筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

アクティブ音響センシングを用いた
触れ方の認識

大野 誠

指導教員 志築 文太郎 三末 和男 田中 二郎

2013 年 2 月

概要

これまでに，物体に対する触れ方を認識し，HCI への応用を試みる研究が数多く行われている．その研究の多くは大量のセンサや特殊なハードウェア構成を必要とするため，複雑もしくは高コストである．本研究では，アクティブ音響センシングにより，手軽かつ安価に物体の触れ方を認識する手法を示す．本手法の特徴は 1 組のスピーカとマイクを物体に貼り付けるだけで，物体に対する触れ方を認識可能とする点にある．机，食器，玩具，携帯情報端末に対して本手法を適用し，触れ方の認識を行った．また，携帯情報端末に適用したシステムにおいて，7 種類の触れ方における認識精度の評価を行った．

目 次

図目次

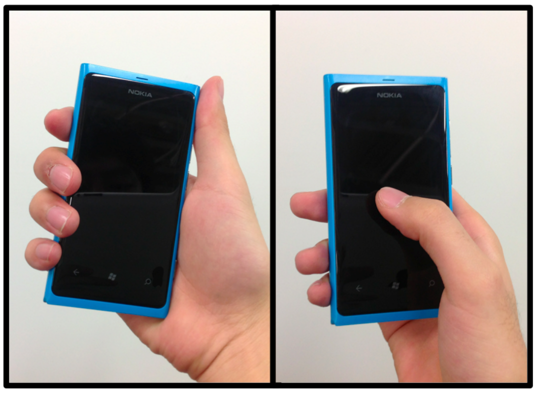
第1章　はじめに

本章では，研究の背景と目的について述べ，最後に本論文の構成を述べる．

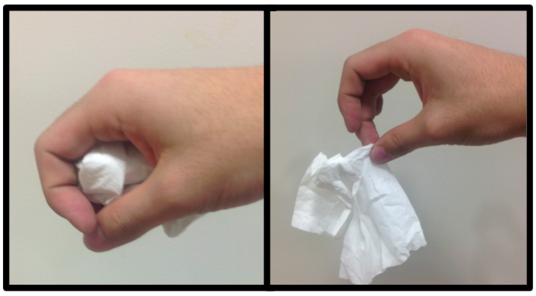
1.1　背景

物体に対する触れ方（把持に伴うものも含む）が場合に応じて異なることに着目し，これを認識して HCI への応用を試みる研究が数多く行われている．例えば携帯情報端末（以降，端末）を使用する際，電話することを目的とした場合と，メール作成を目的とした場合によって端末の触れ方（この場合，持ち方）は異なる．この例における触れ方の差は主に操作の目的に起因するが，その他にも様々な要素が触れ方に影響を与える．Wimmer らは物体に対する触れ方に影響する要素を，Goal, Relationship, Anatomy, Setting, Properties の 5 種類に分類している [Wim11]（図 1.1.1）．これらの要素は対象の触れ方が決定されるまでに至るコンテキストを表している．ユーザの置かれている暗黙的な状況をコンピュータが理解することにより，行動を支援するコンテキストアウェアネスについての研究が数多く行われているが，触れ方に含まれるコンテキストについても同様の応用が期待される．また，触れる際に意識的に力を込める等の，明示的な触れ方の変更による操作も可能であるため，触れ方の認識はさまざまな面において HCI の発展に寄与するものと考えられる．例えば，Song らの研究では静電容量センサを用いてペンの触れ方を認識可能なタッチペンを実装している [SBG+11]．これは，スケッチ技法によって異なるペンの触れ方を，それらの技法に対応したペイントツールに割り当てている．そのため，ユーザはペイント操作を行う際に，実世界に近いペンの使用感を得られる．

一方で，コンピュータに物体の触れ方を認識させることは難しく，様々な課題を抱えている．その 1 つとしてセンシングの困難さがある．手の接触を認識する技術は，タッチパネルの普及により，容易に使える．しかし物体の触れ方を認識する既存手法は大量のセンサや特殊なハードウェア構成を必要とするため，複雑もしくは高コストである．この問題に対する解決策として，導電性の物体に対して周波数を掃引させた電流を流すことにより，単一の静電容量センシング機構による触れ方の認識を行った例もある [SPH12]．しかしながら，この手法は一般に導電性の物体のみを触れる対象とする．



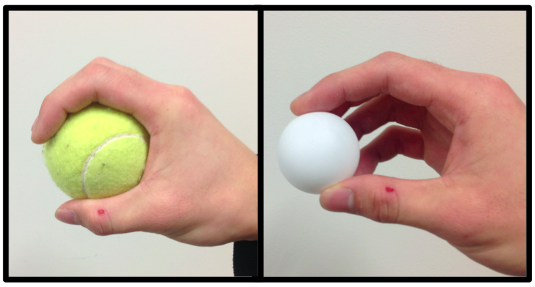
(a) Goal



(b) Relation

(c) Anatomy

(d) Setting



(e) Properties

図 1.1.1: Wimmer らによる分類

1.2 目的

本研究では，アクティブ音響センシングにより，手軽かつ安価に物体の触れ方を認識する手法を示す．本手法において認識対象とする触れ方は，触れる手の姿勢によって異なるものである．本手法の特徴は 1 組のスピーカとマイクを物体に貼り付けることによって，物体の触れ方を認識可能とする点にある．そのため，触れる対象をデバイスとして一から作成することなく，既存の物体に対しても触れ方の認識機能を追加することが可能である．これは，触れ方の認識を利用するシステムの開発においてプロトタイピングを容易にする．

1.3 本論文の構成

第 1 章以降の本論文の構成は次のとおりである．第 2 章では，関連研究を紹介することにより，本研究の位置づけを述べる．第 3 章では，本研究の提案手法の原理及び特徴を述べる．第 4 章では，提案手法に基づいて実装したプロトタイプシステムを述べる．第 5 章では，作成したプロトタイプシステムを用いて，身の回りの物体に対して本手法を適用し，適用の容易さを検証する．第 6 章では，提案手法を用いて，携帯情報端末における触れ方の認識を行う．また，その認識精度実験から，本手法の実用性について検証する．第 7 章では，本手法の適用範囲，問題点を議論する．第 8 章では，本研究の結論を述べる．

第2章　関連研究

本章ではまず，触れ方の認識を行う研究を述べる．次に，アクティブ音響センシングを用いる研究を述べる．最後にオーディオ入出力端子を用いる研究について述べる．

2.1　触れ方の認識

今日までに，様々な手法による触れ方の認識が試みられている．

最も多く見られる手法は静電容量センサを使用したものである [KCC+06, SPH12, TB09, WB09, CHLC12]．これらの手法は，数多くの静電容量センサを用いた専用の回路により触れ方の認識を実現している．例えば Kim らは，64 個の静電容量センサを端末に組み込むことにより，端末の触れ方の認識を行った [KCC+06]．これは，触れ方を高精度に認識できるものの高コストを要する．また，Sato らの Touché[SPH12] は導電性物質に周波数を掃引させた電流を流すことにより，単一の静電容量センシング機構による多様な触れ方の認識を行った．しかし，これは一般に導電性物質にのみ適用可能となるため，非導電性物質に対して適用する場合には導電インクや導電テープを使用したコーティングを必要とする．

また，静電容量センサ以外のセンサ，及び端末に内蔵されたセンサを使用した手法も提案されている．Wimmer らは光ファイバと画像処理によって触れ方の検出が可能な面のプロトタイピングを行う手法を提案している [Wim10]．面に大量の光ファイバを組み込み，それらの末端を束として収束させたものを面画像として捉え，画像処理を施すことにより触れ方の認識を実現した．Goel らは端末に内蔵された，ジャイロセンサと振動モータとスワイプ軌跡の組み合わせにより端末の触れ方の認識を行った [GWP12]．一般的な端末のみによる，追加のデバイスを必要としない触れ方の認識手法を提案しているが，認識に際してユーザに画面のスワイプ操作を要求する．

これらの認識手法に対して，本手法は音響に基づくため，導電性および非導電性の両者を含む様々な物体に対して触れ方の認識を行える．また，認識に必要とするセンサは 1 組のスピーカとマイクのみであるため，手軽かつ安価である．

2.2　アクティブ音響センシング

スピーカとマイクを使用したアクティブ音響センシングシステムはこれまでにいくつか提案されている．

Gupta らの SoundWave[GMPT12] はラップトップ型 PC に搭載されたスピーカとマイクを使用して，PC の周囲における in-air ジェスチャの認識を行った．SoundWave は，認識のために高周波信号を空気中に出力し，ドップラー効果を観測する．一方，本手法は高周波信号を振動として固体に直接出力し，その振動特性を観測する．

Collins は 1 つのピエゾトランスミッタと 2 つのコンタクトマイクを用いてガラス等の平面をタッチパネルにする手法を提案した [Col09]．これは，面の特定の位置をタッチした時に生じる振動特性の変化をアクティブ音響システムによって計測し，タッチ位置を推定する．本研究では振動特性の変化をタッチ位置ではなく，触れ方の認識に使用する点が異なる．

2.3 オーディオ入出力端子

本手法が認識に使用する特徴量は音響信号であるため，端末や PC に設けられたオーディオ入出力端子を介したデータの入出力が可能である．結果として，センサ以外に特別なハードウェアを必要とせず認識システムを端末内や PC 内に閉じて構築することが可能である．このように，オーディオ入出力端子をセンサ情報取得のためのインタフェースとして用いる研究はこれまでにいくつか提案されている．

Kuo らは，端末のオーディオ入出力端子の可能性について探求した．端末の端子を使った通信方法として，アナログ，デジタル，シリアルの例を示すことにより，信号入出力インタフェースとしてのデザイン空間について述べている [KVSD10]．Hwang らの MicPen[HBW12] はペン先のスクラッチノイズを iPad のマイク入力端子を介して取得することにより，感圧ペンを実装した．巻口らは端末のオーディオ入出力端子を使用した脈波測定装置を提案している [巻口 12]．これらの研究は，モバイルデバイスのオーディオ入出力端子を使用することによって，低コスト化に貢献できることを示している．

第3章　アクティブ音響センシングを用いた触れ方の認識

本章では，本手法の原理及び特徴について述べる．

3.1　センシング原理

物体はその構造の特徴を表す指標のひとつとして振動特性を持つ．この特性は振動モード，固有振動数，モード減衰比によって表現され，物体の形状，材質，境界条件に依存する．これは，建築や機械の分野において，構造物の耐久度の評価や制振技術として応用されている [和夫 91].

