

# フレーム間差分の累積を利用したスクリーンカメラ通信

山本 純也<sup>1,a)</sup> 萬代 雅希<sup>2,b)</sup>

受付日 2018年3月5日, 採録日 2018年10月2日

**概要:** 本研究では, フレーム間差分の累積を利用したスクリーンカメラ通信を提案する. スクリーンカメラ通信とは, ディスプレイの表示フレームに対して情報を埋め込んでおき, ユーザがカメラで撮影することで情報を取得する通信である. 既存方式は, 市松模様の有無によって情報を埋め込むため, 通信距離が遠くなるに従い市松模様を鮮明に撮影することができなくなり, ビット誤り率が急激に上昇する問題がある. 提案方式はフレーム間差分の累積を利用することにより, 通信距離が遠くなった際のビット誤り率の上昇を低減することを目指す. 実際にディスプレイとカメラを用いて実験を行い, 通信距離が遠くなった際のビット誤り率の上昇を低減することを示す.

**キーワード:** スクリーンカメラ通信, ビット誤り率

## A Screen Camera Communication Method Using Accumulation of Interframe Differences

JUNYA YAMAMOTO<sup>1,a)</sup> MASAKI BANDAI<sup>2,b)</sup>

Received: March 5, 2018, Accepted: October 2, 2018

**Abstract:** In this paper, we propose a screen camera communication method using accumulation of interframe differences. The bit error rate performance of the conventional method increases sharply as the communication distance increases because the conventional method performs decoding according to the presence or absence of the checkerboard pattern. By using the accumulation of interframe differences, the proposed method reduces the rise in bit error rate when the communication distance becomes long. Through performance evaluation using an actual screen and a camera, we show that the proposed method reduces the BER when the communication distance becomes long.

**Keywords:** screen-camera communications, bit error rate

### 1. はじめに

近年, 駅などの大型ディスプレイに広告を表示するデジタルサイネージに注目が集まっている [1]. 最近のデジタルサイネージでは, 広告を表示すると同時に, 映像上に QR コード [2] を表示してユーザにスマートフォンで撮影させることで情報を配信する方法が普及している. スクリーンカメラ通信は, QR コードと同様にディスプレイを送信機,

カメラを受信機として, ディスプレイに流れる映像に情報を埋め込んでおき, ユーザがカメラで撮影することで情報を得る通信である. 人間が識別できる形式で映像に情報を埋め込むと, 映像を視聴するのを妨げるため, スクリーンカメラ通信では人間が識別できない形式で情報を埋め込む必要がある. 既存のスクリーンカメラ通信 [3], [4], [5] では, 人間が識別できないように映像に情報を埋め込む方法を利用している. HiLight [3] では画像の不透明度を変化させることで情報を埋め込む. InFrame [4] ではディスプレイを高速で点滅させることで情報を埋め込む. TextureCode [5] では, 局所的なテクスチャ特徴量である texton 特徴量を使用して, コンテンツ内の平坦なテクスチャ領域以外にメッセージを埋め込む. 人間は情報が埋め込まれていることを識別できないが, カメラで撮影することで情報を取得でき

<sup>1</sup> 上智大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Science and Technology, Sophia University, Chiyoda, Tokyo 102-8554 Japan

<sup>2</sup> 上智大学理工学部情報理工学科  
Department of Information and Communication Sciences, Sophia University, Chiyoda, Tokyo 102-8554 Japan

a) junya1994@eagle.sophia.ac.jp

b) bandai@sophia.ac.jp

る。スクリーンカメラ通信は、デジタルサイネージでの利用が想定されるため、ディスプレイとカメラが通常のディスプレイの視聴距離よりも離れた位置で通信を行うことが考えられる。しかしながら、既存の InFrame [4] では市松模様の有無により情報を復号するため、通信距離が遠くなるに従い市松模様をカメラで鮮明に撮ることができなくなるため、ビット誤り率 (BER: Bit Error Rate) が急激に上昇する問題がある。

本研究では、スクリーンカメラ通信において、ディスプレイとカメラの通信距離が遠くなった際の BER の上昇を低減することを目的として、フレーム間差分の累積を利用したスクリーンカメラ通信方式を提案する。提案方式は、符号化時は  $\tau$  枚のフレームを利用することでユーザに点滅やちらつきを感じさせずに情報を埋め込む。復号時は  $\tau$  枚のフレームから差分フレームを生成し、差分フレームをすべて足し合わせた累積フレームから復号することで BER を低減する。性能評価では、実際にディスプレイとカメラを用いて通信距離が遠くなった際の BER の上昇を低減できることを示す。

以下、2 章では関連研究としてスクリーンカメラ通信の概要と、既存のスクリーンカメラ通信の情報を埋め込む手法について説明する。3 章では提案方式についてその目的と動作を説明する。4 章では性能評価に用いるパラメータを適切に決定するために、ディスプレイとカメラを用いて基礎評価を行う。5 章ではディスプレイとカメラを用いて実験を行い、提案方式を評価する。6 章では本研究のまとめを述べる。

## 2. 関連研究

### 2.1 スクリーンカメラ通信

スクリーンカメラ通信は、ディスプレイの表示フレームに対して情報を埋め込んでおき、ユーザがカメラで撮影することで情報を取得する通信である。図 1 にスクリーンカメラ通信の概要を示す。図 1 上のようにスクリーンカメラ通信では、通信に利用する二次元コードと人が見る映像

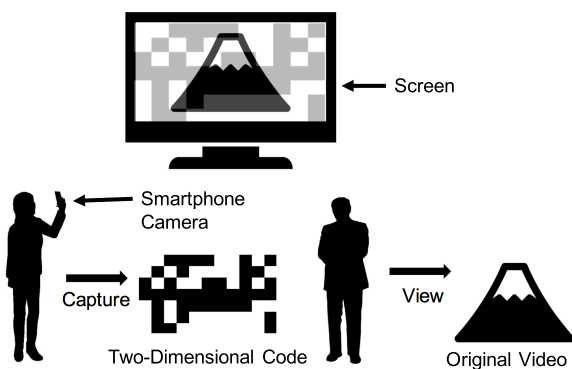


図 1 スクリーンカメラ通信

Fig. 1 Concept screen-camera communications.

