

高イマーシブマルチビュー伝送に関する研究

研究代表者 藤 橋 卓 也 大阪大学 大学院情報科学研究科 助教
共同研究者 渡 辺 尚 大阪大学 大学院情報科学研究科 教授

1 研究背景

複数視点映像(マルチビュービデオ)や全方位映像の有線/無線ネットワーク伝送を通して仮想現実(VR)や自由視点映像に挙げられる没入型コンテンツを多様な視聴端末に提供することが期待されている。例えば CISCO が 2019 年 2 月に発表した CISCO Visual Network Index [1] によれば、全世界のモバイルトラフィックのうち、2022 年には約 82%が映像トラフィックになるとの予測がなされている。これは有線接続された端末だけでなく、無線接続された端末に対する没入型コンテンツを含む映像コンテンツのネットワーク伝送に対する需要が高まっていることを示唆している。一方で、無線接続された視聴端末に対してマルチビュービデオや全方位映像を配信する場合、伝送に要するトラフィックや無線通信路品質の変動に起因して多くの課題が生じる。

マルチビュービデオや全方位映像を伝送する場合、解像度やフレームレート、カメラ台数が要因となって多大な通信トラフィックが必要となる。一方で、無線ネットワークにおいて利用可能な帯域は有線ネットワークと比較して限定的であるため、受信映像コンテンツの品質低下や再生停止を招く。限定的な帯域を有する無線伝送路を介して端末に高品質な映像コンテンツを伝送するためには、通常、H.264/Advanced Video Coding (AVC) [2] や H.265/High Efficient Video Coding (HEVC) [3] に代表されるデジタル映像符号化技術を用いて映像データを圧縮する。このとき、デジタル映像符号化に用いる符号化パラメータは観測した無線通信路品質に応じて設定する。無線伝送路品質が映像コンテンツ伝送中に変化しない場合、本手法は限られた帯域を最大限活用できるため、無線接続端末における受信映像品質を高めることができる。しかしながら、無線伝送路品質は端末の位置や周辺電波伝搬環境に応じて頻繁に変動することが知られている。例えば、映像コンテンツを無線接続端末に対して伝送しているときに無線伝送路品質が悪化した場合、受信映像品質が著しく低下する Cliff Effect が生じる。これは無線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各ビデオフレームのデコード失敗を招くとともに、デコードに失敗したビデオフレームより後続にあるビデオフレームにもその影響が伝搬(エラー伝搬)して多くのビデオフレームの品質が著しく劣化するためである。低品質化した映像コンテンツを用いたサービスは低いユーザ満足度を招くことが知られている[4]。一方で、映像コンテンツを無線接続端末に対して配信しているときに無線伝送路品質が改善したとしても、従来の映像配信技術は改善した無線伝送路品質を受信映像品質にすぐさま反映させることは困難である。これはデジタル映像符号化を用いて圧縮した映像コンテンツの品質がその量子化の度合いにしたがって定まることに起因する。

以上の点から無線接続端末に対して没入型コンテンツを配信する場合、1) トラフィック増加に起因する受信映像品質低下、2) 無線伝送路品質の時間的変動にともなう受信映像品質の低下および一定化に対処する必要がある。本研究ではマルチビュービデオおよび全方位映像の高品質無線ネットワーク伝送を実現するために FreeCast, 360Cast をそれぞれ提案した。FreeCast は色・奥行き情報の双方を含むマルチビュービデオ (Multi-view plus Depth: MVD) の無線ネットワーク伝送を対象としている。本手法ではデジタル映像符号化を利用せず、代わりに、周波数変換とニアアナログ変調 [5] を組み合わせることで無線伝送路品質の時間的変動に耐性を持つ無線マルチビュービデオ伝送を実現する。より具体的には、1 Group of Picture (GoP) 分の MVD フレームに対して 5 次元離散コサイン変換 (Discrete Cosine Transform: DCT) を用いてビデオフレーム内、ビデオフレーム間、カメラ間に含まれる相関情報を利用して画素情報を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いる。得られた周波数成分に対してはそれぞれの値の大きさに応じて送信電力を割り当てる。その後、すべての周波数成分から 2 つずつ周波数成分を取り出すとともにニアアナログ変調を用いて周波数成分を In-phase (I) 平面、Quadrature (Q) 平面に直接マッピングしてから無線接続端末に送信する。無線接続端末はニアアナログ変調された各周波数成分を受信すると、各周波数成分に対して割り当てた送信電力の逆数に基づくフィルタを用いてデコードする。このとき、デコードした周波数成分と元の周波数成分との間のずれは無線伝送路品質にしたがって改善する。すなわち、無