境界条件は物体の振動特性に影響を与える要因のひとつであり，物体に対する荷重や拘束の条件によって定義される．物体に触れる場合，触れ方によって物体に対する接触点と圧力が異なり，これに伴って拘束条件や荷重条件が変化する．これらの条件の変化は振動特性の変化として表れる．よって，物体の形状や材質に変化がない場合，物体の触れ方の変化は，振動特性の変化として観測可能である．

本研究ではこの現象を利用して，振動特性を解析し，その解析結果から触れ方を推測する．振動特性の解析には，実現象の観測に基づく周波数応答解析を用いる．これはアクチュエータによって物体を様々な周波数で振動させ，センサによって振動の周波数応答を取得する，実現象の観測に基づく手法である．得られた周波数応答から具体的な触れ方を求めるには，よく有限要素法等の理論モード解析が用いられる．しかしながら，これには物体の元の形状や材質，触れること以外の境界条件についての情報を要する．そのため，物体の構造情報について既知でなければならず，計算コストも高い．

これに対して，本手法では認識したい触れ方をラベルとして定義し，周波数応答を特徴量とした機械学習を用いる．これにより，学習フェーズを必要とするものの，理論モード解析を用いるよりも計算量を抑えつつ，物体の構造情報が未知な物体に対しても大まかに触れ方を推測できる．

3.2　本手法の特徴

本手法は関連研究の手法と比べて以下のような特徴を持つ．

低コストかつシンプルな実装

これまでの触れ方の認識の研究は，数多くのセンサとそれらを制御するための専用の回路を必要とする．一方で，本手法はセンサとして 1 組の振動スピーカとピエゾマイクのみを必要とする．また，これらの制御は一般的な PC や端末に搭載されているオーディオ入出力端子を介して行える．そのため，必要な材料の原価は数百円程度となり，実装コストを抑えられる．

既存の物体にも適用可能

既存の手法は，センサ機構の組み込みのために，触れる対象をデバイスとして一から作成する，もしくは既存の物体に対して大掛かりな加工を行う必要があった．これに対して本手法は物体の振動特性に基づいたセンシングを行うため，振動スピーカとピエゾマイクを取り付ける場所さえあれば，既存の物体を利用して触れ方の認識を行うことができる．これは，触れ方の認識を利用するシステムの開発においてプロトタイピングを容易にする．

ピエゾマイクと振動スピーカによる入出力

本手法はハードウェア構成として，ピエゾマイクと振動スピーカを使用する．これらは触れ方を認識するためのセンサだけでなく，他の入出力技術としての併用も可能である．ピエゾマイクから固体音を検出して入力を行う手法がいくつか提案されている [HSH11][HH08]．本手法において，センシングに使用する信号は高周波信号であるため，周波数帯が重複しないこれらの手法と組み合わせることが可能である．また，空気中の音は，物体に当たった時に多くの成分が反射されるものの，一部は物体の振動として伝搬される．これを利用して，音声を用いた入力も併用可能である．さらに，振動スピーカを用いた可聴領域の出力により，音声フィードバックの提示も可能である．

第4章　プロトタイプシステム

3 章のセンシング原理に基づき，触れ方の認識を行うためのプロトタイプシステムを実装した．本章ではその実装を述べる．

4.1　システム構成

実装したプロトタイプシステムの全体図を図 4.1.1 に，システム構成を図 4.1.2 に示す．本システムは，物体を振動させるための振動スピーカ，振動応答を取得するためのピエゾマイク，信号の入出力と解析を行うためのコンピュータ及びソフトウェアからなる．

以下の節では使用したハードウェア及び実装したソフトウェアの詳細を述べる．

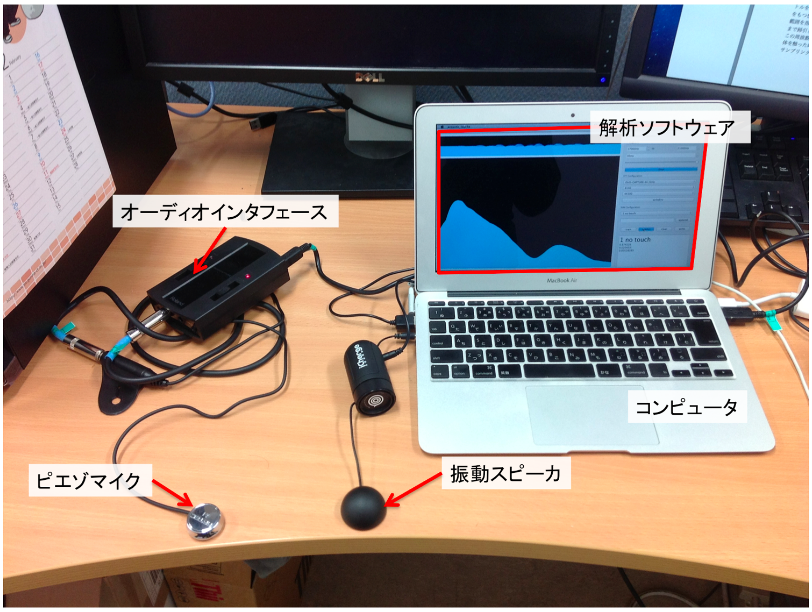


図 4.1.1: プロトタイプシステム

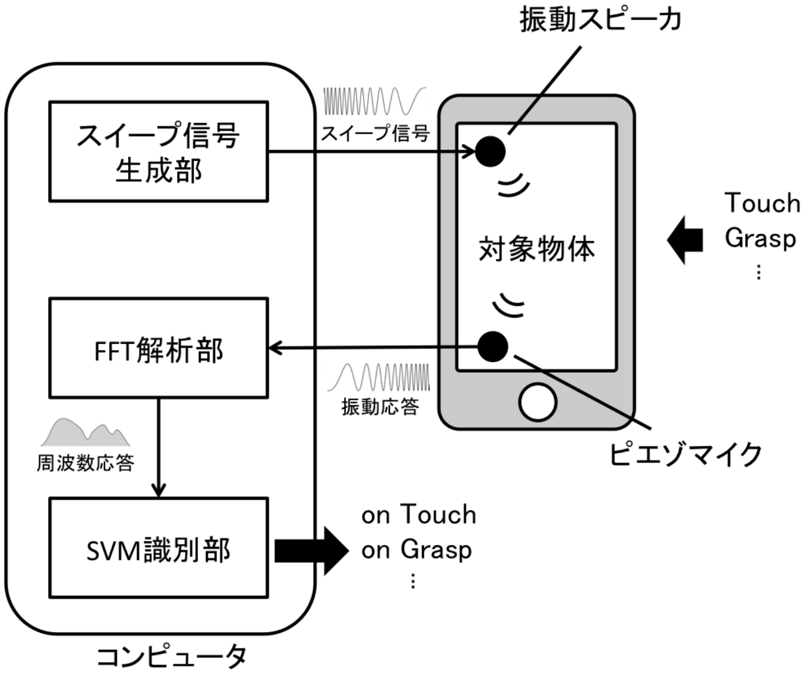


図 4.1.2: システム構成

4.2　ハードウェア

4.2.1　振動スピーカ

振動スピーカはそれを物体に貼り付けることにより，物体自体を振動させて音を出力するスピーカである．一般的なスピーカと同様に音響信号を再生するため，細かな振動の制御が可能である．本システムでは，振動スピーカとしてリンクスインターナショナル社の iChargeSound を用いた（図 4.2.1 右）．これは，物体を振動させる振動ヘッドと，USB 給電または電池給電によるアンプからなる．これにより，ある程度の厚さや大きさを持つ物体も振動させることができる．物体と振動スピーカの接着にはスリーエム社の強力両面テープ KH–19（テープ厚さ 1.2mm）を用いた．

4.2.2　ピエゾマイク

ピエゾマイクは固体音を検出するマイクであり，主にアコースティック楽器の録音に用いられる．これを振動応答の取得に用いる．本システムでは，ピエゾマイクとして ARTEC 社の A1–OSJ を使用した（図 4.2.1 左）．ピエゾマイクの接着には振動スピーカと同様に強力両面テープを用いた．

図 4.2.1: 振動スピーカとピエゾマイク

4.2.3　コンピュータ

振動スピーカを駆動させるための音響信号の出力，ピエゾマイクによって取得した振動応答の入力，及び機械学習を行うコンピュータとして Apple 社の MacBook Air（CPU：Intel Core 2 Duo 1.4GHz，RAM：2GB）を使用した．振動スピーカへの信号の出力には本体のヘッドフォンポートを用いた．また，ピエゾマイクからの入力には USB 接続のオーディオインタフェース（Roland Duo–Capture）を用いた．なお，コンピュータとしてライン入力を備えるものを使用した場合，USB オーディオインタフェースなしでも実装可能である．

4.3　ソフトウェア

解析ソフトウェアを C++言語を用いて作成した．これは，スイープ信号生成部, FFT 解析部, SVM 識別部からなる 3 つのモジュールと，各モジュールの動作設定や結果の出力を行う GUI ツールによって構成される．

4.3.1　スイープ信号生成部

スイープ信号生成部は振動スピーカを駆動させるための信号の生成を行う．共振スペクトルを得るには幅広い周波数帯を持つ信号によって振動させる必要がある．そのような特性をもつ信号として，インパルス信号やスイープ信号等があるが，プロトタイプシステムでは帯域の範囲を指定できるスイープ信号を使用した．スイープ信号は時間経過とともに低い周波数から高い周波数へ変化させた信号である．基底となる信号にはサイン波を用いた．

