

PneuModule: 感圧タッチパッドとインフレータブルピンアレイを用いた再構成可能な物理インタフェース

韓 燦教^{1,a)} 高橋 亮^{1,b)} 矢作 優知^{1,c)} 苗村 健^{1,d)}

概要: 本稿では、感圧タッチパッド上に再構成可能な物理インタフェースを実現するためのシステム、PneuModule を提案する。PneuModule はメインモジュールと拡張モジュールにより構成され、拡張モジュールはメインモジュールにエアプラグを介して接続される。拡張モジュールはユーザ入力に応じて気室の体積が変化する入力機構を持ち、リジッドな入力および柔軟な入力の両方を実現できる。拡張モジュールからの入力により、メインモジュール内部の独立したパイプを介してそれぞれ対応するインフレータブルピンが膨張し入力をタッチ面に伝達する。伝達された入力からユーザ入力または拡張モジュールの種類を認識することが可能となる。以上の構成により、ユーザは即座に物理インタフェースのレイアウトを変更可能である。本論文では、インフレータブルピンの設計、さまざまな空気圧入力機構の設計、および一連のインタラクティブな応用例により確認した本システムの実用性について報告する。

1. はじめに

キーボードやマウスなど、コンピュータとインタラクションするための入力デバイスのほとんどは再構成不能で、エンドユーザが形を変えることは難しい。これに対し、Villar ら [8] は用途に応じて形状・機能を変更可能とする、再構成可能なインタフェースを提示した。Villar らシステムではマイクロコントローラを埋め込んだブロックを用いるが、製造およびメンテナンスのコストを下げるため、給電不要でパッシブなブロックも提案されてきた [4]。しかし、従来のシステムの多くはボタンやつまみなどリジッドな入力だけに対応するため、入力の多様性が制限されるといった限界がある。そのため、HCI の分野ではこの入力の多様性を向上するため、柔軟な入力 (deformable input) に関する研究が注目されている [2]。例えば握る、曲げる、ねじるといった動作はゲームや音楽パフォーマンスにおいてより豊かな体験を提供できることが報告されている [7]。

パッシブなタンジブルオブジェクトを介して柔軟な入力を支援する手法の一つとして、タッチサーフェスを用いる手法がある。Schmitz ら [6] は絶縁性の柔らかい材料と導電性の材料を組み合わせた構造を作ることによって、静電容量式タッチパッド上で物体の変形をその物体に備わる静

電容量の変化を通して検知できるシステムを提案した。さらに、この構造は 3D プリンタで一括出力可能なオブジェクトという利点を有する。また、池松ら [5] は静電容量式タッチパッド上の物体の抵抗値の連続的変化を計測できる手法を提案し、抵抗値が変化する構造を柔軟な物体の中に作ることで柔軟な入力を実現した。しかし、静電容量式のタッチパッドは周囲の接地条件や誘電体の影響を受けやすいという欠点がある。そこで我々は、物体の導電性に関係なく接触情報を検知できる抵抗式感圧タッチパッドに注目した。

本論文では、入力インターフェースとしてリジッドな入力と柔軟な入力の両方を支援し、かつ即時に形状・機能を再構成可能な物理インタフェースのプラットフォーム、PneuModule を提案する [3]。図 1 に示すように PneuModule は、メインモジュールと拡張モジュールの 2 種類のモジュールで構成され、感圧タッチパッド上で動作する。メインモジュールは、内部の空気パイプにより拡張モジュールからの入力をタッチ面まで伝達する。拡張モジュールは、内部に気室のある構造をした入力機構を持つ。拡張モジュールの形状および材質を変化させることで、さまざまな物理入力を実現できる。拡張モジュールがメインモジュールに接続されると、拡張モジュールの気室が下面のインフレータブルピンと接続される。ユーザが入力を行うと、気室内の空気圧が変化し、ピンの膨張の程度が変化する。インフレータブルピンは互いに独立しており、同時に複数の入力が可能である。さらに、ピンを用いて拡張

