

MagTile：多様な操作が可能なマグネット式インタフェースの試作

晴山 京汰^{1,a)} 塚田 浩二¹

概要：本研究では、磁石のフィードバックを利用した入力デバイスを提案する。このデバイスはボードとスイッチの2つのモジュールで構成され、ボードの上にスイッチを乗せ、動かす事で操作する。操作方法は、回転・ピボット・押すの3種類に対応する。2つのモジュールには磁石が埋め込まれており、操作した際のフィードバックを触覚や音で得ることが出来る。また、操作をセンシングする電子回路はボード部／スイッチ部の一方に埋め込めばよいので、用途で使い分けができる。本研究では、このデバイスの設計や実装方法、及び応用例を提案する。さらに、評価実験を通して、システムのユーザビリティを検証する。

MagTile: Magnetic interface for various operations

HAREYAMA KYOTA^{1,a)} TSUKADA KOJI¹

1. はじめに

近年、情報家電等の操作をスマートフォンアプリで行う事例が増えてきている。例えば、家庭用照明器の PHILIPS Hue^{*1}ではスマートフォンと照明を Bluetooth で繋ぎ、専用のスマホアプリを操作することで照明の調整が行える。Nature Remo^{*2}は、赤外線マルチリモコンを Wifi 経由で制御できるデバイスであり、赤外線で制御可能な家電であれば、スマートフォンでの操作を可能とする。このようなスマートフォンを中心とした情報家電操作手法は、一つのデバイスに操作を統合できる反面、基本的に画面を目視しながら操作する必要があり、触覚フィードバックに乏しい課題がある。本研究では、マグネットを中心として、操作の柔軟性と心地よい操作感を備えたデバイスを提案し、情報家電制御等に活用を図る。

本研究では、シンプルな設計で多様な操作が行える入力デバイスを提案する。筐体の設計や磁石の配置を工夫することで複数の入力操作を実装し、磁石の吸い付きと反発で

触覚フィードバックを表現する。このデバイスを用いることで、生活の様々な場面に馴染みつつ、心地よい操作感で情報家電等を制御することを目指す。

2. 関連研究

本章では、本研究に関連する研究事例として、「マグネットを用いたインタフェースの例」、「既存のユーザインタフェースの拡張例」の2つの例を説明する。

2.1 マグネットを用いたインタフェース

宮武ら [1] は、平面の板に磁石を埋め込み、スマートフォンを平面上にかざすことで内蔵の磁気センサを用いて位置を検出できるシステムを提案している。

Clement Zheng ら [2] は、磁石と 3D プリンタで出力されたパーツを組み合わせて様々な触覚インタフェースを作ることが出来る Mechamagnets というプロトタイプ手法を提案している。

尾形ら [3] は、スライダー型の入力デバイスに磁石を埋め込むことで磁石の触覚フィードバックを得ながら操作が出来るインタフェースと設計可能なデザインツールを提案している。

尾形ら [4] は、強力に着磁された磁石紙とプログラマブル

¹ 公立はこだて未来大学
Future University Hakodate

^{a)} harekyon@gmail.com

^{*1} <https://www.philips-hue.com/ja-jp>

^{*2} <https://nature.global/nature-remo/>

な磁界変化を用いて、物理的な運動と動的なアクチュエーションを可能にする紙素材 FluxPaper を提案している。

道貝ら [5] は、電磁石で日用品を駆動させるための電磁石デバイスツールキット ToolShaker を提案している。

折原ら [6] は、電子工作等の作業机に着目し、さりげなく机上の工具／部品等を移動・整理するシステム PartsSweeper を提案している。

2.2 既存のユーザインタフェースの拡張

塚田ら [7] は日用品を置いて動かす事で、日用品に関連するアプリケーション（例: CD に対応する音楽プレイヤー）等を直感的に操作することが出来るデバイスを提案している。

暦本ら [8] は RFID を埋め込んだタイルを専用のディスプレイに置くことで、タイルの位置に合わせた GUI をディスプレイに表示し、スタイラスペンなどで操作することが出来るデバイスを提案している。タイルを好きな位置に配置することで自分好みに GUI をカスタマイズでき、汎用性の高いデバイスになっている。

尾形ら [9] は、赤外線センサをバンドの皮膚側に設置し、皮膚とセンサの距離を計測することで操作を読み取るインタフェース「SenSkin」を提案した。

池松ら [10] は、静電容量方式のタッチサーフェス上へ張り付けるだけの簡単な作業で取り付けられる Force-to-Motion 方式の薄型入力機器、Ohmic-Sticker を提案した。

