

# カメラ間通信を用いた無線マルチビューストリーミング

小寺 志保<sup>1,a)</sup> 藤橋 卓也<sup>2,b)</sup> 猿渡 俊介<sup>3,c)</sup> 渡辺 尚<sup>2,d)</sup>

受付日 2013年12月27日, 採録日 2014年6月17日

**概要:** 本稿では, スマートフォンなどの小型端末でマルチビュービデオを場所を選ばず撮影でき, 低トラフィック, 高品質で無線伝送できる方式として Domino Streaming を提案する. Domino Streaming では, 他の撮影機器がアクセスポイントに送信している映像を, 近隣の撮影機器が傍受して自身の映像との差分のみをエンコードすることでトラフィックを削減する. また, Domino Streaming では一方向の撮影機器の映像だけでなく, 自身の前後または左右にある撮影機器の映像を利用するようにアクセスポイントが各撮影機器の送信順を制御することで, さらに多くのトラフィックを削減する. MERL が提供している実ビデオシーケンスを用いた計算機シミュレーションから, Domino Streaming は各撮影機器が単純に映像を送信する場合と比較して, 同じ PSNR で最大 52% のトラフィックを削減できることを示す.

**キーワード:** マルチビュービデオ, カメラ間通信, 無線通信

## Using Inter-camera Communication on Wireless Multi-view Video Streaming

SHIHO KODERA<sup>1,a)</sup> TAKUYA FUJIHASHI<sup>2,b)</sup> SHUNSUKE SARUWATARI<sup>3,c)</sup> TAKASHI WATANABE<sup>2,d)</sup>

Received: December 27, 2013, Accepted: June 17, 2014

**Abstract:** This paper describes Domino Streaming for multi-view video streaming over wireless networks. Domino Streaming achieves the reduction of traffic and maintenance of high video quality. To reduce the traffic and maintain the high video quality, Domino Streaming exploits the overhearing of wireless communication and transmission order control. First, each camera overhears video frames from other cameras' communication and encodes own video frames with the overheard video frames. Second, an access point controls the transmission order of cameras. Evaluations using multi-view video sequences, which are provided by MERL, show that Domino Streaming reduces the traffic with a slight degradation of video quality compared to existing methods. For example, the traffic of Domino Streaming is 52% lower than that of the existing methods when PSNR is 36 dB.

**Keywords:** multi-view video, inter-camera communication, wireless communication

### 1. はじめに

立体映像, 自由視点映像 [1], [2] に代表される超臨場感映像の発展は, 話し手と聞き手の間にある物理的距離を限りなくゼロに近づける. たとえば, テレプレゼンス [3], [4] が実現されることで遠隔にいる人々にも face-to-face と同等の円滑なコミュニケーションを提供できる. オリンピック種目の自由視点映像配信では, 会場さながらの熱狂を遠隔地で味わうことができるエンタテインメントを提供できる.

マルチビュービデオは, 超臨場感映像の発展を担う主要技術の 1 つであり, ある被写体を近隣に設置した複数台の

<sup>1</sup> 静岡大学情報学部  
Faculty of Informatics, Shizuoka University, Hamamatsu, Shizuoka 432-8011, Japan  
<sup>2</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan  
<sup>3</sup> 静岡大学大学院情報科学研究科  
Graduate School of Informatics, Shizuoka University, Hamamatsu, Shizuoka 432-8011, Japan  
a) koder@aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp  
b) fujihashi.takuya@ist.osaka-u.ac.jp  
c) saru@inf.shizuoka.ac.jp  
d) watanabe@ist.osaka-u.ac.jp

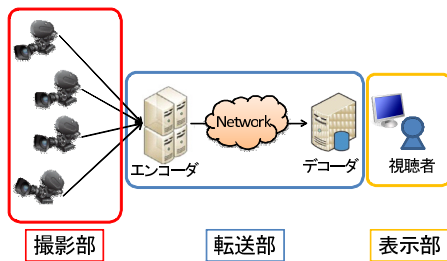


図 1 マルチビュービデオシステムの構成

Fig. 1 The structure of multi-view video system.

カメラで同時に撮影し、撮影した複数の映像を視聴者に提供する技術である。

図 1 にマルチビュービデオを撮影してから、視聴者が映像を視聴するまでの構成を示す。マルチビュービデオシステムは、撮影部、転送部、表示部の 3 種類から構成される。撮影部では、被写体を複数台のカメラを用いて同時に撮影し、エンコーダまで撮影した映像を伝送する。転送部では、撮影部から受信した映像をエンコードし、エンコードした映像を視聴者のデコーダまで伝送する。表示部では、転送部から届いた映像をデコードし、表示機器上に映像を表示する。

転送部の代表的な研究として、H.264/AVC によって標準化された Multi-view Video Coding (MVC) [5], [6], [7], YouTube など蓄積型配信に対応した Interactive Multi-view Video Streaming (IMVS) [8], [9], [10], [11], [12], ライブ配信に対応した User Dependent Multi-view Video Transmission (UDMVT) [13], [14], [15], 複数の視聴者への配信に対応した User dependent Multi-view video Streaming for Multi-user (UMSM) [16], [17], [18] があげられる。表示部の代表的な技術には、インテグラル立体テレビ [19], 自由視点テレビ [2] がある。

一方で、現在のマルチビュービデオの撮影部ではマルチカメラアレー [20] が用いられている。マルチカメラアレーの例としては、直線上にカメラを配置した直線カメラアレー、円形にカメラを配置したカメラアレー、直線カメラアレーを動かす移動カメラアレーなどがあげられる。しかしながら、マルチカメラアレーは有線ネットワークでつながれた複数台のカメラを利用することを想定しているため、カメラを設置できる環境が限定的になり、マルチビュービデオを展開する際の障壁となっている。

本研究では、デジタルカメラやスマートフォンといった小型撮影機器と無線通信を組み合わせることで、場所を選ぶことなくマルチビュービデオが撮影できるシステムを考える。撮影部を無線化するためには、2つの要件を満たす必要がある。1つ目の要件は、トラフィックの削減である。マルチビュービデオが複数台のカメラの映像から構成されるのに対して、無線通信は電波という有限の資源を共有するため有線通信よりデータレートが低い。2つ目の要件は、映像品質の維持である。これら 2つの要件を同時に満たさな

れば、アプリケーションに対する視聴者満足度が低下する。

本稿では、撮影部を無線化した際に、トラフィックの削減と映像品質維持の 2つの要件を満たす方式として、Domino Streaming を提案する。Domino Streaming では、ある撮影機器は他の撮影機器が送信しているビデオを傍受し、傍受した映像と自身の映像との差分をエンコードすることでトラフィックを削減する。また、撮影機器間にある冗長な情報をより多く削減するため、アクセスポイントによって送信順序を制御する。Domino Streaming は図 1 における撮影部で用いる技術であり、転送部で検討されている技術 [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18] や表示部で検討されている技術 [19] と同時に使用することができる。JMVC エンコーダ [21] 上に実装した計算機シミュレーションと MERL (Mitsubishi Electronics Research Laboratory) が提供している実ビデオシーケンスを利用して Domino Streaming の性能を評価した。その結果、Domino Streaming は、他の撮影機器の映像を利用しない場合と比較して、同じ映像品質を維持したまま、最大 52% のトラフィック削減を達成できることが分かった。

本稿の構成は以下のとおりである。2 章では、撮影部の無線化を実現するための要件と、既存研究について述べる。3 章では、提案方式である Domino Streaming について述べる。4 章では、JMVC エンコーダにより、単純な伝送方式と提案方式である Domino Streaming を比較する。5 章では、Domino Streaming の適用領域やトラフィック削減効果について議論する。最後に 6 章でまとめとする。

## 2. 関連研究

本研究では、マルチビュービデオをより多くの場面で利用できるようにするため、撮影部を無線化したマルチビュービデオシステムの実現を目指す。撮影部を無線化することで、スタジオなどの屋内の限られた場所だけでなく、より多くの被写体をマルチビュービデオで提供することが可能となる。たとえば、屋外イベントの際にイベントの状況を各参加者が持っているスマートフォンなどの小型撮影機器で撮影し、その場にはいないユーザに対してマルチビュービデオとして提供することができる。