¹ 東京大学

a) hanc@nae-lab.org

b) rtakahashi@nae-lab.org

c) yahagi@nae-lab.org

d) naemura@nae-lab.org

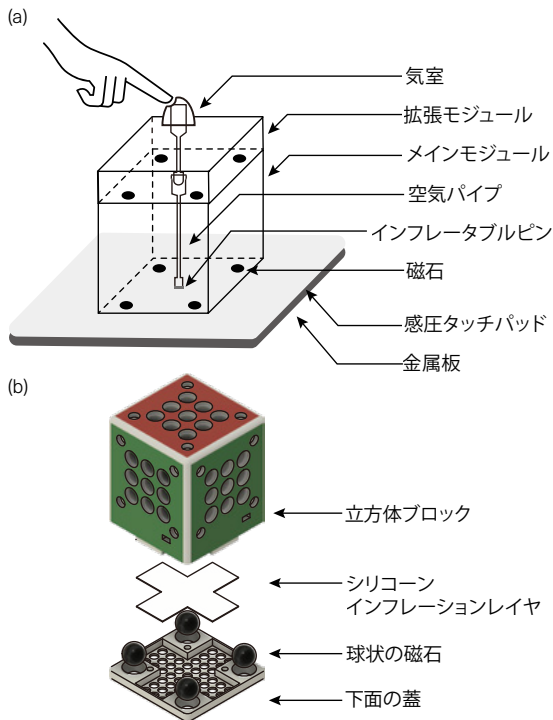


図 1 PneuModule の概観. (a) メインモジュールに拡張モジュールが接続されると拡張モジュールの気室（入力）がメインモジュールの空気パイプを介して底面のインフレーターブルピンとリンクする. (b) メインモジュールの構成部品.

モジュールの ID を表現することもでき、ユーザがインタフェースのレイアウトを再構成した際に、システムは接続された拡張モジュールの種類を認識可能である.

2. メインモジュール

上述したように、PneuModule はメインモジュールと拡張モジュールから構成され、多種多様な拡張モジュールをメインモジュールの上面・側面へ接続することで、ユーザの多種多様な入力を支援可能とする. 本節では、この要件を満たすための、メインモジュールの設計と実装方法について順に説明する.

図 1 (b) に示すように、メインモジュールは主に 1) ソケットと空気パイプを有する立方体のブロック、2) インフレーターブルピンアレイを構成するための、シリコンシートと多数の穴の開いた蓋、3) 4 つの球状磁石から構成される. 立方体ブロックでは、下面以外の 5 つの面へ各々 3×3 のソケットを設け、拡張モジュールとの接続を可能とする. 下面にはシリコン製の薄いインフレーションレイヤを貼り付け、その下に多数の穴の開いた蓋をかぶせることでインフレーターブルピンアレイを実現する. このピンアレイの各ピンは、立方体ブロック内の空気パイプを通じて各ソケットへ各々接続され、気室内の気圧が高まると膨張する. 加えて 4 つの球状の磁石をメインモジュールの底面に配置し、タッチパッドの下に金属板を置くことで、インフ

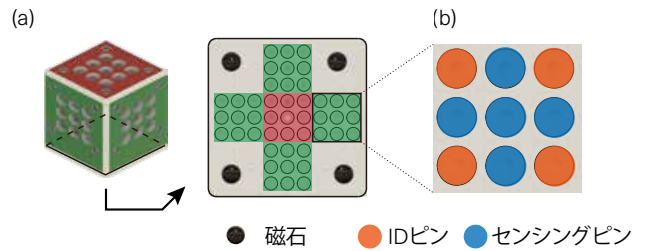


図 2 メインモジュールのマーカデザイン. (a) 5 つの面にそれぞれ対応する 3×3 のインフレーターブルピンの配列と 4 つの磁石がマーカの役割を果たす. (b) 各ピンはそれぞれ入力を伝達するためのピン (青), 拡張モジュールの ID を表すためのピン (橙) に分かれる.

レーターブルピンの膨らみによってメインモジュールが浮くことを防ぎ、さらにメインモジュールの位置を追跡ためのマーカとして用いる.

