

# PocoPoco：実物体の動きを利用した楽器演奏インタフェース

金井 隆晴<sup>1,a)</sup> 菊川 裕也<sup>1</sup> 鈴木 龍彦<sup>1</sup> 馬場 哲晃<sup>1</sup> 串山 久美子<sup>1</sup>

受付日 2011年6月17日, 採録日 2011年12月16日

**概要：**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ソレノイドユニットを制作し、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適用する。オブジェクトを実際に動かすことで、動きに応じたインタラクション設計が可能になるだけでなく、その動きによってユーザの興味を惹きつけるインタフェースを提案できると考えている。本稿では、1年間の展示・パフォーマンス活動を通じて改良を重ねた電子楽器「PocoPoco」に関して、デバイスの概要、「押す」、「掴む」、「回す」入力装置の詳細を述べた後、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。

**キーワード：**インタラクションデザイン, TUI, キネティックインタフェース, エンタテインメント, 楽器

## PocoPoco: An Musical Interface that Has Dynamic Moving of Real Objects

TAKAHARU KANAI<sup>1,a)</sup> YUYA KIKUKAWA<sup>1</sup> TATSUHIKO SUZUKI<sup>1</sup> TETSUAKI BABA<sup>1</sup>  
KUMIKO KUSHIYAMA<sup>1</sup>

Received: June 17, 2011, Accepted: December 16, 2011

**Abstract:** We developed SOL actuator units with built-in several sensors, and produced a box-shaped device “PocoPoco” using 16 units of them as an universal I/O device. In this paper we apply up-and-down movement of the SOL-units and user’s input such as pushing, catching and turning to musical interface. Using transformation of the object, we can apply movement of 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 a year’s our study. After that, give consideration to a musical interaction design to use those I/O functions efficiently.

**Keywords:** interaction design, TUI, interactive kinetic surface, entertainment, musical instruments

### 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

ないため、ユーザが受け取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。MichelitschらによるHaptic Chameleon [1]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ほか、その動きによってユーザを

<sup>1</sup> 首都大学東京大学院  
Graduate School of Tokyo Metropolitan University, Hino,  
Tokyo 191-0065, Japan

a) takaharu.kanai@gmail.com

魅了する可能性を持つ。

芸術分野においては、キネティックスカルプチャに代表される動きをともなった芸術作品が見られる。キネティックスカルプチャは、1900年代初頭からマルセル・デュシャン [2] やナウム・ガボラ [3] を筆頭とする数々のアーティストによって制作されたといわれている。初期のキネティックアートは風や水の力に動くものがほとんどであったが、Yanagi [4] による昆虫の動きを取り入れた作品など、現代芸術の多様化とともに作品も多様化してきた。近年では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多数見られるようになった。Kodama による MorphoTower [5] は、鑑賞者の動きをセンサで検知し、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。また Kato [6] はスピーカ振動とダイラタンシ現象を利用したダイナミックな動きをともなう造形表現を発表している。このように古くから現在まで、様々なアーティストが動きをともなう芸術作品を追求してきたことから、動きをともなう造形物が鑑賞物として人々から評価されてきたことがいえる。このほか、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やすくなるなどは、よく知られた事実である。このようなことから著者らは、インタフェースのデザインに動的な動きを取り入れることはユーザの興味を引くという点で有意義であると考えた。

以上をふまえ、本研究では動きをともなう実物体インタフェースの制作を目指す。Ishii が提案してきた tangible [7] 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 PocoPoco は、ソレノイドアクチュエータとスイッチと複数のセンサを有した円柱状ユニットをマトリクス状に盤面に配している。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。本稿では本デバイスの入出力機構を生かした音楽アプリケーションを紹介する。このアプリケーションでは、「押す」、「掴む」、「回す」という3つの入力方法を用いて、動作の状況に応じたインタラクションを提供し、奏でる音楽だけでなく楽器そのものの動きで、ユーザに対して操作すること自体の楽しさを与え、さらには鑑賞者にもデバイスを使っている様子を見る楽しさを提供することを狙った。

