

アクティブ音響センシングを用いた物体識別と位置推定

岩瀬 大輝^{*1} 伊藤 雄一^{*1} 秦 秀彦^{*1} 山下 真由^{*1} 尾上 孝雄^{*1}

Object Recognition and its Position Detection by using Active Acoustic Sensing

Daiki Iwase^{*1}, Yuichi Itoh^{*1}, Hidehiko Shin^{*1}, Mayu Yamashita^{*1} and Takao Onoye^{*1}

Abstract - Systems that get various information such as object labels and object positions in real world have a great deal of potential in realizing unconscious computing. Therefore, we propose a method to get various information of objects by using active acoustic sensing. Active acoustic sensing is a method that estimates a rich context of objects. Attaching a microphone and a vibration speaker on an object surface, propagating a specific sound in the object and analyzing the frequency response, we estimate states of the object. In this paper, especially, we propose a method to recognize an object and detect its position, and suggest the effectiveness through evaluation experiments.

Keywords : Active acoustic sensing, Object recognition, Position detection and Frequency response

1. はじめに

日常生活空間には様々な物体が存在し、人々は多くの道具、機械、器具を用いて活動している。そのため、人間の行動、状態、周囲の環境などをコンピュータが認識し、これらを支援するためには、実空間に存在する物体が、どこでどのように使用されているかといった、物体の状態や状況を認識することが重要となる。実空間の物体を認識する技術は古くから研究がなされており、画像処理技術を用いた日常空間に存在する物体位置の認識などが進展してきた。一方で、近年のセンサ技術の発達により、加速度センサや光センサ、ジャイロセンサや圧力センサといった様々なセンサを用いて、物体の種類だけでなく、その位置や使われ方まで、コンピュータが認識する技術に注目が集まっている。そういった物体の状態や状況などを、コンピュータが認識することができれば、人が何を、どこで、どのように使用したかなどの詳細な活動情報に基づいた、行動推薦システムなど、人々の生活をより豊かにする情報技術の発展が期待できる。物体の状態や状況は、その種類や位置、加速度など、多角的な物体情報の組み合わせで表され、認識には物体の様々な情報が必要となる。例えば、どの物体がどこに配置されているかを認識するためには、物体の種類とその位置をそれぞれ取得する必要がある。物体の使用状態を認識するためには、物体の種類とその内部状態や位置、姿勢などの情報を取得する必要がある。したがって、物体の状態・状況認識において、物体の様々な情報を同時取得するシステムは有用であると考えられる。

そこで本研究では、多角的な物体情報の取得手法として、アクティブ音響センシングを用いた物体情報識別手

法を提案し、検討する。アクティブ音響センシングとは、物体表面にマイクとスピーカを配し、特定の音響信号を物体内部に伝搬させ、その応答の周波数解析をすることで状態を推定する手法である。物体の周波数特性には、その材質や形状など、様々な要因が影響を与えるため、取得データから要因ごとに変化する特徴を抽出することができれば、物体情報を多角的に取得できると考えられる。多角的な物体情報の取得には、一元的な測定装置を複数組み合わせる手法も考えられるが、アクティブ音響センシング装置は実装が容易かつ安価であるため、普及時のコストを抑えることができるという利点がある。

本稿では、アクティブ音響センシングを用いた多角的な物体情報取得の中でも特に、物体識別、ならびに位置推定を検討する。ピエゾ素子によって生成する音響信号を伝搬させる物体としてアクリル製平板を用意し、その上に置かれた物体の情報の取得を目指しプロトタイプを実装した後、評価実験を行い、提案手法の識別精度を評価する。

2. 関連研究

2.1 物体情報識別

物体情報を識別する研究として、YeoらのRadarCatは、物体に放射した電波の跳ね返りをマルチチャンネルで観測し、random forest classifierを用いて物体識別を可能とした^[1]。Laputらは、電子機器の電磁ノイズを測定、学習することで、触れた物体を瞬時に識別するシステムを提案した^[2]。しかし、物体識別を行ったこれらの研究では、得られる情報はその物体が何であるかといった単一なものに限られ、識別した物体の位置や形状、重量といった複数の情報を同時に取得することができないという欠点がある。また、物体の位置、形状を認識する研究としては、BaudischらのLuminoがある^[3]。これは、光ファイバ

