

擦り音に着目した水場におけるインタフェース

川勝 棕介^{†1} 平井 重行^{†2}

概要：水場で利用するユーザインタフェース操作として、なめらかな表面を擦ったときに鳴る擦り音に着目した操作インタフェースを提案する。提案手法では受け取った擦り音を解析することで「時間長」「リズムパターン」「擦る指の本数」を識別し、これらを操作イベントに変換することが可能である。また提案手法においては指本数を識別する際に、「モデルを必要としないアルゴリズム」と「ユーザに違和感を与えないレイテンシ」の二つを実現することを目標に実装を行った。本稿では今回提案する手法の説明や性能評価に加え、これらに応用したアプリケーション例を示す。

キーワード：ユーザインタフェース、ユビキタスコンピューティング、擦り音、信号処理



図 1 住宅環境における水場の例。(キッチン, 洗面台, 浴室)

1. はじめに

近年、ウェアラブル機器が普及していると共に Internet of Things (IoT) の側面を持つ家庭用スマートデバイスが多数登場している。これらにより、住宅内の情報化が多種多様に進展しつつある。一方で、以前から家具や調度品、住宅設備にコンピュータを組み込んでインタラクティブな住宅環境に関する研究が様々に行われている[1-6]。その中でも平井らは水場におけるユビキタスコンピューティングに着目し、浴室内の行動計測や操作インタフェース構築などを通じて、日常生活にエンタテインメント要素を組み込むことで QOL(Quality of Life)を向上させるインタラクティブな浴室環境の研究を重ねてきている[7-13]。水場におけるコンピュータの導入には他の環境に比べ多くの制約がある。コンピュータ自体に対する防水対策や水周りの設備は多くの場合において買い替えが想定されない点、更には設備の形状からセンサやデバイスの設置箇所が限られてしまう点などが挙げられる。そのため多様な水場に導入するインタフェースに求められるのは「既存の設備に追加導入する形態であること」「デバイスとして小型であること」「一つのデバイスで広い範囲に適応できること」が望ましい。

本研究では、多様な水場に適応できる入力インタフェースの一つとして「擦り音」を提案する。擦り音を始めとする

音響信号は一つのセンサを取り付けるだけで広範囲に適応でき、前述のような導入箇所に制限が掛かる場合において有用である。またその中でも擦り音は擦った物体から直接に固体振動として信号が得られ、かつ「一定強度の信号が持続する」「調波構造を含まれる」といった特徴を持っており、他の信号との区別が容易にできるという点でも有用と考えられる。本稿では擦り音を入力インタフェースとして利用するにあたり、「時間長」「リズムパターン」「擦る指の本数」を識別する手法を提案し、検証を行った結果について述べる。また提案した「擦るインタフェース」に応用したアプリケーションを用いてユーザ評価を行い、そこから得られた結果を示す。

2. 関連研究

2.1 類似した動作を用いたインタフェース

提案する「擦るインタフェース」の先行研究として Bathcratch[13]が挙げられる。Bathcratch は擦る動作が DJ スクラッチの動作に類似していることから浴槽縁を擦った際の音響信号を検出することで DJ スクラッチを楽しめるエンタテインメントシステムである。しかしこの研究では厳密な信号解析などは行われておらず、擦り音が鳴ったかどうかのみを判定しているため、ユーザインタフェースの応用性に乏しい。また「擦る」動作に類似した動作を利用した

^{†1} 京都産業大学大学院 先端情報学研究所
Division of Frontier Informatics, Graduate School of Kyoto Sangyo University
^{†2} 京都産業大学 コンピュータ理工学部
Faculty of Computer Science and Engineering, Kyoto Sangyo University

インタフェースとして、Scratch Input[14]や Stane[15]などが挙げられる。Scratch Input では壁などを爪先で引っ掻いた音から動きなどを検出する研究である。Stane では、表面を複数種類の線や点、くぼみなどで構成した小型デバイスにピエゾセンサを内蔵させ、Scratch Input と同様に指の爪先で擦った音を用いて、擦った場所によって変化する振動パターンや長さを識別し入力手法として利用している。これらは、振動を信号処理や機械学習を含めてユーザインタフェースとして利用しているが、本研究で提案する擦り音とは違う振動を対象としている。

2.2 その他の音響信号を用いたユーザインタフェース

「擦る」以外の音響信号を用いたインタフェースの研究も数多く存在する。Skinput[16]ではピエゾアレイを腕に取り付けることで手や腕の表面のどこを叩いたのかを識別することができるシステムである。TapSense[17]ではタッチパネルなどにおいて音響信号を組み合わせることで従来の操作に叩き方などを組み合わせることで拡張を図っている。Lopes らは音響センシングを用いてタッチインターフェースの表現力を拡張することを提案している。[18] また伊藤らは浴槽縁に音響センサを組み込むことで叩打音の位置や叩き方、リズムパターンなどを識別するによって入力システムを実現する研究が行われている。[10-11]