出力するスイープ信号の最小周波数を f_{min}(Hz)，最大周波数を f_{max}(Hz)，掃引周期を T(s) とすると時刻 $t(0 \leq t < T)$(s) における出力信号 $X(t)$ は以下の式によって表される．

$$f(t) = f_{min} + \frac{f_{max} - f_{min}}{T} \cdot t \tag{4.1}$$

$$\phi(t) = \int_0^t 2\pi f(t) dt \tag{4.2}$$

$$X(t) = \sin(\phi(t)) \tag{4.3}$$

これをサンプリング周波数 f_s によって離散化した場合，n サンプル目の信号出力 $X(n)$ は以下のようになる．

$$n_{max} = f_s \cdot T \tag{4.4}$$

$$f(n) = f_{min} + \frac{f_{max} - f_{min}}{n_{max}} \cdot (n \bmod n_{max}) \tag{4.5}$$

$$\phi(n) = \begin{cases} 0 & (n = 0) \\ \phi(n-1) + \frac{2\pi f(n)}{fs} & (n > 0) \end{cases} \tag{4.6}$$

$$X(n) = \sin(\phi(n)) \tag{4.7}$$

以上の式に基いてスイープ信号を出力するモジュールを作成した．なお，これらの式における各変数（f_{min}, f_{max}, f_s, T）をパラメータとして，プログラムの実行中に GUI ツールから変更できるようにした．しかしながら，各変数には以下のような制約が存在する．

サンプリング周波数 f_s

利用可能な f_s の値は使用するオーディオインタフェースに依存する．プロトタイプシステムで使用した PC のオーディオ出力ポートにおける最大サンプリング周波数は 96kHz である．

掃引周波数 f_{max}，f_{min}

利用可能な掃引周波数の最大値は標本化定理により $f_s/2$ となる．また，これらの値を可聴域 [Chr03] に設定した場合耳障りとなるため，実利用を想定する場合には 18kHz 以降に設定する必要がある．

掃引周期 T

T は認識を 1 フレーム分行う際の最小時間となるため，認識の時間分解能に影響する．一方で，T をより短く設定した場合，生成されるスイープ信号の掃引間隔が広くなるめ，得られる共振スペクトルの周波数分解能が粗くなる．

4.3.2 FFT 解析部

FFT 解析部はピエゾマイクから取得した振動波形に対して FFT を行い，共振スペクトルへ変換する．FFT ライブラリとして FFTW[1]を使用した．FFT を行う際，信号のサンプリング周波数 f_s，フレームサイズ W_{len}，窓関数 W_{func} によって得られる結果が異なる．今回，W_{func}

[1]FFTW http://www.fftw.org/

はハニング窓を使用するものとし，f_s と W_{len} はプログラム実行時に GUI ツールから設定できるようにした．ただし，サンプリング周波数 f_s は出力のスイープ信号の値に合わせる必要がある．なお，1 フレームの FFT によって処理される信号の時間 T_{frame} は W_{len}/f_s となる．T_{frame} がスイープ信号の掃引周期 T よりも短い場合，1 フレーム分の FFT では目的とする共振スペクトルが得られない．そのため，共振スペクトルとして，T 秒間の間に得られた周波数スペクトルに対して各周波数バンドにおける最大値をとったものを使用する．

4.3.3 SVM 識別部

SVM 識別部は機械学習手法のひとつである Support Vector Machine（SVM）を用いて，振動特性と触れ方の関係の学習とリアルタイム識別を行う．学習に使用する特徴量として，FFT 解析部によって得られた共振スペクトルのうち，出力するスイープ信号と同じ周波数帯である f_{min}〜f_{max} の部分を用いた．なお，実装に際して，SVM のライブラリである LIBSVM（RBF kernel）[CL11] を使用している．システムの適用対象やマイクとスピーカの設置箇所によって共振スペクトルの変化の仕方が大きく異るため，本システムではハードウェアセットアップの際にグリッドサーチによるパラメータ最適化を行う．グリッドサーチには LIBSVM に付属するツールである grid.py を用いた．

4.3.4 GUI ツール

前述したモジュール中で使用するパラメータの設定，及び処理結果の確認のために GUI ツールを作成した．図 6.4.1 に作成した GUI ツールを示す．本ツールの作成には Qt[2]を用いた．

本ツールは振動波形と共振スペクトルを表示するビューと，スイープ信号，FFT，SVM のパラメータを設定する領域からなる．振動波形と共振スペクトルの描画には OpenGL[3]を用いた．スイープ信号の設定領域では，出力オーディオデバイス，掃引周波数，掃引時間，出力レベルの設定を行う．FFT の設定領域では，入力オーディオデバイス，サンプリング周波数，フレームサイズの設定を行う．SVM の設定領域では，機械学習に使用するラベルの定義と選択，学習状況と識別結果の表示を行う．また，学習の ON/OFF を切り替えるための Train ボタン，識別の ON/OFF を切り替えるための Predict ボタン，学習に使用した訓練データを.libsvm 形式でファイルに出力する Write ボタンなどを含んでいる．Weka Machine Learning ToolKit[HFH$^+$09] 等の機械学習ツールを用いることによって，出力された.libsvm 形式のデータをオフライン解析にかけることが可能である．

[2]Qt http://qt.digia.com/
[3]OpenGL http://www.opengl.org/

4.4 使用手順

本システムを用いて触れ方の認識を行う際の使用手順は以下の通りである．

1. 振動スピーカとピエゾマイクを対象物体に貼り付ける．
2. 対象物体に触れながら，特徴が良く現れるようにスイープ信号と FFT の設定を行う．
3. SVM 設定領域で，認識対象とする触れ方のラベルを定義する．
4. 定義したラベルの中から 1 つを選択し，そのラベルに対応した触れ方で対象物体に触れる．
5. Train ボタンを ON にし，いくつかのサンプルを学習させる．
6. Train ボタンを OFF にし，触れ方とラベルを変更する．
7. 以降 5~6 を目的とする全ての触れ方の学習が終わるまで繰り返す．
8. 全ての触れ方の学習が終わったら，Predict ボタンを ON にする．
9. 対象物体に触れ，正しく認識されるか確認する．

なお，正しく認識されない場合は，その触れ方を保ったまま SVM 設定領域から正しいラベルを選択し，Train ボタンを ON にして再び学習を行う．これにより認識結果が改善される．また，触れ方を微妙に変化させながら学習することによって，それらの変動にロバストな認識結果を得られる．

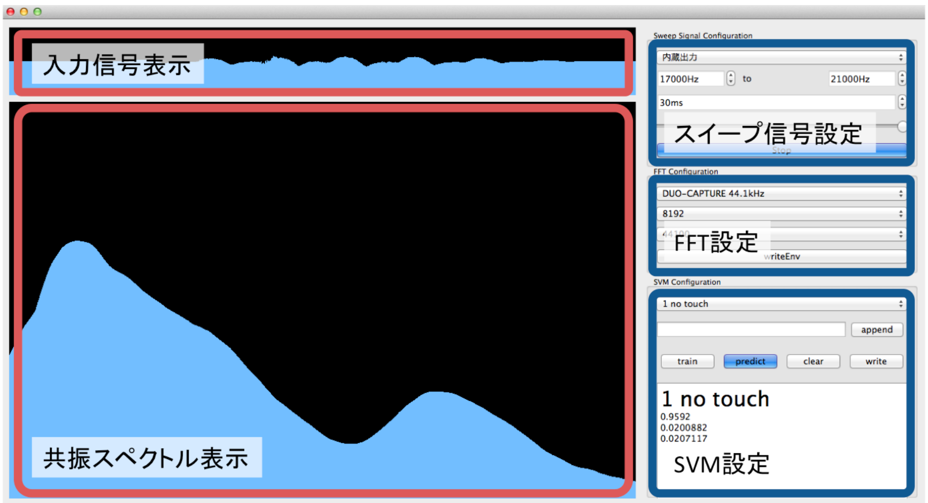


図 4.4.1: GUI ツール

第5章　身の回りの物体への適用

本章では，前章に述べたプロトタイプシステムを使用して，身近にある様々な物体における触れ方の認識を行う．これにより，本手法の適用の容易さを示すものとする．

5.1　机への適用

研究室の自席の机に対してシステムを適用し，机に対する触れ方の認識を行った．

使用した机を図 5.1.1 に示す．これは厚さ 5cm の木製の机である．なお，机のような大きな物体の場合，アンプ付きの振動スピーカを使用しても机全体を振動させることはできない．また，触れることによる振動特性への影響も，触れる位置の周辺に限定される．そのため，触れ方を認識可能な部位は振動スピーカとピエゾマイクの周辺に限定される．今回は，図 5.1.2 に示すように，振動スピーカとピエゾマイクを 15cm の間隔を開けて設置し，それらの間（背面も含む）を触れる領域とした．ソフトウェア側のパラメータを表 5.1 のようにした．

図 5.1.1: 使用した机

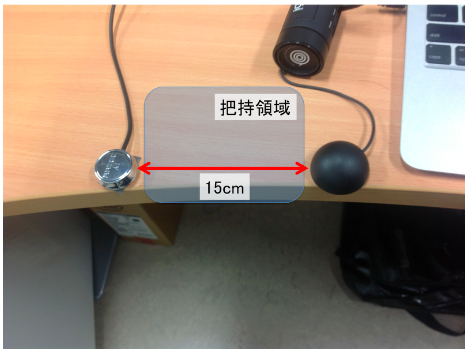
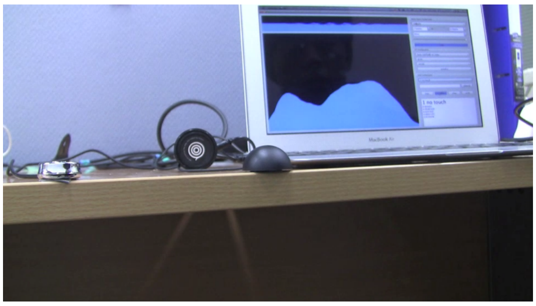


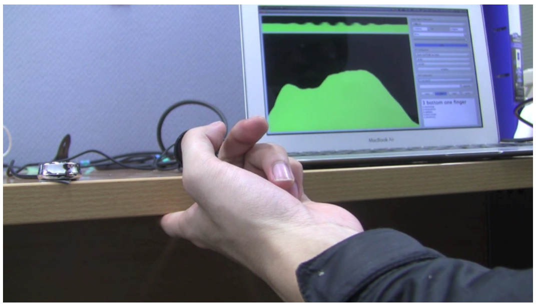
図 5.1.2: システムの取り付け位置

以上の条件において，著者 1 名が 5 種類の触れ方（no touch, top touch, bottom touch, forehand grasp, backhand grasp）によって机に触れた．図 5.1.3 に各触れ方とシステムの動作の様子を示す．また，各触れ方において図 5.1.4 に示すような共振スペクトルの変化を得られた．これらの触れ方において約 100 フレームずつ学習を行った後，リアルタイムに触れ方を識別できることを確認した．

