ディスプレイにおけるフリッカ視認性の視距離および発光デューティ比依存性

Dependence of Flicker Visibility on Viewing Distance and Light-emission Duty Ratio on Displays

小川 将史^{†*}, 正会員 志賀 智一[†]

Masafumi Ogawa^{†*} and Tomokazu Shiga[†]

Abstract New display devices such as liquid-crystal displays, plasma displays, and organic LED displays, and high-definition (HD) TV formats may make a change in flicker visibility on displays. The flicker visibility for various viewing distances and light-emission duty ratios using a 44-inch diagonal flat light source was examined for this paper. As the viewing distance is reduced, the perceptible limit luminance of flicker decreases and the perceptible limit frequency increases. This implies that flicker is more perceptible for HDTV. The results show that a lower light-emission duty ratio, which is used to reduce the motion blur, requires a higher field frequency to prevent flicker. We proposed the empirical equations for the flicker-free field frequency and light-emission duty ratio as functions of the luminance. We found from these equations that more than 75 Hz of field frequency is required to prevent flicker when the duty ratio is 50% and the luminance is 300 cd/m². In addition, more than an 81% duty ratio is required when the luminance is 300 cd/m², the viewing distance is 3 H, and the field frequency is 60 Hz.

キーワード: フリッカ, CFF, 大画面ディスプレイ, 視距離, 発光デューティ比, フィールド周波数

1. ま え が き

臨界融合周波数 (Critical Fusion Frequency: CFF) は、放送方式の検討やディスプレイの設計において重要な要素で、ディスプレイに関しては古くから CRT を想定した実験が数多く行われていた^{1)~6)}。しかし、最近では液晶ディスプレイ (LCD)、プラズマディスプレイ (PDP) や有機 EL (OLED) など新しいディスプレイデバイスが登場し、これらは CRT とは異なる表示方式を採用しているため、ディスプレイにおけるフリッカ視認性が異なっている可能性がある。例えば、LCD の場合、各画素は一般に 1 テレビ (TV) フィールド間発光を維持し続けるため、フリッカは発生しない。しかしこの表示方式と、人間の視覚特性における明るさ感覚の時間的加重効果により、動画ぼやけが生じる⁷⁾。そこで、1TV フィールドあたりの発光期間の割合である発

光デューティ比を低くする方法⁸⁾⁹⁾が提案されている。また OLED においても十分な表示輝度を維持しつつ動画ぼやけを低減する方法として、発光デューティ比を低くする表示方式が採用されている¹¹⁾。低発光デューティ比とする方法は動画ぼやけを低減することができるが、設定する発光デューティ比によってはフリッカが発生する。このため、その対策を考慮したフリッカ視認性の研究が行われている¹⁰⁾。

現在、アナログからデジタルへの放送方式の移行により画像解像度が増したため、推奨される視距離が短縮し、視野角は増加している。例えば、NTSC では画面の高さを H とすると、5H、6H の視距離が推奨されていたが、地上デジタル等の高精細度 TV (High Definition TV: HDTV) では 2H (視野角 48°)、3H (視野角 33°) の視距離が推奨されている。さらにこれより短い 0.75H (視野角 100°) の視距離を推奨するスーパーハイビジョン方式も提案されている¹²⁾。人間の視覚では周辺視野でのフリッカ視認性が高い。したがって、上記の視距離短縮や昨今の表示画面大型化は、視野角の増加に繋がるためフリッカ知覚の増加要因となる。

以上のように、ディスプレイデバイスの異なりや視環境の異なりにより、ディスプレイにおけるフリッカの視認性が以前とは異なっている可能性がある。より画質の優れたディスプレイデバイスの設計においては、それぞれの表示

2009 年 12 月, IDW '09 で発表

2010 年 3 月 1 日受付, 2010 年 6 月 11 日再受付, 2010 年 8 月 4 日採録
[†] 電気通信大学 電子工学科

(〒182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1, TEL 042-443-5178)

* アイシン精機

[†] Department of Electronic Engineering, The University of Electro-Communications

(1-5-1, Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan)

* AISIN SEIKI Co., Ltd.

A: リファレンス表示 (デューティ比100%)
B: テスト表示

図 1 評価実験刺激の提示シーケンス
Presentation structure of test material.

表 1 5 段階劣化尺度
Five-grade impairment scale.

