

押す，掴む，回すを利用した演奏インタフェースの試作

金井隆晴^{†1} 菊川裕也^{†1} 鈴木龍彦^{†1}
馬場哲晃^{†1} 串山久美子^{†1}

著者らはソレノイドアクチュエータに数種のセンサを内蔵した独自のユニットを制作し，16個のユニットを内蔵する立方体型のデバイス「PocoPoco」を制作してきた．本稿では，ソレノイド機構による実物体の上下運動装置と，ユーザの「押す，掴む，回す」入力装置を楽器演奏インタフェースに応用する行程を述べる．物体が実際に動くことで，動的なアフォーダンス提供が可能になるだけでなく，その動きによりユーザを魅了するインタフェースを提案できると考えている．本論文では，1年間の展示・パフォーマンス活動を通じて改良した電子楽器 PocoPoco に関して，デバイスの概要，入力装置の詳細，それらを利用した楽器演奏インタラクションについて考察する．

Prototyping of Musical Interface that applied Pushing, Catching, Turning

TAKAHARU KANAI,^{†1} YUYA KIKUKAWA,^{†1}
TATSUHIKO SUZUKI,^{†1} TETSUAKI BABA^{†1}
and KUMIKO KUSHIYAMA^{†1}

We developed original solenoid actuator units with built-in several sensors, and produced a box-shaped device “PocoPoco” using 16 units of them as an universal input/output device. In this paper we apply up-and-down movement of the solenoid-units and user’s input such as “pushing”, “catching” and “turning” to musical interface. Using transformation of the object, we can apply movement of the units to new interaction design. At the same time we intend to suggest a new interface whose movement itself can attract the user. In this paper we shall mention an abstract of the device and a detail of the input interaction such as “pushing”, “catching” and “turning”, considering several improvements achieved based on feedback from exhibitions and live performance given in one year’s our study. After that, we give careful consideration to a musical interaction design to use those input/output functions efficiently.

1. はじめに

近年，スマートフォンやメディアタブレットなどの普及により，タッチパネルデバイスによってアプリケーションを操作する機会が多くなった．画面上のインタフェースを変更可能なタッチパネルデバイスは，様々なコンテンツに対応ができる．しかし，ハードウェア形状は変わることがない為，ユーザが受けとるアフォーダンスは依然として視覚・聴覚情報に限定されている，タッチパネルデバイスが普及する一方で，ハードウェアの形状変化を利用したインタフェース事例が報告されている．G. Michelitsch らによる Haptic Chameleon¹⁾ では，インタフェースとなるデバイス自体を可動式にすることでインタフェースがユーザに与えるアフォーダンスを動的にコントロールすることを試みている．実物体の動きがインタフェースとして機能することで，そのインタフェースは状況に応じた動的なアフォーダンス提供が可能である他，その動きによってユーザを魅了する可能性を持つ．

芸術分野において，キネティックスカルプチャに代表される動きを伴った芸術作品は古くから鑑賞者を魅了してきた．中でもキネティックアートの分野では，鑑賞者がインタラクティブに関わることでできる作品も存在する．キネティックアートは，1900年代初頭からマルセル・デュシャン²⁾ やナウム・ガボ³⁾ らを筆頭とする数々のアーティストが制作してきた．初期のキネティックアートは風や水の力で動くものがほとんどだった．柳幸典⁴⁾ は昆虫の動きを作品に取り入れる等，現代芸術の多様化とともに作品も多様化してきた．中でもコンピュータによる制御や周囲のセンサによって，鑑賞者の行動にインタラクティブに反応するキネティックアートが近年多く発表されている．例えば，児玉らによる MorphoTower⁵⁾ は，鑑賞者の動きに対して，磁界を変化させ，磁性流体を生き物のようにダイナミックに変化させる作品である．加藤ら⁶⁾ はスピーカ振動とダイラタンシー現象を利用した造形表現を発表している．この他，芸術に限らず，幼児が動くものに興味を示すことや，動きを取り入れた広告がユーザの興味をひき易いなどは，よく知られた事実である．

