

# BathDrum2: 叩打位置と音色を利用した浴槽打楽器

伊藤大毅<sup>†1</sup> 平井重行<sup>†2</sup>

**概要:** 我々は浴槽縁を手指で叩くことにより、様々な浴室内機器やアプリケーションの操作を行うインタフェースシステムを開発している。このシステムは、既存浴槽の縁の裏側に複数ピエゾセンサを配置し、浴槽縁上面を手指で叩いた際の叩打音から、その位置（叩いた場所）、音色（叩き方）、叩打パターン（叩くリズム）を検出し、それら検出結果を操作イベントとして様々な応用システムで利用可能なものとなっている。これまで、叩打位置検出の機能を中心に他システムとの連携や、日常生活を支援・演出する応用システムの制作などを行ってきた。今回は叩打位置に加えて叩き方の違いによる音色判別を行う機能も追加し、それを活用した打楽器エンタテインメントシステム BathDrum2 を制作した。本報告では、叩打位置と音色の検出手法およびその性能と共に BathDrum2 の遊び方やその内容について紹介する。

## 1. はじめに

ユビキタスコンピューティングの概念を住宅に適用したスマートハウス研究が数多く行われている 1) - 6)。それらでは、住宅内の日常生活において快適さを追求するだけでなく、エンタテインメント要素を含めた QoL (Quality of Life) を向上させる環境を提供する研究も数多く行われている。その多くがリビングルームやキッチンを対象としたものであるなか、我々は水場である浴室向けのユーザインタフェース (UI) 構築およびその応用について研究を行ってきた 6) - 10)。これら浴室のシステムでは、基本的にセンサやディスプレイ機器などを浴槽内部や天井裏、床下などに埋め込んでおり、特にそれらを使わずとも従来の浴室として普通に利用できる(目に見えない)ものとなっている。それらの中でも、静電容量タッチセンサにより浴槽で「触れる」インタフェースを構成する TubTouch 9) は、オーディオやテレビ、調光照明などの既存設備のリモコンの代わりが可能で、身障者や高齢者向けの UI として機能させることができる。また、TubTouch を応用することで、浴槽に手を近付けて演奏するテルミン Batheremin や、子供が遊べる Bathtuboom や BathCount といったアプリケーションなどを提供し、これまでにない新たな浴室の楽しみ方を提案している。さらに Batheratch 9) では、浴槽裏側に設置したピエゾセンサも用いて、浴槽をこする音を検出して DJ スクラッチ演奏を行うシステムを構築し、「こする」インタフェースを実現した。

本研究は、これら「触れる」「こする」インタフェースに加えて、浴槽縁上面を手指で叩く音を利用した「叩く」操作インタフェースシステムを開発している 21) - 23)。これは、浴槽裏側に設置したピエゾセンサにより、浴槽を叩いた際の固体振動を直接音響入力とし、音響信号処理によって叩く位置、音色、パターンの検出を行って操作イベントとして出力する。そして、TubTouch 同様に浴室内機器やアプリケーションの操作などに利用できるものとなってい

る。これまでに、このシステムの応用として、叩打位置にシンバルやスネアドラムといったそれぞれ異なる楽器を割り当てることで、浴槽を叩いてドラム演奏ができる BathDrum を制作した 21)。また他にも、叩打位置検出を利用したモグラ叩きゲーム、早押しクイズボタンといったエンタテインメントシステムの実装を行ってきた。

今回、我々は叩打位置の検出処理に加えて「叩き方（叩打音色）」の判別と「叩くリズム（叩打パターン）」の認識の処理を実装を行った。その上で、叩打位置と叩打音色の処理を活用した浴槽打楽器システム”BathDrum2”を提案する。BathDrum2 は既存の位置検出のみの BathDrum に加え、叩き方の違いの判別処理によって演奏方法のバリエーションを拡張し、より打楽器らしいアプリケーションを実現している。本稿では、「叩打位置検出」と「叩打音色判別」の処理、およびリアルタイム処理システムの実装について、その性能と共に述べる。また、「位置検出」と「音色判別」のその他の応用についても説明する。

## 2. 関連研究

### 2.1 浴槽内をエンタテインメント空間とする研究

浴槽内をエンタテインメント空間とする研究としては、入浴中の動作を湯水の動きから検出し、それを元にインタラクティブなサウンドを生成し、楽しみながら入浴ができる Bathonify 11)がある。また、浴槽湯面の手指の動きをカメラ画像から検出し、それを元に湯面に投影されたディスプレイを操作する Aquatop Display 12)がある。これにより、浴室内で湯船に浸かりながらの動画コンテンツの再生や、シューティングゲームの操作などを実現している。ただ、これらは浴槽そのものを操作インタフェースとするのではなく、湯水を操作インタフェースにするものである。