## 2. 関連研究

### 2.1 形状ディスプレイ

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。Iwata 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。Blackshaw 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させる。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速く、力も強い反面、駆動音が大きい。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]、Nakatani 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ないが、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ないが、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2つのインタラクションを追加した。

### 2.2 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。ミュージックシーケンサとは、あらかじめ入力された楽器音の発音を自動で行うもので、古くはオルゴールや自動演奏ピアノなどから発展した自動演奏装置の一種である。電子機器の発達によりコンピュータ制御による自動演奏が可能な電子楽器が登場し、動的な音響合成などの技術も高まり、ミュージックシーケンサ型電子楽器は高度な音楽演奏パフォーマンスに対応できる楽器として扱えるようになった。現在一般的な電子音楽に用いられるステップシーケンサ機能を持った電子楽器として Roland 社の MC-808 のような複合的ミュージックシーケンサ型電子楽器があげられる。Nishibori ら [14] による TENORI-ON や、Levin [15] による Scrapple は近年のミュージックシーケンサ型電子楽器といえる。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同じ分類に属するといえる。しかしそれらの事例と異なる点として、実物体インタフェース自体が発音や操作に合わせて形を変えること、またその変形が動的なアフォーダンスを提供し、プレイヤーとのインタラクションに直接関係していることによって、演奏の一部が自動化されているにもかかわらず身体性の高い電子楽器であることがあげられる。本デバイスでは動いているソレノイドユニットを手でつかまえ、回したり上下させたりすることによって音響を操作するなど触覚的、身体的な操作を行うことができる。

### 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で可動部が上下動する。可動部を押し込むことで、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、上下動およ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。

#### 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、断面図を図 4 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 3 種類の情報を取得できる。

表 1 デバイスの仕様

Table 1 specification of the device.

動作電圧	12 V
最大電力	60 W
筐体寸法	205 × 205 × 90 (W × D × H) mm
総重量	1,215 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 31250 baud

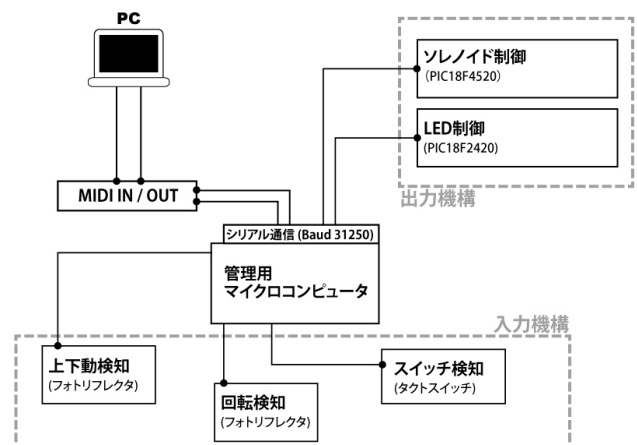


図 2 PocoPoco システム構成  
Fig. 2 System of PocoPoco.



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

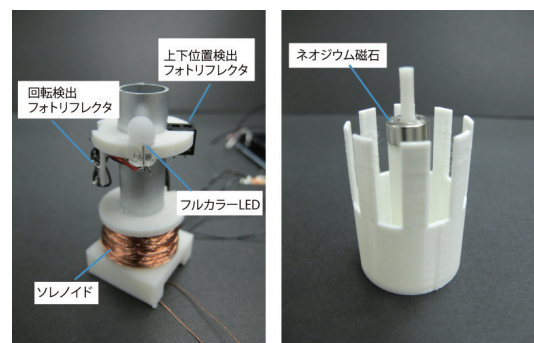


図 3 ソレノイドユニットの外観. 左: 土台部, 右: 可動部  
Fig. 3 Appearance of the solenoid unit (Left: Base part, Right: Moving part).

