

# 絵楽器の設計段階におけるプロトタイピング支援システムの設計と実装

Design and Implementation of a Prototyping Support System for Painted Musical Instruments

竹川佳成 福司謙一郎 Machover Tod 寺田 努 塚本昌彦\*

**Summary.** 本研究では、紙の上に描かれた楽器からインタラクティブに音が出る楽器（以降、絵楽器と呼ぶ）を設計する段階におけるプロトタイピング支援システムを実現した。近年、動物の鳴き声や乗り物の音が出る図鑑や、紙の上に導電性インクで電気回路を描くことで音や光を提示する作品など、電気電子情報技術を用いて紙にインタラクティブな機能を搭載する試みが盛んであるが、紙に搭載された入力インタフェースと、それを操作したときの反応は決まっており、ユーザはカスタマイズできなかった。楽器音はさまざまな音色や音高が存在するため、絵楽器の設計段階において、紙上に描かれた楽器から実際に多種多様な楽器音を出せれば、深い議論や問題点の発見につながるといえる。そこで、本研究では、導電性インクを用いて紙上に描いた任意形状のオブジェクトに指で触れて、その場ですぐに多様な楽器音を鳴らせる絵楽器のためのプロトタイピング支援システムを構築した。制作した絵楽器の展示においては好評を博し、特に子供は、巨大なピアノ、猫などキャラクターと一緒に描かれた楽器に強く興味をひかれていた。

## 1 はじめに

近年、動物の鳴き声や乗り物の音が出る図鑑 [1] や、紙の上に導電性インクで電気回路を描くことで音や光を提示する作品 [2, 3] といったように電気電子情報技術を用いて紙にインタラクティブな機能を搭載する試みが盛んである。絵に付加機能を搭載することで、体験・解説・状況・空想上の世界などをより直観的に豊かな表現力をもって表せるが、紙に搭載された入力インタフェースと、それを操作したときの反応は決まっており、ユーザはカスタマイズできなかった。

紙の上に描かれた楽器からインタラクティブに音が出る楽器（以降、絵楽器と呼ぶ）の設計段階においては、絵楽器の外観のデザインや、その出力音は試行錯誤される。楽器音はさまざまな音色や音高が存在し、複数音の同時発音や発音順番によって印象が異なるため、描画や言葉だけで楽器音を的確にイメージすることは困難である。したがって、既存の楽器だけでなく、新規デザインの楽器も対象とする絵楽器の設計段階において、紙上に描かれた楽器から実際に楽器音を出し、その出力音を柔軟に変更できれば、深い議論や問題点の発見につながるといえる。これに対し、ボタン・スライダー・センサ情報を容易に取得できる汎用のセンサボードを備えるフィジカル・コンピューティング [4] 用デバイスは、こ

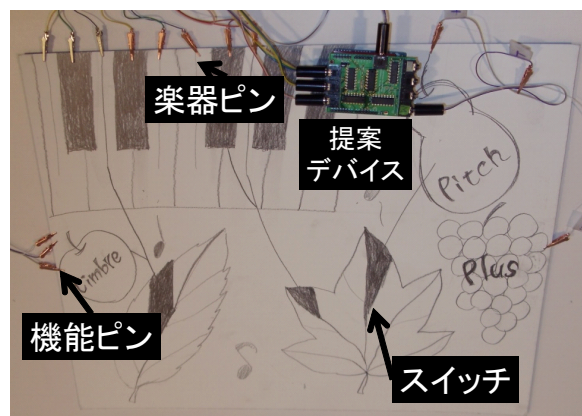


図 1. 提案システムの概観

れを実現する有用なツールであるが、音を出すために電子回路の設計やマイクロコンピュータの振る舞いをプログラミングする必要や、ラフ画に柔軟に対応するためにさまざまなサイズのボタンやセンサを用意する必要があった。特に、初期の設計段階では、紙上に描かれた楽器の入力インタフェース（以降、スイッチと呼ぶ）の形状や数が頻繁に変わるため、このような変更に対応することは困難である。そこで本研究では、絵楽器を設計する段階におけるプロトタイピング支援システムの設計と実装を目的とする。

提案システムを活用することで、図 1 に示すように紙上に描かれたピアノや葉を触ると音を出したり、果物を触ると音高や音色が変わるような、既存楽器だけでなく新規デザイン楽器を含むさまざまな絵楽器を制作できる。

Copyright is held by the author(s).