### 2.2 叩打位置（叩く場所）検出に関する研究

叩打音や衝突音の位置に基づいて処理を行うシステムの研究としては、まず Paradisso らによる Tapper 13)が挙げられる。これは街中のショーウィンドウなどを叩くインタフェースとする研究で、平面ガラス板に複数のピエゾセン

<sup>†1</sup> 京都産業大学大学院 先端情報学研究所

<sup>†2</sup> 京都産業大学 コンピュータ理工学部

サを取り付け、ガラス板をロックした際の振動が各センサに伝搬する時間差からロック位置を算出している。また、Ishii らによる PingPongPlus 14) においても、卓球台の裏面に取り付けられた複数のマイクによってピンポン球が卓球台の上面で跳ねる音を検出し、その信号の到達時間差から跳ねた位置を検出している。本研究でもこれらと同様に信号の伝達時間差による位置認識を行うが、浴槽縁は幅が狭いため叩打位置検出は1次元的に行うという点や、浴槽は様々な形状があり、振動の伝播が単純でない可能性があるという点でも異なる。

叩打位置を用いる他の研究である Skinput 15) では、ピエゾセンサアレイを組み込んだアームバンドを用い、手指や腕を指先でタップした際の皮膚を伝搬する振動と骨に伝搬して跳ね返る振動のパターンを、SVM によってタップ位置を割り出している。本研究でも複数センサを用いることによって高精度な叩打位置認識は有効であると考えられる。本研究では、BathDrum2 が「楽器」であることとシステムの汎用性に主眼を置き、センサ数と応答速度に考慮して検出処理手法の検討を行なっている。

### 2.3 叩打音色（叩き方）の判別に関する研究

叩打音色（叩き方）を音響的に処理して扱う研究としては、Lopes らがタッチ操作するテーブルトップディスプレイに対し、叩打音を補助的に用いて入力インタフェースに活用するシステムを実現している 17)。ここではディスプレイ表面を指先や拳で叩いた音をピエゾセンサで計測し、周波数解析と SVM によって叩打音を区別している。そして、ディスプレイ上で表示するオブジェクトに対してコピーやペーストなど叩打音に割り当てられた操作を適用するシステムである。Harrison らの TapSense 19) でも同様の処理をスマートフォンの小型端末の音響入力で行い、指先タップやノックなどの検出を GUI 操作へ応用している。また、叩打音の認識ではないが、Harrison らの Scratch Input 20) では、聴診器を用いて、壁や衣服を指先で引っ掻いた音かの振幅の時間変化などから指先の動き（ジェスチャ）を認識して異なる入力を行うシステムを実現している。

一方で、叩打音色（叩き方）を打楽器などセンシングの際のレイテンシが重要な研究として、山本による Possessing Drums 16) が挙げられる。これは身の回りの物を叩く音に任意の音色を割り当てて演奏することができる打楽器システムである。入力された音色に対し、NMF (Nonnegative Matrix Factorization) を用いて音源の駆動タイミングと伝達関数とに分割して伝達関数のみを別に割り当てた音色の伝達関数に差し替え、音色の変換を実現している。比較的小さな音でも処理ができるため、生楽器と同様に様々な表現をすることが可能となっている。同様に安倍らのゲームインタフェースに向けたより高認識率を目指した改良 NMF を用いた叩打音色処理の研究がある 17)。

NMF が Possessing Drums のような楽器やゲームとしてのシステムに利用されていることを考慮すると、BathDrum2 においても NMF による音色判別は有効であると考えられる。また、叩くインタフェースとしてもレイテンシが小さければ応用の幅も広がると考えられる。よって、本研究においては音色判別処理を NMF により行うことを目指し、Possessing Drums の公開プログラムソースコードを活用することとした。

## 3. システム概要

### 3.1 システム構成

本研究システムは、一般的な浴槽の縁裏側にピエゾセンサを取り付け、浴槽縁の叩打を基に打楽器として動作するシステムである。叩打音をピエゾセンサで固体振動として計測し、その音響波形をコンピュータで処理して「叩打位置」や「叩打音色」、「叩打パターン」の組合せに対応した操作イベントをリアルタイムで出力する (図 1)。ここではこの操作イベントによって様々な浴室内機器やアプリケーションを操作することを想定している。BathDrum2 はこのシステムの応用の一つであり、操作イベントに対応した打楽器としてのサウンドをスピーカから出力するアプリケーションとして制作している。例えば、ドラムをスティックやブラシ等の叩くものによる音色の違いを手指での叩き方の違いで表現できる。また、ハイハットを叩く場合ならばオープンかクローズかといった音色の違いを選択できる。本システムの音響センサにはアコースティックギター等で使われる安価なピエゾピックアップ（ピエゾセンサ）を用いている。対象となる浴槽は一般的に普及しているユニット式のシステムバスであり、浴槽の横壁（エプロン壁）は簡単に取り外しができる。これにより浴槽縁の裏側には容易にアクセスでき、センサなどの機器を設置することが可能である。