図 2 に、無線化した撮影部の通信モデルを示す。アクセスポイント間は無線によって接続され、アクセスポイントからエンコーダまでは有線によって接続されている。各撮影機器は自身が撮影した映像をアクセスポイントまで伝送し、アクセスポイントは複数の撮影機器から受信した映像をエンコーダへ伝送する。

無線化したマルチビュービデオの撮影部を想定した場合、視聴者が、実際の被写体に限りなく近い映像を不自然に途切れることなく視聴できることが必要となる。そのため、次の 2つの要件を同時に満たす必要がある。

1つ目の要件は、トラフィックを少なくすることで、伝送

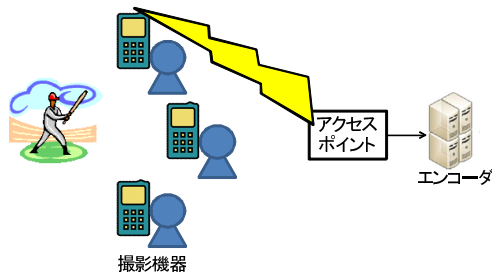


図 2 無線化した撮影部

Fig. 2 Wireless multi-view video acquisition.

遅延による視聴者満足度の低下を防ぐことである。マルチビュービデオは複数のカメラからの映像を扱うため、シングルビデオよりトラフィックが多くなる。一方で、無線通信では、有限である電波を複数のノードによって共有しているため、有線通信と比べると伝送レートが低い。単純にマルチビュービデオを無線通信で伝送した場合、伝送レートの低さによって映像を撮影してから視聴者へ映像を届けるまでの遅延が大きくなり、結果として視聴者満足度が低下する。たとえば、視聴者が視点を切り替えたときに、所望の映像が届くことが遅延していることに起因して、映像が停止したりスキップしたりする。

2つ目の要件は、映像品質を高く維持することである。映像品質とは、元の映像とデコードした映像との劣化の度合いを表す。品質が高い映像とは、劣化が小さく、再現率の高い映像を意味する。視聴者は、実際の被写体と同等の映像を求めため、映像品質の低下は視聴者満足度の低下を招く。

1つ目の要件であるトラフィックの削減と2つ目の要件である映像品質の維持はトレードオフの関係にある。最も単純に撮影部の無線化を実現する方法として、各撮影機器が無線通信で映像を個別に送信することが考えられる。しかしながら、各撮影機器が送信する複数の映像によるトラフィックが1つの無線通信の伝送レートを共有することになるため、1つの撮影機器あたりの伝送レートが低くなる。その結果、視聴者への映像の伝送に遅延が発生し、視聴者満足度が低下する。

トラフィックを削減する単純な方法として、マルチビュービデオの量子化パラメータを大きくすることやフレームレートを落とすことが考えられる。量子化パラメータとは、映像を量子化する際に元映像の情報をどれだけ残すかを表すパラメータである。たとえば、マルチビュービデオをエンコードするときに量子化パラメータを大きくした場合、量子化によって多くの映像データが捨てられるため、トラフィック量が減少する。一方で、映像をデコードするとき、捨てられた映像データの欠損によって元の映像データを復元しにくくなるため、映像品質が劣化する。

マルチビュービデオにおいて、映像品質を維持したまま無線通信時のトラフィックを削減する方法として、

表 1 前提条件

Table 1 Assumption.

層	プロトコル
トランスポート	UDP
ネットワーク	IP
MAC・物理	IEEE 802.11a

DMVC [22], [23], [24] があげられる。DMVC は、マルチビュービデオの無線伝送において、映像間の相関を利用して符号化レベルでアプローチしている研究である。DMVCでは、分散情報源符号化を適用するとともに、撮影機器の設置位置や撮影しているアングルを映像データとともに side information として送信する。分散情報源符号化とは、相関を有する2つのデータを独立に符号化しても参照したときと同程度の圧縮率を達成できる符号化手法であり、Slepian-Wolf 理論 [25] や Wyner-Ziv 理論 [26] などが存在する。

### 3. Domino Streaming

2章での議論をもとに、無線化したマルチビュービデオ撮影部において低トラフィックと映像品質の維持を達成する Domino Streaming を設計した。Domino Streaming では、無線通信において近隣のノードが他のノードの通信を受信できるという特性を利用して、傍受した映像の差分をとることで高い圧縮率を実現する。Domino Streaming は映像の前処理部分に着目したアプローチであるため、2章で述べた符号化レベルでのアプローチである DMVC などと組み合わせ使用することもできる。

表 1 に Domino Streaming が各層で用いることを想定しているプロトコルを示す。物理層・MAC 層は IEEE 802.11a [27]、ネットワーク層は IP、トランスポート層は UDP を用いることを想定している。

#### 3.1 動作の全体像

Domino Streaming は初期化、送信順序決定、エンコード、映像伝送、デコードの流れで動作する。

- (1) Domino Streaming に参加する撮影機器は、アクセスポイントの通信範囲内に入ると初期化を開始し、アクセスポイントによって送信順が割り当てられる。初期化の詳細については 3.2 節で述べる。
- (2) 各撮影機器の初期化が終了すると、アクセスポイントは初期化中に取得した各撮影機器の位置情報から映像送信順を決定し、撮影機器に決定した送信順をブロードキャストする。送信順決定の詳細については 3.3 節で述べる。
- (3) 各撮影機器はアクセスポイントが決定した送信順に従って、自身の映像をすでに傍受した他の撮影機器の映像を用いて一定量エンコードする。エンコードの詳細については 3.4 節で述べる。

- (4) 各撮影機器はアクセスポイントが決定した送信順に従ってエンコードした自身の映像をアクセスポイントへ伝送する。また、他の撮影機器は通信を傍受することで、送信中の撮影機器の映像を受信する。すべての撮影機器が映像を送信し終わると、アクセスポイントは再び各撮影機器の位置情報に基づいて、映像送信順序を決定する。映像伝送の詳細については 3.5 節で述べる。
- (5) 各撮影機器とアクセスポイントから映像を受信しているエンコーダは、新たに撮影機器の映像を受信するとデコードを開始する。デコードの詳細については 3.6 節で述べる。

### 3.2 初期化

Domino Streaming では、各撮影機器は映像を伝送する前に、アクセスポイントによって一意の ID を割り当てられる。アクセスポイントはアクセスポイントの通信範囲に入ったことを撮影機器に通知するビーコンを周期的に送信する。撮影機器はビーコンを受信すると、ID を取得するために、位置情報をアクセスポイントへ送信する。位置情報には、撮影機器に搭載された GPS 情報を利用する。アクセスポイントは撮影機器から位置情報を受信すると、フレームを送信した撮影機器に対して ID 割当てフレームを送信する。ID 割当てフレームにはアクセスポイントが各撮影機器に割り当てた一意の ID が格納される。

### 3.3 送信順決定

アクセスポイントは撮影機器間にある冗長な情報を効率的に削減するために、各撮影機器の位置情報をもとに、各撮影機器の映像送信順を決定する。送信順序は H.264/AVC における双方向予測を利用できるように設定される。双方向予測とは、ある撮影機器が自身の映像をエンコードするとき、自身の前後または左右の撮影機器が撮影した映像を利用することで、より大幅なトラヒック削減を達成する技術である [5], [6], [7]。

Algorithm 1 に撮影機器が  $N$  台の場合の送信順決定アルゴリズムを示す。送信順決定アルゴリズムは、開始機器の決定、送信順の決定の合計 2 種類の処理から構成される。表 2 に、Algorithm 1 で使用する変数と関数を示す。 $C$  はアクセスポイントの通信範囲内にある撮影機器の ID の集合である。 $order[i]$  は  $i$  番目に映像を送信する撮影機器の ID を格納する配列である。 $\arg \max_{a \in C} f(a)$  は  $C$  に属する撮影機器のうち  $f(a)$  が最大となる撮影機器  $a$  の ID を取得する関数である。 $p_b$  は撮影機器  $b$  の位置情報を表す。 $\text{calc\_distance}(p_c, p_d)$  は  $c$  から  $d$  までの直線距離を算出する関数である。 $\text{delete}(C, e)$  は撮影機器の集合  $C$  から ID が  $e$  である撮影機器を削除する関数である。 $\text{size}(C)$  は  $C$  に含まれる元の個数であり、初期値は撮影機器数  $N$  であ