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で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 出力機構：光による視覚ガイド機能の実装

土台部上部にフルカラーLEDを取り付け、可動部の上下動に合わせて赤、緑、青、水色、黄色、マゼンタ、白の7色を表示できる機能を実装した。16個のベースに対し、各RGB3チャンネルのLEDをマトリクス制御により点灯させる。ただしこのままではLEDの光量が落ちるため、点灯させる箇所のみプログラム上でループ処理を行うことで、1~4個程度の箇所であれば十分な光量で発光が可能となった。ソレノイド回路と同様にLED制御用マイクロコンピュータがシリアル通信で管理用マイクロコンピュータに接続される。

以上を利用して、デバイスの状態に応じて各々のソレノイドユニットを指定した色に光らせる機能を追加した(図5参照)。これによりアプリケーションでは各々の音色(MIDIチャンネル)に対応して異なる色を割り当てたり、再生を行う周期パターンを動的に光らせたりすることで視覚的なガイドを付加した。

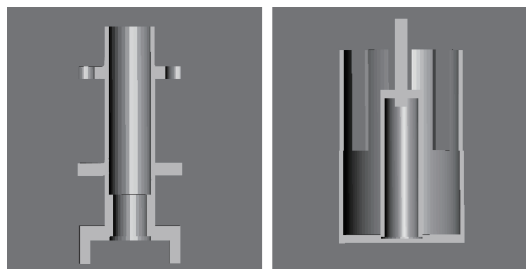


図4 ソレノイドユニットの断面図。左：土台部、右：可動部  
Fig. 4 Cross section of the solenoid unit (Left: Base part, Right: Moving part).

3.3.3 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。なお、ユニット可動部が浮かび上がった状態ではスイッチを押すことはできず、その代わりに後述した「掴む」入力方法が可能となる。

3.3.4 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。たとえば、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。図6は1つの可動部の上下位置の状態とフォトリフレクタから得られる出力電圧の対応を

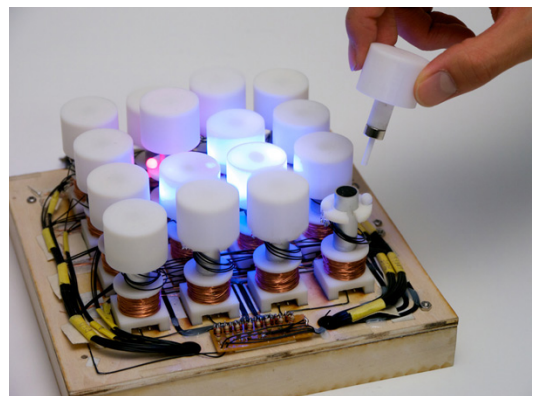


図5 LEDが取り付けられたソレノイドユニット  
Fig. 5 Solenoid units which is mounted LEDs.

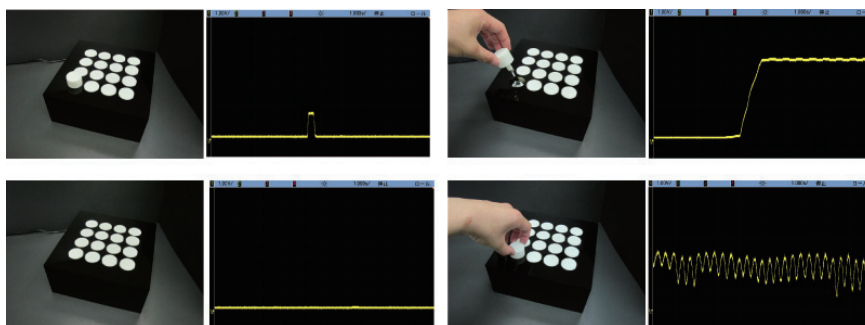


図6 可動部の高さとして出力電圧の対応関係  
Fig. 6 Relation of height of a moving part and output voltage.

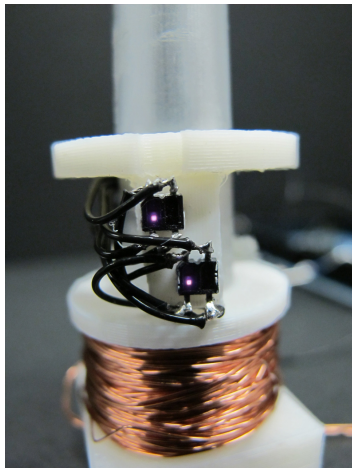


図 7 回転情報を取得するためのフォトリフレクタ

Fig. 7 Photo reflector to read information of rotation.