以上を踏まえ，本研究では動きを伴う実物体インタフェースを利用したミュージックシーケンサ型電子楽器の制作を目指す．石井らが提案してきた tangible⁷⁾ の概念に加え，本研究では “動く・触れる”インタフェースを提案する．動的に盤面上の形状が変化するデバイス

^{†1} 首都大学東京大学院
Graduate School of Tokyo Metropolitan University

PocoPoco は、インタフェースそのものが物理的に動作するため、視覚情報に加え、触覚を介したダイナミックな情報呈示が可能である。また、スイッチと複数のセンサによりユーザは各ユニットについて、「押す」、「掴む」、「回す」、というフィジカルな入力を行うことができる。PocoPoco ではこれらの触覚主体の入力方法によりより直感的に音を操作でき、さらに楽器そのものの形状変化によって動的にアフォーダンスを提供できる電子楽器の制作を目指す。

2. 関連研究

形状変化が可能なデバイスの関連研究として、形状ディスプレイの研究分野では様々な駆動機構を用いたシステムが提案されている。岩田らによる FEELEX⁽⁸⁾ や Leithinger らによる Relief⁽⁹⁾ は、DC モータに送りネジ機構やピストン・クランク機構を組み合わせてピンアクチュエータを動かす可変式ディスプレイである。Matthew らによる Recompose⁽¹⁰⁾ も DC モータ駆動の可変抵抗器を利用しピンを上下する。モータを使用した可動式ディスプレイは駆動スピードが早く、力も強い反面、駆動音が大きいが、駆動音が小さい機構としては形状記憶合金があげられる。Poupyrev らによる Lumen⁽¹¹⁾、中谷らによる PopUp!⁽¹²⁾ は形状記憶合金を利用した可変式ディスプレイである。形状記憶合金に関しては駆動音はほとんど無いが、速い動きや強い力を要する場面には向かない。点字ディスプレイは点字を動的に表示するためのデバイスである。点字ディスプレイではドットの駆動に圧電アクチュエータが用いられる。圧電アクチュエータは小型で駆動音も無いが、駆動の幅が小さく、ダイナミックな動きを呈示することには不向きである。

上記に対し著者らは自作のソレノイドアクチュエータ機構を利用することで即時性が高く、ある程度の動作幅を持ち、さらに駆動音が小さい動作ユニットを制作した。本デバイスは著者らが以前に制作した Emerging Keys⁽¹³⁾ の機構を基にしている。Emerging keys は使用する用途に合わせて動的にインタフェースの形状が変化するデバイスである。タイピングの際はキーボード型に、ゲームの際はコントローラ型にキーが浮遊し操作が可能になる。底面に磁石がついたキーが電磁力によって浮き上がり、凹凸をユーザに提示するだけでなく、スイッチの入力機構を備えることにより入力の機能を持つ。本研究ではこの機構を利用・改良し、「掴む」、「回す」の二つのインタラクションを追加した。

2.1 ミュージックシーケンサ型電子楽器

本研究で制作する電子楽器はミュージックシーケンサ型電子楽器となる。岩井ら⁽¹⁴⁾ による TENORI-ON や、Golan⁽¹⁵⁾ による Scrapple は近年のミュージックシーケンサ型電子楽



図 1 PocoPoco の外観
Fig. 1 Appearance of the device

器といえる。TENORI-ON ではマトリクス状に配されたボタン操作、Scrapple では横に並べたオブジェクトを順に上部のカメラから読み取ることで、それぞれに対応した音色をタイムラインに合わせて出力する。これらの電子楽器は光と音を同期させることで直感的な操作を可能にしており、本稿で紹介する PocoPoco も光と音を同期させる電子楽器という点ではこれらに分類される。一方で PocoPoco はソレノイドアクチュエータを用いた実物体のリズミカルな物理運動をインタラクションの主体としており、その点は既存の電子楽器の中であまり例をみない。また動いているソレノイドユニットを手で捕まえ、回したり上下させることによって音響を操作するといった触覚に主眼を置いたインタラクションについても同様に独特であると考えられる。