線伝送路品質の変動に耐性を持った無線マルチビュービデオ伝送が実現できることを意味している。

360Cast は全方位映像の無線ネットワーク伝送を対象として 2 次元離散ウェーブレット変換 (Discrete Wavelet Transform: DWT) とニアアナログ変調を組み合わせた伝送手法である。通常のカメラ映像とは異なり、全方位カメラを用いて撮影した全方位映像は球体状の映像であることから正距円筒図法などの 2 次元プロジェクション技術を用いて平面上にマッピングする。360Cast では平面へ射影するときに生じる劣化量およびヘッドマウントディスプレイ (HMD) を通して得られたユーザの注視点を中心に各周波数成分に対して送信電力を割り当てる。さらに、平面上にマッピングした全方位映像のうち、ユーザが視聴する可能性が高い領域 (以降、ビューポート) のみを伝送することで無線全方位映像伝送に要するトラフィックの削減を達成する。

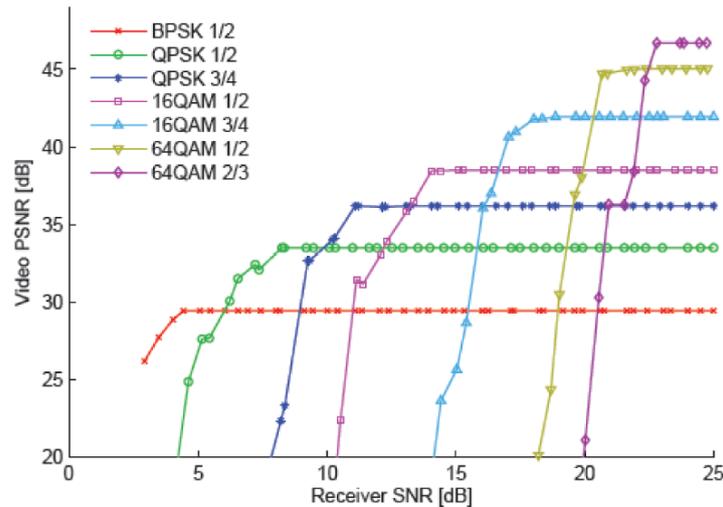


図 1: 無線伝送路品質に対するデジタル映像符号化技術を用いた従来手法の映像品質

2. 従来の無線映像伝送とその課題

前節で述べたとおり、従来の無線映像伝送においてはデジタル映像符号化技術を用いて映像コンテンツを圧縮する。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 DCT、量子化、エントロピー符号化を用いて各ビデオフレームに含まれる冗長な映像情報を圧縮する。DCT ではビデオフレーム内の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。高周波成分が変化するとき、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。低周波成分はビデオフレームに含まれる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情報を削減する。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さらに圧縮する。

一方で、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、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得られるビット列は畳み込み符号などで符号化、Binary Phase Shift Keying (BPSK) などに変調された後、無線接続端末に対して伝送される。

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映像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) [dB] である。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) [dB] である。ここで、各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、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 つ目は無線伝送路品質が約 4dB のとき、受信映像品質が最も高く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変調技術と畳み込み符号にしたがって定まる無線伝送路の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を設定する。ビット誤りがほとんど生じない無線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 つ目は無線伝送路品質が 4dB 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。これはビット誤りによるビデオフレームのデコード失敗と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エントロピー符号化が高い圧縮効率を達成する一方、圧縮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。

3 つ目は伝送路品質が 4dB より高くなった場合、受信映像品質が一定となる点である。デジタル映像符号化において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から削減することで映像情報を圧縮する。一方で、削減した映像情報は端末上で復元できないため、無線伝送路品質に関わらず、受信映像品質は一定となる。