をディスプレイに同時に表示する。ユーザはディスプレイをスマートフォンなどで撮影して、撮影した動画データから情報を取得する (図 1 左下)。ディスプレイを見ているユーザには映像のみが見える (図 1 右下)。ディスプレイを見ているユーザには映像のみが見えるように、スクリーンカメラ通信ではユーザが識別できない形式で情報を埋め込む必要がある。

### 2.2 HiLight

HiLight [3] は、画像の不透明度を表現する  $\alpha$  チャネル [6] を利用してスクリーンカメラ通信を行う方式である。画面の表示フレームを分割し、分割した領域に 1 bit の符号をそれぞれ割り当てる。分割した領域の  $\alpha$  チャネルを変化させることで情報を埋め込み通信する。 $\alpha$  チャネルは不透明度を表現するため、 $\alpha$  チャネルを変化させて情報を埋め込むと、人に変化していることが認識されにくい。しかし、 $\alpha$  チャネルの変化はカメラで撮影した際も微細な変化として映る。このため、HiLight は 1 枚のフレームに多くの情報を割り当てようと画面の表示フレームを細かく分割すると、 $\alpha$  チャネルの変化を誤って認識する。誤って認識することで、BER が上昇するため、ディスプレイの表示フレームを分割する際、1 bit を割り当てる領域が大きくなるように分割する必要がある。これにより、1 枚の表示フレームに割り当てることができる情報量が少なくなるため、単位時間当たりに多くの情報を送信することができない問題がある。

### 2.3 TextureCode

TextureCode [5] は、局所的なテクスチャ特徴量である *texton* 特徴量を使用して、コンテンツ内の平坦なテクスチャ領域以外に情報を埋め込むことでスクリーンカメラ通信を行う方式である。平坦なテクスチャ領域以外に情報を埋め込むことで、人が点滅を感じにくくする。符号化時はマンチェスタ符号を利用し、2 枚のフレームで 1 ビットを送信する。1 を送信する際は、1 枚目のフレームの輝度値に  $\alpha$  加算し、2 枚目のフレームの輝度値から  $\beta$  減算する。0 を送信する際は、1 枚目のフレームの輝度値から  $\beta$  減算し、2 枚目のフレームの輝度値に  $\alpha$  加算する。復号時には送信時の 2 倍のフレームレートで撮影し、4 枚のフレームから復号する。4 枚のフレームのうち前 2 フレームの輝度値の平均と後ろ 2 フレームの輝度値の平均を比較することで、埋め込んだビットが 0 か 1 かを判別する。送信時に輝度値に加減する値は、人へ点滅を感じさせないために小さい値にする必要がある。TextureCode は 2 枚のフレームの輝度の平均にて比較を行うため、通信距離が遠くなった際に十分な輝度の差を得られず、BER が高くなる課題がある。

## 2.4 InFrame

InFrame [4] は、高リフレッシュレートのディスプレイを利用して、ディスプレイを高速で点滅させることによってスクリーンカメラ通信を行う方式である。人の目には高速で点滅するものを見たときに点滅を感じとれなくなる Flicker Fusion がある [7]。人の目は点滅を感じなくなると、点滅の代わりに点滅間の明るさの平均を感じる [8]。文献 [8] を利用して InFrame は情報を埋め込む。InFrame では、フレームを  $m \times n$  の領域に分割し、1 枚のフレームで  $mn$  ビットのデータを送信する。InFrame では、1 を符号化する領域には市松模様になるよう互い違いに輝度値を  $\delta$  加算する。隣接する次のフレームでは、前のフレームにて輝度値を  $\delta$  加算した領域と同じ箇所の輝度値を  $\delta$  減算する。隣接するフレーム間で輝度値を変化させることで、点滅を起こす。高リフレッシュレートのディスプレイを用いて高速で点滅を起こすことで、変化が認識されにくくなる。さらに、人の目には高速で動くものを見たとき、点滅を感じやすくなる Phantom Array Effects がある [9]。埋め込む情報が変わる際に輝度値を加減する領域がフレーム間で変化する。この変化の際に Phantom Array Effects の影響により、点滅を感じやすくなる。InFrame では  $\tau$  回同じ情報を送信し、輝度値を加減する  $\delta$  を埋め込む情報の切り替わり目に近づくと徐々に小さくすることで Phantom Array Effects を防ぐ。復号方式は、1 枚のフレームから復号するために市松模様を平滑化したときの平滑化前後の絶対値差分和が、市松模様がいない箇所と比べて大きくなることを利用する。InFrame の復号手順を以下に示す。

- (1) 撮影した動画のフレームを  $m \times n$  の領域に分割
- (2) 分割した領域を平滑化
- (3) 平滑化前後の絶対値差分和を算出
- (4) 絶対値差分和がしきい値以上であれば 1、しきい値以下であれば 0 として復号

InFrame は市松模様の有無により復号するため 1 枚のフレームのみで復号することができる。しかし、通信距離が遠くなると市松模様の有無を鮮明にカメラで撮ることができなくなる。これにより、撮影した動画フレームを分割した領域の平滑化前後の絶対値差分和が小さくなり BER が上昇する問題がある。InFrame++ [10] は、InFrame を拡張した手法である。InFrame++ では市松模様のパターンを複数用意することで 1 つの領域で複数ビットを送ることを可能にする。復号時は、1 枚のフレームを使用して領域の市松模様のパターンが複数あるパターンの中のどのパターンに該当するかを判別することで 1 つの領域から複数ビットを復号する。InFrame++ は、InFrame と比較するとフレーム 1 枚から復号する際の BER が低減されている。InFrame および InFrame++ はともに 1 枚のフレームから復号する方式である。

## 3. 提案方式

本研究では、通信距離が遠くなった際の BER を低減することを目的としたフレーム間差分の累積を利用したスクリーンカメラ通信方式を提案する。提案方式では、 $\tau$  枚 ( $\tau$  は 4 の倍数) のフレームを利用して情報を埋め込む。符号化時は  $i$  番目から  $i + \tau - 1$  番目までの隣接するフレームの差分に対して符号を割り当てる。フレーム間の差分に対して符号を割り当てることにより市松模様の有無を鮮明に撮影する必要をなくし、通信距離が遠くなった際の BER の低減を目指す。復号時は  $i$  番目から  $i + \tau - 1$  番目までの隣接するフレームから差分フレームを  $\tau/2$  枚生成する。 $\tau/2$  枚の差分フレームをすべて加算して累積フレームを生成し、累積フレームの白色ピクセルの数によりしきい値処理をして復号する。フレーム間の差分は通信距離が遠くなるに従い徐々に小さくなるが、 $\tau/2$  から累積フレームを生成することで、通信距離が遠くなった際においても BER を低減することができる。

### 3.1 符号化時

$i$  番目から  $i + \tau - 1$  番目までの  $\tau$  フレームで  $mn$  ビットのデータを送信するために以下の手順で符号化を行う。

