

動的に押し心地が変化する押しボタンの試作と評価

田原 和真¹ 塚田 浩二^{1,a)}

受付日 2024年5月19日, 採録日 2024年11月1日

概要: 押しボタンスイッチ（以下、押しボタン）は、動作の分かりやすさや設計上の扱いやすさ等があり、多様な家電や情報機器等で用いられている。押しボタンは多様な押し心地（重さ、深さ、カチッとといった感触等）を持つが、従来は押しボタンごとに固有であり、柔軟に調整することは困難であった。そこで、本研究では押し心地を動的に変更可能な押しボタン型デバイスを提案する。永久磁石の反発力を用いて安価に押下圧の変化を実現し、そこにリニア振動アクチュエータを用いて強さ・位置の異なるクリック感を表現する点が特徴である。本論文では、押下圧とクリック感を動的に変更可能なプロトタイプの開発と、これらを用いた活用例を示す。また、押しボタン型デバイスの性能評価・ユーザ評価を行い、その結果からプロトタイプの有用性と課題を議論する。

キーワード: 押しボタン, 触覚, フィードバック

Prototyping and Evaluation of a Pushbutton with Dynamically Changing Push Feeling

KAZUMA TAHARA¹ KOJI TSUKADA^{1,a)}

Received: May 19, 2024, Accepted: November 1, 2024

Abstract: Pushbutton switches (pushbuttons) are used in a wide variety of home appliances and computers because of their ease of operation/design. Although pushbuttons have various push feeling (e.g., weight, depth, and click), it is difficult to flexibly adjust the feelings on the single device. We propose a pushbutton device that can dynamically change the push feeling. The repulsive force of permanent magnets is used to inexpensively achieve changes in pressing pressure, and a linear vibration actuator is used to express clicking feeling with different strengths and positions. In this paper, we introduce a prototype that can change the pressing pressure and click feeling dynamically. Some examples using the prototype are also explained. In addition, we discuss the effectiveness and challenges of the prototype based on the results of the performance evaluation and the user test.

Keywords: Pushbutton, haptic, feedback

1. 序論

押しボタンは、多様な家電や情報機器等で用いられている一般的な入力デバイスである。「押す」という動作の分かりやすさ・シンプルさや、省スペースで制御が容易という設計上の扱いやすさ等により、広く使われている。押しボタンの中にも多様な種類があり、押した時の感触（押し心地）が異なっている。

たとえば、パソコン用のメカニカルキーボードだけを見ても、押し心地の異なる様々な種類の押しボタンが存在する。人気が高いCHERRY MXシリーズ^{*1}では、クリック感が特徴的な青軸、なめらかで軽い押し心地な赤軸、赤軸よりも重い押し心地の黒軸等、10種類以上の押しボタンが販売されている。

エンターテインメント分野に着目した例としては、ジョイスティックと押しボタンで構成されるアーケードゲーム用のコントローラーにおいて、同じ形でも様々な押し心地

¹ 公立はこだて未来大学
Future University Hakodate, Hakodate, Hokkaido 041-8655, Japan

^{a)} tsuka@acm.org

^{*1} <https://www.cherry-world.com/mechanical-switches/mx-switches>

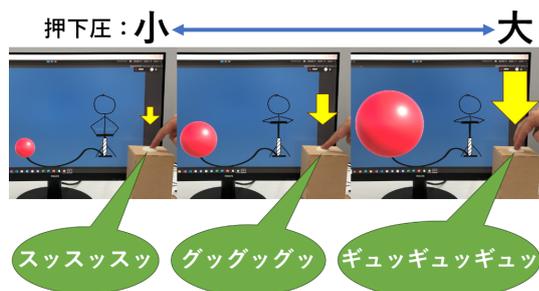


図 1 押しボタン型デバイスの動作イメージ。風船の空気圧に連動するように、押しボタンの押下圧等を変更することで、動的に押し心地を変更する

Fig. 1 An example of the operation of a pushbutton device.

の押しボタンが使用されている。1例としては、少し重めの押し心地なセイミツ工業製や、軽めの押し心地な三和電子製があり、ユーザの好みで使い分けられている。最近では、先述した CHERRY MX シリーズ等のメカニカルキーボード用スイッチを使用した押しボタンも登場しており、カスタマイズ性が高くなっている。

このように、ユーザや場面に応じて押し心地を調節することは有効であると考えられる。しかし、従来押し心地は押しボタンごとに固有であり、柔軟に調整することは困難であった。そこで本研究では、1つの押しボタンに複数の押し心地を表現する機構を搭載し、動的に切り替え可能な押しボタン型デバイスを提案する(図1)。押しボタンには様々な使用用途があり、用途ごとに設計要件(サイズ・形状・動作方式等)が異なるため、すべての要件に対応する実装は現実的に困難である。そのため、本研究ではエンターテインメント分野を主な用途として設計を行う。詳細は3.1節にて記載するが、本研究で対象とする押し心地の要素は、「押下圧」と「クリック感」とする。なお、本論文はWISS2023にて発表[1]した内容に加筆したものである。

本論文では、ボタンの重さのことを「押下圧」、後述する制御基板から設定する16段階の押下圧のことを「押下圧レベル」と呼ぶ。また、ボタンを押し込んだ距離のことを「押し込み距離」、押し込み距離の最大値のことを「ストローク」、押し込み距離をもとに制御基板から16段階に判定するものを「押し込みレベル」と呼ぶ。

2. 関連研究

2.1 押しボタンにクリック感を加える研究

押しボタンの押し心地を拡張する手法の1つに、押下中に振動を与えてクリック感を加える方法がある。

小川ら[2]は、物理的な押しボタンに振動子を取り付け、ボタンの押下に合わせて振動子に減衰正弦波を与え振動させることにより、多様なクリック感を提示する手法を示した。Parkら[3],[4]は、同様の手法を用いて、与える振動の種類による知覚効果の違いを定量的に評価し、情報伝達

の手法としての有用性を示した。

本研究では、クリック感に加えて押下圧も変更することで、表現の幅を広げている。

2.2 押しボタンの押下圧を変える研究

アクチュエータを用いて、押しボタンの重さを変更する研究を紹介する。

Doerreraら[5]は、ムービングコイル方式のアクチュエータとリニアポジションセンサを用いて、任意のフォースカーブ(押し込み距離と重さの関係)の特性をシミュレートできる手法を開発している。Liaoら[6],[7]はリニアフォースアクチュエータやボイスコイル等を、ボタンの押し込み距離や速度に応じて制御することで、フォースカーブに加えて、振動や、速度に依存した特性を再現する手法を開発している。