\* Yoshinari Takegawa, 神戸大学自然科学系先端融合研究環, Kenichiro Fukushima, 東京工業大学大学院総合理工学研究科, Tod Machover, MIT Media Lab, Tsutomu Terada, 神戸大学大学院工学研究科/科学技術振興機構さきがけ, Masahiko Tsukamoto, 神戸大学大学院工学研究科

## 2 設計

本研究では、紙の上に描かれた楽器を指で触れると音が鳴るシステムを構築する。提案システムは、絵楽器の設計のためにラフ画を描いている段階において、実際に音を出力しイメージを具体化することで、絵楽器の設計を深化させることが目的である。利用シーンとして、例えば、セミプロや学生の作品制作などで1人あるいは複数人で考えながら楽器の外観やスイッチの形状などを紙上でデザインしている状況を想定している。また、多種多様な音高や音色があることや、その違いを理解しており、各スイッチから出力される音にこだわりをもっており、ピアノやギターといった楽器の弾き方、これらの楽器に割り当てられている音高の規則を理解しているユーザを対象とする。そのために、システム設計における要件として下記の4点をあげる。

(i) 多様性: さまざまな形状のスイッチを作れること  
絵楽器では、通常の楽器のように直線的なスイッチだけでなく、絵ならではの芸術的な曲線をもつ形状のスイッチなども考えられ、ラフ画ではさまざまな形状のスイッチが描かれる。したがって、描かれたスイッチを簡易の入力インタフェースとして機能させ、かつ、多種多様な形状のスイッチに柔軟に対応できる必要がある。

(ii) 編集性: スwitchの追加修正や、楽器音の再マッピングなど編集が素早く直観的に行えること  
設計段階においては、時々刻々と創造的なアイデアが生まれ、スイッチの形状や、スイッチと楽器音のマッピングが何度も追加修正される。また、修正と試行のサイクルが短時間のうちに繰り返されることで、洗練され完成度が高まるため、素早く直観的に編集作業を行える必要がある。

(iii) シームレス性: スwitchの配置作業とラフ画の描画作業がシームレスに移行できること  
楽器の外観やスイッチは関連度が高く、これらのデザインは同時にできた方が望ましい。したがって、スイッチの配置作業と楽器の描画作業がシームレスに移行できる必要がある。

(iv) 即時利用性: その場ですぐに利用できること  
ひらめきは、自宅や職場だけでなく、通勤中や通学中、料理中や掃除中などさまざまな状況で生まれるため、その場ですぐにアイデアを反映できる手軽さが求められる。

### 2.1 入力インタフェースの検討

1章で述べたように、既存の入力インタフェースとして一般に使われているボタンや各種センサは、ラフ画に描かれるさまざまな形状のスイッチへの対応や、仕様変更にも柔軟に対応することが難しい。した

がって、本研究では、要件 (i) を満たすために導電性インクを用いる。静電容量の原理を活用することで、導電性インクを塗布した部分がボタンとして機能する。また、インクを利用することでさまざまな形状のスイッチをその場で簡単に作れる。導電性インクとしては、鉛筆、黒色の水彩絵の具、LessEMF社のCuPro-Cote[5]などがある。特に、鉛筆は、薄く描いた場合、抵抗値が高いため導電性インクとして使えないが、濃く描けば抵抗値が低くなり導電性インクとして機能するため、音が鳴ってほしい箇所は濃く描き、鳴ってほしくない箇所は薄く描くというように使い分けすることもできる。また、消しゴムで消せるため、仕様の変更も容易である。これらにより、スイッチに関する要件 (ii)、要件 (iii) を満たす。

なお、CuPro-Coteは導電性の高いインクであり、これでスイッチを塗布した後に絵の具などで上塗りすることも可能である。これは、完成版絵楽器を制作する際に有用である。