- (1) 表示フレームを  $m \times n$  の領域に分割
- (2)  $i + 2x$  番目の表示フレームの分割した領域に対して、1 を符号化する際は各領域の輝度値を  $\delta_x$  加算。0 を符号化する際は加算を行わない ( $x = 0, 1, 2, \dots, \tau/2 - 1$ )
- (3)  $i + 2x + 1$  番目の表示フレームに対して、 $i + 2x$  番目の表示フレームと対応するように 1 を符号化する領域の輝度値を  $\delta_x$  減算。0 を符号化する際は減算を行わない  $x$  は 2 枚のフレームを 1 組としたときのフレームの番号とする。 $i + 2x$  番目と  $i + 2x + 1$  番目のフレームの輝度値の加減値に利用する  $\delta_x$  は以下の値とする。

$$\delta_x = \begin{cases} \delta_{x-1} + 1 & (x \leq \tau/4) \\ \delta_{x-1} - 1 & (x > \tau/4) \end{cases}$$

Phantom Array Effects を防ぐために輝度値の加減値を徐々に変化させる必要がある。図 2 に加減値  $\delta_x$  の変化手法を示す。図 2 のように提案方式では、 $\tau$  枚のフレーム内で徐々に  $\delta_x$  の値を上昇し、データの切り替わり目に近づくと徐々に値を減少する。これにより、Phantom Array Effects を防ぎつつ、 $\tau$  枚のフレームに情報を埋め込むことができる。

図 3 に  $m = 3$ ,  $n = 2$ ,  $\tau = 8$  とし、“110011” の 6 ビットを送信する場合の提案方式の符号化例を示す。図 3 のように、提案方式は  $\tau$  枚のフレームを利用して情報を割り当てる。 $i$ ,  $i + 1$  番目のフレームは輝度値の加減を行わない。 $i + 2$ ,  $i + 4$ ,  $i + 6$  番目のフレームの白色の領域はオリジナルのフレームに対して輝度値を  $\delta_x$  加算したことを示して

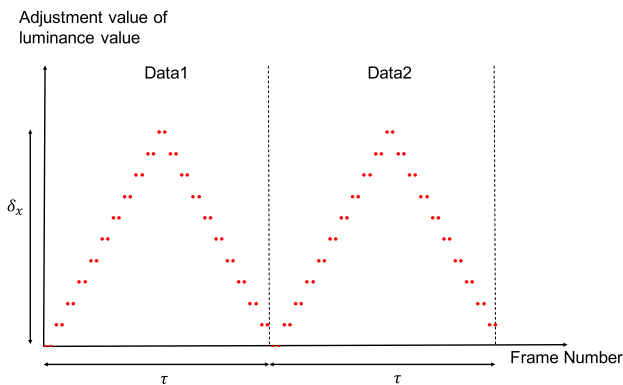


図2 加減値  $\delta_x$  の変化 ( $\tau = 40$ )

Fig. 2 Change in adjustment value  $\delta_x$  ( $\tau = 40$ ).

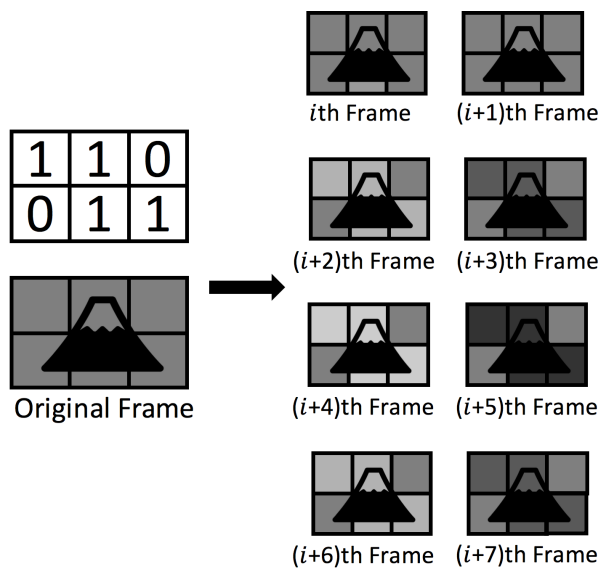


図3 提案方式の符号化例 ( $m = 3, n = 2, \tau = 8$ )

Fig. 3 Example of encoding procedure ( $m = 3, n = 2, \tau = 8$ ).

いる。  $i + 3, i + 5, i + 7$  番目のフレームの黒色の領域はオリジナルのフレームに対して輝度値を  $\delta_x$  減算したことを示している。この例では、 $\delta_0 = 0, \delta_1 = 1, \delta_2 = 2, \delta_3 = 1$  として輝度値を加減する  $\delta_x$  を2フレームに1度変化させている。

### 3.2 復号時

$i$  番目から  $i + \tau - 1$  番目までの  $\tau$  フレームから  $mn$  ビットのデータを受信する。カメラで撮影した動画から得た  $i$  番目から  $i + \tau - 1$  番目までの  $\tau$  フレームから復号する際の手順を示す。累積フレームを  $m \times n$  の領域に分割し、さらに分割した領域を境界部と中央部に分割したときの境界部の白色ピクセルの数を  $N_{wpb}$ 、中央部の白色ピクセルの数を  $N_{wpc}$ 、境界部の総ピクセル数を  $N_{pb}$ 、中央部の総ピクセル数を  $N_{pc}$  とする。境界部と中央部の白色ピクセル数の重み付け係数を  $\alpha, \beta$  とする ( $\alpha < \beta$  かつ  $\alpha + \beta = 1$ )。

- (1)  $i$  番目から  $i + \tau - 1$  番目までのフレームから差分画像を隣接するフレームごとに生成

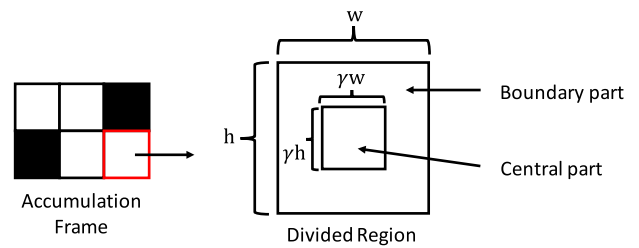


図4 境界部と中央部への領域の分割手法

Fig. 4 Method of dividing region into boundary and central parts.

