情報処理学会論文誌　Vol.59　No.10　1880–1894 (Oct. 2018)

推薦論文

# 複数の無線伝送路を活用したハイブリッド映像伝送に関する研究

藤橋 卓也[1,a)]　大友 伊織[2,b)]　遠藤 慶一[1,c)]　廣田 悠介[3,d)]　小林 真也[1,e)]　渡辺 尚[2,f)]

受付日 2018年2月16日, 採録日 2018年7月10日

**概要**：近年，無線端末への高品質映像配信を実現する方法として，Long Term Evolution（LTE）や Wi-Fi などの無線伝送路を映像伝送に複数同時利用する技術が注目を浴びている．既存研究は，階層映像符号化や Multiple Description Coding を用いて，複数の無線伝送路を映像品質向上に利用している．しかしながら，無線端末の移動や電波伝搬環境の変化によって無線伝送路の品質が変動した場合，ビット誤りの発生とともに映像品質の急激な劣化が生じる．本研究では，各無線端末が LTE 基地局および複数の Wi-Fi アクセスポイントから映像情報を受信できるとき，各無線端末が映像受信に利用可能な無線伝送路数および，各無線伝送路の品質に応じて高映像品質を達成する伝送手法を提案する．提案手法では，デジタル映像符号化技術，圧縮センシング，ニアアナログ変調を組み合わせて映像情報を伝送する．まず，デジタル映像符号化技術と LTE 基地局による伝送を組み合わせて，無線端末にベースライン品質の映像を提供する．また，オリジナルの映像情報と圧縮後の映像情報から残余情報を取得した後，圧縮センシング，ニアアナログ変調を組み合わせて複数の Wi-Fi アクセスポイントから送信することで，受信可能な Wi-Fi チャネル数，伝送路品質に応じた映像品質の向上を達成する．性能評価から，LTE 基地局に加えて Wi-Fi アクセスポイントから映像情報を受信できるとき，その伝送路品質に応じて映像品質を向上できることが分かった．また，無線端末が 3 台の Wi-Fi アクセスポイントから映像情報を受信できるとき，映像品質を 8.9 dB 改善できることを明らかにした．

**キーワード**：ハイブリッド映像伝送，圧縮センシング，複数無線伝送路

# A Study on Hybrid Digital-analog Video Transmission Utilizing Multiple Wireless Paths

Takuya Fujihashi[1,a)]　Iori Otomo[2,b)]　Keiichi Endo[1,c)]
Yusuke Hirota[3,d)]　Shinya Kobayashi[1,e)]　Takashi Watanabe[2,f)]

Received: February 16, 2018, Accepted: July 10, 2018

***Abstract:*** Multi-homed wireless video streaming systems concurrently send video frames of one video content from multiple wireless access networks. The coexistence of Long Term Evolution (LTE) and Wi-Fi systems is one of the typical multi-homed wireless environments. To utilize such multiple wireless access links for high-quality streaming, conventional systems encode the video frames using digital video encoder such as scalable video coding and multiple description coding (MDC). However, even when a receiver can receive video frames from both LTE and Wi-Fi channels, the received video quality is often susceptible due to Wi-Fi channel instability. To improve quality of multi-homed wireless video streaming, we propose a new transmission scheme, which integrates digital video coding, near-analog modulation, and compressive sensing. The proposed scheme first encodes video frames using the digital video coding and transmits them through the LTE channel, which can be received by many receivers, thereby provides baseline quality video to the receivers. In addition, the residuals acquired from the original and the reconstructed video frames are compressed and modulated by using compressive sensing and near-analog modulation, and then transmitted from multiple Wi-Fi access points to ensure the received video quality can be proportionally improved according to the quality of the Wi-Fi channel. From evaluations, it was found that the received video quality can be gracefully improved according to the number of receivable Wi-Fi access points and the Wi-Fi channel quality. For example, we clarified that the proposed scheme improves video quality by 8.9 dB compared to the conventional scheme with MDC when the receiver receives video frames from LTE and three Wi-Fi channels.

***Keywords:*** hybrid video transmission, compressive sensing, wireless multiple paths

## 1. 背景

近年，スマートフォンなどの無線端末の普及とともに，無線端末に対する映像配信への需要が急激に高まっている．2017 年 9 月に CISCO が発表した資料によると，2021 年にはインターネットトラヒックのうち，約 82%がビデオトラヒックになると予想されている [1]．無線端末に高品質映像を提供するために，近年では，各無線端末がそれぞれの位置や電波伝搬環境に応じて利用可能な複数の無線伝送路（たとえば，Long Term Evolution（LTE），Wi-Fi，可視光通信など）を映像配信に利用することで，受信映像品質の向上を達成する研究 [2], [3], [4] が注目されている．

複数の無線伝送路を映像伝送に利用するための代表的な技術として，Multiple Description Coding（MDC）が考えられている．MDC は映像情報を複数の表現に圧縮する．各表現にはビットレートが異なる符号化後の映像情報が含まれている．このとき，無線端末が複数の無線伝送路を通じて利用可能なデータレートに応じて，無線端末に適当な表現を伝送することで，利用可能な無線伝送路数の増加に応じた映像品質の向上を達成している．しかしながら，各無線伝送路の品質がユーザの移動や電波伝搬環境の変化によって低下した場合，ビット誤りの発生によって受信した映像情報がデコードできなくなる．このとき，受信映像の品質は著しく低下する．一方で，無線伝送路の品質が映像送信開始時より向上したとしても，伝送路品質の向上とともに受信映像品質を向上させることはできない．これは，映像符号化時に失われた画素情報を受信側で取り戻すことができないことに起因する．

無線伝送路品質の低下による急激な映像品質の劣化を防ぐとともに，伝送路品質の復旧に応じて受信映像品質を改善するために，グレイスフル映像伝送 [5], [6], [7], [8] が提案されている．グレイスフル映像伝送では，3 次元離散コサイン変換（Discrete Cosine Transform：DCT）とニアアナログ変調を用いて周波数成分に変換した画素情報をそのまま送信信号としてマッピングして伝送する．ニアアナログ変調によって，無線伝送路品質に応じて受信映像品質を比例的に改善することができる．しかしながら，周波数成分を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ことが示されている [9]．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いため，グレイスフル映像伝送の性能は低下する．

そこで近年，デジタル映像符号化技術とグレイスフル映像伝送を組み合わせたハイブリッド映像伝送 [10], [11], [12] が提案されている．ハイブリッド映像伝送ではデジタルエンコーダとアナログエンコーダの 2 種類のビデオエンコーダを利用する．デジタルエンコーダでは，まず 1 Group of Picture（GoP）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．GoP とは，一度にエンコードされるビデオフレームの集合を表す単位であり，通常は 8 フレームから構成される．その後，エンコード後に得られるビット列をチャネル符号化およびデジタル変調する．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デコードして，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の残余情報を取得し，3 次元離散コサイン変換とニアアナログ変調を用いてアナログエンコーダは残余情報を変調する．ハイブリッド映像伝送では，最後に，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無線端末に伝送する．

ハイブリッド映像伝送では，デジタル映像符号化技術を用いて，ベース品質となる映像を無線端末に提供することができる．また，グレイスフル映像伝送を用いて送信する残余情報は，その最大値と最小値の差が小さくなるため，伝送路品質の改善とともにより高い映像品質を達成することができる．しかしながら，これまでのハイブリッド映像伝送に関する研究は単一無線伝送路を利用する場合にとどまっている．各無線端末が複数の無線伝送路を映像受信に利用できるとき，これらの伝送路を高品質化に活用するための議論は十分に行われていない．

本研究では，1) 各無線端末が映像情報を受信可能な無線伝送路数に応じて映像の高品質化を達成すること，2) 無線伝送路品質が悪化した場合に生じる急激な受信映像品質の劣化を抑制すること，3) 無線伝送路品質の改善に対して，受信映像品質を改善することを目的とした新たな無線映像伝送手法を提案する．ここで，各無線端末が映像情報を受信可能な無線伝送路として，単一の LTE チャネルおよび異なる周波数帯を利用する複数の Wi-Fi チャネルを想定する．すべての無線端末は LTE から映像情報を受信できるものとする．また，無線端末の位置に応じて，周波数帯の


1 愛媛大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Ehime University, Matsuyama, Ehime 790–0826, Japan
2 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
3 国立研究開発法人情報通信研究機構
National Institute of Information and Communications Technology, Koganei, Tokyo 184–8795, Japan
a) fujihashi@cs.ehime-u.ac.jp
b) otomo.iori@ist.osaka-u.ac.jp
c) endo@cs.ehime-u.ac.jp
d) hirota.yusuke@nict.go.jp
e) kob@ehime-u.ac.jp
f) watanabe@ist.osaka-u.ac.jp


本論文の内容は 2017 年 6 月のマルチメディア，分散，協調とモバイル（DICOMO2017）シンポジウムで報告され，モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である．

異なるすべてのWi-Fiアクセスポイントから映像情報を受信可能な端末，一部のWi-Fiアクセスポイントのみから映像情報を受信可能な端末，いずれのWi-Fiアクセスポイントからも映像情報を受信できない端末があるものとする．

上述の3課題を達成するために，提案手法ではデジタル映像符号化，ニアアナログ変調，圧縮センシング[13], [14]を組み合わせて映像情報を伝送する．デジタル映像符号化はLTEを介したベース品質映像の提供とWi-Fiアクセスポイントによるグレイスフル映像伝送の高品質化を実現する．ニアアナログ変調はWi-Fiアクセスポイントと各無線端末間の伝送路品質にしたがって比例的に映像品質を改善するために用いる．圧縮センシングとは，送信情報の一部が受信側で欠落したとき，受信側で取得した一部の情報から欠落した送信情報を復元できる技術である．帯域の不足や伝送中のデータ損失によって受信できなかった情報は，通常，受信側で復元することはできない．しかしながら，ある辞書（離散コサイン変換や離散ウェーブレット変換）上で送信情報がスパースとなるとき，すなわち，ほとんどのデータを0として表現できるとき，欠落した送信情報を復元することができる．提案手法では，圧縮センシングに基づく平滑化技術を利用することで，複数のWi-Fiアクセスポイントからの送信による受信映像の高品質化を実現するとともに，無線端末がWi-Fiアクセスポイントを通して一部の映像情報のみを取得できるとき，欠落した映像情報を復元することで高品質化を達成する．