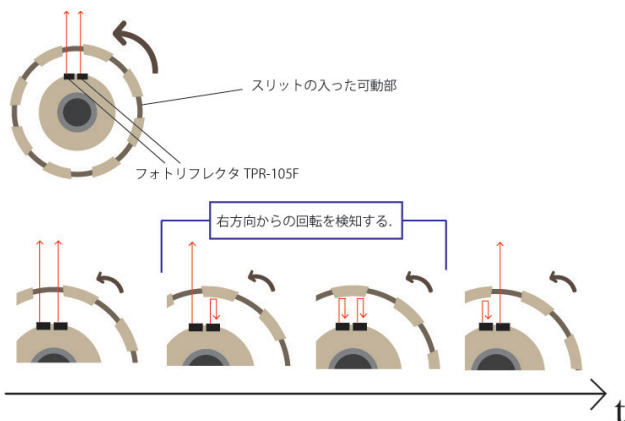


図 8 回転方向検知のメカニズム

Fig. 8 The mechanism to detect direction of rotation.

表したものである。左上は可動部が電磁力で浮き上がって降りたとき、左下は可動部がつねに降りた状態のとき、右上は可動部を土台部から引き抜いたとき、右下は可動部を掴んで上下に動かしたときのそれぞれの出力電圧の変化の様子である。

### 3.3.5 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個のフォトリフレクタを使用した(図7参照)。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リフ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個のフォトリフ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(図8参照)。この方式は一般的なロータリエンコーダのA相B相を用いた方式である。しかし市販のロータリエンコーダは土台とツマミが一体となっているため、市販のものを用いた場合、ユニット可動部の上下運動の妨げとなってしまう。そこで図3に示す機

構を用い、回転するパーツと回転を検出するパーツを分離した状態での回転の検出を可能とした。

### 3.3.6 可動部の動作に関する検討

ソレノイドユニットの大部分はABS樹脂で形成されている。ただし可動部を収容する筒の部分(図4参照)はアルミニウムパイプを使用した。試作段階では筒の部分もABS樹脂で作成したが、筒をABS樹脂にした場合には可動部が上下移動する際に振動が見られた。本研究では可動部の動きに関してはスムーズな上下動を目指しているため、振動が起きない機構を再検討する必要がある。アルミニウムは常磁性の金属であるため、アルミパイプの中をネオジム磁石が移動する際には逆向きの電磁力が生じ、等速運動に近い動きとなる。そこで筒の材質をアルミパイプに変更した結果、樹脂素材を使用した際に見られた振動がほとんどなくなった。

最後にソレノイドユニットの仕様を表2に、デバイスにおける各機能の消費電力を表3に示す。

### 3.3.7 駆動速度に関する計測と考察

本機構の駆動速度については、計測実験を行った。計測はオシロスコープ(Agilent Technologies社製デジタルオシロスコープDS0514A)を用いて、ソレノイドユニットを駆動する信号を発生するICのピンと、ソレノイドユニットに内蔵されたフォトリフレクタ(ROHM社製フォトリフレクタRPR-220)が読み取るアナログ値を計測することで行った。ユニット可動部が上下に移動すると、それに従ってフォトリフレクタのアナログ値が変化するため、この方法を用いることで可動部の動きをオシロスコープの表示することができる。

計測結果によれば、ICからユニット駆動の信号が発せられてからユニット可動部が最高位置に到達するまでに要した時間は77msであった。上下駆動幅(20mm)を移動し終えるまでの平均速度を計算すると260mm/secであった。また最大移動速度は560mm/secであった。先行研究と比較すると、アクチュエータにモータを使用したIwataのFEELEXの移動速度が100mm/secであるのに対し、本機構は移動速度が十分に大きく、即時性の高い駆動を実現するうえでソレノイドアクチュエータを使用が有効だったといえる。

次に音楽インタフェースとしての有用性について述べる。機構の性質上、可動部が受ける電磁力はコイルから離れるにつれて弱くなる。計測結果からは上下駆動幅の70%を超えたあたりから減速を始めることが確認できた。なお上下駆動幅の70%を移動するのに要する時間は32msであった。30ms程度で駆動幅の70%以上が駆動できれば、演奏時に発音と同時にユニットが移動を始めたとしても、ユーザや鑑賞者は音とユニットの動きのずれをほとんど感じることがないと考えられる。これにより、本デバイスは音に同期して駆動するインタフェースとして有用であるとい