### 2.2 音出力までの流れ

提案システムを使って、描かれた絵から実際に音が鳴るまでの流れについて説明する。

1. 好みの絵を描く。
2. スwitchを導電性インクで塗りつぶす。以降、導電性インクが塗布されたスswitchをアンテナと呼ぶ。
3. 提案デバイスは図1に示すように複数の入力ピン（アンテナと提案デバイスの静電容量計測回路とを物理的につなげるインタフェース）を搭載しており、アンテナと入力ピンをそれぞれ繋げる。
4. 各アンテナに割り当てる音を設定する。
5. アンテナに指で触れることによって音が実際に出力される。

本研究では導電性インクを用いることで、任意形状のスswitchから音を出すことができる。また、描くという行為の延長として作業できるため、アンテナ同士が接触しないように塗りつぶすということに注意すればよく、特別な電子工作の知識を必要としない。さらに、紙、インク、提案デバイス以外に持ち運ぶ必要がないため手軽に即座に使用できる。これにより要件 (iv) を満たす。

### 2.3 マッピング方法

提案デバイスは、多種多様な絵楽器の制作をめざしており、多彩な音色を搭載する。また、手軽さを満たすために提案デバイス単体でマッピングを完結させる一方、デバイスに搭載されている入力ピンの数は限定され、出力は楽器音のみと貧弱なインタフェース上でマッピングを実現する必要がある。こ

表 1. 機能ピンの種類

名称	説明
Plus ピン	音高・オクターブ・音色の値を1つ増加させる．
Minus ピン	音高・オクターブ・音色の値を1つ減少させる．
Pitch ピン	音高を設定する．
Octave ピン	オクターブを設定する．
Timbre ピン	音色を設定する．
Volume ピン	音量を設定する．
Group ピン	グループを構築する．
Keyboard ピン	鍵盤構造を構築する．
String ピン	弦楽器構造を構築する．
Percussion ピン	打楽器構造を構築する．
Copy&Paste ピン	楽器ピンの音をコピーし，他の楽器ピンにペーストする．
Recording ピン	レコーディングした音を楽器ピンの音として割り当てる．

のような要求や制約において，楽器音に関する要件(ii)を満たすために，楽器のメタファを活用したルールに従ってアンテナに触れるだけで，複数アンテナの音高や音色をまとめて設定できる直観的かつ高速なマッピング方法を含むさまざまなマッピング方法を提案する．以下，提案するマッピング方法について詳細に説明する．

なお，入力ピンには「音を鳴らしたいスイッチと繋がる楽器ピン」および「楽器ピンの音のマッピングに使用する機能ピン(表1)」を用意し，これらを利用しながらマッピングをしていく．また，図1に示すように楽器ピンだけでなく機能ピン用のスイッチを描くこともできる．さらに，これらの機能ピンを押した場合に，その機能固有の音を出力することで設定中であることを認識できるようにしている．楽器ピンには，音色はピアノが，音高は「ピアノの鍵盤の中央のド(60: MIDI のノートナンバ)」がデフォルトで設定されている．

### 1. 加減方式

音高を変更するためには，図2(a)に示すように，Pitch ピンおよび変更したいスイッチのアンテナをつなぎ，Pitch ピンを押しながら，Plus ピンをタップ(押して離すこと)すれば音高が1音高くなり，Minus ピンをタップすれば音高が1音低くなる．また，図2(b)に示すように Pitch ピンに複数スイッチのアンテナをつなげることにより，接続されたスイッチの音高を同時に変更できる．オクターブ，音色，音量に関しても音高設定操作と同様で，該当するピン(Octave ピン，Timbre ピン，Volume ピン)と変更したいスイッチのアンテナをつなげることにより変更できる．