3. デバイスの実装

3.1 概観

PocoPoco は動的な触覚情報呈示が可能な自作ソレノイド出力装置と数種類のセンサを応用した触覚主体の入力装置を同時に備えたデバイスである。自作ソレノイドユニットは土台部と可動部からなり、デバイス内に内蔵されたマイコン制御にて可動部が上下動する。可動部を押しこむことで、デバイス底面のスイッチが押される。また、各ソレノイドユニットにフォトリフレクタを取り付けることで、上下動及び回転状態を取得することができる。本デバイスの外観を図 1 に示す。本稿では可動部と、土台部、土台部に取り付けられたセンサ入力機構をまとめてソレノイドユニットと呼ぶ。デバイスの仕様を表 1 に示す。

表 1 デバイスの仕様
 Table 1 specification of the device

| | |
|--------|-----------------------------|
| 動作電圧 | 12V |
| 最大電力 | 60W |
| 筐体寸法 | 205 × 205 × 90(W × D × H)mm |
| 総重量 | 1215 g |
| 筐体材質 | アクリル |
| 外部通信規格 | MIDI, IN/OUT 1 組 |
| 内部通信規格 | シリアル Baud 31250 |

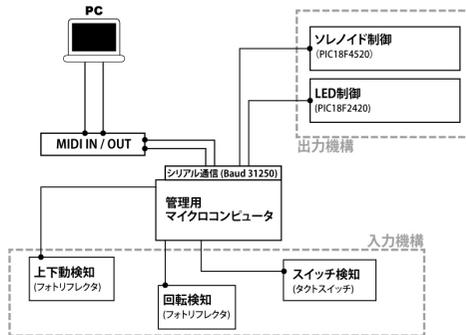


図 2 PocoPoco システム構成
 Fig.2 System of PocoPoco

3.2 システム構成

本デバイスはソレノイドユニットとそれをコントロールする回路によって構成される。図 2 に構成の概観を示す。出力回路には、可動ユニットを上下させるソレノイド制御回路と各ユニットの LED 発光を管理する LED 制御回路があり、各回路は Microchip 社の PIC によって制御される。入力回路は、マトリクススイッチ検出回路、可動部の回転を検出する回転検出回路、可動部の上下位置を検出する上下動検出回路の 3 構成となる。これら計 5 つの回路は Arduino Mega からなる管理用マイクロコンピュータによって制御される。

3.3 ソレノイドユニットの制作

本研究で利用するユニットは、プッシュ型 DC ソレノイドアクチュエータ機構にセンサ入力を付加したものである。外観を図 3、に示す。入力は「タクトスイッチによる押し動作の検知」、「フォトリフレクタによる高さ情報の検知」、「フォトリフレクタによる回転情報の検知」の三種類の情報を取得できる。

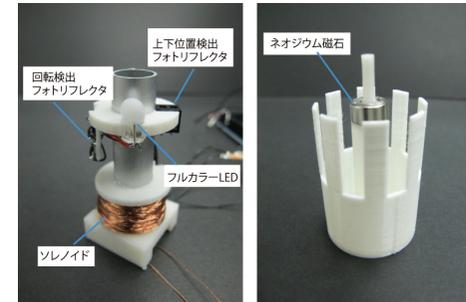


図 3 ソレノイドユニットの外観 左：土台部、右：可動部
 Fig. 3 Appearance of the solenoid unit (Left : Base part, Right : Moving part)

3.3.1 出力機構：ソレノイド機構による上下動

可動部の底にはリング型ネオジウム磁石が取り付けられており、土台部はエナメル線が巻かれソレノイドの役割を果たしている。コイルに電流が流れることで極性が生じ、それにネオジウム磁石が反発することで可動部が浮き上がる。各ソレノイド回路は制御用マイクロコンピュータに接続され、制御用マイクロコンピュータはシリアル通信にて管理用マイクロコンピュータに接続されている。各ソレノイド回路は 128 段階の PWM 出力が可能である。