*1: 大阪大学 大学院情報科学研究科

*1: Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University

とマーカを組み合わせたブロックを用いることで、ディスプレイの下からカメラで光ファイバ越しにマーカを認識し、ブロックの位置認識や、重なったブロックの識別からブロックの形状を認識できるシステムである。しかし、このシステムでは、位置や形状の認識をするために物体に特殊な機構をもたせたり、物体にマーカを搭載する必要があり、様々な物体を識別するシステムとしての汎用性を持ち合わせてはいない。このように、物体情報識別手法は多く提案されているが、得られる情報が一元的なものに限られることや様々な物体には適用しづらいといった問題がある。これらの問題に対して音響センシングを用いた手法も提案されている。音響センシングは振動する物体であれば適用可能で、音響の伝搬は、その材質や接触状況などいくつかの要因で変化するという特徴をもつため、様々な物体に対して、多角的な物体情報の取得を実現できる可能性があると考えられる。

2.2 音響センシング

音響を用いて動作や物体情報をセンシングする研究は盛んになされており、それらは、スピーカ等で音響信号を印加しないパッシブなもの、音響信号を印加するアクティブなものに分類することができる。

パッシブ音響センシングは、何らかのアクションによって引き起こされる音響を受信し、信号を解析する手法である。Ament らの The Sound of One Hand は、指先で叩いたり、撫でたりといった動作を、その動作によって起こる骨伝導音響を解析し認識するシステムである^[4]。

Murray-Smith らは、質感のある表面に対し、ユーザのスクラッチ動作や撫でるといったインタラクションによって起こる音響から、そのインタラクションが何であるかを識別した^[5]。Harrison らは、質感のある物体の表面をスクラッチすることで生まれる独特な音響を用いた入力手法に関して検討した^[6]。また、Harrison らは、物体に彫られたバーコード状の切れ目を、爪などの硬いものが横切った時に生まれる音響から、そのバーコードの単一の ID を認識するシステムである Acoustic Barcodes を提案した^[7]。Paradiso らは、音響の到達時間差を用いて、多数のマイクで、ガラスシート上のタップ位置を推測した^[8]。Harrison らの Skinput は、生体音響センサを用いることで、肌上のタップ位置を推測する^[9]。物体表面へのタップを通じた物体の識別としては、Harrison らや Lopes らが行ったものがある。Harrison らは、タップ音からタップに使われた物体のタイプを特定し^[10]、Lopes らは、どの指でタップしたかを特定した^[11]。

一方、アクティブ音響センシングは、スピーカ等を用いて音響を与え、その応答を受信し、解析する手法である。Stewart らの Active Sonar は、音響を発生させ、その応答が返ってくるまでの時間を測定することで周囲の物体との距離を測定する^[12]。Brenner らの Surface Acoustic Wave(SAW) touch screens は、ガラス板とトランスミッタ、

レシーバ、リフレクタで構成され、ガラス板上のタッチ位置を検出する^[13]。SAW は弾性のある物体の表面を進む波であり、これをトランスミッタから送信し、ガラスのエッジに並べられたリフレクタで反射する。この状態でタッチが起きた時に発生する波の吸収をレシーバで観測し、タッチ位置を測定する。Gupta らは、発生させた音響のドップラー効果から空中でのジェスチャを認識した^[14]。武村らはスピーカと2つのマイクを用いて肘の骨伝導音響から肘の角度を認識した^[15]。Collins は、ピエゾトランスミッタと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^[16]。Laput らの Acoustruments は、アクティブ音響システムを利用し、携帯端末等に物理インタフェースを追加する手法を提案した^[17]。

パッシブ音響センシングに対するアクティブ音響センシングの利点として、振動を伴わないソフトタッチやタッチ圧力の変動を取得できることが挙げられる。大野らの Touch&Activate は、この点を利用し、アクティブ音響センシングを用いて物体の触れ方を認識するシステムである^[18]。これは、認識したい把持状態をラベルとし、アクティブ音響センシングで得られる周波数応答を特徴量とした機械学習を用いて、状態を推定する。大野らの研究では物体の把持状態の認識のみにアクティブ音響センシングを用いているが、音響の応答は把持以外にも様々な要因で変動するため、同時に物体の様々な情報が取得可能であると考えられる。本研究では、アクティブ音響センシングを用いて多角的な物体情報の取得を目指す。