2.3 本研究の特徴

本研究では、マグネットの吸着力を用いた心地よい操作感と、柔軟な操作を両立できるシステムを目指し、シンプルな配線と機構で操作のセンシングが行えるようなシステムを目指す。

3. 提案

本研究ではボードとスイッチの二つのモジュールから構成される入力インタフェースを提案する（図 1）。システムの中心となる永久磁石は、スイッチの中央と角の二箇所と、ボードに一定間隔で配置されている。スイッチをボードにおくことで、磁石の吸着力を利用して操作することができる。

3.1 操作方法

操作方法は回転・ピボット・押すの 3 種類の操作を行うことができる（図 2）。回転はスイッチ部中央の磁石を軸に回転し操作する。ピボットはスイッチ部の端の磁石を軸に回転し、別の場所に移動させる。押す操作は 2 つの磁石が設置された対角線上の角を押す事でクリック感を表現している（図 3）。

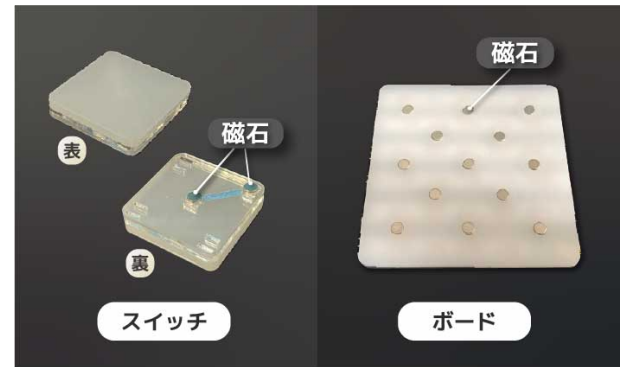


図 1 本研究の構成. 2 つのモジュールからなる。

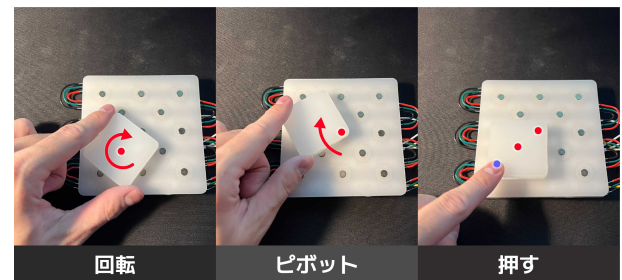


図 2 本研究の操作体系



図 3 押す操作の仕組み (スイッチ側面図)

3.2 センシング方式

本システムでは、操作をセンシングする電子回路はボード部／スイッチ部の一方に埋め込めばよいので、用途で使い分けることができる。具体的には、ボードにマイコンを内蔵するボード内蔵型と、スイッチに内蔵するスイッチ内蔵型の 2 種類を提案する（図 4）。

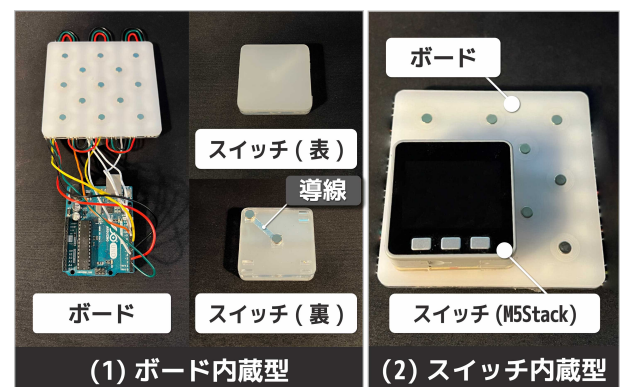


図 4 2 つのセンシング方式

4. 実装

ここでは、まず基本的な磁石配置と機構の設計について紹介し、次にボード内蔵型デバイスとスイッチ内蔵型デバイスの実装について説明する。

4.1 磁石と機構

ボードとスイッチの設計図を図5に示す。筐体はアクリル板を使用し、磁石を取り付けるための穴を開けている。磁石には、ダイソー社の超強力マグネットミニ（280mT、直径6mm）を利用した。サイズとしては、まずスイッチを大人が片手でつまみやすい約43mm四方に設定し、磁石を中央と角に埋め込んだ。この磁石の間隔（16.5mm）に基づいて、ボードに計13個の磁石を一定間隔で配置した。なお、ボードの穴の周りにすり鉢状の彫刻加工を施すことで、磁石が滑りやすいように工夫している（図6）。