物理的に結ばれた場合だけでなく，図2(c)に示す

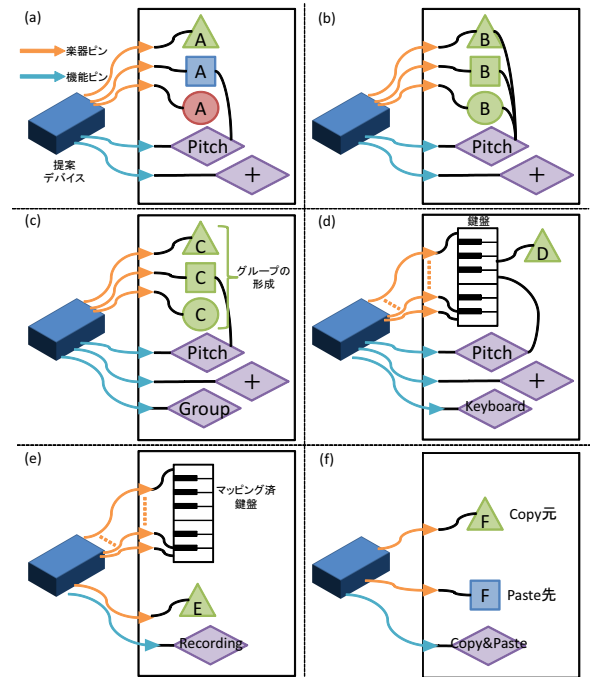


図 2. 機能ピンの使用事例

ように，Group ピンを押しながらスイッチのアンテナをタップすることで，グループを形成し，グループ単位で上記操作を行うこともできる．

本手法は，最もシンプルなマッピング方法であるが，所望する音を設定するために時間がかかる．

### 2. 楽器方式

楽器方式は，音高や音色設定の元となる楽器をもとにスイッチのマッピングを行う．これは楽器そのものを描く場合や，楽器のメタファを使って音を割り当てたい場合に有効である．楽器としては，鍵盤楽器，弦楽器，打楽器の3種類を提案しているが，本論文では紙面の都合上，鍵盤楽器のみ説明する．

鍵盤楽器は，一般に，白鍵と黒鍵の2種類があり，左の鍵から右の鍵にかけて音高が高くなる構造をもつ．そこで，鍵盤構造の特性を活用した鍵盤楽器構築のためのルールを提案する．ユーザは，以下のルールに従い設定することで，直観的かつ高速に鍵盤楽器を構築できる．

1. 設定中は，Keyboard ピンを常に押しておく．
2. 音高の低い鍵から順にタップする．
3. 白鍵は1回タップ，黒鍵は2回タップする．

システムは白鍵と黒鍵の組み合わせパターンから構築された鍵盤を認識し自動的に音高をタップされた鍵に割り当てる．デフォルトとして音色はピアノの音，オクターブは「ピアノの中央のド(60)のオクターブ」が割り当てられる．



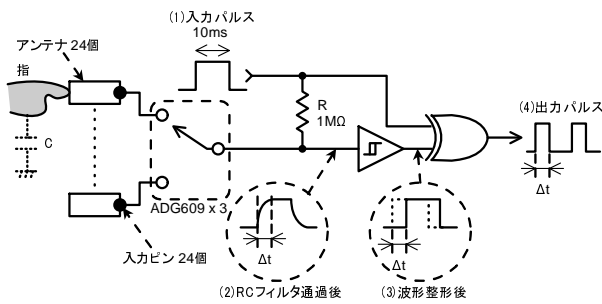


図 3. プロトタイプデバイスの回路図

なお、弦楽器や打楽器のメタファを使ってマッピングする場合、String ピンや Percussion ピンを使用する。

作成した楽器に関しても上記で述べた加減方式が適用できる。例えば、図 2(d) に示すように、Pitch ピンと鍵盤楽器の鍵をつないで、Pitch ピンを押しながら Plus ピンを押すことで、接続した鍵だけでなくその鍵が所属する鍵盤楽器全体を移調することができる。また、図 2(d) の三角スイッチ D のように、鍵盤楽器の鍵とスイッチを結ぶことで、接続した鍵の音を得られる。

