

ハイスピードカメラによる 動画撮影時の照明に起因するちらつき判定方法

Method to Evaluate Flicker Phenomenon Associated with Lighting in Moving Images Recorded by High-Speed Cameras

秦 由季 HATA Yuki 東 洋邦 HIGASHI Hirokuni

スポーツ中継番組などのリプレー場面で活躍するハイスピードカメラは、時間分解能を人の視覚よりも高く設定できる。そのため、人の視覚ではフリッカー（ちらつき）が見えない照明環境でも、ハイスピードカメラで撮影した動画にちらつきが見えることがある。

東芝ライテック（株）は、ハイスピードカメラのフレームレートと照明器具の光出力の周波数及びリップル率が動画のちらつきに関係することを明らかにし、その関係を定量的に表した。更に、周波数解析を用いてちらつき有無を判定する方法を開発した。この方法が、ハイスピードカメラの撮影動画にちらつきが見えない照明器具を設計する上で有効なことを、実験によって確認した。

In recent years, attention has been focused on high-speed cameras that provide higher temporal resolution than the human eye, allowing viewers to watch super-slow-motion replays of important scenes in sports broadcast programs. However, the phenomenon of flicker sometimes occurs in such super-slow moving images recorded under artificial lighting, even when this flicker is invisible to the human eye in the actual illuminated scene.

Toshiba Lighting & Technology Corporation has quantitatively clarified the relationship between the flicker phenomenon and two variables: (1) the frame rate of high-speed cameras, and (2) the frequency and ripple factor of the optical outputs of lighting. Utilizing these results, we have developed a method capable of detecting whether flicker will occur by means of frequency analysis. We have conducted verification tests and confirmed that this method is effective for the design of lighting products that will not cause the flicker phenomenon in moving images taken by a high-speed camera.

1. まえがき

近年、スポーツ中継でのボールの動きやクロスプレーのリプレーで、またドキュメンタリー番組での動物の躍動感あふれる疾走シーンなどの映像で、滑らかなスローモーション再生が取り入れられている。撮影で用いられるハイスピードカメラは、従来のカメラでは捉えられなかった高速の動きをスローモーションで見ることができると、迫力のある映像が楽しめる。しかし、ハイスピードカメラの時間分解能は人の視覚よりも高く設定されているため、図1に示すように、人の視覚ではちらつきが見えない照明環境であっても、ハイスピードカメラで撮影した動画にはちらつきが見えることがある。人の視覚で見た際のちらつきについてはこれまで多くの研究が行われてきたが¹⁾、ハイスピードカメラで撮影した動画のちらつきについての研究報告はほとんどない。

そこで東芝ライテック（株）は、照明器具の光出力とハイスピードカメラで撮影した動画のちらつきとの関係を、主観

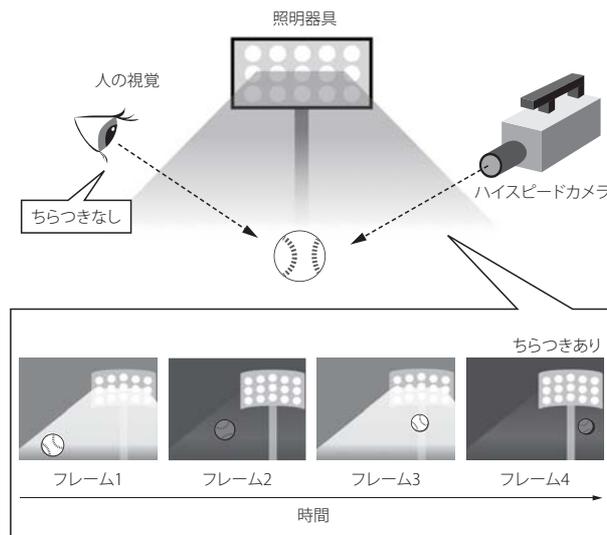


図1. ハイスピードカメラで撮影した動画のちらつき

人の目ではちらつきが見えない照明環境でも、ハイスピードカメラで撮影すると、動画のフレームごとに明暗が生じてちらつきが見える場合がある。

Flicker in moving images recorded by high-speed camera

評価実験によって明らかにした。更にこれを基に、一般の照明器具の光出力から動画のちらつき有無を判定する方法を開発した。ここでは、今回開発した方法の概要と評価実験の結果について述べる。