3.3.2 入力機構：押す

ソレノイドユニットの下にタクトスイッチを配置することでユーザの押し動作を検知する。ユーザがユニットの上面を押すと、その動きに連動して可動部から伸びる足パーツがタクトスイッチを押す。搭載したソレノイドユニットと同じ数の 16 個のスイッチの入力を縦横 4 × 4 のキーマトリックススキャンを利用して検出している。

3.3.3 入力機構：掴む

上下に駆動する可動部の高さ情報を取得するために、フォトリフレクタを土台部に固定し(図 3 左参照) 可動部の上面との距離を測定できる機構を取り入れた。デバイスの電磁力による可動部の上下駆動幅は 2cm 程度であるのに対し、現在の設計におけるフォトリフレクタの検出可能距離は 4cm 程度である。よって電磁力によって上下運動する幅よりも広い範囲の位置情報を所得できる。例えば、電磁力が可動部を持ち上げることでできる限界の高さよりも高い位置まで可動部が上がっていることを検知することで、デバイスはユーザが可動部を掴み高く持ち上げているということを認識する。

表 2 ソレノイドユニットの仕様
Table 2 Spec of the solenoid unit

| | |
|------------------|---------------------------------------|
| ソレノイドのピッチ | 35mm |
| 可動部の上下駆動幅 | 20mm |
| 可動部重量 | 10g |
| コイル巻き数 | 500 回 |
| ソレノイドユニット材質 | ABS 樹脂, アルミニウム |
| ネオジム磁石の仕様 | リング型, 10 × 5 × 5, 表面磁束密度 4090G/ 409mT |
| 回転検知フォトorefレクタ | TPR-105F |
| 上下位置検知フォトorefレクタ | RPR-220 |

3.3.4 入力機構：回す

可動部は土台部に収容されており、ソレノイドユニットの中心を軸に自由に回転させることができる。本研究では可動部の回転情報を取得するために、2個のフォトorefレクタを使用した。可動部の側面には複数のスリットを入れた(図3右参照)。可動部の側面がフォトorefレクタの光を反射したかどうかを検出することで可動部の回転を検知する。2個のフォトorefレクタを左右に並べることで、光の変化を左右どちらの素子が先に検出するかで回転方向を認識する。一般的に回転情報を取得する手法は可変抵抗やロータリーエンコーダを用いるが、本デバイスでは可動部と土台部を結合させてしまうと電磁力で可動部を浮かせることができなくなってしまうので、このような手法をとった。

4. アプリケーション

4.1 概要

本デバイスを利用した楽器演奏用アプリケーションについて詳述する。演奏者はソレノイドユニットのスイッチの ON/OFF を選択することで一定周期の自動演奏を繰り返すリズムシーケンサの演奏音を操作することが出来る。16個のソレノイドユニットはそれぞれシーケンサの演奏する一小節分の拍に対応しており、スイッチが ON になっているソレノイドユニットの可動部は所定のリズムで上下運動を行い、同時にそれに対応する音源が再生される。ユーザは浮かび上がる可動部を掴み、上下動させることや回転させることで音響を動的に操作することが出来る。

4.2 操作方法

ユーザは図4に示すように、「押す」、「掴む」、「回す」の三つの操作を利用して演奏することができる。PocoPocoの演奏には可動部を押している間だけその位置に対応する音源が再生されるリアルタイムモードと、一定のリズムに合わせて進行するタイムライン上で音