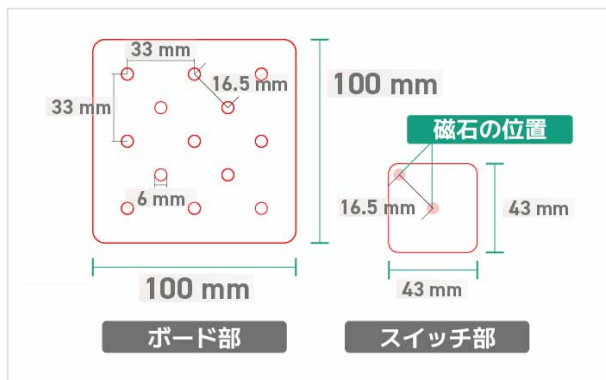


図5 デバイスの設計と磁石の配置

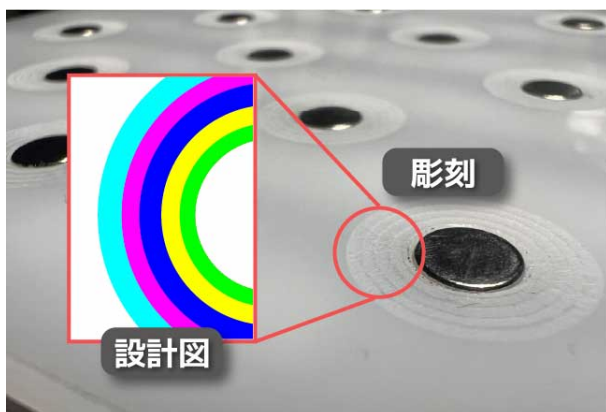


図6 操作感を良くするための工夫（彫刻）

4.2 ボード内蔵型デバイス

ボード内蔵型デバイスでは、ボードに埋め込まれた磁石をそれぞれ Arduino の入出力ピンに接続する。スイッチがボードに置かれると、ボード上の2つの磁石が通電する。通電状態の変化からユーザの操作を検出する（図7）。

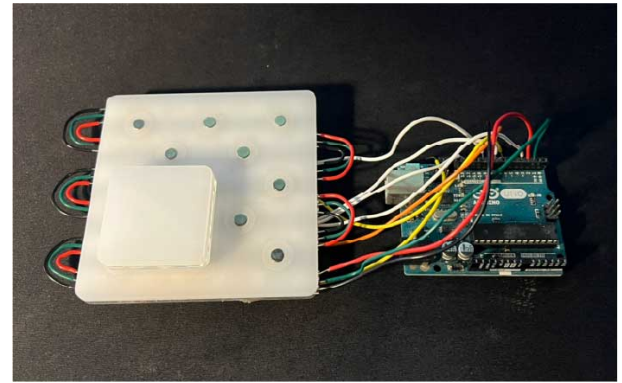


図7 ボード内蔵型デバイス

4.2.1 配線用の機構

ここでは、デバイスの筐体設計について説明する。ボード内蔵型は4.1節で説明した設計に加え、ボードに埋め込まれた磁石から Arduino に配線する機構を作る必要がある。今後、配線パターンや機構の変更があることを考慮し、導線で直接配線することとした。しかし、磁石に対してはんだ付けが出来ないため、導線を磁石に固定する機構を実装した（図8）。ジャンプワイヤの片側を切断し外の被膜を剥がして導線をむき出しにした上で、専用のアクリルを用意し中央の穴に導線を巻き付ける。その中に磁石を埋め込むことでこの機構は完成する。この配線機構をボード部の

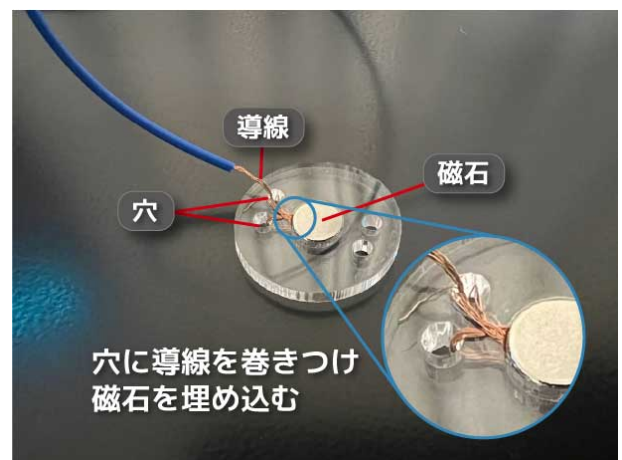


図8 磁石と配線するための機構

裏側に取り付け、もう片方を Arduino に差し込むことで配線が完了する（図9）。配線機構とボードは磁石の吸着力で固定される。磁石の吸着を利用して簡単に配線を行うことが出来る。

