

触覚情報の無線伝送高品質化に向けた一手法

北村 翔吾¹ 藤橋 卓也¹ 猿渡 俊介¹ 渡辺 尚¹

概要：振動触覚情報をネットワーク伝送するための基盤技術として振動触覚情報に対する符号化手法が提案されている。例えば、標準化手法である Haptic Codec は人間の知覚閾値に基づいて振動触覚情報を量子化することで体感品質の低下を抑制しつつ、振動触覚情報のネットワーク伝送に要するトラフィックを削減する。しかしながら、Haptic Codec に挙げられる符号化手法を用いた場合、無線伝送路品質の悪化時における cliff 効果や無線伝送路品質の改善時における復元品質の頭打ちを招く。本稿では従来の符号化手法における問題を解決する、振動触覚情報に対する新たな伝送手法を提案する。本手法では、振動触覚情報を時間領域から周波数領域に変換した後、量子化をせずに送信信号としてそのまま伝送する。また、伝送中に生じる雑音への耐性を高めるために、送信前の信号と送信後の信号の平均二乗誤差が最小になるように送信電力を割り当てる。IEEE1918.1.1 が提供する振動触覚情報のデータセットを使用して、既存手法および提案手法の性能を数値解析ソフトウェア MATLAB を用いて評価した。データの送信シンボル数が等しい場合、既存手法と比較して提案手法がより高い復元品質の振動触覚情報を受信できることを明らかにした。

1. はじめに

高次元化した映像情報・音情報を利活用した Virtual Reality (VR) はエンタテインメントや医療、教育など、多様な分野への応用が期待されている。より臨場感あふれる体験をユーザに対して提供するため、近年では映像情報や音情報に加えて、触覚情報に挙げられる感覚情報をユーザに提供することが考えられている。触覚情報の1つとして振動触覚情報 (vibrotactile information) が広く用いられている。振動触覚情報は実空間や仮想空間で接触しているものの表面に応じたテクスチャを3軸加速度センサから得られた振動の強弱として表現する。

遠隔で触れたものの振動触覚情報をユーザに対して伝達する場合、振動触覚情報は有線ネットワークだけでなく、無線ネットワークを介してユーザが装着する触覚ディスプレイへと伝送され、受信した振動触覚情報は触覚ディスプレイ上で振動として再現される。それぞれの振動触覚情報に要するデータサイズは視覚情報より限られているものの、触覚情報をより正確に再現するためには複数の応答ポイントを保持する必要があるため、複数の振動触覚情報をユーザに対して送信する必要がある。複数の振動触覚情報を同時伝送することはトラフィックの増大につながる。個々の振動触覚情報のデータサイズを抑制する方策として、振動触覚情報に対する符号化技術が提案されている [1-4]。例えば、Haptic Codec [3,4] では1次元離散ウェーブレット変換

を用いて振動触覚情報を周波数成分に変換した後、人間の知覚閾値 [5,6] に基づいて各周波数成分を量子化する。量子化した各周波数成分は Set Partitioning In Hierarchical Trees (SPIHT) [7] を用いて符号化する。符号化後に得られたビット列に対してチャンネル符号化を適用するとともに Binary Phase Shift Keying (BPSK) などを用いて変調することで無線伝送路を介して振動触覚情報を伝送する。

一方で、符号化された振動触覚情報を無線ネットワーク上で伝送する場合、無線伝送路品質の変動に起因して受信した触覚情報の品質が低下する。より具体的には、伝送中に伝送路品質が悪化した場合、ビット誤りが振動触覚情報のデコード失敗を招くためである。このようにビット誤りによってデコードが失敗し、情報品質が急激に悪化することを cliff 効果と呼ぶ [8]。cliff 効果を軽減する方法の一つとして振動触覚情報を再送する方法が挙げられる。一方で、再送は振動触覚情報の受信までに要する遅延が増大する。振動触覚情報に対する遅延制約は厳しいため、振動触覚情報の伝送に導入することは困難である。また、伝送中に伝送路品質が改善した場合、振動触覚情報の品質は伝送路品質によらず頭打ちとなる。これは量子化による振動触覚情報の品質低下が無線伝送路品質の改善によらず、復元できないためである。

本稿では、上述した 1)cliff 効果による品質低下、2) 量子化に起因する頭打ちの抑制を解決するため、新たな無線触覚伝送手法を提案する。提案手法では量子化およびエンタロピー符号化を利用せず、離散コサイン変換 (Discrete