3. 提案手法

3.1 擦り音の特徴

擦り音は濡れた滑らかな表面を擦るときに起こる Stick-slip 現象によって発生する。そして一つの指から発生する擦り音には基本周波数 F_0 およびそれを基準とした調波構造を持っている。また複数本指で擦った場合では、指ごとの形状や状態、力のかかり具合などによって F_0 が僅かに変化し、それに伴って調波構造も僅かにずれて重なった周波数特性が得られる。(図 2) さらに他の特徴として励起時間(擦り音がなり始めてから音圧が最大になるまでの時間)が長いことも挙げられる。これらの特徴を用いて指本数の識別を行う。

3.2 本手法における目的

最初に本手法における指本数識別とは、擦った指の本数が「一本指」か「複数本指」であるかの識別に留めている。その理由として、擦る指本数が増加するにつれて全ての指において擦り音を正確に鳴らすことが困難になることが予備実験から分かっている。また複数本指を擦る際に力を入れやすい(擦りやすい)本数はユーザによって異なることもあり、ユーザビリティの観点から厳密な指本数の識別は行わず「複数本指」として1つに纏めることにする。

このような指本数識別の手法として、各指本数のパワースペクトルを Gaussian Mixture Model(GMM)と EM アルゴリ

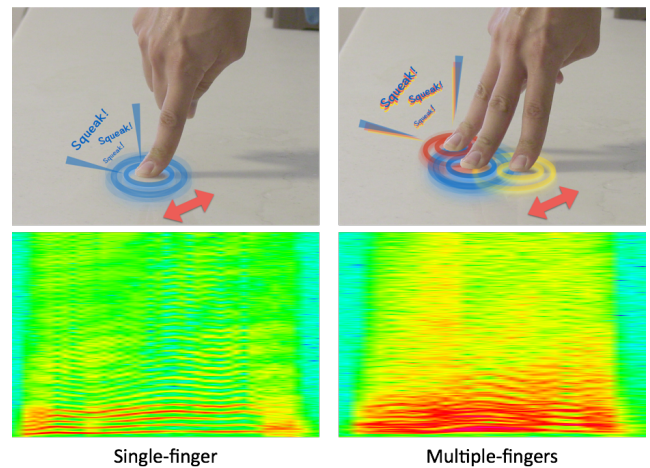


図 2 擦り音のスペクトログラム;
 左) 1 本指, 右) 複数本指.

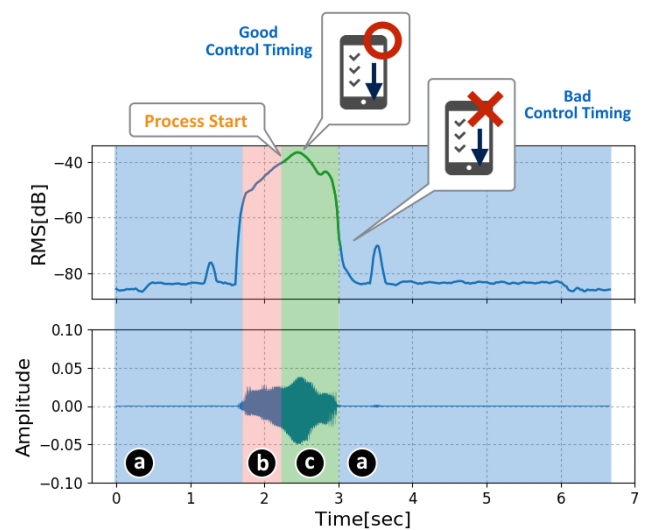


図 3 ユーザがインタフェースに求めるコントロールタイミング。
 (a) 無音区間。(b) 擦り音鳴り始めの不安定な区間。
 (c) 周波数特性が安定する区間。

ズムを用いてモデル化し、擦り音が鳴り始めてから鳴り終わるまでの範囲においてモデルとの相関に着目することで高い精度での識別をする手法を以前に提案した。[20] しかしこの手法には二つの問題点が存在している。一つ目は「モデル生成におけるコスト問題」がある。本手法では多様な環境、かつ多数のユーザで利用されることが想定されており、各条件下で擦り音は敏感に変化することが分かっている。そのためモデル生成するためにそれぞれの条件下に適応したモデルを毎回生成するのは非現実的であり、また結果として識別するのは「一本指」と「複数本指」の識別のみの割にはモデル生成の計算量が多く非効率と言える。そこで、本研究では「擦るインタフェース」には処理負荷がより少ない手法での識別を行うこととした。二つ目に「レイテンシ問題」が存在する。以前の手法では精度を高めるために擦り音全体を解析しており、結果が出力できるのは擦り音が鳴り終わった後になる。これによって、多く