#### Algorithm 1 Transmission order control

```

1:  $i \leftarrow 1$ 
2:  $x \leftarrow \arg \max_{x \in C} (\text{calc\_distance}(p_x, p_{AP}))$ 
3:  $order[i] \leftarrow x$ 
4:  $\text{delete}(C, x)$ 
5: while  $\text{size}(C) > 0$  do
6:    $y \leftarrow \arg \min_{y \in C} (\text{calc\_distance}(p_y, p_x))$ 
7:    $\text{delete}(C, y)$ 
8:   if  $\text{size}(C) \geq 1$  then
9:      $z \leftarrow \arg \min_{z \in C} (\text{calc\_distance}(p_z, p_y))$ 
10:     $order[i+1] \leftarrow z$ 
11:     $order[i+2] \leftarrow y$ 
12:     $\text{delete}(C, z)$ 
13:     $x \leftarrow z$ 
14:     $i \leftarrow i+2$ 
15:   else
16:      $order[i+1] \leftarrow y$ 
17:   end if
18: end while

```

表 2 Algorithm 1 で使用する変数、関数

Table 2 Notation.

変数、関数	説明
$C$	アクセスポイントの通信範囲内にある撮影機器の ID の集合
$order[i]$	$i$ 番目に映像を送信する撮影機器の ID を格納する配列
$\arg \max_{a \in C} f(a)$	$C$ に属する撮影機器のうち $f(a)$ が最大となる撮影機器 $a$ の ID を取得する関数
$p_b$	撮影機器 $b$ の位置情報
$\text{calc\_distance}(p_c, p_d)$	$c$ から $d$ までの直線距離を算出する関数
$\text{delete}(C, e)$	撮影機器の集合 $C$ から ID が $e$ である撮影機器を削除する関数
$\text{size}(C)$	$C$ に含まれる元の個数
$\arg \min_{a \in C} f(a)$	$C$ に属する撮影機器のうち $f(a)$ が最小となる撮影機器 $a$ の ID を取得する関数

る。 $\arg \min_{a \in C} f(a)$  は  $C$  に属する撮影機器のうち  $f(a)$  が最小となる撮影機器  $a$  の ID を取得する関数である。

1 つ目の処理である開始機器の決定では、 $N$  台の撮影機器のうち、1 番目に映像を送信する撮影機器を決定する。具体的には、Algorithm 1 の 1 行目から 4 行目で、アクセスポイントの通信範囲内にある撮影機器のうち、最もアクセスポイントから離れている撮影機器  $x$  を開始機器とする。

2 つ目の処理である送信順の決定では、開始機器を除くすべての撮影機器の送信順を決定する。撮影機器どうしが双方向予測可能な位置関係にある場合は、撮影機器間で双方向予測を利用できるように送信順を決定する。具体的には、Algorithm 1 の 6, 7 行目で、撮影機器  $x$  から最も近い撮影機器  $y$  を選択する。その後、撮影機器  $y$  を除いて送信順を決定していない撮影機器の台数  $\text{size}(C)$  を求める。

size( $C$ )の値に応じて、アクセスポイントは撮影機器  $y$  の映像が双方向予測できるか判断する。

送信順が未決定である撮影機器の台数が1台以上である場合は、撮影機器  $y$  の映像に対して双方向予測が可能となるため、アクセスポイントは撮影機器  $y$  が双方向予測できる送信順を決定する。双方向予測をするためには、撮影機器  $x$  の映像と、撮影機器  $y$  に最も近く、送信順が未決定である撮影機器の映像を撮影機器  $y$  が事前に傍受する必要がある。Algorithm 1の9行目から14行目では、撮影機器  $y$  に最も近い撮影機器  $z$  を選択し、送信順を撮影機器  $x$ 、撮影機器  $z$ 、撮影機器  $y$  の順に決定することで、撮影機器  $y$  での双方向予測を実現する。その後、残りの撮影機器に対しても双方向予測が可能な送信順を決定するため、撮影機器  $z$  を撮影機器  $x$  と見なし、再び Algorithm 1の6, 7行目の処理を開始する。

送信順が未決定である撮影機器の台数が0台である場合は、双方向予測が利用できないため、送信順の末尾に撮影機器  $y$  を追加する。すべての撮影機器に対して送信順を決定した後、アクセスポイントは送信順決定アルゴリズムを終了する。送信順決定アルゴリズムが終了すると、アクセスポイントは自身が決定した送信順を送信順通知フレームを用いてすべての撮影機器にブロードキャストする。

例として3台の撮影機器が配置している場合を考える。図3に3台の撮影機器の位置関係を示す。ここで撮影機器のIDの集合  $C$  には撮影機器1, 撮影機器2, 撮影機器3のIDが含まれているとする。まず、アクセスポイントは  $C$  に含まれる撮影機器の中で、自身から最も離れている撮影機器1を開始機器とする。開始機器は1番目に映像を送信するため、アクセスポイントは撮影機器1のIDを  $order[1]$  に格納し、撮影機器1のIDを  $C$  から削除する。次に、アクセスポイントは  $C$  に含まれる撮影機器のうち、撮影機器1に最も近い撮影機器2を選択する。その後、アクセスポイントは  $C$  から撮影機器2のIDを削除し、size( $C$ )を算出することで、アクセスポイントは自身の通信範囲内で撮影機器2を除いて送信順を決定していない撮影機器の台数を求める。size( $C$ ) = 1であるため、 $C$  に含まれる撮影機器のうち、撮影機器2に最も近い撮影機器3を選択する。その後、撮影機器3のIDを  $order[2]$ 、撮影機器2のIDを  $order[3]$

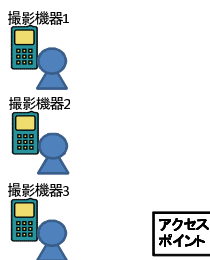


図3 撮影機器が3台のときの配置例

Fig. 3 The example of three wireless cameras.

へ格納することで、撮影機器2の映像に対して双方向予測できる送信順を決定する。撮影機器3の送信順を決定すると、アクセスポイントは  $C$  から撮影機器3のIDを削除し、まだ自身の通信範囲内で送信順を決定していない撮影機器があるか、size( $C$ )の値をもとに判断する。size( $C$ ) = 0であるため、アクセスポイントはすべての撮影機器に対して送信順を決定したと判断し、送信順決定アルゴリズムを終了する。最終的に、アクセスポイントが決定した送信順は撮影機器1, 撮影機器3, 撮影機器2の順となる。

### 3.4 エンコード

送信順が決定すると、各撮影機器は送信順に従って自身の映像をエンコードする。各撮影機器はH.264/AVCに基づき、GOP (Group Of Picture) ごとに自身の映像をエンコードする。GOPとは、複数のフレームの集合体のことであり、通常は8枚のフレームから構成される。Domino Streamingでは、撮影機器は自身の映像を低トラヒックで送信するために、自身に割り当てられた送信順より前の通信をすべて傍受する。

図4, 図5, 図6にGOPのエンコードを示す。ここで撮影機器の台数, 位置関係, 送信順は図4と同じであるこ

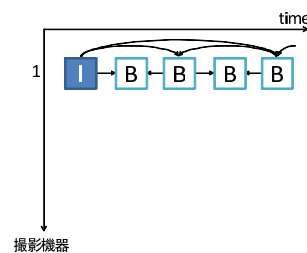


図4 撮影機器1の映像のエンコード

Fig. 4 Prediction structure of camera 1.

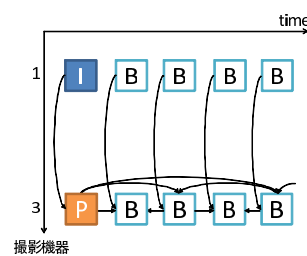


図5 撮影機器3の映像のエンコード

Fig. 5 Prediction structure of camera 3.

