



運動視における高フレームレート映像の鮮明化現象測定法

中田健斗¹⁾, 古川正紘¹⁾²⁾, 原彰良¹⁾²⁾, 前田太郎¹⁾²⁾

1) 大阪大学大学院情報科学研究科 (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5, k-nakata@hiel.ist.osaka-u.ac.jp)

2) 脳情報通信融合研究センター (CiNet) (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-4, {m.furukawa, akiyoshi-hara, t.maeda}@ist.osaka-u.ac.jp)

概要: 等価的無遅延な視覚提示法として 1,440fps を達成する視覚刺激が有望視されている。観察者と相対運動する映像を提示すると、60fps と比較し 1,440fps 下で鮮明化現象が得られる一方で、本現象を定量評価可能な指標は知られておらず、定量的に未測定であった。そこで本稿では、鮮明化現象が、空間輝度勾配・量子化・局所コントラストの 3 変数関数と仮定して、知覚的等価ブラー指標を設計し定量的に測定した。

キーワード: 高フレームレート, 時空間相互作用, 運動視

1. はじめに

1.1 研究背景

バーチャルリアリティ (VR) やテレグジスタンスは、遠隔地や VR 空間への深い没入感の提供を目指す技術である。その実現には、ユーザーが頭部や視線を動かしながら能動的に環境を観察する「運動視」のリアリティが重要である。

しかし、現在主流のサンプル&ホールド型ディスプレイでは、フレーム更新周期の制約により、視線移動中に像が網膜上でぶれて知覚されるモーションブラーが原理的に発生する。これは、フレーム間で画素が点灯し続ける一方、視線は連続的に移動するためでありこのモーションブラーは結果として映像がローパスフィルタを通過したようにぼやけ、運動視のリアリティを損なう。

このモーションブラーを抑制する手段の一つが高フレームレート化であり、運動視における鮮明さの向上が期待される。先行研究では、1,440fps の提示下で画像の鮮明化が知覚されることが報告されている [1]。

しかしその評価には、画像全体の Michelson コントラスト調整が用いられており、ブラーによる輝度勾配の変化を反映していない。また、提示にアフィン変換と補間を用いた曲面映像系が使われており、写像の歪みや画素配置の不均一性といったアーチファクトの影響が排除できていない。そのため、モーションブラー低減が鮮明化の主要因かどうかは明らかでない。

そこで本研究では、提示系のアーチファクトを統制した条件下で高フレームレートによる鮮明化を主観的に評価し、その要因を同定することで、鮮明化を客観的に定量化可能な評価指標の構築を目的とする。

1.2 研究手法

本研究では、以下の 3 つの検証を通じて、高フレームレート提示による運動視下での鮮明化現象に寄与する要因を同定し、鮮明化を客観的に評価可能な指標の構築を目的とする。まず、映像提示系に由来するアーチファクト要因を可能

な限り排除した環境を構築する。この環境下で、受動運動視における鮮明化現象の客観的な存在を検証する。画像速度とフレームレートを操作し、固視・追従視条件における二対比較による主観評価を実施することで、モーションブラー低減が知覚鮮明度に寄与するかを検証する。

次に、フレームレート別の画像刺激である動画を既存の客観評価指標で評価し、主観応答との関係を分析する。この検証により、フレームレートの違いによる画像の特徴に関わる鮮明化の要因を推定する事を試みる。

最後に、評価指標の妥当性を検証する為構成要素の一つである「時空間量子化誤差 (ジャギー)」の影響を定量的に評価する。提示系のアーチファクトが存在する状態でも鮮明化が再現されることから、このジャギーがモーションブラー以外の重要な要因であると仮定する。人工的に生成した量子化誤差を映像に付加し、高フレームレート環境下での鮮明化の変化を計測する。これにより、評価指標の主要因の妥当性を部分的に示すことを目指す。

能動運動視では、例えば遠隔操作のように観察者が自らの頭部を動かして奥行き情報を得る状況では、図 1 のように観察者の頭部運動と画面の描画更新との間に生じる時間的な遅延が問題となる。頭部速度 V で動いていても画面上の映像は更新周期 t は更新されない為、結果として網膜上では $V \times t$ の長さのブレとして知覚される。