のユーザに自分の擦る動作と操作開始の間に大きな遅延による大きな違和感を与える。遅延が発生する。これはユーザインタフェースとして大きな問題であるため、違和感ない操作を確立するために、擦り音が発生して数十ミリ秒以内に識別結果を出力できるようにする必要がある。(図 3)

本稿ではこれら二つの問題を解決した上で先行研究と同等の精度を維持する手法を提案し、性能評価を行う。

3.3 システム構成

「擦るインタフェース」を構築するには、対象の表面に対して一つのピエゾセンサを設置し、そこから得られる信号をオーディオインタフェースを介して 16[bit]/44.1k[Hz]のデジタル信号としてコンピュータへ入力する。そこで得られた信号をフレーム毎に解析し、操作イベントに変換する。また得られた信号を処理する際のフレーム幅は 1024[sample] (約 23.21[msec]), フレームを移動幅は 256[sample] (約 5.805[msec])としている。また、窓関数として Hamming 窓を採用している。

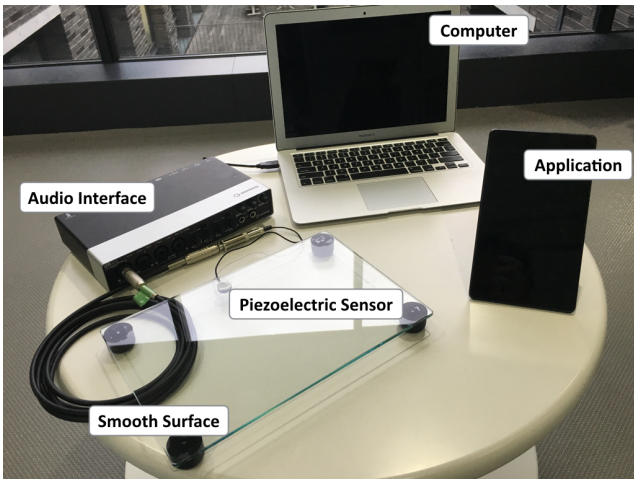


図 4 ガラス表面におけるシステムの構築例。

3.4 指本数識別のアルゴリズム

本手法で着目するのは擦り音を持つ調波構造である。調波構造の特徴として周波数成分のピークが等間隔に現れる (F0 と倍音の関係)。しかし調波構造が複数重なった場合、複数の調波構造を持つ F0 が倍音の関係を持たない限り等間隔に成分が現れない。つまり、この関係性を評価する関数を設計することで「一本指」か「複数本指」の識別できる。本研究では得られた特性のピークが調波構造の関係であるかを評価する手法を提案する。具体的な処理内容について以下に示す。

3.4.1 全体の処理フロー

まずは擦り音を解析するに当たって擦り音を検知する必

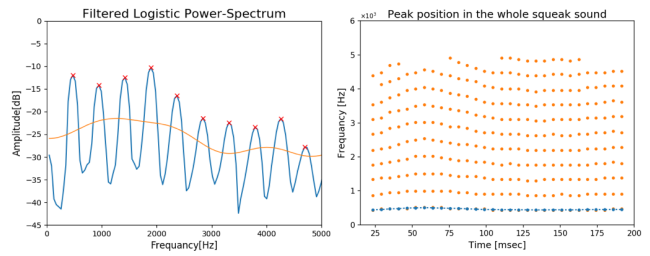


図 5 左) 調波構造から得られる有意ピーク, 右) 有意ピークの軌跡。単一の調波構造の場合、ピークは等間隔に現れる。

要がある。本手法では、その検知に RMS (Root Mean Square) を用い、RMS の立ち上がり時と立ち下がり時を判定するそれぞれの閾値処理を行う。まずフレーム毎に RMS 値を求め、立ち上がり判定用 RMS 閾値を超えた時に調波構造識別の処理を開始する。その後、予め設定したフレームぶんだけ調波構造識別処理を行い、その識別結果によって擦り音開始通知を出力することで限りなくレイテンシを減らしている。そして RMS 値が立ち下がり判定用閾値を下回った時に、擦り音終了通知を操作イベントとして出力する(図 6 参照)。予め設定する処理フレーム数は事前検証において 5 フレーム程度 (約 52.25msec) で高い制度となることが確認されている。