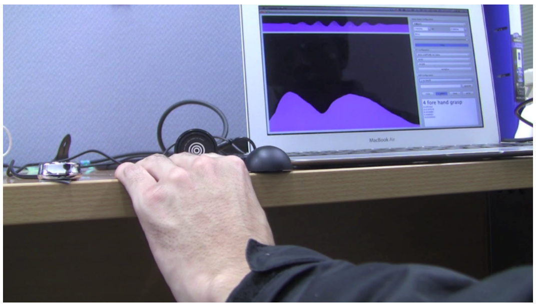


(a) no touch

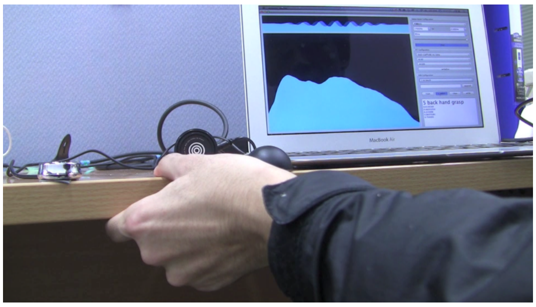
(b) top touch



(c) bottom touch



(d) forehand grasp



(e) backhand grasp

図 5.1.3: 5 種類の触れ方

表 5.1: パラメータ設定

パラメータ	値
入出力サンプリング周波数	44100Hz
量子化ビット数	16bit
掃引周波数	17～21kHz
掃引時間	30ms
フレームサイズ	8192
窓関数	ハニング窓

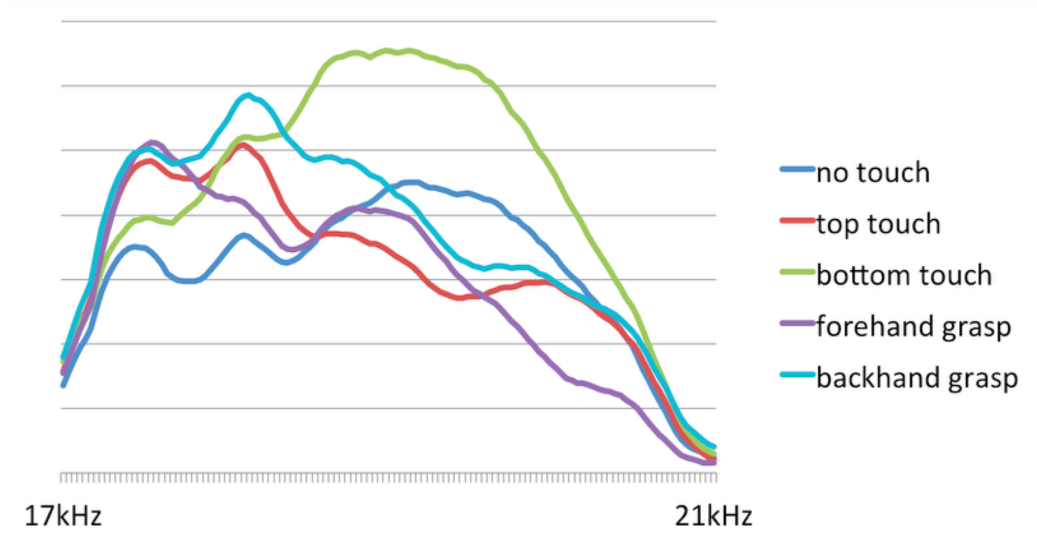


図 5.1.4: 5 種類の触れ方における共振スペクトル

5.2　食器への適用

椀に対してシステムを適用し，触れ方の認識を行った．

椀に対する触れ方は，内容物や個人の癖によって異なる．例えば熱い汁物が入った椀を運ぶ場合，手が熱くならないように椀の上部を触れることがある．また，子供は椀の正しい持ち方を知らないために，悪い持ち方[1]をすることがある．このような違いを認識することにより，内容物の状態を推定したり，子供に椀の正しい持ち方を学習させるためのシステムとしての応用が考えられる．

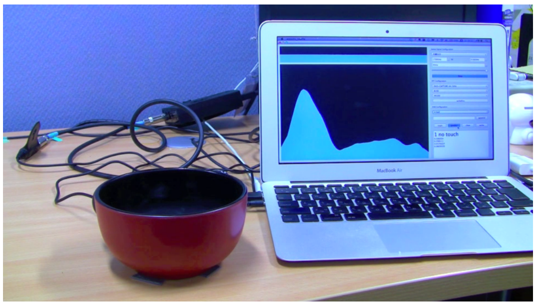
今回使用した椀を図 5.2.1 に示す．これは，直径 12.5cm，高さ 6.5cm のプラスチック製の椀である．この椀に対して図 5.2.2 のようにシステムを取り付け，ソフトウェアのパラメータを表 5.1 のように設定した．

図 5.2.1: プラスチック製の椀

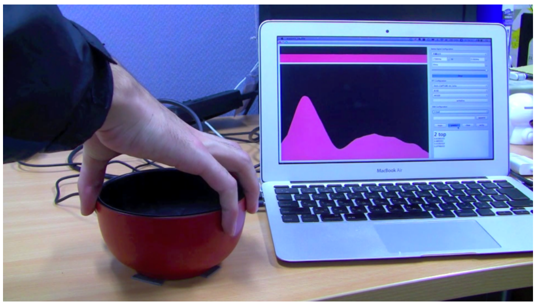
図 5.2.2: システムの取り付け位置

以上の条件において，4 種類の触れ方（no touch, hot grasp, good grasp, bad grasp）によって椀に触れた．図 5.2.3 に各触れ方とシステムの動作の様子を示す．また，各触れ方において図 5.2.4 に示すような共振スペクトルの変化を得られた．これらの触れ方において約 100 フレームずつ学習を行った後，リアルタイムに触れ方を識別できることを確認した．

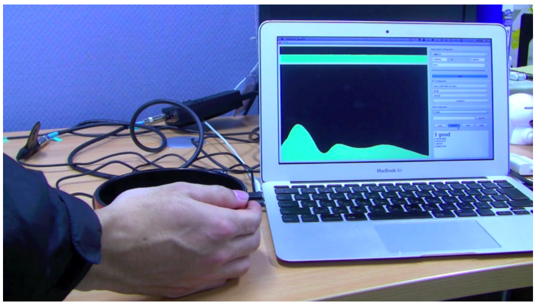
[1]お茶碗の持ち方/ネコがけ http://www.kennya.jp/sahou/otyawannno-motikata/



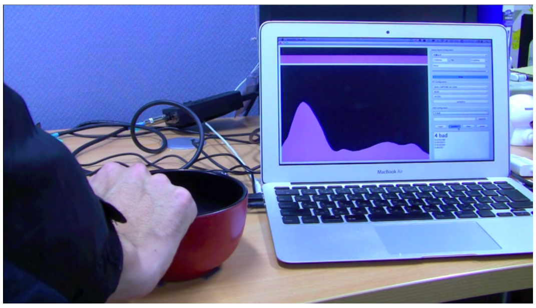
(a) no touch



(b) hot grasp



(c) good grasp



(d) bad grasp

図 5.2.3: 4 種類の触れ方

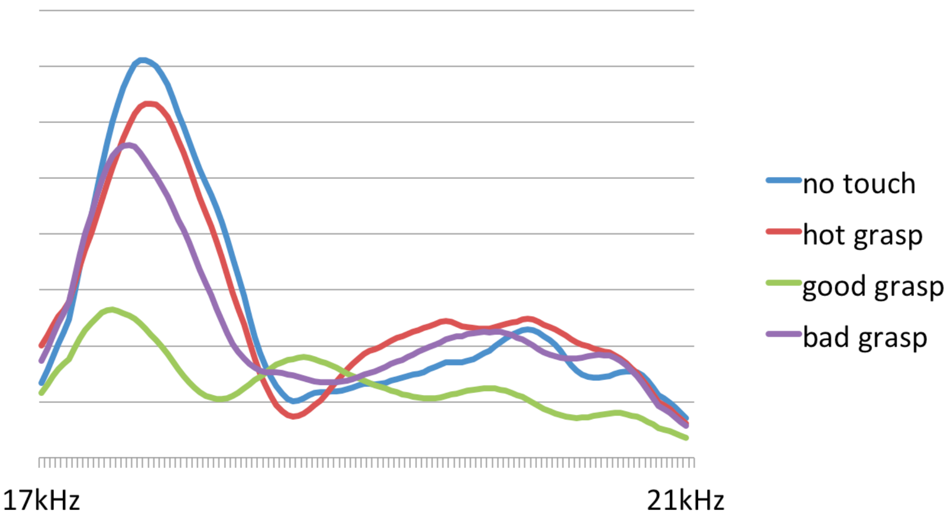


図 5.2.4: 4 種類の触れ方における共振スペクトル

5.3 玩具への適用

玩具に対してシステムを適用した．使用した玩具を図 5.3.1 に示す．これは，100 円ショップで購入したマスコット型の貯金箱であり，プラスチック製である．このような玩具は作りが単純であるため，安価であるものの，インタラクティブ性は備えていない．一方で，ファービー[2]のような玩具は，子供が触れたり呼びかけたりすることによって反応するインタラクティブな玩具として親しまれている．こちらは，前者に比べて高価となる．本手法を用いれば，前者のような安価で静的な玩具を，後者のようなインタラクティブな玩具に拡張することが可能である．また，センシングにマイクを使用するため，触れ方の認識だけでなく，音声による呼びかけも入力として使用することが可能である．