メインモジュールの底面に備わるインフレーターブルピンアレイは、主に以下の 2 つの要件を満たす必要がある. まず、45 個のピンを通して、a) メインモジュールに接続された拡張モジュールの種類と b) その拡張モジュールを通して伝わるユーザの物理的入力を認識する必要がある. これは、主に 45 個のピンを用いたマーカ設計により実現する. さらにこのピンは、i) 拡張モジュールを通して伝わるユーザの物理的入力を感圧タッチパッド上に伝達することに加え、ii) ユーザの物理的入力の度合いを検知する必要がある. そのために、物理的入力の度合いをなるべく正確に検出可能とするような、インフレーターブルピンの構造設計を行う.

2.1 マーカの設計

まず、メインモジュールのマーカデザインについて述べる. 図 2 (a) に示すように、このマーカは 45 個のインフレーターブルピンと 4 つの磁石から構成され、前者は主に 1) メインモジュールに接続されている拡張モジュールの種類・入力を把握することを可能とし、一方後者は、2) 感圧タッチパッドを通して、メインモジュールの位置・角度と 45 個のピンの状態を把握することを可能とする.

まず、1 の実現に向けた、45 個の各インフレーターブルピンの役割を説明する. 45 個のピンは 3×3 の 5 つのグループに分かれ、赤色で示す部分は上面の $9 (= 3 \times 3)$ つのソケットへ内部の空気パイプを介し、独立して接続される. 一方、緑色で示す部分は側面 4 つに備わる $36 (= 3 \times 3 \times 4)$ 個のソケットへ各々同様に独立して接続される. 図 2 (b) で示すように、各グループ内の 3×3 のピンの内、青色で示した部分は拡張モジュールからの入力を検出するために用いられ、残りの橙色で示した部分は、拡張モジュールの種類を認識するために用いられる. 以上、45 個のピンを各々 45 個のソケットと接続し、各ピンの役割を割り振る

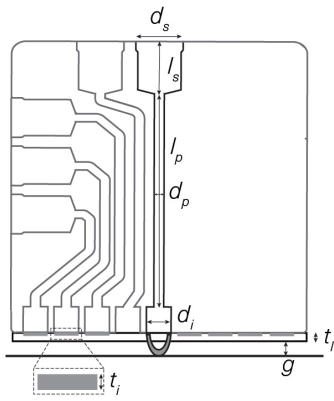


図 3 メインモジュール内部のインフレイタブルピンの概要と、そのピンの設計におけるパラメータ. d_s : ソケットの外径, l_s : ソケットの長さ, d_p : パイプの外径, l_p : パイプの長さ, d_i : インフレイタブルピンの外径, t_i : インフレイタブルピンの厚さ, t_l : 下面の蓋の厚さ, g : 下面の蓋とタッチ面までの距離.

ことで、接続された拡張モジュールの種類と拡張モジュールからの入力を認識可能とする。ただし、この割り当てはあくまで一例であり、用途に合わせてその割り当ては変更可能である。

45 個のピンにより 1 を実現できる一方で、これには 45 個のピンの場所・状態を感圧タッチパッドを通して認識する必要がある。そのために、図 2 (a) 内の黒丸で示した、4 つの磁石をメインモジュールの底面の角へ配置する。そして、感圧タッチ面を通して取得した圧力画像から、事前に決められた、4 つの磁石の幾何配置を満たす接触点の組み合わせを探索することで、メインモジュールの位置を推定可能とする。さらに、磁石が回転非対称に配置されているため、メインモジュールの向きも検出可能である。以上、4 つの磁石配置をもとにメインモジュールの位置・角度を把握することで、45 個のインフレイタブルピンの位置を推定し、それぞれのピンからの入力を圧力情報として取得することができる。