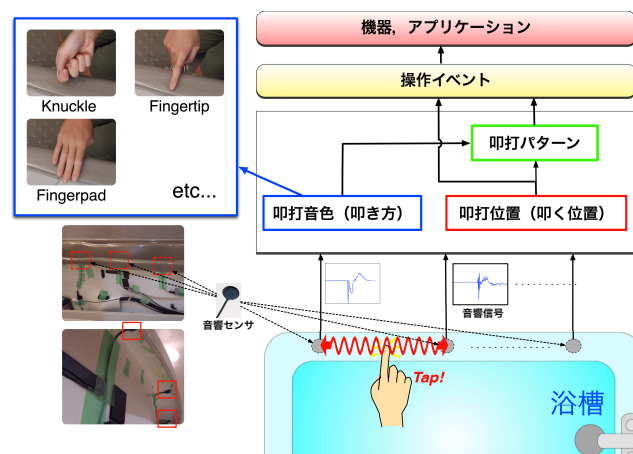


図 1 浴槽叩打インタフェースのシステム概要

## 4. 叩打音処理手法

### 4.1 叩打位置検出処理

本システムでは、浴槽の裏側に設置したピエゾセンサによって叩打位置認識を行う。位置検出処理の要件としては、BathDrum2 が楽器であることを鑑みると、ユーザが浴槽を叩打してからスピーカからサウンドが鳴るまでの時間（レイテンシ）は、楽器として違和感のない程度の速さであることが望ましい。単に位置だけを検出したいならば、センサを浴槽に大量に設置し、振幅の増加から位置を検出すれば良いと考えられる。しかし、センサが増えることによる計算処理速度の増加、汎用性の低下、またセンサ設置の手間などを考慮すると、できるだけ少ないセンサでシステムを実現したい。このことから、複数個のセンサを一定間隔で離して設置し、叩打音がセンサに伝搬するまでの時間差を利用して位置を算出する処理を行うことにした。この時間差による位置検出を実現するためには、叩打音の振動がセンサ到達した時刻を求める必要がある。そのため、ある設定した閾値を叩打音の振動エネルギーが超えた時刻を振動の初動として検出する手法を用いる。次節ではこの初動検出時間を高精度で検出する方法について述べる。

#### 4.1.1 初動検出処理

叩打音による振動が複数センサへ伝搬する時間差によって位置を算出するためには、音の振幅が大きくなり始める時間（初動）を的確に検出する必要がある。本研究システムでは、この初動検出処理に振動波形に対する移動実効値法（Running Root Mean Square Method）を用いている。ある幅を持つ窓を時間移動させながら波形の二乗成分を積分しつつ、振幅の細かな変化を平滑化しつつ振動エネルギーの増加分を閾値処理する（図2）。また、実際には計測回路の性能にもよるが、商用電源周波数帯（ハムノイズ）が含まれると閾値処理に支障を来すため、ハム対策のノッチフィルタ処理ののち、移動実効値の計算処理を行う。

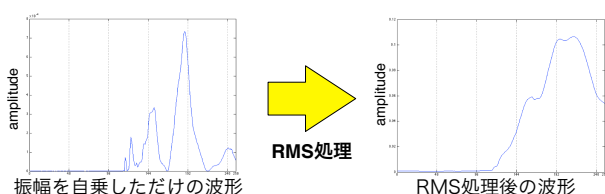


図2 移動実効値法による波形の平滑化

#### 4.1.2 叩打位置検出のためのキャリブレーション

前述の初動検出のための閾値と、移動実効値法の積分に用いる窓幅は未知であり、具体的な処理のためにはこれらを決定する必要がある。ただ、これらはセンサを設置する浴槽の形状・材質、温度などによって変化することが考えられる。また、設置するセンサの適切な距離間隔と必要なセンサ数も求める必要がある。本システムの要件としては

少ないセンサでの実装が求められているが、センサを少数にするためにセンサ間距離を長くすると、振動がセンサに伝搬するまでに振幅が大きく減衰して到達してしまう。これにより振動の立ち上りがなだらかになり初動が検出しづらくなる。ここでは、これら閾値と窓幅、センサ間距離とセンサ数は、予め収録した叩打音データを解析することで求める。具体的には、システムを構成する対象の浴槽において、複数回叩いた音データを用意し、閾値と窓幅を任意の範囲・刻み幅で変化させながら初動検出処理によって叩打位置からセンサに振動が伝搬するまでの時刻を求める。その後、全ての閾値と窓幅の組合せに対して振動の伝播時間の標準偏差を求め、標準偏差の値が最小になる閾値と窓幅の組合せを適切な値とする。実際の初動検出処理では、閾値の値は1つの音データの振幅の自乗の最大値にある倍率を掛けあわせたものとして求める。標準偏差のデータは叩打音データを収録した位置の数だけ得られる。そのため、各叩打位置で得られた標準偏差の値の総和が最小となる閾値と窓幅を適切な値とする。

