

擦り音による指本数識別を利用したユーザインタフェース

川勝 棕介^{1,a)} 平井 重行^{1,b)}

概要: 滑らかな面と手指が擦れた際に発する擦り音とその時の擦った指の本数を識別して利用する新たな入力インタフェースを提案する。このインタフェースは擦り音となる環境の都合から主に水場での利用が中心となる。本研究では、指本数毎の擦り音の識別に、GMM によって構築した音響スペクトルモデルを用いている。本稿では擦り音のスペクトル解析と GMM の構築、および指本数に対する識別性能について述べ、応用システム例について示す。

User Interface Using Difference of Rubbing Sounds by a Number of Fingers

KAWAKATSU RYOSUKE^{1,a)} HIRAI SHIGEYUKI^{1,b)}

Abstract: We propose novel user interface using a number of rubbing fingers and its sound with a smooth surface and water. This interface is basically applied with wet area because of the rubbing sound with water. This paper describes the classification method for a number of rubbing fingers using its rubbing sound with spectrum model by Gaussian Mixture Model (GMM), and its performance. We also describe a few applications using this user interface.

1. はじめに

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]。そのような中、平井らは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、インタラクティブな浴室環境の研究を重ねてきている [7-11]。とりわけ、Bathcratch システム [11] で提案された操作インタフェースは、濡れた滑らかな面（ここでは浴槽）を指で擦れば鳴る擦り音を検出するもので、水場ならではの操作手法と言える。ここでは、擦る面の裏側にピエゾセンサを設置して音響信号として処理することで擦り検出を行っている。これは、機器や構造物の

内部にセンサを設置するため、操作インタフェースが表面を加工しないため、衝撃によるセンサの故障などは起こりにくく、掃除を含めたメンテナンス性にも優れていると言える。ただ、Bathcratch での擦り音検出は、擦ったか否かだけの検出であったため、押しボタン 1 個の操作と同等のこと（単一イベントの操作）しかできていない。

本研究では、この擦り音検出の機能を浴槽だけでなく水場で汎用的かつ多機能的に扱えるよう改良することを目的として、擦った指の本数や擦りパターンなどの検出を行う。今回は擦り音の指の本数によるパワースペクトルの違いに着目し、それをガウス混合分布（GMM）でモデル化して指の本数識別に用いることを提案する。

本稿では、第 2 章において、GMM 構築のための擦り音解析とモデル生成、指本数の識別処理手法について述べる。第 3 章では、擦る指本数毎の GMM の構築とそれによる指本数識別性能の評価について述べる。第 4 章では、構築した擦り音の GMM による指本数識別を利用したアプリケーション例を示す。そして、第 5 章をまとめとする。

¹ 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

a) flicka.muk99@gmail.com

b) hirai@cse.kyoto-su.ac.jp

2. GMMによる擦り音のモデル化と指本数の識別処理手順

人工大理石やFRPなどの滑らかな表面を持つ素材を擦ったときの擦り音にはピッチ（音高）と明確な調波構造が存在している．水がある状態で指で擦ると，StickSlip現象が起こって擦り音が鳴る．この擦り音には耳で聞き取れるピッチ（音高）があり，音響信号としてF0と調波構造があることがわかる．また，この擦り音を複数本の指で擦った際には，それぞれの指の力加減などにより指ごとに異なるピッチの音が発生する．その具体的な例として，一本指と二本指のそれぞれでの擦り音のスペクトログラムを図1に示す．ここでは，右側の二本指のほうが調波構造が折り重なる形で現れていることが分かる．本研究では，この特徴に着目して指の本数の識別を試みた．