2. 運動視におけるモーションブラー

一方、受動運動視ではディスプレイ上で物体が移動するのを目で追う場合でもモーションブラーは発生する。ディスプレイ上の画像は、次のフレームに切り替わるまでの更新周期 t の間、同じ表示を続ける。速度 V で移動する物体を視線で正確に追従していると、眼球は滑らかに運動するが、網膜に投影される像は断続的に位置を変えるため、1 フレームの時間内に網膜上で $V \times t$ の幅でブレが生じる。これが知覚的なボケや不鮮明さの原因となる。

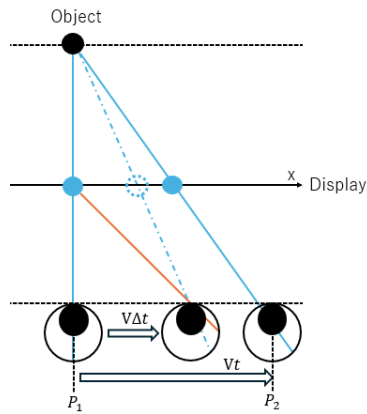


図 1: 能動運動視におけるモーションブラー

3. アフィン変換による量子化誤差

コンピュータグラフィックスでは、デジタル画像を離散的な画素上に表示する。この画像を特に物体の移動や回転といったアフィン変換を行うと、本来描画されるべき連続座標と、実際に色が塗られる離散的な画素座標との間にズレが生じる。このズレが「空間量子化誤差」であり、「ジャギー」として知られる画像のギザギザした輪郭の原因となる。

この量子化誤差は、描画位置の計算上の真値と、それを画素グリッドに丸める（量子化する）処理との差として定義できる。画像が時間的にアフィン変換で変形する場合、この誤差もまた時間と共に変動する。物体のエッジ位置を

$x_e(y, t)$ 、画素間距離を d としたとき、真値としての量子化誤差量 $\epsilon_x(y, t)$ は小数部分を取り出す関数 frac を用いて式 (1) で表される。

$$\epsilon_x(y, t) = d \left(\text{frac} \left(\frac{x_e(y, t)}{d} \right) - \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

4. 評価指標の選定

高フレームレート化による主観的鮮明化を定量的に評価するため、基礎的かつ広く用いられる客観画質評価指標を採用する。具体的には、画素レベルの忠実度を測る PSNR と、人間の知覚特性を考慮した構造的類似性を測る SSIM の 2 指標を選定した。

PSNR (PeakSignal-to-NoiseRatio) は、参照画像に対する信号の忠実度を評価する、最も基本的で確立された指標である。視覚特性を直接的には反映しないものの、画素レベルでの誤差を定量化することで、映像信号に物理的な変化が生じているかを判断するための基準となる [2]。

SSIM (Structural Similarity Index) は、PSNR の課題であった人間の知覚特性を考慮した指標であり、輝度、コントラスト、そして「構造」の類似性に着目する。本研究が扱う「鮮明化」とは、輪郭などの構造情報が問題と関連する。SSIM は、この構造の変化を直接的に捉えることができるため、モーションブラーや量子化誤差が画像の知覚的鮮明度に与える影響を評価する上で、妥当性の高い指標である [2]。

以上の理由から、物理的な信号レベルでの変化を PSNR

で、知覚的な構造レベルでの変化を SSIM で捉えることにより、フレームレートの違いを客観評価出来る事が期待される。

5. 実験 1: ブラー低減による鮮明化現象の検証

5.1 実験目的

本実験では、先行研究におけるブラー仮説に基づき、映像提示系に由来するアーチファクト要因を分離して再検証する。そして、フレームレートおよび画像の移動速度に從属して変化するモーションブラーが、主観的な鮮明化印象に与える影響を検証する。一対比較法による主観評価によって鮮明化現象を定量化し、この現象がアーチファクトを排除した条件下での再現を確認することを目的とする。