また、予備実験として上述の解析手法を表1, 2の条件を当てはめ、各閾値倍率、窓幅の組合せごとの標準偏差の和を求めた。叩打音データは図5のようにしてセンサを浴槽に設置し、各叩打位置を30回ずつ叩くことで収録した。叩打音伝搬時間は収録ごとに叩打位置の直下にもセンサを設置し、一方のセンサとの振動到達時刻の差を計算することで求める。また、図3は求められた閾値と窓幅での各叩打位置の振動伝搬時間のグラフである。この図では、叩打位置がセンサから100~300mm離れた位置ならば伝搬時間が重複せず確実に叩打位置が判別できることを示している。

表1 計測および解析の条件

| 浴槽材質 | 浴槽の長さ  | センサ位置(Ch1・Ch2) | センサ間距離 | 叩打位置間隔 | Fs    | bit   |
|------|--------|----------------|--------|--------|-------|-------|
| FRP  | 1600mm | 300mm・1300mm   | 1000mm | 100mm  | 48kHz | 16bit |

表2 移動実効値法による波形の平滑化

|                |  |
|----------------|--|
| RMS窓幅(W)       | $W = \{48, 96, \dots, 480\} [samples]$ |
| 閾値倍率(T)        | $T = \{0.003, 0.006, \dots, 0.03\}$    |
| 叩打位置～センサの距離(D) | $D = \{100, 200, \dots, 900\} [mm]$    |

## 4.2 叩打音色判別

叩打音色判別処理は、NMFを用いた楽器システムであるPossessing Drumsのプログラムソースコードを利用して実装した。Possessing DrumsはNMFによって、予め登録した分離対象の音源を教師データとして入力音を駆動タイミング（発音時刻）と伝達関数（音色）に分離し、伝達関数を別に割り当てた音色の伝達関数に差し替えるシステムである。本研究ではNMFによる音源分離処理を利用し、分離後の駆動タイミングの振幅が最大となる音色を出力する処理とすることで音色判別を行うこととした。

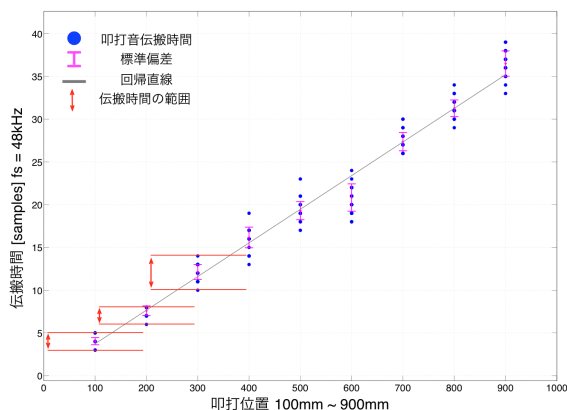


図3 各叩打位置の伝搬時間の標準偏差と回帰直線

Possessing Drums では、マレット、ドラムブラシ、手指といった材質・音色が異なる叩打において高精度な音色判別を実現している。しかし、本研究においては手指のみでのノックやタップといった叩き方の違いを判別する必要があり、異なる叩き方でも音色が似通って判別できない可能性がある。次章では数種類の叩き方において、どの叩き方の組み合わせなら確実な判別が可能かの検討を行う。

#### 4.2.1 判別可能な叩き方の検証

ある複数の叩き方のパターンに対して、前述の手法により判別可能な音色の組合せの検証を行った。今回、叩き方のパターンとして、拳(Bottom of Fist)、指関節(Knuckle)、指先と爪(Tip&Nail)、複数指の腹(Fingers)、指先(Pad)の5種類(図4参照)において判別可能かを調べた。NMFにおいては、駆動タイミングとして分離するための音色を任意の個数設定できる。検証では、5パターンの音色のNMFに登録する数と組合せを変えつつ、入力音を割り当てた音色通りに正しく判別できているかどうかを調べる。今回、入力音データは30回ずつ行い、正しく判別できた率を求めた(表3~6参照)。