2. 動画のちらつきに関する主観評価実験

2.1 実験方法

照明器具の光出力と、ハイスピードカメラで撮影した動画のちらつき(以下、ちらつきと略記)との関係を把握するために、図2(a)に示すような環境で主観評価実験を行った⁽²⁾。様々な年齢層(24~47歳)から10名の被験者を選び、パソコン(PC)で再生される10s間の動画(非圧縮AVI(Audio Video Interleave)ファイル、画面解像度512×512画素)を注視してもらい、それぞれの動画に“ちらつきが見える”若しくは“ちらつきが見えない”の2択で評価した。動画の評価は、1動画当たり2回実施した。評価に使用した実験機材の設定値を表1に示す。

被験者が注視する動画は、図2(b)に示すように、光出力を任意に制御できるLED(発光ダイオード)照明装置の照射

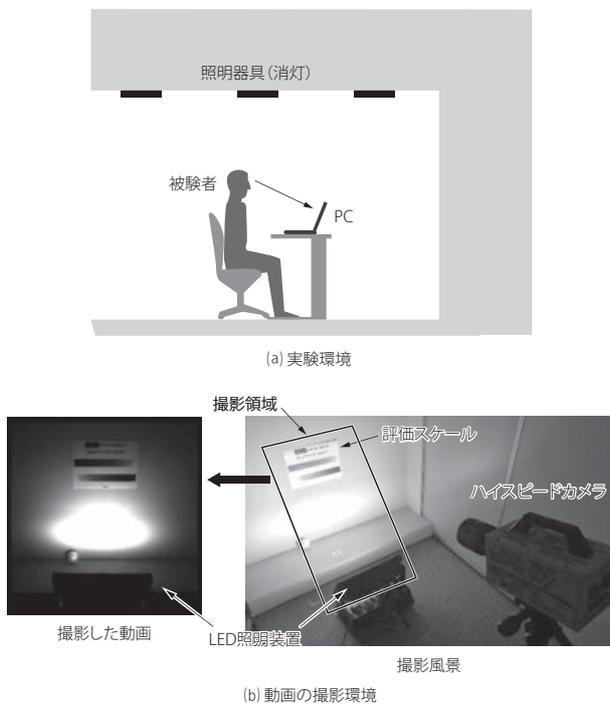


図2. 主観評価実験の概要

被験者は、LED照明装置の照射面をハイスピードカメラで撮影した10s間の動画をPCで注視し、ちらつき有無を評価した。

Outline of subjective evaluation experiments

表1. 動画の撮影・再生時の設定値

Set parameters of high-speed camera and PC used in experiments

(a)ハイスピードカメラの設定		(b)PCの設定	
項目	設定	項目	設定
解像度	1,024 × 1,024 画素	再生フレームレート	30 fps
レンズの絞り	F4	ディスプレイのリフレッシュレート	60 Hz
ガンマ値	1.00		
明るさ補正	なし		

面をハイスピードカメラで撮影したものである。ここで、光出力は照射面の照度で評価し、光出力の波形は正弦波に一定値を合成したものとした。

動画の変数は、光出力の最大値と最小値の差を平均値で除したリップル率⁽³⁾と、光出力の周波数 f をハイスピードカメラのフレームレート(1sあたりに撮影するフレーム数、単位:fps(Frames per Second)) FR で除した f/FR の二つである(図3)。図3(b)に示すように、 f/FR と R が同じであれば、 FR や f が違って、動画の明るさを一定とした場合にちらつきの見え方は同じである。この性質を利用して動画の条件数を削減した。