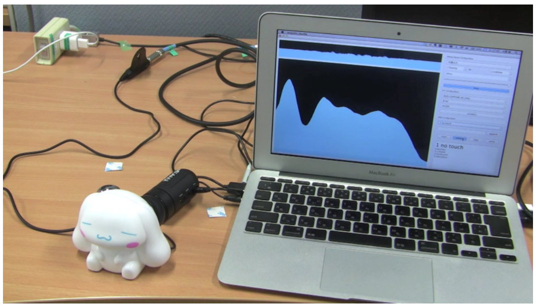
この玩具に対して図 5.3.2 のようにシステムを取り付けた．また，ソフトウェアのパラメータを表 5.1 のように設定した．

図 5.3.1: 使用した玩具

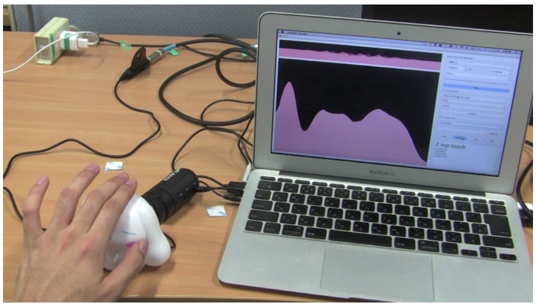
図 5.3.2: システムの取り付け位置

以上の条件において，著者 1 名が 4 種類の触れ方（no touch, top touch, side grasp, whole grasp）によって玩具に触れた．図 5.3.3 に各触れ方とシステムの動作の様子を示す．また，各触れ方において図 5.3.4 に示すような共振スペクトルの変化を得られた．これらの触れ方において約 100 フレームずつ学習を行った後，リアルタイムに触れ方を識別できることを確認した．

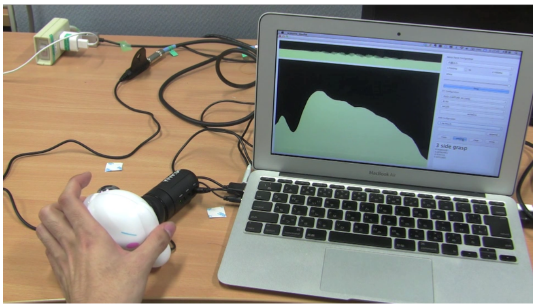
[2]http://www.takaratomy.co.jp/products/furby/index.php



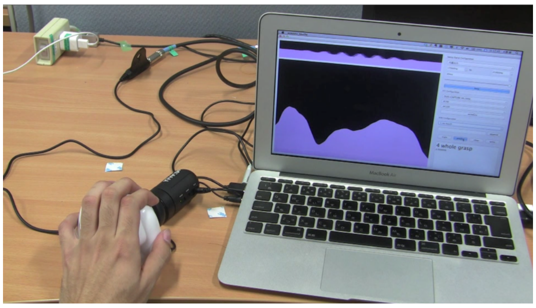
(a) no touch



(b) top touch



(c) side grasp



(d) whole grasp

図 5.3.3: 4 種類の触れ方

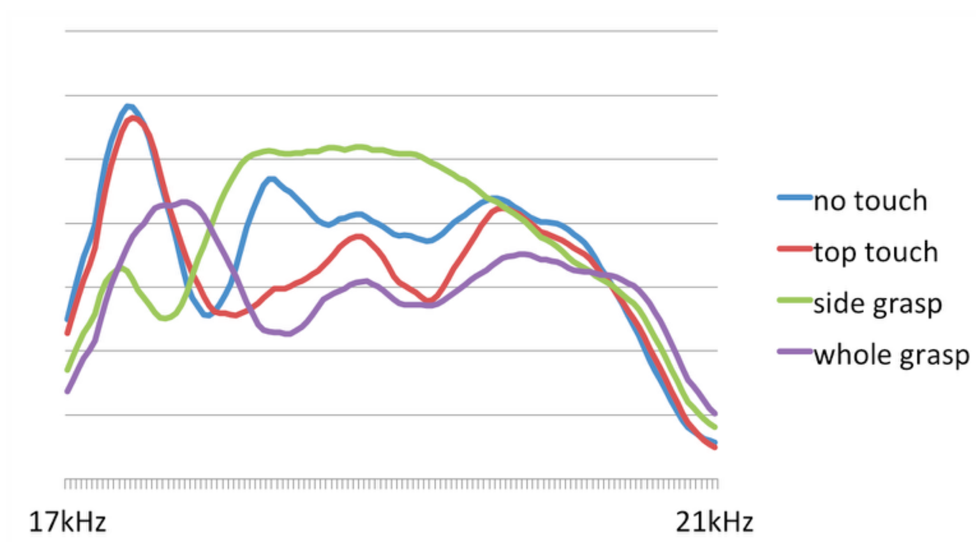


図 5.3.4: 4 種類の触れ方における共振スペクトル

第6章　携帯情報端末における触れ方の認識

前章では身の回りの様々な物体に本手法を適用することにより，本手法の適用の容易さやプロトタイピングツールとしての有用性を示した．本章では，より実用的な観点から，携帯情報端末を対象とした触れ方の認識を行う．

6.1　背景

スマートフォンを始めとした端末は，電話，カメラ，メールといった様々なアプリケーションを備えている．そのうち，いくつかのアプリケーションは特有の触れ方を要求する．例えば電話の場合，端末を耳に当てようとするため，親指が端末の側面に沿った触れ方になりがちである．また，カメラとして使用する場合は，端末の四隅を摘むような触れ方になりがちである．したがって，これらの触れ方を認識することによって，端末がそれらの触れ方に対応するアプリケーションを起動するといった自然なインタラクションが可能になる．また，同じアプリケーションを操作する場合においても，利き手，非利き手，両手といった持ち手の種類によって，指の可動範囲や操作体系が異なる．各持ち手を認識してそれらに最適化したUI へ動的に変更することにより，操作性の向上が期待される．

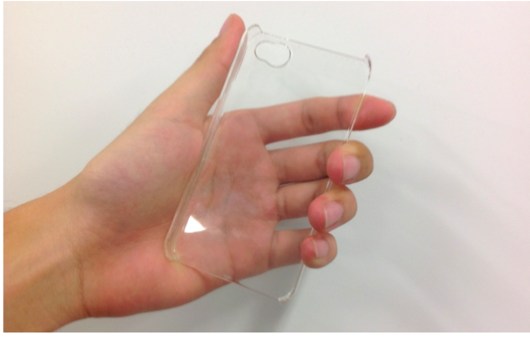
以上の背景から，本手法の適用例として端末における触れ方の認識を行った．

6.2　認識対象とする触れ方

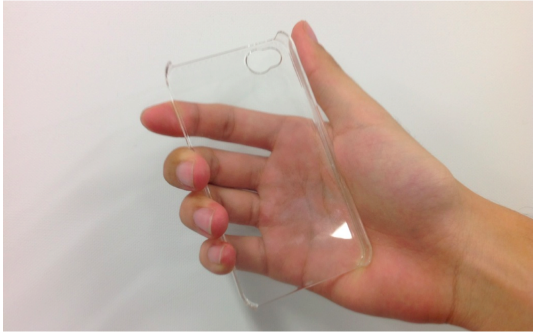
端末の触れ方は，触れ方の認識の研究において認識対象として多くの例が見られる [KCC+06, WB09, TB09, GWP12, CHLC12]．認識対象とする触れ方はこれらの先行研究を参考にした上で，図 6.2.1 に示す認識セットとした．この認識セットは 4 種のアプリケーション（call, sms, camera, game）と 3 種の持ち手（left, right, both）の組み合わせによって構成されている．

6.3　システムのスタンドアロン化

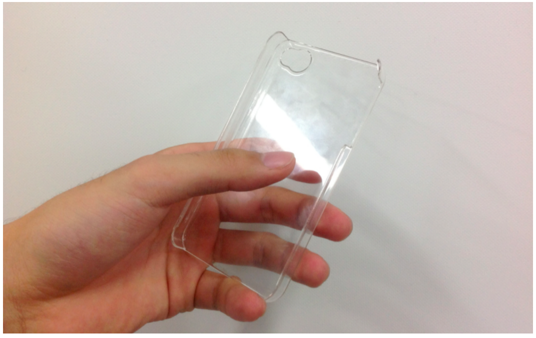
4 章のプロトタイプシステムの実装では，一般用途のスピーカとマイク，PC 上の認識ソフトウェアを用いており，また，音声信号の入出力はオーディオインタフェースを介して行っていた．このシステムをそのまま端末に適用した場合，常に PC が必要となる大掛かりなシステムとなる．近年の端末は高い処理能力を持ったプロセッサと，ヘッドセットの使用を想定したオーディオ入出力端子を持つ．これらを利用することにより，認識システムを端末内に閉



(a) left call

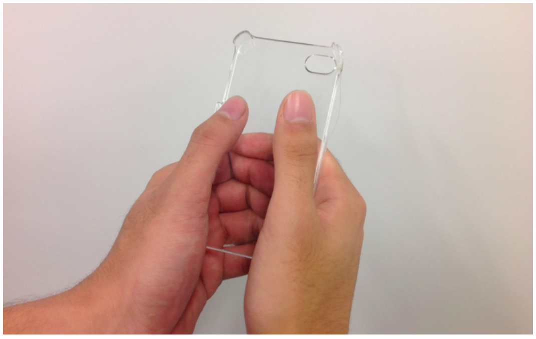


(b) right call

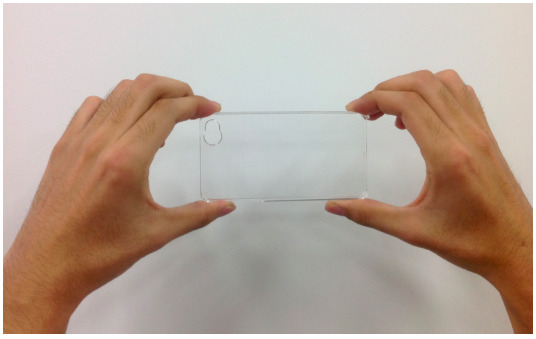


(c) left sms

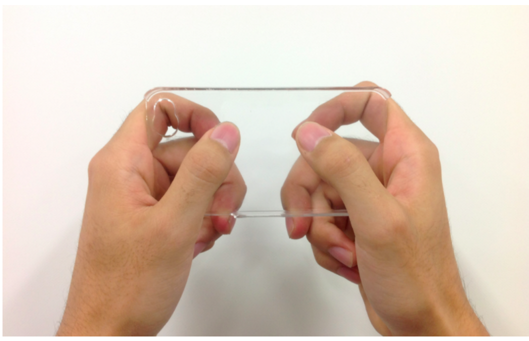
(d) right sms



(e) both sms



(f) camera



(g) game

図 6.2.1: 認識セット

じて構築することが可能である．また，マイクやスピーカについても一般用途の製品ではなく，素子単位のものを利用することによって小型化が可能であり，コストも抑えられる．これらのことから，本節では端末上で動作するスタンドアロンシステムの実装を行う．