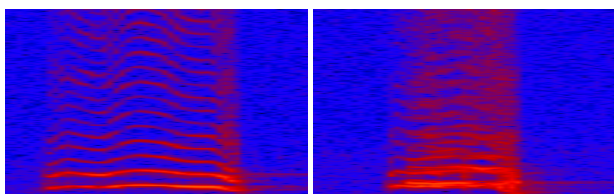


図1 こすり音のスペクトログラム
 左) 一本指 右) 複数本指

Fig. 1 Spectrogram of Rubbing Sound.
 Right) Single Left) Multiple

2.1 GMMによる擦り音の音響スペクトルモデル

擦り音を指本数で分類するために各指本数ごとのモデルを次式のGMMにより生成する．学習データとして用いるのは面積正規化及びF0正規化によってスケールされた擦り音のワースペクトルにおけるピークデータである．ピークデータ取得は閾値処理によって行っている．

$$p(x^{(m)}) = \sum_{k=1}^K \pi_k^{(m)} \mathcal{N}(x^{(m)}; \mu_k^{(m)}, \Sigma_k^{(m)}) \quad (1)$$

ここで， m は m 本指の擦り音モデルを表し，GMMの混合数を K とし k は分布番号を示す． $\mathcal{N}(\cdot; \mu, \Sigma)$ は，平均ベクトル μ ，分散 Σ の正規分布を表す． $\pi_k^{(m)}$ は n 本指の擦り音モデルの k 番目の混合係数に当たる．これらEMアルゴリズムによって最尤推定を行う更新式は以下の通りである．

$$\gamma(z_{nk}) = p(z_k = 1|x) = \frac{\pi_k N(x|\mu_k, \Sigma_k)}{\sum_{j=1}^K \pi_j N(x|\mu_j, \Sigma_j)} \quad (2)$$

$$N_k = \sum_{n=1}^N \gamma(z_{nk})$$

$$\mu_k = \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^N \gamma(z_{nk}) x_n \quad (3)$$

$$\Sigma_k = \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^N \gamma(z_{nk}) (x_n - \mu_k)(x_n - \mu_k)^T \quad (4)$$

$$\pi_k = \frac{N_k}{N} \quad (5)$$

Eステップでは現在のパラメータから負担率 $\gamma(z_{nk})$ を計算し(式2)，MステップではEステップで求められた負担率を用いて平均ベクトル μ ，分散 Σ ，混合係数 π をそれぞれ負担率 $\gamma(z_{nk})$ が最大になるように更新を行い(式3-5)，収束性が確認されるまでEステップとMステップを交互に繰り返し計算を行う．

2.2 指本数の識別処理手順

まず最初にM本指の擦り音モデルをtypeMとする．次に44100Hzサンプリングされた未知データが与えられた場合，先頭から512サンプルずつ取得していき，RMS(Root Mean Square: RMS)を求め閾値以上の波形が検知された時から処理を開始する．(式6)

$$RMS[x] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (6)$$

処理を開始すると，各フレーム毎にFFTを行い，面積正規化及びF0正規化でGMMと同様のスケールを行う．次に各typeのGMMと積和演算を行うことで互いに相関し合う周波数成分を強調させる．ただしF0付近はどのGMMも他の成分に比べ大きな値を取るため判定に使用せず，また，高音成分は値が小さすぎるため計算処理をする必要がない．そのため，積和演算を行う周波数帯域を制限することによってこれらの問題を解決する．

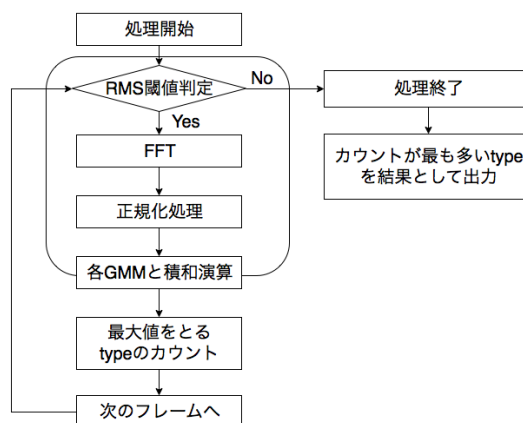


図2 提案手法の処理開始からの処理フロー

Fig. 2 Block diagram of the proposed method.