しかし、これらのデバイスはシミュレータとして開発されたものであるため、サイズとコストの面からみると、一般的な入力装置の押しボタンと置き換えて利用することは難しい。たとえば、Liaoらの研究で開発されているデバイスは、機構が90mm×120mm×200mm(縦・横・高さ)程度と大きい。一般的に流通している制御用スイッチの規格(NECA C 4521)では、直径が30mmまでしか定義されておらず、これらの先行研究のシミュレータは一般的な押しボタンのサイズには収まらない。また、フォースカーブや速度に依存した特性を再現するために、リニアフォースアクチュエータを使用しているが、1つ\$400程度であり、押しボタンに使用するパーツとしては高価である。こうした理由から、これらの研究事例は、一般的な入力装置の押しボタンと置き換えて利用することは難しい。本研究では、サイズやコストを考慮することで、一般的な入力装置の押しボタンと置き換えて利用可能な設計を目指す。一方、押しボタンの特性を再現する機能の一部(押下圧の再現範囲・変化速度)は先行研究より制限される。

PlayStation 5の専用コントローラDualSenseに含まれるアダプティブトリガー[8]は、トリガースwitchの押し心地を動的に変化させることができる。コントローラ左右側面のトリガースwitchがウォームギアを介してモータと接続され、トリガーを引く動作に対して逆方向にモータを回転させることで、抵抗力を生じることができる。

しかし、トリガーと内部の機構が接続されているため、ギアやモータの質量の影響を受け、慣性が効いた動きになってしまう。その結果、トリガーを引く際に引っかかりを感じたり、一気に動いたりして、思うような操作ができないことがある。本研究では、永久磁石を用いてボタンと内部の機構を分離することで、ボタン本来の慣性が少なく滑らかな動きが可能になっている。

2.3 永久磁石を用いてデバイスの操作性を変更する研究

電気的な制御ではなく、永久磁石の特性を生かして、デバイスの操作性を変更する研究を紹介する。

Zheng ら [9] は、3D プリンタで出力したパーツと磁石を組合せて、様々な入力デバイスを作ることができる手法を提案している。磁石の配置と反発力を利用することで、同じ形状のデバイスでも目的に応じて操作感を変更することができる。尾形 [10], [11] は、磁石の吸着力・反発力を用いてパッシブな触覚フィードバックを設計する手法を提案している。数理モデルを導入し、可視化と直感的な設計を可能にしている。さらに、磁石を用いた触覚フィードバックの利点を整理し、「磁気力なのでヒトが感じる遅延がない」点等を報告している。本研究では、永久磁石を移動させることで、磁気力を多段階に切り替えて押しボタンのなめらかなフィードバックに活用している。

2.4 タッチパネルにフィードバックを付与している研究

タッチパネルに対して、物理的なフィードバックを付与している研究を紹介する。

タッチパネル上の仮想ボタンを押す動作に合わせて、振動を提示することにより、ボタンの押下に対してフィードバックを付与する事例 [12], [13], [14] がある。有名な事例として、iPhone シリーズに搭載されている Taptic Engine [14] があり、これはホームボタンのクリック感を生み出すことや、ボタン長押し時のフィードバックに使用されている。

また、タッチパネル上にボタン状の突起を作り出し、物理的にストローク（押し込む深さ）を確保する事例 [15], [16] もある。タッチパネルでの入力では、操作面の高さが一定のため、ストロークがない。そこで、形状が変化する素材を用いることで、ストロークを物理的に作り出すことに成功している。他にも、磁気粘性流体を利用して触覚フィードバックを作り出す事例 [17] 等が存在する。

これらの事例では、振動フィードバック等を用いることで、タッチパネルに物理ボタンの操作性の一部を付与している。本研究では、物理ボタン自体の操作性を拡張する点で焦点が異なる。

3. 提案

3.1 押し心地の要素

押しボタンの押し心地を決める要素は様々あるが、多くの要素に対応しようとすると、サイズやコストが増加することが予想される。本研究は入力装置の押しボタンを置き換えて利用することを指すため、操作者から見て大きな影響を与える要素に絞って設計を行う。具体的な要素として、押下圧（ボタンを押すのに必要な力）、クリック感（接点切り替わった際のフィードバック）、ストローク（最大までボタンを押した時の深さ）に注目する（図 2）。これは、メカニカルキーボード用のキースイッチの選定の際

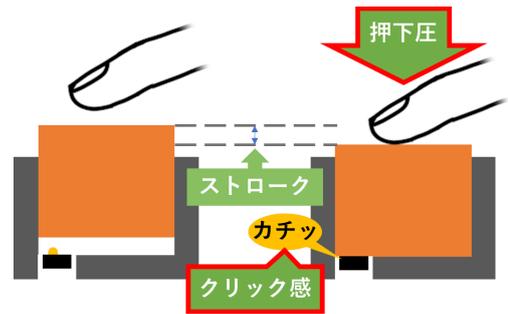


図 2 押しボタンの押し心地の要素
Fig. 2 Elements of push feeling.

に、一般的に用いられることが多い要素*2,*3,*4を参考に、筆者が整理したものである。

本研究では、3要素を動的に変更可能な機構を検討したが、押下圧とストロークの機構を省スペースで両立することは困難だったため、押下圧の実装を優先した。なお、ストロークについては、7章で議論する。

3.2 デバイス概要

本研究では、押し心地（押下圧、クリック感）を動的に変化可能な押しボタン型デバイスを提案する。ここでは、押下圧とクリック感について、従来の押しボタンと提案手法の違いや特性を整理する。

押下圧

従来の押しボタンでの押下圧は、初期位置に戻るために必要なばねの弾性によって生じているため、柔軟な変更は難しい。本研究では、永久磁石どうしの反発力を用いて押下圧を提示し、磁石の距離を変更することで押下圧の最大値を調整する。この手法を用いると、磁石の位置を動かすだけの単純な制御で押下圧を調整することができる。一方で、本研究の押しボタンと従来の押しボタンでは、ボタンを押し込んだ際の押下圧の変化（フォースカーブ）が異なる。バネを用いた従来の押しボタンでは、フックの法則により、押し込み距離に応じて直線的に押下圧が上昇する。それに対し、磁石を用いた本研究の押しボタンでは、押し込み距離に応じて押下圧が急上昇する。これは磁気に関するクーロンの法則により、磁極間の距離の2乗に反比例して反発力が生まれるからである。そのため、押せば押すほど押下圧の上昇量が増加し、従来の押しボタンとは異なる感触となることが予想される。実際のフォースカーブは 6.1 節で計測する。

クリック感

従来の押しボタンでのクリック感は、主にスナップア

*2 <https://www.diatec.co.jp/products/CHERRY/>

*3 <https://archisite.co.jp/pick-up/keyboard-switch/>

*4 <https://www.razer.com/jp-jp/gaming-keyboards-accessories/razer-mechanical-switches>

クシオン機構^{*5}（≒接点の切り替わり）によって生じているため、柔軟な変更は難しい。クリック感の強さは機構ごとに固定であり、クリック感の発生する高さ（位置）を変えるためには、機構自体の取り付け位置を変更する必要がある。本研究では、リニア振動アクチュエータを押しボタンに組み込み、ボタンの押下に合わせて駆動することで、クリック感の強さと発生する高さを調整する。