3. FreeCast

3-1 全体像

FreeCast は MVD を対象とした無線映像伝送手法である。MVD ではカメラ 2 台分の色情報・奥行き情報を無線接続端末に対して伝送する。無線接続端末は受信したカメラ 2 台分の色情報・奥行き情報からその間のカメラ映像をレンダリングして視聴することができる。図 2 に FreeCast の概要を示す。エンコーダは色情報と奥行き情報をパラメータ α 、 β にしたがってスケールする。スケールした色情報・奥行き情報に対して 5D-DCT を用いることで画素情報を周波数成分に変換する。このとき、得られた DCT 係数の大きさに応じて各 DCT 係数に対する電力割り当て係数を定める。送信電力を割り当てた DCT 係数はニアアナログ変調を用いてそのまま送信信号としてマッピングする。受信端末は無線伝送路を介して受信した DCT 係数に対して最小平均二乗誤差 (Minimum Mean Square Error: MMSE) フィルタを用いてデノイズ後の DCT 係数を取得する。ここで、フィルタ利得は電力割り当て係数および各 DCT 係数の大きさに基づいて得られる。デノイズ後の DCT 係数に対してデコーダは 5D-IDCT を実行して色情報・奥行き情報を再構成する。最後にデコーダは Depth Image-Based Rendering (DIBR) [6] を用いて色情報および奥行き情報からユーザが所望するカメラ映像をレンダリングする。

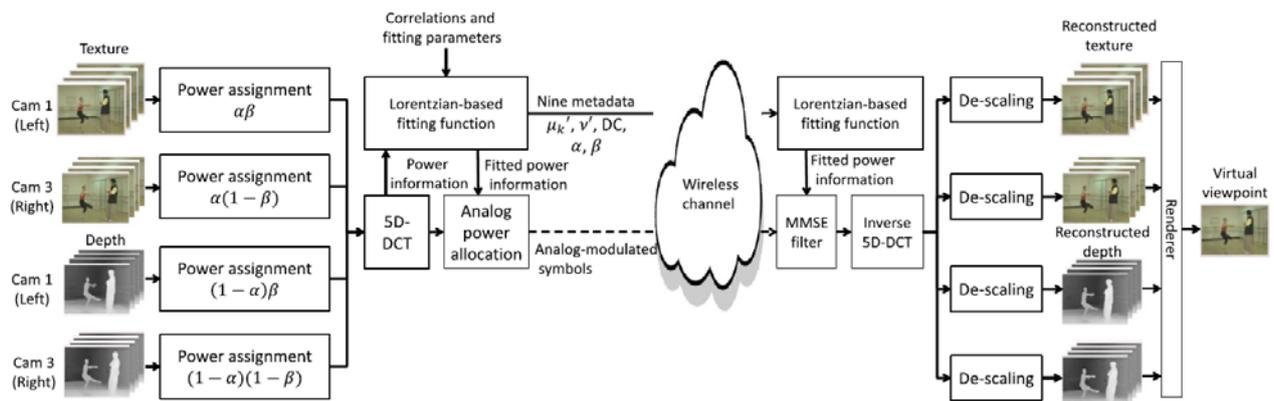


図 2: 無線マルチビュービデオ伝送を対象とした FreeCast の全体像

3-2 エンコーダ

エンコーダでは 1GoP あたりに含まれる複数カメラの色情報・奥行き情報全体に対して 5D-DCT を使用する。各 DCT 係数に対して送信電力を割り当てた後、I 平面および Q 平面上に DCT 係数をマッピングする。ここで、 x_i をニアアナログ変調した送信シンボルとする。送信シンボルは電力割り当て係数 g_i にしたがってス

ケーリングした i 番目の DCT 係数 s_i として下記のように表すことができる。

$$x_i = g_i \cdot s_i$$

ここで、最適な電力割り当て係数 g_i は、平均電力制約 P の下で平均二乗誤差 (Mean Square Error: MSE) を最小化することを目的として以下のように定めた。

$$\min_{g_i} \text{MSE} = \mathbb{E}[(s_i - \hat{s}_i)^2] = \sum_i^N \frac{\sigma^2 \lambda_i}{g_i^2 \lambda_i + \sigma^2}$$

$$\text{s. t. } \frac{1}{N} \sum_i^N g_i^2 \lambda_i = P,$$

ここで、 $\mathbb{E}[\cdot]$ は期待値、 \hat{s}_i は受信端末における各 DCT 係数の推定値、 λ_i は DCT 係数の大きさ、 N は DCT 係数の数、 σ^2 は無線伝送路におけるノイズの大きさである。このとき、最適な電力割り当て係数は以下のように定まる。