2.2 インフレイタブルピンの設計

45 個のインフレイタブルピンにより、拡張モジュールの種類・入力を把握するためには、ユーザからの物理的入力を感圧タッチパッド面で検出可能とすることが必要不可欠である。そのためには、ユーザからの物理的入力を反映するインフレイタブルピンの膨張量を適切な範囲にする必要がある。なぜなら、過度に膨張するとモジュールをスライドしたときに磁石の参照点との位置ずれが発生し、膨張不足の場合はインフレイタブルピンとの接触点が圧力画像上で検出できないためである。ここでは、インフレイタブルピンの設計方法について述べる。

図 3 にインフレイタブルピンの概要と各種設計パラメータを示す。ピンの膨らみは主にインフレーションレイヤの

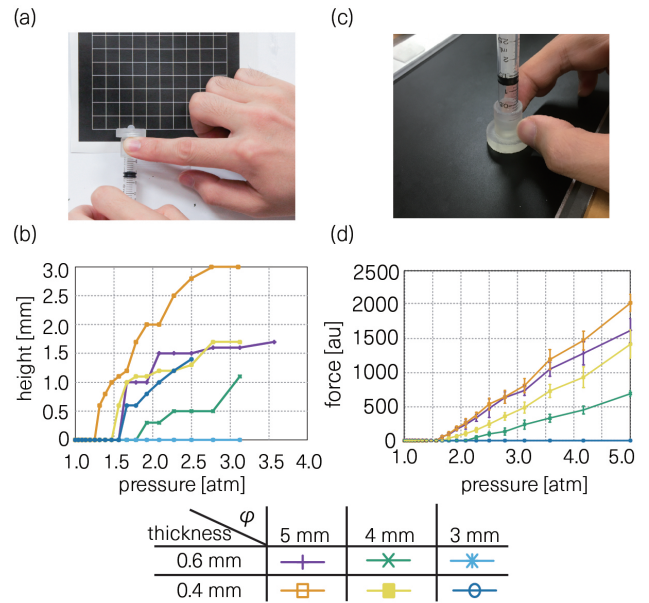


図 4 (a) ピンの飛び出る高さを測定するための実験環境. (b) 印加した空気圧とピンの高さの関係. (c) ピンによる圧力画像の強度変化を調べるための実験環境. (d) 印加した空気圧とセンサが読み取った圧力値の関係.

表 1 メインモジュールの設計パラメータ.

パラメータ	d_s	l_s	l_p	d_i	t_i	t_l	g
値 (mm)	8.8	10	30-65	5	1	0.4	0.5

硬度、厚さ、ピンの外径の 3 つの要素から決まる。インフレーションレイヤの素材としては、複数回の試作の結果、所望の膨張量が得られたショア硬度 18A のシリコンを採用した*1。また、厚さとピンの外径に関しては、図 4 に示すように 2 つのパラメータを調整しながら膨らみ具合を確かめた。そのために、3D プリントされたテスト用の試験装置を用いて、3 つの異なる外径 (3 mm, 4 mm, 5 mm) と 2 つの厚さ (0.4 mm, 0.6 mm) による計 6 通りの組み合わせを用意し、1 atm から 5 atm の範囲での圧力の入力に対する出力を測定した。具体的には、図 4 (a) で示すようにピンを膨張させ、カメラで撮影した画像よりピンの飛び出す高さを測定した。さらに図 4 (c) に示す実験では、タッチパッドに押し付けたときのピンによる圧力画像の強度を調べた。ピンからタッチ面までの距離は 1.5 mm であった。

感圧タッチパッドとしては市販品として入手できる Sensel 社の Sensel Morph を採用した*2。このタッチパッドには 185 × 105 個の圧力センサが 1.25 mm の間隔で配置されている。各タッチポイントに加えられた力は API を介し圧力画像として取得可能で、0.005 kgf から 5 kgf の範囲を測定可能である。