このように、押し込む際の押下圧の最大値を柔軟に変化させた上で、クリック感の強さ・提示位置を調整可能にすることで、多様なボタンの特性を表現することを目指す。

3.3 設計要件

本研究の押しボタン型デバイスは、既存の入力装置、特にアーケードゲーム用コントローラーに埋め込まれている押しボタンと置き換えて使用することを想定する。そのため、サイズ・コスト・応答速度に制約を設ける。サイズは、上限を直径 30mm とする。このサイズは、一般的に流通している制御用スイッチの規格（NECA C 4521）で定義されている最大サイズ（直径 30mm）であり、アーケードゲーム用コントローラーでも一般的に採用されていることから決定した。コストは、同型のゲーム用スイッチや制御用スイッチの価格帯（実売価格で 300 円～3,000 円程度）に収めることを理想とする。押下圧の応答速度は、押下のたびに押し心地が変更できる想定として、数百ミリ程度で押下圧を変更できるように設計を行う。

4. 実装

4.1 概要

本研究の押しボタン型デバイスは、主に「ボタン部」（押しボタンの指で押し込む部分）、「ケース部」（内部機構を保護するケース部分）、「モータ部」（押下圧の変更に用いるモータ部分）、とそれらの制御を行う「制御部」（センサやアクチュエータに接続されたマイコンや、その周辺回路部分）に分かれている。押しボタン型デバイスの外観を図 3 に、内部構造を図 4 に示す。ボタン部・ケース部・モータ部の筐体や機構は、ABS フィラメントを用いて 3D プリンタ（UP Plus2）で出力している。また、押しボタンのストロークは、3mm に固定している。

4.2 押下圧

押下圧の変更には、永久磁石どうしの反発力を利用する。ネオジム磁石をボタン部とケース部の内部に、2つの磁石の着磁方向を向かい合わせて同軸に配置した。使用した磁石はどちらも、株式会社マグファイン^{*6}製のネオジム磁石

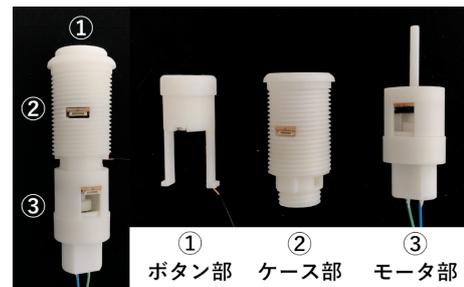


図 3 押しボタン型デバイスの外観
Fig. 3 Appearance of the pushbutton device.

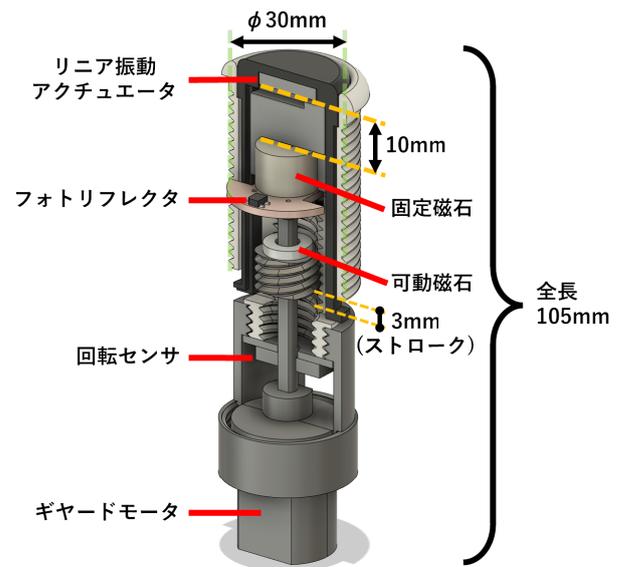
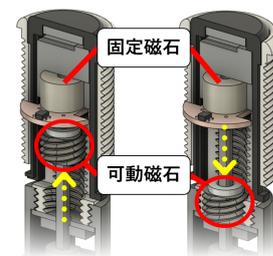


図 4 押しボタン型デバイスの内部構造
Fig. 4 Internal structure of the pushbutton device.



押下圧：最大 押下圧：最小

図 5 押下圧の最大値の変更可変イメージ
Fig. 5 The method to change the maximum pressing pressure.

（残留磁束密度：1,170–1,220 mT）である。ボタン部の磁石（以下、固定磁石）は丸型皿穴（外径 13mm×内径 3.2mm×高さ 9mm：ネジ呼び径 M3）で吸着力が 4.5 kgf、ケース部の磁石（以下、可動磁石）はリング型（外径 10mm×内径 5mm×高さ 5mm）で吸着力が 2.11 kgf のものを使用している。固定磁石はボタン部に固定した。可動磁石はネジ機構を用いて上下に移動できるように設計しており、モータ部から回転させることで可動磁石の位置・固定磁石との距離を変更し、押下圧の最大値を変更することができる（図 5）。本研究では、数百ミリ秒で押下圧を変更できる程

^{*5} <https://components.omron.com/jp-ja/products/basic-knowledge/switches/technology>

^{*6} <https://www.magfine.com/>

度の応答速度を目指している。そのため、可動磁石の移動速度を上げるために、ネジ溝は1回転で3ピッチ分進むことができる3条ネジとしており、約3回転で押下圧の最小から最大まで変更することができる。

モータ部では、可動磁石を決められた位置に移動するために、回転角の制御を行っている。本機構では、最大で3周ほど回転する必要があるため、可動域が180度程度の角度制御式サーボモータでは不十分である。また、可動域の制限がないステッピングモータには、高速域でトルクが低下するという特徴があるため、トルクと回転速度の両立が必要な本機構には適さない。そのため、ギヤードモータと回転センサを利用して、フィードバック制御を行う機構とした。ギヤードモータはギヤ比1:60のRA12W006000202Rを、回転センサはRDC803101Aを使用した。モータの駆動には、モータドライバモジュールDRV8835を使用している。

4.3 クリック感

クリック感の生成には、クリック感を発生させるためのリニア振動アクチュエータを配置する。リニア振動アクチュエータは、従来の偏心モータ型に比べて、精度や立ち上がり性能が良く、より多彩な表現ができるアクチュエータである。リニア振動アクチュエータは、ニデックコンポーネツ株式会社のLD14-002を使用した。ボタン部の指で触れる部分の裏側にアクチュエータをはめ込んでいる。リニア振動アクチュエータは近くに磁石があると、その影響を受けて振動が弱くなってしまふ。今回使用した磁石の場合、筆者の主観ではあるが、3mmの間隔だと振動すら発生せず、5mm以上離すと少しずつ振動が強くなり、10mm以上離すとそれ以上振動量の変化を感じなくなった。そのため、固定磁石との距離を10mm確保している(図4)。

また、クリック感が発生する高さを可変させるために、押しボタンの入力をON/OFFの2値のマイクロスイッチではなく、フォトリフレクタ(TPR-105F)を用いてアナログ値で取得する。ボタン部とケース部の間にフォトリフレクタを配置し、ボタン部の動き(=押し込み距離)を取得している。ボタン部には、フォトリフレクタの赤外線を反射する部分を設けている(図6)。反射部には再帰性反射材を張り付けて、3Dプリントしたパーツ表面の凸凹の影響が出ないようにしている。

4.4 制御部

システム構成を図7に、制御基板の外観を図8に示す。マイコン

本デバイスの制御には、ADC・PWM・I²C・UART機能が必要である。これらの機能を有しているマイコンの中から、Microchip Technology Inc.のPIC18F26K22を制御に使用した。

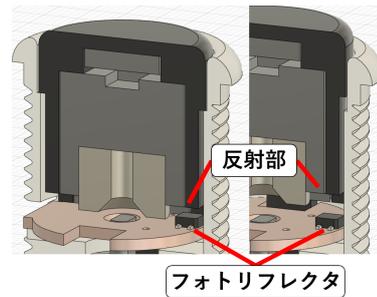


図6 フォトリフレクタと反射部

Fig. 6 Photoreflexor and reflective part.

