

浴槽叩打音を利用したお風呂ドラム BathDrum の叩打位置検出

伊藤大毅^{†1} 平井重行^{†2}

概要：我々は、既存の浴室環境を活用しつつ埋め込まれたセンサを用いたユーザインタフェースとそのエンタテインメント応用の研究を行ってきた。そして、これまでは浴槽に対して「触れる」「こする」の2つの操作手法とその応用システムの研究を行ってきた。今回、我々は浴槽を手指で「叩く」操作インタフェースを元にしたお風呂ドラムシステム BathDrum を提案する。BathDrum は浴槽縁の内側に複数設置したピエゾセンサで浴槽の叩打音を検出し、その「叩打位置（叩く場所）」や「叩打音色（叩き方）」に対応したサウンドを鳴らすシステムである。本稿では、主に叩打位置検出処理に関する内容について報告する。ここでの叩打位置検出処理は、複数センサへの叩打音の振動到達時間差から叩打位置を算出するものだが、本研究システムが「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を重視している。そして、実際の浴槽での叩打実験に基づき、具体的な位置検出処理を検討した。これにより、キャリブレーションを基に様々な形状・材質の浴槽に対して適切な叩打位置検出可能範囲を設定することを確認した。またリアルタイムに叩打位置を出力するシステムの実装も行った。

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。その多くは、リビングルームやキッチンを対象としたものだが、我々は敢えて水場である浴室における様々な研究を行ってきた 7)-10)。基本的には、センサやディスプレイ機器を浴槽内部や天井裏、床裏などに埋め込んでのシステムを構築している。特に、浴槽を用いたものとしては、静電容量方式タッチセンサを埋め込んで、浴槽に「触れる」インタフェースを実現する TubTouch 10) がある。ここでは、浴室オーディオやテレビ、調光照明などの既存設備をコントロールすることができるだけでなく、浴槽に手を近づけることで電子楽器のテルミンとして機能するほか、子供が遊べるアプリケーションを幾つも提供している。また、Batheratch 9) は、TubTouch の機能も用いつつ、浴槽裏側に設置したピエゾセンサで浴槽をこする音を検出することで DJ スクラッチ演奏を行うエンタテインメントシステムである。ここでは浴槽を「こする」インタフェースを実現している。

今回は、これら「触れる」「こする」インタフェースに次いで、浴槽を「叩く」インタフェースを提案する。そして、それをエンタテインメントとして応用する楽器システム BathDrum (お風呂ドラム) を提案する。「叩く」インタフェースとしては、「叩打位置（叩いた場所）」と「叩打音色（叩き方）」を利用し、様々な機器操作などの入力インタフェースとして活用することを目指す。そして BathDrum としても、それら「叩打位置」「叩打音色」によって様々な打楽器の音色が鳴る機能を提供するエンタテインメントシ

テムを目指す。本稿では特に「叩打位置」の検出を中心とした処理とその検討について述べ、リアルタイムで位置算出を行うシステムの実装についても説明する。

2. 関連研究

2.1 叩打音色（叩き方）に関する処理

叩打音色（叩き方）を音響的に処理して扱う研究として山本による Possessing Drums 11) がある。これは身の回りの物を叩く音に任意の音色を割り当て、楽器のように演奏することができるシステムである。入力された音色に対し、音源の駆動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ることで、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。音の割当には、PC 以外にセンサとしてのマイク 1 本のみが必要で、単純な構成で実現できる利点もある。BathDrum においても、打楽器としての利用を考慮すれば、音色を区別する処理を行うのではなく、他の音に割り当てることができれば良いと言え、Possessing Drums は BathDrum にもそのまま適用できると考えられる。

他の関連研究として、Lopes らは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 12)。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 13) 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 14) 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