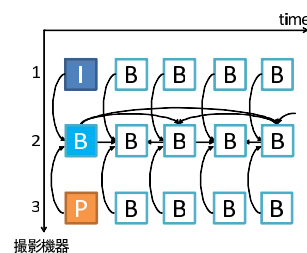


図6 撮影機器2の映像のエンコード

Fig. 6 Prediction structure of camera 2.

とを想定する．図 4 に，撮影機器 1 の予測構造を示す．撮影機器 1 は単独でエンコードするため，先頭のフレームが I フレームとなる．I フレームは，JPEG によって符号化された静止画情報であり，データ量が大きい．

図 5 に，撮影機器 3 の予測構造を示す．撮影機器 3 は，撮影機器 1 の映像を傍受しているため，撮影機器 1 と自身の映像との差分情報をエンコードする．具体的には，撮影機器 3 の先頭フレームを P フレームとしてエンコードする．P フレームは他の撮影機器の I フレームをもとに作成した自身の映像との差分情報であるため，I フレームよりデータ量が少なくなる．

図 6 に撮影機器 2 の予測構造を示す．撮影機器 2 は，撮影機器 1 と 3 の映像を傍受しているため，撮影機器 1, 3 の映像と自身の映像との差分情報をエンコードする．具体的には，撮影機器 2 の先頭フレームを B フレームとしてエンコードする．B フレームは複数の撮影機器の映像をもとに作成した自身の映像との差分情報であるため，最もデータ量が少なくなる．

### 3.5 映像伝送

各撮影機器はアクセスポイントが割り当てた送信順に従って，3.4 節に示した方法でエンコードした映像を伝送する．各撮影機器は 1 GOP ずつ自身の映像をアクセスポイントへ送信する．図 7 に映像伝送のタイムシーケンスチャートを示す．図 7 では，アクセスポイントが撮影機器 1, 3, 2 の順に送信順を決定したと仮定する．また， $P_{i,j}$  は，撮影機器  $i$  の GOP  $j$  のビデオフレームから構成されるパケットを表している．

表 3 に  $P_{i,j}$  のフォーマットを示す．カメラ位置フィールドには，GPS によって取得した撮影機器の位置情報を格納する．映像フィールドには，撮影機器  $i$  がエンコードし

表 3 ビデオパケット  $P_{i,j}$   
Table 3 Video packet  $P_{i,j}$ .

フィールド	バイト
カメラ位置	8
映像	可変長

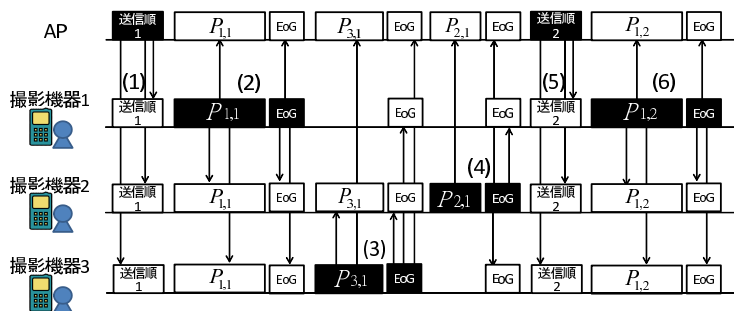


図 7 映像伝送タイムシーケンスチャート

Fig. 7 Timing diagram of Domino Streaming.

た GOP  $j$  の映像を格納する．

(1) アクセスポイントは 3.3 節の方法に従って決定した GOP1 に対する各撮影機器の送信順を送信順通知フレームに格納し，すべての撮影機器にブロードキャストする．

(2) アクセスポイントから受信した送信順に基づいて，撮影機器 1 から映像の伝送を開始する．撮影機器 1 は自身の位置情報をカメラ位置フィールド，エンコードした自身の映像を映像フィールドに格納し， $P_{1,1}$  をアクセスポイントに対して送信する．撮影機器 2 と 3 は  $P_{1,1}$  を傍受して撮影機器 1 のデコードを開始する．撮影機器 1 は  $P_{1,1}$  を送信し終わると，続けて EoG (End of GOP) パケットを送信する．EoG パケットは，1 GOP 分の映像の送信が終了したことを他の撮影機器に通知するために利用され，IEEE 802.11 における ACK フレーム [27] と同じフォーマットを利用する．EoG パケットを傍受した撮影機器 3 は，次が自身の送信順だと判断し，デコードが終了した撮影機器 1 の映像を利用して自身の映像のエンコードを開始する．一方，撮影機器 2 は，次はまだ自身の送信順ではないと判断し，デコードが終了した撮影機器 1 の映像を保持し，送信機器 3 の通信が終了するまで待機する．

(3) 撮影機器 3 は，自身の位置情報をカメラ位置フィールド，エンコードした自身の映像を映像フィールドに格納し，アクセスポイントに対して  $P_{3,1}$  を送信する．撮影機器 2 は  $P_{3,1}$  を傍受することで撮影機器 3 の映像と位置情報を取得する．その後，撮影機器 2 は受信した映像のデコードを開始する．撮影機器 3 は  $P_{3,1}$  の送信が終了すると，EoG パケットをアクセスポイントへ送信する．EoG パケットを傍受した撮影機器 2 は，次が自身の送信順だと判断し，デコードが終了した撮影機器 3 の映像と保存していた撮影機器 1 の映像を利用して自身の映像をエンコードする．

(4) 撮影機器 2 は，自身の位置情報をカメラ位置フィールド，エンコードした自身の映像を映像フィールドに格納し，アクセスポイントに対して  $P_{2,1}$  を伝送する．撮影機器 2 は  $P_{2,1}$  の送信が終了すると，EoG パケット

をアクセスポイントへ送信する。

- (5) アクセスポイントは受信した  $P_{1,1}$ ,  $P_{2,1}$ ,  $P_{3,1}$  を有線通信によってそのままエンコーダへ転送すると同時に、 $P_{1,1}$ ,  $P_{2,1}$ ,  $P_{3,1}$  に含まれている各撮影機器の位置情報から、3.3 節の方法に従って、GOP2 に対する映像伝送順を決定する。その後、決定した送信順を送信順通知フレームに格納し、すべての撮影機器にブロードキャストする。

Domino Streaming ではすべての GOP の送信が終了するまで、(2)~(5) の動作を繰り返す。

### 3.6 デコード

Domino Streaming のデコードには特別な処理を必要としない。撮影機器とアクセスポイントから各撮影機器の映像を受信しているエンコーダは標準的な H.264/AVC デコーダを利用して、それぞれ受信した映像をデコードする。各撮影機器とエンコーダが最初に受信する映像は、先頭フレームが静止画である I フレームによってエンコードされているため、撮影機器とエンコーダは映像を受信すると同時にデコードを開始する。1 番目に送信された撮影機器の映像以降、撮影機器とエンコーダが受信する映像は、すでに受信した映像をもとに作成された差分映像である。撮影機器とエンコーダはすでに受信した映像のデコードが終了すると同時に、新たに受信した映像のデコードを開始する。エンコーダではすべての撮影機器の映像をデコードすると、転送部で利用する方式に従ってすべての撮影機器の映像を再びエンコードする。最後に、エンコードした映像を視聴者へ伝送することで、視聴者は複数台の撮影機器が撮影したマルチビュービデオを視聴することができる。

## 4. 性能評価

### 4.1 評価環境

Domino Streaming の有効性を確認するために、JMVC エンコーダ [21] 上に実装した計算機シミュレーションと MERL が提供しているテストビデオシーケンス [28] によって映像品質に対するトラヒック量、異なるビデオシーケンスを利用した場合のトラヒック量、送信順制御をしない場合のトラヒック量を測定した。Domino Streaming の性能を相対的に評価するために、次の 3 つのアプローチを比較した。

#### (1) Independent Streaming

Independent Streaming は、各撮影機器が無線通信で自身の映像をアクセスポイントに対して個別に送信する方式である。Independent Streaming は、他の撮影機器の通信を傍受しないため、Domino Streaming において他の撮影機器の映像を利用することによって得られた性能を示す尺度となる。