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科

Cosine Transform) または離散ウェーブレット変換 (Discrete Wavelet Transform: DWT) を用いて時間領域にある振動触覚情報を周波数領域に変換するとともに、各係数をそのまま送信信号として同相 (In-phase: I) 平面および直交相 (Quadrature: Q) 平面にマッピングして伝送する。このとき、各係数に対して送信前の信号と受信後の信号との間の平均二乗誤差 (Mean Square Error: MSE) が最小になるように送信電力を割り当てることで伝送中に発生するノイズへの耐性を向上させる。本手法を通してエントロピー符号化に起因する著しい品質低下、量子化に起因する品質の頭打ちを抑制すると同時に、無線伝送路品質の改善に応じて振動触覚情報を高品質化できる。

性能評価では、IEEE1918.1.1 が提供する振動触覚情報データセット、数値解析ソフトウェア MATLAB を使用した。既存手法である Haptic Codec を利用した伝送手法と提案手法とを比較した結果から振動触覚情報に要するトラフィックを削減した場合、既存手法に対して提案手法がより高い復元品質を達成できることがわかった。

2. 関連研究

本研究は振動触覚情報に対する符号化手法に関する研究、アナログ変調を利用した伝送手法に関する研究と関連する。

2.1 振動触覚情報に対する符号化手法

振動触覚情報の伝送に要するデータ量を削減するために、周波数変換・量子化・符号化を組み合わせた手法 [1–4] が提案されている。振動触覚情報に対する代表的な符号化手法として IEEE 1918.1.1 で標準化されている Haptic Codec [3, 4] が挙げられる。Haptic Codec は振動触覚情報を Cohen-Daubechies Feauveau (CDF) 9/7 フィルタにしたがう DWT、離散フーリエ変換 (Discrete Fourier Transform: DFT) をそれぞれ用いて周波数変換する。DFT から得られたパワースペクトル、各周波数成分に対する知覚閾値をもとにして各 DWT 係数に対する量子化ビット数を定める。定めた量子化ビット数にしたがって各 DWT 係数を量子化するとともに、ロスレス符号化技術の 1 種である SPIHT を用いて振動触覚情報を符号化する。文献 [1] では、符号化手法 PVC-SLP が提案されている。PVC-SLP は音声信号と振動触覚情報とが類似した特性を持つことから、音声信号の符号化で導入されている線形予測符号化 (Linear Predictive Coding: LPC) をベースとした Sparse Linear Prediction (SLP) を用いて振動触覚情報を符号化する。より具体的には、送信側は SLP を用いて振動触覚情報に対する近似曲線を取得するとともに、近似曲線と元の振動触覚情報との差分情報を取得する。その後、近似曲線に要するフィッティング係数を量子化、差分情報を量子化・エン

トロピー符号化してそれぞれ伝送する。受信側は得られたフィッティング係数から近似曲線を取得するとともに、デコードして得られた差分情報を近似曲線と足し合わせることで元の振動触覚情報を復元する。

上述した符号化手法を用いることで振動触覚情報の伝送に要するトラフィックを削減できる一方で、エントロピー符号化が要因となって無線伝送路品質が悪化した場合におけるデコード失敗を招く。また、無線伝送路品質が改善した場合は、量子化による品質劣化を復元することができず、復元品質の頭打ちが発生する。提案手法においては量子化・エントロピー符号化を利用せず、周波数変換した振動触覚情報をそのまま送信信号として伝送することで量子化・エントロピー符号化に起因する品質劣化を抑制する。

2.2 アナログ変調を利用した伝送手法

無線伝送路を介した画像伝送あるいは映像伝送において cliff 効果および品質の頭打ちを解決する方法としてソフト伝送手法が提案されている。SoftCast [9–11] はソフト伝送方式における代表的な研究である。SoftCast では 1 Group of Picture (GoP) 分のビデオフレームを 3 次元 DCT (3D-DCT) を用いて周波数成分に変換する。得られた周波数成分はそれぞれ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 I 平面、Q 平面に直接マッピングした後伝送する。受信側では Minimum MSE (MMSE) フィルタを用いて雑音を受けた受信信号をデノイズするとともに、3D-IDCT を用いて 1GoP 分のビデオフレームをデコードする。