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	35 mm
可動部の上下駆動幅	20 mm
可動部の平均移動速度	260 mm/sec
可動部の最高移動速度	560 mm/sec
可動部重量	10 g
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, $\phi 10 \times \phi 5 \times 5$ , 表面磁束密度 4090 G/ 409 mT
回転検知フォトリフレクタ	TPR-105F
上下位置検知フォトリフレクタ	RPR-220

表 3 消費電力  
Table 3 Electricity consumption.

フルカラー LED	最大 75 mA (1 セット 2 個, 1 個あたり 35 mA 白色点灯時)
ソレノイドユニットの駆動	1 個 250 mA
上下位置検出フォトリフレクタ	30 mA $\times$ 16 ユニット 16 個分常時点灯
回転検出フォトリフレクタ	20 mA $\times$ 16 ユニット 16 個分常時点灯 (1 セット 2 個, 1 個あたり 10 mA)

える。

現在の仕様では、可動部を駆動する際にコイルに上向きの電流が 107 ms 間流れるため、可動部は 77 ms をかけて最高位置に達した後、30 ms 間その位置で保持されてから落下する。また落下に要する時間が 148 ms であったことから、ソレノイドユニットの駆動から元の位置に戻るまでに要する時間は合計でおおよそ 260 ms である。著者らは今までに本デバイスを音楽インタフェースとして利用したパフォーマンスを行っており、その中で演奏した楽曲の速度は最大で 130 BPM 程度であった。その楽曲では 16 個のソレノイドユニットの 1 つ 1 つが 16 分音符に対応づけられており、130 BPM の楽曲では 16 分音符に割り当てられる時間は 112 ms である。ユニットが駆動してから初期位置に戻るまで 260 ms を要することから、この速度の楽曲の演奏は困難とも予想されるが、実際には駆動を始めてから 100 ms 程度で可動部が落下を始めるため、演奏において大きな障害とはならない。実際に演奏を行った著者らの見解としても、操作性、視認性ともに問題は感じられなかったと考えている。

## 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できる。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 1 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



図 9 左：押す，中央：掴む，右：回す  
Fig. 9 Left: Pushing, center: Catching, right: Turning.

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できる。

### 4.2 操作方法

ユーザは図 9 に示すように、「押す」、「掴む」、「回す」の 3 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 2 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よう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 10 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。さらに、可動部を掴んで回すことで音量

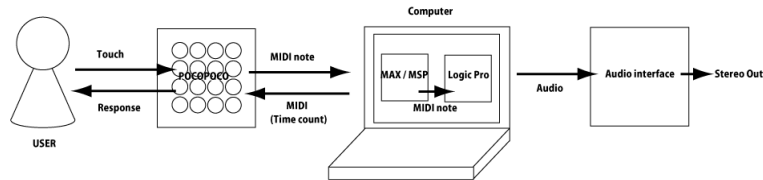


図 11 楽器演奏アプリケーションのシステム構成

Fig. 11 System organization of our music performance application.

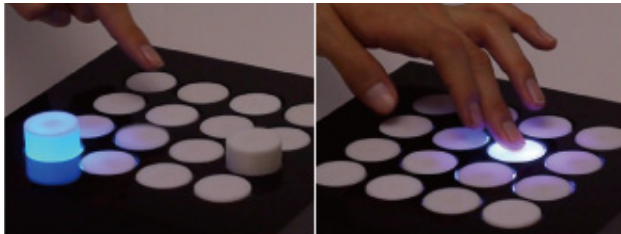


図 10 左：ステップシーケンサモード，右：リアルタイムモード

Fig. 10 Left: Step sequencer mode, right: Realtime mode.