実験は、 f/FR を6条件、 R を7条件それぞれ用意し、合計42動画を用いて行った(図4)。ここで R と f は、LED照明

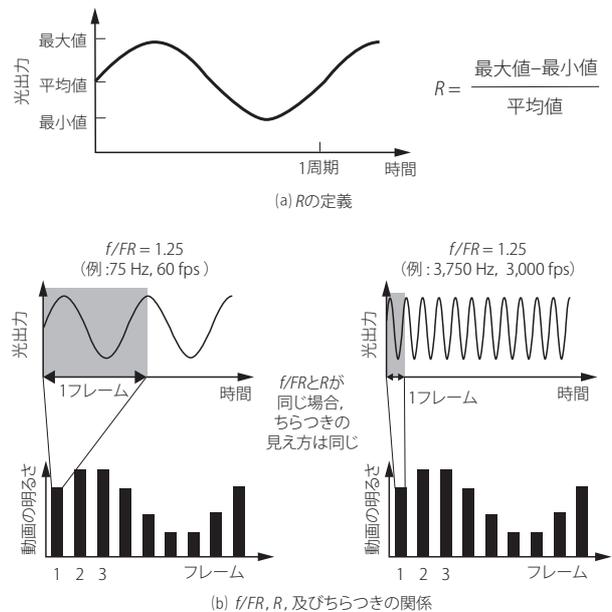


図3. 動画撮影時の変数

光出力の R と f/FR を変数として動画を撮影した。

Variables related to experiments

装置の照射面の照度とLEDに流れる電流が線形の関係であることを利用し、電流から求めた。

2.2 実験結果

主観評価実験で得られたデータから、 f/FR とちらつきが見える割合との関係を、 R ごとに求めた結果を図5に示す。ここでちらつきが見える割合とは、一つの動画で被験者がちらつきが見えると答えた回数を、1動画に対する全評価回数で除した値である。10名の被験者が1動画につき評価を2回行うので、全評価回数は20回になる。

f/FR が同じであれば、 R が高いほどちらつきが見える割合は高く、また R が同じであれば、 f/FR が低いほどちらつきが見える割合が高くなるという傾向が見られた。ただし、 R が

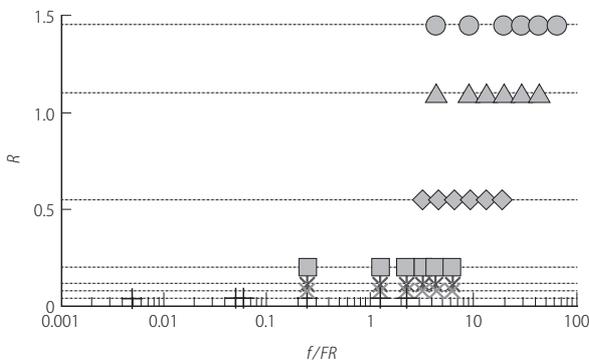


図4. 実験で評価した動画の条件

予備実験によって決定した、 f/FR の6条件と R の7条件の合計42動画を注視して評価を行った。

Experimental conditions for acquisition of moving images

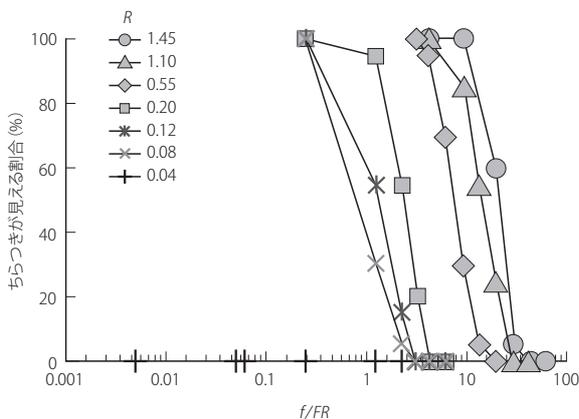


図5. 光出力の R ごとの f/FR とちらつきが見える割合との関係

光出力の R が低く f/FR が高いほど、ちらつきが見えにくいという傾向が見られた。

Relationship between probability of flicker occurrence and frequency divided by frame rate (f/FR)