そして得られた各type毎の積和値の中で最大値を取るtypeをカウントしていく．そして次のフレームに移り，再びRMSを求めて閾値以上であれば同様の処理を繰り返す．最終的にRMS閾値以下のフレームが来た時に処理を終了し，カウントが最大となるtypeを結果として出力する．

3. GMM の構築とその性能評価

今回は、人工大理石でできたキッチンカウンターの天板の裏にピエゾセンサを設置して擦り音の収録と解析、GMM によるモデル化を行った。ピエゾセンサはアコースティックギター用のピエゾピックアップ Guyatone GP-1 を用い、その出力を USB オーディオインタフェースを介して 44100Hz / 16bit でサンプリングした。音響収録に用いたキッチンカウンターと収録時の様子を図 3 に示す。



図 3 キッチンにおける実験環境
 Fig. 3 Experiment environment in Kitchen.

3.1 周波数の制限帯域と精度検証

様々な擦り音のパワースペクトルを解析したところ、大きく変動する周波数成分は F_0 と第 2 高調波であることが確認できている。また、指本数が 2 本以上の場合、異なる指の F_0 は比較的近い周波数であり、一番低く検出される F_0 とその第 2 高調波の間に存在することがほとんどであることも確認できている。複数本指の場合、一番低い F_0 の第 2 高調波と第 3 高調波の間に、他の指の第 2 高調波が入ることになるため、一番低い F_0 の第 3 高調波までを GMM のモデル構築に用いることとした。そこでまず初めに周波数帯域を $1.0[F_s/F_0] < n \leq 2.0[F_s/F_0]$ に設定し、下限値を上昇させることで最適値を検証する。(図 4) また、今回用いる擦り音モデルと同一環境・同一被験者で収録された擦り音データを未知データとして扱う。結果として $1.1[F_s/F_0]$ 付近が最も精度が高いことが確認された。次に下限値を $1.1[F_s/F_0]$ と設定し上限値を上昇させると以下のような結果が得られる。このことから最適値は $1.1[F_s/F_0] < n \leq 2.0[F_s/F_0]$ と考えられる。よってこれ以降の検証ではこの範囲を用いる。

3.2 GMM の混合数と精度検証

擦り音モデルと同一環境・同一被験者で収録された擦り音データを未知データとして固定し、擦り音モデルにおける GMM の混合数を変化によって精度がどのように変化するかを検証する。図 6 より、GMM の混合数は精度に大き

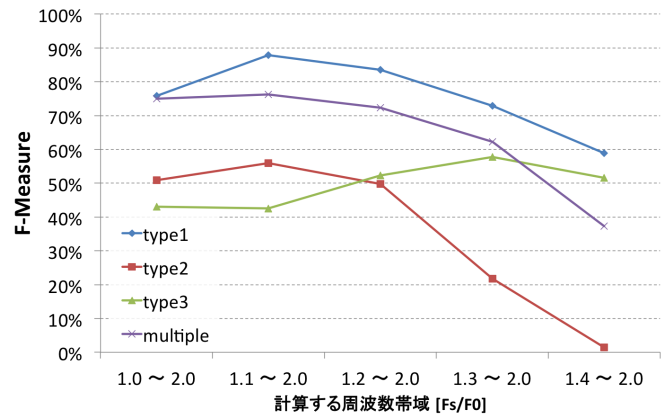


図 4 計算する周波数帯域の下限値と F 値の関係

Fig. 4 Relationship between F-measure and Lower Limit of Calculation Frequency Range.

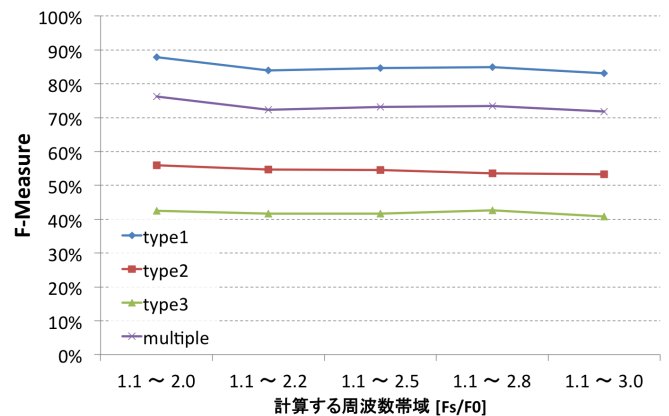


図 5 計算する周波数帯域の上限値と F 値の関係

Fig. 5 Relationship between F-measure and Upper Limit of Calculation Frequency Range.