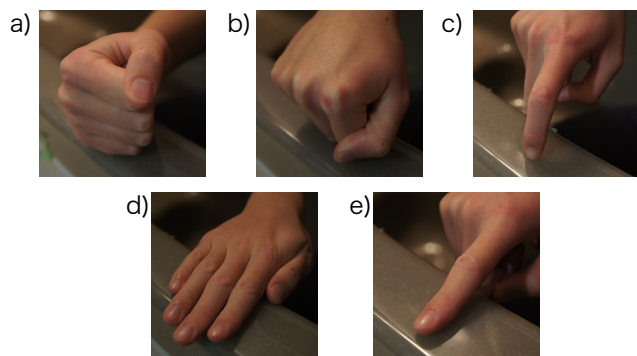


図4 各叩き方の様子

- a) 拳 (Bottom of Fist), b) 指関節 (Knuckle), c) 指先と爪 (Tip)  
 d) 複数指の腹 (Fingers), e) 指先 (Pad)

表3 2音色の場合の判別率

| 音色組合せ             | 音色判別率 |         |         |       |       | 平均    |
|-------------------|-------|---------|---------|-------|-------|-------|
|                   | Fist  | Knuckle | Fingers | Tip   | Pad   |       |
| Fist - Knuckle    | 63.3% | 100.0%  |         |       |       | 81.7% |
| Fist - Fingers    | 30.0% |         | 100.0%  |       |       | 65.0% |
| Fist - Tip        | 30.0% |         |         | 86.7% |       | 58.4% |
| Fist - Pad        | 30.0% |         |         |       | 96.7% | 63.4% |
| Knuckle - Fingers |       | 100.0%  | 26.7%   |       |       | 63.4% |
| Knuckle - Tip     |       | 100.0%  |         | 93.3% |       | 96.7% |
| Knuckle - Pad     |       | 100.0%  |         |       | 76.7% | 88.4% |
| Fingers - Tip     |       |         | 96.7%   | 90.0% |       | 93.4% |
| Fingers - Pad     |       |         | 100.0%  |       | 40.0% | 70.0% |
| Tip - Pad         |       |         |         | 93.3% | 60.0% | 76.7% |

表4 3音色の場合の判別率

| 音色組合せ                    | 音色判別率 |         |         |       |       | 平均    |
|--------------------------|-------|---------|---------|-------|-------|-------|
|                          | Fist  | Knuckle | Fingers | Tip   | Pad   |       |
| Fist - Knuckle - Fingers | 40.0% | 100.0%  | 38.7%   |       |       | 59.6% |
| Fist - Knuckle - Tip     | 33.3% | 96.7%   |         | 20.0% |       | 50.0% |
| Fist - Knuckle - Pad     | 30.0% | 100.0%  |         |       | 40.0% | 56.7% |
| Fist - Fingers - Tip     | 33.3% |         | 77.4%   | 16.7% |       | 42.5% |
| Fist - Fingers - Pad     | 33.3% |         | 80.0%   |       | 30.0% | 47.8% |
| Fist - Tip - Pad         | 32.3% |         |         | 66.7% | 76.7% | 58.6% |
| Knuckle - Fingers - Tip  |       | 100.0%  | 16.7%   | 90.0% |       | 68.9% |
| Knuckle - Fingers - Pad  |       | 100.0%  | 20.0%   |       | 33.3% | 51.1% |
| Knuckle - Tip - Pad      |       | 100.0%  |         | 90.0% | 63.3% | 84.4% |
| Fingers - Tip - Pad      |       |         | 100.0%  | 96.7% | 36.7% | 77.8% |

表5 4音色の場合の判別率

| 音色組合せ                          | 音色判別率 |         |         |       |       | 平均    |
|--------------------------------|-------|---------|---------|-------|-------|-------|
|                                | Fist  | Knuckle | Fingers | Tip   | Pad   |       |
| Fist - Knuckle - Fingers - Tip | 33.3% | 96.7%   | 13.3%   | 26.7% |       | 42.5% |
| Fist - Knuckle - Fingers - Pad | 30.0% | 100.0%  | 20.0%   |       | 33.3% | 45.8% |
| Fist - Knuckle - Tip - Pad     | 36.7% | 96.7%   |         | 16.7% | 60.0% | 52.5% |
| Fist - Fingers - Tip - Pad     | 33.3% |         | 53.3%   | 16.7% | 70.0% | 43.3% |
| Knuckle - Fingers - Tip - Pad  |       | 100.0%  | 13.3%   | 90.0% | 20.0% | 55.8% |

表6 5音色の場合の判別率

| 音色組合せ                                | 音色判別率 |         |         |       |      | 平均    |
|--------------------------------------|-------|---------|---------|-------|------|-------|
|                                      | Fist  | Knuckle | Fingers | Tip   | Pad  |       |
| Fist - Knuckle - Fingers - Tip - Pad | 33.3% | 96.7%   | 6.7%    | 26.7% | 0.0% | 32.7% |