楽器方式は楽器を描く必要や、楽器の構造を理解している必要はあるが、描いた楽器をもとに設定するため視覚的に何の音が割り当てられているか理解しやすい。

### 3. レコーディング方式

レコーディング方式は、すでに構築された楽器やマッピング済みのスイッチを使って演奏を記録し、それを新たなスイッチの音として割り当てる。これにより、スイッチに和音やフレーズを割り当てられる。具体的な設定方法としては、図 2(e) に示すように Recording ピンと設定したいスイッチを押しながら、マッピング済スイッチを使って演奏する。Recording ピンが離されるまでの演奏が記録され、Recording ピンが離された段階で設定したいスイッチに記録した演奏の音が割り当てられる。

### 4. コピー&ペースト方式

コピー&ペースト方式は、マッピング済みのスイッチの音を他のスイッチにコピーできる機能である。具体的な使用方法としては、図 2(f) の Copy&Paste ピンを押しながら三角スイッチ F を押すことで、三角スイッチ F に割り当てられている音をコピーされる。次いで、四角スイッチ F を押すことで、コピーした三角スイッチ F の音が四角スイッチ F の音としてマッピングされる。



図 4. 展示の様子

## 3 実装

2 章で述べたプロトタイプシステムのプロトタイプを実装した。プロトタイプデバイスの制御は Arduino Uno を使用し、音源は Arduino の拡張シールドである Musical Instrument Shield を用いた。静電容量検出モジュールは自作の回路を作成し、Arduino の拡張シールド同様積み上げられるように設計した。デバイス本体のサイズ（入力ピンを含まない）は 7.6cm(横) × 5.6cm(縦) × 2.5cm(高さ)であり、重さは 283g で小型軽量である。

本回路は、人がもつ静電容量を利用した RC ローパスフィルタを持ち、入力パルスの応答から静電容量値  $C$  を推定する。図 3(1) のパルスの波形は抵抗  $R(=1M)$  と静電容量  $C$  によって (2) のように  $t$  の遅れをもつ波形に変化する。 $C$  が大きな場合、すなわち電極に指が触れている場合はより長い遅れ  $t$  が発生する。波形の遅れ  $t$  を計測するには、(2) の波形をシュミットトリガ入力バッファによって整え、(1) との排他的論理和を取ることで長さ  $t$  のパルスを作り、Arduino Uno で計測する。また複数の入力ピンに対応できるように、アナログスイッチ (ADG609) を用いて時分割で各入力ピンの静電容量値を計測できるようにした。なお、静電容量計測時に人体に流れる電流は最大で 5uA と極めて小さく、人体に影響はない。また、人が感ずることのできる最小の電流 0.2mA(60Hz 時)[13] を大きく下回っており、利用者は痛み等電気による刺激は全く受けない。

## 4 実運用

図 4 に示すように、プロトタイプデバイスを用いて巨大なピアノや、ネコ・カエル・鳥といったキャラクターと楽器と一緒に描かれた絵楽器、楽譜を模した絵楽器を制作した。これらの絵楽器を用い

て、実際に Boston Children's museum で 3 回の展示、Elizabeth Seton Residence にて 1 回の展示を行った。

これらの絵楽器は、2.3 節で説明した楽器方式のマッピング方法を使うことで短時間でセッティングを済ませることができたが、今回の展示のようにアンテナと出力音の関係が一意に決まっている場合においてはマッピング機能は不要である。また、紙上のピアノ、ギター、打楽器の演奏方法は既存の楽器と同じで、来場者は特別な説明がなくとも楽器に触り演奏を楽しんでいた。子供はカエルや猫などキャラクターが描かれていることでより親近感をもって使ってもらえ、これは Boston Children's museum のスタッフから「子供は動物にとっても興味をもっており、これらのキャラクターの影響は、子供たちの緊張の緩和や好奇心の向上に貢献している」とコメントをもらったことから伺える。さらに、お年寄りには筋力が弱っており、打鍵や弦をかき鳴らすために十分な力がなく演奏を諦めていた人も、演奏を楽しんでおり、紙楽器の思わぬ利点に気付くことができた。一方、ギターに関しては、入力から音の出力までの遅延が問題となった。ギターは、弦をかき鳴らすイメージが強く、多くの子供達はギターを目の前にしたとき、弦をかき鳴らす動作をしていたが、全ての音が鳴らずに困惑している子供も中にはいた。遅延に関しては高速なマイコンの利用や、ギターの弦など速度がもとめられる部位は検出回数を増やすといったことで対応していきたい。

