5Y-08

複数触覚情報の高品質無線伝送に向けた実験的検討

小椋 登夢 † 北村 翔吾 ‡ 藤橋 卓也 ‡ 木崎 一廣 ‡ 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

視覚や聴覚に特化した Virtual Reality (VR) は娯楽や教育，医療など多様な分野において活用されている．より高度なユーザー体験を提供するために映像情報や音情報に加えて，触覚情報を初めとする感覚情報を利用することが考えられている．本稿では複数の加速度センサを用いて取得した多次元振動触覚情報の高品質無線伝送について検討する．

2 関連研究

本研究は振動触覚情報の取得方法に関する研究，振動触覚情報の符号化手法に関する研究，アナログ変調を利用した無線伝送手法に関する研究と関連する．

2.1 振動触覚情報の取得方法

触覚情報を表現するフォーマットの 1 つとして振動触覚情報が広く用いられている．振動触覚情報は指などである物体の表面を触ったときに受ける振動を表現している．文献 [1, 2] では指先に装着したポリフッ化ビニリデンを素材とするフィルム型のセンサを用いて振動触覚情報を取得する．一方で，ポリフッ化ビニリデンは高価であることから，文献 [3] では，市販されている 3 軸加速度センサならびにデータ収集デバイスを利用して低コストで振動触覚情報を取得する手法が提案されている．3 軸加速度センサからはそれぞれの軸に対する振動の大きさを取得することができるが，人間は振動の方向を認識できない．そのため，得られた 3 軸加速度情報に対して discrete Fourier transform 3-to-1 (DFT321) を用いることで表面を触ったときに受けた振動の大きさを取得する．

本研究では複数の 3 軸加速度センサを用いて複数の指から得られる振動触覚情報を同時に取得する手法を実装した．文献 [3] では安価に振動触覚情報を取得する手法が設計されている一方で，3 軸加速度センサ 1 つのみを接続することが前提とされている．本研究ではマイクロコンピュータ STM32 を用いて複数の 3 軸加速度センサを同時に接続するとともに複数の指から得られる振動触覚情報を同時に取得する．得られた振動触覚情報に対しては 2 次元信号に対する周波数変換技術，電力割当，アナログ変調からなる提案手法を用いて多次元の振動触覚情報を無線伝送する．

2.2 振動触覚情報に対する符号化手法

振動触覚情報の符号化手法の 1 つとして Perceptual Vibrotactile-Signal Compression Based-on Sparse Linear Prediction (PVC-SLP)[4] 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 SLP を用いて振動触覚情報を符号化する．

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ヒ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．

2.3 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 [5] はソフト伝送方式における代表的な研究である．SoftCast では 1Group of Picture (GoP) 分のビデオフレームを 3 次元離散コサイン変換 (3D discrete cosine transform: 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 IQ 平面に直接マッピングした後伝送する．受信側では Minimum Mean Square Error (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，逆 3 次元離散コサイン変換 (3D-IDCT) を用いて 1GoP 分のビデオフレームをデコードする．

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複数の指から得られた 2 次元信号であることから 2D-DCT または 2 次元離散ウェーブレット変換 (2D discrete Wavelet transform: 2D-DWT) を導入することで振動触覚情報に含まれる冗長な情報を削減する．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ヘッドが必要となる [6]．デノイズに要するオーバヘッドを削減するために，提案手法では Blind Data Detection (BDD) [7] 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

本稿では複数の指から得られた多次元の振動触覚情報を効率的に無線伝送するための新たな手法を提案する．

3.1 全体像

図 1 に提案手法の全体像を示す．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．各センサから得られたブロック内の振動触覚情報に対して DFT321 を適用する．センサ軸と時間軸の 2 次元情報に対して，2D-DCT または Cohen-Daubechies Feauveau (CDF) 9/7 フィルタにしたがう 2D-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，もとの振動触覚情報と復元後の振動触覚情報との間の平均 2 乗誤差 (Mean Square Error: MSE) が最小化するように電力を割り当てる．送信電力を割り当てた 2D-DCT 係数または 2D-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 MMSE フィルタを用いて送信信号と受信信号感の 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 2 次元離散コサイン変換 (2D-IDCT) または逆 2 次元ウェーブレット変換 (2D-IDWT) を利用して振動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 次元化した複数の振動触覚情報に対して 2D-DCT または 2D-DWT を用いて周波数領域に変換する．得られた係数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リング係数 g_i および g_{i+1} を用いて $x_i = g_i s_i + \jmath g_{i+1} s_{i+1}$ のように表現される [5]．