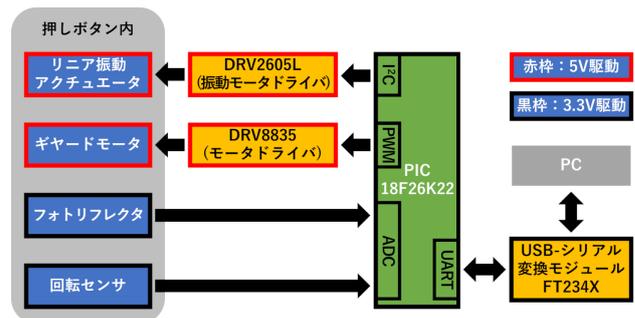


図7 システム構成

Fig. 7 System configuration.

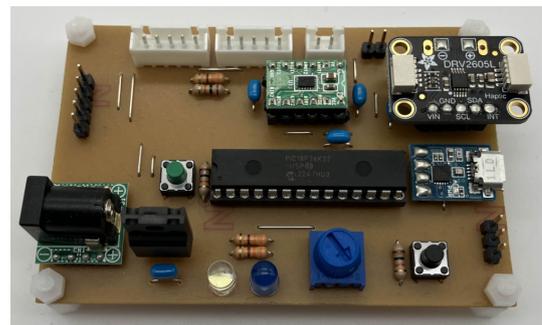


図8 制御基板の外観

Fig. 8 Appearance of the control board.

モータの駆動

押下圧の変更に使用するモータの駆動には、秋月電子通商のDRV8835使用ステッピング&DCモータドライバモジュールを使用している。

リニア振動アクチュエータの駆動

リニア振動アクチュエータの駆動には、Adafruit IndustriesのDRV2605Lハプティックモータドライバモジュールを使用し、内蔵されている振動パターンを再生して振動を発生させている。全123種の内蔵パターンのうち、クリック感に適したパターンを事前に6つ選択した(図9)。具体的には、押しボタンのクリック感に近い要素として、振動が短いこと、残響感が少ないこと、立ち上がり早いこと等を条件として選択した。また、応答速度の予備的な検証も行った。アクチュエータに加速度センサを取り付け、応答速度を測

定したところ、コマンド送信開始から約 1.5ms でアクチュエータが振動を開始しており、一定の応答速度があることを確認した。

シリアル通信

押しボタンの状態や各種パラメータを送受信するために、秋月電子通商の FT234X 超小型 USB シリアル変換モジュールを使用して、PC とシリアル通信を行っている。

電源

電源には 5V を使用している。モータ駆動により発生するノイズの各種センサへの影響を軽減するために、ギヤードモータとリニア振動アクチュエータは 5V の電源をそのまま使用し、各種ロジック用の電源は三端子レギュレータで生成した 3.3V を使用している。

4.5 プログラム

ここでは、ボタンの押し込みレベルを取得するためのフォトリフレクタと、可動磁石の位置を取得するための回転センサの計測処理、およびそれを用いてギヤードモータを回転させる処理を紹介する。なお、各種センサの出力は分解能 10bit の AD 変換値を 1ms 周期で取得している。

フォトリフレクタの値は、10bit の AD 変換値から入力変換テーブルを用いて、16 段階の押し込みレベルを識別できるように変換する。識別した押し込みレベルを元に、クリック感の発生とボタンの入力判定を行う。ここで 16 段階とした理由は、押し込みレベルの精細度と制御の容易さのバランスをとったためである。16 段階の場合、高さ方向で 0.2mm 程度の分解能となる。また、外部から制御を行う際に 4bit で表現することができ、通信の簡素化も図れる。続いて、入力変換テーブルの作成方法を説明する。まず、押しボタンの押し込み距離を 0.1mm ずつ変えたときのフォトリフレクタの出力値をプロットする。次に、そのデータの近似曲線 (2 次) を求め、ストローク (3mm) を均等に 16 段階に区切った際の閾値を計算して入力変換テーブルとする。

回転センサでは、2 相の可変抵抗を組み合わせることで、360 度の角度情報を検出できる。この回転角を用いて、モータ

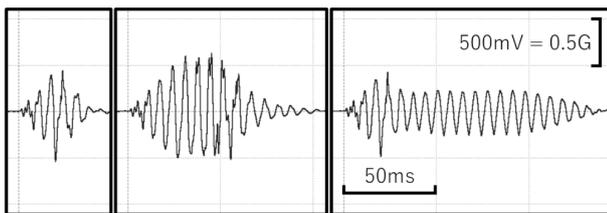


図 9 振動パターンの一例。リニア振動アクチュエータに、計測のために一時的に取り付けた加速度センサの値 (アクチュエータと垂直な軸) を、オシロスコープで観察したもの

Fig. 9 Examples of a vibration pattern.

ータの回転量 (≒ 磁石の移動量) を求めることができる。電源投入時に自動で可動磁石の位置を最大までゆっくりと上昇 (固定磁石との距離が最小の状態) させ、内部のストッパーに引っかかり動かなくなった位置を原点とする。そこから、回転センサによって求めた移動量を累積することにより、可動磁石の位置を取得している。

可動磁石の移動は、事前に作成した出力変換テーブルを用いて、最小から最大まで 16 段階の押下圧レベルを入力として制御する。16 段階とした理由は、フォトリフレクタと同様に、押下圧の精細度と制御の容易さのバランスを取ったためである。出力変換テーブルは、可動磁石の位置を最大まで上昇させた時 (図 5 左) の磁石間の距離と、可動磁石の位置を最低まで下降させた時 (図 5 右) の磁石間の距離を、均等に 16 分割するように作成した。

モータ制御は、正転・逆転・ブレーキ^{*7}の切り替えのみで行っている。回転センサによって求めた現在の可動磁石の位置と、出力変換テーブルを用いて取得した磁石間の距離 (≒ 移動先の可動磁石の位置) をもとにフィードバック制御を行い、出力はモータドライバを介してギヤードモータに出力している。

5. 活用例

ここでは、ゲーム等のエンターテインメント用途を想定した 3 種類の基本的な活用例を紹介する。その他の用途については 7 章で後述する。コンテンツの開発には Unity を使用した。Unity 側ではシリアル通信を用いてデバイスとの通信を行い、「押し込みレベル」を受信し、「押下圧レベル」や「クリック感の強さ・発生する高さ」等を送信している。

5.1 風船への空気入れ

1 つ目の活用例は、風船への空気入れをモチーフに作成した (図 10)。ボタンを押すことで、PC 画面上の風船に



図 10 活用例 1: 風船への空気入れ

Fig. 10 Example1: Inflating a balloon.