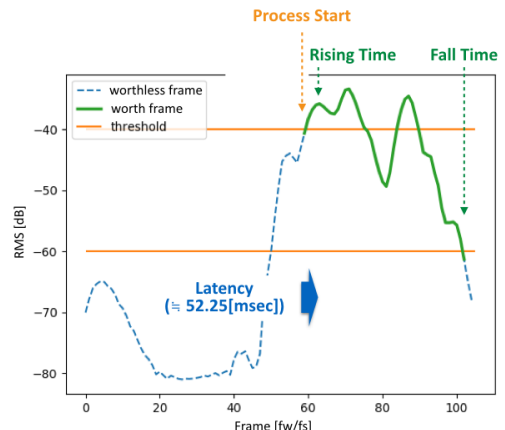


図 6 処理開始から識別結果通知, 擦り音終了通知までの流れ。二つの RMS 閾値(Onset, Offset)を利用している。

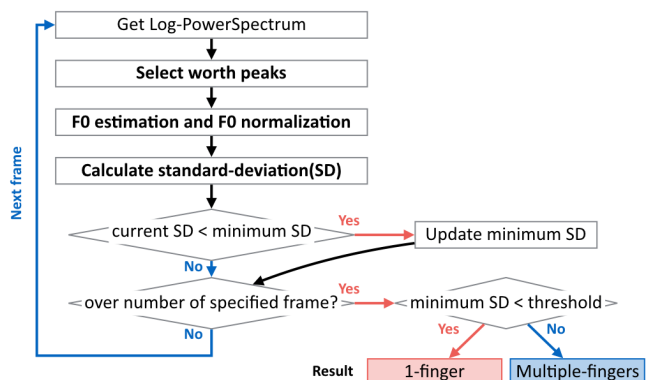


図 7 指本数識別処理のフローチャート。処理開始から指定フレーム数までこの処理を繰り返す。

次に識別処理開始から識別処理通知までの処理フレーム間では、図 7 に示す処理を繰り返す。ここでの各処理については以下に示す。

3.4.2 有意ピークの選出

前述に述べたように、本手法では周波数ピークに着目して調波構造の特性を評価することで識別を行う。ここでは倍音にも着目するために、フレーム毎に FFT を用いて対数パワースペクトルを取得する。しかし対数パワースペクトルから得られるピークにはノイズピークが多量に含まれているため、そこから有意なピークを選出する必要がある。まず、対数パワースペクトルに対して平滑化フィルタ処理を施すことで粗方のノイズピークを除去する。最後にフィルタ後のピーク群から有意なピークを選出するための境界線としてスペクトル包絡を用いる。スペクトル包絡を利用する利点としては、周波数特性に応じて適切かつ動的に境界線を決定することが可能であり、また多くの環境下でも同一のパラメータを利用できる点である。しかしスペクトル包絡をそのまま利用すると超低周波数帯域(100[Hz]以下)における誤選出などの問題が発生するため、選出に用いるスペクトル包絡を以下の式によって改良する。

$$C_a(f) = \begin{cases} \alpha(C_b(f) + \beta(C_b(f) - C_b(F_1))) & f < F_1 \\ \alpha C_b(f) & otherwise \end{cases} \quad (1)$$

$C_b(f)$ は周波数 f における本来のスペクトル包絡、 $C_a(f)$ は周波数 f における改良後のスペクトル包絡、 F_1 はスペクトル包絡における第 1 ピーク、 α は全体を調整する係数、 β は超低周波数帯域を調整する係数である。

3.4.3 F0 正規化と調波構造評価関数

次に得られた有意ピークから調波構造の特性を一定の尺度に合わせるために F0 正規化を行う。そうすることで理想的な調波構造におけるピークはピッチに関わらず全て整数値に限りなく近い場所に位置づけられることが分かる。この状態で調波構造を評価するためには各ピークがどれだけ最近傍の整数値からかけ離れているかで評価が可能であると考えられる。このことから調波構造評価関数を以下の通りに定義する。

$$p_f \leftarrow p_f / F0 \bmod 1$$

$$p_f \leftarrow \begin{cases} p_f - 1.0 & 0.5 < p_f \\ p_f & otherwise \end{cases} \quad (2)$$

p_f は F0 によって正規化されたピークの周波数成分を示している。そして最後に、得られた調波構造評価値の標準偏差を計算することでピーク全体としてどれだけ調波構造に近いかを評価する。この値が小さいほど調波構造に近く、大きければ調波構造からかけ離れていると判断できる。最終的に閾値に用いて指本数の識別を行う。