4.2.2 マイコンとの配線

ボードには13個の磁石が埋め込まれており、各々 Arduino の入出力ピンに配線されている。ボードと Arduino の配線関係が図10である。D2-D10はデジタルピンで主に回転操作を認識し、A1-A4はアナログピンで主にピボット操作を認識する*3。前述したように、スイッチには2つの

*3 アナログピンをデジタルピンとして利用



図 9 ボードに配線する様子

磁石が埋め込まれており、2点間に導線が張られている。ボードにスイッチを取り付けると2点間が通電し接触状態を認識する。

4.2.3 プログラム

まず最初に、D2-D10を出力、A1-A4を入力としてA1-A4の入力状態を確認する。その次にA1-A4を出力、D2-D10を入力としてD2-D10の入力状態を確認する。例えば、A1がHighの場合、D2、D3、D5、D6の何かがHighとなればA1を中心とする位置にスイッチが置かれていることになる。通電状況を専用の変数に格納し、前後の認識結果を踏まえて条件分岐させることで操作を認識している。

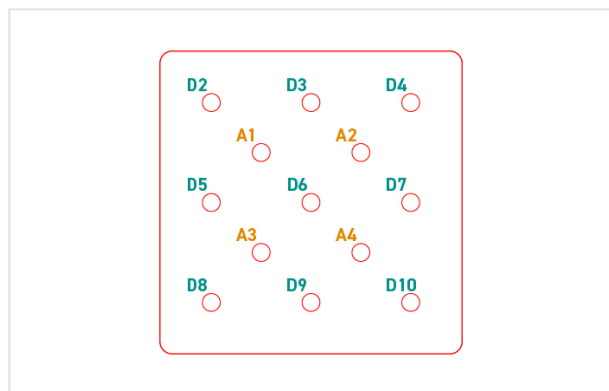


図 10 マイコンとの配線関係

4.3 スイッチ内蔵型デバイス

スイッチ内蔵型デバイス(図 11)では、ボード部の磁石に配線が不要となり、スイッチ部に M5Stack Gray を利用する。M5Stack の筐体には元々磁石が内蔵されているが、それを一度取り除いて、ボード部の配置に合わせて磁石を取り付けた。操作の検出は、M5Stack に内蔵された慣性センサ(加速度/ジャイロ)を利用する。なお現時点では、スイッチ内蔵型デバイスの回転/ピボットの分類精度が不十分であり、改良が必要である。ここでは、操作の読み取りの実現可能性などを議論する。

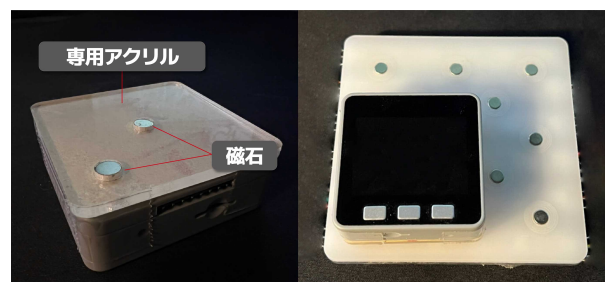


図 11 スイッチ内蔵型デバイス

4.3.1 機構

スイッチ内蔵型は 4.1 章で説明した設計に加え、スイッチ部に M5Stack Gray を取り付ける。ボード部にはマイコンを取り付ける必要が無いため、磁石の埋め込まれたアクリル板があればボードの役割を果たし、操作が行える。

4.3.2 操作のセンシング

M5Stack Gray には加速度・ジャイロセンサを内蔵した MPU6886 モジュール、磁気センサとして BMM150 モジュールが内蔵されており、これらの 9 軸 IMU を使用して操作の判定を行う。また、今回は ArduinoIDE のシリアルプロッタ機能を使ってグラフを表示し、センシングの値と 3 つの操作をどのように判別できるかを検証する。操作を検証した結果、ジャイロセンサと磁気センサを使用することで操作を認識できる可能性があるかと判断した。その理由を次に記す。

ジャイロセンサ

図 12 は、回転と押す操作をした時のジャイロセンサのグラフである。時計回りに回転した場合、ジャイロセンサの Z 軸の値が大きく下がり、反時計回りの場合は Z 軸の値が大きく上昇している(図 12)。