5	わからない (imperceptible)
4	わかるが気になる (perceptible, but not annoying)
3	気になるが邪魔にならない (slightly annoying)
2	邪魔になる (annoying)
1	非常に邪魔になる (very annoying)

方式に応じたフリッカの視認性の知見が必要となる。そこで本研究では、実際のディスプレイ視環境を考慮し、対角 44 インチの大型光源を用いて、視距離、発光デューティ比、周波数に関するフリッカの視認実験を行い、フリッカ視認特性を調べることを目的とした。またフリッカを抑制する各種条件の提案を行う。

2. 視認性評価実験の方法

測定には白色 LED と拡散板で作製した対角 44 インチの白色面光源を使用した。発光領域は縦 58.4 cm、横 98.0 cm である。輝度は LED の電流を変化させ 0.001 cd/m^2 ~ 600 cd/m^2 の範囲で調整した。発光周波数 F は 15 Hz ~ 80 Hz とした。また 1 周期当たりの発光期間の割合を発光デューティ比 D とし、 D を 10 % ~ 90 % と変えた。なお LED 発光の立ち上がり、立ち下がり時間はそれぞれ約 $3 \mu\text{s}$ 、 $1 \mu\text{s}$ である。光源の拡散板上輝度の最小値と最大値の比で定義される輝度均斉度は 89% であった。

測定は ITU-R BT.500-8 の 2 重刺激劣化尺度法に基づいて行った。図 1 に評価実験刺激の提示シーケンスを示す。まず、発光デューティ比を 100 % としたフリッカが発生しないリファレンス表示を 10 秒間行い、その後 3 秒間の休止期間を挟んで各種条件を変えたテスト表示を 10 秒間行ってフリッカを評価した。評価は 5 段階劣化尺度を用いた。表 1 に評価値と評価用語を示す。評価値が小さいほど、フリッカを視認しやすい。

光源の拡散板上における照度は、一般的な家庭のリビングを想定し 100 lx とした¹³⁾。被験者は正常な視覚を持つ 20 代の男性 9 人、女性 1 人の合計 10 人で、光源の中心に小さな目印を設け、これを注視するように指示した。眼精疲労と観察慣れを防ぐため 30 分ごとに休憩を取った。

表 2 視距離と視野角、および想定した放送方式
Relation between viewing distance and field of view for various video formats.

視距離	視野角	放送方式
0.75H	96°	SHV
2H	45°	HDTV
3H	31°	HDTV
5H	19°	NTSC

図 2 各視距離における輝度と平均評価値の関係、 $F = 60 \text{ Hz}$ 、 $D = 50 \%$

Averaged evaluation value vs. luminance for various viewing distances when $F = 60 \text{ Hz}$, $D = 50 \%$.

3. 視距離依存性

各種放送方式を想定し、光源の発光領域の高さを H とすると、視距離を 0.75H (Super Hi-Vision: SHV)、2H (HDTV)、3H (HDTV)、5H (NTSC) の 4 種類として測定を行った。表 2 に視距離、視野角、想定した放送方式の関係を示す。

フリッカ視認実験より得られた、各視距離における輝度と評価値の平均の関係を図 2 に示す。測定条件は発光周波数 $F = 60 \text{ Hz}$ 、発光デューティ比 $D = 50 \%$ で、面光源内の全 LED は毎周期同じタイミングで発光開始するように設定した。前述のように図 2 の縦軸は評価値の平均である。被験者間の評価値のばらつきは輝度によって違いがあった。輝度が 30 cd/m^2 以下ではほとんどばらつきはないが、輝度の増加とともにばらつきも増し、 100 cd/m^2 の時最大となり、それ以上では減少した。図 2 が示すように、輝度が高いほど評価値が低くフリッカを視認しやすい。また視距離が短いほどフリッカを視認しやすいことがわかる。以降本論文では、平均評価値 4.5 をフリッカの知覚限界とし、その時の輝度および周波数をそれぞれフリッカ知覚限界輝度およびフリッカ知覚限界周波数とする。なお後者は CFF とほぼ同等である。

図 2 において平均評価値が 4.5 となる輝度から、各視距離の $F = 60 \text{ Hz}$ におけるフリッカ知覚限界輝度を得ることができる。様々な発光周波数において図 2 を求めたものと同様な実験を行った。その結果を用いて、発光周波数とフリッカ知覚限界輝度の関係をプロットすると図 3 のようになる。なお、すべての測定で発光デューティ比は 50 % とした。図の各ラインより下側がフリッカを視認する領域で

図3 各視距離における周波数とフリッカ知覚限界輝度の関係、 $D = 50\%$
Frequency F vs. perceptible limit luminance for various viewing distances when $D = 50\%$.