ソフト伝送手法による性能向上を図るために、画像伝送や映像伝送を対象とした発展手法が設計されている。例えば、文献 [12, 13] においては motion-compensated temporal filter (MCTF) を用いて時系列データ間に存在する冗長な情報を削減している。また、文献 [14, 15] においては coset coding を用いて各係数値を圧縮することで復元品質の向上を図っている。また、文献 [16–18] においてはフェージングが発生するチャネル、Multiple-Input Multiple-Output orthogonal Frequency Division Multiplexing (MIMO-OFDM) チャネル、Non Orthogonal Multiple Access (NOMA) を利用したチャネルにおけるソフト伝送手法が設計されている。また、文献 [19, 20] においては人間の知覚にしたがって周波数係数に対する電力割り当て係数を定めることで体感品質の向上を達成している。文献 [21, 22] では VR を対象とした 360 度映像伝送、Augmented Reality (AR) を対象とした点群伝送におけるソフト伝送手法が設計されている。

提案手法は振動触覚情報の伝送においてソフト伝送手法のアイデアを導入している。本研究で対象とする振動触覚情報は 1 次元信号であることから 1D-DCT または 1D-DWT を導入することで振動触覚情報に含まれる冗長

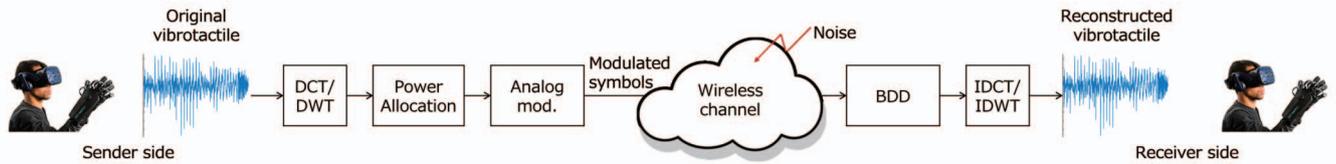


図 1: 提案手法の全体像

な情報を削減する．また，送信前と送信後の振動触覚情報間の MSE を最小化するように各周波数係数に対する電力割り当て係数を定める．受信側ではデノイズフィルタを用いて伝送路で受けた雑音の影響を低減する．一方で，理想的なデノイズフィルタを利用するためには多大な通信オーバーヘッドが必要となる [23]．デノイズに要するオーバーヘッドを削減するために，提案手法では Blind Data Detection (BDD) [24] にしたがうデノイズフィルタを導入する．より具体的には，受信信号に基づいてデノイズフィルタを導出することで通信オーバーヘッドを必要とせず振動触覚情報を復元できる．

3. 提案手法

3.1 全体像

図 1 に提案方式の全体像を示す．送信側では 3 軸加速度センサから得られた 3 次元の振動触覚情報を 1 次元の振動触覚情報に変換する．1 次元の振動触覚情報は遅延許容量に応じてブロックに分割する．具体的には，振動触覚情報を 32 サンプル，64 サンプル，128 サンプル，256 サンプルずつ振動触覚情報が含まれるブロックに分割する．サンプリングレートが 3000 Hz であるとき，許容遅延量はそれぞれ 10.6 ms，21.3 ms，42.6 ms，85.3 ms となる．ブロック内の振動触覚情報に対して DCT または DWT を用いて周波数成分に変換する．得られた周波数成分に対して，送信電力を割り当てる．このとき，元の振動触覚情報と復元後の振動触覚情報との間の MSE が最小化するように電力割当を行う．送信電力を割り当てた DCT 係数または DWT 係数はアナログ変調を用いて送信信号としてそのまま伝送する．ここで，各送信信号は伝送中に加算性白色ガウス雑音 (Additive White Gaussian Noise:AWGN) を受けるものとする．受信側は BDD を用いて送信信号と受信信号間の MSE が最小化するように受信信号から雑音の影響を軽減した後，逆離散コサイン変換 (IDCT) または IDWT を利用して振動触覚情報をデコードする．

3.2 送信側の処理

送信端末は DFT321 を適用して 1 次元化した振動触覚情報に対して DCT または DWT を用いて周波数領域に変換する．周波数領域に変換した各係数はそれぞれの大きさに応じて送信電力を割り当てる．送信電力を割り当てた後，

それぞれの係数を送信信号の IQ 平面にそのままマッピングする．

ここで i 番目の送信信号を x_i とする．各送信信号は i 番目および $i+1$ 番目の係数 s_i, s_{i+1} とそれぞれに対するスケール係数 g_i および g_{i+1} を用いて次のように表現される [9–11]．

$$x_i = g_i s_i + j g_{i+1} s_{i+1}. \quad (1)$$

式 (1) において， j は虚数単位を表す．このとき， i 番目の係数に対するスケール係数 g_i は，平均送信電力 P 下において送信前の係数 s_i と受信後の係数 \hat{s}_i との間の MSE を最小化するように割り当てられる．すなわち，以下の式のように表現される．

$$\min_{\{g_i\}} \text{MSE} = \mathbb{E} \left[(s_i - \hat{s}_i)^2 \right] = \frac{1}{N} \sum_i \frac{\sigma^2 \lambda_i}{g_i^2 \lambda_i + \sigma^2}, \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad \frac{1}{N} \sum_i g_i^2 \lambda_i = P, \quad (3)$$