^{†1} 京都産業大学大学院 先端情報学研究所

^{†2} 京都産業大学 コンピュータ理工学部

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。

2.2 叩打位置（叩いた位置）に関する処理

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 Ishii らによる PingPongPlus 15) が挙げられる。この研究では、卓球台の裏面に取り付けた 8 個のマイクでピンポン球が卓球台の上で跳ねる音を集音し、その信号の到達時間差から跳ねた位置を検出している。Paradisso らによる Tapper 16) では、街中のショーウィンドウなどの平面ガラス板に複数のピエゾセンサを取り付け、ガラス板をノックした際の振動が各センサに伝搬する時間差からノック位置を算出している。BathDrum でもこれと同様の原理で位置認識を行うが、浴槽縁は幅が狭いため叩打位置検出は 1 次元的に行うほかなく、形状の都合から曲面をも対象にしているという点で異なる。他に叩打位置を用いる研究に Skinput 17) が挙げられる。これはピエゾアレイを組み込んだアームバンドを用いて、入力インタフェースとするシステムである。手指や腕をタップした時の皮膚を伝搬する振動と、骨に伝搬して跳ね返ってくる振動の伝播パターンにより、どの部位がタップされたかを高精度で認識する事ができる。BathDrum においても複数の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。しかし、BathDrum が楽器であることを鑑みると、楽器として自然な応答速度が要求される。センサが増えることによって処理すべき入力信号が増えることを考慮すると、センサの数はできるだけ少ないほうが良い。また、システムの汎用性の観点からも少ないセンサのほうが浴槽への取り付けは容易となる。

本研究では、叩打音色の認識については Possessing Drums のような有効な手法が既にあると考え、叩打位置の検出手法と実時間処理プログラムの検討を行った。また、BathDrum 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認識処理手法の検討を行なっている。

3. BathDrum 概要

3.1 BathDrum とは

BathDrum 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対応したサウンドをスピーカから鳴らす (図 1 参照)。この際、BathDrum ではセンサで受け取った叩打音に対して「叩打位置」の検出や、「叩打音色」の認識をリアルタイムで行い、それぞれの情報に基づいて打楽器としての音をスピーカから出力する (図 2)。前章で述べたとおり、叩打音色の認識については有効な手法が既にあることから、本稿では叩打位置の検出を主な処理として以降で説明する。

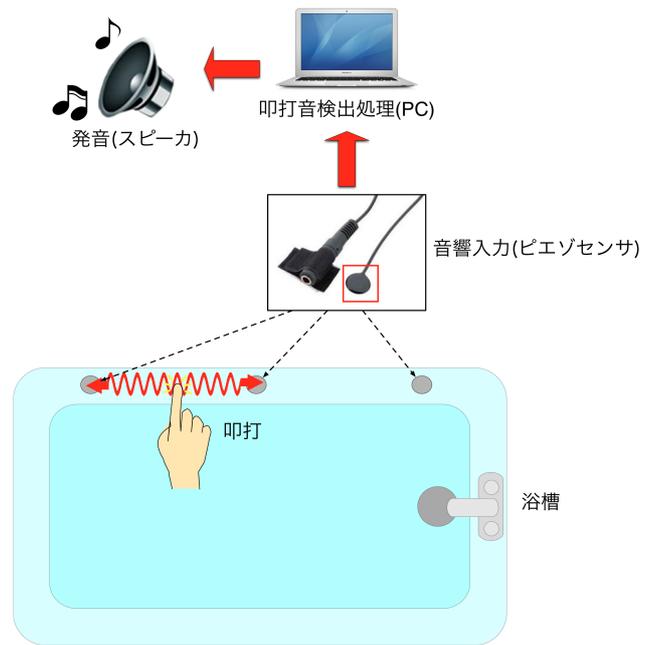


図 1 BathDrum 処理概要

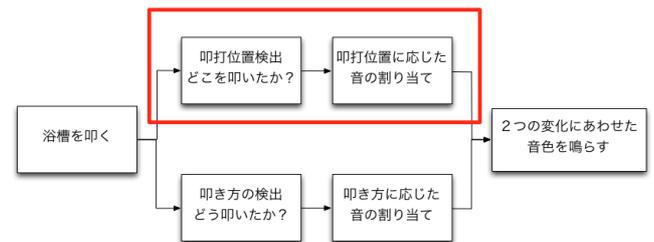


図 2 叩打音検出処理の流れ

BathDrum の音響センサにはアコースティックギター等に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。対象となる浴室は一般家庭に普及しているユニットバス（システムバス）で、その浴槽の横壁（エプロン壁）は簡単に取り外しができる。これにより浴槽壁の内側や縁の裏側へ容易にアクセスでき、センサ素子や回路などの機器を簡単に設置することができる。

