

触覚情報の高品質無線伝送に向けた基礎的検討

北村 翔吾[†] 藤橋 卓也[‡] 猿渡 俊介[‡] 渡辺 尚[‡]

[†]大阪大学工学部 [‡]大阪大学大学院情報科学研究科

1 はじめに

ネットワーク技術の発展とともに高精細映像と対応する音情報を活用する Virtual Reality (VR) に対する需要が娯楽, 教育, 医療などの分野において高まっている。多様な分野への VR サービス展開が進むにつれて, 映像情報や音情報から得られる視覚情報・聴覚情報だけでなく, 触覚情報・味覚情報・嗅覚情報に挙げられる Multiple Sensorial Media (MulsemMedia) を効率的に圧縮・伝送する技術が注目を集めている。本稿では MulsemMedia の一種である触覚情報, 特に振動触覚情報の無線伝送についてその課題と高品質化に向けた伝送手法について検討する。

2 振動触覚情報の圧縮とその課題

広義の触覚は生理学における体性感覚と同義である。体性感覚は体の表面で感じる皮膚感覚 (cutaneous sensation) と, 体の深部の筋肉・関節などで感じられる深部感覚 (deep sensory) とに分けられる。工学において触覚は皮膚感覚, 力覚は深部感覚で感じる力の知覚を指している。皮膚感覚, すなわち, 狭義の触覚は大きく圧覚・温覚・冷覚・痛覚に分けられる。圧覚とは皮膚表面に直接接しているものの形状・表面の材質, 動きを機械的受容器であるメルケル細胞によって知覚できる感覚である。

遠隔や VR 空間で接触しているものの表面の材質をユーザに伝達するための情報として振動触覚情報 (Vibrotactile) が広く用いられている。あるものに対する振動触覚情報は 3 軸加速度センサを用いて, ものの表面を往復するなどして取得される。それぞれのものに対応する振動情報は遠隔あるいは VR 空間でユーザがものに触れたとき, 有線ネットワークまたは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, 触覚ディスプレイ上で振動として再現される。このとき, 振動触覚情報は 3 次元の時系列データで構成されている一方で, 多くの触覚ディスプレイ上で出力可能な振動触覚情報は 1 次元の時系列データである。3 次元の時系列データを 1 次元の時系列データに変換するために discrete Fourier transform 3-to-1 (DFT321) [1] を利用する。DFT321 は 3 軸の時系列データを 1 軸の時系列データに変換するとき, 各次元の時系列データに DFT を用いて異なる基底に変換して和を取ることで各軸間の干渉に起因する振動触覚情報の劣化を抑制する。

振動触覚情報は 1 軸の時系列データであるが, 必要となるサンプリングレートが 1000 Hz を超えることから, 振動触覚情報の伝送に要するトラヒックの削減が重要となる。IEEE 1918.1.1 では振動触覚情報に対する符号化手法として Haptic Codec [2] が規定されている。Haptic Codec の全体像を図 2 に示す。Haptic Codec では振動触覚情報を Cohen-Daubechies Feauveau (CDF) 9/7 フィルタにしたがう 1 次元離散ウェーブレット変換 (discrete Wavelet transform: DWT) を用いて時系列領域から周波数領域に変換する。このとき, 振動触覚情報を活用するアプリケーション側の許容遅延量に応じて DWT を適用する時系列データ数および DWT のレベルを設定する。例えば, 振動触覚情報のサンプリングレートが 2800Hz, 許容遅延量が約 11 ms であるときは, レベル 4 の DWT を用いて 32 サンプルずつを周波数領域に変換する。また, Haptic Codec では, 振動触覚情報に対して DFT を用いて DWT とは異なる直交基底に変換する。DFT から得られた振動触覚情報のパワースペクトルおよび各周波数成分に対する振動触覚情報の感度 [3] をもとにして, 各ウェーブレットバンドに対する量子化ビット数を適応的に決定する。その後, 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 (Set Partitioning In Hierarchical Trees) を用いて振動触覚情報をエントロピー符号化する。その後, エントロピー符号化後に得られたビット列に対してはチャネル符号化, Binary Phase-Shift Keying (BPSK) 等に挙げられる変調技術を用いて振動触覚情報を無線伝送する。受信した振動触覚情報に対しては逆 SPIHT を用いてエントロピー復号するとともに, 量子化された DWT 係数に対して逆量子化・逆 DWT (IDWT) を適用することでユーザは振動触覚情報を取得できる。

Haptic Codec は量子化およびエントロピー符号化を利用することによって振動触覚情報内に含まれる冗長な情報を削減して伝送に要するトラヒックを軽減する。一方で, 無線伝送路を介して Haptic Codec を用いて符号化した振動触覚情報を伝送する場合, 無線伝送路品質の変動に