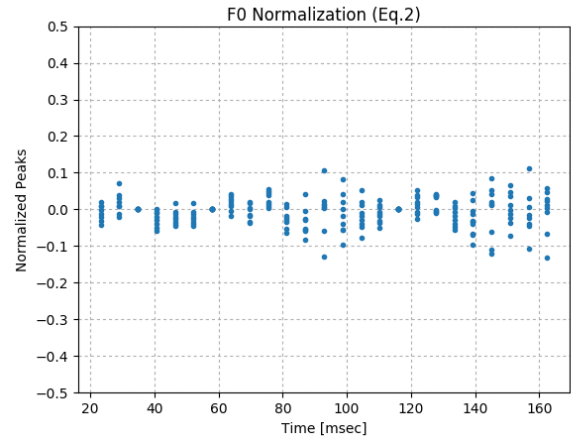


図 8 式 2 によって計算された各有意ピーク群(1 本指)の調波構造評価値。

3.4.4 F0 推定

本手法において最も重要なのが正規化するための F0 の推定である。推定された F0 が非常にかけ離れていた場合、評価関数は正しく機能しないため識別結果も大きく異なるからである。

本手法では F0 候補推定と F0 補正の 2 段階に分けて F0 の推定を行っている。F0 候補推定では各ピークを F0 と仮定し正規化を行い、先ほど定義した調波構造評価関数を用いて評価を行う。そこで得られた結果の中から最も評価値の良い(値が小さい)ピークを F0 候補とする。しかしここで推定された F0 は、FFT フレーム幅による周波数分解能に依存した値であり、誤差が含まれる可能性が高い。F0 推定段階で発生した誤差は高い倍音になるにつれて大きな誤差になり、評価関数に悪影響を及ぼす。そこで F0 補正では F0 候補から -40[Hz]から 40[Hz]の範囲において刻み幅 5[Hz]でずらし、再度評価関数を用いて評価を行う。そこで得られた最も評価値の良い(値が小さい)F0 候補を最終的に F0 であると判断している。

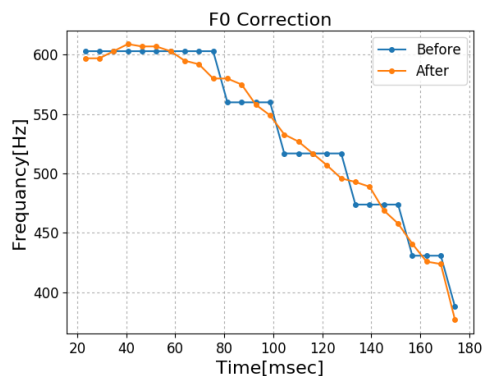


図 9 F0 補正前と補正後の F0 軌跡。

また処理負荷の軽減のために初期フレーム以降のフレー

ムでは、ピークは短時間において大きく変動しないという特性に着目し、前フレームで推定されたピークに最も近いピークを F0 候補として選出している。そうすることで F0 候補推定における処理手順を大幅に削減している。

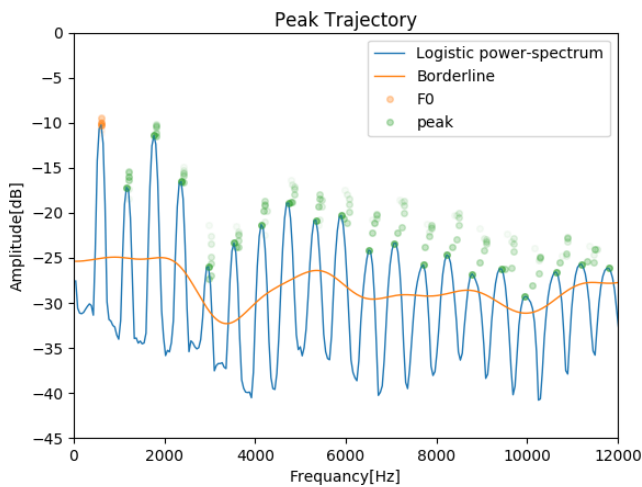


図 10 本手法で得られたピーク群の時間変化
 (短時間でピークは大きく変動しないことが確認できる)。

4. 性能評価

提案手法の性能評価として二種類の検証を行う。一つ目は異なる条件下(環境、ピエゾセンサとの距離)において実際に収録した擦り音を用いる検証、二つ目はテスト信号を用いた提案手法が適応できる範囲の検証である。ここではテスト信号としてノコギリ波を利用した。

4.1 擦り音による性能評価

4.1.1 複数環境における性能評価

本研究における目的は多様な水場環境に適応できるシステムの構築である。そのため、検証する環境も複数用意する必要がある。今回は検証する環境は住宅における水場に焦点を当て、図 1 に示す大規模な環境(材質の情報と表面のなめらかさ)に加え、図 11 に示すような小規模な環境において有用であるかを検証した。

