

無線伝送路特性を考慮した高品質映像伝送技術

藤橋 卓也^{1,a)} 渡辺 尚^{1,b)}

概要: スマートフォンなどの無線端末の普及や 4K やマルチビュービデオなどの映像技術の発展とともに、無線を介した映像伝送に対する需要が高まっている。一方で、無線伝送路の品質は端末の位置や環境に応じて頻繁に変動する。また、Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) に代表される近年の無線伝送技術では、異なる品質を有する複数の無線資源を同時に用いてデータを送信する。映像伝送時に無線伝送路の品質が悪化した場合、あるいは品質が悪い無線資源を利用した場合、映像データにビット誤りやデータ損失が発生して、ビデオフレームのデコード失敗や複数枚のビデオフレームへのエラー伝播による受信映像品質の著しい低下を招く。本稿では、モバイル環境における高品質映像伝送を達成するために、筆者らが現在取り組んでいるグレイスフル映像伝送、ハイブリッド映像伝送、無線マルチビュービデオ伝送手法について紹介する。

キーワード: 無線映像伝送, マルチビュービデオ, グレイスフル映像伝送, ハイブリッド映像伝送

FUJIHASHI TAKUYA^{1,a)} WATANABE TAKASHI^{1,b)}

Abstract: Video streaming is becoming one of major applications over wireless networks. The quality of wireless video delivery is often susceptible to wireless channel instability, including channel fading, shadowing, interference, noise, and packet loss. In this paper, we introduce our approaches to improve the video quality in such wireless channels: graceful video delivery, hybrid digital-analog video delivery, and loss-resilient multi-view video delivery.

Keywords: Wireless Video Delivery, Multi-view Video, Graceful Video Delivery, Hybrid Video Delivery

1. はじめに

近年、無線伝送技術の発展および 4K, 8K に代表される映像技術の発展とともに、無線伝送路を介した映像伝送に対する需要が高まっている。文献 [1] では、2020 年には無線ネットワークトラヒックのうち、約 75% が映像トラヒックになると予想されている。

映像技術においては、従来の単一視点映像（シングルビュービデオ）だけでなく、より高い臨場感をユーザに提供するために、複数のカメラ映像を利用する複数視点映像（マルチビュービデオ） [2-4] への関心も高まっている。マルチビュービデオはユーザが自由な視点から対象を視聴する自由視点映像 [5,6] の基盤となる技術であり、将来の映像技術を支えるものとして注目されている。

無線伝送技術においては、Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) に代表される複数の無線資源（サブキャリア）を利用して多量のデータを送信する技術が広く用いられている。このとき、利用可能な無線資源の品質は送受信端末の位置や周波数帯に応じて大きく変化する。文献 [7] では、サブキャリアの品質は最大 20 dB 程度の差が生じることが報告されている。

無線伝送路を介して映像を伝送する場合、まず H.264/Advanced Video Coding (AVC) [8] や H.265/High Efficient Video Coding (HEVC) [9] に代表されるデジタル映像符号化技術を用いて複数枚のビデオフレームから構成される映像データを圧縮する。デジタル映像符号化技術では、各ビデオフレームを I フレーム、P フレーム、B フレームの 3 種類に分けてエンコードする。

I フレームでは、離散コサイン変換 (Discrete Cosine Transform:DCT)、量子化、エントロピー符号化を用いてビデオフレームに含まれる情報を圧縮する。DCT では、ビ

¹ 大阪大学
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan
^{a)} fujihashi.takuya@ist.osaka-u.ac.jp
^{b)} watanabe@ist.osaka-u.ac.jp

ビデオフレームを構成する画素値を周波数成分に変換する。周波数成分は大きく高周波成分と低周波成分の2種類に分けることができる。高周波成分はビデオフレームの詳細な特徴を表している。高周波成分が変化しても、人間はほとんどビデオフレームに生じる変化を視認できない。一方で、低周波成分はビデオフレームの大まかな特徴を表している。低周波成分が変化すると、ビデオフレームには人間が視認できる変化が生じる。量子化では、上述の特性を踏まえて高周波成分からゼロ化する。量子化後の周波数成分は、可変長符号または算術符号を利用したエントロピー符号化によって圧縮される。