*7 モータドライバのブレーキ機能。モータの端子間を短絡させることで、モータの自己誘導起電力により急減速を行う機能。

少しずつ空気が入っていく。初期状態での押下圧は最小の状態になっているが、風船が膨らむにつれて少しずつ押下圧が大きくなり、空気を入れるために力が必要になる。ある程度まで風船が膨らむと破裂し、その後は空気が抜けるように押下圧が最小の状態になる。

5.2 手触りボックス

2つ目の活用例は、押下圧とクリック感を組み合わせた押し心地のバリエーションを楽しめるシステム「手触りボックス」を作成した(図 11)。3つの食べ物(豆腐, いくら, こんにゃく)が箱に入った様子が表示され、指のアイコンで選択された食べ物をモチーフにした押し心地を楽しむことができる。豆腐であれば「やわらかい・最初に突き破る感覚(1回の振動)」, いくらであれば「ぶつぶつとした感覚(複数回の振動)」, こんにゃくであれば「弾力のある感じ」, といった特徴を押し心地で味わうことができる。具体的な設定パラメータは図 11 下に記載する。

5.3 綱引きゲーム

3つ目の活用例は、相手の強さを押下圧の最大値の変化で表現する綱引きゲームである(図 12)。左下のゲージは



図 11 活用例 2: 手触りボックスと設定パラメータ
Fig. 11 Example2: The feel box.

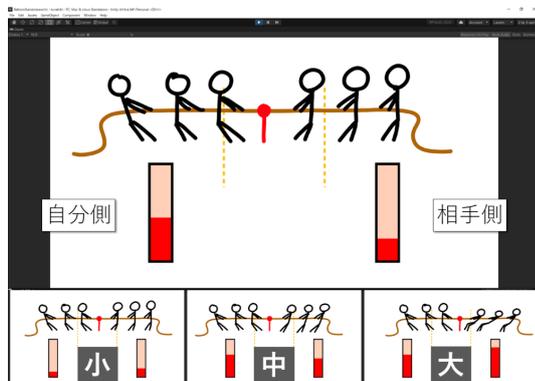


図 12 活用例 3: 綱引きゲーム。相手のパワーで押下圧が変化する
Fig. 12 Example3: Tug-of-war game.

プレイヤーのパワー、右下のゲージは相手のパワーを表している。プレイヤーのパワーは常時減少するが、ボタンを連打することで上昇する。パワーが多い方に綱が少しずつ移動していき、左右の点線まで綱の中央の赤い部分が移動すると、勝敗が決まる。相手のパワーと押下圧が対応しており、相手のパワーが強くなるほど、押下圧が大きくなる。相手の強さは3段階あり、強さ1→2→3と連続で勝負する。相手が強くなるにつれて、綱を引かれる感覚が強くなるような印象を押しボタンで体感することができる。

6. 評価実験

6.1 性能評価

本デバイスで取得・可変できる要素である「押し込みレベル」「押下圧」に関する性能を評価した。評価項目は(1)ボタンの押し込みレベル, (2)押下圧の可変範囲, (3)押下圧の変化速度, (4)フォースカーブ, の4つである。測定は、図 13 に示す装置で行った。これは3Dプリンター Ender3 のエクストルーダー付近に、フォースゲージを取り付けたものである。Ender3はエクストルーダーの高さを任意に操作することが可能である。この装置を用いて押し込み距離の調節・押下圧の測定を行った。

6.1.1 ボタンの押し込みレベル

フォトリフレクタの入力から変換テーブルを通して求める16段階の押し込みレベルの精度を調査した。本デバイスでは5.2節の活用例のように、押し込みレベルに対応させてクリック感を生成しているため、押し込みレベルを正しく検出できれば、クリック感を任意の高さで生成できることにつながる。押し込みレベルは、4.5節で述べたように押し込み距離に応じて均等に变化するようにプログラムしており、押し込みレベルと押し込み距離の関係は直線的な変化となるはずである。実験では、0.1mm ずつ押し込み距離を変化させ、システム上で押し込みレベルが変化した際の押し込み距離を記録した。測定は5回行った。測定結果を図 14 に示す。5回の測定はすべて同じ結果となり、分散は見られなかった。概ね想定通りの直線的な変化を確

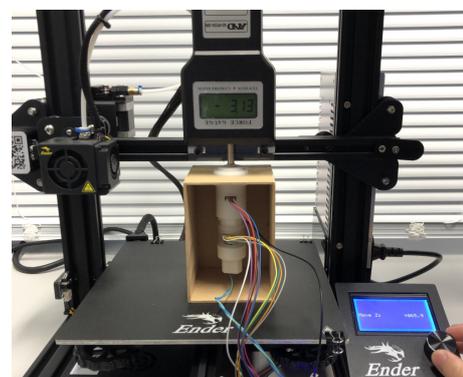


図 13 性能評価に用いた器具
Fig. 13 Equipment used for performance evaluation.

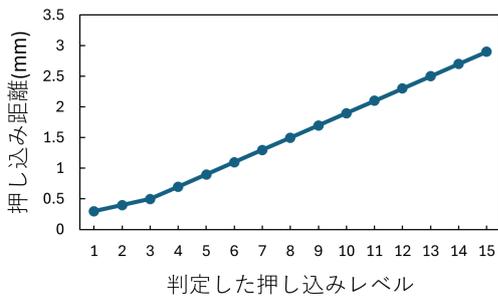


図 14 16 段階の押し込みレベル (0~15, 0 は押していない状態のため省略) と、実測した押し込み距離の比較

Fig. 14 Comparison of the 16 pressing levels.

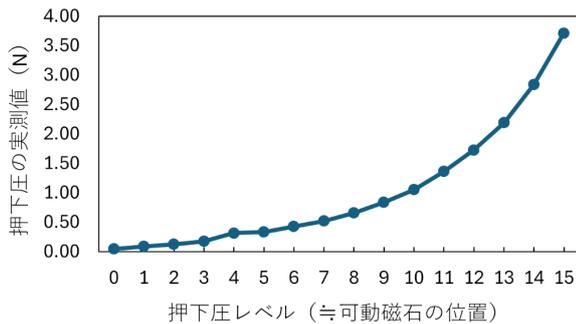


図 15 押下圧レベルと押下圧の実測値の相関

Fig. 15 Correlation between the pressing force level and the measured value.