3. アクティブ音響センシングを用いた物体識別と位置推定

3.1 センシング原理

物体の周波数特性は、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、物体への荷重や拘束による物体表面の状態(境界条件)の3つの要因によって変化する^[18]。これらの周波数特性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も応用されている^[19]。物体の形状、材質は物体の種類によって異なるため、周波数特性の違いから物体の種類を識別することができると考えられる。また、境界条件は、物体の接触面の形状や接触位置、接触面に対する荷重などから変化し、周波数特性に影響を与える。そのため、周波数特性の変化から物体の位置情報、ならびに物体の形状を取得できると考えられる。周波数特性の取得・解析には、アクティブ音響センシングを用いる。本稿では、スピーカからアクリル製平板にスイープ信号を与え、その上に置かれた物体の状態や状況によって変化する応答をピエゾマイクで取得し、Fast Fourier Transform (FFT) を用いて周波数領域に変換することで

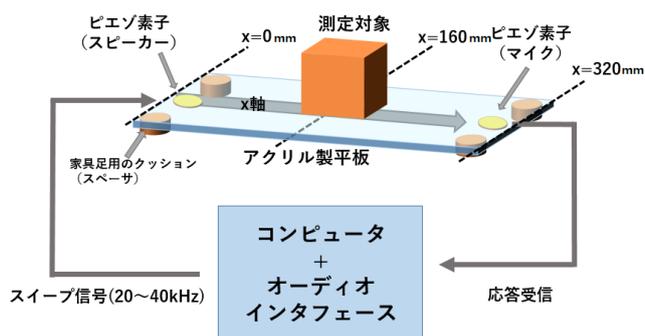


図1 システム概要

Fig.1 System overview

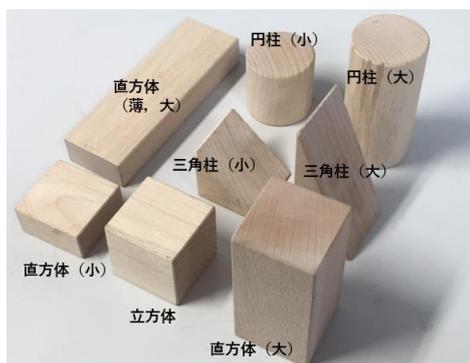


図2 実験に用いた積み木の外観

Fig.2 Building blocks used in experiments

表1 実験に用いた積み木の詳細

Table.1 Detail of building blocks used in experiments

ラベル	重さ [g]	高さ [mm]	底面形状	底面積 [mm ²]	圧力 [g/mm ²]
直方体 (小)	32	22	44mm × 44mm の正方形	19.36	1.65
立方体	60	44	44mm × 44mm の正方形	19.36	3.10
直方体 (大)	102	90	44mm × 44mm の正方形	19.36	5.27
直方体 (薄, 大)	86	22	44mm × 135mm 長方形	59.40	1.45
三角柱 (小)	29	41	44mm × 44mm の正方形	19.36	1.50
三角柱 (大)	55	90	39mm × 44mm の正方形	17.16	3.21
円柱 (小)	47	45	直径 44mm の円	15.21	3.09
円柱 (大)	91	90	直径 44mm の円	15.21	5.98

周波数特性を解析する。スイープ信号とは、時間経過に応じてその周波数が変化する信号を指す。スイープ信号は様々な周波数を持っているので、応答から周波数特性を解析することができる^[18]。得られた周波数特性と各状態を機械学習などで対応付け、その結果から物体の位置や形状などの物体情報を識別する。

3.2 実験システム

アクティブ音響センシングを物体情報識別に応用する上で、振動素子を測定したい物体に直接装着し、周波数特性を取得する直接方式と、専用の装置に振動素子としてピエゾ素子を装着し、装置上に物体を置き、その物体の情報を間接的に周波数特性から取得する間接方式が考えられる。直接方式の場合、スイープ信号に対する応答が物体の影響を直接受けるといった利点が存在し、形状情報をより正確に反映すると考えられる。しかし、液体や球には振動素子の装着が難しく、また位置情報を取得することができない。そこで本稿では、後者の間接方式を用いる。システム概要を図1に示す。縦180mm、横320mm、厚さ5mmの直方体型の亚克力板の四隅に、直径32mm、厚さ5mmの家具足用のフェルトクッションを、亚克力板の辺がクッションの接線になる位置に取り付ける。これは外部からの振動が亚克力板に伝わるのを防止する。また、マイク及びスピーカとして、直径20mm、厚さ0.3mmの円盤型のユニモルフ式ピエゾ