一方で、あるビデオフレームをPフレームまたはBフレームとしてエンコードする場合、まず、動き補償を用いてビデオフレーム間に含まれる冗長な映像情報を削減する。動き補償では、ビデオフレーム間で被写体に生じた動きを動きベクトルとして推定した後、動きベクトルに基づいてビデオフレーム間の差分情報を取得する。ここで、あるビデオフレームをPフレームとしてエンコードする場合は、前方のビデオフレームを差分算出時の参照フレームとして利用する。Bフレームとしてエンコードする場合は、前方および後方の2枚のビデオフレームを参照フレームとして利用する。差分情報を取得した後は、Iフレームと同様に、DCT、量子化、エントロピー符号化を用いて差分情報を圧縮する。エントロピー符号化後に出力されるビット列は、畳み込み符号などでチャンネル符号化され、Binary Phase Shift Keying (BPSK)などでデジタル変調された後、受信端末に伝送される。

デジタル映像符号化を用いた無線映像伝送は、伝送路の品質に変動がない場合、そのデータレートに合わせた映像符号化パラメータを設定することで、高い受信映像品質を達成することができる。しかしながら、無線通信における伝送路品質は受信端末の位置や周辺環境に応じて頻繁に変動する。例えば、映像伝送中に伝送路品質が悪化した場合、受信映像品質は著しく低下する。これは伝送路品質の悪化によって生じるビット誤りやデータ損失が1枚のビデオフレームのデコード失敗を招くとともに、後続のビデオフレームにもその影響が伝搬して複数枚のビデオフレームの品質が著しく劣化するためである。低品質の映像を用いたサービスは低いユーザ満足度を招く [10]。一方で、映像伝送中に伝送路品質が改善されたとしても、受信映像品質は量子化の影響で一定となる。

本論文では、伝送路品質が変動しやすい無線映像伝送において高映像品質を達成するために、筆者らが取り組んできた研究について述べる。まずは、シングルビュービデオに対する無線映像伝送手法としてグレイスフル映像伝送、ハイブリッド映像伝送について述べる。その後、マルチビュービデオに対する無線伝送手法について述べる。

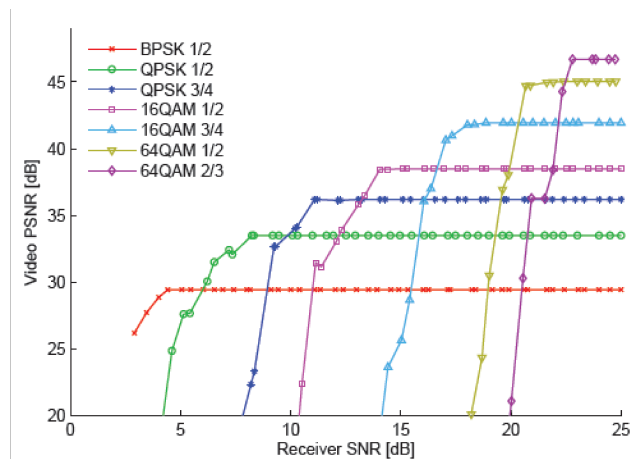


図1 デジタル映像符号化を利用した伝送手法の映像品質 (出典: [11] Jakubczak, S. and Katabi, D.: A cross-layer design for scalable mobile video, *ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 289–300, 2011.)

2. 課題

2.1 デジタル映像符号化を用いた伝送手法の映像品質

図1に、無線伝送路品質に対するデジタル映像符号化技術を利用した伝送手法の映像品質を示す。縦軸は映像品質を表す指標である Peak Signal Noise Ratio (PSNR) であり、値が大きいほど受信後に得られた映像が元映像に近いことを表している。横軸は無線伝送路品質を表す Signal Noise Ratio (SNR) である。ここで、各デジタル変調方式に続く数値は畳み込み符号における符号レートを表している。例えば、デジタル変調方式として BPSK、畳み込み符号の符号レートを 1/4 に設定して映像を伝送した場合、次の3つのことが分かる。

1つ目は、伝送路品質が約 4 dB のとき、映像品質がピークとなっている点である。デジタル映像符号化技術を用いた伝送手法では、利用するデジタル変調技術と畳み込み符号によって決定される無線データレートに合わせて映像符号化に関するパラメータが設定される。そのため、ビット誤りがほとんど生じない伝送路品質下では、送信時と同じ映像品質を達成することができる。

2つ目は、伝送路品質が 4 dB より低下したとき、映像品質が急激に劣化している点である。映像品質の急激な劣化は、ビット誤りによるビデオフレームのデコード失敗とそれによって生じる後続ビデオフレームへのエラー伝播に起因する。デジタル映像符号化では、高い圧縮効率を達成するエントロピー符号化を利用することで、低伝送レート下での高い映像品質を達成する。しかしながら、エンコード後のビット列に対して少量の誤りが発生した場合、正しくビデオフレームをデコードすることができない。また、1章で述べたとおり、各ビデオフレームは前方のビデオフ