## 5 関連研究

**静電容量センサを利用した事例** 静電容量センサを使ってインタラクティブなシステムを構築している事例として、SmartSkin[6] やテルミン、ふれあいどらむ [7] がある。SmartSkin は、静電容量を検出する電極を格子状に張り巡らし、人体の位置や形状を測定するデバイスであるが、入力インタフェースとして開発されたためマッピング機能をもたない。テルミンは、テルミン本体からのびている 2 本のアンテナと手との距離を計測し音高や音量を制御している。これは基本的に単音の出力を前提としており、複数アンテナに対して音をマッピングできない。ふれあいどらむは人同士の接触により演奏する楽器である。音色を変更するためのボタンをもち、1 つのボタン操作で複数アンテナの音色を一斉に制御する。ボタンの数しか音色を割り当てられないが、子供など複雑な操作が苦手なユーザにとっては有効である。さらに、これらの事例はいずれも、好みのスイッチを作成したり、アンテナのサイズや形を柔軟に変更できなかった。

これに対して、本研究で提案するデバイスは導電性のインクを活用することで、さまざまな形状のア

ンテナの作成や編集を容易に行える。また、さまざまな音色や音高を割り当てるために、例えば、音高を 1 つずつ高くするといった相対的に変化させる方式を採用したり、楽器の特性を用いて複数アンテナの音高をまとめて割り当てる方式などを提案している。これにより扱える音色や音高のバラエティは増すが、設定の難度は高まる。したがって、いかに直観的なマッピング方法を提案するかが本研究の課題となる。

**導電性インクを利用した事例** 導電性インクを用いたインタラクティブシステムとして、DrawDio[8] や文献 [2]、文献 [3] がある。DrawDio は、紙や布の上などに水や鉛筆で描かれた線の抵抗値を計測して音を奏でる楽器である。DrawDio は任意形状のスイッチを制作できるが、物理的なスイッチの長さによって出力音そのものが変化するため出力音がスイッチ形状に依存している。本研究の提案デバイスは、出力音の自由度を高めるために、スイッチ形状と出力音は独立している。文献 [2] や文献 [3] は、紙上に導電性インクを使って回路を作成し紙を折りたたむことでスイッチの機構を実現している。これらは、設計段階においてスイッチの形状を自由自在に変更できるが、本研究のようなマッピング環境は備えていない。マッピング機能をもたせないことで操作方法は簡単になるが、操作対象（本研究では音色や音高）の自由度が下がるため創作活動が限定されてしまう。

**光学センサを利用した事例** 光学センサを用いて紙などの上に描かれたものに対して音を出力する研究として Twinkle[9] や LiveScribe 社の Pulse Smartpen[10] がある。Twinkle は、紙の上に描かれた色とりどりのマークをカラーセンサで読み込み、その結果を音として出力している。Pulse Smartpen は、カメラを用いて軌跡から描かれたものを認識するアノトペン [11] と音声録音/再生機能を一体化したもので、指示に従いピアノの鍵盤の形状を描くとピアノの音が再生される。これは指示から逸脱した形状に対して柔軟に対応できず、マッピングは音色を 1 つずつ相対的に変更するというシンプルな機能しかもっていない。Twinkle は、スイッチごとに異なる色を塗る必要があり、カラーセンサの性能による認識精度を確保するために使える色は限定されスケラビリティに限界があり、マッピング機能をもっていない。

**タブレットを利用した事例** UPIC[12] はタブレットに描いた図形が音に変換されるシステムである。ディスプレイを用いることでさまざまな形状を作成でき、音色や音高のマッピングの自由度は高く直観的な操作を実現できるが、紙上で実現できない。