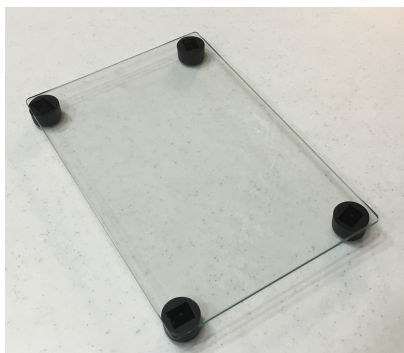


図 11 小型環境. 強化ガラスと滑り止めのゴムで構成されている。
 検証方法は、各環境において 1~3 本指ごとに 100 音源ず

つ収録し、それぞれに対して本手法を用いて正しく識別できるかを検証する。前述で述べた通り、1 本指の場合は 1 本指、2 本指と 3 本指は複数本指が正答となっている。検証に用いたパラメータを以下に示す。

表 1 提案手法の検証時に用いたパラメータ群

パラメータ名	設定値
処理適応周波数範囲	200[Hz]~5000[Hz]
立ち上がり判定用 RMS 閾値	-40[dB]
立ち下がり判定用 RMS 閾値	-60[dB]
処理フレーム数	5[frame] (≒52.25[msec])
調波構造評価関数閾値	0.07
ケプストラム係数	30
α	0.95
β	0.5

表 2 収録した擦り音による性能評価結果

入力ラベル	1-finger	2-fingers	3-fingers
出力ラベル	Single-finger	Multiple-fingers	
キッチン	100.0%	95.0%	99.0%
浴槽	94.0%	98.0%	98.0%
鏡	100.0%	96.0%	99.0%
小型環境	100.0%	99.0%	100.0%

今回の検証結果を表 2 に示す。この結果から、本手法は各環境、各指本数において 94%以上の精度での識別が可能であることが示されている。従って、本手法は環境(材質や大きさ)に大きく依存しない手法であると考えられる。

4.1.2 ピエゾセンサとの距離における性能評価

次にピエゾセンサとの指を擦る場所との距離によって識別性能がどのように変化するかを検証する。環境によっては設置する場所が限定されることが予想されるため、常に擦る場所とデバイスを設置する場所が一定の間隔で保てないためである。今回は同一環境においてピエゾセンサを固定し、擦る場所のみを変化させて収録を行い(図 12)、検証した。

表 3 提案手法の検証時に用いたパラメータ群

収録環境	立ち上がり判定用 RMS 閾値	1-finger	2-fingers	3-fingers
		Single-finger	Multiple-fingers	
Short	-46[dB]	95.0%	94.0%	94.0%
Middle	-52[dB]	99.0%	91.0%	95.0%
Long	-63[dB]	100.0%	96.0%	100.0%

結果として各環境、各指本数において 91%を超える精度での識別が可能であることが示された。しかし、立ち上がり判定用 RMS 閾値を距離によって適切に設定しなければならぬという問題点も確認された。原因は図 3 の(b)に示す擦り音が鳴り始めてまだ周波数成分が不安定な区間にあると

考えられる。本手法では周波数成分の安定した図 3 の(c)の区間で適切に処理を開始しなければ正しい結果が得られない。そのため、ピエゾセンサと擦る場所の距離によって適切に立ち上がり判定用 RMS 閾値を設定しなければならない。今後、得られた擦り音に対して適切に処理を開始する方法が求められる。

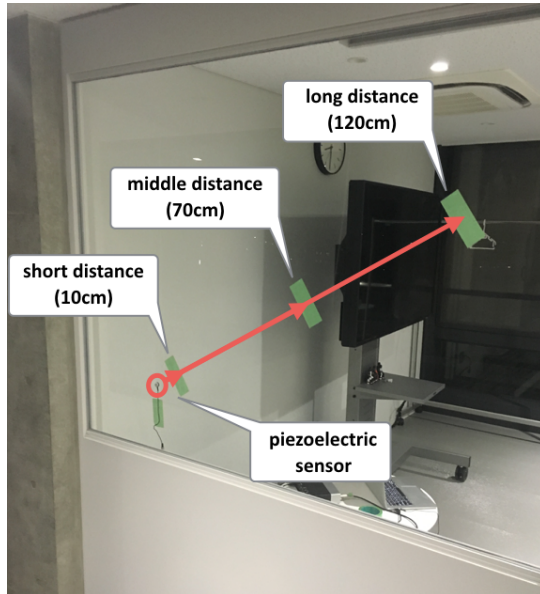


図 12 同一環境(ガラス)にて擦る場所を変更した例。

4.2 テスト信号による性能評価

テスト信号(ノコギリ波)によって検証する対象として以下の三つを挙げる。

4.2.1 識別可能な F0 下限値

ここでは、提案手法が推定可能である F0 の下限値を検証する。ピッチを 10[Hz]~440[Hz]の範囲で変化させた単一のノコギリ波を生成して本手法を用いて識別する。