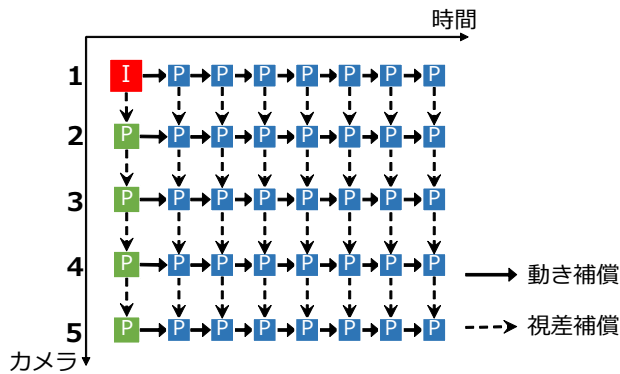


図 2 5 台のカメラを用いたマルチビュービデオにおけるエンコード構造

フレームとの差分情報のみをエンコードしている。このとき、前方のビデオフレームのデコードが失敗すると、後続のビデオフレームにその影響が伝搬する。

3つ目は、伝送路品質が 4 dB より高くなった場合、映像品質は一定となる点である。映像符号化時に用いる量子化は、人間がほとんど変化を視認できない高周波成分を削減する。一方で、削減した映像情報は伝送路品質に関わらず、受信側で復元することはできない。

2.2 マルチビューエラー伝播

マルチビュービデオ伝送において、伝送路品質の悪化によってビット誤りやデータ損失が発生した場合、シングルビュービデオと同様に、エラー伝搬が発生する。このとき、1枚のビデオフレームで生じたエラーは、同じカメラのビデオフレームだけでなく、近隣カメラのビデオフレームにも伝搬する。この特性は、マルチビューエラー伝搬（2次元エラー伝搬）[12]と呼ばれる。

図 2 に、5 台のカメラ映像を用いたマルチビュービデオにおけるエンコード構造を示す。ここで、矢印の先のビデオフレームはその根元にある 1 枚あるいは 2 枚のビデオフレームを参照して差分情報を取得する。マルチビュービデオに対する符号化技術では、まず、先頭カメラの 1 ビデオフレームを I フレームとしてエンコードする。同じカメラあるいは別カメラの他のビデオフレームは、動き補償だけでなく、視差補償 [13] を用いてエンコードする。視差補償は、各ビデオフレームを同じカメラのビデオフレームだけでなく、近隣カメラのビデオフレームも利用して差分情報を取得する技術である。ここで、図 2 に従ってエンコードされたビデオフレームのうち、伝送中にカメラ 2 の 3 番目のフレームが損失したとする。このとき、損失フレームを元にエンコードしていたカメラ 2 の後続のビデオフレーム、カメラ 3 の 3 番目から 8 番目のビデオフレームはデコードに必要な情報を取得できない。結果的に、あるカメラの 1 枚のビデオフレームの損失が複数台のカメラのビデオフレームにまたがった品質劣化をもたらす。

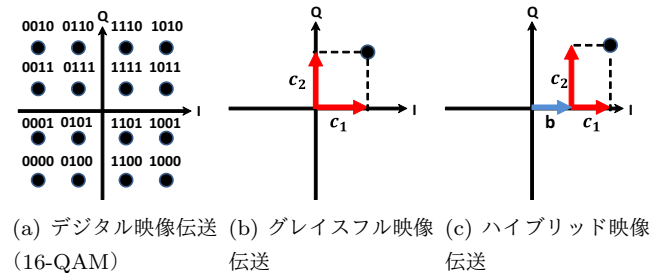


図 3 各伝送手法における変調技術

3. 関連研究

3.1 グレイスフル映像伝送

2.1 章で述べたとおり、デジタル映像符号化技術を用いた映像伝送では、ビット誤りやデータ損失が生じた場合、映像品質が急激に劣化する。一方で、伝送路品質が向上した場合であっても、映像品質は一定のままとなる。そこで、無線伝送路品質の悪化による急激な品質劣化を防ぐとともに、伝送路品質の改善に応じて映像品質を改善することを目的としたグレイスフル映像伝送が提案されている。グレイスフル映像伝送の大きな特徴は、量子化・エントロピー符号化を利用せず、画素値に対する DCT で得られた周波数成分をそのまま送信することである。