$$g_i = \lambda_i^{-1/4} \sqrt{\frac{NP}{\sum \sqrt{\lambda_j}}}$$

3-3 デコーダ

受信端末は無線伝送路を介して下記のように受信シンボル y_i を受信する。

$$y_i = x_i + n_i$$

ここで、 y_i は受信シンボル、 n_i は分散 σ^2 にしたがう加法性白色ガウス雑音 (Additive White Gaussian Noise: AWGN) である。受信端末は MMSE フィルタ [5] を介して I 平面と Q 平面から DCT 係数をデコードする。

$$\hat{s}_i = \frac{g_i \lambda_i}{g_i^2 \lambda_i + \sigma^2} y_i$$

その後、フィルタ出力 \hat{s}_i に対して 5D-IDCT を取ることでデコード後の DCT 係数に対応する色情報・奥行き情報を取得する。最後に受信端末は得られた色情報・奥行き情報に対して DIBR [6] を用いることで自身が所望するカメラ映像を生成する。

3-4 関心情報に基づいた送信電力割当

DIBR を用いて生成したカメラ映像の品質は DIBR に入力した各カメラの色情報・奥行き情報それぞれの品質に応じて定まる。デジタル映像符号化技術を用いた従来の無線 MVD 伝送では各カメラの色情報・奥行き情報に対する割り当てビット量・送信電力量を定めてそれぞれの情報に対する品質を制御することで生成カメラ映像の品質最大化を図る。このとき、従来手法では膨大な組み合わせの中から最適なビット量・電力量の組み合わせを定める必要がある。例えば各カメラの色情報・奥行き情報に対する割り当てビット量を定める場合、その組み合わせ数は 52^4 となる。これはそれぞれの情報に対する量子化パラメータが $[0, 51]$ の範囲で設定できることに起因する [7]。

一方、FreeCast は量子化およびエントロピー符号化を利用しないため、従来手法における組み合わせ問題を各カメラの色情報・奥行き情報に対する電力割り当て問題のみに簡潔化することができる。FreeCast では各カメラの色情報・奥行き情報に対する電力量を制御するためにパラメータ α 、 β を利用する。 α は色情報・奥行き情報に対する割り当て電力量を定めるパラメータである。 β は 1 台目・2 台目のカメラそれぞれに対する割り当て電力量を定めるパラメータである。FreeCast では図 3 に示すようにパラメータ α 、 β にしたがって各カメラの色情報・奥行き情報に対して電力を割り当てたあと、5D-DCT を用いて電力割り当て後の画素値に対応する周波数成分を取得する。

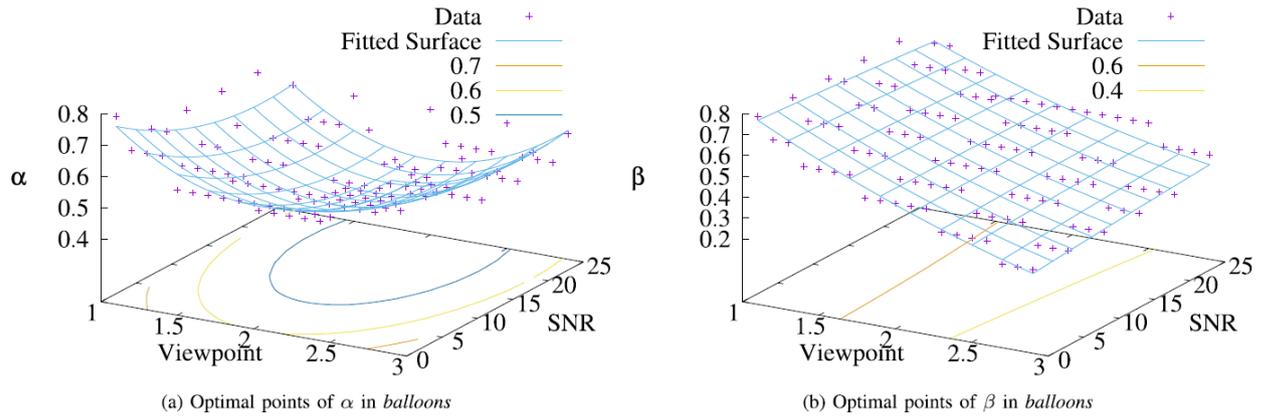


図 3: 生成するカメラ映像位置および無線伝送路品質に対応する最適なパラメータ α , β

図 3 に生成するカメラ映像の位置および無線伝送路品質に対応する最適なパラメータ α , β の値を示す。本評価では名古屋大学藤井研究室が公開している balloons を MVD シーケンス [8] として利用した。図 4 の結果から生成するカメラ映像の位置を p , 無線伝送路品質を q としたとき, パラメータ α , β の最適値は二次関数 $f(p, q) = ap^2 + bq^2 + cpq + dp + eq + h$ から次のように得られることが分かった。