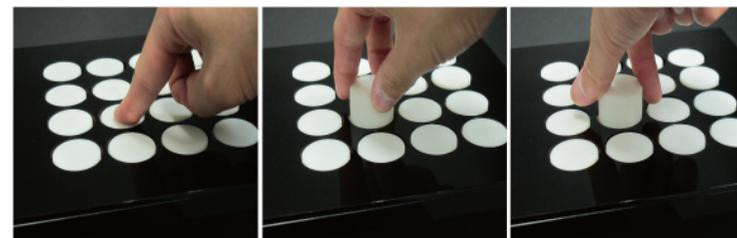


図 4 左：押す, 中央：掴む, 右：回す

Fig. 4 left : Pushing, center : Catching, right : Turning

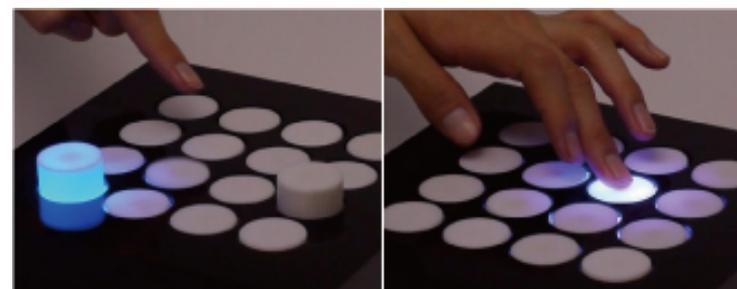


図 5 左：ステップシーケンサモード, 右：リアルタイムモード

Fig. 5 left : Step sequencer mode, right : Realtime mode

の ON/OFF を選択し音源をループ再生するステップシーケンサモードという二つの演奏モードがある。リアルタイムモードでは可動部は鍵盤の様に扱われるため上下運動はせず、ユーザが可動部を押すと、その間だけ音源が再生されるとともに可動部が LED によって光る。ステップシーケンサモードでは進行するタイムラインが LED の光によって表現される(図5左参照)。タイムラインがユニット上を通る際、スイッチが ON になっている場合はそのユニットに対応した音源が再生されるとともに可動部が浮き上がる。また、浮き上がっている可動部を手で掴み続けることで音源は再生され続け、音を伸ばすことができる。その状態から可動部を上下に動かすことで伸ばしている音にビブラートをかけることもできる。更に、可動部を掴んで回すことで音量の増減や特定周波数帯へのフィルタをかける等の様々なエフェクトを操作することができる。ユーザは可動部を掴んだり回したりすることで音を触覚的に操作することができる。

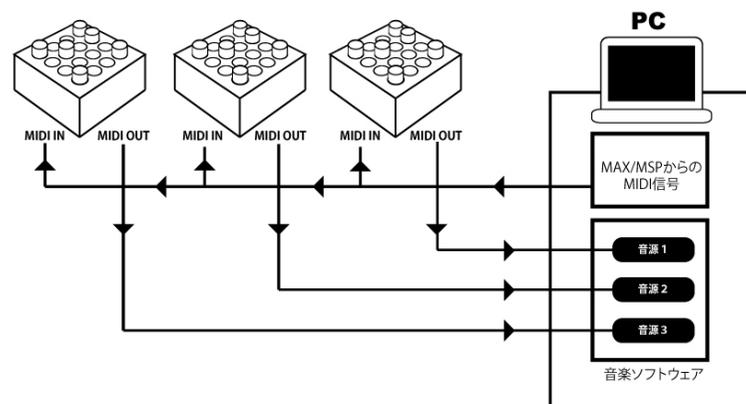


図 6 合奏システムの構成図

Fig. 6 System organization of our ensemble performance

4.3 複数台での合奏パフォーマンス

MIDI を介してコンピュータと複数台の PocoPoco を接続することで、それらのリズムを同期させて演奏を行うことができる。各自の PocoPoco が別々の MIDI チャンネルを担当することで様々な楽器音やサンプリング音源を利用した多様な合奏が可能である。著者らは 3 台の PocoPoco を同期させ、学術音楽系のコンサートにて、合奏パフォーマンスを実施した。合奏システムの構成図を図 6 に示す。

5. 展示・パフォーマンス活動

本研究はこれまで 5 回のパフォーマンス演奏、6 回の展示活動を行った。筆者らは数回の展示を通して小学生や視覚障がい者の方に本デバイスを演奏してもらいフィードバックを得た。結果、小学生が演奏をする場合でも一度先に演奏の様子を見せておくだけで特別な指導を必要とせず演奏可能なケースがほとんどだった。また、動的に物体が動くことで、視覚障がいのある子供もそれに触れながら楽器演奏を楽しむ様子を観察できた。このことから、視覚・聴覚・触覚を利用した、共有玩具として本研究を今後展開することも考えられる。現在商用に流通しているミュージックシーケンサ電子楽器のほとんどは多種のボタンスイッチやスライド式のノブ、ディスプレイなどを併せ持ち非常に多機能である。このような製品は一見しても、どの入力装置がどのような機能に対応しているのかが分かりづらく、初心者が直感的に演奏することが困難な場合がある。一方で PocoPoco は 16 個のソレノイドユニット以