図 4 (b) にピンの高さの測定結果を示す。結果から、外径 5 mm、厚さ 0.4 mm のピンの場合、他の条件と比べて低

*1 HTV-2000, Engraving Japan, <http://engravingjapan.com/>

*2 Sensel Morph, <https://sensel.com/>

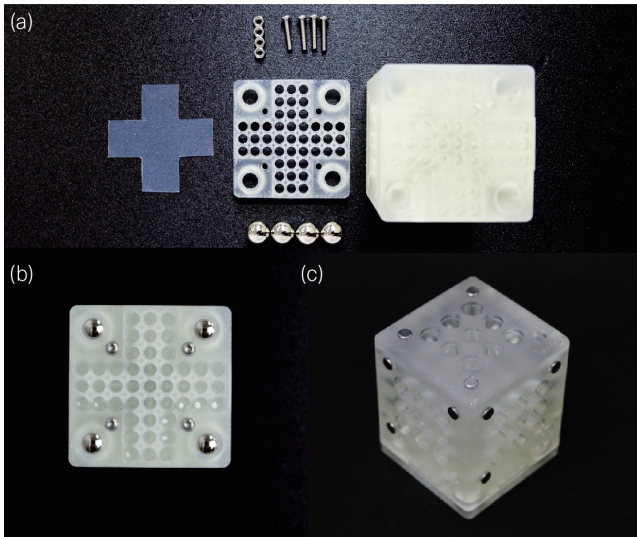


図 5 実装したメインモジュール. (a) 組立前のパーツ. (b) 下面からの写真. (c) 等角投影図.

い圧力でタッチ面まで到達することが確かめられた. さらに, 図 4 (d) に示すように最も空気圧に対するセンサの感度が高いことが確認された. 以上より, それらをピンのパラメータとして採用した.

2.3 ソケットおよび空気パイプの設計

次に, 拡張モジュールからタッチ面までをつなぐ内部の空気パイプの設計について述べる. 図 4 に示すように, ピンにかかる圧力はパイプ内の空気の圧縮率によって決まる. 拡張モジュールのプラグがソケットの奥まで挿入されたときのパイプ内部の気圧 P' は次式で与えられる.

$$P' = P \frac{V_s + V_p}{V_p}, \quad (1)$$

ここで, P は初期の圧力 (大気圧), V_s はソケットの体積, V_p はパイプの体積を表す. 接続の気密性を担保するため, 接続用のプラグには市販のシリンジのプランジャを流用する (TERUMO SS-02SZ, 外径: 8.8mm). 内部の空気パイプの体積が小さいほど圧縮時のパイプ内の気圧が高くなるため, 3D プリントが出力できる限界の外径に近い 2mm を採用する. 次に, 隣り合うソケット間の干渉を避けるため, ソケットの長さは 10mm とする. パイプの長さはソケットとピンの位置によって 30mm から 65mm までばらつきがあり, 結果的に 3.89atm から 5.34atm の圧力がピンに印加される. これは, ピンがタッチ面に接触するために必要な膨張量に対して十分な圧力である. 表 1 に設計のパラメータを示す.

2.4 メインモジュールの実装

図 5 に作製したメインモジュールを示す. 立方体ブロックと下面の蓋は 3D プリント (Formlabs Form 2) で出力した. シリコンレイヤは立方体ブロック側に難接着性材料

用の接着剤 (セメダイン PPX) を用いて接着し, 4 つの球状の磁石をはめて蓋をした. その結果, メインモジュールの寸法は 60mm×60mm×72mm, 重量は 290g となった.

3. 拡張モジュール

次に, 図 6 に示すように 7 つの拡張モジュールを設計・実装した. 拡張モジュールは各々対応する入力を支援する入力機構とその入力機構を支える台座から成る. また, メインモジュールとの接続部には非対称の磁石のコネクタ (時計回りに NSN 極) を設け, 正しい向きに接続されるようにするとともに, 空気圧の反発でモジュールが外れることを防止した.

メインモジュールとの接続部となるプラグには, 図 6 に示すようにスルーホールプラグとアクチュエーションプラグの 2 種類がある. まず, スルーホールプラグはプランジャの中央に穴を開けたプラグで, 入力機構の気室とインフレーターブルピンを接続する. 一方, アクチュエーションプラグには穴が開いていない. このため, メインモジュールに挿し込むと空気パイプ内の圧力が増加し, インフレーターブルピンが膨張する. これにより, 拡張モジュールの ID の表現が可能となる. またこれを応用し, 入力機構はないが他のモジュールとメインモジュールの間に挟むことでモジュールの ID を変化させる拡張モジュールを作ることもできる. 例えば図 6 (g) のスタックモジュールでは, 左下のプラグ以外のプラグをすべてスルーホールプラグにすることで, 他のピンの入力はすべてバイパスしつつ左下に対応するピンを膨張させることができる. これにより, スタックによるインタラクションも実現可能である.