文献[15]では，提案手法による効果を明らかにするために，単一のテストビデオシーケンス，LTEチャネルの固定データレート下における映像品質を評価した．評価結果から，提案手法は利用可能な無線伝送路数に応じて高映像品質を達成できること，各無線伝送路の品質に応じて映像品質を改善できることを明らかにした．本論文では，提案手法による効果を詳細に評価するために複数のテストビデオシーケンスを利用して映像品質を評価した．また，提案手法の拡張として，LTEチャネルにおいてデータレートが変動した場合，変動後のレートに応じて映像品質を向上するためのアダプティブストリーミングへの拡張を検討するとともに，その効果について評価した．

## 2. 関連研究

本研究は，無線端末間での品質差異に対処した無線映像伝送，マルチパスを用いた高品質映像伝送に関する研究と関連する．

### 2.1 無線端末間での品質差異に対処した無線映像伝送

無線通信では，無線端末の位置や電波伝搬環境の変化に応じて，各端末が体感する伝送路品質が変化する．このとき，各無線端末に高品質映像を配信するためには，各無線端末で生じている伝送路品質の変化に対処した伝送手法が必要となる．伝送路品質の変化に対処するために，これまで階層変調（Hierarchical Modulation：HM）とH.264/SVCを組み合わせたHM-SVC [16], グレイスフル映像伝送[5], [6], [7], [8], ハイブリッド映像伝送[10], [11], [17]が提案されている．

HM-SVCでは，H.264/SVCを用いてビデオフレームを複数のレイヤにエンコードした後，すべてのレイヤ情報を階層変調を用いて一度にブロードキャスト伝送する．本手法は，各無線端末の伝送路品質に応じた映像品質を達成できる一方で，全無線端末の伝送路品質が既知であることが求められる．グレイスフル映像伝送では，H.264/SVCなどで用いられる量子化，エントロピー符号化を利用せずに，画素値に対する3次元離散コサイン変換で得られる周波数成分を送信信号とみなして伝送する．本手法では，各無線端末の伝送路品質が未知であるときに，その品質に応じた映像品質を達成できる．一方で，グレイスフル映像伝送を用いて達成可能な受信映像品質は低くなることが報告されている[9]．ハイブリッド映像伝送は，グレイスフル映像伝送とデジタル映像符号化を組み合わせることで受信映像の高品質化を達成する手法である．本手法では，まず，ビデオフレームをデジタル映像符号化を用いてエンコードする．エンコード後のビデオフレームはいったんデコードして，オリジナルのビデオフレームとの間で生じた差分情報を取得する．その後，エンコードしたビデオフレームはBinary Phase Shift Keying（BPSK）などの変調技術を用いて伝送するとともに，取得した差分情報はグレイスフル映像伝送に基づいて送信する．受信側では，デジタル変調技術を用いて伝送されたビデオフレームにグレイスフル映像伝送を用いて伝送された差分情報を足すことで，デコード後のビデオフレームを取得する．

提案手法では，単一の無線伝送路を利用する既存のハイブリッド映像伝送のアイデアを，複数の無線伝送路を利用可能な環境下に拡張している．複数の無線伝送路を受信映像品質の高品質化に利用するために，提案手法ではベースとなる映像情報をLTE基地局から送信する．その後，得られた残余情報を平滑化・パケット化して複数のWi-Fiアクセスポイントから無線端末に伝送する．このとき，無線端末がWi-Fiアクセスポイントから一部の残余情報しか受信できなかったとしても，圧縮センシングに基づく復元アルゴリズムを用いることで，より高い映像品質を達成することができる．

### 2.2 マルチパスを用いた高品質映像伝送手法

近年，受信映像の高品質化を達成するために，複数の異なる伝送路を利用して映像情報を伝送する研究がなされている．既存研究では，MDCを用いてビデオフレームを2種類の表現にエンコードした後，2つの伝送路に各表現を送信する．また，ある伝送路で欠落した表現は，他の伝送路から受信した表現を用いて回復を試みる．文献[2], [3]では，同程度の品質を有する2つの無線伝送路を映像伝送に

表 1 既存研究と提案手法の分類表
Table 1 Difference between existing and proposed schemes.

| 手法 | デジタル映像符号化の利用 | チャネル符号化の利用 | 残余情報の送信（圧縮方法） | 複数伝送路の利用（想定する伝送路） |
|---|---|---|---|---|
| MDC [2], [3] | ○ | ○ | × | ○（2 つの無線伝送路） |
| MDC [4] | ○ | ○ | × | ○（Wi-Fi および LTE） |
| MDC [18] | ○ | ○ | × | ○（携帯ネットワークおよび D2D） |
| HM-SVC [16] | ○ | ○ | × | × |
| グレイスフル映像 [5], [6], [7], [8] | × | × | × | × |
| ハイブリッド映像伝送 [10], [11], [12] | ○ | ○ | ○（3 次元 DCT） | × |
| ロス耐性ハイブリッド映像伝送 [17] | ○ | ○ | ○（圧縮センシング） | × |
| 提案手法 | ○ | ○ | ○（圧縮センシング） | ○（Wi-Fi および LTE） |

利用することを想定している．また，文献 [4] では，各無線端末が Wi-Fi および LTE チャネル，文献 [18] では，携帯ネットワークおよび device-to-device（D2D）通信を映像伝送に利用可能な環境を想定している．

本研究では，LTE 基地局および複数の Wi-Fi アクセスポイントを映像配信に利用可能な場合に対処した映像伝送手法を提案している．提案手法では，デジタル映像符号化技術とニアアナログ変調を用いて映像情報を大きく 2 種類に分割した後，LTE 基地局と Wi-Fi アクセスポイントからそれぞれの映像情報を伝送する．このとき，分割した各映像情報は，互いを補間するものではなく，一方の情報を強化するものである．これは将来，Wi-Fi チャネルを利用可能な無線端末は，そのほとんどが LTE チャネルを介してデータを同時に受信できるという予測に起因する．

### 2.3 既存研究に対する提案手法の特徴

**表 1** に，既存研究と提案手法を 4 つの観点から分類した表を示す．1 つ目の観点は，デジタル映像符号化技術を送信映像に対して利用するか否かである．2 つ目の観点は，映像符号化後に得られたビット列に対してチャネル符号化技術を利用するか否かである．3 つ目の観点は，オリジナルの映像情報と映像符号化後に得られた映像情報との間の残余情報を伝送するか否かである．また，残余情報を伝送する場合はその圧縮方法について示している．4 つ目の観点は，送信映像を単一の伝送路を用いて伝送するか，複数の伝送路を用いて伝送するかである．また，複数の伝送路を利用する場合は，想定された伝送路について示している．

MDC を用いたマルチパス映像伝送手法では，デジタル映像符号化およびチャネル符号化を用いて複数の無線伝送路から映像情報を送信する．このとき，文献 [2], [3] では同程度の品質を有する 2 つの無線伝送路を介して映像情報を送信する．また，文献 [4] では，Wi-Fi および LTE チャネル，文献 [18] では，携帯ネットワークおよび D2D 通信を介して映像情報を送信することを想定している．一方で，デジタル映像符号化技術を用いて映像情報を圧縮して伝送するため，無線伝送路品質が低下すると，受信映像品質が著しく劣化する．

伝送路品質の低下による映像品質の劣化を抑制するために，HM-SVC [16] を用いた既存研究では，階層映像符号化技術と階層変調技術を組み合わせて映像情報を単一無線伝送路を介して送信する．また，グレイスフル映像伝送 [5], [6], [7], [8] では，映像情報に対する 3 次元 DCT から得られた DCT 係数をニアアナログ変調を用いて伝送する．さらに，ハイブリッド映像伝送 [10], [11], [12] では，伝送路品質の低下による品質劣化の抑制と伝送路品質の改善による映像品質向上を同時に達成するために，まず，映像情報に対してデジタル映像符号化技術を用いて圧縮した後，オリジナルの映像情報と圧縮後の映像情報から得られた残余情報に対して 3 次元 DCT およびニアアナログ変調を適用する．その後，無線端末に圧縮後の映像情報とニアアナログ変調された残余情報を送信することで，受信映像品質の向上を達成している．近年では，得られた残余情報を圧縮センシングによって圧縮してから無線端末に送信した後，無線端末上で復元アルゴリズムを用いることでパケットロスへの耐性を高めたハイブリッド映像伝送手法 [17] が提案されている．

本研究では，文献 [17] と同様に，ハイブリッド映像伝送と圧縮センシングを組み合わせた伝送手法を提案している．このとき，無線端末は LTE 基地局および複数の Wi-Fi アクセスポイントから映像情報を受信可能であることを想定している．提案手法では，複数の Wi-Fi アクセスポイントから送信する残余情報を圧縮センシングを用いて圧縮することで，ある無線端末が Wi-Fi アクセスポイントから一部の残余情報しか受信できなかったとしても，圧縮センシングに基づく復元アルゴリズムを用いることで，欠落した残余情報を復元できるため，より高い受信映像品質を達成できる．

## 3. 提案手法

本章では，LTE と複数の Wi-Fi アクセスポイントを利用可能な環境において，受信映像の高品質化を達成する映像伝送手法を提案する．まず，3.1 節では提案手法が想定するモデルについて説明する．3.2 節では提案手法におけるエンコードおよびデコード方法の概要を示した後，3.3 節で Wi-Fi チャネルで送信する残余情報の平滑化およびパ