ある。図3は各輝度に対するフリッカ知覚限界周波数を示しており、輝度が高いほど周波数を増加しなければフリッカを抑制できないことがわかる。図3を用いると、任意のディスプレイ表示輝度と発光周波数におけるフリッカの視認性を調べることができる。例えば、発光周波数が60Hz、表示輝度が一般的なテレビを想定して 300 cd/m^2 とすると、いずれの視距離においてもフリッカを視認してしまうことがわかる。

視距離依存性に関しては、任意の輝度に対し視距離が短いほどフリッカ知覚限界周波数は高いことがわかる。例えば、5Hと0.75Hでは平均15%の周波数の差がある。輝度が低いほど周波数差は大きく、輝度 0.1 cd/m^2 の場合、33%であった。なお 500 cd/m^2 ではいずれの視距離においても $F = 80 \text{ Hz}$ でフリッカが見受けられなくなった。

Ferry-Porterの法則¹⁴⁾に従うと、フリッカ知覚限界周波数 F_{CF} と輝度 L の関係を次の実験式、

$$F_{CF} = a \log L + b \quad (1)$$

に近似することができる。図3のグラフから、輝度が $0.1 \text{ cd/m}^2 \sim 500 \text{ cd/m}^2$ の範囲で実験式を求めた。各視距離に対する実験式の各パラメータ値を表3にまとめる。視距離が短いほどフリッカを知覚しやすいため、パラメータ b は視距離が短いほど大きい。パラメータ a は視距離が短いほど若干ではあるが小さくなった。一般的なディスプレイの表示輝度である 300 cd/m^2 において、フリッカを抑制するために必要なフィールド周波数を実験式から求め、表3に併記した。図3および表3から、発光デューティ比50%のHDTV用ディスプレイを設計する場合、フリッカ抑制のためにはフィールド周波数を75 Hz以上とする必要があることがわかる。

4. 発光デューティ比依存性

図4に $F = 60 \text{ Hz}$ における発光デューティ比とフリッカ知覚限界輝度の関係を示す。図の各ラインより上側がフリッカを視認する領域である。図4より、発光デューティ

表3 フリッカ知覚限界周波数と輝度の関係実験式(1)の各パラメータ値と輝度 300 cd/m^2 における F_{CF}
Parameters of equation (1) and F_{CF} when luminance is 300 cd/m^2 .

視距離	a	b	$F_{CF@300\text{cd/m}^2}$ [Hz]
0.75H	13.6	42	75.7
2H	14.3	40	75.4
3H	14.5	37	72.9
5H	14.7	36	72.4

図4 各視距離における発光デューティ比とフリッカ知覚限界輝度、 $F = 60 \text{ Hz}$
Perceptible limit luminance vs. light-emission duty ratio for various distances when F is 60 Hz.

図5 各視距離における輝度とフリッカ抑制発光デューティ比の関係、 $F = 60 \text{ Hz}$
Flicker-free light-emission duty ratio vs. luminance for various viewing distances when F is 60 Hz.

が高いほど、より高い輝度までフリッカを抑制できることがわかる。発光デューティ比の増加に伴いフリッカ知覚限界輝度は増加する。その変化は発光デューティ比が50%未満では小さいが、それ以上では急激となる。

図4の発光デューティ比50%以上の結果を用いて、任意の輝度とその輝度に対してフリッカ抑制に必要な発光デューティ比（フリッカ抑制発光デューティ比 D_{CF} とする）の関係を調べた。その結果を図5に示す。図には各視距離における特性を直線近似したものも示した。各ラインの下側がフリッカを視認する領域である。図より輝度が高いほど、高い発光デューティ比とする必要があることがわかる。また、視距離が短いほど発光デューティ比をより高くする必要があることがわかる。任意の輝度において、視距離5Hと0.75Hに対するフリッカ抑制に必要な発光デューティ比の

表 4 フリッカ抑制発光デューティ比と輝度の関係実験式 (2) の各パラメータ値と輝度 300 cd/m² における D_{CF}
Parameters of equation (2) and D_{CF} when luminance is 300 cd/m².