#### (2) Domino Streaming w/o order control

Domino Streaming w/o order control は、各撮影機器

がアクセスポイントによって割り当てられた ID 順に自身の映像を送信する方式である。Domino Streaming w/o order control は撮影機器間で双方向予測によるエンコードをしないため、Domino Streaming においてアクセスポイントによる送信順制御によって得られた性能を示す尺度となる。

#### (3) Domino Streaming

Domino Streaming は、3 章で述べた提案方式である。Domino Streaming では、近隣の撮影機器の映像を利用して自身の映像をエンコードすることで、トラヒックを削減する。また、アクセスポイントによる送信順制御によって、より大幅なトラヒック削減を達成する。

共通の評価パラメータを以下に示す。テストビデオシーケンスには、Ballroom, Exit, Vassar を利用した。Ballroom は舞踏会の映像で、動きが多い。Exit は出入り口の映像で、Ballroom ほどではないが動きがある。Vassar は風景の中を車が走る映像で、動きは少ない。撮影機器とアクセスポイント間の無線通信路はロスレスを想定した。Ballroom, Exit, Vassar における各撮影機器間の距離は 19.5 cm である。

表 4 に JMVC エンコーダのパラメータを示す。フレームレートは 15 fps、各テストビデオシーケンスのフレーム数は 250 フレームである。1 GOP あたりのフレーム数は 8 フレームとし、撮影機器数は 8 台とした。各評価にあたって、量子化パラメータを 24 から 40 まで変化させ、異なる Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) 時のトラヒック量を取得した。PSNR とは映像品質を表すために一般的に用いられている指標であり、次式で表される。

$$PSNR = 20 \log_{10} \left( \frac{MAX}{\sqrt{MSE}} \right) \quad (1)$$

MAX は元画像がとりうる最大画素値、MSE は元映像とデコード後の映像との平均二乗誤差 (Mean Square Error) である。

2 章で述べたように、本研究の目的はトラヒックを削減すると同時に映像品質を高く保つことである。映像品質と視聴者満足度の関係を定量的に表す指標として、PSNR に対する MOS (Mean Opinion Score) が一般的に用いられている。MOS とは、動画像に対する主観的評価方法である。表 5 に、文献 [29], [30] の研究から得られた PSNR と

表 4 評価パラメータ  
Table 4 Evaluation settings.

解像度	176 × 144
フレームレート	15 fps
フレーム数	250
GOP サイズ	8 フレーム
カメラ数	8 台
量子化パラメータ (QP)	24~40

表 5 PSNR に対する MOS 評価結果

Table 5 PSNR vs. MOS.

PSNR [dB]	MOS
$\geq 45$	5
$\geq 33 \ \& \ < 45$	4
$\geq 27.4 \ \& \ < 33$	3
$\geq 18.7 \ \& \ < 27.4$	2
$< 18.7$	1

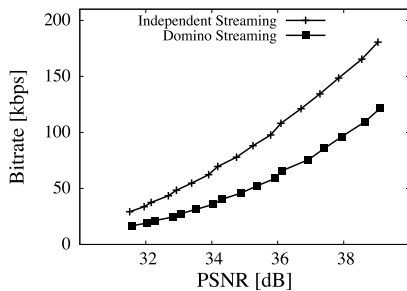


図 8 映像品質に対するトラフィック量

Fig. 8 PSNR vs. Traffic.

MOS の関係を示す。文献 [29], [30] の研究では、PSNR が異なる 175 種類の映像を 25 名の被験者が実際に視聴し、動画の品質を 5 段階で評価している。5 段階の評価は、非常に良い (5)、良い (4)、普通 (3)、悪い (2)、非常に悪い (1) となっている。性能評価では、視聴者満足度の高い映像品質下での Domino Streaming のトラフィック削減効果の評価するため、PSNR が 32~36 [dB] の場合における Domino Streaming と既存方式とのトラフィック量を比較している。表 5 から、PSNR が 32~36 [dB] のとき、MOS では 3~4 に相当するため、視聴者満足度が高い映像であるといえる。

#### 4.2 映像品質に対するトラフィック量の評価

Domino Streaming の基本性能を評価するために、映像品質を変化させた場合のトラフィック量を評価した。

図 8 に、利用したビデオシーケンスが Ballroom、各撮影機器の位置は固定、量子化パラメータを 24~40 に変えた場合のトラフィック量を示す。横軸は PSNR [dB]、縦軸は撮影機器全体の映像ビットレート [kbps] である。図 8 より、次の 2 つのことが分かる。

1 つ目は、Domino Streaming は、Independent Streaming より映像品質を維持したまま、トラフィック削減を達成していることである。たとえば、PSNR が 36 [dB] のとき、Domino Streaming は Independent Streaming と比較して、約 42.3 [kbps] のトラフィックを削減している。Domino Streaming がトラフィックを削減しているのは、他の撮影機器の通信を傍受して得られた映像を利用して自身の映像をエンコードすることで、撮影機器間に存在していた冗長な情報を削減しているためだと考えられる。

2 つ目は、PSNR が高くなるにつれて Independent

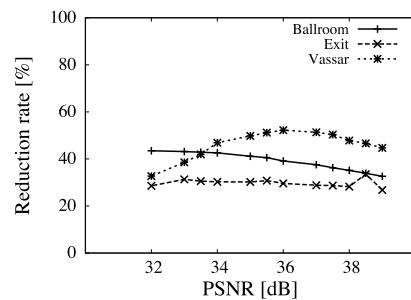


図 9 ビデオシーケンスごとのトラフィック削減率

Fig. 9 PSNR vs. Reduction rate between Domino Streaming and Independent Streaming.

Streaming と Domino Streaming のトラフィック量の差が大きくなっていることである。たとえば、PSNR が 32 [dB] のとき Domino Streaming は Independent Streaming と比較して約 14.6 [kbps] のトラフィックを削減しており、PSNR が 39 [dB] のとき約 59.1 [kbps] のトラフィックを削減している。PSNR が高くなると、各撮影機器が送信する映像は元映像に近づくため、高いトラフィック量が発生する。その結果、Independent Streaming では、PSNR の上昇とともにトラフィック量が急激に増加している。一方、Domino Streaming では、各撮影機器が自身の映像をエンコードするときに、利用する他の撮影機器の映像が元映像に近づくほど、自身の映像との間の冗長な情報が増加する。その結果、2 映像から得られる差分情報が小さくなり、より大幅なトラフィック削減を達成していると考えられる。

#### 4.3 異なるビデオシーケンスを利用した場合のトラフィック量の評価

4.2 節でビデオシーケンスが Ballroom の場合を評価した。しかしながら、Domino Streaming の効果は撮影対象によって異なると考えられる。このような観点から、ビデオシーケンスを変えた場合のトラフィック削減率を評価した。

図 9 に各撮影機器の位置は固定、ビデオシーケンスには Ballroom, Exit, Vassar を利用し、それぞれのビデオシーケンスに対して量子化パラメータを 24~40 に変えた場合のトラフィック削減率を示す。各ビデオシーケンスの特徴は、4.1 節で述べたとおりである。横軸は PSNR [dB]、縦軸は Independent Streaming に対する Domino Streaming のトラフィック削減率 [%] である。各ビデオシーケンスの PSNR 値として、JMVC エンコーダに異なる量子化パラメータを与えて各ビデオシーケンスをエンコードした後に得られた PSNR 値を小数点第 1 位で四捨五入した値を用いて、PSNR 値とトラフィック削減率とを対応付けている。図 9 から 2 つのことが分かる。

1 つ目は、Domino Streaming は映像品質が変化しても、被写体に関係なく Independent Streaming よりトラフィック削減を達成していることである。Vassar におけるトラヒッ



ク削減率は、PSNR が 36 [dB] のとき 52 [%] であり、最もトラフィック削減率が高い。また、各ビデオシーケンスの削減率には、ビデオの特徴に応じて差が生まれているものの、すべてのビデオシーケンスにおいて、少なくとも約 20 [%] 以上の削減率を達成している。この結果から、マルチビュービデオの撮影対象が変化しても、Domino Streaming は他の撮影機器の映像を利用して撮影機器間の冗長な情報を削除することで、トラフィック量を削減することができるといえる。