情報処理学会論文誌　Vol.59　No.10　1880–1894 (Oct. 2018)

ケット化手法についてそれぞれ述べる．3.4 節では残余情報を伝送する Wi-Fi チャネルの伝送路モデルについて示し，3.5 節では残余情報受信後のデコード処理について示す．最後に，3.6 節では提案手法をアダプティブストリーミングに拡張するための方法について検討する．

### 3.1　モデル

**図 1** に，本研究における想定環境を示す．配信サーバから映像情報を受信する LTE の基地局および各 Wi-Fi アクセスポイントは互いに良質な回線で接続されているものとする．各無線端末は，位置に応じて LTE のみから映像情報を受信するか，LTE と単一あるいは複数の Wi-Fi アクセスポイントから映像情報を受信するか決定する．ここで，LTE 基地局，各 Wi-Fi アクセスポイントから送信された信号は互いに干渉しないものとする．

LTE 基地局は，各無線端末に対してデータレート $R$ で映像情報を送信する．データレートとは，LTE 基地局が LTE チャネルを介して通信範囲内の無線端末に送信可能な 1 秒間あたりのビット数を示す．このとき，デコード後の映像情報はエラーフリーであることを仮定している．各 Wi-Fi アクセスポイントは，シンボルレート $S$ にしたがって映像情報を各無線端末に送信する．シンボルレートとは，Wi-Fi チャネルを通して各 Wi-Fi アクセスポイントが 1 秒間あたりに送信可能なニアアナログ変調されたシンボル数あるいはデジタル変調されたシンボル数を示す．このとき，各 Wi-Fi アクセスポイントから送信される各シンボルは無線端末の位置や電波伝搬環境に応じて，伝送中に加法性白色ガウス雑音（Additive White Gaussian Noise：AWGN）を受けるものとする．

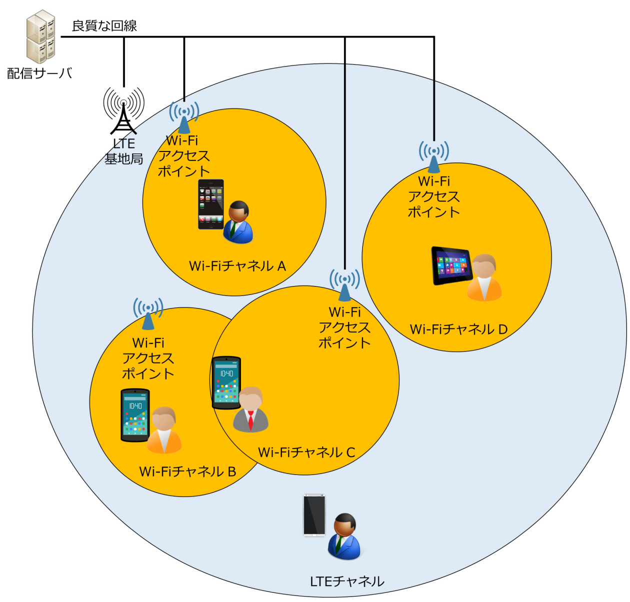



**図 1**　提案手法における想定環境
**Fig. 1**　Network model in our study.

雑音の大きさにかかわる Wi-Fi チャネルの伝送路品質（Signal-to-Noise Ratio：SNR）は無線端末の移動や電波伝搬環境の変化などの要因によって，送信信号に対して生じたフェージングやシャドウイングなどのノイズの度合いによって変化する．本研究では，まず，そのような伝送路品質の変化が既存手法ならびに提案手法における受信映像品質にもたらす基礎特性を明らかにするため，簡単化として，フェージングやシャドウイングなどによって生じるノイズも伝送路品質に応じた AWGN としてみなしている．

### 3.2　エンコードおよびデコード

**図 2** に，提案手法におけるエンコーダおよびデコーダの概要を示す．まず，配信サーバはビデオフレームを 1 GoP ごとにまとめる．1 GoP 分のビデオフレームは H.264/Advanced Video Coding（AVC）ビデオエンコーダ [19] を用いてエンコードする．このとき，エンコード後のビデオフレームのデータサイズが LTE のデータレート $R$ 以下となるように符号化パラメータを設定する．その後，エンコード後に出力されたビット列に対して，チャネル符号化，デジタル変調をした後，LTE チャネルを介して各無線端末に伝送する．また，Wi-Fi アクセスポイントから映像情報を送信するために，配信サーバでエンコードしたビデオフレームを H.264/AVC デコーダを用いていったんデコードする．アナログエンコーダでは，オリジナルのビデオフレームとデコードしたビデオフレームを用いて残余情報を取得する．得られた残余情報は平滑化，スケーリング，パケット化がなされた後，ニアアナログ変調を用いて各 Wi-Fi アクセスポイントから送信される．

受信側では，LTE チャネルを介して受信した信号を復調/チャネル復号化して受信後のビット列を取得する．その後，受信後のビット列に対して H.264/AVC デコーダを用いることで受信ビデオフレームを取得する．Wi-Fi アクセスポイントから受信したパケットに含まれる残余情報に対しては，Minimum Mean Square Error（MMSE）フィルタ，圧縮センシングに基づく復元アルゴリズムを利用してデコードする．最後に，受信ビデオフレームと残余情報を足し合わせることで再生映像を取得する．

### 3.3　残余情報の平滑化

配信サーバは 1 GoP 内に含まれる残余情報*1 を複数の 2 次元ブロックに分割する．このとき，各ブロックのサイズを $B \times B$ ピクセルとする．各ブロックは長さ $B^2$ のベクトル $\mathbf{r}_i$ に変換した後，サイズ $B^2 \times B^2$ の 2 次元測定行列 $\mathbf{\Phi}$ を用いて次式のとおり平滑化する．

$$\mathbf{c}_i = \mathbf{\Phi}\mathbf{r}_i, \qquad (1)$$

ここで，測定行列 $\mathbf{\Phi}$ は正規直交行列であり，測定行列に含

*1　たとえば，ビデオフレームの解像度が $640 \times 480$ ピクセルである場合，1 GoP 内の残余情報は $640 \times 480 \times 8 = 2.4\,M$ 個である

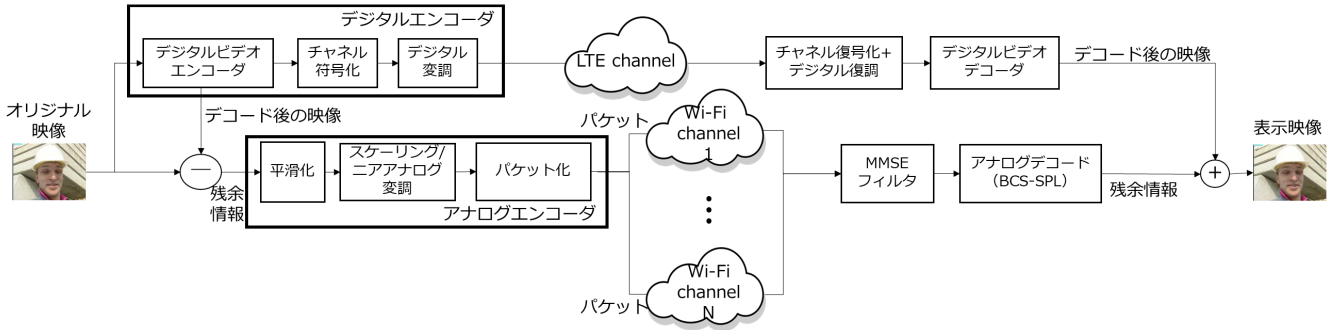



図 2　提案方式：エンコーダおよびデコーダ

**Fig. 2**　Proposed encoder and decoder.

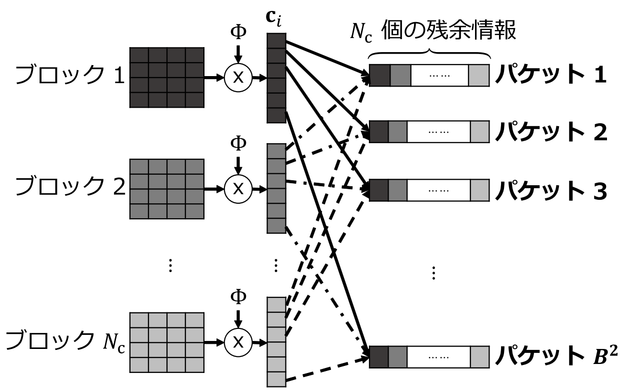



図 3　残余情報のパケット化 [15]

**Fig. 3**　Packetization of residual information.

まれる各要素は，標準正規分布に基づく独立かつ同一分布に従う確率変数である．提案手法では，すべてのブロックに対して同一の測定行列 $\mathbf{\Phi}$ を用いてブロック内の残余情報を平滑化する．

平滑化した残余情報は図 **3** に基づいて複数個のパケットを生成する．図 3 に示すように，平滑化後の各ベクトル $\mathbf{c}_i$ から 1 要素ずつ残余情報を各パケットに含める理由は，各パケットが受信映像品質にもたらす影響を均一化するためである．パケット化を行った後，配信サーバは $N_c$ 個の残余情報を含む $B^2$ 個のパケットを生成する．