ここで， λ_i は係数 s_i の電力， σ^2 は無線伝送路における雑音電力， N は係数の総数である．このとき，MSE を最小化可能な g_i は以下の式にしたがうことが知られている．

$$g_i = m \lambda_i^{-1/4}, \quad m = \sqrt{\frac{NP}{\sum_j \lambda_j^{1/2}}}. \quad (4)$$

3.3 受信側の処理

ユーザは無線伝送路を介してアナログ変調された送信信号を受信する．このとき，受信信号は次式にしたがうものとした．

$$y_i = x_i + n_i. \quad (5)$$

ここで， y_i は i 番目の受信信号， n_i は送信信号 x_i に対してかかる加算性白色ガウス雑音 (Additive white Gaussian noise) である．雑音の分散は σ^2 にしたがうものとした．なお，雑音電力はフェージング下におけるチャネルゲインにしたがって正規化されているものと仮定した．受信信号から得られた周波数係数は MMSE フィルタを介して次式のとおりデノイズすることが望ましい [9]．

$$\hat{s}_i = \frac{g_i \lambda_i}{g_i^2 \lambda_i + \sigma^2} \cdot y_i \quad (6)$$

一方で，MMSE フィルタを用いて受信をデノイズする場合，各係数の電力 λ_i をメタデータとして受信する必要が



(a) aluminum-Grid (b) antiVivPad (c) BalticBrown (d) Bamboo Grid



(e) Cork (f) Felt (g) Polyester-Pad (h) Rubber

図 2: 性能評価に利用した振動触覚情報に対応する表面

ある。メタデータの通信に要する性能低下を抑制するために、ユーザは受信信号に対して BDD を導入して雑音の影響を軽減する。

前述の通り、提案手法においては各周波数係数に対して式 (4) にしたがって電力を割り当てる。 $\lambda_i = |s_i|^2$ とすると、式 (4) は次式のように定義できる。

$$g_i = m|s_i|^{-1/2}. \quad (7)$$

このとき、受信信号は次式のようにモデル化できる。

$$y_i = g_i \cdot s_i + n_i = m|s_i|^{-1/2}s_i + n_i. \quad (8)$$

得られた受信信号から送信前の周波数係数を次式のとおりデノイズすることが可能となる。

$$\hat{s}_i = (y_i/m)^2 \cdot \text{sgn}(s_i). \quad (9)$$

ここで、 $\text{sgn}(s_i)$ は正負の符号を意味する。BDD を介してデノイズした受信信号に対して IDCT もしくは IDWT を適用することで振動触覚情報をデコードする。

4. 性能評価

提案手法による効果を明らかにするため、提案手法および既存手法 Haptic Codec を数値解析ソフトウェア MATLAB を用いて実装した。

4.1 評価環境

データセット

性能評価には IEEE1918.1.1 が提供する振動触覚情報のデータセットを使用した。図 2(a)-(h) に IEEE1918.1.1 が提供する振動触覚情報に対応した表面のスナップショットを示す。振動触覚情報のサンプリングレートは 3,000 Hz と定め、4200 サンプル、すなわち 1.4 秒間の振動触覚情報を評価に用いた。

比較手法に関する設定

比較手法 Haptic Codec においては、送信側が各振動触

覚情報を量子化・符号化した後、変調を用いて無線伝送するものとした。符号化後のビット列に対しては二位相偏移変調 (Binary Phase Shift Keying: BPSK)、四位相偏移変調 (Quadrature Phase Shift Keying: QPSK)、16 Quadrature Amplitude Modulation (16QAM) を用いて変調する。受信側では、復調を経て、得られたビット列を Haptic Codec に入力して対応する振動触覚情報を取得する。このとき、ビット列に生じた誤りに起因して振動触覚情報が復号できない場合がある。復号できなかった振動触覚情報は 0 とみなすものとした。

無線通信に関する設定

無線伝送路として AWGN チャネルを想定する。既存手法および提案手法を用いて伝送された変調シンボルは無線伝送路品質 (channel Signal-to-Noise Ratio: cSNR) にしたがう雑音電力 σ^2 に応じて雑音を受けるものとした。