素子を、亚克力板の短辺方向のフェルトクッション同士を中心線を素子の中心が通り、亚克力板の長辺から等距離の位置に、それぞれ瞬間接着剤（セメダイン社のセメダイン PPX:品番 CA-522）を用いて取り付ける。スイープ信号として、1.0秒間に周波数が20000Hzから40000Hzまで一定スピードで増加する正弦波を用いる。この帯域の周波数を用いる利点として、音声に聞こえないこと、環境ノイズに強いことが挙げられる。信号の送受信は、TASCAM社製のオーディオインターフェース（US-4x4-SC）を経由して、サンプリング周波数96000Hzで行う。このとき、オーディオインターフェースを介してピエゾ素子と送受信できる信号に含まれる最大周波数はサンプリング定理より48000Hzとなる。ピエゾマイクから取得した振動応答からフレームサイズが512点のハミング窓を用いて順次データを抽出し、FFTを施す。ここでハミング窓の重複幅は511点とする。得られた周波数スペクトルから各周波数における振幅スペクトルの最大値を取得し、これを物体の周波数特性として用いる。

3.3 評価実験

3.3.1 物体識別

本実験では、アクティブ音響センシングを用いて、図2に示す8種類の異なる形状の積み木を識別し、その識別精度を評価する。識別は、機械学習のひとつであるSupport Vector Machine (SVM)で行う。亚克力板に乗

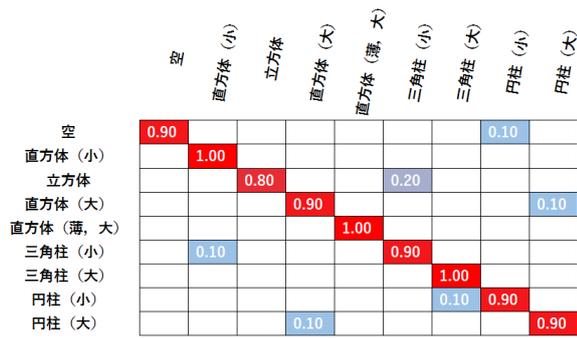


図3 物体識別の結果

Fig.3 Result of object recognition

っている積み木をラベルとし、その時の周波数特性をそれぞれ SVM で学習させ、交差検証の結果からその識別精度を評価する。

まず、アクリル板に何も乗っていない状態で、一方のピエゾ素子からスイープ信号を送信し、もう一方のピエゾ素子でその応答を取得する。次に、8種類の各積み木について、アクリル板の中心に積み木底面の中心が一致するように置き、それぞれ応答を取得する。この試行を10回繰り返す、合計90個の周波数特性を取得した。得られた周波数特性とラベルの組を5つのグループに分割し、交差検証を行った。5つのグループの中から1グループを選択し、残り4グループを訓練データとしてSVMに学習させる。学習させたSVMを用いて、選択したグループを識別し、その識別率を算出する。この試行を全グループに対して行い、識別率の平均を求める。また、得られた周波数特性を各ラベルで平均化し、アクリル板に何も乗っていない状態からの差分を求め、波形変化も確認する。

交差検証の結果をまとめたコンフュージョンマトリクスを図3に示す。縦軸が正解ラベル、横軸が推定結果である。交差検証の結果、識別率は92.2%となった。最もよく識別できたのは直方体(薄, 大)の積み木であり、全ラベルの中で唯一、他のラベルと識別されることも、他のラベルがこのラベルであると誤識別されることもなかった。識別に誤りがあったのは試験データ90個に対して7個で、立方体を三角柱(小)に誤ったのが2つ、何も乗っていないラベルを円柱(小)に、直方体(大)を円柱(大)に、三角柱(小)を直方体(小)に、円柱(小)を三角柱(大)に、円柱(大)を直方体(大)に、それぞれ誤ったのが1つずつであった。今回得られた識別率は十分に高く、本手法を用いた物体識別が有効であると考えられる。

