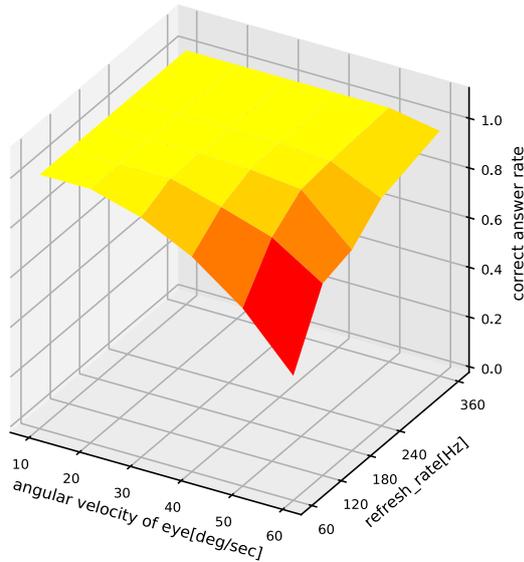


図 9: 正答率と、視角速度およびフレームレートの関係 (スネレン指標の視力値 0.15)

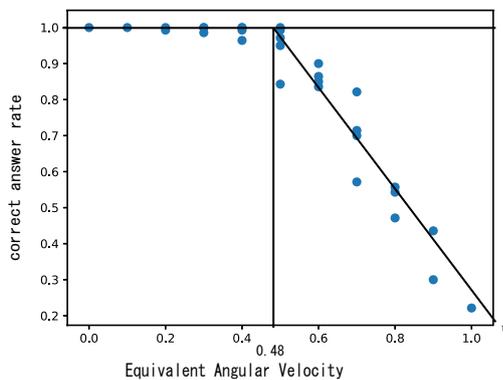


図 10: パースートの難易度と正答率 (視力値 0.25)

たがってこの量 ϕ は分解視力における指標の大きさ、動体視力における指標の速度に相当する量であるから、時間離散ディスプレイにおける換算速度と考えるとよい。ある指標サイズに対し限界換算速度が存在するので、これが仮想空間における動体視力値とみなすことができよう。

3. 結論

本論文では、仮想空間における分解視力のモデルである、換算視力や仮想視力と同様に、仮想空間ではどのような動体視力が得られるかを、物体の運動速度とフレームレートを変化させ、被験者実験により調査した。単純なパーストブラーモデルを設定し、実験結果と照合したところ、このモデルは実験値とはよく合わず、むしろ視角速度とフレームレートの線形結合が正答率を支配していることがわかった。分解視力検査で、指標の小ささという難易度を軸としていることと同様、この軸はディスプレイ上での動体視力検査の難易度を表しているわけで、フレームレートを考慮した換算視角速度と呼んでも良いだろう。また、ある指標サイズに対して正答率が下がり始める限界換算視角速度が

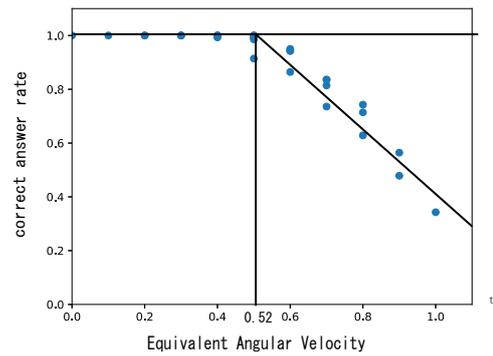


図 11: パースートの難易度と正答率 (視力値 0.20)

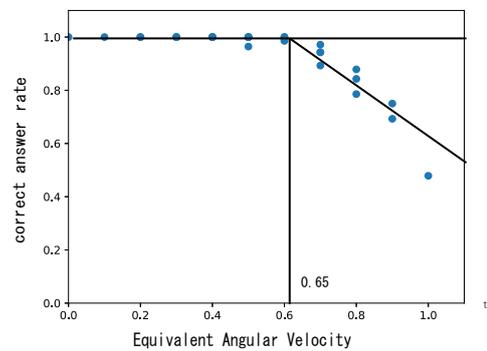


図 12: パースートの難易度と正答率 (視力値 0.15)

存在することもわかった。したがって適切な正答率閾値を設定すれば、換算動体視力値を換算視角速度に対して求めることができよう。入手できるディスプレイの制約から、本稿では比較的大きな指標 (分解視力値 0.15-0.25) のみを用いた。より小さな指標を用い、広範囲に分解視力値と換算動体視力値の関係を調査すれば、フレームレートというディスプレイの物理性能から、ユーザーが仮想空間で発揮できるであろう動体視力つまり換算動体視力値を求めることができるかもしれない。ユーザにとって直接的に有益な情報は、解像度やフレームレートという物理スペックではなく、ユーザが仮想空間で発揮できるであろう視角能力であり、換算動体視力はその一つを与えるものになりうる。動体視力がスポーツ医学分野で利用されているのと同様に、e-sports では換算動体視力が有用であるかもしれない。

参考文献

- [1] 岩本 和世, 前田 太郎, 谷江 和雄, 視線追従型映像提示系への応用を目的とした注視点近傍における視覚特性の検討,
- [2] 木島竜吾仮想空間における視力 TVRSJ Vol.23 No.3 pp.179-188, 2018