- (2) 生成した  $\tau/2$  枚の差分画像の輝度を各ピクセルごとに加算
- (3) 加算した値がしきい値  $T$  以上の際は白,  $T$  以下であれば黒とする2値の累積フレームを生成
- (4) 累積フレームを  $m \times n$  の領域に分割
- (5) 分割した領域をさらに、境界部と中央部に分割
- (6) 領域ごとに  $\frac{N_{wpb}\alpha + N_{wpc}\beta}{N_{pb}\alpha + N_{pc}\beta}$  を計算
- (7)  $\frac{N_{wpb}\alpha + N_{wpc}\beta}{N_{pb}\alpha + N_{pc}\beta} \geq \frac{1}{2}$  であったら1, そうでなければ0として復号

1フレームに  $mn$  ビットを割り当てるため、フレームを  $m \times n$  に分割する。フレームを分割すると、分割した領域の境界部は隣接する領域の輝度値の影響を受けるため、カメラで撮影した際に本来の輝度値と異なる明るさになる。このため、累積フレームを生成した際に白黒を誤ったピクセルとなるため、復号時の手順6では境界部よりも中央部に重みを付けて計算する。図4に境界部と中央部への領域の分割手法を示す。図4のように累積フレームを  $3 \times 2$  に分割し、分割した領域を境界部と中央部に分割する。累積フレームを  $3 \times 2$  に分割した領域の幅を  $w$ 、高さを  $h$  とする。中央部の幅と高さは  $3 \times 2$  に分割した領域に対して定数  $\gamma$  ( $\gamma < 1$ ) を乗算した値とし、領域の中心部分を中央部、中央部以外の領域を境界部とする。

図5に  $m = 3, n = 2, \tau = 8$  としたとき、“110011”の6ビットを復号する場合の提案方式の例を示す。図5のようにまず隣接するフレームから差分フレームを4枚生成する。次に差分フレームの輝度値を各ピクセルごとに足し合わせ、足し合わせた値がしきい値以上であれば白、そうでなければ黒とする累積フレームを生成する。累積フレームを  $3 \times 2$  に分割し、分割した領域をさらに境界部と中央部に分割する。最後に累積フレームの各領域の白色ピクセルの数から復号する。

提案方式は  $\tau$  枚のフレームをすべて利用して、隣接するフレームの差分を累積し累積フレームから復号する。人の目から見た際に二次元コードを認識しにくくするために輝度値を  $\pm\delta_x$  したフレームを交互に表示する必要がある。さらに Phantom Array Effects を防ぐために輝度値を加減する値  $\delta_x$  を  $\tau$  枚のフレームを用いて徐々に変化させる必要がある。InFrame は、1枚のフレームから復号する方式で、

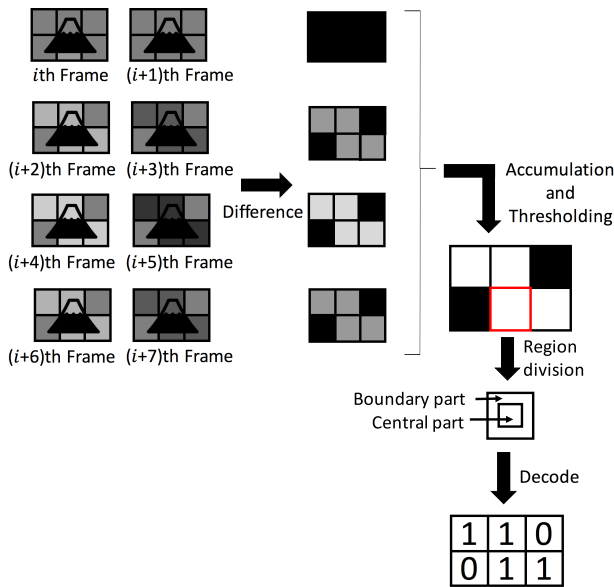


図 5 提案方式の復号例 ( $m = 3, n = 2, \tau = 8$ )

Fig. 5 Example of decoding procedure ( $m = 3, n = 2, \tau = 8$ ).

提案方式は  $\tau$  枚すべてのフレームを利用して復号する方式である。InFrame は 1 枚のフレームから復号するため、市松模様の有無を撮影する必要があるが、提案方式は差分の累積を利用するため、細かな模様を撮影する必要がない。また、InFrame は Phantom Array Effects を防ぐために  $\tau$  回同じ情報を送信しているが、復号には 1 枚のフレームのみを利用している。フレーム間の差分は通信距離が遠くなるに連れ徐々に小さくなるが、 $\tau/2$  から累積フレームを生成することで、通信距離が遠くなった際においても BER を低減することができる。このため、提案方式は通信距離が遠くなった際に急激に BER が上昇する問題を解決することができる。

## 4. 基礎評価

### 4.1 実験環境

フレームを  $m \times n$  に分割する際の適切な  $m, n$  の値を評価するために基礎評価を行う。  $m \times n$  の値を  $16 \times 9, 32 \times 18, 64 \times 36, 80 \times 45, 128 \times 72, 160 \times 90, 255 \times 144$  としてそれぞれの分割数における BER の評価を行う。ディスプレイとカメラの間の通信距離は 50 cm とする。カメラはディスプレイに対して水平垂直に設置する。ディスプレイは Eizo Foris FS2735, カメラはスマートフォンの Nexus6P を使用する。動画の内容は再生時間 1 秒、解像度  $2,560 \times 1,440$ , フレームレート 120 fps の動画を利用する。実験に使用するパラメータは  $\alpha = 0.2, \beta = 0.8, \tau = 60$  とする。評価は 5 回の試行の平均とする。

### 4.2 評価結果

図 6 にフレームの分割数の変化に対する BER を示す。図 6 より BER は  $80 \times 45$  分割から上昇し始め、 $128 \times 72$

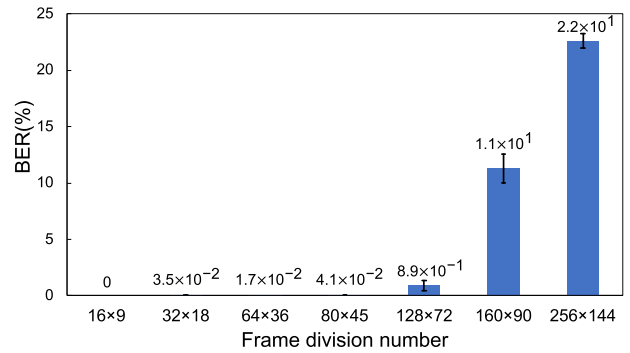


図 6 フレームの分割数の変化に対する BER

Fig. 6 BER for frame division number.