生成した各パケットには残余情報の一部が含まれているため，各無線端末における受信映像品質はより多くのパケットを受信することで向上させることができる．各無線端末がより多くのパケットを受信するために，提案手法では各 Wi-Fi アクセスポイントに対して，互いに重複がないように送信を担当するパケットを割り当てる．まず，1 つの Wi-Fi アクセスポイントを選択する．選択した Wi-Fi アクセスポイントのシンボルレートが $S$ であるとき，提案手法では全パケットのうち，$\lfloor \frac{2S}{N_c} \rfloor$ パケットを割り当てる．このとき，$2S$ としているのはニアアナログ変調によって，送信シンボルごとに In-phase（I）平面および Quadrature（Q）平面を用いて 2 つの残余情報を送信するためである．次に，異なる Wi-Fi アクセスポイントを選択して，シンボルレートに応じて割り当てるパケット数を決定する．その後，新たに選択した Wi-Fi アクセスポイントの通信範囲内に，送信パケットを割当て済みの別の Wi-Fi アクセスポイントが存在するか確認する．もし，別の Wi-Fi アクセスポイントが存在する場合は，すでに割当て済みのパケットを除くパケットから選択した Wi-Fi アクセスポイントに対して割当てを行う．この動作をすべての Wi-Fi アクセスポイントに対して適用することで，複数の Wi-Fi アクセスポイントが送信するパケットが重複しないように制御する．

### 3.4　伝送

各 Wi-Fi アクセスポイントは 3.3 節に基づいて生成したパケットを通信範囲内の各無線端末に送信する．式 (2) に，提案手法における Wi-Fi アクセスポイントと各無線端末間の伝送路モデルを示す．ここで，$x_{i,j}$ はパケット $i$ に含まれる $j$ 番目の平滑化後の残余情報，$P$ はすべてのアクセスポイントで利用可能な総電力量，$y_{i,j}$ は対応する受信信号である．また，$n_{i,j}$ は伝送中に生じるノイズであり，平均 0，ノイズ分散 $\sigma^2$ の AWGN に従う．

$$y_{i,j} = \begin{cases} \sqrt{P}x_{i,j} + n_{i,j}, & \text{受信パケット}, \\ \emptyset, & \text{未受信パケット}. \end{cases} \tag{2}$$

### 3.5　残余情報のデコード

いずれかの Wi-Fi アクセスポイントからパケットを受信した無線端末は，受信パケットから各ブロックに含まれる平滑化後の残余情報を取得する．このとき，受信信号に対して式 (3) に示す MMSE フィルタ [5] を用いて伝送中に生じたノイズの影響を低減する．なお，未受信パケット（$y_{i,j} = \emptyset$）に含まれる平滑化後の残余情報に対してはフィルタを利用しない．

$$\hat{s}_{i,j} = \frac{\sqrt{P}\lambda_i^2}{P\lambda_i^2 + \sigma^2} \cdot y_{i,j}. \tag{3}$$

ここで，$\hat{s}_{i,j}$ はブロック $i$ に含まれる $j$ 番目のデノイズ後の残余情報である．また，$\lambda_i$ は各ブロック $i$ に含まれる残余情報の分散である．

情報処理学会論文誌 Vol.59 No.10 1880–1894 (Oct. 2018)

受信した残余情報から送信時の残余情報を取得するために，各無線端末は配信サーバと同じ乱数シードを用いて共通の2次元測定行列 $\mathbf{\Phi}$ を取得する．また，各ブロック $i$ に含まれる受信残余情報を列ベクトル $\hat{\mathbf{s}}_i$ に変換する．このとき，一部のWi-Fiアクセスポイントのみから残余情報を受信可能な無線端末は，一部の残余情報を受信できない可能性がある．これは，列ベクトル $\hat{\mathbf{s}}_i$ に含まれるはずだったいくつかの行が欠落していることと同義である．このとき，無線端末は対応する行を2次元測定行列 $\mathbf{\Phi}$ から削除する．その後，欠落した残余情報を復元するために，圧縮センシングに基づく復元アルゴリズムBlock-based Compressed Sensing with Smoothed Projected Landweber reconstruction（BCS-SPL）[20]を用いる．BCS-SPLはブロック単位の復元アルゴリズムであり，ビデオフレーム全体を対象とする復元アルゴリズムと比較して復元に要する計算量が少なく済むため，遅延制約が厳しい映像アプリケーションに適している．

BCS-SPLでは，受信した残余情報から構成される列ベクトル $\hat{\mathbf{s}}_i$ に対して2次元測定行列 $\mathbf{\Phi}$ を用いて，列ベクトル $\hat{\mathbf{r}}^{(0)} = \mathrm{Wiener}[\mathbf{\Phi}^{\mathrm{T}}\hat{\mathbf{s}}_i]$ を取得する．ここで，$\mathrm{Wiener}[\cdot]$ はブロックに含まれる各残余情報に対して適用するウィーナ・フィルタであり，$[\cdot]^{\mathrm{T}}$ は転置である．取得した列ベクトル $\hat{\mathbf{r}}^{(0)}$ は以下のアルゴリズムにしたがって更新する．

$$\hat{\hat{\mathbf{r}}}_i^{(l)} = \hat{\mathbf{r}}_i^{(l)} + \mathbf{\Phi}^{\mathrm{T}}\big(\hat{\mathbf{s}}_i - \mathbf{\Phi}\hat{\mathbf{r}}_i^{(l)}\big), \tag{4}$$

$$\check{\mathbf{r}}^{(l)} = \begin{cases} \hat{\hat{\mathbf{r}}}^{(l)}, & \big|\mathbf{\Psi}\hat{\hat{\mathbf{r}}}^{(l)}\big| \geq \tau^{(l)}, \\ \mathbf{0}, & \text{otherwise}, \end{cases} \tag{5}$$

$$\mathbf{r}_i^{(l+1)} = \check{\mathbf{r}}_i^{(l)} + \mathbf{\Phi}^{\mathrm{T}}\big(\hat{\mathbf{s}}_i - \mathbf{\Phi}\check{\mathbf{r}}_i^{(l)}\big). \tag{6}$$

ここで，$\mathbf{r}_i^{(l)}$ は $l$ 回目の繰り返し時におけるビデオフレーム全体 $\mathbf{r}^{(l)}$ のブロック $i$ に含まれる残余情報を表している．また，$\tau^{(l)}$ は $l$ 回目の繰り返し時におけるしきい値である．$\mathbf{\Psi}$ は $B^2 \times B^2$ ピクセルの直交変換行列（たとえば，2次元ウェーブレット変換や2次元離散コサイン変換）であり，$l$ 回目の繰り返し時に得られた残余情報 $\hat{\hat{\mathbf{r}}}^{(l)}$ をスパースな表現に変換するときに利用する．本論文では，文献[17]で示されているとおり，高品質化を達成できる2次元ウェーブレット変換を直交変換行列として利用する．

上述のアルゴリズムは $\big|D^{(l+1)} - D^{(l)}\big| < 10^{-4}$ を満たすまで実行する．このとき，収束条件となる $10^{-4}$ は文献[20]に基づく．ここで，$D^{(l)} = \frac{1}{\sqrt{N_{\mathrm{c}}}}\big|\mathbf{r}_i^{(l)} - \hat{\hat{\mathbf{r}}}_i^{(l-1)}\big|_2$ から得られる．このとき，$l_{\mathrm{end}}$ が最後の繰り返しだとすると，復元した残余情報は $\mathbf{r}^{(l_{\mathrm{end}}+1)}$ から取得できる．最後に，各無線端末は復元した残余情報とLTEチャネルから受信した映像情報とを足し合わせることで受信映像を取得する．

### 3.6 アダプティブストリーミングへの拡張

提案手法における受信映像品質はLTE基地局から配信される映像品質に応じて改善する．これは，デコード後の映像がオリジナルの映像品質に近ければ近いほど，得られる残余情報の最大値と最小値の差が小さくなるためである．LTE基地局から配信される映像の品質は，LTEチャネルで利用可能なデータレートに依存する．一方で，文献[21]で報告されているとおり，Wi-Fiチャネルにおける伝送路品質の変化と同様に，LTEチャネルのデータレートは時間に応じて変化しやすい特性を持つ．たとえば，ユーザが直近で観測したデータレートが以前の観測と比較して向上した場合，配信サーバはより高品質な映像を無線端末に提供するために，変化後のデータレートに応じて映像情報を提供する必要がある．

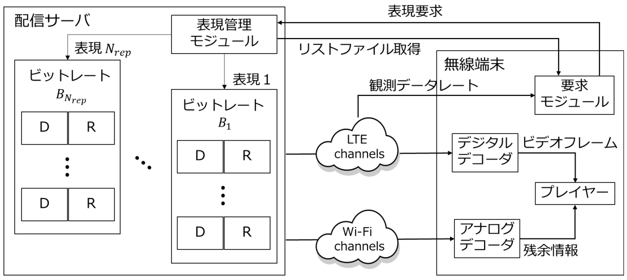



図 4 アダプティブストリーミングへの拡張

**Fig. 4** Extension for adaptive streaming.

図4に，LTEチャネルで生じるレート変動に対処した提案手法の配信システムを示す．提案手法では，LTEチャネルで生じるデータレートの変動に対応するため，配信サーバがオリジナル映像を $N_{\mathrm{rep}}$ 通りの表現に圧縮する．各表現には，LTEチャネルに求める必要ビットレート $B_{\mathrm{rep}}$ に合わせてデジタル映像符号化技術で圧縮した1 GoP分のビデオフレームと対応する残余情報が含まれている．各表現は，サーバが管理するリストファイルにその必要ビットレートとともにまとめられる．各無線端末は，まずリストファイルをサーバから受信した後，自身が観測したデータレートと各表現の必要ビットレートをもとにして，データレートを満たす最大ビットレートの表現を要求する．無線端末からの要求に応じて，配信サーバはLTEチャネルを通してビデオフレーム，無線端末が受信可能なWi-Fiチャネルを通して残余情報を送信する．

## 4. 性能評価

### 4.1 シミュレーション条件

提案方式の有効性を確認するために，Mitsubishi Electric Research Laboratories（MERL）[22]が提供しているビデオシーケンスとMATLABを用いた計算機シミュレーションを用いて，受信可能なWi-Fiアクセスポイント数と各Wi-Fiチャネルの伝送路品質に対する映像品質，LTEチャネルで生じるレート変動に対する映像品質を測定した．

