

先端科学技術研究科 修士論文要旨

所属研究室 (主指導教員)	ユビキタスコンピューティングシステム (安本 慶一 (教授))		
学籍番号	2411141	提出日	令和 8年 1月 19日
学生氏名	柴田 洋希		
論文題目	テーブルトップインターフェースのFPGA実装のための振動ベースジェスチャ認識の軽量化		

要旨

近年、スマートホームの普及に伴い、家具や壁などの既存の環境表面を入力インターフェースとして活用するテーブルトップUIが注目されている。これらのUIは、生活空間の美観を損なうことなく直感的な操作を実現できる点で有望である。このようなテーブルトップUIに関する研究の一例として、先行研究ではテーブル天板裏に設置した複数の振動センサを用いて、ユーザのスワイプ操作を認識するシステム「Smatable」を提案した。Smatableは、振動が素材内部を伝播する特性を利用することで、カメラやマイクを用いない非可視かつ低プライバシー侵害なインターフェースを実現している。一方で、Smatableを実環境の家具に組み込み、常時利用可能なインターフェースとして運用するためには、低遅延かつ低消費電力での処理が不可欠である。しかし、従来の手法では、取得した振動信号に対して短時間フーリエ変換(STFT)による時間周波数画像化を行い、大規模な2次元畳み込みニューラルネットワーク(2D-CNN)を用いて認識を行っていた。この構成により高い認識精度(約99%)を達成している一方で、前処理および推論に要する計算コストが大きく、総推論時間は約365msに達しており、FPGAなどの低リソースな組込みデバイスへの直接実装が困難であるという課題があった。

そこで本研究では、振動ジェスチャ認識を対象として、FPGA実装を見据えた前処理および認識モデルの軽量化を行う。具体的には、前処理に伴う計算処理を削減するために、STFTによる画像化処理を撤廃し、振動センサから取得した生波形を直接入力として扱う。さらに、メモリ使用量を削減するために入力波形に対して1/10へのダウンサンプリングを適用し、識別に必要な時間的特徴を保持したまま入力次元を大幅に削減した。また、限られたハードウェア資源下でも高精度な認識を実現するために、振動データの時間構造に適した軽量な1次元畳み込みニューラルネットワーク(1D-CNN)およびDepthwise畳み込みを用いた1D-Separable CNNを設計した。これらのモデルは、従来の2D-CNNと比較してパラメータ数および演算量を大幅に削減しつつ、振動ジェスチャに固有の特徴を効率的に抽出できる構造となっている。

提案手法がFPGA実装に適しているかを明らかにするため、認識精度に加えて推論レイテンシ、モデルサイズ、および消費エネルギーを指標として評価実験を行った。先行研究で作成された3名の被験者および3種類のテーブルを用いたデータセットを用いた実験の結果、提案手法は個人内評価(Per-Subject)において従来手法と同等の高い正解率(0.996)を達成した。また、推論レイテンシは約6.83msと、従来手法(約365ms)と比較して約1/50に短縮された。さらに、モデルパラメータ数は従来の2D-CNN(約3.69億)から最大で216まで削減され、FPGA実装時の推定消費エネルギーは1推論あたり1.2mJ以下であることを確認した。これらの結果から、提案手法は低リソースなエッジデバイスやFPGA上の実装に適しており、常時利用可能なスマート家具インターフェースの実現に貢献できることを示した。