外の入力装置を持たないため初心者や子供でも直感的に演奏を楽しむことができる。また、本デバイスが対照的な形状をしていることから、ユーザは四方から同様に操作をすることが出来る。展示でも自然と複数人によって操作が為されることも多くあった。対称性を持ったシンプルなインターフェースの特性が影響していると考えられる。視覚障がいのある小学生が本デバイスを演奏する際も、可動部の上下運動と音楽の連動を感じて比較的早い段階で演奏することが出来た。

本デバイスを楽器演奏インターフェースとして位置付けている以上、楽器経験者が本格的な演奏パフォーマンスを行うための電子楽器としての操作性についても十分に考察する必要がある。コンサート等でパフォーマンス演奏を担当したユーザは全員楽器経験者であり、コンピュータを利用した楽曲制作に慣れ親しんでいる。他の楽器と同様に、音楽経験や事前練習はパフォーマンスの質に大きく影響することはパフォーマンス活動を通じて明白であった。同様に楽曲構成や音作りもパフォーマンスの重要な要素となる。

現状のシステムでは、これまでに紹介したリアルタイムモードのような演奏方法は設けているものの、ギター、ピアノ、バイオリンといった楽器に比べアーティキュレーションの精密な操作などの一部の演奏性は低いと言える。また事前に登録された MIDI 音源を再生するというシステム上、演奏の自由度は他の楽器に比べ高くない。一方で、PocoPoco は初心者でも直感的に和声やリズムが調整された演奏が可能であり、ユニットの同時押しによって 16 種の楽器音を容易に切り替えることが出来る。また実物体を操作する「押す」、「掴む」、「回す」インタラクションによって、このような楽器特性を考慮しながら、本デバイス独特の音響操作方法をさらに追求することで、精密な演奏性を獲得できるよう改良を検討する。

前述の音楽コンサートにおける合奏パフォーマンスの際にも、観客・専門家からの多くの意見を頂いた。中でも、物理的な運動を提示できる本デバイスによってのみ提供できる独自性の高いインタラクションが必要であると指摘され、結果としてこの指摘はソレノイドユニットを掴む、回すなどの触覚主体のアクションを導入する契機となった。

6. まとめ・今後の展望

本稿では視触覚呈示デバイスの入出力機構を開発し、その機構を利用したインタラクションの楽器演奏インターフェースへの応用を述べた。デモ展示や実際の演奏パフォーマンスを経て得られた経験を基に、システムの改良をこれまで進めてきた。今回提案した、ユーザが可動ユニットを「掴む」、「回す」といった動作を検出するシステムは、音楽演奏インターフェースとしてライブパフォーマンスに使用してきた中で、より多様な音楽表現をするために考

案された。本研究ではタンジブルなデバイスであると同時に、ユーザを”動き”によって魅了するインタフェースを目指した。結果として、16個のユニットからなる PocoPoco では、これまで静的であった楽器インタフェースに、動く楽器インタフェースというユニークな試みを示せた。

展望としてはインタラクションの主体であるソレノイドユニットの運動をより精密にコントロールすること、ソレノイドユニットを手で操作する上での入力システムをより精密化することを主眼に置きながら、音楽演奏用アプリケーションとして独特の入出力を提供できるような改善を進めて行く。

PocoPoco はライブパフォーマンスに利用できる電子楽器として開発し、結果として複数の感覚器に働きかけるインタラクションを提供できるデバイスとなった。今後は電子楽器としてより独自のインタラクションを追求しながら、様々な応用可能なこのインタフェースを利用し PocOthello のように特定の感覚器に障害を持っているユーザでも使用可能なユニバーサルなアプリケーションの研究開発も行う。