3.2 叩打位置認識手法

BathDrum 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検出を行う。位置検出処理の要件としては、BathDrum が楽器であることを鑑みると、ユーザが風呂を叩打してからスピーカからサウンドが鳴るまでの反応時間について、楽器として違和感のない時間の必要があると考えている。一方で、単に位置だけを検出するならば、浴槽に大量のセンサを設置すれば高精度な位置検出が可能になると考えられる。だが、センサ数の増加に伴う計算処理負荷の増加、汎用性の低下を考えると、少ないセンサ数でシステムを実現できるほうが良いと考えた。これらにより、複

数のピエゾセンサを一定距離だけ離して設置し、浴槽を叩いた振動がセンサに伝搬するまでの時間差を利用してどの位置を叩いたかを算出する。

また、時間差による位置検出を実現するためには、叩打による振動のセンサへの到達時間を正確に求める必要がある。そのため、適切な閾値を設定し、叩打音の振幅がその閾値を超えた時刻を音の鳴り始め（初動）として検出する手法を用いる。次章ではこの初動検出時刻を高精度で検出する方法について検討している。

4. 叩打音位置認識のための振動解析

4.1 初動検出処理

叩打音がセンサに伝搬する時間差によって叩打位置を判別するためには、音の鳴り始め、つまり音の振幅が大きくなり始める時間（初動）を適切に検出する必要がある。初動検出方法としては、時間波形の振幅の絶対値、もしくは振幅の二乗した値を取り、その値がある閾値を超えた時間を初動として検出する手法が考えられる。しかしこの手法では検出時刻のばらつきが大きく、十分な検出精度が得られない。その理由としては、ほんの少しの叩き方の違いによる振幅の時間変化の違いが著しく変わり、一貫した振幅の立ち上がりが見られず、適切な初動検出もできないのではないかと考えている（図3）。このため振幅が増加し始める瞬間のみを的確に検出できるような処理の検討をする必要がある。

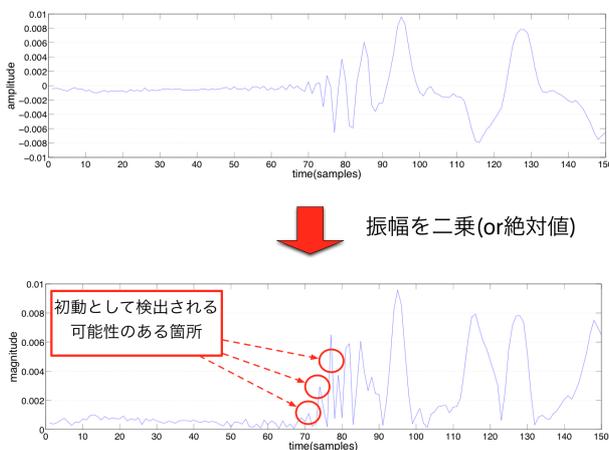


図3 振幅を二乗した場合の波形

今回、初動検出処理としては、振幅を二乗した波形を一定幅の矩形窓で切り出して加算平均し、振幅の時間変化を平滑化する手法を用いた（図4）。なお、この手法の計算を行う前に、ハムノイズ対策として商用電源周波数（50/60Hz）のノッチフィルタでハムノイズをあらかじめ除去する。