5.2 実験内容

本実験では、実験参加者は条件の異なる 2 映像を白色のマスクのインターバルを挟んで連続して提示し、より鮮明と回答された条件を測定した。

5.2.1 提示刺激

実験では TexasInstrument 社の LightCrafter4500 を用いた。この DLP プロジェクタは 60fps で 24bit の色深度を持つ映像提示が可能である。この RGB24bit を 1bit のビットプレーン 24 枚と扱う事で 1,440fps での映像提示が可能である。提示刺激には、図 2 に示すジューメンスターを用いた。投影の際にはプロジェクタの内部解像度と投影解像度の違いにより歪んで表示されてしまう為、投影される画像のアスペクト比が 1 になるようにあらかじめ画像を歪めて投影した。これをスクリーンの左端から右端へ等速で水平移動させた映像を評価に用いた。映像は以下の 4 条件を組み合わせたものである。

表 1: 刺激提示条件（フレームレート × 移動速度）

移動速度	60fps	1,440fps
低速 (10deg/s)	条件 1	条件 2
高速 (40deg/s)	条件 3	条件 4

実験は暗室環境で行い、実験参加者は顎台に頭部を固定して、1.25m 先の映像を観察した。固視条件では実験参加者は画面中央の注視点を注視するよう指示した。

5.2.2 実験手続

主観評価には一対比較法を採用した。前述の 4 つの映像条件から 2 つをランダムに抽出し、左右に並べて同時に提示した。実験参加者は、より鮮明に見える方の映像を選択するタスクを行った。

また、提示条件として固視条件、追従視条件を設けた。

これらの観察条件ごとに全ての組み合わせについて比較を行い、実験参加者ごとに主観スコアを取得した。取得したデータは、Bradley-Terry モデルに基づく最尤推定法により分析し、各映像条件に対する主観鮮明度スコア (BT スコア) を算出した。

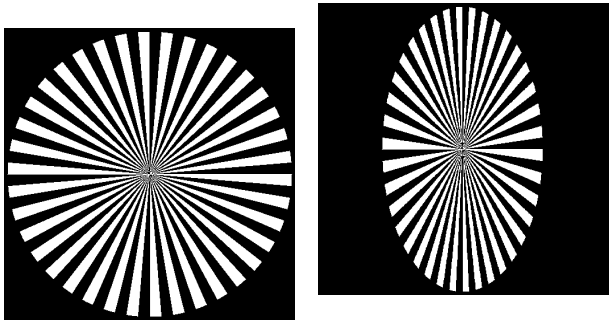


図 2: ジーメンススター

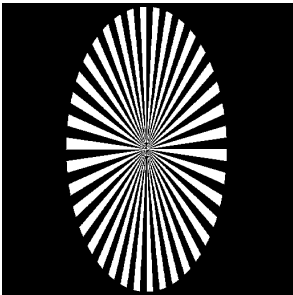


図 3: 映像信号として事前に歪ませた画像

5.3 実験参加者

実験参加者は、平均年齢 24.6 歳（標準偏差 2.9 歳）の健康な視力を持つ男女 5 名（男性 3 名、女性 2 名）であった。全参加者は、1.25m 先のスクリーン上の文字を問題なく読むことができ、実験に支障がない視力を有することを確認した。

5.4 実験結果と考察

各観察条件における BT スコアの推定結果を図 4 に示す。BT スコアが高いほど、その条件が他の条件に比べて主観的に鮮明であると評価されたことを意味する。

結果として低速条件の方が鮮明と判断される傾向にあった。しかしどちらの観察条件においても、60fps と 1,440fps の間に BT スコアの顕著な差は認められなかった。これは、低速条件の場合には、FPS の向上が必ずしも鮮明度の向上に貢献しないことを示唆している。

一方、高速条件では、観察条件によって明確な傾向の違いが見られた。固視条件では、低速条件と同様にフレームレート間の差は小さかった。しかし、眼球追従視条件では、1,440fps 条件の BT スコアが著しく高く、60fps 条件は著しく低くなった。これは、高速かつ追従視条件において、高 fps がモーションブラーを効果的に低減し、鮮明化が強く知覚されたことを示す。

以上より、提示系アーチファクトを排除した条件下でも、「高速かつ追従視」の状況で高フレームレートによる鮮明化が定量的に確認された。本研究では、この条件での主観評価結果を鮮明化評価の真値（Ground Truth）と位置づける。