認できた。ボタンの押しはじめ (押し込みレベル 1~3) では、他と比べて若干傾きが小さくなっているが、これは各種パーツのクリアランスによる誤差であると推測される。ボタン部が引っかかりなく動くために、ボタン部とケース部の間にクリアランスを設けており、特に押しはじめの箇所では影響を受けやすく、若干斜めにボタンが押し込まれる。これにより、フォトリフレクタとの距離の変化がやや少なくなり、このような結果になったと推測される。以上より、ボタンの押し込みレベルは、安定して 16 段階で判定できる。

6.1.2 押下圧の変換範囲

フォースゲージを用いて、押下圧の変換範囲を測定した。ボタンを 2.9 mm 押し込んだ状態 (ボタンの底まで押ししてしまうことを避けるために、ストローク 3.0 mm から若干余裕を持たせている) にフォースゲージを固定し、16 段階 (0 が最小、15 が最大) に押下圧レベルを変化させ、フォースゲージにかかる力を測定した。その結果を図 15 に示す。3.2 節で説明したように、理論的には、押下圧レベルが増えるにつれ (= 磁石間の距離が短くなる)、磁石間の距離の 2 乗に反比例して押し込みにかかる力が増える。実験結果からも、理論的な変化に近い相関を示すことが確認できた。また、最も設定値を高くした際にかかる力 (= 押下圧の最大値) は約 3.72 N であった。これは、一般的な PC 用メカニカルキーボードスイッチ (最大で約 0.8 N) や、マウス用マイクロスイッチ (一般的に約 0.6 N) に比べて十分

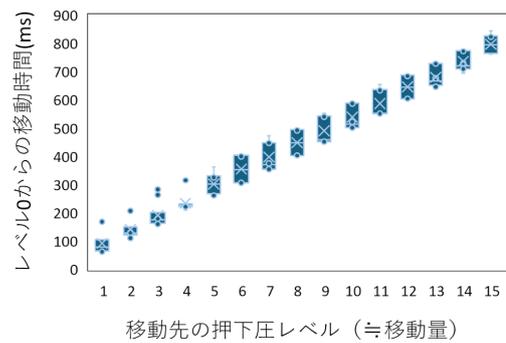


図 16 押下圧レベル 0 から各レベルへの移動時間

Fig. 16 Required time for changing the pressing force level.

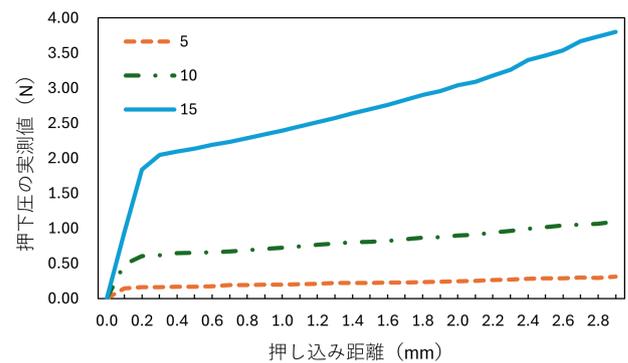


図 17 フォースカーブ (凡例の数字は押下圧レベル)

Fig. 17 Force curve.

に大きく、押すために少し力が必要な値であり、多様な押し心地の実現に寄与できると考える。

6.1.3 押下圧の変化速度

押下圧変化の応答速度を測定した。押下圧を増加させるために 2 つの磁石を近づけるほど、磁石の反発力の影響を受け応答速度が悪化する可能性があると考えた。そこで、押下圧が最小の状態 (押下圧レベル 0) と、それ以外の各段階 (押下圧レベル 1~15) 間の移動時間を測定した。各押下圧レベルに対して 10 試行を行い、その結果を箱ひげ図にまとめたものを図 16 に示す。結果は、移動量と移動時間が概ね比例した。移動量が最大になる 0~15 間では約 800 ms となっていた。

また、0~15 までの各 1 段階 (0-1, 1-2, ~~, 14-15) の移動速度についても別途計測したところ、平均が 101.6 ms、標準偏差が 8.3 ms であった。つまり、移動元・移動先にかかわらず、移動量により大体の移動時間が決まるといえる。

6.1.4 フォースカーブ

フォースカーブ (押し込み距離と押下圧の関係) を測定した。実験では、押下圧レベル 5, 10, 15 のそれぞれにおいて、押し込み距離を 0.1 mm ずつ変化させた際の押下圧を測定した。結果を図 17 に示す。どの段階でも、緩やかな傾きを見せながらほぼ直線状に増加する。これはメカニカルキーボードの赤軸や黒軸と同様に、滑らかで癖のない押し心地を示している。ボタンの押下による磁石間の距離

表 1 提案デバイスと標準ボタンの違い

Table 1 Differences between the proposed device and standard button.

ボタン	押下圧の最大値	ストローク	クリック感
提案デバイス	最大 3.72 N で可変	3.0 mm	あり
標準ボタン	約 0.60 N で固定	2.5 mm	なし

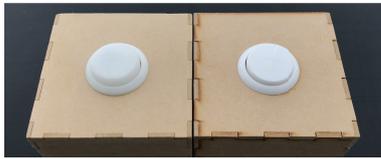


図 18 提案デバイス (左) と標準ボタン (右) を被験者から見た様子
Fig. 18 Appearance of the proposed device (left) and standard button (right).

の変化は 3 mm と短いため、図 15 に見られるような押下圧が 2 乗に反比例する様子がほとんど表れず、直線成分が多く含まれるフォースカーブとなったと予想される。

6.2 ユーザ評価

6.2.1 目的

ここでは、既存の押しボタン (アーケードゲーム用コントローラーのボタン) の代わりに本研究の押しボタン型デバイスを利用した際の、コンテンツに対する主観的な印象の変化を調査した。調査は、活用例で示したエンターテインメント系のコンテンツの体験を対象として行う。

6.2.2 手法

本研究の押しボタン型デバイス (以下、提案デバイス) と、市販されている通常の押しボタン (以下、標準ボタン) のそれぞれでゲームを遊んでもらい、ゲームの楽しさやボタンの押し心地等について、アンケートを行った。標準ボタンには、一般的なアーケードゲーム筐体で使用されている押しボタンの 1 つである、三和電子株式会社製の OBSF-30^{*8}を使用した。提案デバイスと標準ボタンの構造的特性の違いを、表 1 に示す。提案デバイスは、押しボタンを半分押し込んだ時に、短めで軽いクリック感 (図 9 左) を発生する設定とした。また、ボタンをパネルに取り付けた状態で上部から見える部分の直径 (ボタン部・ケース部の外形) は、提案デバイス・標準ボタンで同様になっている (図 18)。

アンケートには、5.1 節で紹介した風船への空気入れ (以下、ゲーム a) と、5.3 節で紹介した綱引きゲーム (以下、ゲーム b) を利用する。連打ミニゲームとして 2 つのゲームを遊んでもらうために、ゲーム a では画面上にタイマーを表示し、「とにかく早く風船を割る」ように指示を、ゲーム b では、「勝利できるよう全力で連打をする」ように指示を行った。評価は押しボタンごとに行い、順序効果を考慮

^{*8} <https://www.sanwa-d.co.jp/product/button.html>



図 19 アンケートの流れ

Fig. 19 Flow of the questionnaire

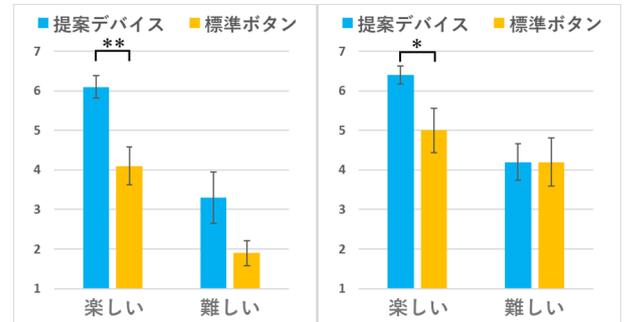


図 20 ゲーム a/b のアンケート結果 (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$)

Fig. 20 The questionnaire results of game a/b.