SoftCast [11,14] はグレイスフル映像に関する代表的な研究である。SoftCast では、まず 1 Group of Picture (GoP) 分のビデオフレームを 3 次元 DCT を用いて周波数成分に変換する。ここで、1GoP とは 1 度に処理されるビデオフレームのまとまりを表しており、通常は 8 フレームである。得られた周波数成分は、複数個のサイズ $h \times w$ の固まり（チャンク）に分割した後、チャンク内に含まれる周波数成分の大きさに応じて送信電力を割り当てる。その後、全周波数成分から 2 つずつ周波数成分を取り出して In-phase (I) 平面、Quadrature (Q) 平面に直接マッピングする。

図 3(a) および (b) に、16 Quadrature Amplitude Modulation (16-QAM) を用いたデジタル変調技術、SoftCast における変調技術の信号点を示す。デジタル変調技術では、受信信号点に最も近い信号点を送信シンボルとして復調する。このとき、伝送中に生じたノイズの影響で異なる信号点を送信シンボルとみなして復調した場合、ビット誤りが生じる。一方で、SoftCast では、受信信号点をそのまま受信した周波数成分としてみなした後、割り当てた送信電力の逆数を取ることでデコードする。このとき、信号点のずれは伝送路品質が良くなるにつれて小さくなるため、その結果、映像品質が改善する。現在、グレイスフル映像伝送に関する研究は、剰余類符号 [15] やレートレス符号 [16] を組み合わせた伝送手法、OFDM 環境 [17] および Multi-User Multiple Input Multiple Output (MU-MIMO) 環境 [18] に拡張した伝送手法などがマルチメディア系およ

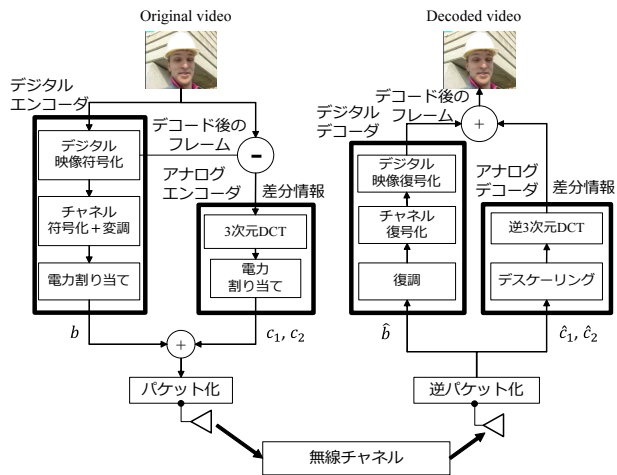


図 4 ハイブリッド映像伝送における送信側および受信側の処理

びネットワーク系の国際会議および学術論文誌で提案されている。

3.2 ハイブリッド映像伝送

グレースフル映像伝送は、伝送路品質の悪化による急激な映像品質の劣化を防ぐとともに、伝送路品質と映像品質の関係を線形化することができる。しかしながら、周波数成分を直接送信信号としてマッピングする伝送手法は、その成分内の最大値と最小値の差が大きくなるにつれて性能が低下する [19]。通常、画素情報に対する DCT で得られる周波数成分の最大値と最小値の差は大きくなるため、グレースフル映像伝送の性能は低下する。そこで、デジタル映像符号化技術とグレースフル映像伝送を組み合わせたハイブリッド映像伝送 [20–22] が近年提案されている。

図 4 に、ハイブリッド映像伝送手法の一例を示す。ハイブリッド映像伝送はデジタルエンコーダとアナログエンコーダで構成される。デジタルエンコーダでは、まず IGoP 分のビデオフレームをデジタル映像符号化技術を用いてエンコードする。その後、エンコード後に得られるビット列に対して、チャンネル符号化およびデジタル変調が行われる。一方で、アナログエンコーダでは、デジタル映像符号化後に得られるビット列を一度復号して、デコード後のビデオフレームを取得する。その後、オリジナルのビデオフレームとデコード後のビデオフレームとの間で生じた差分情報を取得する。差分情報に対しては、グレースフル映像伝送と同様の処理が行われる。最後に、図 3(c) に示すように、デジタルエンコーダから出力される変調後のシンボルとアナログエンコーダから出力される変調後のシンボルを重畳して受信側に伝送する。

ハイブリッド映像伝送は、無線伝送路がある品質以上で保証されているとき、有用な伝送手法である。また、グレースフル映像伝送を用いて送信する差分情報は、その最大値と最小値の差が小さいため、伝送路品質が改善するにつ