ここで，$\jmath$ 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リング係数 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．

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

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

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 s_i 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．

$$g_i = m\lambda_i^{-1/4}, \qquad m = \sqrt{\frac{NP}{\sum_j \lambda_j^{1/2}}}. \tag{3}$$

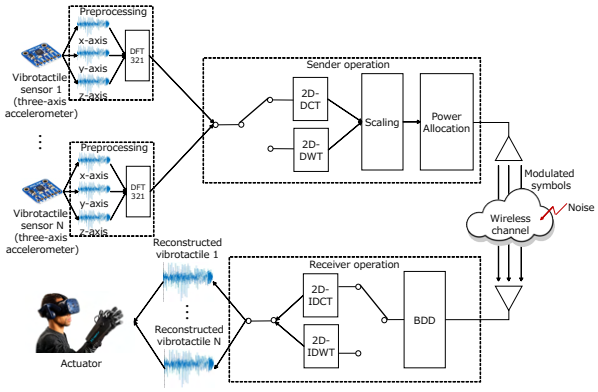

図 1: 提案手法の全体像

Copyright ©2023 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.

表 1: 実験機器

名称	機能
ADXL335	3 軸加速度センサ
STM32	マイクロコンピュータ. 複数の振動触覚情報を同期して取得
GALLERIA ZA9C-R38	STM32 を制御

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 $y_i = x_i + n_i$ にしたがう．

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 AWGN 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 BDD を導入して雑音の影響を軽減する．

$$\hat{s}_i = (y_i/m)^2 \cdot \mathrm{sgn}(s_i). \tag{4}$$

ここで，$\mathrm{sgn}(s_i)$ 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 2D-IDCT もしくは 2D-IDWT を適用することで振動触覚情報をデコードする．

4 実験環境

4.1 実験機器構成

これまで 3 軸加速度センサを用いて振動触覚情報を取得する場合，単一の 3 軸加速度センサを用いて指 1 本に対応する振動触覚情報を取得する方法が検討されていた [3]．本研究では複数の 3 軸加速度センサを用いて複数の指から同時に振動触覚情報を得るための実験環境を構築した．図 2 に実験環境の全体像を示す．表 1 に使用した実験機器を列挙した．振動触覚情報を取得する 3 軸加速度センサとして ADXL335 5 個，センサ間の同期ならびにセンサ値の取得のためのマイクロコンピュータとして STM32 2 台，STM32 を制御するための PC として GALLERIA ZA9C-R38 を用意した．加速度センサそれぞれのカットオフ周波数を変更するために ADXL335 の x 軸，y 軸，z 軸に対応するキャパシタを 10nF に変更した．また，STM32 1 台あたりに接続可能なセンサ数は 3 個であったため，1 台目の STM32 に ADXL335 3 個，2 台目の STM32 に ADXL335 2 個をそれぞれフラットケーブルで接続した．GALLERIA ZA9C-R38 と各マイクロコンピュータ STM32 とは USB ケーブルを用いて接続する．5 本の指の振動触覚情報を同時に得るために，ビスコース・レーヨンを素材とする手袋を用意するとともに，5 個の ADXL335 を右手の手袋の爪部分にそれぞれ設置した．

4.2 振動触覚情報の取得

図 3 に振動触覚情報を取得する対象とした合成革の表面を示す．3 軸加速度センサのサンプリングレートは 3000Hz に設定した．3 軸加速度センサは静止時においてオフセット値が含まれているため，オフセット値を較正するために 2 秒間静止した状態で振動触覚情報を取得した．オフセット値を取得した後，評価用データとして 2 秒間対象の表面を触った．評価用データに含まれるオフセットを除去するために 2 秒間の静止時に得られた加速度センサ値の平均値を取得して評価用データの加速度センサ値から引いた．最後に，得られた振動触覚情報に対して DFT321 を適用して振動の大きさを取得した．

5 性能評価

5.1 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無線伝送路品質に対する振動触覚情報の復元品質を 2 つの品質指標を用いて評価した．

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 AWGN の分散は cSNR (dB) にしたがって定まるものとした．

評価指標: 評価指標として vibrotactile SNR (vSNR) [8] および HSSIM [9] を使用して受信振動触覚情報の復元品質を評価した．vSNR は次式にしたがう．ここで，原信号となる振動触覚情報を $\boldsymbol{s}$，受信した振動触覚情報を $\hat{\boldsymbol{s}}$ とした．

$$\mathrm{vSNR} = 10\log_{10}\left(\frac{\|\boldsymbol{s}\|^2}{\|\hat{\boldsymbol{s}} - \boldsymbol{s}\|^2}\right) \tag{5}$$