表3~6から、最も判別率が高かったのは「指関節」と「爪」の2つの音色を割り当てた時で、入力音が「指関節」の時は100%、「爪」のとき93.3%である。また次点では「複数指」「爪」の2つを割り当てた場合は検出率が高く、「複数指」:96.7%、「爪」:90%という結果となった。ただ、「指関節」「複数指」「爪」の3つを割り当てた場合だと、「指関節」:100%、「複数指」:16%、「爪」:90%という結果となり「複数指」での叩打は検出率が低くなった。また「指関節」「複数指」の2つを割り当てた場合、「指関節」:100%、「複数指」:26.7%となり、この2つの組合せだと「複数指」の検出率が低くなっている。図5は各叩き方のパターンの時間波形とスペクトログラムのグラフである。「爪」と「指間接」では、時間波形の形や音の鳴りはじめの部分の周波数成分が大きく異なり、NMFでの音源分離がしやすく正しく判別できていると考えられる。一方、「複数指」は「爪」程度の特徴的な高周波数の立ち上りは見られず、時間波形も類似している。そのためこれらはNMFによる判別がし

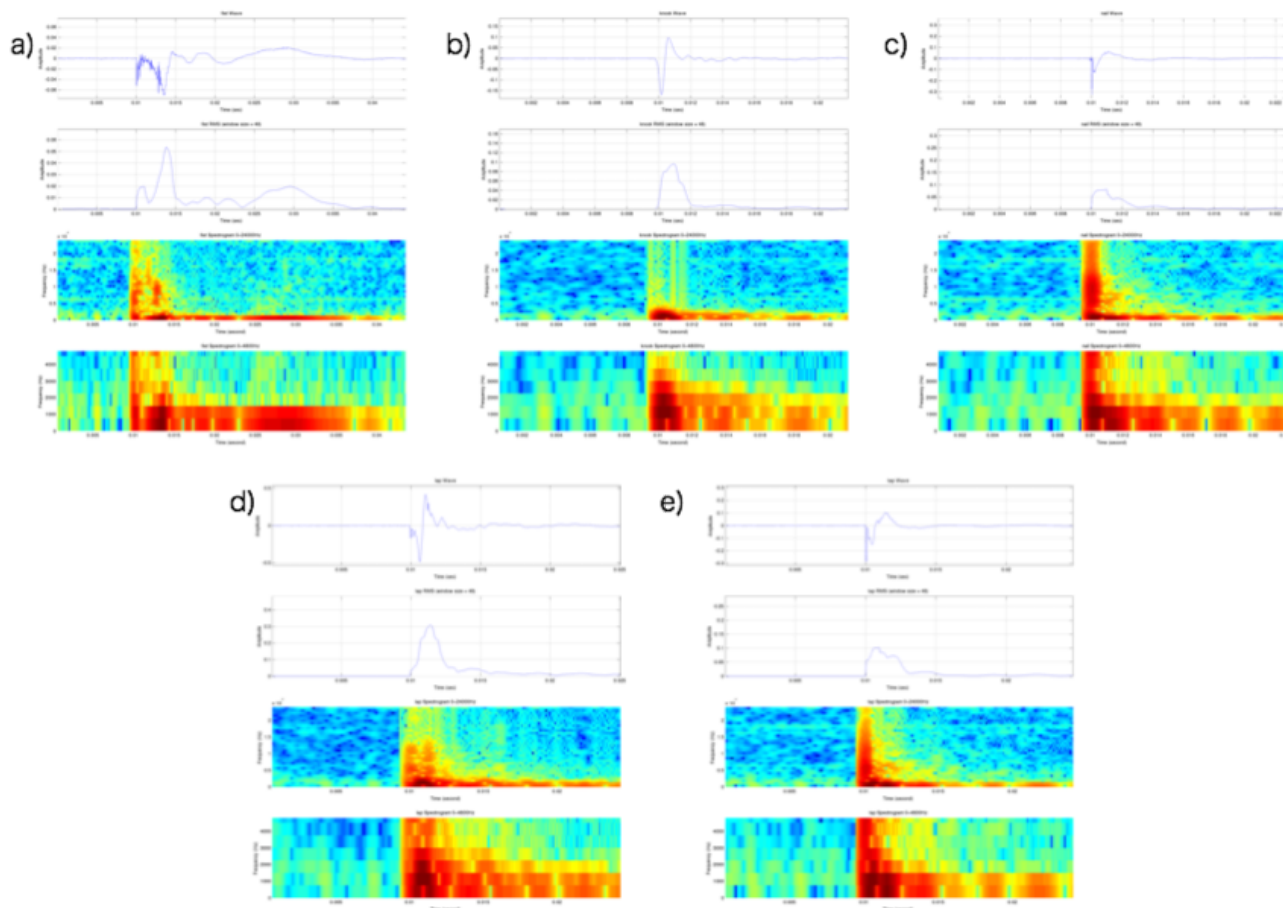


図5 各叩打パターンの時間波形とスペクトログラム

a) 拳 (Bottom of Fist), b) 指関節 (Knuckle), c) 指先と爪 (Tip) d) 複数指の腹 (Fingers), e) 指先 (Pad)