テストビデオシーケンスとして *ballroom*，*exit*，*vassar* を利用した．ballroomは舞踏会の様子を撮影した映像であ

り，動きが激しい映像である．exit は出入り口の様子を撮影した映像であり，動きが少ない映像である．vassar はある通りでの行き交いの様子を撮影した映像であり，ballroom と比較して動きが少ない映像である．各ビデオフレームの解像度は $640 \times 480$ ピクセルである．各テストビデオシーケンスは 8 台のカメラ映像から構成されている．4.5 節では，各カメラ映像を利用した場合の映像品質について議論している．また，4.5 節に示す評価結果から，カメラ映像による提案手法の優位性に影響はないといえるため，4.2 節から 4.4 節では，各テストビデオシーケンスにおける 1 台目のカメラ映像を利用する．

映像品質を評価する指標として Peak Signal-to-Noise Ratio（PSNR）および Structural Similarity（SSIM）[23] を利用した．PSNR は以下の式で表される．

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

MAX は各ビデオフレームがとりうる最大の画素値である．本評価で利用するビデオシーケンスは各画素が 8 bit で構成されることから 255 となる．また，Mean Square Error（MSE）は元映像とデコード後の映像との平均二乗誤差である．SSIM はオリジナル映像と受信映像の間の構造的な類似度を評価する指標である．SSIM は 0 から 1 までの値をとり，1 に近いほど受信映像がオリジナル映像に近いことを表している．PSNR は画像品質の客観的評価を示す指標として広く用いられている．一方で，PSNR と比較して人間の主観的な画像品質を反映した評価指標として SSIM が広く利用されている．多くの研究 [24], [25] では，それぞれの伝送手法が画像品質の主観的・客観的評価にもたらす効果を議論するために双方の指標を用いた性能評価がなされている．本論文においても，双方を画像品質の評価指標を利用することで提案手法が客観的評価および主観的評価にもたらす効果について評価する．

本評価では，全無線端末が LTE 基地局からデータレート $R$ にしたがって映像情報を受信できるものとする．LTE チャネルで利用可能なデータレート $R$ はその伝送路品質や利用ユーザ数に応じて決定されるものとし，4.3 節では 2 Mbps とした．また，一部の無線端末はそれぞれの位置に応じて，3 台の Wi-Fi アクセスポイントのうち，単一あるいは複数の Wi-Fi アクセスポイントから映像情報を受信できるものとする．各 Wi-Fi アクセスポイントのシンボルレートは 1.4 Msymbols/sec とし，無線端末と各 Wi-Fi アクセスポイント間の伝送路品質は等価であるとする．

比較手法として，MDC，HDA-Cast [10]，Proposed を用意した．MDC では，ビデオシーケンスを 4 種類の表現に符号化する．このとき，1 つ目の表現のビットレートは LTE チャネルで利用可能なデータレート，2 つ目の表現のビットレートは LTE チャネルで利用可能なデータレートおよび Wi-Fi アクセスポイント 1 台をとおして利用可能なシンボルレートを合わせた合計レート，3 つ目の表現のビットレートは LTE チャネルで利用可能なデータレートおよび Wi-Fi アクセスポイント 2 台をとおして利用可能なシンボルレートを合わせた合計レート，4 つ目の表現のビットレートは LTE チャネルで利用可能なデータレートおよび Wi-Fi アクセスポイント 3 台をとおして利用可能なシンボルレートを合わせた合計レート以下となるようにエンコードする．その後，各無線端末が利用可能なレートに応じて，LTE 基地局および Wi-Fi アクセスポイントから適当な表現を無線端末に対して送信する．各表現は畳み込み符号と BPSK を用いて送信される．このとき，畳み込み符号のレートとして 1/4，1/2，利用しない場合の 3 種類を想定した．

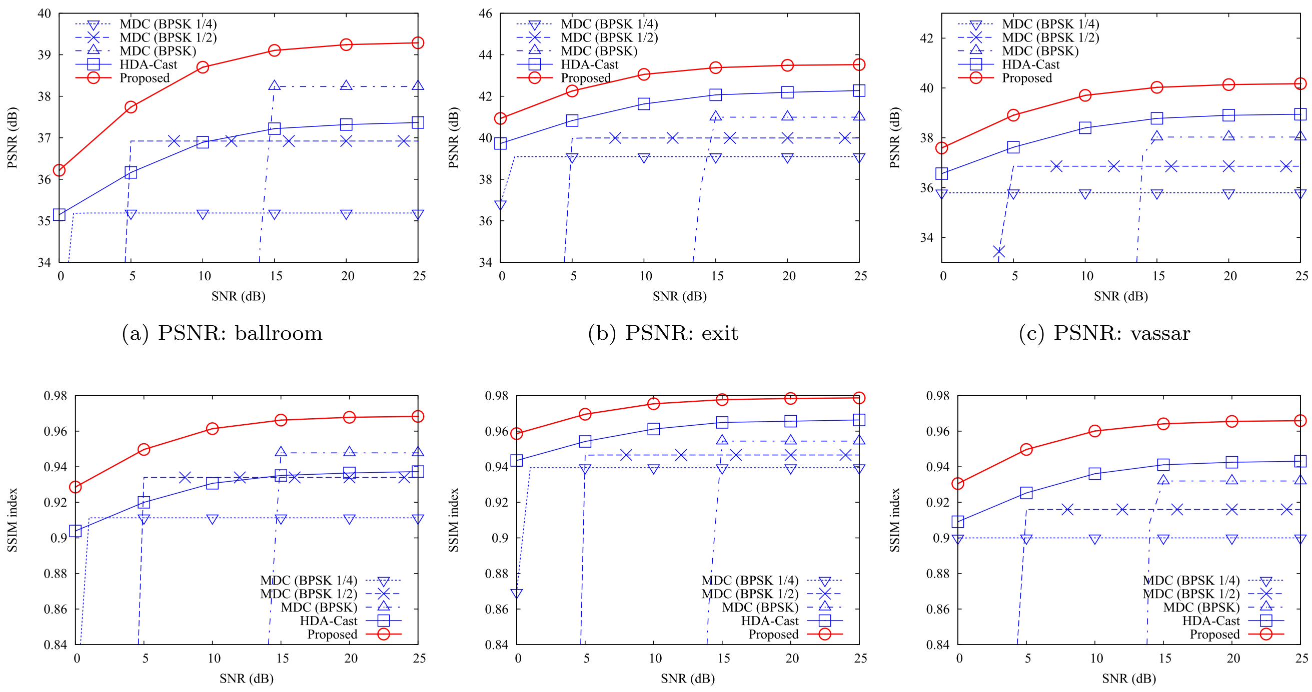
畳み込み符号のレートが 1/4 であるときは，畳み込み符号を利用しない場合と比較して，送信データ内に含まれる実映像データが 1/4 となる．一方で，畳み込み符号のレートが 1/2 であるときは，畳み込み符号を利用しない場合と比較して，送信データ内に含まれる実映像データが 1/2 となる．すなわち，使用する畳み込み符号のレートが小さければ小さいほど，送信データ内に含まれる実映像データが少なくなるため，受信映像品質が低下する．

HDA-Cast では，まず，ビデオシーケンスをデジタル映像符号化を用いてエンコードする．エンコードした映像情報は LTE チャネルを介して伝送する．その後，オリジナルのビデオシーケンスといったんデコードしたビデオシーケンスから取得した残余情報に対して 3 次元 DCT を用いて周波数成分に変換した後，ニアアナログ変調を用いて各 Wi-Fi アクセスポイントから送信する．このとき，各残余情報の送信元 Wi-Fi アクセスポイントは一様に決定するものとする．残余情報を受信した各無線端末は MMSE フィルタを用いて受信残余情報をデコードする．また，受信できなかった残余情報は 0 とする．最後に，LTE チャネルを通して受信した映像と受信残余情報に対して 3 次元逆 DCT を用いて得られた残余情報とを足し合わせることで再生映像を取得する．

### 4.2 Wi-Fi チャネルの伝送路品質に対する映像品質

提案方式の基本性能を評価するため，複数の Wi-Fi アクセスポイントから各テストビデオシーケンスを受信可能な無線端末がその伝送路品質に応じて享受する映像品質を PSNR と SSIM を用いて評価した．

図 5 (a)–(f) には，LTE のデータレートが 2 Mbps，無線端末が Wi-Fi アクセスポイント 2 台から各テストビデオシーケンス *ballroom*，*exit*，*vassar* を受信可能な場合における各手法の映像品質をそれぞれ示す．図 5 (a)–(c) における横軸は無線端末と Wi-Fi アクセスポイント間の無線伝送路品質を表す SNR であり，縦軸は映像品質を表す PSNR である．同様に，図 5 (d)–(f) における横軸は SNR，縦軸




(a) PSNR: ballroom　(b) PSNR: exit　(c) PSNR: vassar

(d) SSIM: ballroom　(e) SSIM: exit　(f) SSIM: vassar

**図 5**　Wi-Fi アクセスポイント 2 台から各テストビデオシーケンスを受信可能な無線端末が享受する映像品質

**Fig. 5**　Received video quality at the number of Wi-Fi access points (APs) of 2.

は映像品質を表す SSIM である．図 5 の結果より，次の 3 つのことが分かる．

1 つ目は，提案手法はビット誤りの発生による映像品質の急激な劣化を抑制できている点である．たとえば，図 5 (a) において，畳み込み符号を利用しない MDC では，Wi-Fi チャネルの伝送路品質が 12 dB まで低下した場合，Wi-Fi アクセスポイントをとおして伝送した表現に含まれる映像情報に誤りが生じてデコードが失敗する．一方，提案手法では，デジタル映像符号化を利用せずに残余情報を伝送するため，伝送路品質が 0 dB まで低下した場合であってもビット誤りによるデコードの失敗を防ぐことができる．