4.2 叩打音収録・解析

実環境（浴室）での実験の前に予備実験を行う。叩打位置検出処理の妥当性を確認するために、実際に収録した叩

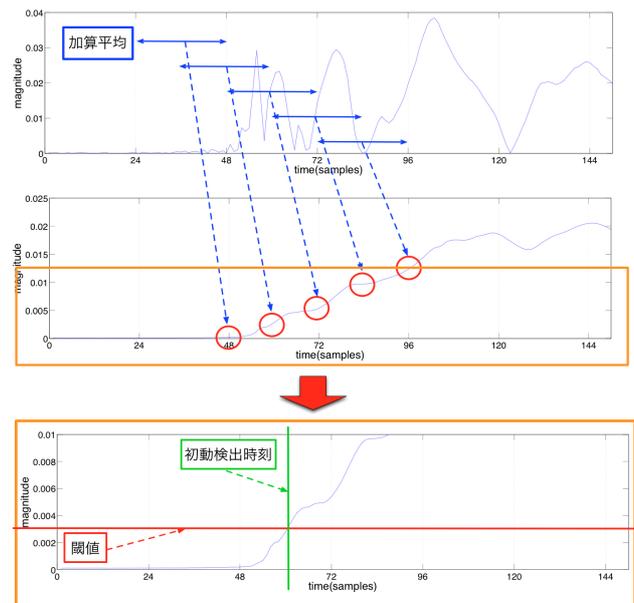


図4 加算平均による平滑化と初動検出処理

打音データを解析し、認識処理の精度を測る。次節で使用ハードウェア等の振動データ収集環境と、解析方法について述べる。

4.2.1 収録環境（使用ハードウェア・ソフトウェア）

予備実験としての信号収録・解析には、通常の1616サイズの浴室に設置する1600mm×800mmのFRP製浴槽を使用する。叩打音の検出に用いるピエゾセンサには、アコースティックギター用のピエゾピックアップであるShadow社SH710を用いて、浴槽縁裏側へ貼り付けた。またそのセンサで取得した叩打音（浴槽の固体振動）はオーディオインタフェースRoland社OCTA-CAPTURE（最大8CH入力可能）を介してPC上で記録される。叩打音（固体振動）の信号収録にはAudacityを用い、解析処理にはMATLABを用いた。

4.2.2 収録方法

実際にひと挿し指で浴槽の縁を叩いた音を収録しwavファイルとして保存する。今回、全長1600mmの浴槽の両端から300mmの各地点に2つのピエゾセンサを設置し（それぞれCh1, Ch2とする）、センサ間の直線距離1000mmに叩打位置を100mm間隔で9ヶ所を設定した（図5）。叩打音は初動検出時刻の精度確認のために、各位置で30回叩打して収録する。また、叩打位置からセンサまでの伝搬時間を計測するために、収録毎に叩打位置の直下にもピエゾセンサを設置し（Ch3とする）データの収録を行った。収録データは48kHz、16bitサンプリングとした。

4.2.3 叩打音データ解析

収録した各叩打位置での叩打音データを解析し、振動の伝播時間の標準偏差を求める。叩打位置から浴槽両端の各



図 5 浴槽への piezo センサ設置の様子
 上) 浴槽外観, 下) 浴槽縁裏側へのセンサ設置

センサまでの伝搬時間は、両端のセンサ (Ch1, Ch2) の初動検出時刻と叩打位置直下のセンサ (Ch3) での初動検出時刻の差によって求める。また、初動検出処理において「閾値」と「加算平均の窓幅」は未知の値である。これらの適切な値を動的に求めなければならない。そのため、閾値と窓幅を任意の範囲・刻み幅で値を変更しながら各データの伝搬時間の標準偏差を求める。これにより標準偏差が最小となる閾値と窓幅の値の組み合わせを適切な値とする。実際の初動検出プログラムでは、閾値の値は収録データの振幅の二乗の最大値にある倍率を変え合わせたものである。解析でこの倍率を求めることになる。

叩打位置は上述の通り 9ヶ所なので、9個の標準偏差のデータが得られることになる。この解析により、各叩打位置での適切な閾値と窓幅の値が異なってくる可能性はあるが、実時間処理において叩打位置それぞれに最適な閾値や窓幅の値を設定することはできない。よって、各叩打位置で得られた標準偏差の総和が最小となる閾値と窓幅の組み合わせを適切な値とする。また、初動検出処理の検出確立が一定以上でない場合はその時の標準偏差の和を比較の対象としないこととする。今回は初動検出確立が 100%である場合を比較の対象とする。この場合、叩打回数が 30 回の収録データならば 30 個の伝搬時間のデータが得られていなければ、その標準偏差の値は比較の対象としない。初動が非検出となった場合は伝搬時間の値を 0 (sample) として記録するものとする。