視距離	c	d	$D_{CF}@300\text{cd/m}^2$ [%]
0.75H	37	4	87
2H	44	23	86
3H	47	35	81
5H	50	46	79

図 6 視距離 3H の場合の各輝度における発光デューティ比とフリッカ知覚限界周波数の関係
Perceptible limit frequency vs. light-emission duty ratio for various luminance when viewing distance is 3H.

差は、例えば、輝度が 100 cd/m² では 15%, 300 cd/m² では 6 % と、輝度が高くなるにつれ小さくなった。

ここで、フリッカ抑制発光デューティ比 D_{CF} と輝度 L の関係を、図 5 の直線を元に次の実験式

$$D_{CF} = c \log L - d \quad (2)$$

に近似した。各視距離における実験式のパラメータ値と、輝度 300 cd/m² に対する D_{CF} を表 4 にまとめた。この実験式から輝度が 100 cd/m² ~ 500 cd/m² の範囲で、各輝度に対しフリッカを抑制するために必要な発光デューティ比を求めることができる。例えば、フィールド周波数 60Hz、視距離 3H、輝度 300 cd/m² のディスプレイを設計する場合、フリッカを抑制するためには発光デューティ比を 81 % 以上とする必要があることがわかる。

視距離を 3H とし、上記実験と同様な発光デューティ比依存性の測定を、いくつかの発光周波数に対して行った。その結果から求めた発光デューティ比とフリッカ視認限界周波数の関係を図 6 に示す。図の各ラインより下側がフリッカを視認する領域である。動画ぼやけ低減のためには、発光デューティ比を低くするのが望ましいが、その場合は図 6 が示すようにフィールド周波数を高くする必要がある。通常のフィールド周波数 60 Hz においては、発光デューティ比を 70 % 程度以上にしなければフリッカを抑制できない。ただし、この発光デューティ比では動画ぼやけ低減に対してはあまり効果はない。また図 6 から、ディスプレイとして必要な輝度が高いほど、フリッカを抑制するにはデューティ比もしくはフィールド周波数を高くする必要があるこ

図 7 光源の発光方式
Light emission scheme of light source.

図 8 光源の発光方式と発光デューティ比-フリッカ知覚限界輝度、 $F = 60$ Hz、視距離 2H
Perceptible limit frequency vs. light-emission duty ratio for various light emission scheme of light source. F is 60 Hz and viewing distance is 2H.

とがわかる。

5. 発光方式とフリッカ視認性

前章までの実験では図 7(a) に示すように、1 周期当たりの光源の発光開始タイミングは全領域に渡り同時としていた。しかし、一般的なディスプレイはラスタースキャンを行っており、全領域同時発光とは異なる。また、LCD の動画ぼやけ対策のために発光デューティ比を低くする場合には、バックライトの点灯タイミングを各ラインの走査タイミングに合わせてずらす方法⁹⁾ が用いられており、これも全領域同時発光ではない。そこで、発光タイミングの違いがフリッカ視認性へ与える影響を調べた。図 7(b) に示すように、光源の発光制御領域を水平 10 ブロックに分割し、1 周期当たりの各ブロックの発光開始タイミングを、光源の上部からずらして発光させて評価実験を行った。ディスプレイの全ラインの走査に 1TV フィールドの半分を費やすと仮定すると、全体の 1/10 ライン分の走査には 0.8 ms かかる。これを参考に、隣接する発光ブロック間の発光開始タイミングの差は 0.8 ms とした。

図 8 に各発光方式における発光デューティ比とフリッカ知覚限界輝度の関係を示す。 $F = 60$ Hz、視距離 2H とした。図 8 のように、例えば、一定の発光デューティに対して

は、全領域同時発光方式にくらべ分割非同時発光方式でフリッカなしで表示可能な輝度はわずかに上昇している。つまり分割非同時発光方式の方がフリッカ視認性が低いことがわかる。ただしその差はあまり大きくはない。

6. む す び

新規ディスプレイデバイスの登場や放送方式の変化に対応すべく、ディスプレイにおけるフリッカ視認性について対角 44 インチの大型平面光源を用いた評価実験を行い検討した。特に、視距離と発光デューティ比依存性を中心にフリッカ視認性の実験結果を示し、またいくつかのディスプレイ設計指針を提示した。以下に結果をまとめる。