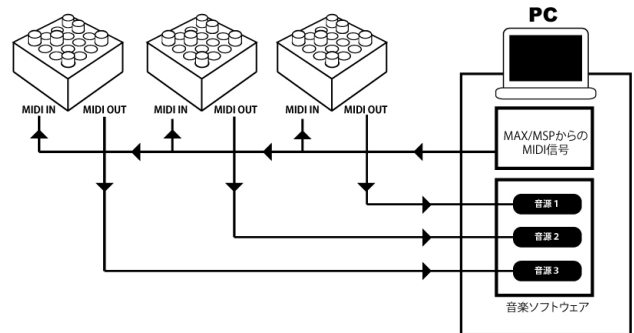


図 12 合奏システムの構成図

Fig. 12 System organization of our ensemble performance.

の増減や特定周波数帯へのフィルタをかけるなど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。

#### 4.3 システム処理の流れ

本デバイスでは、リズムに合わせて可動部を上昇させ同時に MIDI out から音源を再生するための MIDI メッセージを伝達する。PC 上のソフトウェア MAX/MSP は各 MIDI インタフェースからのメッセージを受け取り、音源再生用の DAW ソフトウェア Logic pro まで中継し、複数台の PocoPoco に対して同期用の MIDI メッセージを送る。MAX/MSP から MIDI メッセージを受け取った Logic Pro は各 MIDI チャンネル、MIDI ノートに対応した音源を再生する、いわば MIDI 音源の役割を果たす。図 11 にシステム構成を示す。

#### 4.4 同時押しによる MIDI チャンネル切替え

前述のキーマトリックススキャンを利用したタクトスイッチの押し動作検知によって複数個のソレノイドユニットが同時に押されたことを認識し、MIDI チャンネルを切り替え、別の音色に切り替えるプログラムを採用した。このシステムにより 1 つのデバイスで 16 個 × 16 チャンネル、つまり 16 の音色による演奏が可能である。将来的に現在使っていないスイッチの組合せを使って、さらに様々な操作を行うことができる。しかし一方で均一的な 16 個のスイッチの組合せを多数覚えることはユーザビリティを減少させるおそれがあるので、その際にはユーザが直感的に操作できるような操作方法を検討することが重要である。

#### 4.5 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。

また出力装置としての機能も持つ本デバイスは合奏行為を支援することができる。演奏者は再生音に合わせてソレノイドユニットが浮き上がる、光るといった情報呈示によって他者が再生している音を視覚を通して確認できる。またソレノイドユニット内の LED は複数の色を呈示することができるため、他の演奏者による演奏モードや各音色を切替えも視認することができる。「掴む」「回す」といった独特の入力方法も、視覚的に分かりやすい身体的な動きをとるため、他の演奏者の様子を把握するうえで有効な情報となりうる。

著者らは 3 台の PocoPoco を同期させ、学術音楽系のコンサートで、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 12 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 回のデモ展示活動を行った。パフォーマンスは、著者らの中の 3 人が、1 人 1 台の PocoPoco を担当し合奏をすることで行った。演奏した楽曲は著者らがオリジナルに制作した 5 から 10 分程度の楽曲であり、これまでに 5 種類の楽曲を演奏している。パフォーマンスを行ったのは、コンピュータ音楽やデジタル表現に関する研究会や学会である。また、デモ

展示において、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1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あわ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分かりにくく、初心者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4方向から同様に操作をすることができる。展示でも自然と複数人によって操作がな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できた。

本デバイスを楽器演奏インタ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。コンサートなど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いえる。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できる。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いただいた。なかでも、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、インタフェース自体の動きによってユーザの興味を惹きつけ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うえ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改善を進めてゆく。具体的な改善案を以下に示す。

### 6.1 上下運動のコントロールの精密化

現在ソレノイドユニットの上下運動は電磁力によって浮かんでいる状態と電磁力の働いていない状態との2種の操作しか行っていない。上下運動を複数の段階に分けてコントロールすることでより複雑なインタラクションを提供することができる。現在検討している複数の手法について順に述べる。

#### ・PWM制御による電磁力のコントロール

ICからのPWM制御によって電磁力を変化させることで多段階的な駆動を行う。この手法は現行のアクチュエータ駆動回路で実験を行ったが、その回路で使用しているICの仕様ではPWMの周波数の帯域が人間の可聴域を超えることができなかつたため、ソレノイドユニットの振動が不要な音が発生してしまった。この手法を用いる場合はより高い周波数でPWMを行うことができるICを採用する必要がある。