2 つ目は，無線端末と Wi-Fi アクセスポイント間の伝送路品質が改善するにつれて提案手法の映像品質が改善している点である．たとえば，図 5 (a) においては，伝送路品質が 0 dB であるとき，PSNR は 36.2 dB となるが，伝送路品質が 25 dB まで改善したとき，PSNR は 39.3 dB まで向上している．提案手法では，ニアアナログ変調を用いて残余情報を伝送することで，伝送路品質の向上にともなって送信した残余情報に生じるノイズが小さくなる．受信した残余情報に含まれるノイズが小さくなるほど，送信した映像情報がオリジナル映像に近づくため，映像品質が向上する．

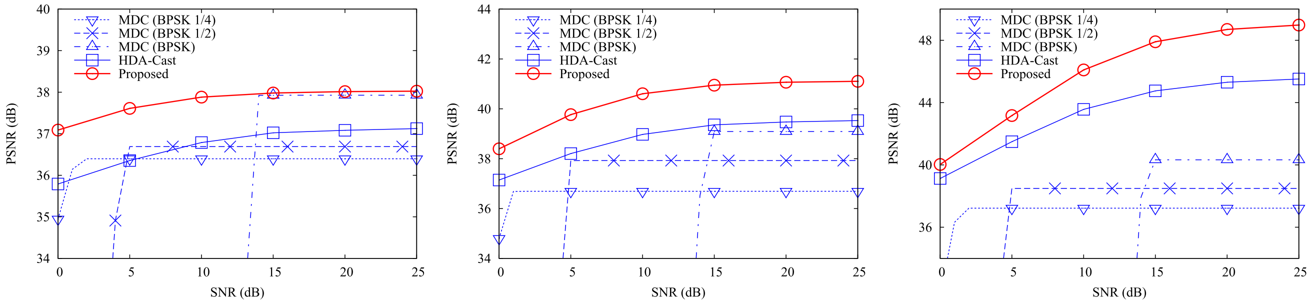
3 つ目は，視聴するテストビデオシーケンスに関係なく，提案手法は高い映像品質を達成できている点である．また，ビデオシーケンスの動きが少なければ少ないほど，提案手法が MDC と比較して高い映像品質を達成できる．たとえば，図 5 (b) に示すように，テストビデオシーケンスが *exit* であり，各 Wi-Fi チャネルの伝送路品質が 15 dB であるとき，提案手法は MDC（BPSK 1/4）と比較して約 4.3 dB，MDC（BPSK 1/2）と比較して約 3.4 dB，MDC（BPSK）と比較して約 2.4 dB 改善できることが分かる．一方で，図 5 (a) に示すように，テストビデオシーケンスが *ballroom* であるとき，提案手法は MDC（BPSK 1/4）と比較して約 3.9 dB，MDC（BPSK 1/2）と比較して約 2.2 dB，MDC（BPSK）と比較して約 0.9 dB 改善している．

前述のとおり，提案手法はテストビデオシーケンスに関係なく高映像品質を達成できることが明らかとなった．以降の評価では，テストビデオシーケンスごとに映像品質を取得した後，ビデオシーケンス間で平均をとった値を評価結果として採用する．

### 4.3　Wi-Fi アクセスポイント数に対する映像品質

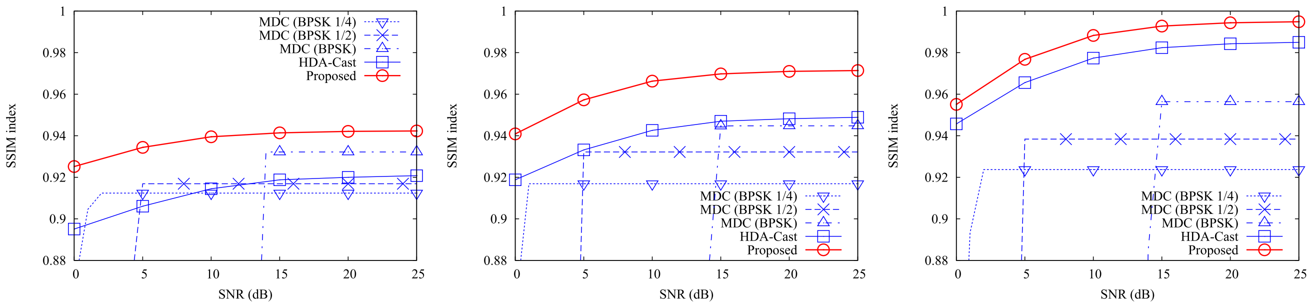
4.2 節では，複数の Wi-Fi アクセスポイントから映像情報を受信できるとき，提案手法がより高い受信映像品質を達成できることを明らかにした．本節では，受信可能な Wi-Fi アクセスポイント数が提案手法にもたらす品質改善効果について議論するために，単一あるいは複数の Wi-Fi アクセスポイントから映像情報を受信可能な無線端末がその伝送路品質に応じて享受する映像品質を評価した．

図 **6** (a)–(c) には，LTE のデータレートが 2 Mbps，無線端末が Wi-Fi アクセスポイント 1 台，2 台，3 台から映像情報を受信可能な場合における各手法の映像品質をそれぞれ示す．横軸は無線端末と Wi-Fi アクセスポイント間の無




(a) Wi-Fi アクセスポイント 1 台から受信可能な無線端末が享受する映像品質
(b) Wi-Fi アクセスポイント 2 台から受信可能な無線端末が享受する映像品質
(c) Wi-Fi アクセスポイント 3 台から受信可能な無線端末が享受する映像品質

**図 6**　映像情報を受信可能な Wi-Fi アクセスポイント数に対する PSNR
**Fig. 6**　PSNR performance in different number of available Wi-Fi APs.




(a) Wi-Fi アクセスポイント 1 台から受信可能な無線端末が享受する映像品質
(b) Wi-Fi アクセスポイント 2 台から受信可能な無線端末が享受する映像品質
(c) Wi-Fi アクセスポイント 3 台から受信可能な無線端末が享受する映像品質

**図 7**　映像情報を受信可能な Wi-Fi アクセスポイント数に対する SSIM
**Fig. 7**　SSIM performance in different number of available Wi-Fi APs.

線伝送路品質であり，縦軸は映像品質を表す PSNR である．図 6 の結果より，無線端末がより多くの Wi-Fi アクセスポイントから映像情報を受信できるとき，提案手法が既存手法と比較して高い映像品質を達成していることが分かる．これは，BCS-SPL を用いて残余情報をデコードすることで，受信できなかった残余情報を無線端末上で復元できるためである．たとえば，無線端末が 3 台の Wi-Fi アクセスポイントから残余情報を受信可能であり，各 Wi-Fi チャネルの伝送路品質が 10 dB であるとき，提案手法は MDC（BPSK 1/4）と比較して約 8.9 dB，MDC（BPSK 1/2）と比較して約 7.6 dB，MDC（BPSK）と比較して約 5.8 dB，HDA-Cast と比較して 2.5 dB の品質改善を達成している．

**図 7** には，図 6 と同一環境における各手法の映像品質を SSIM で示す．横軸は無線端末と Wi-Fi アクセスポイント間の伝送路品質であり，縦軸は映像品質を表す SSIM である．評価結果から，次の 2 つのことが分かる．

1 つ目は，PSNR で示した評価結果と同様に，映像情報を受信可能な Wi-Fi アクセスポイント数の増加にともなって，提案手法は高い映像品質を達成できている点である．SSIM は主観的な印象を反映した指標であることから，提案手法を用いた映像配信はユーザの主観品質向上につながることが期待できる．

2 つ目は，図 7 (a) において，Wi-Fi チャネルの伝送路品質が高いとき，提案手法は MDC（BPSK）と比較して高い SSIM を達成できている点である．PSNR を用いた図 6 (a) において 2 手法は同等の性能を示していた．一方で，SSIM においては提案手法がより高い性能を達成していることから，提案手法がユーザの主観評価に与える影響は MDC と比較して高いと期待できる．

最後に，提案手法による品質改善が主観品質にもたらす効果を議論するために，**図 8** に各手法における再生映像のスナップショット，**図 9** に一部の領域を拡大したスナップショットを示す．ここで，テストシーケンスは ballroom，フレーム番号は 1 番，LTE チャネルのデータレートは 2 Mbps，無線端末と Wi-Fi アクセスポイント間の伝送路品質は 5 dB であることを想定している．たとえば，図 9 に示すように，赤枠領域を拡大すると，既存手法のスナップショットである図 9 (c)–(d) と比較して，提案手法のスナップショットである図 9 (e) では階段やカーテンに対して生じているノイズが少ないことが分かる．また，提案手法においても，受信可能 Wi-Fi アクセスポイント数が異なる図 9 (e) のスナップショットと図 9 (h) のスナップショットとを比較すると，図 9 (h) の方が細部まで元映像に近い品質を達成できていることが分かる．他手法では細部に生じているノイズを軽減できているのは，BCS-SPL を用いることで高周波成分に含まれる画素情報を復元できるためである．

(a) オリジナル

(b) LTE 基地局のみから受信
PSNR: 33.1 dB，SSIM: 0.88

(c) MDC (BPSK 1/4)
Wi-Fi アクセスポイント 1 台から受信
PSNR: 34.3 dB，SSIM: 0.90

(d) HDA-Cast
Wi-Fi アクセスポイント 1 台から受信
PSNR: 34.3 dB，SSIM: 0.89

(e) Proposed
Wi-Fi アクセスポイント 1 台から受信
PSNR: 35.1 dB，SSIM: 0.92

(f) MDC (BPSK 1/4)
Wi-Fi アクセスポイント 2 台から受信
PSNR: 34.9 dB，SSIM: 0.91

(g) HDA-Cast
Wi-Fi アクセスポイント 2 台から受信
PSNR: 36.2 dB，SSIM: 0.92

(h) Proposed
Wi-Fi アクセスポイント 2 台から受信
PSNR: 37.5 dB，SSIM: 0.95

図 8 LTE チャネルのデータレートが 2 Mbps，Wi-Fi チャネルの伝送路品質が 5 dB であるときの各手法における ballroom（frame #1）のスナップショット