3.3.2 位置推定

本実験では、アクリル板に乗っている積み木の位置を5mm単位で移動させ、アクティブ音響センシングで位置を識別できるかを検証する。識別は、3.3.1節同様、SVMで行う。アクリル板に乗っている積み木の位置をラベル

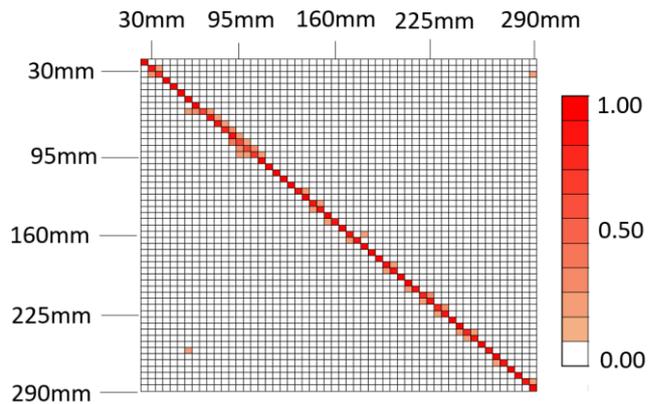


図4 位置識別の結果

Fig.4 Result of position detection

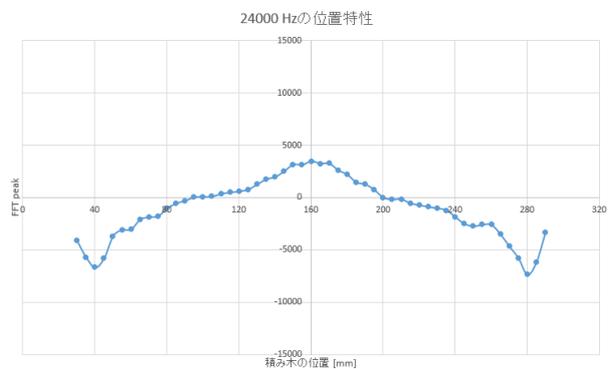


図5 24000 Hzにおける振動特性と物体位置の関係

Fig.5 Relationship between frequency response and position

とし、その時の周波数特性をそれぞれSVMで学習させ、交差検証の結果からその識別精度を評価する。積み木は図2に示した積み木のうち、一辺44mmの立方体の形状のものを用いる。

まず、アクリル板に何も乗っていない状態で、一方のピエゾ素子からスイープ信号を送信し、もう一方のピエゾ素子でその応答を取得する。信号を送信したピエゾ素子側のアクリル板の端から30mmの位置に積み木の中心が一致するように積み木を置き、同様に応答を測定する。そこから5mm刻みで、端から35mm, 40mm, ..., 285mm, 290mmの計53箇所の地点にそれぞれ積み木を設置し、それぞれの位置に対して同様に周波数特性を測定する。アクリル板に何も乗っていない状態と積み木を各地点に置いた状態での測定を各10回行う。得られた540個の周波数特性と状態の組を5つのグループに分割する。その中から1グループを選択し、残り4グループを訓練データとしてSVMに学習させる。学習させたSVMを用いて、選択したグループを識別し、その識別率を算出する。この試行を全グループに対して行い、識別率の平均を求める。交差検証の結果をまとめたコンフュージョンマトリクスを図4に示す。図3と同様に、縦軸が正解位置、横軸が推定位置である。交差検証をした結果、識別率は91.7%であった。認識を誤ったうちのほと

んどは、その前後 5 mm の位置に誤認識していたが、35 mm を 290 mm に、260 mm を 55 mm と大きく識別を誤ることもあった。また、得られた振動特性と物体位置の関係性を見てみると、多くの周波数で、積み木の位置がアクリル板の中心である端から 160 mm の位置を軸に、対称になっている様子が見られた。図 5 にその一例として、24000 Hz における振動特性と物体位置の関係のグラフを示す。横軸がアクリル板の端から見た積み木の位置であり、縦軸は振幅スペクトルである。今回得られた識別率から、位置情報が取得可能であるとともに、周波数帯域ごとの位置特性に対称性が存在することが示された。