評価指標

評価指標として次式に示す vibrotactile SNR (vSNR) および Peak SNR (PSNR) と HSSIM [25] を使用して受信した振動触覚情報の復元品質を評価した。

$$\text{vSNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{\|s\|^2}{\|\hat{s} - s\|^2} \right), \quad (10)$$

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{N \cdot \text{MAX}^2}{\|\hat{s} - s\|^2} \right) \quad (11)$$

ここで、MAX は振動触覚情報が取りうる最大値であり、既存手法 [1] と同様に 6 と定めた。HSSIM は送信前の振動触覚情報と送信後の振動触覚情報との類似度を示す。値が 1 に近づくほど送信前の振動触覚情報と送信後の振動触覚情報が同じであることを示す。

4.2 無線伝送路品質に対する復元品質

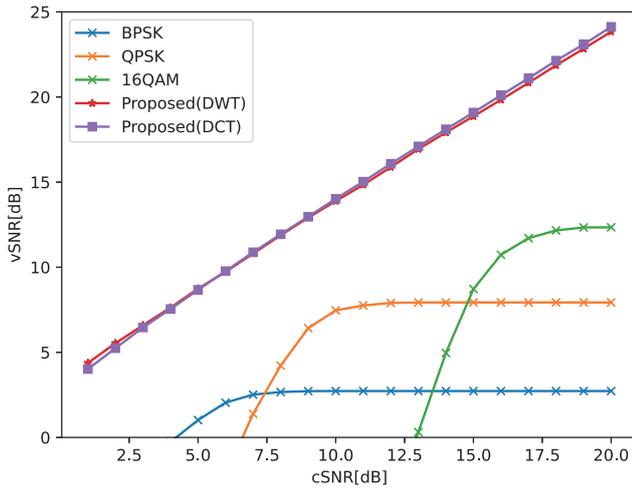
提案手法および既存手法の基本性能を示すため、無線伝送路品質に対応する振動触覚情報の復元品質を評価した。データセットとして “aluminumGrid” を利用した。ここで、提案手法では周波数変換に起因する復元品質への影響を評価するために、振動触覚情報に対して DCT, DWT をそれぞれ利用した場合の復元品質を評価した。

図 3 (a)-(c) に無線伝送路品質に対する振動触覚情報の復元品質を示す。このとき、ブロック長は 256 と定めた。評価結果より、以下の 3 つのことが分かる。

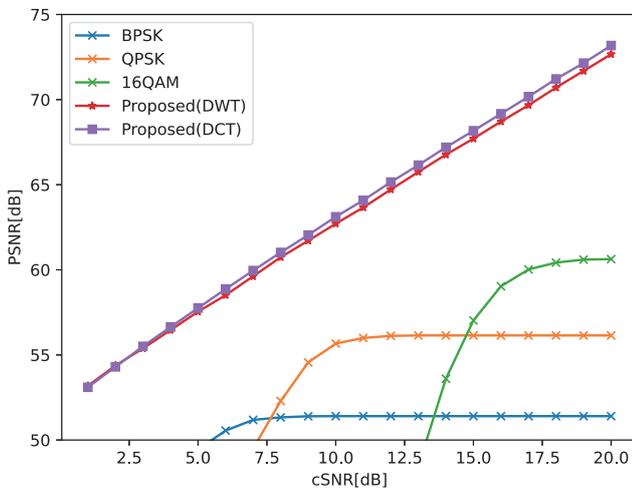
- (1) 提案手法は cSNR に応じて振動触覚情報を復元できること
- (2) Haptic Codec を利用した場合、それぞれの変調技術に応じて cliff 効果、品質の頭打ちが発生していること
- (3) 周波数変換として DWT を用いた場合、DCT を用いた提案手法に対してより高い復元品質が達成できること