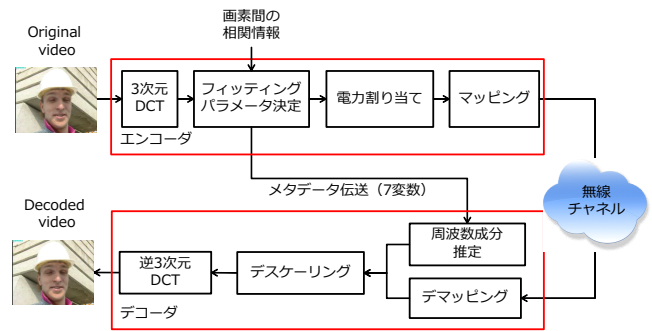


図 5 フィッティング関数を用いたグレースフル映像伝送手法

れて、より高い映像品質を達成することができる。

4. アプローチ

第 1 章で述べたとおり、筆者らは、無線伝送路で生じるビット誤りやデータ損失に耐性を持つ映像伝送手法について取り組んできた。本章では、筆者らが取り組んできたシングルビュービデオに対するグレースフル映像伝送手法、ハイブリッド映像伝送手法、マルチビュービデオに対する無線伝送手法について述べる。

4.1 メタデータ量を削減するグレースフル映像伝送

これまで無線伝送路品質の悪化による映像品質の急落を防ぐとともに、伝送路品質の改善に従って映像品質を改善するグレースフル映像伝送に関する研究がなされてきた。ここで、各伝送手法における映像品質は、各チャンクのサイズに依存する。これは、チャンクサイズが小さくなればなるほど、各周波数成分に対して、その大きさに従う最適な電力割り当てが可能となるためである。しかしながら、各周波数成分に対して細かく送信電力を割り当てた場合、受信側では、デコード処理のために各周波数成分に割り当てられた送信電力を知る必要がある。そのため、送信側は各周波数成分の大きさをメタデータとして受信側に通知するとともに、受信側はメタデータを元にして各周波数成分に割り当てられた送信電力を取得する。メタデータは周波数成分とともに伝送されるため、その量が増加するほど、周波数成分の伝送に利用可能な送信電力が減少する。送信電力の低下は、伝送中に生じるノイズへの耐性が低下するため、映像品質の低下を招く。既存の研究では、あるメタデータ量における映像品質向上を達成する手法について議論がなされてきたが、メタデータ量の削減に向けた研究は行われていない。

このような観点から、筆者らは、グレースフル映像伝送におけるメタデータ伝送量を削減する伝送手法 [23] を提案した。提案手法では、送信側および受信側が共通のフィッティング関数を用いて各周波数成分の大きさを推定することを考える。本手法で送信側と受信側がやり取りするメタデータは、フィッティング関数に必要なパラメータのみと

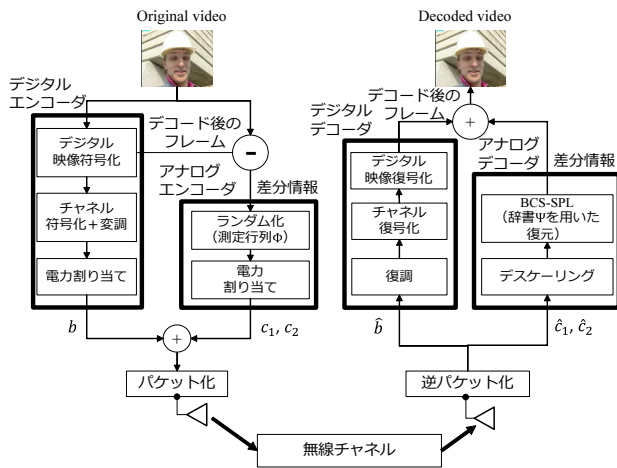


図 6 圧縮センシングをアナログエンコーダ部に組み合わせたハイブリッド映像伝送手法

なる。より正確なフィッティング関数を取得するために、まず、あるビデオシーケンスの画素値間の関係を 3 次元ガウスマルコフランダム場 [24, 25] を用いてモデル化する。3 次元ガウスマルコフランダム場は、画素値間の関係をモデル化するために広く用いられており、各画素値は横・縦・時間方向に異なる相関値を持つ。このような相関関係を持つ画素値に対して 3 次元 DCT を適用した場合、各周波数成分の大きさは 7 変数のローレンツ関数でフィッティングできる。ここで、3 変数は画素間の相関値、4 変数はフィッティング用のパラメータである。

図 5 に、提案手法の概要図を示す。送信側は、まず、1GoP 分のビデオフレームに対して 3 次元 DCT を用いることで周波数成分を取得する。その後、事前に取得した横・縦・時間方向の画素間の相関値を元にして、周波数成分の大きさを最も近似できるフィッティング関数の 4 パラメータを取得する。送信側は、画素間の相関値およびフィッティング用のパラメータをメタデータとして受信側に伝送する。送信側における各周波数成分への電力割り当て、受信側における各周波数成分のデコードは、フィッティング関数から取得できる周波数成分の大きさの近似値を用いる。