最後に, 拡張モジュールの入力機構と台座の実装方法を説明する. 入力機構はリジッドな部品と柔軟な部品に分かれる. まず, リジッドな部品 (*i.e.*, 押しボタン, 回転, 台座) に関してはすべて前述の 3D プリントを用いて作製した. 一方, 柔軟な入力 (握り, 局所握り, ひねり, 曲げ) に対応する部品に関しては, 柔軟性が必要なため, シリコンモールドングにより作製した. 具体的にはまず, シリコンモールド用の型を水溶性の素材を用いて 3D プリントし, 次にシリコンの混合液 (HTV-2000) を流し込み, 硬化後, 水に入れて型を溶かして, 柔軟な入力に対応する部品を取り出した. その後, 図 6 に示すように, 台座の空気ポートに結束用のバンドで締め付け, 気密性を担保した.

4. アプリケーション

4.1 再構成可能なゲームコントローラ

最初のアプリケーションとしてスペースインベーダのようなシューティングゲームを紹介する. PneuModule の本体はスペースシップの機体と対応しており, タッチ面上で水平方向に動かすと画面上の機体の位置を動かすことができる. また, PneuModule の向きは機体の向きに対応する.

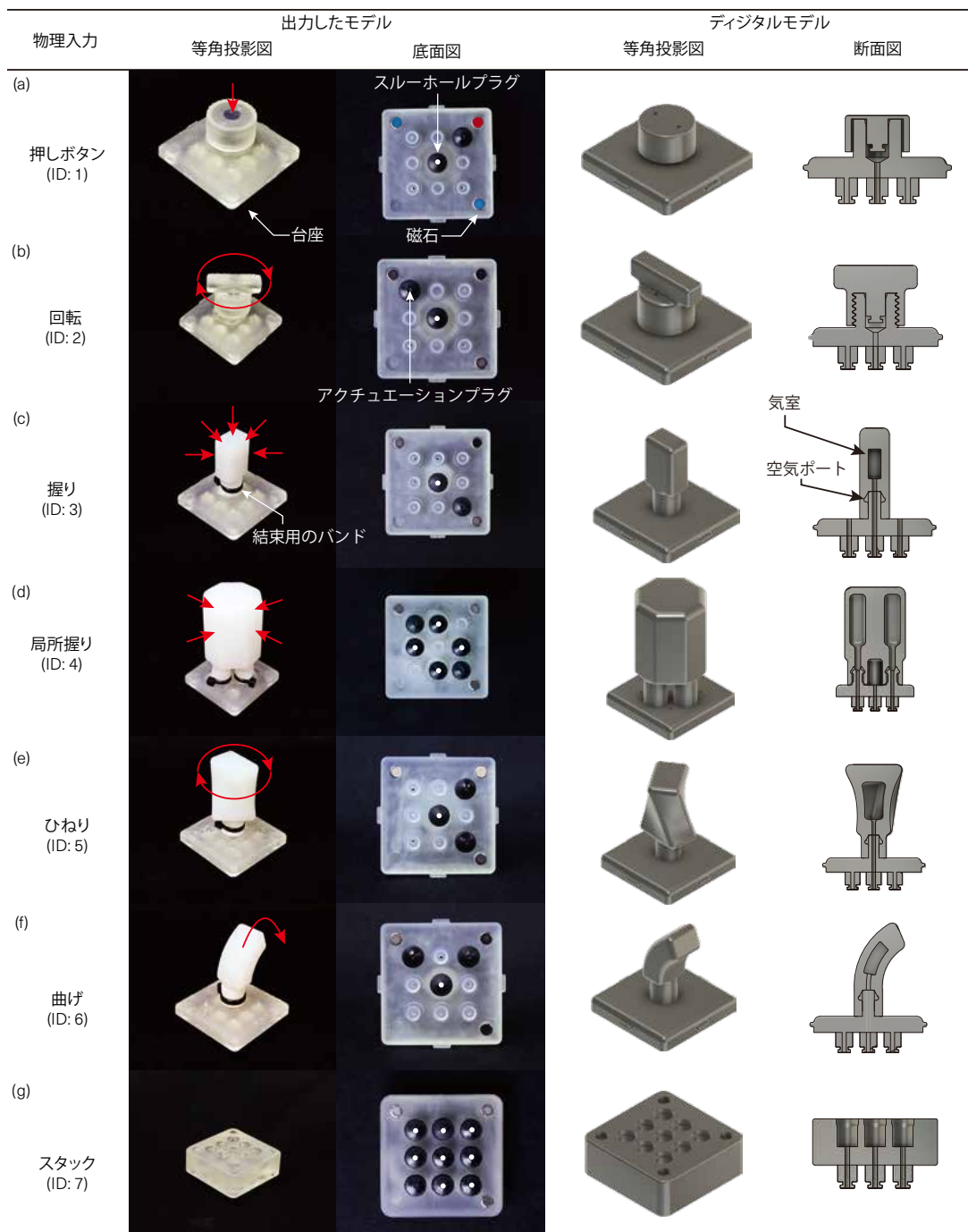


図 6 拡張モジュールの実装。各モジュールは固有の ID と入力機構を持っている。
(a) 押しボタン, (b) 回転, (c) 握り, (d) 局所握り, (e) ひねり, (f) 曲げ, (g) スタック。