#### ・PWMの代わりにアナログ出力を行う

長谷川ら[16]が用いているPWMの代わりにアナログ出力を用いる手法を利用する。この手法であれば、ソレノイドユニットを振動させて不要な音を発生させてしまうことはない。



#### ・コイルの2段階層化

ソレノイドユニット内のコイルを2段階に分けて電流を別々にコントロールすることで電磁力の働いていない状態、下側のコイルのみでソレノイドユニットを浮かせている状態、上側のコイルでソレノイドユニットを浮かせている状態と3段階に高さを調節できる。上側のコイルに電流が流れるとき、その下半分には磁石を下に退ける方向の磁力が発生してしまうため、この手法をとるときは上下のコイルに電流を流すタイミングをずらすことでソレノイドユニットの上下運動を阻害しないようにし適切な運動を実現する。またこの手法をとることで従来のコイルの上下幅の半分で同じ上下運動を実現することができるので、より小さな筐体を実現できる。

#### ・下向きの電流による制御性の向上

この手法はソレノイドのユニットを多段階的に駆動するためのものではないが、現在ユニット可動部が上向きに駆動する方向にのみコイルに電流を流しているのに加えて、適切なタイミングで可動部を下向きに駆動する電流を流すことで上下運動の制御性を向上させることができる。しかしながら、この手法を実現するためには逆向きの大電流を制御するためにHブリッジ回路を追加する必要となり、また可動部の落下速度が大きくなることで「掴む」動作が難しくなる、可動部の着地時の音が大きくなり消音の工夫が必要になる、落下の勢いでユニット下部のスイッチを押してしまう可能性がある、といったデメリットがあげられるため現状では必ずしも必要な手法ではないと考えている。

### 6.2 押す力のアナログ検知

現状ではソレノイドユニットの下部にはタクトスイッチが内蔵されておりユーザがユニットを押すとスイッチがONになる。このタクトスイッチの代わりにアナログに押す力を検知するセンサを取り付けることによって押す力の強さに応じたインタラクションが可能となる。楽器演奏時には押す力に応じて音源の再生音量を操作するなどの、より楽器演奏に近い直感的なインタラクションを検討している。

### 6.3 ソレノイドユニットの素材の検討

ソレノイドユニットの上部、ユーザが手を触れて操作する部分である円柱状の部品は現在ABS樹脂で構成されている。この部品をシリコンなど他の素材を用いて構成することを検討している。伸縮可能な素材の利用によって押す力や掴む力の検知、ソレノイドユニットを穴に押し込む、といった新たなアクションが検知できるようになるだけでなく、柔らかい素材がインタフェースとなることでユーザに独自の操作感を提供できると考えられる。

### 6.4 複数台の連結

本デバイスの4×4個のソレノイドユニットからなる入出力システムは4分の4拍子の音楽における1小節分を表現することに適しているが、一方で複数の小節にわたる長いフレーズの自動演奏が表現できないという欠点を持っている。複数台のデバイスを横に連結することで1台の大きなデバイスのように駆動するシステムを追加することでこの欠点を解消できる。手法としてはデバイスの四方に赤外線センサを設置し至近距離にもう1台のPocoPocoを検知した場合は連結して駆動するプロセスに移行するシステムを検討している。このシステムによって長いフレーズの自動演奏が可能となるほか、複数人のユーザが各々のデバイスを持ち運び移動することで自動演奏の小節を入れ替えるなど新たな演奏方法が可能となる。

### 6.5 音源、スピーカの内蔵

現在はMIDI通信を利用しPCをホストとして複数台のデバイスを同期させ、PC上で音響を合成するシステムを採用している。このシステムは高度な音響合成や合奏パフォーマンスにおいては有効だが、PCとの接続が必須となるためデバイス1台での展示など不向きな場面も多い。そのためMIDI音源とスピーカを内蔵した単体で駆動できるハードウェアの制作を予定している。