$$\alpha = 0.20p^2 - 0.82p - 0.02q + 1.43$$

$$\beta = 0.05p^2 - 0.46p - 0.01q + 1.23$$

なお, 利用する MVD シーケンスを変更したとき, パラメータ α , β の最適値は類似することが分かっている。

3-5 性能評価

名古屋大学藤井研究室が公開する MVD シーケンス balloons を利用して FreeCast による効果を評価した。各カメラの色情報・奥行き情報の解像度は 1024×768 画素である。本評価では映像品質を示す指標として PSNR および Structural Similarity (SSIM) [9] を用いることとした。また, 従来手法が用いるデジタル映像符号化技術として 3D HEVC test model (HTM) software video encoder/decoder v13.0 [10] を用いた。各受信端末が利用するレンダリングソフトウェアとして HTM software renderer を利用した。

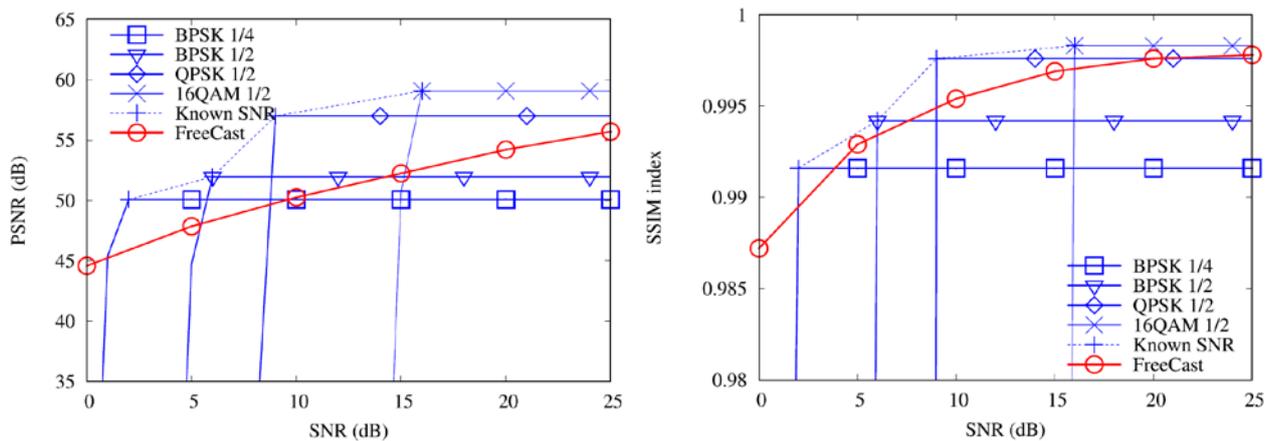


図 4: シンボルレートが 150Msymbols/s のときの各手法における映像品質

図 4 に無線伝送路におけるシンボルレートが 150Msymbols/s であるとき, 無線伝送路品質 SNR に対する従来手法および FreeCast の受信映像品質を示す。左図では平均 PSNR 性能, 右図では平均 SSIM 性能を示している。従来手法として畳み込み符号レート 1/4 の BPSK, 畳み込み符号レート 1/2 の BPSK, 畳み込み符号レート 1/2 の QPSK, 畳み込み符号レート 1/2 の 16QAM を用いて MVD を伝送したときの映像品質を示す。また,

Known SNR 方式はエンコーダが無線伝送路品質を常に把握しており、無線伝送路品質に応じて符号化パラメータを変更できることを前提としている。

FreeCast は量子化とエントロピー符号化をスキップすることで、無線伝送路品質を知る必要なく Cliff Effect や品質の一定化を抑制できていることが分かる。一方で、従来手法においてはそれぞれ異なる無線伝送路品質において Cliff Effect によって品質が著しく低下していることが分かる。例えば、畳み込み符号レート 1/2 を用いた QPSK における SSIM 性能は無線伝送路品質である SNR が 9dB から 25dB に変化しても 0.998 と変わらない一方、SNR が 9dB 以下になると急激に低下している。