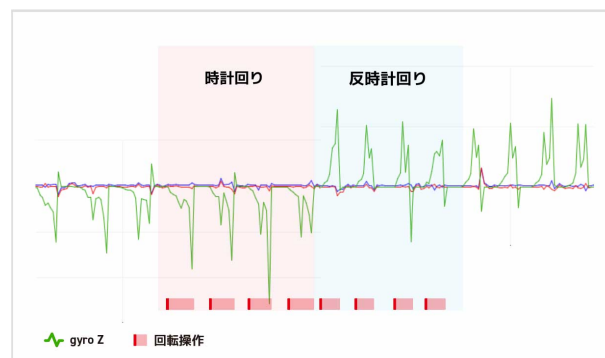


図 12 回転操作によるジャイロセンサの波形

磁気センサ

ここでは回転・ピボット操作を行った時に現れる磁気センサのデータの傾向を紹介する。まず、一つの場所で回転操作を行った場合、センサデータの分布は全て異なっていた。一方、同じ場所を基準にピボット操作を行った場合、センサデータの分布は概ね類似する傾向にあった。すなわち、図 13 に示すように、ある位置から一段階の回転/ピ

ポット操作を行った場合、磁気センサの分布が異なってくる。このようにして、ジャイロセンサの変化をトリガーとしつつ、磁気センサを用いて回転／ピボット操作を切り分けることができると考えた。

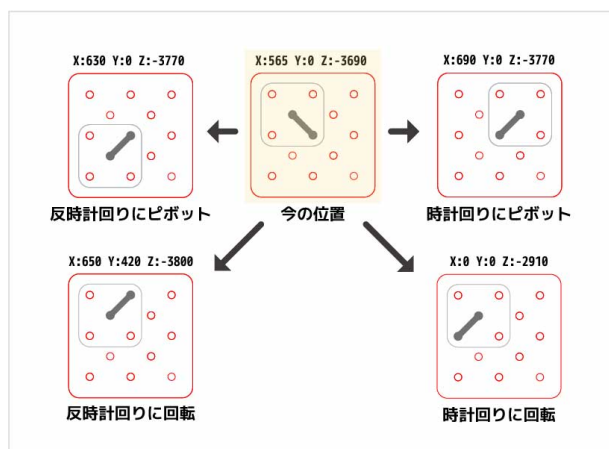


図 13 磁気センサデータによる回転／ピボット操作の切り分け

5. 応用例

ここでは、本研究で提案するデバイスを用いた応用例を構築する。センシング方式はボード内蔵型を使用した。

5.1 照明制御

本デバイスで照明等を制御する例を想定し、フルカラー LED の点灯色や明るさをスイッチによって切り換える応用例を試作した。図 14 は操作のフィードバックをフルカラー LED で表現している。

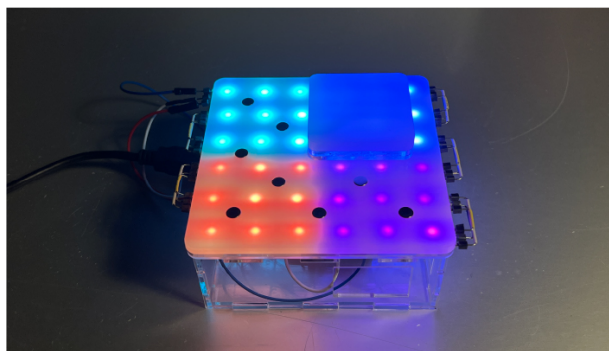


図 14 フルカラー LED マトリクスを内蔵した応用例の外観

5.1.1 実装

ボードの下に LED テープが貼られたアクリル板を取り付ける。このアクリル板にはマイコンへ配線できるようにボードと同じ位置に磁石の穴を空けている (図 15)。ボードの磁石位置に沿って LED 拡張アタッチメントを取り付け、その上に配線アタッチメントをつければ取り付け完了である。

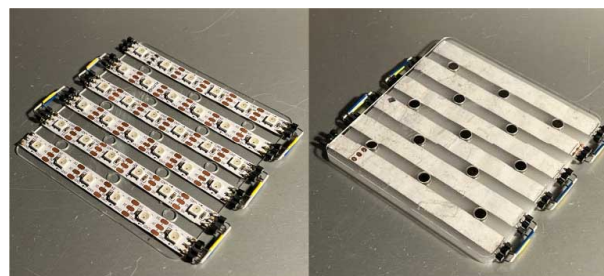


図 15 LED 拡張アタッチメントの外観。右はボードに取り付けた状態。

5.1.2 操作と機能の対応関係

回転は色の明るさを調整し (細かい値を調整するイメージ)、ピボットは移動した箇所を別の色に変える (モード切り替えのようなイメージ)、押す操作は現在の色を全ての LED に適用する視覚フィードバックを与えた。 (図 16)。