にくいと考えられる。今回のこれら結果から、最も判別率の高かった「指間接」(Knuckle)と「指先&爪」(Tip)の2つの組合せを BathDrum2 に活用した。

## 5. BathDrum2 の実装

前章で得られた位置検出における閾値と窓幅、位置検出可能範囲とセンサ数を基に実時間処理を行うシステムの構築を行った。システムの構成としては図6のようにになっている。センサで検出した叩打音信号の処理や、浴槽縁に投影する映像などの制御は浴槽外のPCで行っている。画面投影するプロジェクタは、浴室暖房乾燥機が設置されている天井裏の空いている空間に設置し、投影用の窓を設けた。各叩打音処理に関しては、ビジュアルプログラミング環境のMax/MSPで実装した。標準的なMaxオブジェクトでは実装できない信号処理などはエクスタernalオブジェクトとして作成して利用した。また、天井プロジェクタから投影するUIはProcessingにより実装し、各操作イベントをOSCでメッセージとしてやりとりすることで投影アニメーションに反映する。

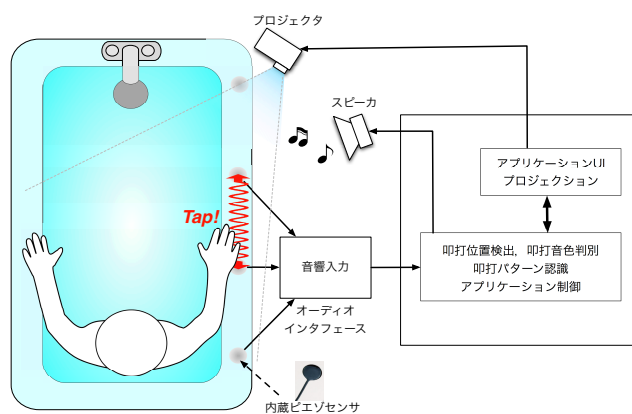


図6 アプリケーションシステムの構成

ーションに反映する。

今回実装した浴槽打楽器システム BathDrum2 (図7)では、位置検出処理によって異なる位置を叩いた時にそれぞれに対応したシンバル、ハイハット、タム、スネア、バスドラムといった楽器音を鳴らす。また、叩打音色判別によって叩き方の違いによって異なるサウンドを出力する。

例えば、叩き方の違いによって同じハイハットでもオープンかクローズかといった違い出力する。

また、他にも位置検出を利用したもぐらたたきゲームや、親子が一緒にお風呂に入る時のクイズやなぞなぞ遊びを支援する早押しクイズボタンも作成している。

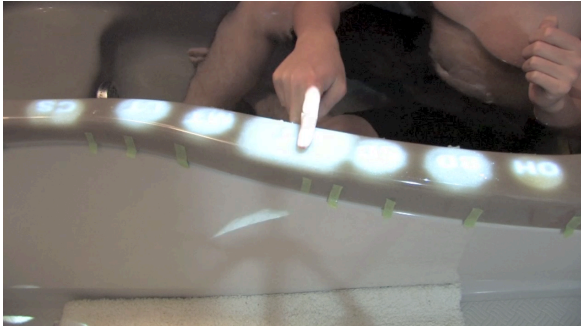


図 1 BathDrum2 利用中の様子

## 6. おわりに

本研究では、浴槽を叩くことで機器操作などを行う操作インタフェースを実現し、その機能を利用した浴槽エンタテインメントシステム BathDrum2 を制作した。本稿では、その叩打位置検出と叩打音判別処理について述べた。位置検出処理に関しては、キャリブレーションによって、様々な材質・形状の浴槽に対して適切な位置認識可能範囲を設定できる。そして、キャリブレーション結果を基に実可動システムの実装が行えている。また、音色判別処理に関しては NMF によって特定の叩き方の組合せであれば、高精度に判別できることが確認できた。だが、周波数成分が類似した音色となる叩き方では NMF での判別が難しく、その点において処理の改良が必要である。一方で、実際の打楽器では連打したり、異なる楽器を同時に叩く演奏が行われるが、BathDrum2 も同様の感覚で演奏することを目指すのであれば、より自然な演奏ができるような UI 処理や画面割当なども必要となる。今後は性能改善と共に、楽器インタフェースとしての向上にも取り組んでいきたい。