6.3.1　ハードウェア

ハードウェア構成

触れ方の認識を行う端末として Apple 社の iPhone 4S を使用した．iPhone 4S を使用した理由は他の端末に比べて，豊かなオーディオ入出力環境を備えているためである．

実装に際して，システムを端末本体に直接取り付けるのではなく，市販のケースに組み込むことによって，システムの着脱が容易となる設計とした．システムのハードウェア構成を図 6.3.1 に示す．これは，iPhone 4S 用のハードケース，バイモルフ型圧電素子を用いた振動スピーカ，ユニモルフ型圧電素子を用いたピエゾマイク，3.5mm 径のオーディオ入出力端子からなる．本システムは iPhone 4S にケースとして装着し，オーディオ入出力端子を本体のヘッドセットポートに挿入して使用する．iPhone 4S にシステムを装着した際の外観を図 6.3.2 に示す．

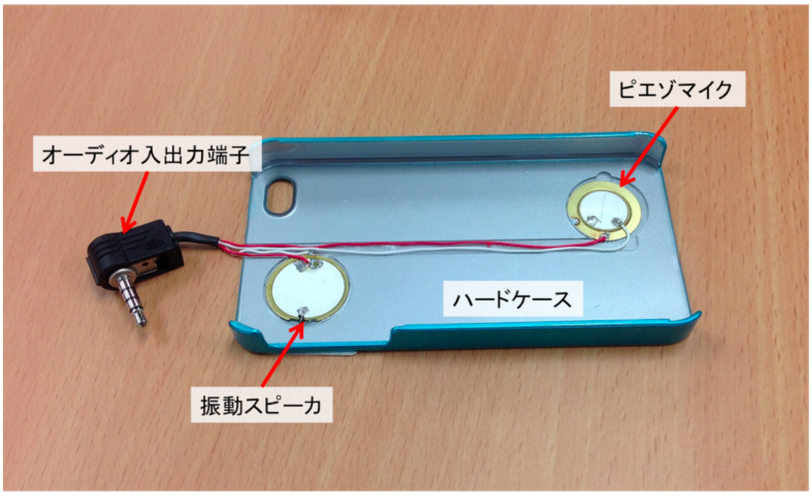


図 6.3.1: ハードウェア構成

ピエゾマイク

プロトタイプシステムでは，ピエゾマイクとして，アコースティック楽器用のピエゾピックアップを用いた．ケースにセンシング機構を組み込むにあたり，より薄型のマイクが必要となるため，今回は圧電素子を用いる．ピエゾマイクとして，秋葉原の鈴商にて 1 枚 80 円で

(a) 前面　　(b) 背面

図 6.3.2: iPhone 4S 装着時のシステムの外観

購入したユニモルフ型の圧電素子を使用した（図 6.3.3 中央）．その形状は厚さ 0.2mm，直径 20mm の円盤型である．

振動スピーカ

プロトタイプシステムで使用した振動スピーカは電磁誘導によって振動板を振動させるため，大きな振動が得られるものの，厚い構造となる．振動スピーカについても前節のマイクと同様の薄さが必要となるため，圧電素子を使用する．今回は，振動スピーカとしてスライブ社の OMR20F10H-BP310 を使用した（図 6.3.3 左）．形状は厚さ 3mm，直径 21mm の円盤型である．

これは前節でピエゾマイクとして使用したユニモルフ型の圧電素子とは異なり，2 枚の圧電素子が重ね合わされたバイモルフ型構造となっている．そのため，ユニモルフ型の圧電素子よりも強い力で振動させることができる．この圧電素子の 1 枚あたりの価格は 1680 円である．これは，マイク用の圧電素子に比べて高価である．しかし，大量発注した場合には，1 枚あたりの価格が 200 円となるため，普及時のコストを抑えられる．

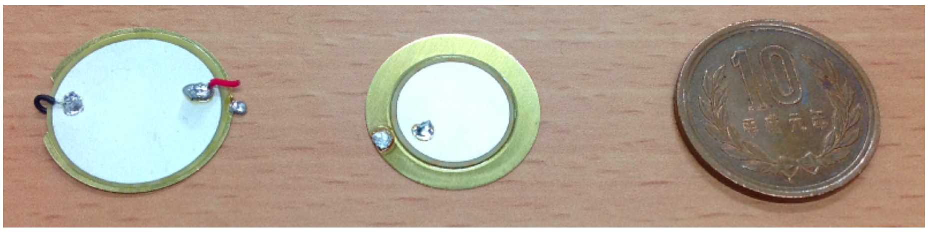


図 6.3.3: スタンドアロンシステムにおいて使用する圧電素子

オーディオ入出力端子

iPhone 4S は，音のステレオ再生とマイクによる入力を行うためのオーディオ入出力端子を備えている．これは 4 極の 3.5mm 径端子となっている．4 極以上の端子が搭載されたデバイスは様々なものが販売されているが，標準規格は定められていないため，会社または製品によって規格が異なる．Apple 社が採用している 4 極端子の規格を図 6.3.4 に示す．この規格にしたがって端子，マイク，スピーカの配線を行う．なお，iPhone 4S の端子はコンデンサマイクの使用を想定して，ローインピーダンスに設計されているため，ギター等のハイインピーダンス機器を直接つないでもマイクとして認識されない．本システムで使用する圧電素子も同様にハイインピーダンス素子であるため，入出力インピーダンスの整合と入力レベルの調節が必要である．これらの調整のため，チップ抵抗による L 型アッテネータを作成した（図 6.3.5）．このアッテネータに対して熱収縮チューブによる絶縁を施した後，端子部分に格納した（図 6.3.6）．また，スピーカの出力には，L チャネルを入力ソース，R チャネルをグランドとして使用するものとした．R チャネルをグランドとして使用するために，ソフトウェア側は常に無音の信号を出力する．以上の設計により，各素子と端子間の回路は図 6.3.7 のようになった．

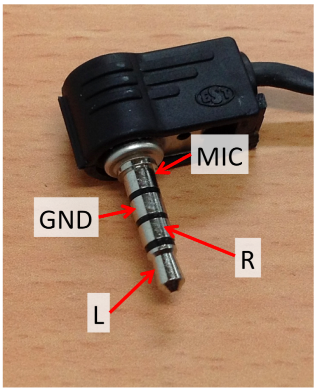


図 6.3.4: iPhone 4S のヘッドセット端子の規格

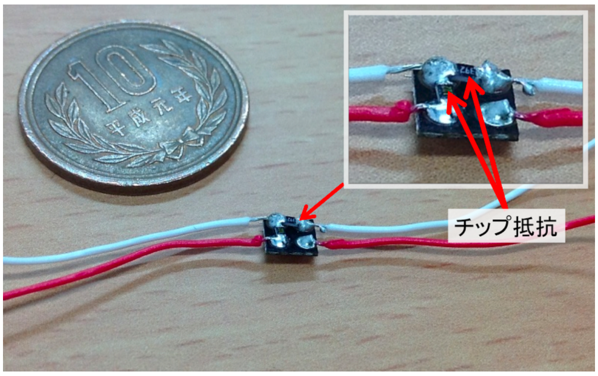


図 6.3.5: L 型アッテネータ

ハードケース

センシング機構を組み込むケースとして，市販のハードケース（ポリカーボネート製）を使用した．使用したケースを図 6.3.8 に示す．なお，センシング機構の組み込みにあたり，圧電素子とコードの厚みの影響を無くすため，旋盤を用いてケースの底面の切削加工を行った．これにより，iPhone 4S にシステムを装着する際に，通常のケースと同様の装着感が得られる．なお，コードや圧電素子の固定にはニチバン社の両面テープ NW–15 一般タイプ（テープ厚さ 0.2mm）を用いた．

図 6.3.6: 端子部分

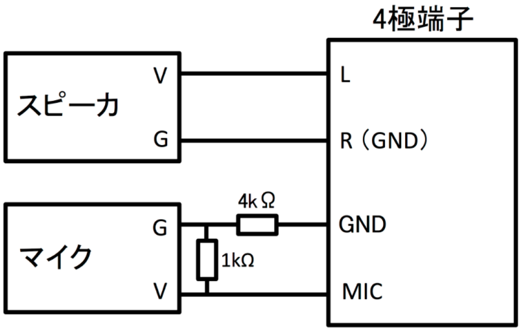


図 6.3.7: 端子とセンサ素子間の配線

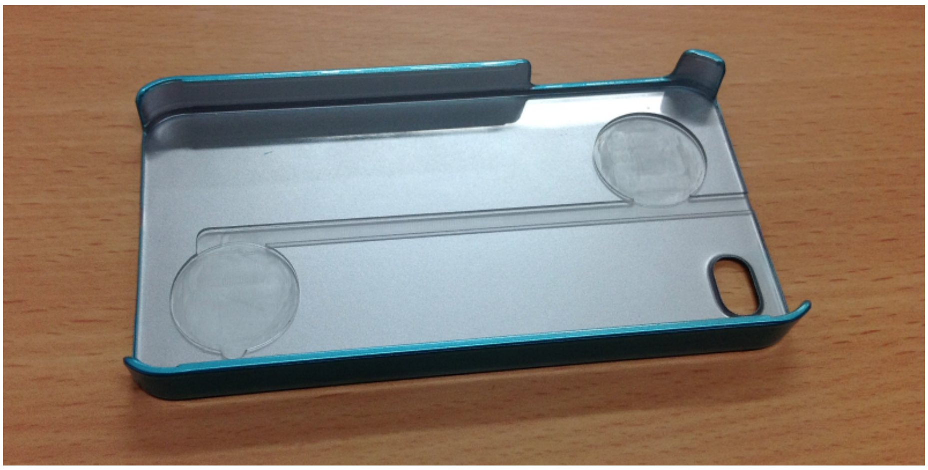


図 6.3.8: 底面を切削したハードケース

6.3.2 ソフトウェア

プロトタイプシステムのソフトウェアを iOS プラットフォーム上で動作するよう移植した．この移植において，プログラミング言語として Objective–C を用いたが，LIBSVM の使用に際して C++言語も使用した．音声入出力，GUI，描画等のプラットフォーム依存の処理については iOS のフレームワークを使用した．使用したライブラリ，フレームワークを表 6.1 に示す．