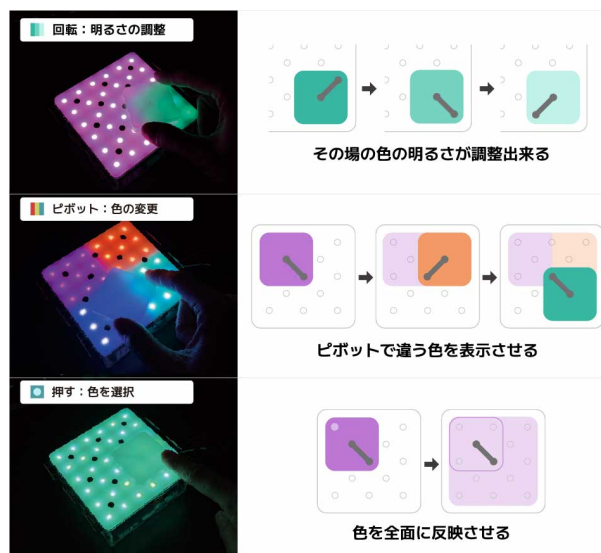


図 16 光の変化と操作の対応

5.2 音楽プレイヤーの制御

さらに、音楽プレイヤーを制御する応用例を試作した。操作と機能の対応付けについて、図 17 に示す。回転で選曲、ピボットで音量調整、押す操作で再生・停止の操作を割り当てた。Processing で音楽再生ソフトを作り、Arduino シリアル通信で操作を認識させている。

6. 評価実験

6.1 目的

本実験では、ユーザに提案デバイスを使用してもらい、操作の成功率や主観的な印象等を調査する。

6.2 手法

この評価実験では大きく 2 つに分けて行う。1 つ目にデバイス単体を操作し、操作の成功率 (またはエラー率) を調

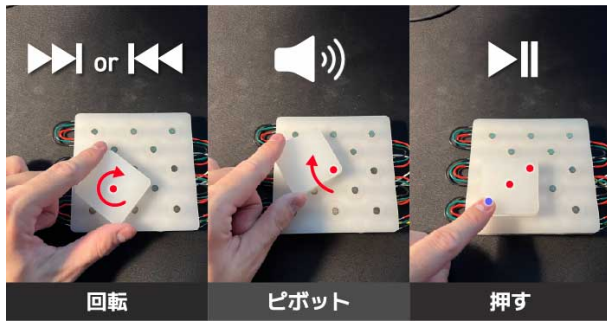


図 17 音楽ソフトウェアと操作の対応

べる．2つ目に光と音のフィードバックを加えた時のユーザの主観的な印象を評価する．評価方法は5段階のリッカート尺度で収集した．また，今回は2つのセンシング方式の中から「ボード内蔵型デバイス」を採用した．被験者は，22歳から24歳の男5人と女3人である．

6.2.1 デバイス単体の操作

デバイス操作時の物理的なミス発生率を調査する．デフォルトの位置から時計回りと反時計回りで回転・ピボットを各々8回ずつ行う．次に，押す操作を8回行い，最後に3種類の操作を連続で行ってもらう^{*4}．

6.2.2 光と音のフィードバックを加えた操作

5章の応用例より，ユーザの主観的な印象に関する評価実験を行う．光のフィードバックでは，デバイス操作と光の変化の関係性を教えてから，20秒間自由に操作してもらう．最後に，「青→赤→緑にしてください」という指示を1問だけ出題する．音のフィードバックでは，オーディオプレーヤーの応用例をデバイスで操作する．デバイス操作とソフトウェア操作の関係を教えてから，指示内容に沿ってソフトウェアを操作してもらう．

6.3 結果

結果を表1から3に示す．

6.3.1 デバイス単体の操作について

デバイスの物理的な操作ミスに関する結果を表1に示す．押操作に関しては物理的な操作ミスは発生しなかった．しかし，回転・ピボットに関しては，どちらも意図しない操作が発生した．特に，回転操作時にミスの確率が高く(11.72%)，意図しないピボットも発生してしまう事があった(4.69%)．また，このインタフェースの操作感や見た目についてのアンケート結果を表2に示す．デバイスの外観が平均5.0，操作の気持ちよさが平均4.5と高いのに対して，使いやすさは平均3.5とやや低い結果となった．

6.3.2 光と音のフィードバックを加えた操作

光・音操作時の主観評価の結果を表3に示す．「楽しさ」に関しては光・音の両方で高い評価を得ることが出来た(平均4.38)．しかし，「スムーズさ」に関しては光・音の両方

^{*4} 回転を4回，ピボットを4回，押すを1回，連続で各々時計回り，反時計回りで行うように指示した．

表 1 物理的操作ミスの発生確率 (%)

	平均 (標準偏差)
回転	11.72(1.55)
ピボット	4.69(0.71)
押す	0(0)
3 種複合	5.47(1.13)

表 2 デバイス単体操作の主観評価

	平均 (標準偏差)
操作の気持ち良さ	4.5(1.07)
デバイスの外観	5.0(0)
使いやすさ	3.5(1.07)