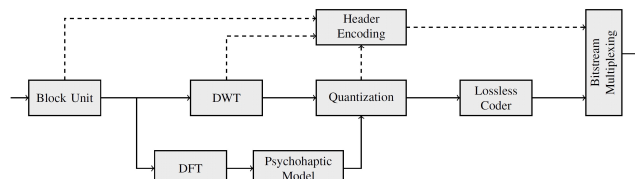


図 2: Haptic Codec の全体像 [2]

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。ビット誤りに起因するデコード失敗の影響を軽減する 1 方法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, 再送は受信に要する遅延が増大すると同時に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。

3 提案手法

本稿では振動触覚情報の無線伝送において, 無線伝送路品質の変動に起因した品質低下を抑制するために, 新たな無線伝送手法を提案する。より具体的には, 1) 無線伝送路品質の悪化に起因する著しい品質劣化の抑制, 2) 無線伝送路品質の改善時に生じる品質の頭打ちの抑制を同時達成する振動触覚情報のアナログ伝送手法を提案する。

3.1 全体像

図 1 に提案方式の全体像を示す。振動触覚情報に対して離散コサイン変換 (discrete cosine transform: 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平均二乗誤差 (Mean Square Error: 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 Minimum Mean Square Error (MMSE) フィルタ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 [5]。

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

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。

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

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

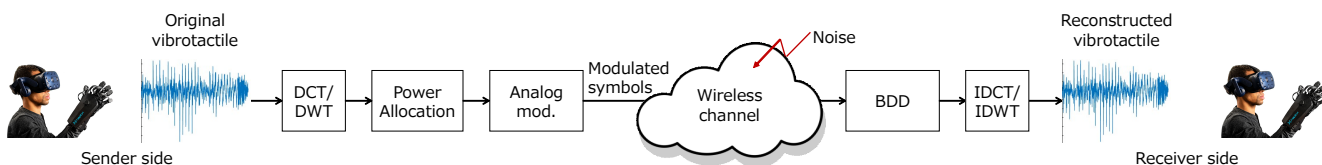


図 1: 提案手法の全体像

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。ユーザは受信信号に対して Blind Data Detection (BDD) を導入して雑音の影響を軽減する。

$$\hat{s}_i = (y_i/m)^2 \cdot \text{sgn}(s_i). \quad (6)$$

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

4.1 評価環境

提案手法の有効性を確認するために、MATLAB によるシミュレーションを用いてトラヒックに対する振動触覚情報の復元品質、無線伝送路品質に対する振動触覚情報の復元品質を評価した。

無線伝送路品質: 無線伝送路品質として channel Signal-to-Noise Ratio (cSNR) を定めた。無線伝送路で発生する雑音の分散は cSNR (dB) にしたがって定まるものとした。

比較手法: 比較手法として IEEE 1918.1.1 が規定する Haptic Codec [2] による振動触覚情報符号化技術を用いた。符号化後のビット列に対して BPSK を用いて変調するものとした。BPSK は 1 送信シンボルあたり 1 ビットを割り当てる。BPSK は無線伝送中の雑音に対して耐性を持つことから、cSNR 10 dB 以上はビット誤りが起きないものとした。

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) 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。vSNR および PSNR は次式にしたがう。

$$\text{vSNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{\|s\|^2}{\|\hat{s} - s\|^2} \right), \quad \text{PSNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{N \cdot \text{MAX}^2}{\|\hat{s} - s\|^2} \right) \quad (7)$$

ここで、MAX は振動触覚情報が取りうる最大値であり、既存研究 [4] にしたがって 6 と定めた。

データセット: 評価に用いたデータセットとして IEEE 1918.1.1 が提供する振動触覚情報データセットのうち、“Ispike.Probe.-.aluminumGrid.-.fast” を使用した。振動触覚情報のサンプリングレートは 3,000 Hz である。このうち、無線伝送路を介して 2,100 サンプルを送受信するものとした。

4.2 送信シンボル数に対する復元品質

図 3 および図 4 に送信シンボル数に対する振動触覚情報の復元品質を示す。図に示された評価結果は、cSNR 及び PSNR を 10 回計測した平均を用いている。比較手法となる Haptic Codec では全ウェーブレットバンドに対する量子化ビット数を制御して符号化後のビット列に対して BPSK を用いて変調した。提案手法では 2,100 サンプルに対して DCT もしくは DWT を適用して 2 係数ずつを 1 送信シンボルとして変調した。このとき、提案手法では高周波成分を送信しないことによって送信シンボル数を削減するものとした。送信シンボルは無線伝送路品質 cSNR が 10 dB、20 dB である無線伝送路を介して送受信するものとした。評価結果から、以下の 5 つのことが分かる。