4. 考察

4.1 物体識別

3.3.1 節の結果より、積み木の識別精度は 92.2% であり高い精度で積み木を識別できていることが確認された。直方体（薄，大）の積み木が最もよく識別できた原因として、底面積が他と大きく異なっていたことが考えられる。図 2 に示すように、直方体（薄，大）の積み木の底面積は他の積み木と比べ 3 倍近いものとなっており、このパラメータが周波数特性に大きく影響を与えたと考えられる。また、図 2 の誤認識があった積み木のうち、直方体（小）と三角柱（小）、直方体（大）と円柱（大）、三角柱（大）と円柱（小）の三組はすべて圧力が似ている組である。このため、周波数特性に影響を与える物体の境界条件が類似し、波形から物体の識別ができなかったと考えられる。一方で、境界条件の類似以外の要因によって誤認識が起こったと考えられるのは、何も乗っていない状態と円柱（小）、立方体と三角柱（小）の 2 組である。前者に関しては、系の対称性によって、系の中心から見た同心円上の圧力の影響が弱められたと考えられる。直方体（大）と円柱（大）の誤認識に関しても、圧力の差が小さいことに加え、同心円上の圧力の影響を弱める働きが、より誤認識を引き起こしやすくなったとも考えられる。後者の三角柱（大）と円柱（小）は、三角柱（大）の方が圧力が大きく対称性も見られないにもかかわらず誤認識が起こっているため、圧力や対称性以外の誤認識の原因を検討する必要がある。今後、更に詳しく底面積や圧力による周波数特性への影響を観測する必要がある。

4.2 位置推定

3.3.2 節の結果より、アクリル平板の中心軸（160mm）に対して、ほぼ対称の位置に積み木を置いた場合（35 mm と 290 mm、55 mm と 260 mm）には識別を誤ることが確認された。しかし、交差検証の結果、識別精度は 91.7% であり、高い精度で位置を識別可能であることが示された。識別精度が高くなった原因として、周波数によっては完全に対称の関係にならない部分があることが上げられる。本システムでは SVM を用いて物体情報を識別しているため、目視では観測が難しい小さな違いを学習し、

識別性能が向上したと考えられる。他の原因として、ハードウェアの作成段階において完全に対称な系を作れなかったことが考えられる。本装置はピエゾ素子の固定に接着剤を用いており、接着状態が両ピエゾ素子間で異なっていた可能性があり、これが系の対称性に影響を与えたと考えられる。今後、接着状態が周波数特性に与える影響の定量的評価を行い、系の対称性を確保した上で、再度同様の測定を行い、系の対称性の影響を検討する必要がある。系の対称性が周波数特性に強く影響する場合、位置の対称性を意図的に崩すことで、全ての位置の識別が可能であると考えられる。また、ピエゾ素子がスピーカとマイクという異なる役割をしているにも関わらず、対称的な結果が表れたことから、振動の印加位置や受信位置は周波数特性に影響を与えないと考えられる。このことから、取得した応答は系全体の応答であることが推測され、装置の全域が測定面になる可能性を示している。

また、図 5 より、両端各 2 点を除き、ほぼ位置に合わせて様に変化している様子が見られる。これは、振幅スペクトルの値を用いて対称軸からの距離を算出できることを示唆している。位置情報は連続値であるため、識別に SVM などの classifier を用いると、クラス数が非常に多くなってしまい、識別精度が落ちる可能性があり、また、事前に学習させておく手間もかかる。位置情報を周波数特性から算出することで、classifier に頼らない位置推定が可能となり、クラス数に基づく問題が解決され、簡単なキャリブレーションのみで位置情報の取得が可能となる。今後は、他の物体に対しても同様の実験を実施することで距離応答性の変化を詳細に観察するとともに、音響工学の知見より定量的なモデルを検討しなければならないと考えられる。

4.3 今後の展望

今後の展望としては、複数物体を置いた場合の物体情報識別が考えられる。音響は波として伝わっているため、波の重ね合わせなどを考慮することで、各状態の学習結果から複数の物体の状態を識別できると考えている。また、容器内の物質が個体であるか液体であるかの識別や、液体の量の取得など、液状物体の情報識別への応用も考えられる。音響を容器内部に伝搬させることで重量からでは識別できない液体の種類などの識別が可能となる。その際、音響を効率よく伝搬させる方法や、液体の状態によって効率よく音響を変化させる容器などを検討する必要がある。