分割からは顕著に BER が上昇することが確認できる。これは分割数が増加すると分割した領域に割り当てられるピクセルが減少し、復号時の白色ピクセル数を誤って判断するためであると考えられる。 $32 \times 18$  分割における値が  $64 \times 36$  分割よりも高いことが確認できる。これはカメラを設置した際に完全に水平垂直に設置できなかったことで発生した誤差であると考えられる。性能評価では BER が上昇し始める直前の  $64 \times 36$  分割を利用して評価を行う。

## 5. 性能評価

### 5.1 実験環境

通信距離が遠くなった際の BER の変化を実際に 27 インチのディスプレイとカメラを用いて実験を行い評価する。通信距離とは、ディスプレイとカメラの間の距離である。通信距離を 50 cm, 100 cm, 150 cm として評価をする。通信距離 100 cm とは、27 インチディスプレイの一般的な視聴距離 [11] を想定した距離である。通信距離 100 cm の前後 50 cm において評価することで、通信距離が遠くなった際の BER の変化を評価する。評価指標は復号したデータの誤り符号の数を送信したデータの総数で割った BER を利用する。評価での比較対象は InFrame とし、InFrame の評価指標は InFrame [4] 内での Block 単位での BER とする。ディスプレイは Eizo Foris FS2735, カメラは SONY DSC-RX100M5 を使用する。図 7 に実験風景を示す。図のように撮影するときは三脚を用いてカメラを固定し、ディスプレイに対してカメラが垂直になるように設置する。評価は明るい室内にて行う。受信の際、カメラはフレームレート 120 fps でズーム機能は使用せずに解像度  $1,920 \times 1,080$  で動画を撮影する。撮影した動画を FFmpeg [12] を利用して、フレームごとの静止画を解像度  $1,920 \times 1,080$  で生成する。送信時には、再生時間 1 秒、解像度  $2,560 \times 1,440$ , フレームレート 120 fps の動画を利用する。復号時に利用する静止画のディスプレイ領域の解像度は通信距離 50 cm の際は  $1,600 \times 900$ , 100 cm の際は  $832 \times 468$ , 150 cm の際は  $544 \times 306$  である。動画の内容は、RGB 値 (127, 127, 127) のグレーの動画と、一般的な動



図 7 実験風景  
Fig. 7 Snapshot of experiment.



図 8 動画のスクリーンショット  
Fig. 8 Screenshot for each video scene.

表 1 InFrame の評価における各パラメータ  
Table 1 Parameter in the evaluation of InFrame.

フレームの分割数	符号化ビット数	$\tau$	$\delta$
64 × 36	4,608	60	15

表 2 提案方式の評価における各パラメータ  
Table 2 Parameter in the evaluation of the proposed method.

フレームの分割数	符号化ビット数	$\tau$	$T$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
64 × 36	4,608	60	100	0.2	0.8	9/16

画の例として BigBuckBunny [13] の 5, 30, 45 秒のシーンをを用いる。図 8 に実験に使用する動画のスクリーンショットを示す。図 8(a) は RGB 値 (127, 127, 127) のグレー動画である。図 8(b) は BigBuckBunny の 5 秒のシーンである。図 8(c) は BigBuckBunny の 30 秒のシーンである。図 8(d) は BigBuckBunny の 45 秒のシーンである。評価は 5 回の試行の平均とする。表 1 に InFrame の評価でのパラメータを示す。また、表 2 に提案方式の評価でのパラメータを示す。評価でのパラメータは、事前実験の結果より定めた。

## 5.2 評価結果

図 9 にそれぞれの動画の内容において通信距離を 50,

100, 150 cm としたときの BER を示す。図 9(a), (b) より InFrame は通信距離が 100 cm から 150 cm になる際に急激に BER が上昇することが確認できる。これは、通信距離が遠くなると市松模様をカメラで鮮明に撮影することが困難になるためである。InFrame は、1 枚のフレームを  $m \times n$  に分割した領域を平滑化し、平滑化前後の絶対値差分和を計算する。このとき市松模様がある領域は、市松模様のない領域と比較して絶対値差分和が大きくなることを利用して復号している。このため、通信距離が遠くなり市松模様を鮮明に撮影することができなくなると BER が上昇する。図 9(c), (d) より InFrame は 50, 100, 150 cm のいずれの通信距離においても BER が高いことが確認できる。これは BigBuckBunny 30 秒, 45 秒シーンが図 8(c), (d) のように細かな模様で構成されているシーンであるためだと考えられる。フレームを分割した領域に細かな模様が含まれる場合、市松模様の有無にかかわらず平滑化前後の絶対値差分和が大きくなる。これにより市松模様の有無を判断できなくなるため、いずれの通信距離においても BER が高い。一方、提案方式は図 9(a), (b), (c), (d) より通信距離 100 cm から 150 cm になる際の BER の上昇を低減していることが確認できる。各動画の内容において提案方式は BER の上昇を低減しているため、提案方式は一般的な動画においても有効である。提案方式は  $\tau$  枚のフレームをすべて利用して、隣接するフレーム間の差分をすべて足し合わせて累積フレームを生成し、累積フレームから復号する。フレーム間の差分を利用することで、細かな模様を鮮明に撮影する必要がなく通信距離が遠くなった際の BER の上昇を低減することができる。Block ごとの BER からスループットを算出する。スループット  $Th_{block}$  は 1 秒あたりに送信するビット数を  $N_{bit}$ , Block ごとの BER を  $p$  としたとき、以下の式で算出される。

$$Th_{block} = N_{bit}p$$

本評価における  $N_{bit}$  は 4,608 である。表 3 にそれぞれの動画の内容において通信距離を 50, 100, 150 cm としたときのスループットを示す。表 3 よりスループットは通信距離が遠くなるに従い低下することが確認できる。これは、通信距離が遠くなることで BER が上昇するためである。

## 5.3 GOB を考慮した際の BER の考察

GOB を考慮した際の BER を考察する。InFrame [4] では、フレームを  $m \times n$  に分割したときの 1 つの領域を Block とし、 $2 \times 2$  の Block を GOB (Group of Blocks) としている。このとき、GOB は 3 ビットのデータと 1 ビットのパリティビットから構成される。図 9 にて得られた BER を用いて、GOB を使用した際の Available GOB, Error rate of GOB, スループットを確率的に算出しパリティチェックをした際の影響を考察する。Available GOB とはパリ