2 つ目は、PSNR が低いとき、Vassar の削減率が急激に低下していることである。たとえば、PSNR が 32 [dB] のとき、Independent Streaming のトラフィック量に対する Domino Streaming のトラフィック削減率は 25 [%] であるが、PSNR が 36 [dB] のとき、Independent Streaming のトラフィック量に対する Domino Streaming のトラフィック削減率は 58 [%] である。

前述したように、Vassar は風景の中を車が走る映像であり、全体的な動きが少ないため、PSNR が低いとき、各撮影機器はエンコード時に映像情報のほとんどを量子化によって捨ててしまう。具体的な値としては、PSNR が 32 [dB] のとき、Independent Streaming における各ビデオシーケンスのトラフィック量は、3.3 [kbps] (Ballroom), 840 [bps] (Exit), 420 [bps] (Vassar) となっており、Vassar のトラフィック量を Ballroom と Exit のトラフィック量と比較すると少ないことが分かる。量子化によって捨てられた各撮影機器の映像情報には、撮影機器間で冗長であった映像情報も多く含まれている。冗長であった映像情報の多くを捨てたことによって、各撮影機器が他の撮影機器の映像を用いることで得られる差分情報が大きくなり、トラフィック削減率が低下したと考えられる。

#### 4.4 送信順制御をしない場合のトラフィック量の評価

4.2 節、4.3 節の評価では、Domino Streaming は送信順制御と映像傍受の両方を利用していた。本節では、Domino Streaming において送信順制御と映像傍受がそれぞれ個別にどのくらい性能向上に寄与しているかを明らかにするために、送信順制御を入れた場合と入れない場合のトラフィック量を評価した。

図 10 に、利用したビデオシーケンスが Ballroom、各撮影機器の位置は 1 ビデオ終了ごとにランダムに変化させ、量子化パラメータを 24~40 に変えた場合のトラフィック量を示す。本評価では、各撮影機器の位置を変化させて 100 回結果を取得し、その平均値をトラフィック量として取得した。横軸は PSNR [dB]、縦軸は撮影機器全体の映像ビットレート [kbps] である。図 10 より、次の 2 つのことが分かる。

1 つ目は、各撮影機器の位置が変化しても、Domino Streaming が最も低いトラフィック量を達成していることで

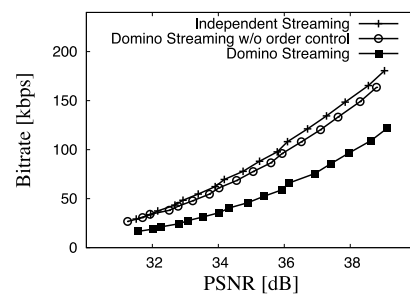


図 10 撮影機器の位置を変えた場合のトラフィック量

Fig. 10 PSNR vs. Traffic with different camera position.

ある。具体的な値として、Domino Streaming は Domino Streaming w/o order control と比較して、最大 41.9 [kbps] のトラフィック削減を達成している。

2 つ目は、Domino Streaming w/o order control と Independent Streaming の差が小さいことである。自身の映像と遠く離れた場所にある撮影機器の映像の間にはほとんど冗長な情報が含まれていないため、Domino Streaming w/o order control はそれほどトラフィックを削減することができなかったと考えられる。Domino Streaming においては、送信順制御の効果が大きいといえる。

## 5. 議論

### 5.1 適用領域に関する議論

Domino Streaming を利用するための条件は、

- (1) アクセスポイントが設置可能な環境であること
- (2) アクセスポイントの通信範囲内に撮影機器が存在すること
- (3) アクセスポイントと各撮影機器が直接通信できること
- (4) 各撮影機器の通信範囲内に他の撮影機器が存在して通信を傍受できること
- (5) 各撮影機器の位置情報が正しく得られること

の 5 つである。このような条件を今すぐすべて揃えるのは困難である。たとえば、現在のスマートフォンにおいて屋内で正しく位置を計測したり、通信を傍受したりするのは不可能ではないものの課題も多い。そこで筆者らは、Domino Streaming を段階的に展開していくことを想定している。

最初に想定しているのは現在のマルチビュービデオの無線化である。現在のマルチビュービデオの撮影部では有線を用いているが、配線トラブルやカメラの動きの制約から無線化したいという要望がある。現在のマルチビュービデオの撮影部の有線無線に置き換えることだけを考えた場合、カメラの相対的な位置を固定して利用しているため [31], [32]、位置情報は手入力が入力可能であると考えている。また、無線通信も独自のシステムとして構築可能であると考えている。たとえば、IEEE 802.11g の無線 LAN チップのアドホックモードを利用して独自システムを構築

することが考えられる。

筆者らが最終形態として想定しているユーザのモバイル端末を利用したマルチビュービデオを実現するためには、位置情報の取得と他の端末の通信の傍受方法が課題となる。これらの課題を解決するためには、位置検出の研究や他の無線通信の研究と合わせて取り組む必要があると考えている。

位置情報の取得では、屋外の場合にはGPSなどを用いることを想定している。屋内で位置情報を取得する方法としては、将来的には、現在研究が進められている屋内GPS、超音波、電波などを用いた位置検出技術を利用できる環境が整備されていることを想定している [33], [34], [35], [36]。また、プロ野球や歌手のコンサートのような屋内でのイベントで利用する場合は、各撮影者に座席が設けられているため、撮影機器の位置がほとんど変化しないと予想される。この場合では、各撮影機器の位置情報をほとんど更新する必要がなく、映像送信順が更新される回数も問題にならないと考えている。一方で、ゴルフのように屋外のスポーツ観戦、フリーマーケットやお祭りなどの屋外でのイベントなどで Domino Streaming を利用する場合は、ユーザが頻繁に移動することも起こり得る。このような環境では、撮影機器間での映像送信順の更新回数も増加すると予想される。各ユーザの移動予測による位置情報更新パケットの削減手法や、Information-Bound References (IBR) など [37], [38] の映像の相関を利用した送信順序の決定方法などを今後は検討する必要がある。

無線通信の傍受方法としては、現在さかんに研究されている他の端末の通信を傍受することを前提とした無線通信方式と合わせて取り組んで行く必要がある。CISCO Visual Networking Index 2013-2018 [39] によると、全世界の無線トラフィックは2018年までに現在の11倍になると予想されている。近年の無線研究では、このような需要に応えることを目的として、周辺の無線機器どうしが互いの通信を傍受・機器間で協調して通信する手法が考えられている [40], [41], [42]。たとえば、協調通信は、各無線機器が独立して通信するよりも効率的であることが示されている [40]。このように、将来的には、通信効率の向上に向けて各端末が互いに通信を傍受することが前提の無線通信方式が登場すると予想している。

## 5.2 トラフィック削減量に関する議論

Domino Streaming による無線マルチビュービデオストリーミングのトラフィック削減は、以下の2つの理由により重要である。1つ目は、各撮影機器がより高品質な映像を無線通信を通して伝送できるようにするためである。各撮影機器が高品質な映像を撮影し、無線通信を通してアクセスポイントまで映像を伝送するためには、Domino Streaming における撮影機器どうしの協調によるトラフィック削減が重

要になる。現状は、MERL が提供しているデータセットの制約より各撮影機器の解像度を  $144 \times 176$ 、フレームレートを 15 [fps] で評価している。一方で、現在では、より高性能の撮影機器を手に入れることができる。たとえば、各撮影機器で解像度  $1,920 \times 1,080$ 、フレームレート 30 [fps] の映像を独立して H.264/AVC でエンコードしたとする。各フレームの画素値は 24 ビットの RGB 情報で構成されており、H.264/AVC は量子化パラメータが 28~40 のとき、最大 100 分の 1 までトラフィック量を圧縮できること [43] をふまえると、撮影機器 1 台あたりの映像ビットレートは  $1,920 \times 1,080 \times 24 \times 30 \div 100 \simeq 15$  [Mbps] となる。このとき、無線通信として本稿で想定している IEEE 802.11a を利用したとすると、複数の撮影機器間で 54 [Mbps] のデータレートで電波を共有する。8 台の撮影機器がアクセスポイントと同時に映像をやりとりする場合、各撮影機器が利用可能なデータレートは  $54 \div 8 = 6.75$  [Mbps] となる。このデータレートは撮影機器 1 台あたりの映像ビットレート 15 [Mbps] より小さく、このまま無線通信で利用することは困難である。現在の有線ネットワークは 1 [Gbps] のものが標準となりつつあり、有線ではメディアを共有することはないため、トラフィックの問題は無線特有の問題であるといえる。