でやや低い評価となった(光：平均3.5，音：平均3.1)．最後に自由記述では，「光操作は何かに使えそうか」に対して，ライブの照明器具や博物館のライトアップ，おもちゃや音楽ゲームなどの候補が挙がった．「光操作の課題や気になった点はあるか」では，ピボット出来ない状態があることが挙げられた．この問題は，6.1.4 節の考察で説明する．また，「音操作の課題や気になる点はあるか」では，「体験としてはとても楽しいが，機能性や使い勝手に関しては普通の音楽プレーヤーの方が使いやすい．」という意見や，「ピボットの仕様上，スムーズに曲変更できないためそこを改善してほしい」などの意見があった．

表 3 光・音操作時の主観評価

	平均 (標準偏差)
光操作の楽しさ	4.38(1.06)
音操作の楽しさ	4.38(0.74)
光操作のスムーズさ	3.5(1.07)
音操作のスムーズさ	3.1(1.2)

6.4 考察

ここでは，上記の結果からデバイスの操作性の問題や展望を考察する．

6.4.1 物理的な操作ミスの原因

本デバイスの操作実験では意図しない操作がいくつか発生した．スイッチ裏側にある2つの磁石が原因であると考えられる．その理由として，磁石の配置は非対称なため，力の入れ具合によっては回転を試みた際にスイッチ外側の磁石が軸となり，ピボットが発生してしまう．同様に，ピボットを行いたい場合も力の入れ具合で回転になってしまうことがある(図18)．

図18の1の場面は，回転する際の一般的なスイッチの持ち方を示し，磁石の位置は赤い点で印を付けた．図18の2は，回転を行う際に意図しないピボットが起きてしまう様子を示した図である．本来であれば，人差し指と親指が力点となり，スイッチ中央の磁石が支点となって，正しい回転操作をすることができる．一方，親指に力が入っていないと，支点がスイッチ端の磁石になってしまうため，図18

の3の様に意図しないピボットが発生してしまう。ピボット操作をより柔軟に行うためには、スイッチ部分に工夫を施す必要がありそうだ。例えば、現在のスイッチの仕様では2つの磁石が非対称に埋め込まれている。磁石の個数を5個にし、中央と四隅に磁石を埋め込むことで、どのポジションからでもピボットが出来るようにするなどの案が挙げられる。

6.4.2 主観的な操作感について

押す操作に関しては、ピボットと回転のような似た操作が他に無いため操作ミスは殆ど起きなかった。また、楽しさや気持ち良さを問うアンケートでは全体的に高い評価を得ることが出来た。自由記述で得られた意見も踏まえると、このデバイスを操作した時に発生する「カチッ」といった磁石の吸いつきや音が、主観的な操作感に関する高評価につながったと考えている。