0.04以下の場合、 f/FR の値にかかわらずちらつきが見える割合は0%であった。

3. ちらつき有無の判定方法

ここでは、2章で述べた主観評価実験の結果を元に、照明器具の光出力からちらつき有無を判定する方法について述べる。まず、ちらつきが見える割合が0%になる f/FR のしきい値を R ごとに求めた(図6)。次に、 f/FR のしきい値と R について回帰分析を行い、ちらつきが見えるか見えないかの境界線を求めるための式(1)を導出した。

$$R = 0.0343f/FR + 0.0079 \quad (f/FR \geq 0.94) \quad (1)$$

$$R = 0.04 \quad (f/FR < 0.94)$$

式(1)を用いることで、 f と R から任意の FR で撮影した動画のちらつき有無を判定することが可能になった。

$f = 10,000$ Hz, $R = 0.75$ のときの光出力を例に、ちらつき有無の判定方法を以下に述べる。ハイスピードカメラの FR は、60 fpsと3,000 fpsの場合で評価した。

まず、図7(a)を用いて60 fpsでの判定方法について述べる。図中の曲線は、式(1)に $FR = 60$ を代入して求めたときのちらつき有無の境界線である。判定する f と R は、境界線の下側、すなわち、ちらつきが見えない領域にある。これより、この光出力で照射された環境を60 fpsで撮影した動画にはちらつきが見えない、と判定できる。

同様に、図7(b)を用いて3,000 fpsで判定を行う方法について述べる。図中の曲線は、式(1)に $FR = 3,000$ を代入して求めたときのちらつき有無の境界線である。判定する f と R は、境界線の上側、すなわち、ちらつきが見える領域に

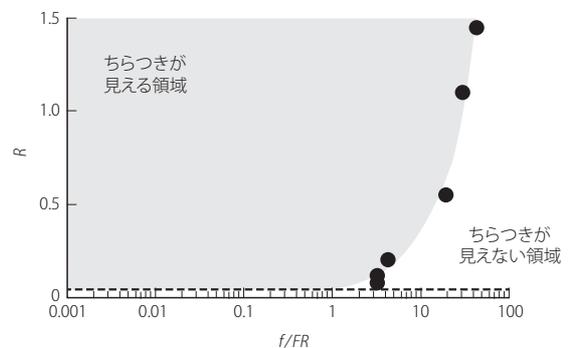


図6. ちらつきのしきい値

R に対する f/FR のちらつきのしきい値を求め、 f/FR と R の回帰式(決定係数は0.99)を導出した。

Flicker threshold of f/FR for each ripple factor

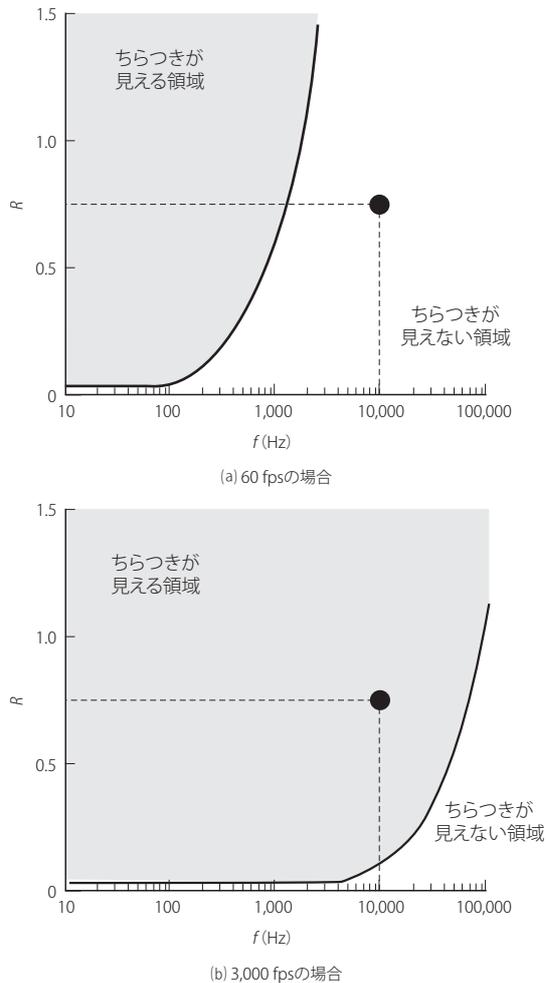


図7. 光出力からちらつき有無を判定する方法

任意のFRに対するちらつきの境界と、光出力の f と R の位置関係から、ちらつき有無を判定する。

Method to evaluate flicker occurrence from frequency and ripple factor of optical outputs of lighting