輝度が高いほどフリッカは視認しやすくなることを確かめた。フリッカ知覚限界周波数と輝度の関係は Ferry-Porter の法則に従っていた。視距離が短いほど、つまり視野角が広いほどフリッカを視認しやすくなった。以上の結果は従来のフリッカ視認性に関する知見と一致しており、現在のディスプレイにより近い条件の大型光源においても、従来の知見が適用可能であることが確かめられた。実験結果から、ディスプレイの大型化や放送方式の移行により、これまで以上にフリッカが視認されやすい状況にあると言える。また、動画ばやけ対策として発光デューティ比を低くする方法が提案されているが、低くするほどフリッカ視認性が増すことが確かめられた。

各視距離において、任意の表示輝度に対するフリッカ抑制に必要なフィールド周波数および発光デューティ比を求めることのできる実験式を示した。それらの式より、例えば、表示輝度が 300 cd/m^2 の HDTV 用ディスプレイにおいて、発光デューティ比が 50% の場合にフリッカを抑制するには、75 Hz 以上のフィールド周波数が望ましいことがわかった。また表示輝度が 300 cd/m^2 の HDTV ディスプレイで、フィールド周波数が 60 Hz の場合は、発光デューティ比を 81 % 以上にすることが望ましいことなどがわかった。

なお、今回の測定では全面均一な発光を提示して実験を行ったが、実際のテレビでは画像が常に変化しているため、今回の結果よりもフリッカが見えにくくなると考えられる。今後は画像表示を含めた実験が必要である。

(文 献)

- 1) C. W. Tyler, R. D. Hamer, "Eccentricity and the Ferry-Porter law", JOSA, **10**, 9, pp. 2084-2087 (1993)
- 2) G. Sperling, M. M. Sondhi, "Model for Visual Luminance Discrimination and Flicker Detection", JOSA, **58**, 8, pp.1133-1145 (1968)
- 3) 福田忠彦, "CFF で示される中心視と周辺視の感度差", テレビ誌, **32**, 3, pp. 210-216 (1978)
- 4) J. E. Farrell, B. L. Benson, C. R. Haynie, "Predicting Flicker Thresholds for Video Display Terminals", Proc. of SID, **28**, 4, pp. 449-453 (1987)
- 5) F. H. van Heesch, M. A. Klompenhouwer, G. de Haan, "Characterizing displays by their temporal aperture: A theoretical framework", J. SID, **16**, 10, pp.1009-1019 (2008)
- 6) 竹内徹二, 大竹史郎, "CRT ディスプレイのちらつき", テレビ学技報, VV177-1, pp.1-6 (1986)
- 7) T. Kurita, A. Saito, and I. Yuyama, "Consideration on Perceived

MTF of Hold Type Display for Moving Images", Proc. of IDW '98, pp.823-826 (1998)

- 8) K. Nishiyama, M. Okita, S. Kawaguchi, "32" WXGA LCD TV using OCB Mode, Low Temperature p-Si TFT and Blinking Backlight Technology", SID '05 Digest, pp.132-135 (2005)
- 9) N. Fisekovic, T. Nauta, H. J. Cornelissen, J. Bruinink, "Improved motion picture quality of AM-LCDs using scanning backlight", Proc. of IDW '01, pp.1637-1640 (2001)
- 10) L. Wang, K. Teunissen, Y. Tu, L. Chen, "Flicker visibility in scanning-backlight displays", J. SID, **16**, 2, pp.375-381 (2008)
- 11) T. Urabe, "Technological challenge toward AM-OLED TV", Proc. of IDW '03, pp. 251-254 (2003)
- 12) Y. Murakami, Y. Hirano, K. Ishii, "Development of 0.3mm-Pixel-pitch Ultra-High-Resolution PDP for "Super Hi-Vision" Broadcasting System", SID '07 Digest, pp. 1522-1525 (2007)
- 13) 窪田悟, 嶋田淳, 岡田想, 中村芳知, 城戸恵美子, "家庭におけるテレビの監視条件", 映情学誌, **60**, 4, pp.597-603 (2006)
- 14) 田崎京二, 大山正, 樋渡涓二, "視覚情報処理", 朝倉書店 (1992)

おがわ まさふみ
小川 将史 2008 年, 電気通信大学卒業。2010 年, 電気通信大学大学院卒業。主としてディスプレイの画質やプラズマディスプレイの駆動に関する研究に従事。現在は, アイシン精機に勤務。

しが ともかず
志賀 智一 1999 年, 電気通信大学博士後期課程卒業。1999 年, 同大学助手。2004 年, 同助教授 (現准教授)。博士 (工学)。主としてプラズマディスプレイや液晶ディスプレイバックライトに関する研究に従事。正会員。