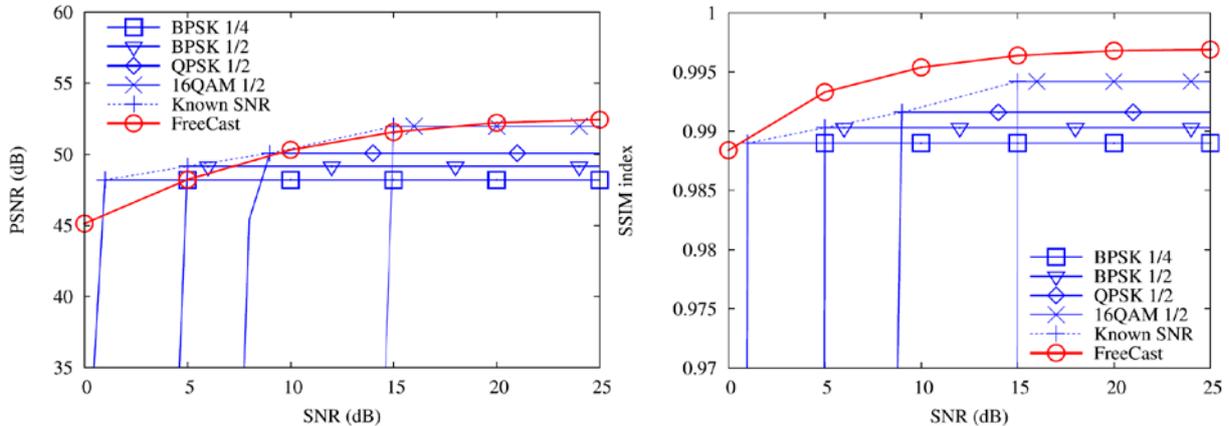


図 5: シンボルレートが 37.5Msymbols/s のときの各手法における映像品質

図 5 に無線伝送路におけるシンボルレートが 37.5Msymbols/s であるとき、無線伝送路品質 SNR に対する従来手法および FreeCast の受信映像品質を示す。図 5 と同様に、左図では平均 PSNR 性能、右図では平均 SSIM 性能を示している。狭帯域においては FreeCast が Known SNR と比較して SSIM 性能が優れていることが分かっている。

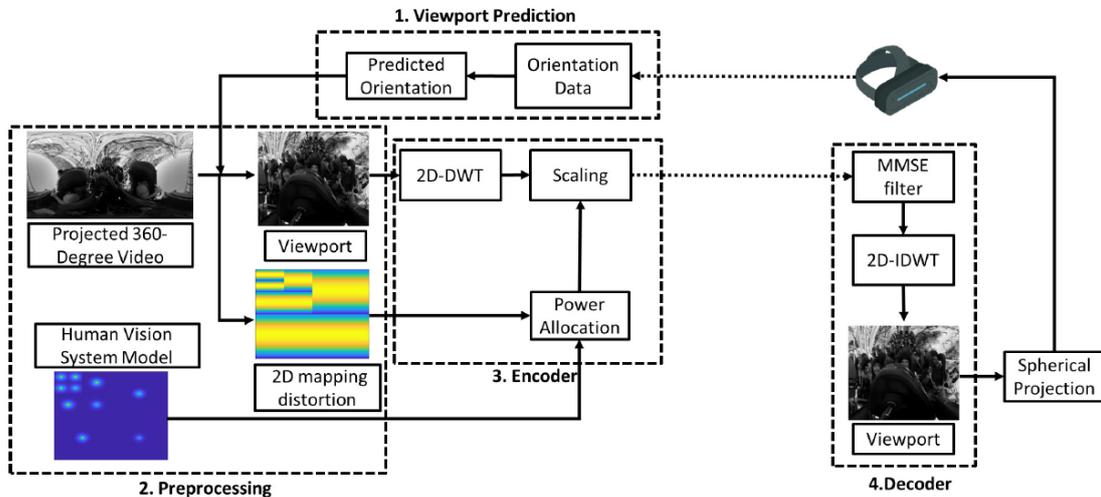


図 6: 無線全方位映像伝送を対象とした 360Cast の全体像

4. 360Cast

4-1 全体像

図 6 に 360Cast の全体像を示す。360Cast ではユーザが装着する HMD が逐次送信する HMD の向き情報に対して Dynamic Linear Regression (DLR) を用いることで全方位映像の中でユーザが注視する点を推定するとともに注視点を中心とするビューポートを生成する。各ビューポートは 2D-DWT を用いて DWT 係数に変換した後、各 DWT 係数に対して送信電力を割り当てる。このとき、各 DWT 係数に対して割り当てる送信電力量は DWT 係数の大きさ、注視点と DWT 係数との距離、平面に射影したときの劣化量に応じて定めるものとした。