解像度 176×144 の実ビデオシーケンスを用いたシミュレーションによって提案手法を評価した結果、提案手法は既存のグレースフル映像伝送手法と比較してメタデータ量を 97%削減しながら 3.4 dB の品質改善を同時に達成できることを明らかにした。提案手法による改善は、フィッティング関数による周波数成分の推定が非常に高い精度で実現できることに起因する。

4.2 ロスレジリエントなハイブリッド映像伝送

3.2 節で述べたとおり、デジタル映像符号化とグレースフル映像伝送のメリットを組み合わせた新たな無線映像伝送方式としてハイブリッド映像伝送が提案されている。既存の研究は、伝送路品質の悪化によって生じるビット誤り

に耐性を持つ伝送手法について議論がなされてきた。しかしながら、無線映像伝送における品質劣化はデータ損失によっても生じる。

そこで、筆者らは、無線伝送中に生じる映像品質劣化の大きな一要因であるデータ損失に対して耐性を持つハイブリッド映像伝送手法 [26] を提案した。提案手法では、データ損失への耐性を高める方法として圧縮センシング [27, 28] を利用する。圧縮センシングとは、あるオリジナルデータの一部が欠落しているとき、残りのデータから欠落したデータを回復できる技術である。例えば、受信側に向けて送信されたオリジナルの映像データのうち、伝送中に生じるデータ損失によって一部のデータが損失したとする。通常、受信側では損失したデータを復元することはできない。しかしながら、オリジナルデータがある辞書（離散コサイン変換や離散ウェーブレット変換）上でスパースであるとき、すなわち、ほとんどのデータを 0 として表現できるとき、損失したデータを含むオリジナルデータを復元できるという技術である。圧縮センシングは画像のボケ除去 [29] などで利用されており、筆者らは、これらの研究から着想を得ている。

図 6 に、提案手法の概要図を示す。図 4 に示したハイブリッド映像伝送手法に対する大きな違いは、アナログエンコーダおよびデコーダにおける処理である。まず、差分情報をサイズ $B \times B$ の複数のチャンクに分割する。チャンク内の差分情報は、サイズ $B^2 \times B^2$ の測定行列 Φ を用いてランダム化する。ランダム化した各チャンクの差分情報は、デジタルエンコーダから出力されたシンボルと重畳した後、各チャンクから 1 つずつ重畳シンボルを取り出して合計 B^2 個のパケットを生成する。このとき、各パケットに含まれる重畳シンボル数は 1GoP あたりの合計チャンク数と一致する。

生成された各パケットは、無線伝送路を介して受信側に伝送される。このとき、一部のパケットは伝送中に損失する。受信側では、受信パケットと共通の測定行列 Φ 、辞書 Ψ を用いて損失したパケットに含まれていた差分情報を復元する。このとき、復元に利用するアルゴリズムとして、復元に要する時間が短い block-wise compressed sensing of an image with a smoothed projected-Landweber (BCS-SPL) [30] を用いる。

実ビデオシーケンスを用いた計算シミュレーションによる性能評価から、提案手法は伝送中に半分のパケットが損失した場合であっても、既存方式に対して高い映像品質を維持できることを明らかにした。また、復元に用いる辞書 Ψ として離散コサイン変換と離散ウェーブレット変換をそれぞれ利用したとき、離散ウェーブレット変換を利用した場合がより高い映像品質を達成できることを示した。

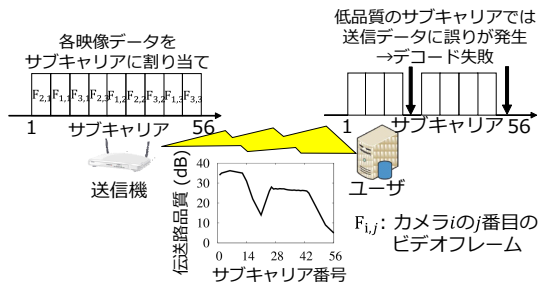


図 7 サブキャリア品質とビデオフレームの重要性に基づくマッピング処理

4.3 無線マルチビュービデオ伝送

2.2節で示したように、マルチビュービデオの伝送中に生じるビット誤りは複数台のカメラ映像にまたがった品質劣化をもたらす。特に、OFDMを用いてマルチビュービデオを無線伝送する場合、低品質のサブキャリアで生じたビット誤りがマルチビューエラー伝搬による品質劣化をもたらす。今後の無線伝送では、OFDMのように異なる伝送路品質を持つ複数の無線資源を同時に用いる技術が頻繁に利用されると考えられ、このような伝送路品質の多様性を活用できる映像伝送技術が必要になると予想される。