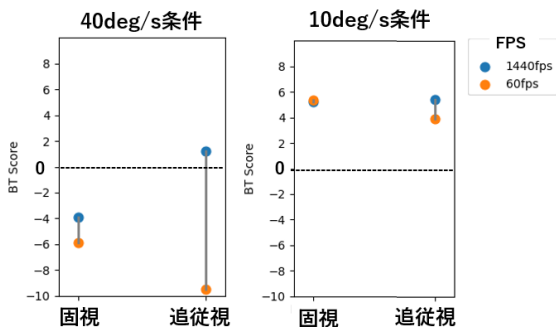


図 4: 各速度条件別の BT スコア

6. 実験 2: 画像特徴量の寄与の解析

6.1 実験目的

実験 1 では、高フレームレート化による主観的な鮮明化現象を定量化した。しかし、この主観的变化が映像のどの物理的特徴に起因するのかは不明である。そこで本実験では、実験 1 で得られた主観評価スコアと、既存の客観画質評価指標（PSNR, SSIM）との相関を解析する。これにより、鮮明化に寄与する画像特徴量を特定し、新たな評価指標構築の足がかりとすることを目的とする。

6.2 実験内容

60fps, 1,440fps の映像に対して客観的な映像品質指標（PSNR, SSIM）を算出した。1,440fps 条件を参照映像とし、同じフレーム数を持つ 60fps の動画はの比較に基づいており、フレーム単位で比較したスコアを平均化して検証した

6.3 実験結果

表 2 に示すとおり、PSNR はいずれの条件でも 97–118 dB と非常に高く、画質差が知覚されないとされる一般的な閾値（30–50 dB）[3] を大きく上回っていた。また SSIM も 0.93–0.96 と高く、客観指標上は全条件で「ほとんど差がない」と評価される。しかし実際の主観評価では、高速条件における選択率が 0.20 や 0.70 に偏るなど、fps 間の知覚的な差異が明確に現れた。また SSIM が同一でも視線条件が異なると選択傾向が大きく変化したことから、現行指標は視覚観察条件やフレームレート起因の構造的差異を反映できていないことが示唆される。

表 2: 1,440fps を基準とした選択率と客観評価指標

観察条件	1,440fps 選択率	PSNR[dB]	SSIM
固視: 低速	0.47	118.43	0.96
固視: 高速	0.70	97.71	0.93
追従視: 低速	0.83	118.43	0.96
追従視: 高速	0.20	97.71	0.93

6.4 提案指標

前述の実験の結果、従来の評価指標では高フレームレート条件における主観的鮮明度の向上を評価できないことが示された。これは、これらの指標が本現象に特有の知覚要因を捉えられていないためと考えられる。そこで本研究では、PEBI（Perceptual Enhancement by Blending Integration）指標を新たに提案する。

PEBI 指標は 3 つの物理量に着目しており、図 5 に示す輝度の空間的「勾配」、空間的「局所コントラスト」、そして運動視において生じる空間的「量子化誤差」を統合し、鮮明度を定量的に表現する。PEBI によって高フレームレート環境に特有の知覚現象を定量化できれば、前述の通り従来の評価指標で検出が困難であった鮮明化現象を測定可能となることが期待される。この指標の妥当性評価のため次節で「量子化誤差」条件付けに対する主観応答の測定を行う。

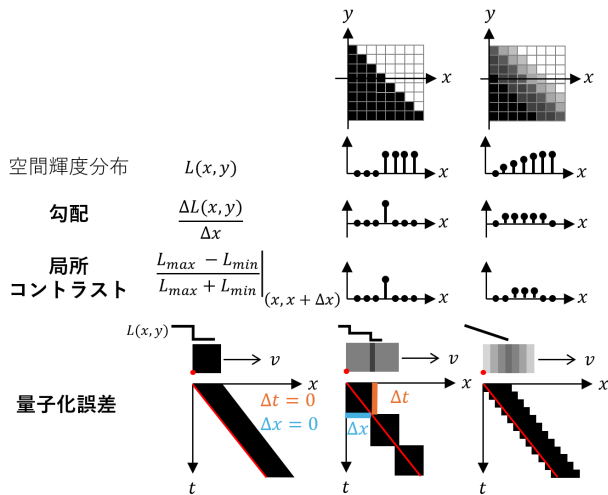


図 5: PEBI (Perceptual Enhancement by Blending Integration) 指標概念図

7. 実験 3: 量子化誤差の寄与の検証

7.1 実験目的

予備実験ではアフィン変換による量子化誤差が含まれていても鮮明化現象が確認されていた。本実験では、アフィン変換による量子化誤差が鮮明化に及ぼす影響を検証する為、人工的な量子化誤差が主観の鮮明度に与える影響を評価することを目的とする。