### 6.6 他種のアプリケーションへの展開

著者らは本デバイスを音楽演奏以外の用途に利用する研究も行っており、たとえば、ボードゲームのオセロをモチーフとしたPocoPocoを利用するゲーム「PocOthello」を開発した。PocOthelloではオセロで使用する白、黒の駒の色の代わりにソレノイドユニット可動部の凹凸の状態を用いる。ユーザが任意のソレノイドユニットを押すことでコンピュータ制御によってそのつど局面が形成される。そのためPocOthelloでは局面の推移がソレノイドユニットの運動によって表現される。このアプリケーションはデバイスに手をかざすことで凹凸を感じ触覚的に局面を感知できるという特色を持つ。そのため従来のオセロで遊ぶことが難しい視覚障がを持つユーザも触覚を通じて遊ぶことができる。

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がい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*, pp.1305-1308, ACM, New York, NY, USA (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*, ACM, New York, NY, USA (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, *Proc. 2nd International Conference on Tangible and Embedded Interaction, TEI'08*, pp.xv-xxv, ACM, New York, NY, USA (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, *Proc. 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH'01*, pp.469-476, ACM, New York, NY, USA (online), DOI: <http://doi.acm.org/10.1145/383259.383314> (2001).
- [9] Leithinger, D. and Ishii, H.: Relief: A scalable actuated shape display, *Proc. 4th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, TEI'10*, pp.221-222, ACM, New York, NY, USA (online), DOI: <http://doi.acm.org/10.1145/1709886.1709928> (2010).
- [10] Blackshaw, M., DeVincenzi, A., Lakatos, D., Leithinger, D. and Ishii, H.: Recompose: Direct and gestural interaction with an actuated surface, *Proc. 2011 Annual Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '11*, pp.1237-1242, ACM, New York, NY, USA (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, *Proc. 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction, TEI'07*, pp.205-212, ACM, New York, NY, USA (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*, p.21, ACM, New York, NY, USA (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*, p.79:1, ACM, New York, NY, USA (online), DOI: <http://doi.acm.org/10.1145/1400885.1400970> (2008).
- [14] Nishibori, Y. and Iwai, T.: TENORI-ON, *Proc. 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, *Proc. International Conference on Computer Music 2006 (ICMC'06)*, ICMC, New Orleans, USA (2006).

- [16] 長谷川晶一, 赤羽克仁, 岩下 克, 馬場次郎, 小池康晴, 佐藤 誠: 高解像度力覚インタフェースをもつ物理ベースVRシステムの開発 (画像処理・ヒューマンインタフェース, <特集>システム開発論文), 電子情報通信学会論文誌 D-I, 情報・システム, I-情報処理, pp.431-438, 社団法人電子情報通信学会 (2005).



金井 隆晴

1987年茨城県生まれ。2010年茨城大学工学部メディア通信工学科卒業, 同年首都大学東京大学院システムデザイン研究科インダストリアルアート学域に入学, 現在に至る。インタラクティブアートおよびインタラクシオンデザインの研究に従事。

インの研究に従事。



菊川 裕也

1985年鳥取県生まれ。2008年一橋大学商学部経営学科卒業, 2010年首都大学東京大学院システムデザイン研究科インダストリアルアート学域に入学, 現在に至る。インタラクティブアートおよびインタラクシオンデザインの研究に従事。

究に従事。



鈴木 龍彦

1987年東京都生まれ。2010年首都大学東京システムデザイン学部インダストリアルアートコース卒業, 同年首都大学東京大学院システムデザイン研究科インダストリアルアート学域に入学, 現在に至る。インタラクティブアートおよびインタラクシオンデザインの研究に従事。

アートおよびインタラクシオンデザインの研究に従事。



馬場 哲晃 (正会員)

1979年長野県中野市生まれ。2005年九州芸術工科大学大学院芸術工学府修了後、2008年九州大学大学院芸術工学府博士後期課程単位取得退学。博士(芸術工学)九州大学。2008年4月より公立大学法人首都大学東京助教。所属はシステムデザイン研究科インダストリアルアート学域。

ACM 会員。



串山 久美子

1986年筑波大学大学院芸術研究科修了。2005年東京農工大学特任准教授、JST さきがけ研究員。2007年首都大学東京教授、現在に至る。メディア芸術およびインタフェースデザイン研究に従事。