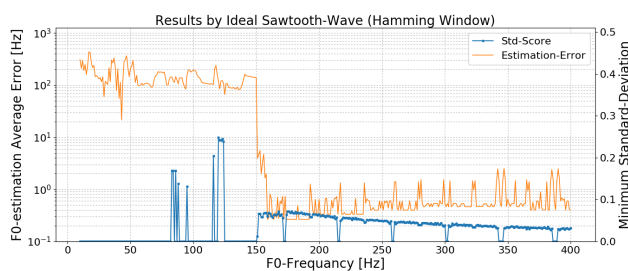


図 13 識別可能な F0 下限値の検証結果。
 青) 調波構造評価値, オレンジ) F0 推定誤差

結果として、F0 が ± 10 [Hz]以内の誤差で推定され、かつ識別結果が正しくなる下限値は 151[Hz]付近であることが示された。多くの擦り音があつてピッチは多くの場合、200[Hz] ~ 1000[Hz]の範囲であることが分かっているため、本手法は擦り音に対して十分な性能を持っていると考えられる。(図 13)

4.2.2 識別可能な二つの信号の F0 差

次に二つの信号の F0 間の差がどれだけ離れていれば識別できるかを検証する。まず基準信号として 440[Hz]のノコギリ波を用意する。それに対して ± 100 [Hz]の間で変化させた F0 を持つノコギリ波を重ねた音源を生成する。

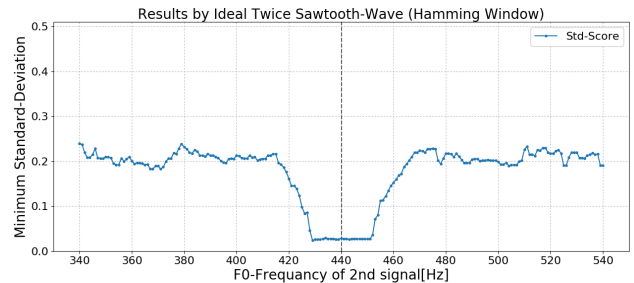


図 14 基準信号 440[Hz]に異なる F0 の信号を重ねた音源に対しての調波構造評価値。

結果として ± 15 [Hz]以上の F0 差があれば、提案手法によって識別することが可能であることが示された。(図 14)

4.2.3 識別可能な二つの信号の振幅差

最後に、二つの信号の間にある振幅差がどれだけ大きくなると識別できなくなるかを検証した。まここでも基準信号として 440[Hz]のノコギリ波を用いた。次に全ての周波数に対して検証は現実的ではないため、識別しやすい F0 差である 470[Hz]と識別できる F0 差の限界値である 455[Hz]の二点において検証を行う。この二点において、振幅差を -30[dB]~0[dB]の間で変化させた信号を重ねた音源に対して検証を行う。

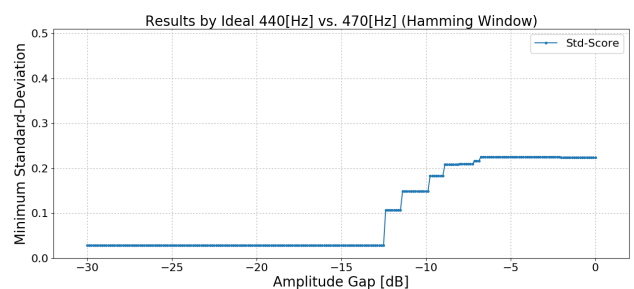


図 15 470[Hz]の信号の音圧を変化させて重ねた信号に対しての調波構造評価値。

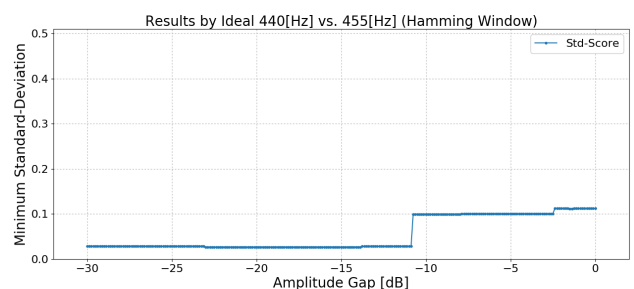


図 16 455[Hz]の信号の音圧を変化させて重ねた信号に対しての調波構造評価値。

結果として、どちらの F0 においても振幅差が 10[dB]以内であれば識別が可能であることが示された。(図 15, 16)