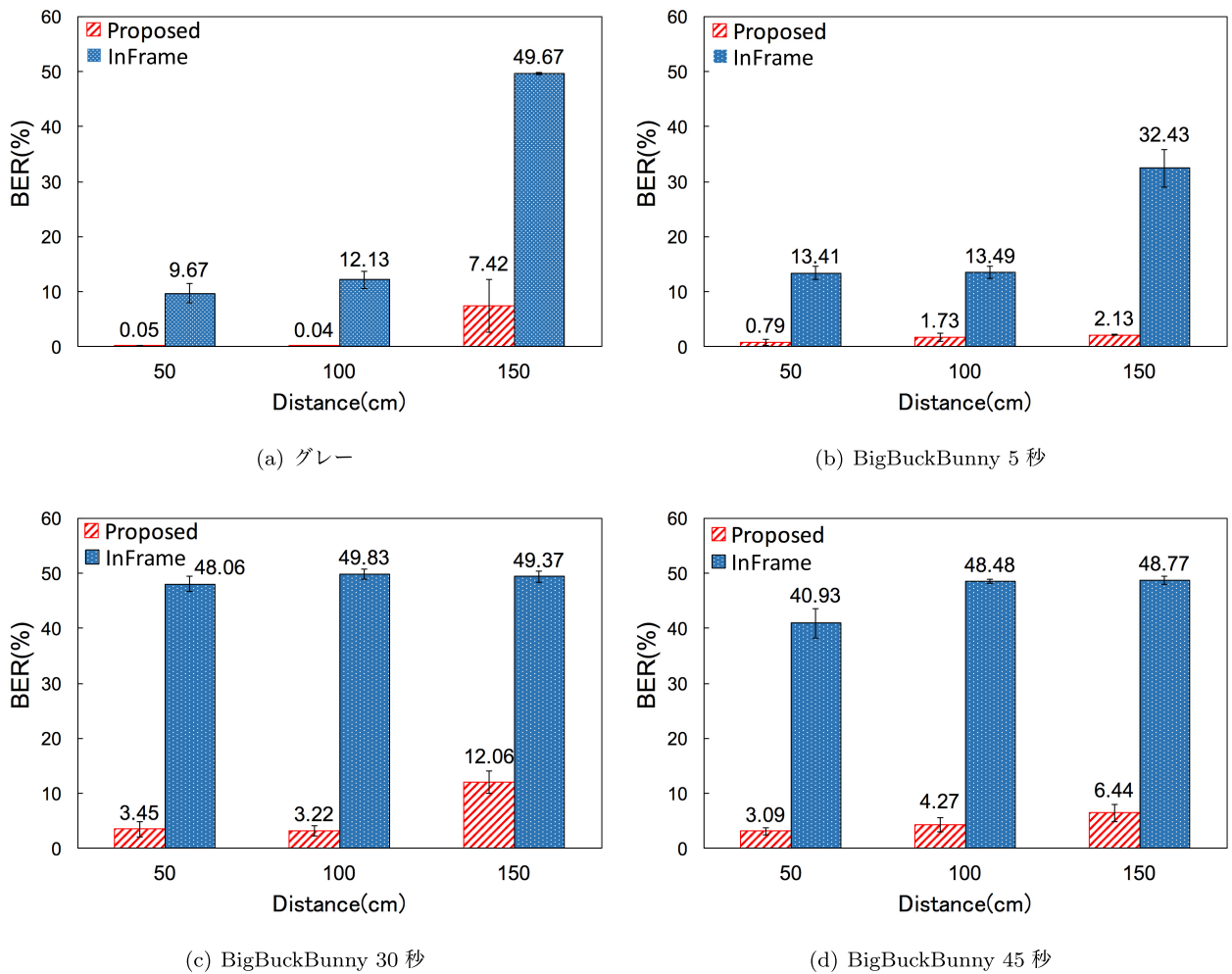


図 9 各通信距離における BER

Fig. 9 BER versus distance.

表 3 各通信距離におけるスループット

Table 3 Throughput versus distance.

	gray			5s			30s			45s		
	50 cm	100 cm	150 cm	50 cm	100 cm	150 cm	50 cm	100 cm	150 cm	50 cm	100 cm	150 cm
InFrame [bit/s]	4,162.2	4,049.0	2,319.0	3,990.2	3,986.4	3,113.8	2,393.4	2,311.8	2,333.0	2,722.0	2,374.0	2,360.8
Proposed [bit/s]	4,605.6	4,606.2	4,266.0	4,571.4	4,528.4	4,509.8	4,448.8	4,459.4	4,052.4	4,465.4	4,411.4	4,311.4

ティチェックを行うことで正しいと認識できる GOB の出現確率である。Error rate of GOB とは Available GOB の中での BER である。Available GOB を  $p_{availGOB}$ 、Error rate of GOB を  $p_{errGOB}$ 、スループットを  $Th_{GOB}$  とする。Block ごとの BER を  $p$ 、1 秒あたりに送信する GOB の総数を  $N_{GOB}$  とした際の  $p_{availGOB}$ 、 $p_{errGOB}$ 、 $Th_{GOB}$  は以下の式で算出される。

$$\begin{aligned}
 p_{availGOB} &= (1-p)^4 + {}_3C_1 p^2(1-p)^2 + {}_3C_2 p^2(1-p)^2 + p^4, \\
 p_{errGOB} &= \frac{p^2(1-p)^2}{p_{availGOB}} + \frac{2\{p^2(1-p)^2\}}{p_{availGOB}} + \frac{p^4}{p_{availGOB}}, \\
 Th_{GOB} &= 3N_{GOB}p_{availGOB}(1-p_{errGOB}).
 \end{aligned}$$

本評価における  $N_{GOB}$  の値は 1,152 である。

図 10 に BER から各試行ごとに確率的に算出した Error rate of GOB を示す。また図 10 より、50, 100, 150 cm のすべての通信距離において、提案方式は、InFrame と比較した際に Error rate of GOB が低減することを確認した。表 4 に BER から各試行ごとに確率的に算出した Available GOB を示す。表 4 より 50, 100, 150 cm のすべての通信距離においても、提案方式は InFrame と比較して Available GOB が向上することを確認した。表 5 に BER から各試行ごとに確率的に算出したスループットを示す。表 5 より提案方式は InFrame と比較して、スループットが向上することを確認した。