して提案デバイスと標準ボタンの提示順序は入れ替えた。被験者は、筆者と同じ大学・大学院に所属する 22 歳~24 歳の学生 10 名であった。まず被験者には、本研究の概要 (押し心地が動的に変化する押しボタンであること)、提示する押しボタンの順番、ゲームの遊び方を説明した。その後、各ボタンに対して 2 つのゲームを遊んでもらい、それぞれのゲームごとに「楽しい」「難しい」の 2 項目に対して当てはまる程度を 7 段階 (「1: まったくそう思わない」~「7: とてもそう思う」) で回答してもらった (Q1)。2 つのゲームが終了した後は、押しボタンの押し心地について、「心地よい」「使いやすい」「疲れやすい」の 3 項目に対して当てはまる程度を Q1 と同様の 7 段階で回答してもらった (Q2)。次に、提示する押しボタンを変えて、もう 1 度 2 つのゲームを遊んでもらい評価をしてもらった。アンケートの流れを図 19 に示す。

6.2.3 結果と考察

アンケートの結果について示す。

図 20 は、ゲーム体験に対するアンケート結果 (Q1) の平均と標準誤差である。結果に対して対応のある t 検定を実施したところ、5%水準で有意差が見られたのは「ゲーム a: 楽しい」($t(9) = 4.24, p = 0.002$) と「ゲーム b: 楽しい」($t(9) = 2.49, p = 0.034$) となり、提案デバイスを使用することにより楽しさが向上すると考えられる。これらの回答の自由記述欄では、楽しいと感じた理由として「フィードバックが連動していて楽しい」「ゲームの内容と押し心地が連動し、リアルな体験ができた」等があげられていた。押し心地を変化させる手法が、ゲーム体験の向上に有効であることが確認できた。反対に「ゲーム a: 難しい」($t(9) = 2.20, p = 0.055$) と「ゲーム b: 難しい」($t(9) = 0, p = 1.000$) では有意差が見られなかった。しかし、これらの回答の自由記述欄の中には、提案デバイスに

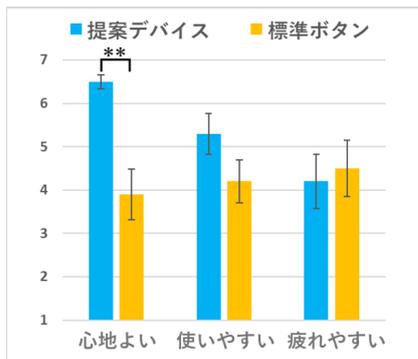


図 21 押し心地についてのアンケート結果 (**: $p < 0.01$)
Fig. 21 The questionnaire results of push feeling.

対して「ボタンの押し心地が変わったため難易度が上がった気がする」や「押し心地が変わることにより単純な連打ゲームではなくなっていたから」等の理由をあげた被験者がおり、表現方法の工夫次第では、難易度の調整に活用できるのではないかと考える。

図 21 は、ボタンの押し心地に対してのアンケート結果 (Q2) の平均と標準誤差である。Q1 と同様に、結果に対して対応のある t 検定を実施したところ、5%水準で条件間に有意差が見られたのは「心地よい」($t(9) = 4.21$, $p = 0.002$) のみとなり、提案デバイスを使用することにより心地よさが向上すると考えられる。この回答の自由記述欄では、心地よいと感じた理由として「押し心地が良い」や「重みが変わることによりなんらかの心地よさを感じられた」等があげられていた。重さが変わるということ自体が、ユーザにポジティブな印象を与えている可能性がある。反対に「使いやすい」($t(9) = 1.82$, $p = 0.102$) と「疲れやすい」($t(9) = 0.28$, $p = 0.785$) では有意差が見られなかった。これらの回答の自由記述欄の中には、提案デバイスに対して、「押し返す力がある分疲れやすい」というネガティブな意見や、「クリック感があるため、押したつもりでも押せていない、という事象が減り、誤入力の手ストレスが改善され疲れにくい」というポジティブな意見があげられていた。現在の印象評価の制約として、押下圧とクリック感を同時に提示しているため、今後は押下圧要因とクリック感要因の切り分けを行いたい。

7. 議論

本デバイスの課題として「押下圧の変化の高速化」「ストロークの変更」「デバイスの高さ」「用途の拡張」「コストと社会展開」について議論する。

押下圧の変化の高速化 現在の応答速度 (変化量にもよるが 100 ms~800 ms ほど) は、ボタンを押す前後に押下圧を変化させることは可能だと考えるが、ボタンを押し込んでいる途中で押下圧を変化させることは難しい。既存の押しボタンの中には、カメラのシャッターボタンのように押下圧が押し込みの途中で変化するこ

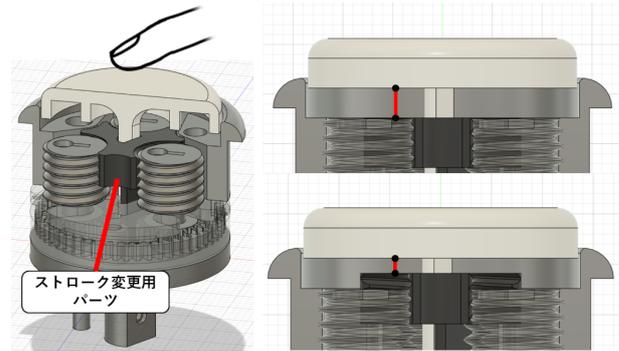


図 22 ストローク変更機構のモデル。右図の赤線がストロークを示す。ストローク変更パーツを上昇させることで、ストロークを短くすることができる。

Fig. 22 Model of the stroke-changing mechanism.



図 23 押しボタンの高さの比較。左はユーザ評価に用いた OBSF-30、右は本研究の押しボタン型デバイス
Fig. 23 Comparison of the height of the pushbuttons.