## 参考文献

- 1) Mason, Roy., Jennings, Lane., Evans, Robert. The Computerized Home of Tomorrow and How It Can Be Yours Today!, Acropolis Books, 1983.
- 2) Cory D. Kidd, et al.: The Aware Home: A Living Laboratory for Ubiquitous Computing Research, Proc. of the Second International Workshop on Cooperative Buildings - CoBuild'99. Position paper, 1999.
- 3) S. S. Intille, K. Larson, J. Beaudin, E. Munguia Tapia, P. Kaushik, J. Nawyn, and T.J. McLeish, "The Place-Lab: a live-in laboratory for pervasive computing research (Video)," Proc. of Pervasive2005, 2005.
- 4) B.de Ruyter, et al. Ambient Intelligence Research in HomeLab: Engineering the User Experience, Ambient

- Intelligence, Springer, pp.49-61, 2005.
- 5) 上田博唯, 山崎達也. ユビキタスホーム: 日常生活支援のための住環境知能化の試み, ロボット学会論文誌, Vol.25, pp.10-16, 2007.
- 6) 椎尾一郎, 元岡展久, 塚田浩二, 神原啓介, 太田裕治. Ocha House とユビキタスコンピューティング, ヒューマンインタフェース学会誌, Vol.12, No.1, pp.7-12, 2010.
- 7) 大西諒, 平井重行. RFID を用いた浴室内行動計測の基礎検討, 情報処理学会論文誌 Vol.49, No.6, pp.1932-1941, 2008.
- 8) 林宏憲, 大西諒, 平井重行. 一般住宅用浴室におけるミストを利用した立体的映像表現. エンタテインメントコンピューティング 2007 論文集, pp.75-76, 2007.
- 9) Shigeyuki Hirai, Yoshinobu Sakakibara and Seiho Hayakawa. Bathcratch: Touch and Sound-Based DJ Controller Implemented on a Bathtub, Proc. of ACE2012, pp.44-56, 2012.
- 10) 榎原吉伸, 林宏憲, 平井重行, TubTouch: 湯水の影響や自由形状への適用を考慮した浴槽タッチ UI 環境, 情報処理学会論文誌 Vol.53, No.4, 2013.
- 11) 平井重行, 藤井元, 佐近田展康, 井口征士: 新たなアメニティ空間を目指した浴室:入浴状態を音で表現する風呂システム, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.6, No.3, pp.287-294 (2004)
- 12) Matoba, Y., Takahashi, Y., Tokui, T., Phuong, S., & Koike, H.. AquaTop display. In Proceedings of the Virtual Reality International Conference: Laval Virtual (p. 24). 2013.
- 13) Hiroshi Ishii, Craig Wisneski, Julian Orbanes, Ben Chun and Joe Paradiso. PingPongPlus: design of an athletic-tangible interface for computer-supported cooperative play, Proc. of CHI'99, pp.394-401, 1999.
- 14) Joseph A. Paradiso, Che King Leo, Nisha Checka, Kaijen Hsiao. Passive acoustic sensing for tracking knocks atop large interactive display, Proc. of the 2002 IEEE International Conference on Sensors, pp.512-527, 2002.
- 15) Chris Harrison, Desney Tan, Dan Morris. Skinput: appropriating the body as an input computing systems, Proc. of CHI2010, pp.453-462, 2010.
- 16) Kazuhiko Yamamoto. Possessing Drums: An Interface of Musical Instruments that Assigns Arbitrary Timbres to Personal Belongings, Journal of Information Processing, Vol.21, No.2, pp.274-282, 2013.
- 17) 安部武宏, 佐古淳: ゲームの直感的なインターフェースに向けたリアルタイムでの打音検出・音のボタン-, 情報処理学会研究報告. 2014-MUS-104, pp.1-6, 2014.
- 18) Pedro Lopes, Ricardo Jota, Joaquim A. Jorge. Augmenting touch interaction through acoustic sensing, Proc. of ITS2011, pp.53-56, 2011.
- 19) Chris Harrison, Julia Schwarz and Scott E. Hudson. TapSense: Enhancing Finger Interaction on Touch Surfaces. Proc. of UIST'11, pp.627-636, 2011.
- 20) Chris Harrison, Scott E. Hudson. Scratch input: creating large, inexpensive, unpowered and mobile finger input surface, Proc. of UIST'08, pp205-208, 2008.
- 21) 伊藤大毅, 平井重行: 浴槽叩打音を利用したお風呂ドラム BathDrum の叩打位置検出, 情報処理学会研究報告 2013-EC-29-1, 2013.
- 22) 伊藤大毅, 平井重行: 叩打音を利用した操作インタフェースと浴槽への適用, WISS2013 論文集, pp.149-150, 2013.
- 23) Daiki Ito and Shigeyuki Hirai, Tap Location User Interface on a Bathtub Edge Using Embedded Acoustic Sensors, Proc. of AmI2014, 2014.