**Fig. 8** Snapshot of ballroom at LTE's data rate of 2 Mbps and Wi-Fi channel SNR of 5 dB.

### 4.4 LTE のレート変動がもたらす影響

4.3 節では，LTE のデータレートが 2 Mbps である環境における提案手法の有効性を明らかにした．一方で，3.6 節で示したとおり，LTE チャネルで利用可能なデータレートは Wi-Fi チャネルにおける伝送路品質と同様に変動しやすい特性を持つ．本節では，LTE のデータレートが変化した場合における各手法の映像品質を評価することで，レート変動に対する各手法の効果を議論する．

図 10 (a)，(b) には，無線端末が 1 台あるいは 2 台の Wi-Fi アクセスポイントから映像情報を受信できるとき，LTE のデータレートが変化した場合における各手法の映像品質（PSNR）を示す．このとき，無線端末と Wi-Fi アクセスポイント間の伝送路品質は 10 dB とする．評価結果から，次の 3 つのことが分かる．

1 つ目は，LTE チャネルで利用可能なデータレートに関係なく，提案手法は高い映像品質を達成できている点である．たとえば，LTE で利用可能なデータレートが 5 Mbps，無線端末が 2 台の Wi-Fi アクセスポイントから残余情報を受信可能であるとき，提案手法は MDC（BPSK 1/4）と比較して約 3.2 dB，MDC（BPSK 1/2）と比較して約 2.7 dB，MDC（BPSK）と比較して約 1.9 dB，HDA-Cast と比較して 0.5 dB の品質改善を達成している．

情報処理学会論文誌 Vol.59 No.10 1880–1894 (Oct. 2018)

(a) オリジナル（赤枠：拡大領域） (b) オリジナル

(c) MDC (BPSK 1/4)
Wi-Fi アクセスポイント 1 台から受信
PSNR: 34.3 dB，SSIM: 0.90

(d) HDA-Cast
Wi-Fi アクセスポイント 1 台から受信
PSNR: 34.3 dB，SSIM: 0.89

(e) Proposed
Wi-Fi アクセスポイント 1 台から受信
PSNR: 35.1 dB，SSIM: 0.92

(f) MDC (BPSK 1/4)
Wi-Fi アクセスポイント 2 台から受信
PSNR: 34.9 dB，SSIM: 0.91

(g) HDA-Cast
Wi-Fi アクセスポイント 2 台から受信
PSNR: 36.2 dB，SSIM: 0.92

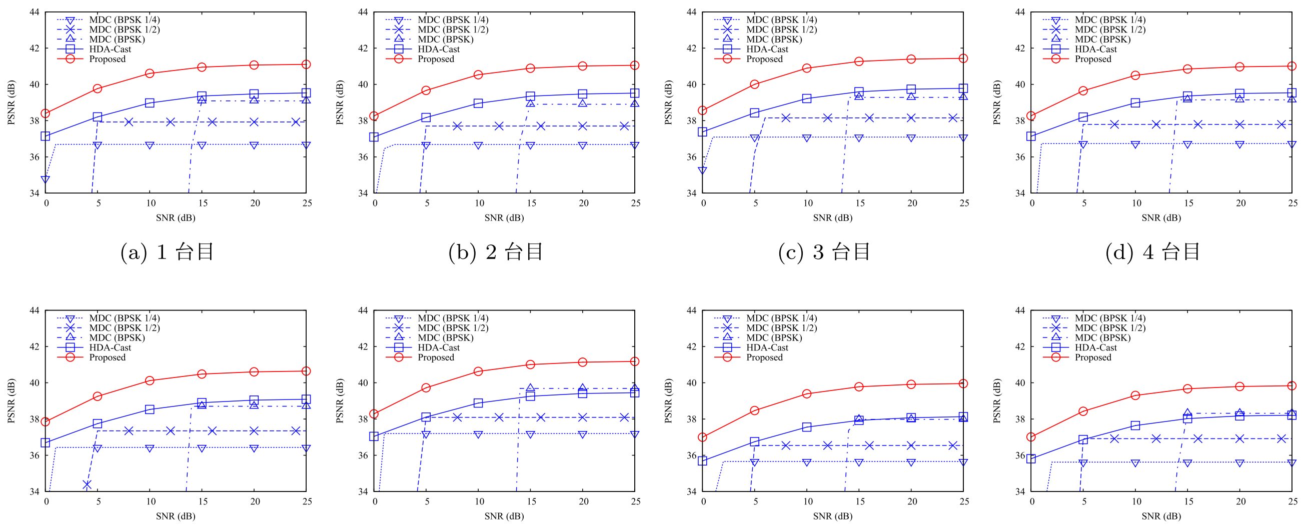
(h) Proposed
Wi-Fi アクセスポイント 2 台から受信
PSNR: 37.5 dB，SSIM: 0.95

**図 9** LTE チャネルのデータレートが 2 Mbps，Wi-Fi チャネルの伝送路品質が 5 dB であるときの各手法における ballroom（frame #1）の拡大スナップショット

**Fig. 9** Zoomed snapshot of ballroom at LTE's data rate of 2 Mbps and Wi-Fi channel SNR of 5 dB.

2 つ目は，複数の Wi-Fi アクセスポイントから映像情報を受信できるとき，BCS-SPL を用いることによる品質改善効果が高くなっている点である．たとえば，LTE で利用可能なデータレートが 3 Mbps であるとき，BCS-SPL を利用しない HDA-Cast と比較して，Wi-Fi アクセスポイント 1 台と接続している場合は 0.6 dB，Wi-Fi アクセスポイント 2 台と接続している場合は 1.0 dB の品質向上を達成している．これは，より多くの残余情報を受信できたとき，BCS-SPL を用いることで未受信の残余情報を復元しやすくなるためである．

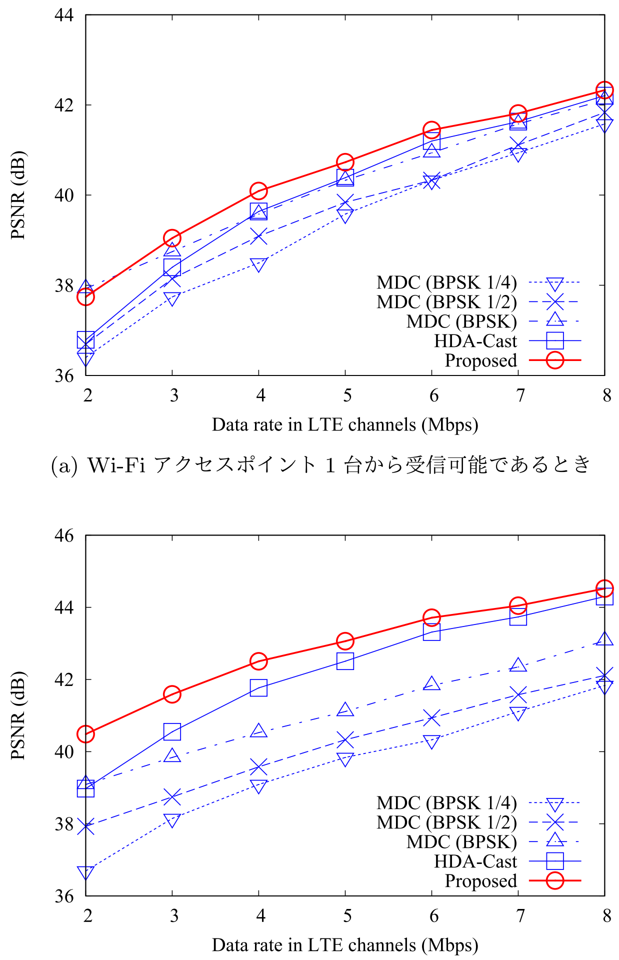
3 つ目は，LTE チャネルのデータレートが向上したとき，提案手法と HDA-Cast との性能差が小さくなる点である．提案手法で用いる BCS-SPL はデコード対象となる残余情報がスパースであればあるほど，多くの情報を復元することができる．一方で，LTE 基地局から送信する映像が高品質になるほど，各ビデオフレームの画素間の相関が弱くなる．このとき，残余情報のスパース性が失われるため，BCS-SPL を用いることによる効果が小さくなることが分かった．




(a) 1 台目　(b) 2 台目　(c) 3 台目　(d) 4 台目

(e) 5 台目　(f) 6 台目　(g) 7 台目　(h) 8 台目

図 11　カメラ映像ごとの映像品質
**Fig. 11**　Video quality in each camera.




(a) Wi-Fi アクセスポイント 1 台から受信可能であるとき

(b) Wi-Fi アクセスポイント 2 台から受信可能であるとき

図 10　LTE のデータレートが変化したときの映像品質
**Fig. 10**　Video quality in different LTE's data rates.