電力を割り当てた各 DWT 係数はニアアナログ変調を用いて I 平面・Q 平面にマッピングした後、無線伝送路を介してユーザの HMD に伝送する。HMD では受信した DWT 係数に対して MMSE フィルタを用いて DWT 係数をデコードしたあと、2D-IDWT を適用することで HMD 上にビューポートを再生できる。

4-2 エンコーダにおける電力割り当て

FreeCast と同様に、360Cast ではビューポートに対する 2D-DWT で得られた DWT 係数に対して送信電力を割り当てたあと、ニアアナログ変調を用いて DWT 係数をユーザの HMD に対して伝送する。このとき、HMD 上で再生するビューポートの品質が最大化できるように各 DWT 係数に対する適切な電力割り当て係数を定めた。具体的には、下式に示す重み付き PSNR (Weighted PSNR: WPSNR) を最大化する電力割り当て係数 g_i を求めた。

$$WPSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{WMSE}$$

ここで、加重平均二重誤差 (Weighted Mean Square Error: WMSE) は球体から平面への射影時に生じた劣化量 D_s [11] と Human Vision System (HVS) に基づく注視点との距離に応じて定まる劣化量 S [12] に基づいて下式のとおりとなる。

$$WMSE = \frac{\sum_{i=1}^N S(v, x_i) D_s(x_i) E(x_i)}{\sum_{i=1}^N S(v, x_i) D_s(x_i)}$$

このとき、WPSNR を最大化する電力割り当て係数 g_i は次のとおりとなる。

$$g_i = \frac{\sqrt{\frac{s_i D_i \sigma^2}{\lambda_i \sum_j s_j D_j} (P + N \sigma^2)}}{\sqrt{\sum_j \frac{s_j D_j \sigma^2}{\lambda_j \sum_k s_k D_k}}} - \frac{\sigma^2}{\lambda_i}$$

4-3 性能評価

全方位映像である Mega Coaster [13] を用いて 360Cast による効果を評価した。Mega Coaster の解像度は 3840×2048 画素であり、ビューポートの解像度は 960×1024 画素と定めた。本評価では映像品質を示す指標として WPSNR を用いることとした。また、比較手法として全方位映像全体を伝送する SoftCast [5] および FoveaCast [14] を用いた。SoftCast は DWT 係数それぞれの大きさに応じて送信電力を割り当てる一方、FoveaCast は DWT 係数および全方位映像に対するユーザの注視点を中心に各 DWT 係数に対して割り当てる送信電力量を決定する。

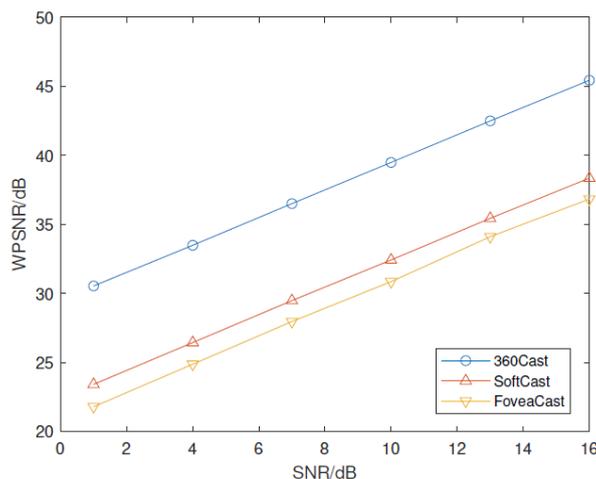


図 7: 提案手法および既存手法における無線全方位映像伝送品質

図 7 に無線伝送路品質 SNR に対する既存手法および 360Cast の受信映像品質を示す。既存手法である SoftCast および FoveaCast は全方位映像全体を伝送する一方、360Cast はビューポートのみを伝送する。評価結果か

ら 360Cast は SoftCast および FoveaCast より優れた WPSNR 性能を達成することが分かった。これは 360Cast においてユーザが所望するビューポートのみを伝送することで全方位映像伝送に要するトラフィックを削減できていることに起因する。例えば 無線伝送路品質 SNR が 1dB のとき, 360Cast は FoveaCast および SoftCast と比較してそれぞれ 7.1dB および 8.7dB の性能向上を達成することが分かった。