4.3 送信シンボル数に対する復元品質

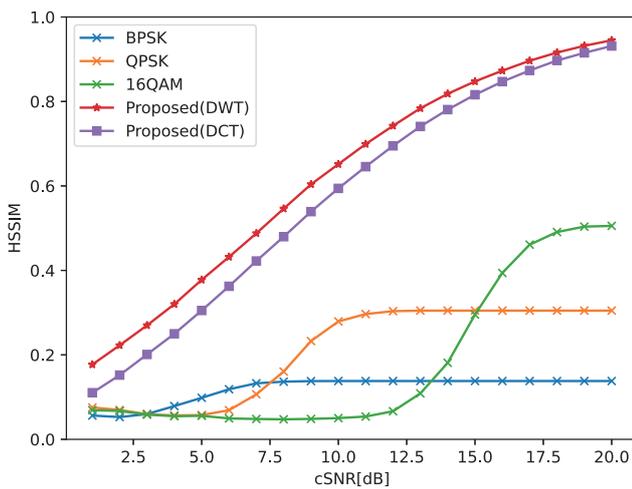
前節では、提案手法が cliff 効果および復元品質の頭打ち



(a) vSNR



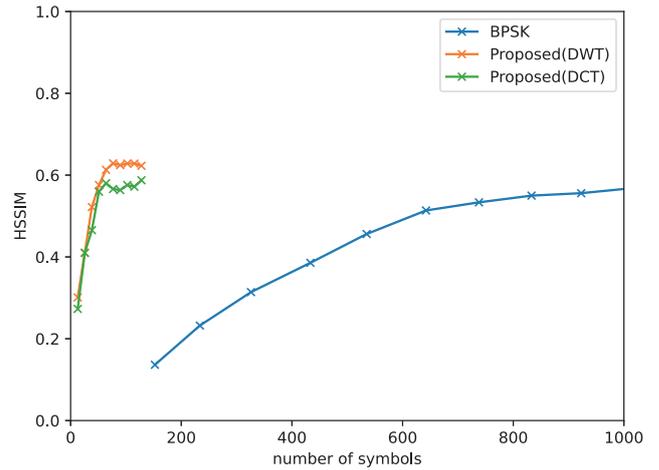
(b) PSNR



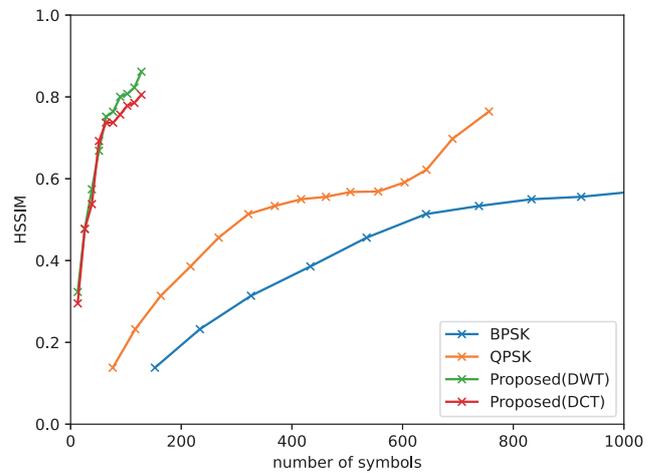
(c) HSSIM

図 3: 無線伝送路品質に対する振動触覚情報の復元品質.

を抑制し、無線伝送路品質の改善に応じて高品質な振動触覚情報を復元できることがわかった。本節では提案手法によるトラヒック削減効果を評価するために、振動触覚情報



(a) cSNR = 10dB



(b) cSNR = 15dB

図 4: 送信シンボル数に対する振動触覚情報の復元品質.

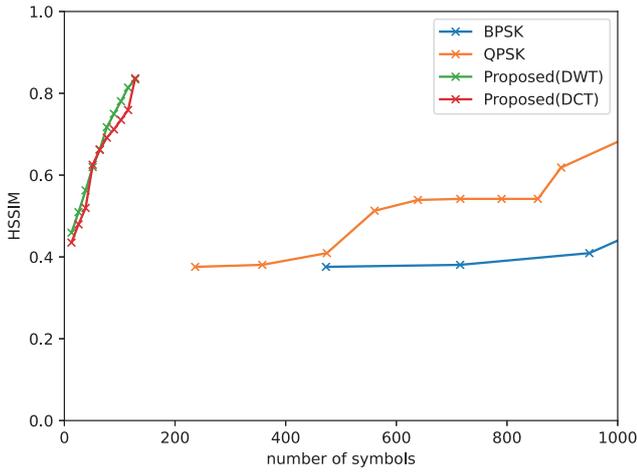
の送信に要するトラヒックに対する復元品質を評価した。前節と同様に、データセットとして“aluminumGrid”を利用した。

図 4 (a)-(b) に 1 ブロックあたりの送信シンボル数に対する復元品質 HSSIM を示す。ここで、ブロック長は 256、無線伝送路品質はそれぞれ 10 dB、15 dB と定めた。評価結果から以下の 3 つのことが分かる。