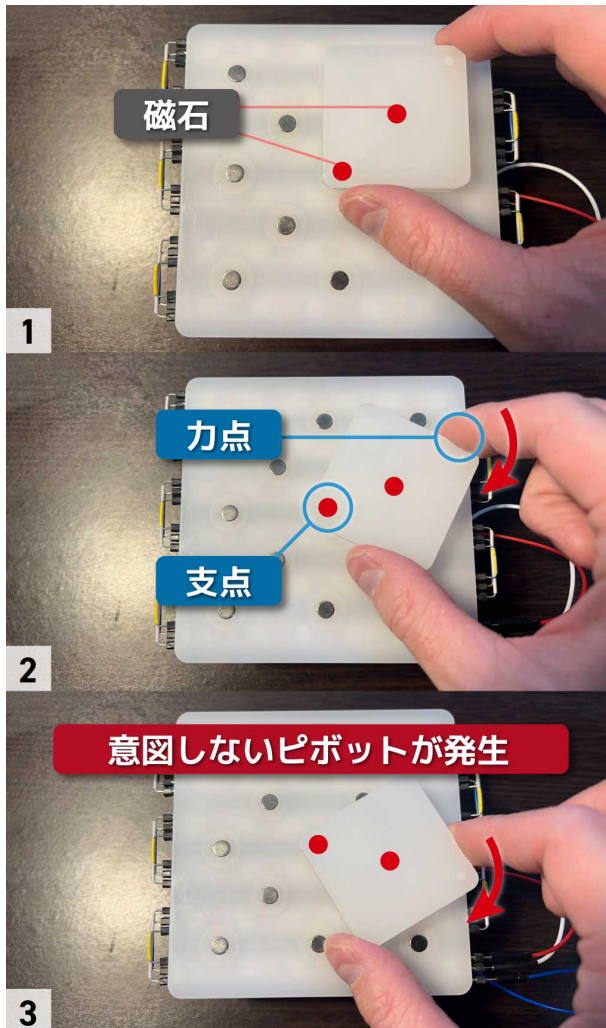


図 18 意図しない操作が発生する原因

7. 議論

ボード内蔵型では、スイッチ部に2つの磁石を埋め込み、導線を張って通電させることで操作を認識させていた。し

かし、回転やピボットをする際、細かい動きで通電が不安定となり、誤認識してしまうことがあったため、筐体やプログラムに工夫を施す必要があると考えられる。また、今回はスイッチ内蔵型の実装が不完全な状態であり、改良が必要である。操作のセンシングとスイッチ内蔵型を使った応用例についても調査し、マグネットを使った新たな入力デバイスの可能性を探っていきたい。

8. おわりに

本研究では、アクリル板に磁石を埋め込み、スイッチ部とボード部からなるデバイスを提案した。このデバイスでは、スイッチ部中央の磁石を軸にした回転操作。スイッチ部端の磁石を軸にしたピボット操作。押す操作。この3つの操作を取り入れた。また、ボード部にマイコンを内蔵する「ボード内蔵型デバイス」と、スイッチ部にマイコンを内蔵する「スイッチ内蔵型デバイス」の2つの提案を行った。他にも光や音を使った操作例を提案した。また、ユーザ評価実験を通じて、意図しない操作の発生確率やユーザの体感などを調査した。現状の設計では意図しない操作が発生してしまうが、気持ち良さや楽しさについては高い評価を得た。検証の結果、今回の実験で磁石によるフィードバックがユーザに「楽しい」や「気持ち良い」と感じさせている事を確認し、光や音を組み合わせた応用例でもその効果が確認できた。自由記述のアンケートでも、エンターテインメント系(VJや音楽ゲームなど)でのアプローチで使用する方が効果的ではないかとの記述が多かった。今後は、意図しない操作を発生させない方法や、操作を誤認識させない機構の設計を考えたい。また、スイッチ内蔵型の実装が不完全なので、改良を進めていく。また、磁石の配置や磁力を変える事で操作にどのような影響を与えるのかなども追及したい。

参考文献

- [1] 宮武陽子, 椎尾一郎. FieldSweep: 永久磁石の配列とスマートフォン磁気センサを用いた二次元トラッキング手法, WISS2020 予稿集, p73-78(2020).
- [2] Clement Zheng, Jeeun Kim, Daniel Leithinger, Mark D. Gross, Ellen Yi Luen Do. Mechamagnets: Designing and Fabricating Haptic and Functional Physical Inputs with Embedded Magnets. TEI '19: Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, p325-334(2019).
- [3] Masa Ogata. Magneto-Haptics: Embedding Magnetic Force Feedback for Physical Interactions. UIST '18: Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, p737-743(2018).
- [4] Masa Ogata, Masaaki Fukumoto. FluxPaper: Reinventing Paper with Dynamic Actuation Powered by Magnetic Flux. CHI '15: Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems. p29-38(2015).
- [5] Hayato Dogai, Maho Oki, and Koji Tsukada. Tool-Shaker: Presentation Technique for “as-is” Display

- of Daily Commodities. In Proceedings of the 9th Augmented Human International Conference (AH ' 18). Article 44, 3 pages, 2018.
- [6] Masayuki Orihara and Koji Tsukada. PartsSweeper: interactive workbench to casually organize electronic parts and tools. In Proceedings of the 2019 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2019 ACM International Symposium on Wearable Computers (UbiComp/ISWC ' 19). pp.339-341, 2019.
- [7] Toshiyuki Masui, Koji Tsukada and Itiro Siio: MouseField: A Simple and Versatile Input Device for Ubiquitous Computing, Proceedings of UbiComp2004, Springer LNCS3205, pp.319-328(2004).
- [8] Jun Rekimoto, Brygg Ullmer, Haruo Oba. DataTiles: a modular platform for mixed physical and graphical interactions. CHI'01:Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 01 March 2001, p.269-276.
- [9] Masa Ogata, Yuta Sugiura, Yasutoshi Makino, Masahiko Inami, and Michita Imai, SenSkin: adapting skin as a soft interface, In Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST ' 13), ACM, 539-544, October 08 – 11, 2013, St Andrews, UK.
- [10] Kaori Ikematsu, Masaaki Fukumoto, and Itiro Siio. 2019. Ohmic-Sticker: Force-to-Motion Type Input Device that Extends Capacitive Touch Surface. In Proceedings of the 32nd Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST' 19). ACM, New York, NY, USA, pp. 1021-1030.