ある。そのため、この光出力で照射された環境を3,000 fpsで撮影した動画にはちらつきが見える、と判定できる。

4. 一般の照明器具への応用

3章で述べたちらつき有無の判定方法を、一般の照明器具に単純に適用することは困難である。なぜなら3章では、単一周波数で構成される正弦波の光出力を対象としているが、一般の照明器具の光出力は、商用電源や電源のスイッチング回路に由来する複数の周波数で構成されるからである。そこで周波数解析を用いることで、複数(n 個)の周波数 f_n で構成される光出力についても、ちらつき有無の判定が可能であるとの仮説を立てた。この仮説の検証を、図8を用いて行う。

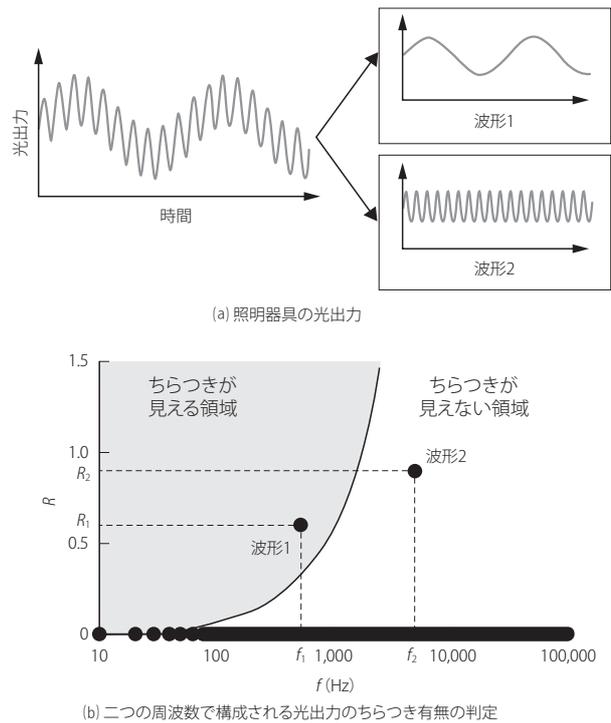


図8. 照明器具の光出力からちらつき有無を判定する仮説

複数の周波数 f_n で構成される照明器具の光出力では、周波数解析により f_n ごとに R を求めた上でちらつき有無を判定する。

Hypothesis of flicker evaluation from optical outputs of lighting products consisting of multiple frequency components

光出力を周波数解析すると、光出力の波形を構成する f_n ($n=1, 2, 3, \dots$)ごとに R_n が求められる。例えば、図8(a)に示す光出力を周波数解析すると、波形を構成している低周波の波形1と高周波の波形2の、二つの周波数 f_1, f_2 に対応した R_1, R_2 が得られる。 f_1, f_2 以外の周波数は光出力に含まれていないため、 R_n (R_1, R_2 を除く)は全て0として扱える。

この結果を元に、 f_n で構成される光出力のちらつき有無を判定する。周波数解析結果に適用できるちらつき有無の境界線は、単一の周波数の正弦波による光出力の場合とは異なり、図8(b)のようになる。例えば、この図のちらつきが見える領域に f_n ごとの R_n が一つでも存在すればちらつきが見える、と判定される。逆に、全ての f_n と R_n がちらつきが見えない領域に存在すればちらつきが見えない、と判定される。図8(b)に示した例では、二つの波形のうち波形1の f_1 と R_1 がちらつきが見える領域にあるのでちらつきが見える、と判定される。