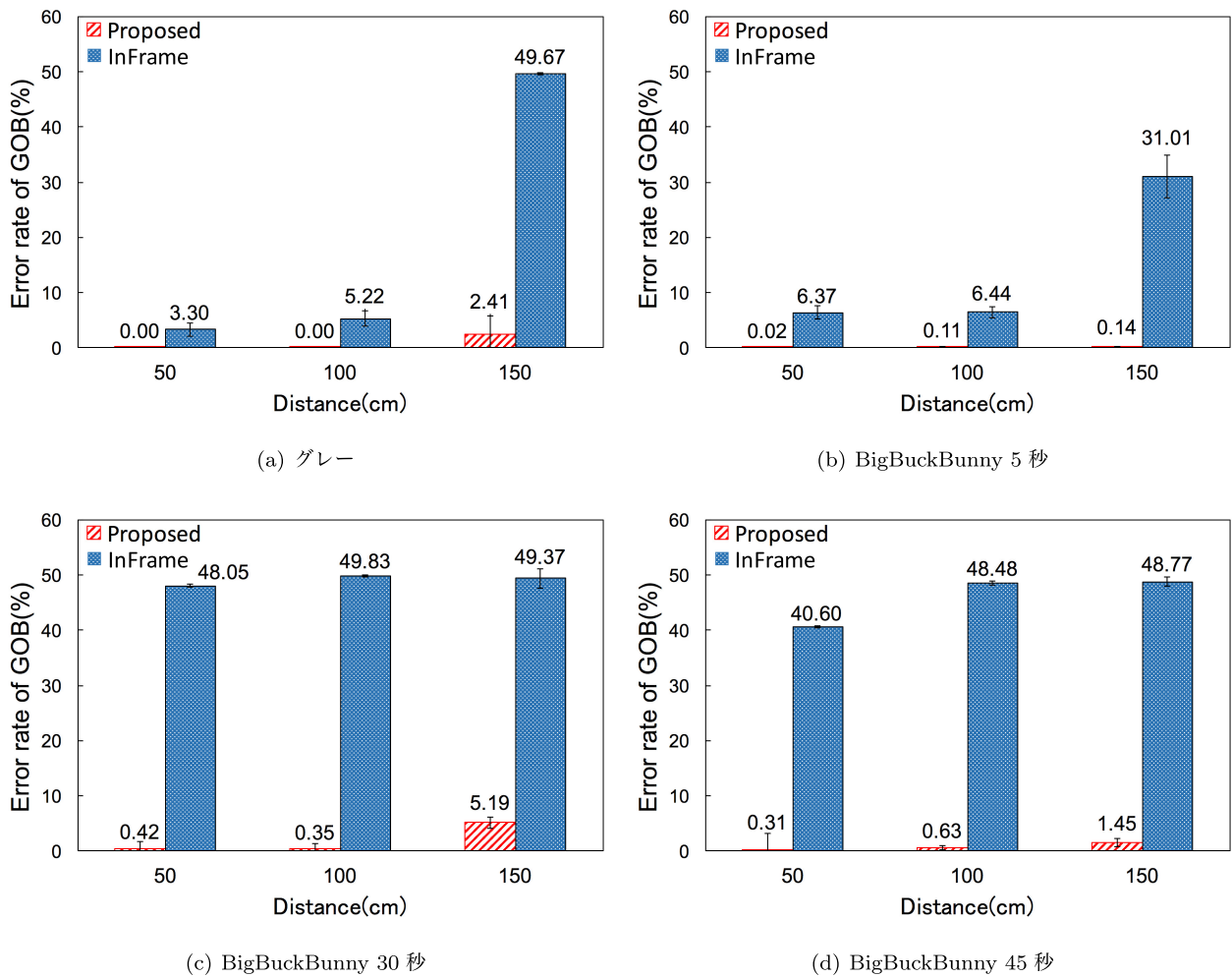


図 10 各通信距離における Error rate of GOB

Fig. 10 Error rate of GOB versus distance.

表 4 Available GOB

Table 4 Available GOB.

	gray			5s			30s			45s		
	50 cm	100 cm	150 cm	50 cm	100 cm	150 cm	50 cm	100 cm	150 cm	50 cm	100 cm	150 cm
InFrame [%]	71.3	66.6	50.0	64.4	64.3	50.9	50.0	50.0	50.0	50.1	50.0	50.0
Proposed [%]	99.8	99.8	77.5	96.9	93.5	92.0	87.7	88.3	66.8	88.8	85.1	79.0

表 5 GOB を考慮した際のスループット

Table 5 Throughput considering GOB.

	gray			5s			30s			45s		
	50 cm	100 cm	150 cm	50 cm	100 cm	150 cm	50 cm	100 cm	150 cm	50 cm	100 cm	150 cm
InFrame [bit/s]	2,383.8	2,245.2	869.6	2,084.6	1,673.8	1,223.1	897.6	863.4	874.9	1,028.1	890.3	885.3
Proposed [bit/s]	3,448.8	3,450.6	2,621.1	3,348.7	3,227.5	3,175.2	3,017.4	3,042.8	2,189.0	3,057.7	2,423.1	2,690.2

#### 5.4 点滅やちらつきについての主観評価

提案方式を適用した動画がユーザに対して点滅やちらつきを感じさせるかを評価するために主観評価実験を行う。被験者に提案方式と InFrame を実装した動画を視聴してもらい、点滅やちらつきを感じるかどうかを評価する。評価指標は“点滅やちらつきをまったく感じない”を 0, “ほとんど点滅やちらつきを感じない”を 1, “少し点

滅やちらつきを感じる”を 2, “明らかに点滅やちらつきを感じる”を 3, “強烈に点滅やちらつきを感じる”を 4 とした 0 から 4 の 5 段階の数値とする。被験者は 20 代の男性 7 名女性 2 名の合計 9 名とする。再生時間 10 秒、解像度 2,560 × 1,440、フレームレート 120 fps の動画を利用する。動画の内容は、RGB 値 (127, 127, 127) のグレーの動画と、一般的な動画の例として BigBuckBunny [13] の 5,



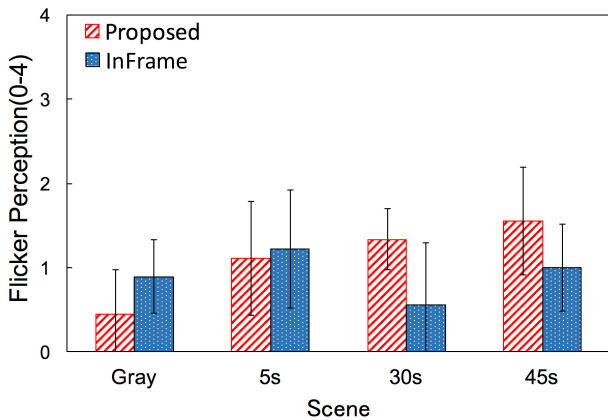


図 11 各動画の内容における点滅やちらつきの主観評価  
 Fig. 11 Subjective evaluation of flicker in each scene.