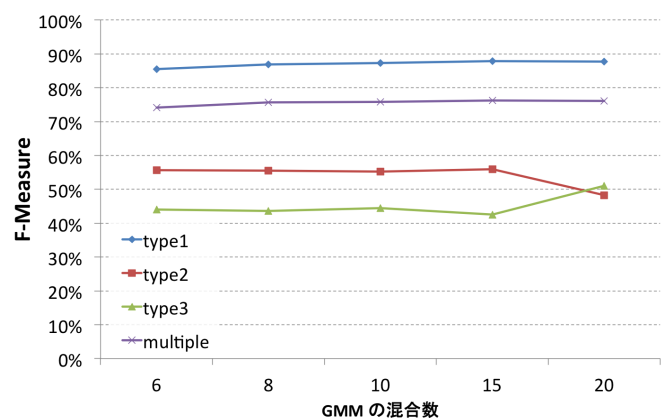


図 6 GMM の混合数と F 値の関係

Fig. 6 Relationship between Recall and GMM components.

な影響が出ることはないが微弱な精度向上には繋がっていることが分かる。ただしある一定数から精度が頭打ちになることも確認されている。このことから、実装するマシンの性能により計算負荷を減らした場合でも精度に大きな支障

を与えないことが示された。

3.3 ユーザの状態と精度検証

同一被験者に五日間に渡って擦り音を収集し、同一の GMM と条件で各日付毎の精度を検証した。(表 1) ただし今回は type2, type3 は複数本指判定を行った場合を成功と見なしている。この結果から、ユーザの状態などによって複数本指の精度が大きく変動する課題が明らかになった。精度が大きく変動する原因の一つとして一つの指の擦り音に対して他の指の擦り音が小さ過ぎることが考えられる。このような問題は擦り音モデルとして用意した被験者と別の被験者の擦り音においても同様の問題が多く見られ、上達や指の状態などの要因が予想できる。

表 1 ユーザの状態と再現率の関係

Table 1 Relationship between Recall and User Condition.

Number of days	1st	2nd	3rd	4th	5th
Temperature	24.7	24.4	26.1	25.3	25.1
Humidity	58%	57%	54%	46%	49%
type1	95%	100%	100%	100%	100%
type2	60%	85%	90%	90%	65%
type3	85%	40%	25%	85%	25%

3.4 実装環境変化による精度検証

入力インタフェースとして汎用的に扱う事を考慮すると、様々な環境で頑健に動作する認識手法であるべきと言える。また、キャリブレーションの手間も省略できることが望ましい。そのような観点から、前述のキッチンとは別の環境として、表面の滑らかさが違う別の人工大理石(図 4)に対し、先に生成した擦り音モデルを用いて精度検証を行った。また、図 4 の環境に合わせた擦り音モデルを生成することで、精度の違いも検証した。それらの結果を表 4 に示す。



図 7 異なった実験環境例

Fig. 7 Other experiment environment example

表 2 より、別環境の擦り音モデルを用いた場合における再現率は 75% を超える精度で判定が行えている事が分かる。また、擦り音モデルを環境に合わせたものに変更する事で 80% 近い精度で判定が行えていることが分かる。しか

表 2 再現率の環境依存性

Table 2 Environmental dependence of Recall.