参 考 文 献

- 1) Michelitsch, G., Williams, J., Osen, M., Jimenez, B. and Rapp, S.: Haptic chameleon: a new concept of shape-changing user interface controls with force feedback, *CHI '04 extended abstracts on Human factors in computing systems*, CHI EA '04, New York, NY, USA, ACM, pp. 1305–1308 (online), DOI:<http://doi.acm.org/10.1145/985921.986050> (2004).
- 2) Duchamp, M.: Bicycle Wheel (1915).
- 3) Gabo, N.: Realistic Manifesto (1920).
- 4) Yanagi, Y.: Ant Farm Project (1989-2001).
- 5) Kodama, S.: MorphoTower / Spiral Swirl: Copyright restrictions prevent ACM from providing the full text for this work., *ACM SIGGRAPH 2006 Art gallery*, SIGGRAPH '06, New York, NY, USA, ACM, (online), DOI:<http://doi.acm.org/10.1145/1178977.1179034> (2006).
- 6) Kato, Y. and Ito, Y.: White Lives on Speaker (2007).
- 7) Ishii, H.: Tangible bits: beyond pixels, *Proceedings of the 2nd international conference on Tangible and embedded interaction*, TEI '08, New York, NY, USA, ACM, pp.xv–xxv (online), DOI:<http://doi.acm.org/10.1145/1347390.1347392> (2008).
- 8) Iwata, H., Yano, H., Nakaizumi, F. and Kawamura, R.: Project FEELEX: adding haptic surface to graphics, *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, SIGGRAPH '01, New York, NY, USA, ACM, pp.469–476 (online), DOI:<http://doi.acm.org/10.1145/383259.383314> (2001).
- 9) Leithinger, D. and Ishii, H.: Relief: a scalable actuated shape display, *Proceedings of the fourth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction*, TEI '10, New York, NY, USA, ACM, pp.221–222 (online), DOI:<http://doi.acm.org/10.1145/1709886.1709928> (2010).
- 10) Blackshaw, M., DeVincenzi, A., Lakatos, D., Leithinger, D. and Ishii, H.: Re-compose: direct and gestural interaction with an actuated surface, *Proceedings of the 2011 annual conference extended abstracts on Human factors in computing systems*, CHI EA '11, New York, NY, USA, ACM, pp.1237–1242 (online), DOI:<http://doi.acm.org/10.1145/1979742.1979754> (2011).
- 11) Poupyrev, I., Nashida, T. and Okabe, M.: Actuation and tangible user interfaces: the Vaucanson duck, robots, and shape displays, *Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction*, TEI '07, New York, NY, USA, ACM, pp.205–212 (online), DOI:<http://doi.acm.org/10.1145/1226969.1227012> (2007).
- 12) Nakatani, M., Kajimoto, H., Sekighuchi, D., Kawakami, N. and Tachi, S.: Pop Up!: a novel technology of shape display of 3D objects, *ACM SIGGRAPH 2004 Emerging technologies*, SIGGRAPH '04, New York, NY, USA, ACM, pp.21– (online), DOI:<http://doi.acm.org/10.1145/1186155.1186177> (2004).
- 13) Baba, T., Ushiyama, T. and Tomimatsu, K.: Emerging keys: interactive electromagnetic levitation keys, *ACM SIGGRAPH 2008 posters*, SIGGRAPH '08, New York, NY, USA, ACM, pp.79:1–79:1 (online), DOI:<http://doi.acm.org/10.1145/1400885.1400970> (2008).
- 14) Nishibori, Y. and Iwai, T.: TENORI-ON, *Proceedings of the 2006 conference on New interfaces for musical expression*, NIME '06, Paris, France, France, IRCAM & #8212; Centre Pompidou, pp.172–175 (online), available from (<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1142215.1142256>) (2006).
- 15) Levin, G.: The Table is The Score: An Augmented-Reality Interface for Real-Time, Tangible, Spectrographic Performance., *Proceedings of the International Conference on Computer Music 2006 (ICMC'06)*., ICMC, New Orleans, USA (2006).