4.3 解析結果

前節の方法で収録データを解析した結果を示す。今回、閾値の倍率の範囲を 0.03~0.003, 刻み幅を 0.003 に設定し、加算平均の窓幅の範囲を 48~480, 刻み幅を 48 に設定して解析を行った。解析の結果、図 6 より閾値の倍率が 0.015, 窓幅が 48 の際に標準偏差の総和が最小となっており、叩打音の伝搬時間のばらつきが最小となる適切な値が求められていることが分かる。グラフではそれよりも標準偏差の和が小さい値も見ることができるが、初動の検出率が 100% でないため結果の対象としていない。

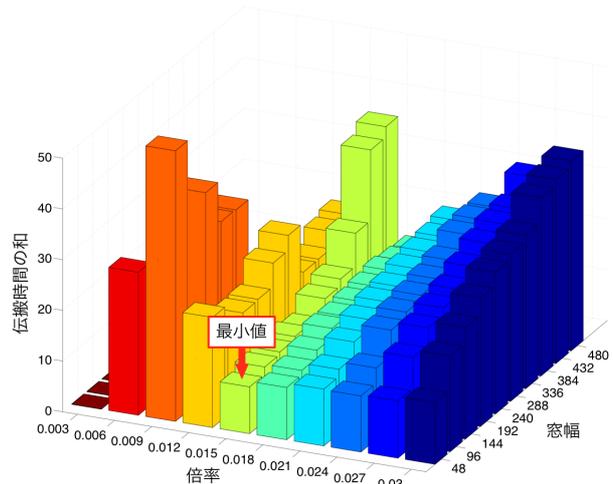


図 6 閾値の倍率と加算平均窓幅の組み合わせごとの各叩打位置の標準偏差の総和

また、閾値の倍率が 0.015, 窓幅 48 の際の叩打位置と伝搬時間差をプロットした図を図 7 に示す。この図から、センサから叩打位置が離れるほど振動の伝播時間は比例的に増加しており、振動の伝播時間の差によって叩打位置の判別は可能であることが確認できる。また、伝搬時間の分布

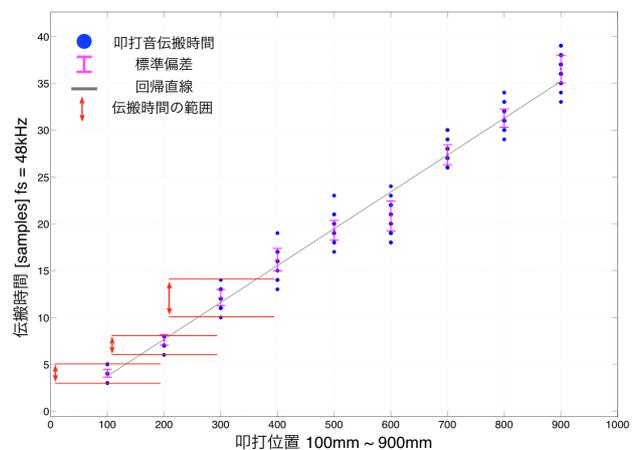


図 7 各叩打位置の伝搬時間の標準偏差と回帰直線
 (倍率 0.015, 窓幅 48)

は伝搬時間の平均値付近に集まっており標準偏差の値も概ね小さいことから、ばらつきの少ない初動検出処理ができていると言える。各叩打位置の標準偏差を見てみると、センサから 100~300mm 離れた位置ならば各叩打位置の伝搬時間が重複しておらず、その範囲までなら叩打位置がしっかりと判別可能であることが分かる。この結果から実際に BathDrum を構築するとき、求められた範囲以上の長さをインタフェースとして使用したい場合は 400mm 間隔でセンサを複数個設置すれば良いと考えられる。

これら解析結果より、適切な閾値、加算平均の窓幅、位置認識可能な距離の範囲などが動的に求めることができおり、システム構築環境に合わせたキャリブレーションが実現できていることが分かる。これにより、材質・形状の異なる浴槽に対して、適切な変数値、位置認識可能距離範囲、が動的に求められることが期待できる。また、必要なセンサ数もキャリブレーション結果から把握できる。