2つ目は、より忠実にユーザの要求に応えることができる超臨場感映像配信を可能にするためである。Domino Streaming によって各撮影機器のトラフィック量を削減することで、より多くの撮影機器の映像をビデオエンコーダに集めることができる。多くの撮影機器の映像をビデオエンコーダに集めることで、ビデオエンコーダは数ある映像の中で、ユーザの要求にあった適切な角度や位置からの映像を複数個、ユーザに伝送することができる。ユーザ側では受信した複数の映像を利用することで、自身の要求に沿った高臨場感映像を視聴することができる。

## 5.3 評価パラメータが変化した場合の考察

表 4 において、解像度は、1 つのビデオフレームを構成する縦横の画素の量を意味する。評価に用いたビデオシーケンスは、1 フレームあたり  $176 \times 144$  の画素で構成されている。フレームレートは 1 秒あたりに再生されるビデオフレームを表す。評価に用いたビデオシーケンスは 15 [fps] であるので、1 秒間に 15 フレームのビデオフレームが表示される。フレーム数は、ビデオシーケンス全体を構成するビデオフレーム数である。本評価では、250 枚のビデオフレームから構成される MERL のビデオシーケンスを利用している。GOP サイズは 1 つの GOP を構成するビデオフレーム数であり、本評価では 8 枚のビデオフレームを 1 GOP としている。カメラ数は、被写体を撮影している撮影機器の台数であり、本評価では 8 台の撮影機器を想定している。量子化パラメータは映像をエンコードする場合の

量子化の度合いを表す数値である。本評価では 24 から 40 までの量子化パラメータを利用している。

1 ビデオフレームの解像度が変化した場合、各ビデオフレームに含まれる撮影機器間で冗長な情報が変化するため、Domino Streaming のトラヒック削減量が増減する。ビデオフレームあたりの解像度が向上した場合は、図 8 に示した結果と同様に、撮影機器間で冗長な情報が増加するため、Domino Streaming のトラヒック削減量が増加する。ビデオフレームあたりの解像度が低下した場合は、撮影機器間で冗長な情報が減少するため、Domino Streaming のトラヒック削減量が減少する。

フレームレートが変化した場合は、Domino Streaming のトラヒック削減量が増減する。フレームレートが増加すると、Domino Streaming のトラヒック削減量が増加する。Domino Streaming は、各ビデオフレームに含まれる冗長な情報を削減しているため、フレームレートの増加によるトラヒックの増加を抑制することができる。フレームレートが減少した場合は、Domino Streaming のトラヒック削減量が減少する。フレームレートの減少によって、1 秒間に表示するビデオフレーム数が少なくなるため、各ビデオフレームの冗長な情報を削減することで得られる利得が小さくなる。

GOP サイズが変化した場合は、ビデオフレーム全体を占める I フレーム、B フレームの割合が変化するため、Domino Streaming のトラヒック削減量が増減する。GOP サイズが大きくなると、Domino Streaming のトラヒック削減量が増加する。GOP サイズが大きいとき、各撮影機器は全体のビデオフレームのうち、より多くのビデオフレームを、他の撮影機器の映像を用いてサイズの小さい B フレームとしてエンコードする。GOP サイズが小さくなると、Domino Streaming のトラヒック削減量が減少する。GOP サイズが小さいとき、各撮影機器は全体のビデオフレームのうち、より多くのビデオフレームを、他の撮影機器の映像を用いることなくサイズの大きい I フレームとしてエンコードする。

撮影機器の台数が変化した場合は、増加あるいは減少した撮影機器が撮影する映像に応じて、Domino Streaming のトラヒック削減量が増減する。カメラ台数が増加した場合は、新たに加わった撮影機器が撮影している映像と他の撮影機器の映像との間の相関に応じて、Domino Streaming のトラヒック削減量が増減する。映像間の相関が強い場合、Domino Streaming のトラヒック削減量が増加し、相関が弱い場合、トラヒック削減量が減少する。カメラ台数が減少した場合は、減少した撮影機器が撮影していた映像と他の撮影機器の映像との間の相関に応じて、Domino Streaming のトラヒック削減量が同様に増減する。

量子化パラメータが変化した場合は、各ビデオフレームに含まれる撮影機器間で冗長な情報が変化するため、

Domino Streaming のトラヒック削減量が増減する。量子化パラメータが増加すると、量子化によって、撮影機器間で冗長な情報を含む多くの元映像情報が削除されるため、Domino Streaming のトラヒック削減量が減少する。量子化パラメータが減少すると、量子化後にも、撮影機器間で冗長な情報を含む多くの元映像情報が残っているため、Domino Streaming のトラヒック削減量が増加する。

## 6. おわりに

本稿では、マルチビュービデオ撮影部の無線化を実現するための伝送方式として、Domino Streaming を提案した。Domino Streaming では、各撮影機器は近隣の撮影機器の映像を用いて自身の映像をエンコードすることで、トラヒック削減を達成する。またアクセスポイントが各撮影機器の送信順を制御することで、より大幅なトラヒック削減を達成する。性能評価から、提案方式 Domino Streaming が既存方式と比較して、映像品質の劣化を防ぎながら、トラヒック削減を達成していることが分かった。

## 参考文献

- [1] Müller, K., Schwarz, H., Marpe, D., Bartnik, C., Bosse, S., Brust, H., Hinz, T., Lakshman, H., Merkle, P., Rhee, H., et al.: 3D High Efficiency Video Coding for Multi-View Video and Depth Data, *IEEE Trans. Image Processing*, Vol.22, No.9, pp.3366–3378 (2013).
- [2] Tanimoto, M. and Suzuki, K.: Global view and depth (GVD) format for FTV/3DTV, *Three-Dimensional Imaging Visualization And Display*, pp.1–10 (2013).
- [3] Beck, S., Kunert, A., Kulik, A. and Froehlich, B.: Immersive group-to-group telepresence, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.19, No.4, pp.616–625 (2013).
- [4] Raskar, R., Welch, G., Cutts, M., Lake, A., Stesin, L. and Fuchs, H.: The office of the future: A unified approach to image-based modeling and spatially immersive displays, *ACM GRAPHITE*, pp.179–188 (1998).
- [5] Vetro, A., Pandit, P., Kimata, H., Smolic, A. and Wang, Y.-K.: *Joint Draft 8.0 on Multi-view Video Coding* (2008).
- [6] Muller, K., Merkle, P., Schwarz, H., Hinz, T., Smolic, A. and Wiegand, T.: Multi-view video coding based on H.264/AVC using hierarchical B-frames, *IEEE PCS* (2006).
- [7] Text of ISO/IEC 14496-10:2008/FDAM 1 ISO/IEC JTC1/SC29/WG11: Multiview Video Coding (2008).
- [8] Xiaoyu, X., Gene, C. and Jie, L.: Frame structure optimization for interactive multiview video streaming with bounded network delay, *IEEE ICIP*, pp.593–596 (2011).
- [9] Ngai-Man, C., Antonio, O. and Gene, C.: Distributed source coding techniques for interactive multiview video streaming, *IEEE PCS*, pp.1–4 (2009).
- [10] Gene, C., Antonio, O. and Ngai-Man, C.: Interactive streaming of stored multiview video using redundant frame structures, *IEEE Trans. Image Processing*, Vol.20, No.3, pp.744–761 (2011).
- [11] Liu, Z., Cheung, G. and Ji, Y.: Unified distributed source coding frames for interactive multiview video streaming, *IEEE ICC*, pp.2048–2053 (2012).