## 6 まとめ

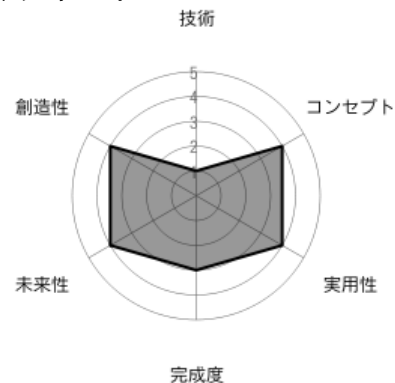
本研究では、導電性インクを用いた音情報提示のためのプロトタイピングシステムを構築した。提案システムは、導電性インクを用いることで、任意形状のスイッチを配置でき、ラフ画の延長としてこれらを描けるためシームレスである。また、各スイッチに割り当てる音を直観的にかつ高速にマッピングできる手法を提案した。

今後の課題としては、マッピング方法に関する評価実験などがあげられる。

## 参考文献

- [1] おととあそぼうシリーズ, ポプラ社
- [2] Paper and conductive ink piano:  
[http://jp.makezine.com/blog/2010/07/paper\\_and\\_conductive\\_ink\\_piano.html](http://jp.makezine.com/blog/2010/07/paper_and_conductive_ink_piano.html)
- [3] Electronic Origami:  
[http://makeprojects.com/pdf/make/guide\\_150\\_en.pdf](http://makeprojects.com/pdf/make/guide_150_en.pdf)
- [4] 長嶋洋一: フィジカル・コンピューティングとメディアアート/音楽情報科学, 情報処理学会研究報告 (音楽情報科学研究会 2008-MUS-077), Vol. 2008, No. 89, pp. 1-6, 2008.
- [5] LessEMF 社の CuPro-Cote:  
<http://www.lessemf.com/292.html>
- [6] K. Fukuchi and J. Rekimoto: Interaction Techniques for SmartSkin, *In Proc. of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2002.
- [7] ふれあいドラム:  
<http://freqtric-drums.jpn.org/>
- [8] J. S. Silver and E. Rosenbaum: Gifts for intertwining with modern nature, *In Proc. of the 9th International Conference on Interaction Design and Children*, 2010.
- [9] J. S. Silver and E. Rosenbaum: Twinkle: programming with color, *In Proc. of the 4th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 383-384, 2010.
- [10] LiveScribe:  
<http://livescribe.com/>
- [11] アノトペン:  
<http://www.anoto.co.jp/>
- [12] UPIC:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/UPIC>
- [13] T. Bernstein: Electrical shock hazards and safety standards, *IEEE Transactions on Education*, Vol. 34 (3), pp. 216-222, 1991.

## アピールチャート



### 未来ビジョン

本研究は下記の2つのビジョンに直接的に貢献できていると考えている。

【だれもが楽器制作を楽しめる環境に向けて】  
本取り組みは、これまでの「既製品による楽器演奏」というアプローチを超えて「制作したオリジナル楽器による楽器演奏」という楽器と人との関わり方の構築を狙いとしている。近年、3Dプリンタやレーザカッタなどの工作機械の技術が進展し木材や鉄板などさまざまな素材を自由に加工できるようになってきた。提案デバイスは、導電性インクを塗布できるところであれば楽器化できるため、工作機械で楽器の筐体を作成し、入出力インタフェースとして提案デバイスを使うという応用も可能になる。これにより体のサイズにあった楽器や、嗜好が存分に入った楽器などこれまでの楽器にとられない独創的な楽器を提案できる。今後は、

取り扱えるセンサの種類を拡充し、各センサの特性を考慮した直観的な音のマッピング方法を提案し、多彩な音楽表現ができるフレームワークの構築を目指したい。

【だれもが楽器演奏を楽しめる環境に向けて】  
提案デバイスは、特殊な部品を必要とせず、シンプルなハードウェア構造で実現できるため、安価に製産でき、小型・軽量で、省電力性も高い。また、紙と鉛筆さえあればいつでもどこでも楽器化できる。したがって、病院のベッドの上など楽器が使いにくい場所や、発展途上国の貧しくて楽器を購入できなかった子供達にも楽器演奏の楽しさを提供できていると考えている。このためには、過酷な環境でも動作するように耐久性を高め、太陽電池などで駆動できるように省電力性を高めるなど、さまざまな環境で手軽に取り扱えるようにハードウェアを洗練させていきたい。