5. アプリケーション

ここでは本稿で提案する「擦るインタフェース」を応用したアプリケーションとして、以下の三つを示す。

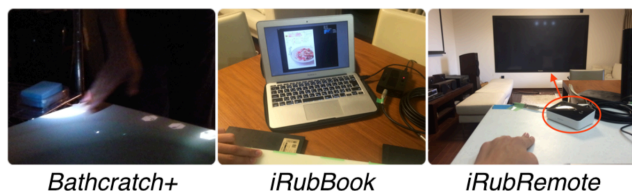


図 17 応用アプリケーション例。

5.1 Bathcratch+

Bathcratch+は、先行研究である Bathcratch に指本数識別の機能を組み込んだエンターテインメントシステムである。擦る指の本数によって、スクラッチサウンドを切り替えることが可能である。

5.2 iRubBook

iRubBook は擦り音を操作に用いたブックリーダーアプリケーションである。調理中の濡れた手の状態で操作することを想定しており、ページ捲りや本の切り替えを指の本数や、リズムなどで切り替えることができる。またスクロール操作を指の本数や擦る長さを用いて操作することも可能である。

5.3 iRubRemote

iRubRemote では、提案手法を用いて家電や照明などを「擦る長さ」「指の本数」「リズムパターン」を用いて操作することができる。

6. さいごに

本稿では、多様な水場環境におけるインタフェースとして「擦るインタフェース」を提案した。また先行研究において問題であった「モデル作成におけるコスト問題」と「レイテンシ問題」の二つを解決しながらも、あらゆる環境下で 90%を超える精度での指本数識別を可能な頑健な手法を提示した。また、本提案手法を用いた具体的なアプリケーションを作成し、「擦るインタフェース」として利用できることを確認した。

今後は、擦り音と雑音との区別について取り組むと共に、Raspberry Pi などを用いて小型センサデバイスとして実装し、設置しやすく様々な機器と連動できるようにしていく予定である。

参考文献

[1] 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.
[2] 椎尾一郎, Jim Rowan, Elizabeth Mynatt: Digital Decor : 日用品コンピューティング, ヒューマンインタフェース学会論文誌 Vol.5 no.3 p.323-330, 2003.
[3] S. S. Intille, K. Larson, J. Beaudin, E. Munguia Tapia, P. Kaushik, J. Nawyn, and T.J. McLeish, "The PlaceLab: alive-in laboratory for pervasive computing research (Video)," Proc. of Pervasive 2005, 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] 平井重行, 上田博唯: 実験住宅 E Home(くすいーほーむ)でのユーザエクスペリエンス研究へ向けて, 計測自動制御学会 SI2011 講演論文集, 2011.
[7] 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.
[8] 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.
[9] 榑原吉伸, 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.54, No.4, pp.1538-1550, 2013.
[10] Shigeyuki Hirai and Daiki Ito, Entertainment Applications for Tapping on a Bathtub Edge Using Embedded Acoustic Sensors, Proc. of ACE2015.
[11] 隅田智之, 伊藤大毅, 川勝椋介, 平井重行: 浴槽叩打音を利用した浴室でのインタラクション手法, 情報処理学会インタラクション 2017 論文集 (2017)
[12] Shigeyuki Hirai, Yoshinobu Sakakibara and Hironori Hayashi. 2013. Enabling Interactive Bathroom Entertainment Using Embedded Touch Sensors in the Bathtub, In Proc. of ACE2013, 544-547.
[13] Shigeyuki Hirai, Yoshinobu Sakakibara and Seiho Hayakawa. 2012. Bathcratch: Touch and Sound-Based DJ Controller Implemented on a Bathtub, In Proc. of ACE2012, 44-56.
[14] Chris Harrison, Scott E. Hudson. Scratch input: creating large, inexpensive, unpowered and mobile finger input surface, Proc. of UIST'08, pp205-208, 2008.
[15] Roderick Murray-Smith, John Williamson, Stephen Hughes, Torben Quaade: Stane: Synthesized Surfaces for Tactile Input, Proc. of CHI2008, pp.1299-1302 2008.
[16] Chris Harrison, Desney Tan, Dan Morris. Skinput: appropriating the body as an input computing systems, Proc. of CHI2010, pp.453-462, 2010.
[17] Chris Harrison, Julia Schwarz and Scott E. Hudson. TapSense: Enhancing Finger Interaction on Touch Surfaces. Proc. of UIST'11, pp.627-636, 2011.
[18] Pedro Lopes, Ricardo Jota, Joaquim A. Jorge. Augmenting touch interaction through acoustic sensing, Proc. of ITS2011, pp.53-56, 2011.
[19] 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.
[20] Ryosuke Kawakatsu, Shigeyuki Hirai. Interaction Technique Using Acoustic Sensing for Different Squeak Sounds Caused by Number of Rubbing Fingers. Proc. of UIST'16 , 2016.