GMM	Other environment	Same environment
type1	79.40%	86.50%
type2	46.20%	0.00%
type3	37.80%	81.75%
Multi-finger	76.30%	79.50%

し、複数本指の判定すべてが type3 となってしまうっており、結果的に精度が向上したとは言い難い状況と言える。

4. アプリケーション実装例

前述の、指本数識別の結果から、指 1 本と複数本での違いが識別できるシステムとして、幾つかのアプリケーションに適用した。本章では以下の各節でそのアプリケーションについて述べる。

4.1 iRubBook

キッチンなどに導入する例として作成した擦り音を用いたブックリーダーアプリである。調理中などで手が水に濡れた状態や汚れている状態でも擦る指本数によってページ送り戻しやスクロールが可能である。また、マウスのダブルクリックのような連続操作にも対応しており、連続で擦った回数と指本数によって読む本の切り替えが行える。

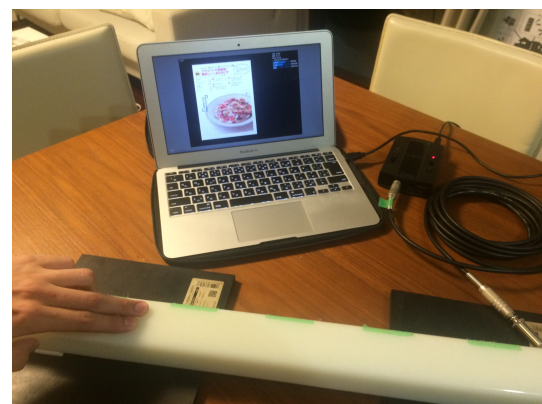


図 8 iRubBook

Fig. 8 iRubBook

4.2 iRubRemocon

家電のスマート化やスマートデバイスの登場など、様々な機器がネットワークで接続され、リモートコントロールできる状況にある。ここでは高機能学習型の赤外線リモコン機器 iRemocon^{*1} と擦り音識別を連携させ、様々な機器を操作するシステムを構築した。例えば、キッチンで調理中にキッチンカウンターを擦り、離れた位置にあるテレビのチャンネルを切り替えたり、BGM の音量を変更したりすることができる。

*1 iRemocon: <http://i-remocon.com/>



図 9 iRubRemocon
Fig. 9 iRubRemocon

4.3 Bathcratch+

先行研究である浴槽エンタテインメントシステム Bathcratch[11] は、擦り音の励起のみを検出してスクラッチサウンドを生成していたが、本研究の手法を適用することで、擦った指の本数でスクラッチサウンドの切り替えやエフェクトをかけることなどができる Bathcratch+ を構築した。



図 10 Bathcratch+
Fig. 10 Bathcratch+

5. おわりに

本研究は、先行研究で提案された擦り音検出によるユーザインタフェースを、指の本数まで識別する入力インタフェースシステムとして拡張し、汎用的に利用できるよう改良することを目指している。現在は、1本から3本までの指本数で擦った音から各本数の擦り音のパワースペクトルから GMM を構築し、それらを用いて指本数識別について試みた。現状の性能評価からは、2本と3本とを識別することは困難ではあるものの、それらを複数本での擦り音と見なすことで、1本指が複数本指かの識別は高精度で行えることは確認できた。その上で、キッチンなどの水場で活用できる生活支援のアプリケーションや先行研究のエンタテインメントアプリケーション Bathcratch の機能を拡

張するなどの応用を示した。今後は、キッチンでの食器類のぶつかる音やその他の雑音との区別をすることと共に、識別性能の向上を目指す。そして、ユーザ評価実験などを通じ、水場でのユーザインタフェースとしての有用性について検証を行う。一方で、Raspberry Pi や Edison などの小型コンピュータボードでも動作するよう計算処理負荷を軽減し、機器や環境に埋め込んだユーザインタフェースとして適用しやすくすることにも取り組む予定である。

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 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: コピキタスホーム: 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 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, 情報処理学会論文集 Vol.54, No.4, pp.1538-1550, 2013.
- [10] 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, 情報処理学会第 77 回全国大会講演論文集, 2ZA-03 (2015)
- [11] Shigeyuki Hirai, Yoshinobu Sakakibara and Seiho Hayakawa, Bathcratch: Touch and Sound-Based DJ Controller Implemented on a Bathtub, In Proc. of 9th International Conference ACE 2012, pp.44-56, 2012.
- [12] C.M. ビショップ (著), 元田 浩, 栗田 多喜夫, 樋口 知之, 松本 裕治, 村田 昇 (訳): パターン認識と学習 下 - ベイズ理論による統計的予測, シュプリンガー・ジャパン (2007)