とで、2段階の操作 (半押し/全押し) を補助するものが存在する。提案手法でも、押し込み途中にクリック感を提示することで、半押し状態に切り替わる場所を提示することは可能だが、押下圧を素早く高めて押し込みにくくするような挙動は難しい。こうした挙動の実現には、モータの回転速度やネジ機構の工夫等を通して可動磁石の移動速度を上昇させる必要があり、今後検討を進めていく。

ストロークの変更 3.1 節で述べたように、押しボタンの押し心地に大きな影響を与える要素のうち、ストロークの変更は現在のシステムには組み込めていない。ストローク制限用パーツを上下に移動させることで、ストロークを 0 mm~3 mm の範囲で変更する機構 (図 22) は実装済みであるが、押下圧変更の機構と干渉するため、このままでは一体化が難しい。ストロークの大きいボタン (例: 非常停止用押しボタン) では一般的に押下圧も大きくなるため、現在のシステムでもある程度押し心地を表現できる可能性はあるが、今後はストローク調整機能をシステムに統合できるように、機構を改良していきたい。

デバイスの高さ 現在の押しボタン型デバイスは、直径は既存の押しボタンと同じ 30 mm に収まっているものの、高さは 105 mm あり、既存の押しボタンの 5 倍以上となっている (図 23)。そのため、高さに制限が

ある場所では本デバイスを使用することができない。アーケードゲーム筐体のようにある程度の厚みがある場所や、壁に取り付ける場合等は現状でも利用可能であるが、今後縦方向の小型化も検討していく。

用途の拡張 本研究のデバイスの活用方法として、エンターテインメント用途以外も視野に入れている。たとえば入力支援として、金額入力の場面で確定操作等の重要なボタンのみ押下圧を大きくすることで、小さな力では押し込めなくなるため、不用意な入力を防ぐことが期待できる。システムのエラー等を通知する場面では、ボタンの押し始めから強いクリック感を断続的に発生させて、ユーザの入力を止めるような情報提示も考えられる。他にも、ユーザが自分の好みに合わせて押し心地を変更することで、入力装置のカスタマイズを行うこともできる。今後は本研究の特徴を生かして、多様な活用例を検討していく。

コストと社会展開 本研究のデバイスの今後の展開として、デバイスの仕様や基板図、筐体のモデル等をオープンソースハードウェアとすることで、多くのユーザが本デバイスを利用できるようにしていきたい。そのためにも、コストは重要な要素となる。現在のプロトタイプは、押し心地の変更に直接関係する主要なパーツだけで約 2,500 円、回路やプログラムの工夫次第で省略可能なパーツ（モータドライバ等）を含めると約 6,000 円程度となっている。これらの省略可能なコスト削減も積極的に行い、目標とするコスト（3,000 円以下）を達成し、本デバイスを利用するハードルを下げていきたい。

8. 結論

本研究では、押しボタンスイッチにおける押し心地を動的に変更可能な押しボタン型デバイスの提案と実装を行った。変更する押し心地の要素として、「押下圧」「クリック感」を対象とし、押下圧は永久磁石の反発力を利用して、クリック感はりニア振動アクチュエータを利用して変化させた。加えて、実装した押しボタン型デバイスを生かす活用例を示した。また、性能評価・ユーザ評価を行うことにより、本デバイスの有用性について調査した。ユーザ評価の結果、本デバイスは既存の押しボタンより心地よさが向上したこと、既存の押しボタンの代わりに本デバイスを用いることでゲームの楽しさが向上することを確認した。今後は、議論で述べたような課題を解決するとともに、ゲーム以外の日常生活環境における多様な活用例を実装していきたい。

参考文献

- [1] 田原和真, 塚田浩二: 動的に押し心地が変化する押しボタンの提案, WISS2023 予稿集 (2023).
- [2] 小川大地, 蜂須 拓, 梶本裕之: 2A1-B01 物理的なボタンへの触振動付与による多感触ボタンの設計, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol.2015, pp.2A1-B01.1-2A1-B01.3 (2015).
- [3] Park, C., Yoon, J., Oh, S. and Choi, S.: Augmenting Physical Buttons with Vibrotactile Feedback for Programmable Feels, *Proc. 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, Association for Computing Machinery, pp.924-937 (2020).
- [4] Park, C., Kim, J., Kim, D.-G., Oh, S. and Choi, S.: Vibration-Augmented Buttons: Information Transmission Capacity and Application to Interaction Design, *Proc. 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1-13, Association for Computing Machinery (2022).
- [5] Doerrer, C. and Werthschützky, R.: Simulating push-buttons using a haptic display: Requirements on force resolution and force-displacement curve, *Proc. EuroHaptics*, pp.41-46 (2002).
- [6] Liao, Y.-C., Kim, S. and Oulasvirta, A.: One Button to Rule Them All: Rendering Arbitrary Force-Displacement Curves, *Adjunct Proc. 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '18 Adjunct*, pp.111-113, Association for Computing Machinery (2018).
- [7] Liao, Y.-C., Kim, S., Lee, B. and Oulasvirta, A.: Button Simulation and Design via FDVV Models, *Proc. 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '20*, pp.1-14, Association for Computing Machinery (2020).
- [8] Sony : DualSense ワイヤレスコントローラー, Sony (オンライン), 入手先 (<https://www.playstation.com/ja-jp/accessories/dualsense-wireless-controller/>) (参照 2024-11-15).
- [9] Zheng, C., Kim, J., Leithinger, D., Gross, M.D. and Do, E.Y.-L.: Mechamagnets: Designing and Fabricating Haptic and Functional Physical Inputs with Embedded Magnets, *Proc. 13th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp.325-334, Association for Computing Machinery (2019).
- [10] 尾形正泰: 磁石触覚の設計と応用—永久磁石を用いた力触覚フィードバック, 情報処理学会論文誌, Vol.61, No.2, pp.211-220 (2020).
- [11] Ogata, M.: Magneto-Haptics: Embedding Magnetic Force Feedback for Physical Interactions, *Proc. 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '18*, pp.737-743, Association for Computing Machinery (2018).
- [12] 古木健悦, 菊地淑晃: らくらくスマートフォン商品化への取組み, Fujitsu, Vol.63, chapter 5, pp.584-554, 富士通 (2009).
- [13] 岡田 明: 機器操作における体性感覚フィードバックの有効性, 日本人間工学会大会講演集, Vol.48spl, pp.110-111 (2012).
- [14] 伊藤元昭: 第 1 回 触感を電子技術で自在に創り出す時代が到来した, TELESCOPE Magazine (オンライン), 入手先 (https://www.tel.co.jp/museum/magazine/intractable/report02_01/) (参照 2024-11-15)/
- [15] Miruchna, V., Walter, R., Lindlbauer, D., Lehmann, M., von Klitzing, R. and Müller, J.: GelTouch: Localized Tactile Feedback Through Thin, Programmable Gel, *Proc. 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, UIST '15*, pp.3-10, Association for Computing Machinery (2015).
- [16] Shultz, C. and Harrison, C.: Flat Panel Haptics: Em-

bedded Electroosmotic Pumps for Scalable Shape Displays, *Proc. 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '23*, Association for Computing Machinery (2023).

- [17] Jansen, Y., Karrer, T. and Borchers, J.: MudPad: Tactile feedback and haptic texture overlay for touch surfaces, *ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, ITS '10*, pp.11-14, Association for Computing Machinery (2010).

田原 和真

2002年生。2024年公立ほこだて未来大学システム情報科学部複雑系知能学科卒業。同年同大学大学院システム情報科学研究科入学。

塚田 浩二 (正会員)

1977年生。2005年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科博士課程修了。博士(政策・メディア)。産業技術総合研究所, お茶の水女子大学, 科学技術振興機構さきがけ研究員を経て, 2013年公立ほこだて未来大学情報アーキテクチャ学科准教授。2023年より同教授。日用品インタフェース, マテリアルインタラクション等の研究に従事。2012年イグノーベル賞(音響学)受賞。