図 7 に示すように、スペースシップは 3 つの異なる武器に対応した拡張モジュールを PneuModule の上面や側面へ装着でき、武器を物理的に入れ替えることができる。このように、PneuModule によりさまざまな武器の攻撃パターンを作ることが可能で、ゲームの状況に応じて物理的にコントローラの構成を入れ替えて遊ぶという体験が可能となる。

4.2 バーチャルキャラクターのための物理コントローラ 実物体のおもちゃに柔軟入力の機能をつけて、バーチャ

ルキャラクターのより直感的操作を実現するという試みは多数存在する。PneuModule を利用すると、入力を瞬時に組み換えできるようになり、ユーザが即座にインタラクションを設計することができる。そこで、図 8 に示すように、バーチャルキャラクターのための物理コントローラを実装した。ユーザはバーチャルキャラクターであるドロイド君の腕を異なる入力モジュールに入れ替えることで、画面内のキャラクターの挙動を、そのモジュールに対応した物理入力へ変えることができる。

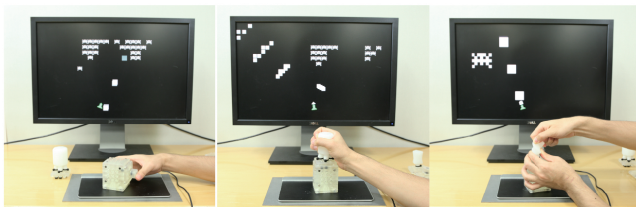


図 7 再構成可能なゲームコントローラ。ボタンを押すと弾を一発撃つ (左), 握る方向に多数の弾を撃つ (中央), ひねって離すと大きい弾を撃つ (右)。



図 8 パーチャルキャラクターのための物理コントローラ。頭を押すと首が縮む (左), 腕をつまむと伸びる (中央), 腕のパーツを曲げ入力に替えると腕が曲がる (右)。

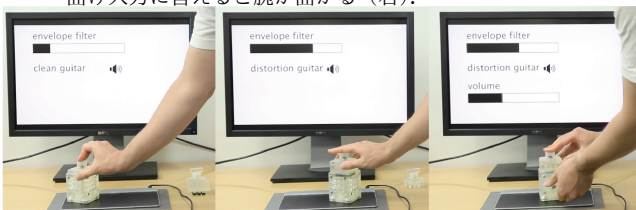


図 9 適応的な音楽コントローラ。コントローラの位置によってエンベロープフィルタの周波数が変わる。ボタンでクリーンギターの音 (左), スタックモジュールを挟むことで歪んだ音に (中央), つまみをつけてボリュームを操作できる (右)。