- [12] Huang, H., Zhang, B., Chan, S.-H., Cheung, G. and Frossard, P.: Coding and replication co-design for interactive multiview video streaming, *IEEE INFOCOM*, pp.2791–2795 (2012).
- [13] Pan, Z., Ikuta, Y., Bandai, M. and Watanabe, T.: User dependent scheme for multi-view video transmission, *IEEE ICC* (2011).
- [14] Pan, Z., Ikuta, Y., Bandai, M. and Watanabe, T.: A user dependent system for multi-view video transmission, *IEEE AINA*, pp.732–739 (2011).
- [15] Pan, Z., Bandai, M. and Watanabe, T.: A user dependent scheme for multi-view video live streaming, *International Journal of Computational Information Systems*, Vol.9, No.4, pp.1439–1448 (2013).
- [16] Fujihashi, T., Pan, Z. and Watanabe, T.: Traffic Reduction for Multiple Users in Multi-view Video Streaming, *IEEE ICME* (2012).
- [17] Fujihashi, T., Pan, Z. and Watanabe, T.: UMSM: A traffic reduction method on multi-view video streaming for multiple users, *IEEE Trans. Multimedia*, Vol.16, No.2, pp.1–14 (2014).
- [18] Fujihashi, T., Pan, Z. and Watanabe, T.: Traffic reduction on multi-view video live streaming for multiple users, *IEICE Trans. Communications*, Vol.96, No.7, pp.2034–2045 (2013).
- [19] 伊藤崇之: 技研における立体テレビの研究結果, *NHK 技研 R&D*, No.123 (2010).
- [20] 横井孝紀, 福嶋慶繁, 圓道知博, パナヒブル テヘラニメヒルダド, 藤井俊彰, 谷本正幸: 移動カメラアレーを用いた時空間の自由視点画像生成 (研究速報, 映像メディア処理, 特集画像符号化・映像メディア処理レター), *電子情報通信学会論文誌 D, 情報・システム*, pp.1996–1999 (2011).
- [21] Joint Video Team of ITU-T VCEG and ISO/IEC MPEG: *JMVC (Joint Multiview Video Coding) Software* (2008).
- [22] Xun, G., Yan, L., Feng, W., Wen, G. and Shipeng, L.: Distributed multi-view video coding, *VCIP*, Vol.38, No.11, pp.1917–1921 (2006).
- [23] Artigas, X., Angeli, E. and Torres, L.: Side information generation for multiview distributed video coding using a fusion approach, *IEEE NORISIG*, pp.250–253 (2006).
- [24] Frederic, D., Mourad, O. and Touradj, E.: Recent advances in multiview distributed video coding, *DSS*, pp.1–11 (2007).
- [25] Slepian, D. and Wolf, J.K.: Noiseless coding of correlated information sources, *IEEE Trans. Information Theory*, Vol.19, pp.471–480 (1973).
- [26] Wyner, A. and Ziv, J.: The rate-distortion function for source coding with side information at the decoder, *IEEE Trans. Information Theory*, Vol.3, No.4, pp.45–49 (1976).
- [27] IEEE Computer Society: IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks-Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (2012).
- [28] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11: Multiview Video Test Sequences from MERL (2005).
- [29] Zimmer, T., Abboud, O., Hohlfeld, O., Hossfeld, T. and Tran-Gia, P.: Towards QoE management for scalable video streaming, *21st ITC Specialist Seminar on Multimedia Applications-Traffic, Performance and QoE*, pp.64–69 (2009).
- [30] Wang, Z., Bovik, A.C., Sheikh, H.R. and Simoncelli, E.P.: Image quality assessment: From error visibility to structural similarity, *IEEE Trans. Image Processing*, Vol.13, No.4, pp.600–612 (2004).
- [31] 池谷健佑, 久富健介, 片山美和, 三科智之, 岩館祐一: 多視点ロボットカメラを用いたぐるっとビジョンシステム, *映像情報メディア学会年次大会*, p.2 (2013).
- [32] Takeo, K. and Narayanan, P.: Virtualized reality: Perspectives on 4D digitization of dynamic events, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.27, No.3, pp.32–40 (2007).
- [33] Adib, F. and Dina, K.: See through walls with WiFi!, *ACM SIGCOMM*, pp.75–86 (2013).
- [34] Kim, S.J. and Kim, B.K.: Dynamic ultrasonic hybrid localization system for indoor mobile robots, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol.60, No.10, pp.4562–4573 (2013).
- [35] Maisano, D.A., Jamshidi, J., Franceschini, F., Maropoulos, P.G., Mastrogiacomo, L., Mileham, A. and Owen, G.: Indoor GPS: System functionality and initial performance evaluation, *International Journal of Manufacturing Research*, Vol.3, No.3, pp.335–349 (2008).
- [36] Rossi, M., Seiter, J., Amft, O., Buchmeier, S. and Tröster, G.: RoomSense: An indoor positioning system for smartphones using active sound probing, *ACM Augmented Human International Conference*, pp.89–95 (2013).
- [37] Anand, A., Akella, A., Sekar, V. and Seshan, S.: A case for information-bound referencing, *ACM SIGCOMM*, p.4 (2010).
- [38] Anand, A., Balachandran, A., Akella, A., Sekar, V. and Seshan, S.: Enhancing video accessibility and availability using information-bound references, *ACM SIGCOMM*, pp.345–356 (2013).
- [39] CISCO Visual Networking Index 2013–2018: *Cisco visual networking index: white paper* (2013).
- [40] Stefanov, A. and Erkip, E.: Cooperative coding for wireless networks, *IEEE Trans. Communications*, Vol.52, No.9, pp.1470–1476 (2004).
- [41] Sheng, Z., Leung, K.K. and Ding, Z.: Cooperative wireless networks: From radio to network protocol designs, *IEEE Communications Magazine*, Vol.49, No.5, pp.64–69 (2011).
- [42] An, D., Woo, H., Yoon, H. and Yeom, I.: Enhanced cooperative communication MAC for mobile wireless networks, *Computer Networks*, Vol.57, No.1, pp.99–116 (2013).
- [43] Sakae, O., Kadono, S., Kikuchi, Y. and Suzuki, T.: H.264/AVC Textbook, *Impress R&D* (2008).



小寺 志保 (学生会員)

2014年静岡大学情報学部情報科学科卒業。現在、同大学大学院情報学研究科情報学専攻に在籍。映像伝送、計算機ネットワークに関する研究に従事。2013年情報処理学会 MBL 研究会優秀論文賞。



藤橋 卓也 (学生会員)

2012年静岡大学情報学部情報科学科卒業。2013年同大学大学院情報学研究科情報学専攻修了。現在、大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻博士後期課程に在籍。日本学術振興会特別研究員(DC1)兼任。映像伝送、計算機ネットワークに関する研究に従事。2012年IEEE ICME (International Conference on Multimedia & Expo) ベストペーパー最終候補。2013年情報処理学会MBL研究会優秀論文賞。2014年電気通信普及財団テレコムシステム技術賞。IEEE 会員。



猿渡 俊介 (正会員)

2007年東京大学大学院博士課程修了。科学博士。2003~2004年IPA未踏ソフトウェア創造事業。2006~2008年日本学術振興会学振特別研究員。2007~2008年イリノイ大学客員研究員。2008~2012年東京大学先端科学技術研究センター助教。2012年より、静岡大学大学院情報学研究科助教。2013年より理化学研究所と産業技術総合研究所で客員研究員。専門はワイヤレスネットワーク、センサネットワーク、システムソフトウェア等。2009年電子情報通信学会論文賞。2010年情報処理学会山下記念研究賞。電子情報通信学会、IEEE、ACM各会員。



渡辺 尚 (フェロー)

1982年大阪大学工学部通信工学科卒業。1984年同大学大学院博士前期課程修了。1987年同大学院博士後期課程修了。工学博士。同年徳島大学工学部情報工学科助手。1990年静岡大学工学部情報知識工学科助教。1996年同大学情報学部情報科学科教授。2006年同大学創造科学技術大学院教授。現在、大阪大学大学院情報科学研究科教授。1995年文部省在外研究員(カリフォルニア大学アーバイン校)。計算機ネットワーク、分散システムに関する研究に従事。2005年より情報処理学会モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会主査。2011年より情報処理学会理事。2013年より電子情報通信学会知的環境とセンサネットワーク研究会副委員長。訳書『計算機設計技法』、『802.11無線ネットワーク管理』等。電子情報通信学会、IEEE各会員。