5. おわりに

本稿では、アクティブ音響センシングを用いた物体情報識別手法を提案した。また、手法の検討のため、アクリル製平板、ピエゾ素子、オーディオインタフェースなどからなるセンシング装置のプロトタイプを実装し、評価実験を行い、提案手法の識別精度を評価した。物体識

別精度の評価実験では、立方体や三角柱など形状の異なる8種類の積み木を識別し、その識別率は92.2%となった。位置推定の実験では、5mm間隔53箇所の位置情報を識別し、その識別率は91.7%となった。これらの評価実験から提案手法を用いた物体識別及び位置推定の可能性が示された。今後の課題として、位置情報は連続値であり、SVMなどのclassifierは、学習の手間などの面から不向きであるため、回帰モデルなどを検討する必要がある。

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費JP16H02891の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] H.S. Yeo, G. Flamich, P. Schrempf, D. Harris-Birtill, and A. Quigley: Radarcat: Radar: categorization for input & interaction; Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, pp.833–841, (2016)
- [2] G. Laput, E. Brockmeyer, S.E. Hudson, and C. Harrison: Acoustruments: Passive, acoustically-driven, interactive controls for handheld devices; Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.2161–2170, (2015)
- [3] P. Baudisch, T. Becker, and F. Rudeck: Lumino: Tangible building blocks based on glass fiber bundles: Invited demo; ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, pp.299–299, (2010)
- [4] B. Amento, W. Hill, and L. Terveen: The sound of one hand: A wrist-mounted bio-acoustic fingertip gesture interface; CHI '02 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp.724–725, (2002)
- [5] R. Murray-Smith, J. Williamson, S. Hughes, and T. Quaaade: Stane: Synthesized surfaces for tactile input; Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1299–1302, (2008)
- [6] C. Harrison, and S.E. Hudson: Scratch input: Creating large, inexpensive, unpowered and mobile finger input surfaces; Proceedings of the 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.205–208, (2008)
- [7] C. Harrison, R. Xiao, and S. Hudson: Acoustic barcodes: Passive, durable and inexpensive notched identification tags; Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.563–568, (2012)
- [8] J.A. Paradiso, C.K. Leo, N. Checka, and K. Hsiao: Passive acoustic knock tracking for interactive windows; CHI '02 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp.732–733, (2002)
- [9] C. Harrison, D. Tan, and D. Morris: Skinput: Appropriating the skin as an interactive canvas; Commun. vol.54, no.8, pp.111–118, (2011)
- [10] C. Harrison, J. Schwarz, and S.E. Hudson: Tapsense: Enhancing finger interaction on touch surfaces; Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.627–636, (2011)
- [11] P. Lopes, R. Jota, and J.A. Jorge: Augmenting touch interaction through acoustic sensing; Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, pp.53–56, (2011)
- [12] C. Wylie, and R.R. Mackie: Active sonar target detection and reporting: Perceived consequences and their effects on performance; Technical report, DTIC Document, (1972)
- [13] M.C. Brenner, and J.J. Fitzgibbon: Surface acoustic wave touch panel system; The Journal of the Acoustical Society of America, vol.84, no.4, pp.1578–1578, (1988)
- [14] S. Gupta, D. Morris, S. Patel, and D. Tan: Soundwave: Using the doppler effect to sense gestures; Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1911–1914, (2012)
- [15] K. Takemura, A. Ito, J. Takamatsu, and T. Ogasawara: Active bone-conducted sound sensing for wearable interfaces; Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium Adjunct on User Interface Software and Technology, pp.53–54, (2011)
- [16] T. Collins: Active acoustic touch interface; Electronics letters, vol.45, no.20, pp.1055–1056, (2009)
- [17] G. Laput, E. Brockmeyer, M. Mahler, S.E. Hudson and C. Harrison: Acoustruments: Passive, acoustically-driven, interactive controls for handheld devices; ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies, pp.3:1–3:1, (2015)
- [18] M. Ono, B. Shizuki, and J. Tanaka, “Touch & activate: Adding interactivity to existing objects using active acoustic sensing,” Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.31–40, (2013)
- [19] 吉田和夫, 野波健蔵, “振動と運動の制御手法の展望,” 日本機械学会論文集 C 編, vol.57, no.534, pp.345–354, (1991)