このような観点から、筆者らは、OFDMを用いたマルチビュービデオ無線伝送において、高映像品質を達成する伝送手法 Significance based Multi-view Video Streaming with Subcarrier Allocation (SMVS/SA) [31] を提案した。図 7に、SMVS/SAの概要を示す。SMVS/SAでは、各サブキャリアの品質と各カメラのビデオフレームの重要性を考慮してマッピングすることでマルチビューエラー伝播を抑制するとともに、高映像品質を達成する。具体的には、損失時に多くのビデオフレームの品質に影響をもたらすビデオフレームを高品質のサブキャリアで伝送する。一方で、映像品質への影響が小さいビデオフレームは低品質のサブキャリアで伝送することで、その影響を緩和する。このとき、サブキャリアとビデオフレームの最適なマッピングを決定することは組み合わせ最適化問題であるため、伝送時に利用するサブキャリア数や伝送するカメラ台数が増加するにつれて必要な計算量が爆発的に増加する。

そこで、ヒューリスティックにサブキャリアとビデオフレームのマッピングを決定する2種類の割り当て手法として First Allocation, Concentric Allocation を提案した。First Allocation は各カメラにおける前方のビデオフレームからマッピングを決定する割り当て手法である。本手法は各カメラにおける後続のビデオフレームのデコードが、前方のビデオフレームのデコード結果に強く依存するという特性を考慮している。Concentric Allocation は、先頭カメラに含まれる I フレームを基準として同心円状にマッピングを決定する割り当て手法である。本手法は、あるビデオフレームのデコード結果が同じカメラのビデオフレーム

だけでなく、隣接するカメラのビデオフレームのデコードに影響することを勘案している。

GNU Radio/Universal Radio Software Platform (USRP) N200 [32] でトレースしたサブキャリア品質に基づくシミュレーションから、First Allocation および Concentric Allocation を用いた提案手法 SMVS/SA は全サブキャリアを使って各ビデオフレームを伝送する方式より 2.7 dB 高く映像品質を維持できることを明らかにした。また、First Allocation によるマッピングは Concentric Allocation より高い映像品質を達成する一方で、Concentric Allocation より大きい計算量を必要とすることを示した。

5. おわりに

本稿では、無線伝送路を介したシングルビュー/マルチビュービデオ伝送における課題と、その課題に対処して高映像品質を達成する関連研究について述べた。また、既存研究をベースとしたグレースフル映像伝送、ハイブリッド映像伝送、マルチビュービデオ伝送に関する我々のアプローチについても述べた。今後は、フェージング等を考慮した実環境に近い無線伝送路や、4K 映像や全方位映像などの高解像度映像を用いた性能評価を通して、提案手法の有効性について詳細に明らかにしたいと考えている。

参考文献

- [1] Cisco: Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic ForeCast Update 2015-2020 (2016).
- [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] Kodera, S., Fujihashi, T., Saruwatari, S. and Watanabe, T.: Multi-view Video Streaming with Mobile Cameras, *IEEE GLOBECOM*, pp. 1412-1417 (2014).
- [4] Otomo, I., Fujihashi, T., Hirota, Y. and Watanabe, T.: Loss Resilient Multi-view Video Streaming over Multiple Transmission Paths, *IEEE International Conference on Communications*, pp. 1-6 (2016).
- [5] Tanimoto, M.: Overview Of Free Viewpoint Television, *Signal Processing: Image Communication*, Vol. 21, No. 6, pp. 454-461 (2006).
- [6] Suenaga, R., Suzuki, K., Tezuka, T., Tehrani, M. P., Takahashi, K. and Fujii, T.: A Practical Implementation of Free Viewpoint Video System for Soccer Games, *Three-Dimensional Image Processing, Measurement, and Applications* (2015).
- [7] Halperin, D., Hu, W., Sheth, A. and Wetherall, D.: Predictable 802.11 Packet Delivery From Wireless Channel Measurements, *ACM SIGCOMM*, pp. 1-12 (2010).
- [8] Richardson, I.: *The H.264 Advanced Video Compression Standard*, A John Wiley and Sons, Ltd, Publication (2011).
- [9] Sullivan, G., Ohm, J.-R., Han, W.-J. and Wiegand, T.: Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 22, No. 12, pp. 1649-1668 (2012).