5. おわりに

本研究ではマルチビュービデオおよび全方位映像の高品質無線ネットワーク伝送を実現するために FreeCast, 360Cast をそれぞれ提案した。FreeCast はデジタル映像符号化を利用せず, 代わりに, 周波数変換とニアアナログ変調を組み合わせることで無線伝送路品質の時間的変動に耐性を持つ無線マルチビュービデオ伝送を実現した。一方で, 360Cast は 2D-DWT とニアアナログ変調を組み合わせることで無線伝送路品質の時間的変動に耐性を持つ全方位映像伝送を実現した。実際のマルチビュービデオおよび全方位映像を用いた性能評価から FreeCast および 360Cast は無線伝送路品質の変動に対して耐性を持つこと, 従来の無線映像伝送手法と比較して高映像品質を達成できることが明らかとなった。今後の取り組みとして異なるビデオシーケンスを配信するとき, コンテンツに対するユーザの視聴傾向が変化したとき, 提案手法の映像品質にもたらす影響を評価することなどが挙げられる。

【参考文献】

- [1] Cisco, “Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update 2017–2022,” Mar. 2019.
- [2] Richardson, I.: The H.264 Advanced Video Compression Standard, A John Wiley and Sons, Ltd, Publication (2011).
- [3] 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).
- [4] Zinner, 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).
- [5] 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).
- [6] C. Fehn, “Depth-image-based rendering (DIBR), compression, and transmission for a new approach on 3D-TV,” in Proc. Stereoscopic Displays Virtual Reality Syst., vol. 5291, May 2004, pp. 93–105.
- [7] A. Vetro, T. Ebrahimi, and V. Baroncini, “3D video subjective quality assessment test plan,” Doc. JCT3V-F1011, Nov. 2013.
- [8] Fujii Laboratory at Nagoya University, Sep. 2018. [Online]. Available: <http://www.fujii.nuee.nagoya-u.ac.jp/multiview-data/>
- [9] Z.Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, “Image quality assessment: From error visibility to structural similarity,” IEEE Trans. Image Process., vol. 13, no. 4, pp. 600–612, Apr. 2004.
- [10] HTM-13.0, Sep. 2018. [Online]. Available: https://hevc.hhi.fraunhofer.de/svn/svn_3DVCSoftware/tags/HTM-13.0/
- [11] J. Zhao, R. Xiong, and J. Xu, “Omnicast: Wireless pseudo-analog transmission for omnidirectional video,” IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, vol. 9, no. 1, pp. 58–70, 2019.
- [12] Z. Wang and A. C. Bovik, “Embedded foveation image coding,” IEEE Transactions on image processing, vol. 10, no. 10, pp. 1397–1410, 2001.

- [13] W.-C. Lo, C.-L. Fan, J. Lee, C.-Y. Huang, K.-T. Chen, and C.-H. Hsu, “360 video viewing dataset in head-mounted virtual reality,” in Proceedings of the 8th ACM on Multimedia Systems Conference. ACM, 2017, pp. 211–216.
- [14] J. Shen, L. Yu, L. Li, and H. Li, “Foveation-based wireless soft image delivery,” IEEE Transactions on Multimedia, vol. 20, no. 10, pp. 2788–2800, 2018.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
360Cast: Foveation-Based Wireless Soft Delivery for 360-Degree Video	IEEE International Conference on Communications	2020年6月
DNN-based Overhead Reduction for High-Quality Soft Delivery	IEEE Global Communications Conference	2019年12月
トラフィック削減を目的とした複数ユーザ向け3次元マルチビュービデオ伝送	マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM02019) シンポジウム	2019年7月
FreeCast: Graceful Free-Viewpoint Video Delivery	IEEE Transactions on Multimedia	2019年4月
複数ユーザを想定した低トラフィック3次元マルチビュービデオ伝送に関する一検討	情報処理学会第81回全国大会	2019年3月
無線伝送路におけるユーザの注視点を考慮したハイブリッド映像伝送に関する基礎検討	情報処理学会第81回全国大会	2019年3月
Graceful Quality Improvement in Wireless 360-Degree Video Delivery	IEEE Global Communications Conference	2018年12月
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	情報処理学会論文誌	2018年10月