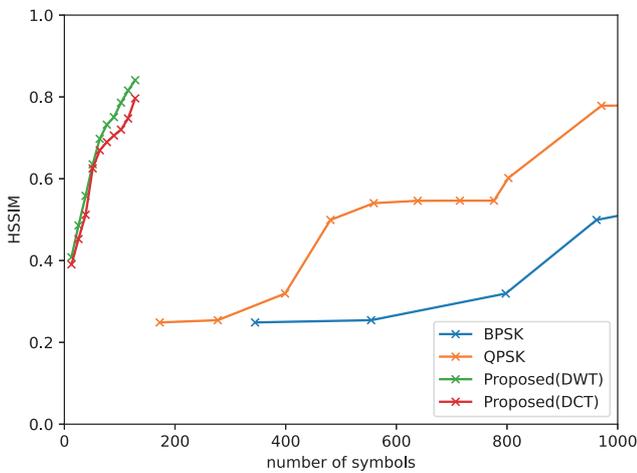
- (1) 既存手法 Haptic Codec に比べて同数の送信シンボル数で高い復元品質を達成できたこと
- (2) 同一の復元品質を達成するために、Haptic Codec はより多くの送信シンボル数が必要となること
- (3) 多くのシンボル数を送信できる場合、DWT を用いた提案手法がより高い復元品質を達成できること

4.4 許容遅延量に対する復元品質

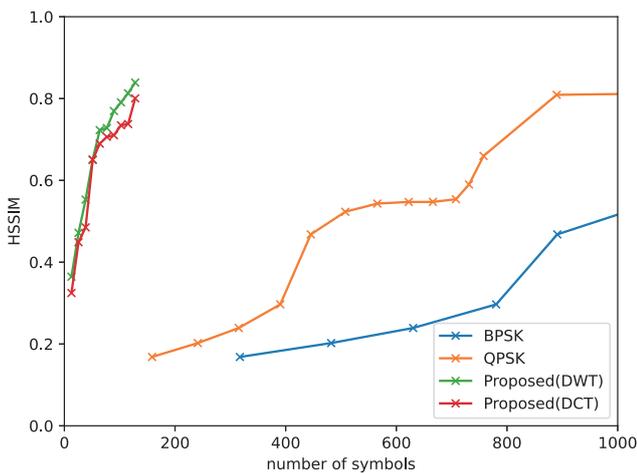
これまで無線伝送路品質およびトラヒックに対する振動触覚情報の復元品質を議論した。本節では振動触覚情報の伝送に対する遅延制約がもたらす影響を評価する。より具



(a) 32 サンプル



(b) 64 サンプル



(c) 128 サンプル

図 5: 許容遅延量に対する振動触覚情報の復元品質.

体的には、ブロックサイズを 32 サンプル、64 サンプル、128 サンプルと定めたとき、復元品質にもたらす影響を評価した。

図 5 (a)-(c) に 1 ブロックあたりの送信シンボル数に対する振動触覚情報の復元品質 HSSIM を示す。ここで、無線

伝送路品質は 15 dB と定めた。評価結果から以下の 3 つのことが分かった。

- (1) 許容遅延量に関わらず、提案手法は既存手法に対して高い復元品質を達成できること
- (2) 許容遅延量が小さくなる、すなわち、ブロックあたりのサンプル数が小さくなるにつれて提案手法による性能改善は大きくなること
- (3) Haptic Codec において、ある復元品質を達成するために必要となるシンボル数は許容遅延量が小さくなるにつれて大きくなること。これはブロックごとに付与されるヘッダ情報のオーバーヘッドに起因すること。

5. おわりに

本稿では振動触覚情報の無線伝送における cliff 効果、復元品質の頭打ちを解決するために、新たな無線伝送手法を提案した。提案手法においては周波数変換した振動触覚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ことで、cliff 効果、復元品質の頭打ちを抑制するとともに、無線伝送路品質に応じて高品質な振動触覚情報を受信できることを可能にした。実際の振動触覚情報を用いた性能評価から、提案手法は無線伝送路品質に応じて高品質化された振動触覚情報を復元できることを明らかにした。また、従来手法 Haptic Codec と比較して、より少ない送信シンボル数で同程度の品質の振動触覚情報を復元できることを示した。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP19H01101, JP22H03582) の支援の下で行った。