7.2 実験内容

実験 1 の追従視条件の映像に式 (2) で示した人工的な量子化誤差を付加し、追従視によって観察した。round は四捨五入を行う関数である。

$$J_x(y, t) = d \cdot a \cdot \text{round} \left(\sin \left(\frac{y}{d} + 2\pi f t \right) \right) \quad (2)$$

実験参加者は実験 1 と同様に追従視条件下で 2 つの映像を観察し、より鮮明だと回答された条件を測定した。

7.3 実験参加者

実験 1 と同一の参加者が評価を行った。

7.4 実験結果

実験の結果、人工的な量子化誤差を付加した映像も同様に 1,440fps 条件が「鮮明である」と回答されやすいことが分かった。

8. おわりに

本研究では、運動視における高フレームレート映像による鮮明化現象の要因を検証しその定量評価に向けた指標構築の基盤を示した。先行研究では、高 fps 提示に対する主観的な鮮明化評価が定量化されていなかった。

本研究ではまず、実験 1 では fps と画像速度の条件において主観の鮮明度を二対比較で測定し、40 deg/s において 1,440 fps が有意に鮮明であると判断されたことから、評価指標の基準値 (ground truth) を得た。実験 2 では、PSNR や SSIM といった従来指標がこの主観応答を反映できず、fps 差を無視する結果を示したことから、客観指標の限界が示

量子化誤差あり 追従視条件

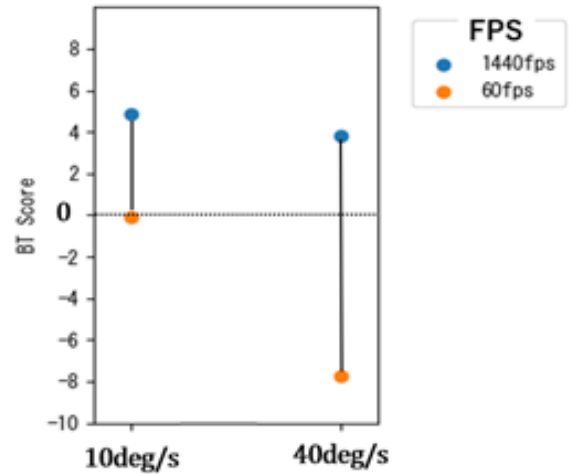


図 6: 量子化誤差条件での速度別 BT スコア

された。実験 3 では、人工的に時空間量子化誤差を付加した場合においても 1,440fps が鮮明と判断されやすい事が示され、鮮明化現象の提案指標の一要素に関する妥当性を支持した。

本研究では 2 値画像を用いたため、空間輝度勾配および局所コントラストをフレームレート非依存に制御した条件で評価を行ったが、今後はこれら 2 変数に対しても主観評価を実施し、3 要素による評価関数の定式化と評価を進めていく。

また、複数のフレームレート条件と運動速度条件を網羅的に組み合わせた評価実験を通じて、fps と観察者との相対速度から決定される等価ブラー量を基準軸とし、鮮明化印象の弁別閾 (JND) を心理物理学的に測定していく。これにより、主観的な鮮明化現象を定量的に捉え、高フレームレート映像の設計や、客観的な映像品質評価指標の開発へとつなげることを目指す。

参考文献

- [1] Masahiro Furukawa, Teppei Matsuoka, and Taro Maeda. The effect of high fps on vision in visual presentation under active motion. *J. Vis.*, Vol. 21, No. 9, p. 2387, September 2021.
- [2] Xionghuo Min, Huiyu Duan, Wei Sun, Yucheng Zhu, and Guangtao Zhai. Perceptual video quality assessment: a survey. *Science China Information Sciences*, Vol. 67, No. 11, pp. 211301:1–211301:57, 2024. Published online 17 October 2024.
- [3] Stephen T. Welstead. *Fractal and Wavelet Image Compression Techniques*. SPIE Publication, 1999.