5. 実稼働システムの実装

キャリブレーションで得られた変数値、位置認識可能範囲を基に実時間処理を行うシステムの構築を行った。ここではビジュアルプログラミング言語 Max6 で実装した。加算平均、閾値による初動検出といった標準的な Max オブジェクトでは処理できないものについては、エクスターナルオブジェクトを作成した。また、センサからの音データの入力やバンドパスフィルタでの処理は Max に予め用意してあるオブジェクトを使用して実装する。今回、前章の解析結果より、全長 1600mm の浴槽に対して 300mm 間隔で 6 個のセンサを設置し、16 個の叩打位置を設定する。

今回実装したシステムでは、収録データと同様に指先での叩打による入力にのみに対応している。そのため、手のひらや指の関節などの叩打による位置検出が実現できていないわけではない。課題として、様々な叩打方法による位置認識を実現するためにデータ収録と解析を行う必要がある。また、位置認識処理からエンタテインメント性を考慮したコンテンツの実装も課題であり、それを元にした被験者実験による検証も行う必要がある。

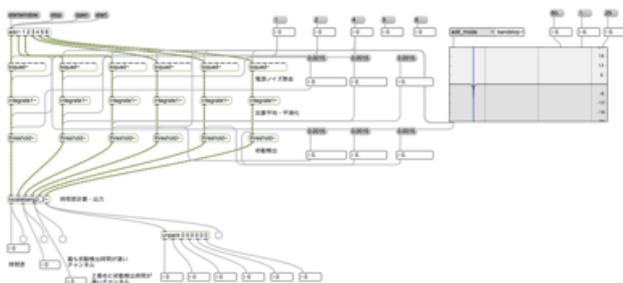


図 8 実装した叩打位置検出処理の Max パッチ

6. おわりに

本研究では、浴槽を「叩く」インタフェースによって、新たなエンタテインメント性を持たせた浴室環境を提供するお風呂ドラム BathDrum を提案した。そして、その叩打音位置検出処理について検討を行った。検討した位置検出処理で叩打音データの解析を行った結果、ある程度の距離範囲までの正確に位置検出できる事が確認できた。また、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検出可能範囲を設定できることが分かり、キャリブレーション結果を基に実可動システムの実装を行った。

今後の課題は、浴槽に水を張った場合や、静電容量センサなどの他のセンサと組み合わせた場合でのデータの収録・解析も必要となってくる。今回、浴室から取り外された状態の浴槽でのデータ収録・解析は行なっているが、実際に浴室に備え付けられた浴槽でのデータ収録・解析は行なっていない。BathDrum が実際に使用されるとすれば、当然、浴室のお湯の張った浴槽での使用が想定されるまた、BathDrum を静電容量センサのような異なるセンサと組み合わせて使うことも想定するならば、他のセンサが取り付けられている状態でのデータ収録・解析も必要となってくる。

また、BathDrum が打楽器として自然な動作をするような処理の検討や、被験者実験による検証も課題である。実際の打楽器は、連打や、異なる音色の楽器と同時に叩くといったような演奏もありうる。BathDrum もまた、本物の打楽器と同じような間隔で演奏することを想定するならば、打楽器として自然な演奏ができるような処理の実装も必要となる。また、そのような処理が実装できたならば、実用的なインタフェースとしての応用の幅が広がることも期待できる。

謝辞

本研究の一部は、中山隼雄科学技術文化財団の助成によって行われた。

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) 榊原吉伸, 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) 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.
- 12) Pedro Lopes, Ricardo Jota, Joaquim A. Jorge. Augmenting touch interaction through acoustic sensing, Proc. of ITS2011, pp.53-56, 2011.
- 13) Chris Harrison, Julia Schwarz and Scott E. Hudson. TapSense: Enhancing Finger Interaction on Touch Surfaces. Proc. of UIST'11, pp.627-636, 2011.
- 14) Chris Harrison, Scott E. Hudson. Scratch input: creating large, inexpensive, unpowered and mobile finger input surface, Proc. of UIST'08, pp.205-208, 2008.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) Chris Harrison, Desney Tan, Dan Morris. Skinput: appropriating the body as an input computing systems, Proc. of CHI2010, pp.453-462, 2010.