参考文献

- [1] R. Hassen, B. Gülecüyüz, and E. Steinbach, "PVC-SLP: perceptual vibrotactile-signal compression based on sparse linear prediction," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol.23, pp.4455-4468, 2021.
- [2] Z. Li, R. Hassen, and Z. Wang, "Autoencoder for vibrotactile signal compression," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp.4290-4294, 2021.
- [3] E. Steinbach, M. Strese, M. Eid, X. Liu, A. Bhardwaj, Q. Liu, MohammadAl-Ja'afreh, T. Mahmoodi, R. Hassen, A. El Saddik, O. Holland, "Haptic codecs for the tactile internet," *Proceedings of the IEEE*, vol.107, no.2, pp.447-470, 2019.
- [4] A. Noll, B. Gülecüyüz, A. Hofmann, and E. Steinbach, "A rate-scalable perceptual wavelet-based vibrotactile codec," *IEEE Haptics Symposium*, pp.854-859, 2020.
- [5] R. Chaudhari, C. Schuwerk, M. Danaei, and E. Steinbach, "Perceptual and bitrate-scalable coding of haptic surface texture signals," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol.9, no.3, pp.462-473, 2014.
- [6] G.A. Gescheider, R.T. Verrillo, and C.L. Van Doren,

- “Prediction of vibrotactile masking functions,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol.72, no.5, pp.1421–1426, 1982.
- [7] A. Said, and W.A. Pearlman, “A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees,” *IEEE Transactions on circuits and systems for video technology*, vol.6, no.3, pp.243–250, 1996.
- [8] S. Kokalj-Filipović, E. Soljanin, and Y. Gao, “Cliff effect suppression through multiple-descriptions with split personality,” *IEEE International Symposium on Information Theory*, pp.948–952, 2011.
- [9] S. Jakubczak, and D. Katabi, “A cross-layer design for scalable mobile video,” *ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.289–300, 2011.
- [10] S. Jakubczak, J.Z. Sun, D. Katabi, and V.K. Goyal, “Performance regimes of uncoded linear communications over AWGN channels,” *45th Annual Conference on Information Sciences and Systems*, pp.1–6, 2011.
- [11] S. Jakubczak, and D. Katabi, “SoftCast: One-size-fits-all wireless video,” *Computer Communication Review*, vol.40, no.4, pp.449–450, 2010.
- [12] X. Fan, R. Xiong, F. Wu, and D. Zhao, “WaveCast: Wavelet based wireless video broadcast using lossy transmission,” *IEEE Visual Communications and Image Processing*, pp.1–6, 2012.
- [13] H. Cui, R. Xiong, C. Luo, Z. Song, and F. Wu, “Denoising and resource allocation in uncoded video transmission,” *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, vol.9, no.1, pp.102–112, 2015.
- [14] X. Fan, F. Wu, D. Zhao, and O.C. Au, “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.
- [15] X. Fan, R. Xiong, D. Zhao, and F. Wu, “Layered soft video broadcast for heterogeneous receivers,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol.25, no.11, pp.1801–1814, 2015.
- [16] H. Cui, D. Liu, Y. Han, and J. Wu, “Robust uncoded video transmission under practical channel estimation,” *IEEE Global Communications Conference*, pp.1–6, 2016.
- [17] Z. Zhang, D. Liu, X. Ma, and X. Wang, “ECast: an enhanced video transmission design for wireless multicast systems over fading channels,” *IEEE Systems Journal*, vol.11, no.4, pp.2566–2577, 2015.
- [18] J. Wu, B. Tan, J. Wu, and M. Wang, “Video multicast: Integrating scalability of soft video delivery systems into NOMA,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol.8, no.6, pp.1722–1726, 2019.
- [19] 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.
- [20] H. Hadizadeh, “Saliency-guided wireless transmission of still images using SoftCast,” *International Symposium on Telecommunications*, pp.506–509, 2017.
- [21] L. Yujun, T. Fujihashi, S. Saruwatari, and T. Watanabe, “360Cast+: Viewport adaptive soft delivery for 360-degree videos,” *IEEE Access*, vol.9, pp.52684–52697, 2021.
- [22] T. Fujihashi, T. Koike-Akino, T. Watanabe, and P.V. Orlik, “HoloCast+: hybrid digital-analog transmission for graceful point cloud delivery with graph fourier transform,” *IEEE Transactions on Multimedia*, vol.24, pp.2179–2191, 2021.
- [23] T. Fujihashi, T. Koike-Akino, T. Watanabe, and P.V. Orlik, “High-quality soft video delivery with GMRF-based overhead reduction,” *IEEE Transactions on Multimedia*, vol.20, no.2, pp.473–483, 2018.
- [24] T. Zhang, and S. Mao, “Metadata reduction for soft video delivery,” *IEEE Networking Letters*, vol.1, no.2, pp.84–88, 2019.
- [25] R. Hassen, and E. Steinbach, “HSSIM: An objective haptic quality assessment measure for force-feedback signals,” *Tenth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)*, pp.1–6, 2018.