30, 45 秒のシーンを用いる. 図 11 に各動画の内容における点滅やちらつきの主観評価結果を示す. 図 11 よりすべての動画の内容において提案方式は 2 (少し点滅やちらつきを感じる) 以下であることが確認できる. このため提案方式はユーザにほとんど点滅やちらつきを感じさせずに動画に情報を埋め込むことが可能である. InFrame と比較するとグレーや BigBuckBunny の 5 秒シーンでは評価の値が低く, InFrame よりも点滅やちらつきを感じさせずに情報を埋め込むことが可能であることが確認できる. 一方 BigBuckBunny の 30 秒, 45 秒シーンでは提案方式よりも InFrame のほうが評価の値が低いことが確認できる. これは動画の模様の細かさの影響であると考えられる. グレーや BigBuckBunny の 5 秒は単色で表示される領域が 30 秒, 45 秒のシーンよりも広いシーンである. InFrame は市松模様の有無により情報を埋め込むため, 模様のない単色の領域に対して模様を付加する必要がある. 元の動画では模様のない領域に対して模様を付加するため, 模様が目立ち点滅やちらつきを感じやすくなると考えられる. 提案方式は  $m \times n$  に分割した領域に対して一様に輝度値を加減するため, 単色で表示される領域が広いシーンにおいて InFrame よりもユーザに点滅やちらつきを感じさせることなく情報を埋め込むことが可能であると考えられる. BigBuckBunny の 30 秒, 45 秒のシーンは細かい模様を多く含むシーンであるため,  $m \times n$  に分割した領域に対して一様に輝度値を加減すると模様の細かい領域において, 輝度値を加減したことが目立ち点滅やちらつきを感じやすくなると考えられる.

### 5.5 考察

提案方式の復号処理コストについて考察する. 提案方式は InFrame と比較して高いスループットを得ることができるが, InFrame は 1 枚のフレームのみを利用して復号するのに対し, 提案方式は  $\tau$  枚のフレームをすべて利用して復号するためスループットと復号処理コストがトレードオフ

の関係にある. 復号処理に制約のある状況で提案方式を用いる場合は,  $\tau$  枚のフレームの一部のみを利用して復号することで, 復号処理コストを低減できると考えられる.

次に, 提案方式における各パラメータが性能に与える影響を考察する.

- $\alpha$  の値が大きい場合は復号時の境界部の重みが大きくなるため隣接する領域の輝度値の影響を受けやすくなり, BER が上昇する. 小さい場合は復号時の境界部の影響が小さくなり中央部のみで復号するため, 撮影時のノイズを受けやすくなり BER が上昇する.
- $\gamma$  の値が大きい場合は境界部が小さくなるため, 隣接する領域の輝度値の影響を受けやすくなり, BER が上昇する. 小さい場合は境界部が大きくなるため, 撮影時に中央部にノイズが入った場合の影響を受けやすくなる.
- $\tau$  の値が大きい場合は単位時間あたりに送ることのできるデータ量が増加するため, スループットが向上するが, 累積するフレームが少なくなるため, BER が上昇する. 小さい場合は累積するフレームが多くなるため, BER は低減するが, 単位時間あたりに送ることができるデータ量が減少するため, スループットが減少する.
- $T$  の値が大きい場合は累積フレームを生成する際に, 本来差分が十分にあるピクセルを差分がないと判断するため, BER が上昇する. 小さい場合は累積フレームを生成する際に, 差分が十分でないノイズによって発生した輝度の差を差分があると判断するため BER が上昇する.

## 6. まとめ

本研究では, スクリーンカメラ通信におけるフレーム間差分の累積を利用した通信方式を提案した. 提案方式は, 符号化時は  $\tau$  枚のフレームを利用することでユーザに点滅やちらつきを感じさせずに情報を埋め込む. 復号時は  $\tau$  枚のフレームから差分フレームを生成し, 差分フレームをすべて足し合わせた累積フレームから復号することで BER を低減する. 提案方式を複数の動画のシーンに実装して通信距離が遠くなった際の BER の変化を評価した. 評価の結果, 提案方式は一般的な動画においても有効に動作することを確認した. また, 提案方式を複数の動画のシーンに実装してユーザが点滅やちらつきを感じるかどうかを評価する主観評価をした. 評価の結果, 提案方式はいずれの動画でも点滅やちらつきを感じずに情報を埋め込むことができることを確認した. 今後は模様が細かいシーンを含む動画において, ユーザが点滅やちらつきをより感じにくくする手法を検討する. また, 大型のディスプレイを用いた評価や手持ち撮影での評価および, それらの環境に対応した手法を検討する.

参考文献

- [1] Markets and Markets: Digital Signage Market worth 27.34 Billion USD by 2022, available from <http://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/digital-signage.asp>
- [2] ISO/IEC 18004:2006: Automatic identification and data capture techniques - QR code 2005 barcode symbology specification (2006).
- [3] Li, T., An, C., Campbell, A. and Zhou, X.: Highlight: Hiding bits in pixel translucency changes, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review* (July 2014).
- [4] Wang, A., Peng, C., Zhang, O., Shen, G. and Zeng, B.: InFrame: Multiflexing full-frame visible communication channel for humans and devices, *Proc. ACM HotNets-XIII* (Oct. 2014).
- [5] Nguyen, V., Tang, Y., Ashok, A., Gruteser, M., Dana, K., Hu, W., Wengrowski, E. and Mandayam, N.: High-Rate Flicker-Free Screen-Camera Communication with Spatially Adaptive Embedding, *Proc. IEEE INFOCOM 2016* (Apr. 2016).
- [6] Porter, T. and Duff, T.: Compositing digital images, *ACM Siggraph Computer Graphics*, Vol.18 (1984).
- [7] Simonson, E. and Brozek, J.: Flicker fusion frequency: Background and applications, *Physiological Reviews* (1952).
- [8] Kelly, D.: Flicker, Visual, *Psychophysics*, pp.273–302 (1972).
- [9] Hershberger, W. and Jordan, J.: The phantom array: A perisaccadic illusion of visual direction, *The Physiological Record* (2012).
- [10] Wang, A., Li, Z., Peng, C., Shen, G., Fang, G. and Zeng, B.: InFrame++: Achieve Simultaneous Screen-Human Viewing and Hidden Screen-Camera Communication, *Proc. ACM MobiSys* (May 2015).
- [11] 藤根俊之, 吉田育弘, 杉野道幸: 画面の好ましい輝度とテレビ画面サイズの関係, *信学論* (2008).
- [12] FFmpeg, available from <https://ffmpeg.org/>
- [13] Big Buck Bunny, available from <https://peach.blender.org/>



萬代 雅希 (正会員)

1996年慶應大学工学部電気工学科卒業。1998年同大学大学院修士課程修了。2004年同大学院博士課程修了。2004年静岡大学情報学部情報科学科助手。2010年上智大学工学部情報理工学科准教授。現在、同教授。2006～2007年ブリティッシュコロンビア大訪問研究員。主として、情報ネットワーク、ネットワークコンピューティングの研究に従事。博士(工学)。



山本 純也

2017年上智大学工学部情報理工学科卒業。現在、同大学大学院修士課程在学中。スクリーンカメラ通信の研究に従事。