表 6.1: 使用したフレームワーク，ライブラリ

処理	フレームワーク，ライブラリ
音声入力	AudioQueueService
音声出力	AudioUnit
FFT	Accelerate
SVM	LIBSVM
スペクトル描画	GLKit (OpenGL ES2)
GUI	UIKit

作成したプログラムの実行中の画面を図 6.3.9 に示す．本システムの GUI は，学習，識別等のモード切替用の UI，学習データのファイル入出力を行うボタン，識別結果と共振スペクトルを表示するビューによって構成される．また，ハードウェア環境が固定されるため，スイープ信号と FFT のパラメータ設定用の UI は設けず，ハードコーディングによって設定するものとした．認識に用いたパラメータの値を表 6.2 に示す．システムの使用に際して，耳障りにならないように，掃引周波数は本来 18kHz 以降に設定すべきである．しかし，20kHz 以降は端末内部のローパスフィルタによってカットされており，使用する帯域幅が 2kHz の場合，特徴量として不十分になってしまうため，今回は 17kHz∼20kHz を使用するものとした．

表 6.2: パラメータ設定

パラメータ	値
入出力サンプリング周波数	44100Hz
量子化ビット数	32bit
掃引周波数	17∼20kHz
掃引時間	100ms
フレームサイズ	8192
窓関数	ハニング窓

また，触れ方の学習のために，ラベルの設定と学習を手動で繰り返す，手動学習（Train）ボタンに加えて，一度タップすると全てのラベルについて自動的に学習を行う自動（Auto）学習ボタンを用意した．自動学習ボタンをタップすることにより，画面に 4 秒間隔で特定の把持姿勢において端末を把持した写真が表示される．その写真の把持姿勢に合わせて把持を行っていく事により各把持姿勢につき 160 の学習サンプルが得られる．自動学習ボタンにより学

習を行う際の端末画面を図 6.3.10 に示す．

図 6.3.9: スタンドアロンシステムの GUI

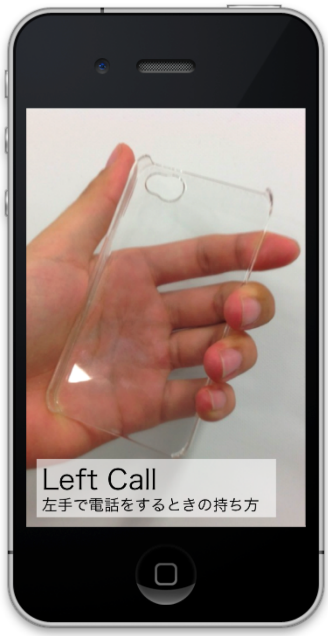


図 6.3.10: 学習時

6.4 評価実験

本手法の実用可能性を検証するものとして，認識精度を求める実験を行った．実験では 6 人（男性 3 人，女性 3 人，21~28 歳）の被験者から端末の様々な触れ方における振動特性データの収集を行った．また，この時，被験者が普段使用する端末や利用歴等についてのアンケートを行った．アンケート結果を付録として末尾に示す．被験者の内，5 人はスマートフォンを，1 人はフィーチャーフォンを普段から使用していた．実験期間は 2 日，1 人あたりの所要時間は約 15 分であった．

6.4.1 実験機器

6.3 節で作成したスタンドアロンシステムを装着した iPhone 4S を用いた．

6.4.2 実験内容

まず，被験者はスタンドアロンシステムの自動学習ボタンをタップする．システムは，4 秒おきに図 6.2.1 の認識セットの中から 1 つの触れ方を抽出し，端末の画面にその写真を表示す

る．被験者は提示された触れ方の写真に合わせて端末の把持を行う．システムは，提示する写真を切り替える直前の 10 フレーム（約 1 秒間）の共振スペクトルを実験データとして取得する．認識セット中の全ての触れ方の写真が 16 回ずつ提示されるまで同様のタスクを繰り返す．なお，提示する写真の順序はランダムかつ同じ物が連続しない順序とした．また，実利用において認識をロバストに行うため，データの収集の際に，被験者に端末に触れる手をわずかに動かしてもらった．

このタスクによって得られるデータの数は，1 被験者あたり 1120 フレーム（10 フレーム× 7 種類の触れ方× 16 セット）となる．

図 6.4.1: 評価実験の様子

6.4.3 実験結果

以上の実験で得られたデータに対して，Weka Machine Learning Toolkit[HFH$^+$09] を用いた 10 分割交差検定を行い，認識精度を評価した．機械学習としてスタンドアロンシステムと同様に LIBSVM（RBF kernel，c=8.0 gamma=0.5）を使用した．議論の章で後述するが，実験に使用したスタンドアロンシステムは時間経過に伴って共振スペクトルが変化してしまう問題がある．異なる被験者間における実験データの取得時刻がことなっているため，被験者間のデータを交差させた場合の評価は困難である．そのため，この実験では，被験者ごとの短期的な利用における認識精度を評価するものとした．また，認識セットのサイズを減らすことにより認識精度がどのように向上するかを調査した．認識セットのサイズを減らす際には，各被験者の直前の検定において最も認識精度が低かった触れ方を認識セットから取り除くものとした．

各被験者，各セットサイズにおける認識精度を表 6.3 に示す．また，セットサイズを減らすことによる平均認識精度の変化の様子を図 6.4.2 に示す．結果として 7 種類の触れ方における平均認識精度は 83.69%（SD=6.41%）となった．また，認識セットのサイズを 3 種類まで減らした場合の平均認識精度は 96.63%（SD=1.71%）となった．

表 6.3: 各被験者，各セットサイズにおける認識精度（%）

被験者 \ セットサイズ	7	6	5	4	3
A	90.45	92.71	96.00	96.41	96.46
B	88.84	91.35	94.00	95.47	97.92
C	77.23	82.08	86.25	90.00	94.58
D	83.84	86.98	90.88	92.97	97.92
E	74.73	80.21	82.88	89.06	94.58
F	87.05	91.88	95.25	96.09	98.33

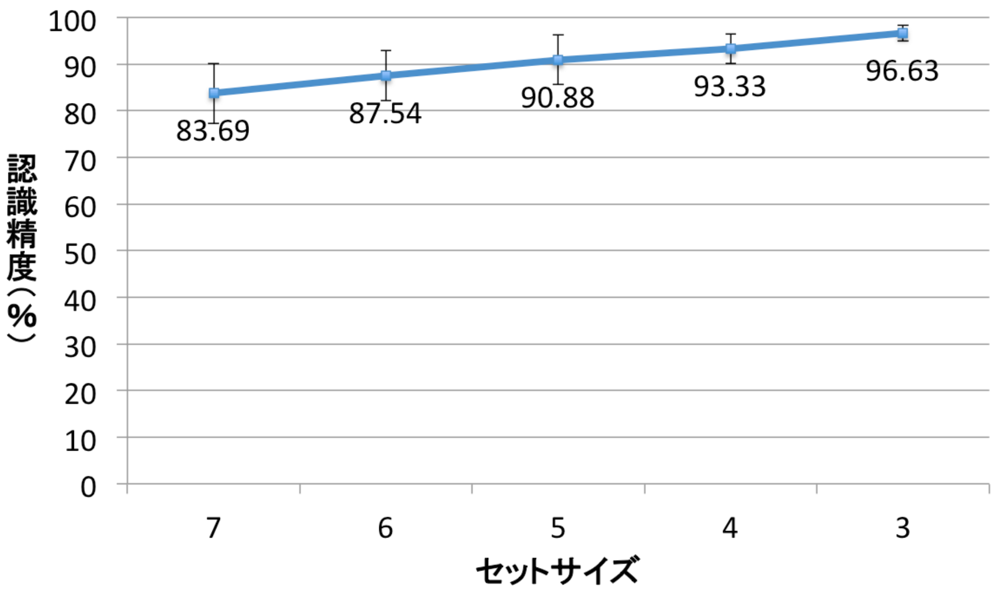


図 6.4.2: 平均認識精度の変化

6.4.4 考察

この実験は，座った状態における短期的な利用を想定した条件で行った．しかしながら，実環境において，システムは，立った状態や歩行状態等の様々な体勢においてもロバストに認

識する必要がある．同様に，長期的な使用においてもロバストに認識する必要がある．現状のシステムには，認識の特徴量に使用する共振スペクトルが時間経過に伴って変化する問題があるため，体勢の変化による影響を評価することは困難である．また，システムの長期的な使用を実現するためにもこの問題の原因を調査する必要がある．

また，スタンドアロンシステムは出力するスイープ信号及び観測する周波数帯域として 17kHz から 20kHz を使用した．この周波数帯を使用した場合，システムの利用者に不快感を与える．この問題を解決するには，20kHz よりも高い周波数の信号の入出力を行える端末上においてシステムを適用する必要がある．

第7章　議論

本章では，本手法の適用範囲，問題点について議論する．

7.1　本手法の適用範囲

本論文では，机，食器，玩具，端末を対象とした本手法の適用例を示したが，原理的には，他の様々な物体に対しても適用可能である．しかしながら，物体の材質や形状によっては適用できない場合もある．例えば，高い自由度で物体が変形する場合，触れ方と振動特性の対応付けは困難である．振動を吸収する物体についても同様である．また，大きい物体を適用対象とする場合，振動スピーカにアンプを接続し，より大きなエネルギーで振動させる必要がある．この場合，振動スピーカによって振動する場所と，触れることによる振動特性への影響が及ぶ場所が部分的になるため，触れ方を認識可能な部位は振動スピーカとピエゾマイクの両者から近い部分に限定される．本論文中に述べた机への適用は，この例のひとつである．今後も様々な物体や条件に対して本手法の適用を試みることにより，適用可能範囲の探索を行う必要がある．