この仮説を検証するため、実際の照明器具を用いて実験を行った。判定には、3,000 fpsで撮影しても動画にちらつ

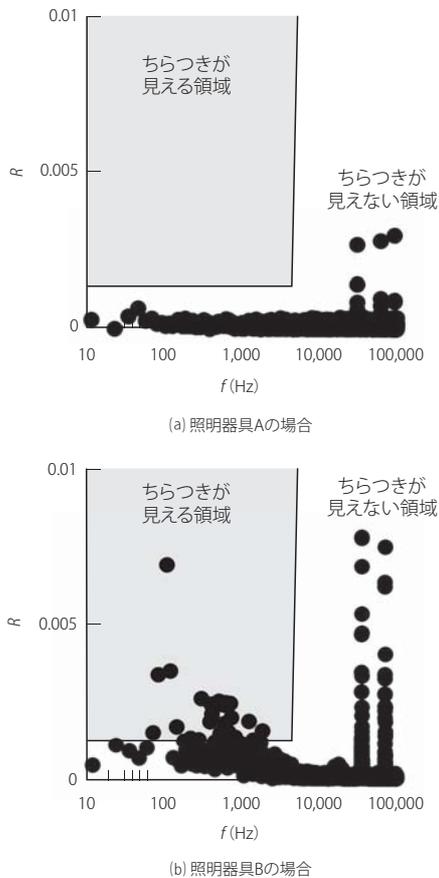


図9. 照明器具のちらつき有無の評価結果

3,000 fpsで撮影したとき、照明器具Aではちらつきが見えないが、照明器具Bではちらつきが見えると判定できる。

Results of flicker evaluation of lighting products

きが見えない照明器具Aと、3,000 fpsで撮影した動画にちらつきが見える照明器具Bを用いた。

照明器具Aと照明器具Bでの判定結果を図9にそれぞれ示す。両照明器具は、光出力がともに複数の周波数で構成されている。照明器具Aの光出力を構成する全ての周波数のRは、図9(a)に示すようにちらつきが見えない領域に存在した。これにより、照明器具Aで照射された環境を3,000 fpsで撮影した動画にはちらつきが見えない、と判定できる。照明器具Bでは、図9(b)に示すように、光出力を構成する周波数のRの一部がちらつきが見える領域に存在した。そのため、照明器具Bで照射された環境を3,000 fpsで撮影した動画にはちらつきが見える、と判定できる。

以上の実験結果から仮説は検証され、光出力が複数の周波数で構成される照明器具についても、周波数解析を用いることでちらつき有無の判定ができることを確認した。

5. あとがき

当社は、ハイスピードカメラで撮影した動画のちらつき有無に、ハイスピードカメラのFR及び光出力の f と R が影響を与えており、それらの関係が定量的に表せることを示した。更に、周波数解析を用いることで、一般の照明器具の光出力から動画のちらつき有無を判定する方法を開発した。判定に用いるちらつき有無の境界線を求めるための式(1)については、更なる精度向上に向けて検討を進めている。

今後、スポーツ中継をはじめとする様々な番組で、ハイスピードカメラに対するニーズが更に高まると予想される。夜間のスポーツ環境でも、ハイスピードカメラで撮影した動画にちらつきが見えない照明器具を提供するため、今回開発した判定方法を応用していく。

文献

- (1) Bullough, J. D. et al. Detection and acceptability of stroboscopic effects from flicker. *Lighting Research & Technology*. **44**, 4, 2012, p.477-483.
- (2) 東 洋邦, 秦 由季. "高速度カメラの撮影動画のちらつきに照明が与える影響". 平成29年度(第50回)照明学会全国大会講演論文集. 多賀城, 2017-09, 照明学会. 2017, p.6-24. (USBメモリー).
- (3) JEL 801:2010. L型ピン口金GX16t-5付直管型LEDランプシステム(一般照明用).



秦 由季 HATA Yuki

東芝ライテック(株)
技術・品質統括部 研究開発センター
照明学会・日本建築学会会員
Toshiba Lighting & Technology Corp.



東 洋邦 HIGASHI Hirokuni

東芝ライテック(株)
技術・品質統括部 研究開発センター
照明学会・日本照明委員会・日本視覚学会会員
Toshiba Lighting & Technology Corp.