- Haptic Codec と比較して提案手法はより少ない送信シンボル数、すなわち、可用帯域下において同程度の品質の振動触覚情報を再現できること。
- 復元品質指標である vSNR、PSNR の双方において、提案手法は Haptic Codec と比較して送信シンボル数に関わらず高い復元品質を達成できること。
- Haptic Codec は多大なシンボル数を必要とする一方で、その復元品質は頭打ちになること。
- 提案手法は無線伝送路品質が高くなるにつれて、その復元品質が向上すること。
- 離散コサイン変換を利用した提案手法は、離散ウェーブレット変換を利用した提案手法と比較して高い復元品質を達成できること。

4.3 データセットによる影響

前節では、ある振動触覚情報における Haptic Codec および提案手法の復元品質を評価した。本節では、異なるデータセット、すなわち、異なる材質の振動触覚情報を対象として Haptic Codec および提案手法の復元品質を評価する。図 5 に振動触覚データセットのうち、“Ispike.Probe.-.aluminumGrid.-.fast”, “Ispike.Probe.-.antiVivPad.-.fast”, “Ispike.Probe.-.BalticBrown.-.medium”, “Ispike.Probe.-.bamboo.-.fast”, “Ispike.Probe.-.cork.-.fast”, “Ispike.Probe.-.felt.-.fast”, “Ispike.Probe.-.polyesterPad.-.fast”, “Ispike.Probe.-.rubber.-.fast”, “Ispike.Probe.-.antiVivPad.-.slower”, “Ispike.Probe.-.cork.-.slow” を利用した際の、送信シンボル数に対する振動触覚情報の平均復元品質を示す。

評価結果より、異なるデータセットにおいても、提案手法は送信シンボル数が同数下において Haptic Codec と比較して復元品質が向上することが分かった。

5 おわりに

本研究では無線伝送路品質の変動に起因する品質低下を抑制する振動触覚情報向けの無線伝送手法を提案した。評価結果から提案手法は既存手法と比較して限られた帯域下において高い vSNR 及び PSNR を実現することが分かった。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP20K19783,JP19H01101) の支援の下で行った。

参考文献

- [1] Katherine J. Kuchenbecker, William McMahan, Nils Landin, Joseph M. Romano, “Dimensional reduction of high-frequency accelerations for haptic rendering,” 2010.
- [2] Andreas Noll, Basak Gulecyuz, Alexander Hofmann, and Eckehard Steinbach, “A Rate-scalable Perceptual Wavelet-based Vibrotactile Codec,” IEEE Haptics Symposium, pp. 854-859, 2020.
- [3] Rahul Chaudhari, Clemens Schuwerk, Mojtaba Danaei, and Eckehard 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.
- [4] Rania Hassen, Basak Gulecyuz, and Eckehard Steinbach, “PVC-SLP: Perceptual Vibrotactile-Signal Compression based-on Sparse Linear Prediction,” IEEE Transactions on Multimedia, vol.pp. no.99, 2020 (in press).
- [5] Szymon Jakubczak, Dina Katabi, “A Cross-Layer Desing for Scalable Mobile Video,” Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 289-300, 2011.

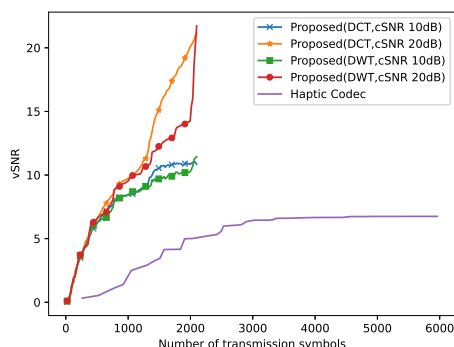


図 3: 送信シンボル数に対する vSNR

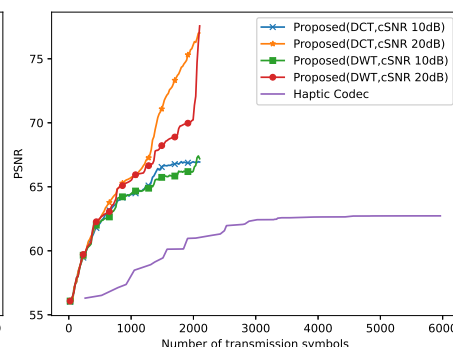


図 4: 送信シンボル数に対する PSNR

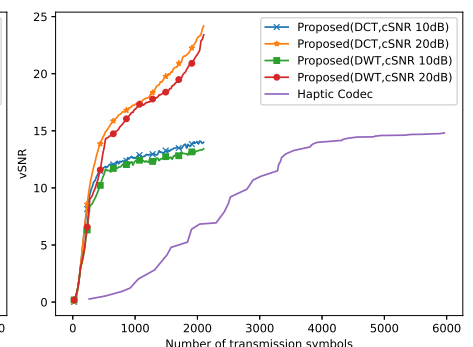


図 5: 異なるデータセットにおける vSNR