HSSIM は振動触覚情報の類似度を示す指標である．0 から 1 の値を取り，1 に近いほど受信した振動触覚情報が原信号となる振動触覚情報と類似していることを表す．HSSIM を取得するパラメータは文献 [9] にしたがった．

5.2 比較手法

比較手法として，各指の振動触覚情報に対して 1D-DCT，1D-DWT を用いる手法を用意した．より具体的には，それぞれの 3 軸加速度センサごとに 1D-DCT または 1D-DWT を適用して周波数領域に変換する．得られた周波数係数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．受信側は BDD を適用した受信信号に対して 1D-DCT または 1D-DWT を適用することで振動触覚情報をデコードする．

5.3 復元品質

図 4 および図 5 に無線伝送路品質に対する復元品質を示す．ここで，ブロック長は 32 サンプルと定めた．また，評価結果は 100 回の計測から得られた平均値を用いた．無線伝送路品質は 1dB から 20dB まで 1dB 刻みで変化させるものとした．評価結果から以下のことが分かる．

- 評価指標 vSNR においては，無線伝送路品質が高くなるにつれて 2D-DCT や 2D-DWT を適用した手法が 1D-DCT や 1D-DWT を適用した手法より優位であること．
- 評価指標 HSSIM においては，無線伝送路品質が高くなるにつれて 1D-DWT を適用した手法が明らかに劣位であること．
- どちらの評価指標においても 2D-DCT を適用する手法が最も高性能であること．

6 おわりに

本稿では複数振動触覚情報の無線伝送手法を提案した．2D-DCT や 2D-DWT を適用する手法が各指に対して 1D-DCT や 1D-DWT を適用する手法に比べて高性能であることを示した．

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] Y. Tanaka, D.P. Nguyen, T. Fukuda, and A. Sano, “Wearable skin vibration sensor using a pvdf film,” 2015 IEEE World Haptics Conference (WHC), pp.146–151IEEE, 2015.

[2] Y. Tanaka, T. Yoshida, and A. Sano, “Practical utility of a wearable skin vibration sensor using a pvdf film,” 2017 IEEE World Haptics Conference (WHC), pp.623–628IEEE, 2017.

[3] J. Kirsch, A. Noll, M. Strese, Q. Liu, and E. Steinbach, “A low-cost acquisition, display, and evaluation setup for tactile codec development,” IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE), pp.1–6, 2018.

[4] R. Hassen, B. Gülecyüz, and E. Steinbach, “PVC-SLP: perceptual vibrotactile-signal compression based-on sparse linear prediction,” IEEE Transactions on Multimedia, vol.23, pp.4455-4468, 2021.

[5] 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.

[6] 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.

[7] T. Zhang, and S. Mao, “Metadata reduction for soft video delivery,” IEEE Networking Letters, vol.1, no.2, pp.84–88, 2019.

[8] 北村翔吾，藤橋卓也，渡辺尚，猿渡俊介他，“触覚情報の高品質無線伝送に向けた基礎的検討,” 第 84 回全国大会講演論文集，vol.2022，no.1，pp.255–256，2022.

[9] 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.

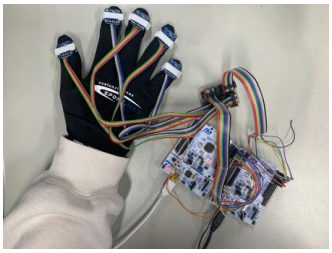

図 2: 実験環境

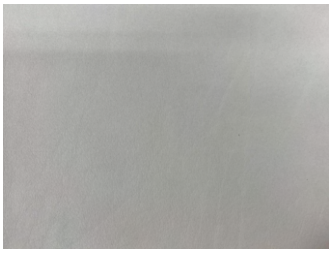

図 3: 合成革表面

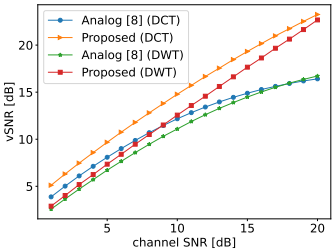

図 4: 通信路品質に対する vSNR

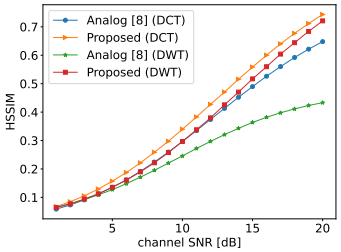

図 5: 通信路品質に対する HSSIM

Copyright ©2023 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.