- [10] Zimmer, T., Abboud, O., Hohlfeld, O., Hossfeld, T. and TranGia, P.: Towards QoE Management for Scalable Video, *International Teletraffic Congress Specialist Seminar on Multimedia Application, Performance and QoE*, pp. 64–69 (2009).
- [11] Jakubczak, S. and Katabi, D.: A cross-layer design for scalable mobile video, *ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 289–300 (2011).
- [12] Zhou, Y., Hou, C., Xiang, W. and Wu, F.: Channel Distortion Modeling For Multi-View Video Transmission Over Packet-Switched Networks, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 21, No. 11, pp. 1679–1692 (2011).
- [13] Zeng, H., Wang, X., Cai, C., Chen, J. and Zhang, Y.: Fast Multiview Video Coding Using Adaptive Prediction Structure And Hierarchical Mode Decision, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, pp. 1–13 (2014).
- [14] Jakubczak, S., Rahui, H. and Katabi, D.: One-Size-Fits-All Wireless Video, *ACM HotNets*, pp. 1–6 (2009).
- [15] Fan, X., Wu, F., Zhao, D. and Au, O.: Distributed Wireless Visual Communication With Power Distortion Optimization, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 23, No. 6, pp. 1040–1053 (2013).
- [16] Aditya, S. T. and Katti, S.: FlexCast: Graceful Wireless Video Streaming, *ACM MOBICOM*, pp. 277–288 (2011).
- [17] Liu, X. L., Hu, W., Luo, C., Pu, Q., Wu, F. and Zhang, Y.: ParCast+: Parallel Video Unicast in MIMO-OFDM WLANs, *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol. 16, No. 7, pp. 2038–2051 (2014).
- [18] Wang, G., Wu, K., Zhang, Q. and Ni, L. M.: SimCast: Efficient Video Delivery in MU-MIMO WLANs, *IEEE Conference on Computer Communications*, pp. 2454–2462 (2014).
- [19] Prabhakaran, V., Puri, R. and Ramchandran, K.: Hybrid Digital-Analog Codes for Source-Channel Broadcast of Gaussian Sources Over Gaussian Channels, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 57, No. 7, pp. 4573–4588 (2011).
- [20] Yu, L., Li, H. and Li, W.: Wireless Scalable Video Coding Using a Hybrid Digital-Analog Scheme, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 24, No. 2, pp. 331–345 (2014).
- [21] Yu, L., Li, H. and Li, W.: Wireless Cooperative Video Coding Using a Hybrid Digital-Analog Scheme, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 25, No. 3, pp. 436–450 (2015).
- [22] He, D., Luo, C., Lan, C., Wu, F. and Zeng, W.: Structure-Preserving Hybrid Digital-Analog Video Delivery in Wireless Networks, *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol. 17, No. 9, pp. 1658–1670 (2015).
- [23] Fujihashi, T., Koike-Akino, T., Watanabe, T. and Orlik, P.: Quality Improvement and Overhead Reduction for Soft Video Delivery, *IEEE International Conference on Communications*, pp. 1–6 (2016).
- [24] Rue, H. and Leonhard, H.: *Gaussian Markov random fields: theory and applications*, CRC Press (2005).
- [25] Zhang, C. and Florencio, D.: Analyzing the Optimality of Predictive Transform Coding Using Graph-Based Models, *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 20, No. 1, pp. 106–109 (2013).
- [26] Fujihashi, T., Koike-Akino, T., Watanabe, T. and Orlik, P. V.: Compressive Sensing for Loss-Resilient Hybrid Wireless Video Transmission, *IEEE Globecom*, pp. 1–5 (2015).
- [27] Candes, E. J. and Wakin, M. B.: An Introduction to Compressive Sampling, *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 25, No. 2, pp. 21–30 (2008).
- [28] Donoho, D. L.: Compressed Sensing, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 52, No. 4, pp. 1289–1306 (2006).
- [29] Jin, J., Yang, B., Liang, K. and Wang, X.: General Image Denoising Framework based on Compressive Sensing Theory, *Computers and Graphics*, Vol. 38, pp. 382–391 (2014).
- [30] Mun, S. and Fowler, J. E.: Block Compressed Sensing of Images using Directional Transforms, *IEEE International Conference on Image Processing*, pp. 3021–3024 (2009).
- [31] Fujihashi, T., Kodera, S., Saruwatari, S. and Watanabe, T.: Wireless Multi-view Video Streaming with Sub-carrier Allocation, *IEICE Transactions on Communications*, Vol. 99-B, No. 2, pp. 542–554 (2016).
- [32] Ettus Research: USRP N200/N210 Networked Series (2012).