### 4.5　テストビデオシーケンスに関する議論

4.2 節から 4.4 節では，テストビデオシーケンス *ballroom*，*exit*，*vassar* の 1 台目のカメラ映像を利用した場合における提案手法の有効性を明らかにした．一方で，各テストビデオシーケンスは 8 台のカメラ映像から構成されている．それぞれのカメラ映像は，10 cm 間隔で設置された 8 台のカメラを用いてある対象を 8 つの異なる角度から撮影したものである．本節では，複数台のカメラを用いて対象を撮影したとき，カメラ映像によって提案手法における映像品質がどのような影響を受けるか議論する．

図 11 には，LTE のデータレートが 2 Mbps，無線端末が Wi-Fi アクセスポイント 2 台から各テストビデオシーケンスの各カメラ映像を受信できるとき，各手法におけるカメラ映像ごとの映像品質（PSNR）を示す．このとき，映像品質としてカメラごとにビデオシーケンス間で平均をとった値を採用している．図 11 から，いずれのカメラ映像を利用した場合においても，既存手法と比較して，提案手法が無線伝送路品質の変化とともに高い映像品質を達成していることが分かる．また，カメラ映像ごとに映像品質が変化しているのは，撮影角度による映像情報の変化がデジタル映像符号化技術および圧縮センシング技術による圧縮効率に影響を与えたためだといえる．

## 5.　まとめ

本論文では，LTE 基地局および複数の Wi-Fi アクセスポイントを映像配信に利用可能な環境下において，受信映像の高品質化を達成するための新たな映像伝送手法を提案した．提案手法では，デジタル映像符号化，圧縮センシング，ニアアナログ変調を組み合わせる．デジタル映像符号化は LTE 基地局によるベース品質となる映像情報の伝送と Wi-Fi アクセスポイントによるグレイスフル映像伝送の高品質化を実現する．ニアアナログ変調は無線端末と各 Wi-Fi アクセスポイント間の伝送路品質にしたがって比例的に映像品質を改善することを達成する．圧縮センシング

による平滑化は，複数の Wi-Fi 伝送路による高品質化を達成するとともに，無線端末が Wi-Fi を通して一部の残余情報のみを取得できるときに欠落した映像情報を復元する．性能評価から，無線端末が複数の Wi-Fi アクセスポイントから映像情報を受信できるとき，提案手法は MDC と比較して映像品質を 8.9 dB 改善できることを明らかにした．今後の課題として，様々な評価パラメータやフェージング・シャドウイング環境を考慮した，より詳細な無線伝送路モデルにおいて，提案手法の優位性に影響はないか明らかにすることがあげられる．

**謝辞**　本研究は JSPS 科研費 JP17K12672 の助成を受けたものです．

## 参考文献


[1] Cisco: Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016–2021 (2017).

[2] Liu, Z., Cheung, G., Chakareski, J. and Ji, Y.: Multiple Description Coding & Recovery of Free Viewpoint Video for Wireless Multi-Path Streaming, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Vol.9, No.1, pp.151–164 (2015).

[3] 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).

[4] Sorensen, J.H., Ostergaard, J., Popovski, P. and Chakareski, J.: Multiple Description Coding with Feedback Based Network Compression, *IEEE GLOBECOM*, pp.1–6 (2010).

[5] Jakubczak, S., Rahui, H. and Katabi, D.: One-Size-Fits-All Wireless Video, *ACM HotNets*, pp.1–6 (2009).

[6] Liu, X.L., Hu, W., Luo, C., Pu, Q., Wu, F. and Zhang, Y.: ParCast+: Parallel Video Unicast in MIMO-OFDM WLANs, *IEEE Trans. Multimedia*, Vol.16, No.7, pp.2038–2051 (2014).

[7] 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).

[8] 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).

[9] Prabhakaran, V., Puri, R. and Ramchandran, K.: Hybrid Digital-Analog Codes for Source-Channel Broadcast of Gaussian Sources Over Gaussian Channels, *IEEE Trans. Information Theory*, Vol.57, No.7, pp.4573–4588 (2011).

[10] Yu, L., Li, H. and Li, W.: Wireless Scalable Video Coding Using a Hybrid Digital-Analog Scheme, *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, Vol.24, No.2, pp.331–345 (2014).

[11] Yu, L., Li, H. and Li, W.: Wireless Cooperative Video Coding Using a Hybrid Digital-Analog Scheme, *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, Vol.25, No.3, pp.436–450 (2015).

[12] He, D., Luo, C., Lan, C., Wu, F. and Zeng, W.: Structure-Preserving Hybrid Digital-Analog Video Delivery in Wireless Networks, *IEEE Trans. Multimedia*, Vol.17, No.9, pp.1658–1670 (2015).

[13] Donoho, D.L.: Compressed Sensing, *IEEE Trans. Information Theory*, Vol.52, No.4, pp.1289–1306 (2006).

[14] Candes, E.J. and Wakin, M.B.: An Introduction to Compressive Sampling, *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol.25, No.2, pp.21–30 (2008).

[15] 藤橋卓也，大友伊織，遠藤慶一，廣田悠介，小林真也，渡辺　尚：複数の無線伝送路を活用した高品質映像伝送に関する一研究，マルチメディア，分散，協調とモバイル（DICOMO2017）シンポジウム，pp.270–276 (2017).

[16] Li, M., Chen, Z. and Tan, Y.P.: Scalable Resource Allocation for SVC Video Streaming Over Multiuser MIMO-OFDM Networks, *IEEE Trans. Multimedia*, Vol.15, No.7, pp.1519–1531 (2013).

[17] 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).

[18] Liu, Z., Dong, M., Zhou, H., Wang, X., Ji, Y. and Tanaka, Y.: Device-to-device assisted video frame recovery for picocell edge users in heterogeneous networks, *IEEE International Conference on Communications*, pp.1–6 (2016).

[19] Wiegand, T., Sullivan, G.J., Bjontegaard, G., Luthra, A.: Overview of The H.264/AVC Video Coding Standard, *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, Vol.13, No.7, pp.560–576 (2003).

[20] Mun, S. and Fowler, J.E.: Block Compressed Sensing of Images using Directional Transforms, *IEEE International Conference on Image Processing*, pp.3021–3024 (2009).

[21] Xie, X., Zhang, X., Kumar, S. and Li, L.E.: piStream: Physical Layer Informed Adaptive Video Streaming Over LTE, *ACM 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.413–425 (2015).

[22] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11: *Multi-view Video Test Sequences from MERL* (2005).

[23] Wang, Z., Bovik, A.C., Sheikh, H.R. and Simoncelli, E.P.: Imge Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity, *IEEE Trans. Image Processing*, Vol.13, No.4, pp.600–612 (2004).

[24] Huang, P.C., Lin, J.R., Li, G.L., Tai, K.H. and Chen, M.J.: Improved Depth-Assisted Error Concealment Algorithm for 3D Video Transmission, *IEEE Trans. Multimedia*, Vol.19, No.11, pp.2625–2632 (2017).

[25] Moldovan, A.N. and Muntean, C.H.: QoE-aware Video Resolution Thresholds Computation for Adaptive Multimedia, *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, pp.1–6 (2017).


## 推薦文

DICOMO2017 の発表論文の中で特に評価が高かったため．また，映像信号をデジタル映像符号化技術，圧縮センシング，およびニアアナログ変調を用いて信号を分離し，LTE を用いて広域に低品質な映像を配信する一方で，Wi-Fi を用いて映像の品質を向上する相補的な通信方式を実現する提案手法は，Wi-Fi によるオフローディングを行なっている現状にマッチするものであり，実用性および有用性が高いと判断されるため．

（モバイルコンピューティングと
パーベイシブシステム研究会主査　河口信夫）

**藤橋 卓也**　（正会員）

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．2016 年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修了．博士（情報科学）．2014～2016 年日本学術振興会特別研究員．2014～2015 年 Mitsubishi Electric Research Laboratories 滞在．2017 年より愛媛大学大学院理工学研究科助教．映像伝送，無線ネットワークに関する研究に従事．2014 年電気通信普及財団テレコムシステム技術賞奨励賞．電子情報通信学会，IEEE 各会員．

**大友 伊織**

1992 年生．2015 年大阪大学工学部電子情報工学科卒業．2017 年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了．映像伝送，計算機ネットワークに関する研究に従事．第一級陸上無線技術士．

**遠藤 慶一**　（正会員）

1980 年生．2003 年京都大学工学部情報学科卒業．2005 年京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻修士課程修了．2008 年同専攻博士後期課程修了．博士（情報学）．2007 年愛媛大学大学院理工学研究科電子情報工学専攻助教，2012 年同専攻講師，現在に至る．アドホックネットワーク，教育工学に関する研究に従事．電子情報通信学会，日本応用数理学会各会員．

**廣田 悠介**

2004 年大阪大学工学部情報システム卒業．2006 年同大学大学院博士前期課程修了．2008 年同大学院博士後期課程修了．同年同大学院・情報科学・情報ネットワーク学・助教，2017 年国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワークシステム研究所・主任研究員，現在に至る．光ネットワーク，交換処理，自律分散システム制御，ならびに，コンテンツ配信技術に関する研究に従事．博士（情報科学）．IEEE，OSA，IEICE 各会員．

**小林 真也**　（正会員）

1985 年大阪大学工学部通信工学科卒業．1991 年同大学大学院博士課程修了．工学博士．同年金沢大学工学部電気･情報工学科助手．その後，同講師，助教授，同大学大学院自然科学研究科助教授を経て，1999 年愛媛大学工学部情報工学科助教授．2004 年同学科教授．2006 年より，愛媛大学大学院理工学研究科電子情報工学専攻教授．また，2018 年から同大学南予水産研究センター教授を兼務．その間 1996 年カリフォルニア大学アーバイン校客員教員．2002～2003 年ワシントン大学パセル校客員研究員．並列処理システム，分散処理システムの研究に従事．近年は，専門分野の研究に加え，実践的能力を備えたエンジニアを育てる工学教育にも関心を持ち，デザイン思考やロジカルシンキング，PM 等のエンジニアの素養とその能力育成への関心を高めている．また，水産分野を初めとする異分野への情報通信技術応用に取り組んでいる．電子情報通信学会，電気学会，日本工学教育協会，IEEE，ACM 各会員．

**渡辺 尚**　（正会員）

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授．1996 年静岡大学情報学部情報科学科教授．2008 年同大学創造科学技術大学院教授．2013 年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．情報処理学会理事，電子情報通信学会アドホックネットワーク研究会副委員長，等．訳書『計算機設計技法』,『802.11 無線ネットワーク管理』等．IEEE 会員．