7.2　触れ方以外の影響による振動特性の変化

本手法では，物体に触れることに伴う振動特性の変化を特徴量として触れ方の認識を行った．しかしながら，触れ方以外にも様々要因が振動特性に影響を与える．これらは認識精度に関わる問題となる．本節ではそれらの要因について議論する．

7.2.1　スピーカとマイクの設置位置による影響

5 章において，物体にプロトタイプシステムの取り付けを行う際，振動スピーカとピエゾマイクの設置場所を，手が直接触れにくいという条件のもと，おおまかに決定した．しかしながら，これらの位置は触れ方による振動特性の変化の仕方に影響を与える．このとき，認識対象とする各触れ方の間で，振動特性が大きく異なるようであれば，SVM による識別は容易になる．これは，サポートベクトル間の距離が大きくなり，分類境界が単純になるためである．一方で，それらの振動特性にあまり差がない場合，分類境界は複雑になる．この場合，SVM のパラメータ最適化を行うことにより，複雑な分類境界を持つモデルも構築できるが，前者と比べて汎化能力が低下する．よって，プロトタイピングのような短期的な利用における

影響は軽微であるが，長期的な利用や騒音環境における利用を考えた場合，なるべくモデルを単純化すべきである．そのためには，スピーカとマイクの設置場所の最適化を必要とする．スピーカとマイクの最適な設置場所を求めるには，理論モード解析によるシミュレーションを行うか，実験的手法により，位置変更と把持を繰り返し，振動特性の変化を観測する必要がある．しかしながら，理論モード解析には物体の形状や材質等の構造情報を要する．また，実験的手法の場合，設置場所と触れ方の組み合わせが膨大になり，計算が高コストとなる．

7.2.2　時間経過による影響

現在のところ，本手法には，システムの長時間の使用に伴う振動特性の変化により，時間経過とともに認識精度が低下するという問題がある．この問題に関して，全ての原因はまだ明らかになっていないが，いくつかの確認した事例について述べる．

振動の増幅に伴う発熱

プロトタイプシステムで使用した振動スピーカ（電磁誘導式）に対して，アンプによる増幅を行った上で動作させたところ，時間経過と共に，振動部の発熱と，振動特性の変化があった．一方で，出力レベルを下げた場合発熱は抑えられ，振動特性の変化もほとんどなくなった．6 章で用いた圧電式の振動スピーカをアンプで増幅させた場合については，今後実験する必要がある．

粘着力の変化

本手法では，振動スピーカとピエゾマイクの固定に両面テープを用いた．しかし，両面テープの粘着力は時間経過と共に減衰するため，それによって振動の伝達効率が変化する．この様子は，貼り付け時に強く押しこむ事によって短時間で観測できる．今後は，時間経過による粘着力低下の影響を長期的に観察し，安定してシステムを使用出来る期間を求めたい．また，接着剤を使用した場合の影響についても確認する必要がある．

触れること以外による境界条件の変化

触れ方の認識を行う対象物体が，複数の部品によって構成される構造物の場合，各部品の接合点は，振動系における境界条件としてとらえることができる．例えば 6 章に述べた端末は，ケースと本体を部品とした構造物とみなすことができる．5.3 節に述べた玩具についても，前面と背面の部品によって構成される構造物である．このような物体の場合，把持によって部品間の接合関係が変化することがある．手を離した後もその関係が元に戻らない場合，以降の振動特性に影響を与える．そのため，本手法は，単一の部品からなる構造物に対して適用しやすく，複数の部品からなる構造物に対しては適用が難しいといえる．

第 8 章　結論と今後の課題

本論文において 1 組のスピーカとマイクを使用したアクティブ音響センシングにより，安価かつ手軽に物体の触れ方の認識を行う手法を提示し，プロトタイプシステムの実装を行った．また，作成したプロトタイプシステムを用いて，身の回りの物体に対して本手法を適用し，触れ方の認識を行った．携帯情報端末において触れ方の認識を行うスタンドアロンシステムを実装し，個人利用者の短期的な利用における認識精度の評価を行った結果，7 種類の触れ方の認識精度が 83.63%となった．

今後の課題として，本手法の適用可能範囲の探索と長期的な利用における認識精度の向上があげられる．

謝辞

本研究を進めるにあたり，志築文太郎先生，田中二郎先生，三末和男先生，高橋伸先生には多くのご指導及びご助言をいただきました．特に志築文太郎先生には研究の進め方，論文の執筆など関して大変多くのご指導をいただきました．また，物品の使用にあたり，様々なご助言や購入の手引きをしていただきました．心より感謝申し上げます．

本研究で使用するハードウェアを作成するにあたり，工作センター及び技術室の職員の方々には，ご助言のみならず精巧な加工をしていただきました．深く感謝申し上げます．

田中研究室の皆様には，研究活動において様々なアドバイスをいただきました．一部の方には被験者実験の被験者としてご協力いただきました．誠にありがとうございます．WAVEチームの皆様にはチームゼミやその他の生活の中で，研究に関するアドバイスを頂きました．先輩方には資料や論文の執筆に関しても丁寧なご指導をいただきました．ありがとうございました．

最後に，自分の生活を支えて下さった両親，日常生活でお世話になった友人，本研究をご支援くださった皆様に心から感謝申し上げます．

参考文献

[CHLC12] Lung-Pan Cheng, Fang-I Hsiao, Yen-Ting Liu, and Mike Y. Chen. irotate grasp: automatic screen rotation based on grasp of mobile devices. In *Adjunct proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST Adjunct Proceedings '12, pp. 15–16, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[Chr03] D'Ambrose Christopher. Frequency range of human hearing. In *The Physics Factbook*. 2003.

[CL11] Chih-Chung Chang and Chih-Jen Lin. Libsvm: A library for support vector machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, Vol. 2, No. 3, pp. 27:1–27:27, May 2011.

[Col09] Tim Collins. Active acoustic touch interface. *Electronics Letters*, Vol. 45, No. 20, pp. 1055 –1056, 24 2009.

[GMPT12] Sidhant Gupta, Daniel Morris, Shwetak Patel, and Desney Tan. Soundwave: using the doppler effect to sense gestures. In *Proceedings of the 2012 ACM annual conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 1911–1914, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[GWP12] Mayank Goel, Jacob Wobbrock, and Shwetak Patel. Gripsense: using built-in sensors to detect hand posture and pressure on commodity mobile phones. In *Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '12, pp. 545–554, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[HBW12] Sungjae Hwang, Andrea Bianchi, and Kwangyun Wohn. Micpen: pressure-sensitive pen interaction using microphone with standard touchscreen. In *Proceedings of the 2012 ACM annual conference extended abstracts on Human Factors in Computing Systems Extended Abstracts*, CHI EA '12, pp. 1847–1852, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[HFH$^+$09] Mark Hall, Eibe Frank, Geoffrey Holmes, Bernhard Pfahringer, Peter Reutemann, and Ian H. Witten. The weka data mining software: an update. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, Vol. 11, No. 1, pp. 10–18, November 2009.

[HH08] Chris Harrison and Scott E. Hudson. Scratch input: creating large, inexpensive, unpowered and mobile finger input surfaces. In *Proceedings of the 21st annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '08, pp. 205–208, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[HSH11] Chris Harrison, Julia Schwarz, and Scott E. Hudson. Tapsense: enhancing finger interaction on touch surfaces. In *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '11, pp. 627–636, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[KCC+06] Kee-Eung Kim, Wook Chang, Sung-Jung Cho, Junghyun Shim, Hyunjeong Lee, Joonah Park, Youngbeom Lee, and Sangryong Kim. Hand grip pattern recognition for mobile user interfaces. In *Proceedings of the 18th conference on Innovative applications of artificial intelligence - Volume 2*, IAAI'06, pp. 1789–1794. AAAI Press, 2006.

[KVSD10] Ye-Sheng Kuo, Sonal Verma, Thomas Schmid, and Prabal Dutta. Hijacking power and bandwidth from the mobile phone's audio interface. In *Proceedings of the First ACM Symposium on Computing for Development*, ACM DEV '10, pp. 24:1–24:10, New York, NY, USA, 2010. ACM.

[SBG+11] Hyunyoung Song, Hrvoje Benko, Francois Guimbretiere, Shahram Izadi, Xiang Cao, and Ken Hinckley. Grips and gestures on a multi-touch pen. In *Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems*, CHI '11, pp. 1323–1332, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[SPH12] Munehiko Sato, Ivan Poupyrev, and Chris Harrison. Touché: enhancing touch interaction on humans, screens, liquids, and everyday objects. In *Proceedings of the 2012 ACM annual conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 483–492, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[TB09] Brandon T. Taylor and V. Michael Bove, Jr. Graspables: grasp-recognition as a user interface. In *Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems*, CHI '09, pp. 917–926, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[WB09] Raphael Wimmer and Sebastian Boring. Handsense: discriminating different ways of grasping and holding a tangible user interface. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, TEI '09, pp. 359–362, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[Wim10] Raphael Wimmer. Flyeye: grasp-sensitive surfaces using optical fiber. In *Proceedings of the fourth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction*, TEI '10, pp. 245–248, New York, NY, USA, 2010. ACM.

[Wim11] Raphael Wimmer. Grasp sensing for human-computer interaction. In *Proceedings of the fifth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction*, TEI '11, pp. 221–228, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[巻口 12] 巻口誉宗, 吉川浩, 棟方渚, 小野哲雄. スマートフォンの音声入出力端子をインターフェースとする脈波測定装置の実装と評価. インタラクション '12, pp. 593–598. 一般社団法人情報処理学会, 2012.

[和夫 91] 和夫吉田, 健蔵野波. 振動と運動の制御手法の展望. 日本機械学會論文集. C 編, Vol. 57, No. 534, pp. 345–354, 1991.

付録

次ページ以降に 6.3 節の実験に関連する書類を示す．1 つ目は被験者に配布した実験同意書である．2 つ目は被験者に配布したアンケート及びその結果である．