4.3 適応的な音楽コントローラ

ミュージシャンにとって、テーブルトップのタンジブルユーザインタフェースは、音色の探索や即興演奏をするために有効である [1]。そこで、図 9 に示すように、タンジブルコントローラを使って音楽の操作ができるインタラクションの一例を実装した。まず、押しボタンにクリーンギターの音をマッピングし、特定のリフを再生できるようにする。また、ボタンとメインモジュールの間に、歪みエフェクタに対応するスタックモジュールを挟むことで、ギターの音色をディストーションサウンドに変化させられる。これにより、音色の変化を実物体により直感的に表すことができる。それに加えて、つまみを追加してボリュームを調整するといった付加機能を即座に組み込むことも可能である。

5. 結論

本稿では、感圧タッチパッドとインフレーターブルピンアレイを用いた再構成可能な物理インタフェースプラットフォーム, PneuModule を紹介した。本研究の主な貢献は提案するプラットフォームを実現するための、メインモジュールと拡張モジュールの設計と実装が挙げられる。PneuModule ではこれまでの再構成可能なブロックとは異

なり、空気圧を用いた機構により、リジッドな入力とともに、柔軟な入力も可能となった。拡張モジュールの認識および入力、ピンアレイによって入力を空間的に分割してタッチ面へ伝えることで実現した。さらに、一連のアプリケーションによって、本システムの実現可能性を実証した。ただし、ファブ리케이션が複雑という課題を抱えるため、それを容易にするためのデザインツールの開発を今後行う予定である。本研究が再構成可能なプラットフォームに関する研究を促進することを願う。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP19J14350 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Anna Xambó Sedó: Tabletop Tangible Interfaces for Music Performance: Design and Evaluation, PhD Thesis, The Open University (2014).
- [2] Boem, A. and Troiano, G. M.: Non-Rigid HCI: A Review of Deformable Interfaces and Input, *Proceedings of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference - DIS '19*, New York, New York, USA, ACM Press, pp. 885–906 (online), DOI: 10.1145/3322276.3322347 (2019).
- [3] Han, C., Takahashi, R., Yahagi, Y. and Naemura, T.: PneuModule: Using Inflatable Pin Arrays for Reconfigurable Physical Controls on Pressure-Sensitive Touch Surfaces, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '20 (to appear)* (2020).
- [4] Hwang, S., Ahn, M. and Wohn, K.-y.: MagGetz: Customizable Passive Tangible Controllers On and Around Conventional Mobile Devices, *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '13*, New York, New York, USA, ACM Press, pp. 411–416 (online), DOI: 10.1145/2501988.2501991 (2013).
- [5] Ikematsu, K. and Sioo, I.: Ohmic-Touch: Extending Touch Interaction by Indirect Touch through Resistive Objects, *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '18*, New York, New York, USA, ACM Press, pp. 1–8 (online), DOI: 10.1145/3173574.3174095 (2018).
- [6] Schmitz, M., Steimle, J., Huber, J., Dezfuli, N. and Mühlhäuser, M.: Flexibles: Deformation-Aware 3D-Printed Tangibles for Capacitive Touchscreens, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '17*, New York, New York, USA, ACM Press, pp. 1001–1014 (online), DOI: 10.1145/3025453.3025663 (2017).
- [7] Troiano, G. M., Pedersen, E. W. and Hornbæk, K.: Deformable Interfaces for Performing Music, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '15*, New York, New York, USA, ACM Press, pp. 377–386 (online), DOI: 10.1145/2702123.2702492 (2015).
- [8] Villar, N. and Gellersen, H.: A Malleable Control Structure for Softwired User Interfaces, *Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction - TEI '07*, New York, New York, USA, ACM Press, pp. 49–56 (online), DOI: 10.1145/1226969.1226980 (2007).