WISS 2022

# TetraForce: スマートフォンの表裏両面に対する垂直・剪断方向の力を 入力可能な磁気式インタフェース

土田 太一<sup>\*</sup> 藤田 和之<sup>\*</sup> 池松 香<sup>\*†</sup> Sayan Sarcar<sup>‡</sup> 高嶋 和毅<sup>\*</sup> 北村 喜文<sup>\*</sup>

概要. スマートフォンの2つの面(タッチ面と背面)に対する2種類の方向(垂直方向と剪断方向)の力 による入力を可能にするスマートフォンケース型の磁気式ユーザインタフェース"TetraForce"を提案する. 本インタフェースの背面には、3 DoF で可動するパネルが搭載されている. このパネルには磁石が取り付 けられており、その変位をスマートフォン内蔵の地磁気センサ(および加速度センサとジャイロセンサ)に より推定することで力による入力の検出を実現する. 本インタフェースのプロトタイプを用いたユーザス タディ(N=12)の結果、ユーザによる4種類の入力が平均97.4 %の精度で意図通りに検出できることを確 認した. また、本インタフェースを用いたアプリケーションを複数実装し、その有用性を議論した.

## 1 はじめに

タッチ入力は、スマートフォンやタブレット等の スマートデバイスにおける主要な入力手段である. 一方で、入力に利用できる情報は2次元座標のみ であることから、入力語彙の乏しさの問題がたびた び指摘されてきた.これに対し、入力語彙を拡張す るための研究が盛んにがなされており、その1つに 「力」の活用が挙げられる.力は、タッチと同様に 指で容易に入力でき、大きさと方向によるベクトル 情報を持つことから、力を用いて入力語彙を拡張す るユーザインタフェースが数多く開発された.

カを入力可能とする既存インタフェースは,表1 に例示するように,力の印加方向(垂直・剪断方向) と力の印加対象(タッチ面・それ以外)の組み合わ せによる4つに大きく分類することができる.こ れらの力の印加方向と印加対象の違いは,異なるメ タファや操作性を提供しうるが,それらはこれまで 個別に検討されてきており,それぞれ個別の機構が 必要であった.4種類の力による入力を単一の機構 で実現できれば,デバイスの付替えを必要とせず, 豊富な入力語彙を提供できる汎用的なユーザインタ フェースになり得る.

| 表 1. 力 | を入力可能とす | る既存インタフ | 'ェースの代表例 |
|--------|---------|---------|----------|
|--------|---------|---------|----------|

|      | 垂直方向                | 剪断方向                  |  |  |  |  |
|------|---------------------|-----------------------|--|--|--|--|
| -    | GraspZoom[11],      | Harrison et al.[5],   |  |  |  |  |
| タッチ面 | Suzuki et al.[12]   | ShearSheet[8]         |  |  |  |  |
|      | Force gestures[6]   |                       |  |  |  |  |
| 背面   | Besançon et al.[2], | Xial et al.[15], Cam- |  |  |  |  |
|      | BackXPress[4]       | TrackPoint[16]        |  |  |  |  |

Copyright is held by the author(s).

<sup>‡</sup> Birmingham City University

そこで本研究では、印加対象面と印加方向の組み 合わせによる4種類の力による入力を1つの機構で 実現可能なスマートフォンケース型の磁気式インタ フェース "TetraForce"を提案する. TetraForce は 3 DoFで可動するパネルを持ち、パネルの表面に磁 石を搭載する. この機構をスマートフォンの背面部 分に装着し,パネルの変位方向(垂直・剪断方向)お よび変位量をスマートフォン内蔵の磁気センサを用 いて推定する.また、ユーザがスマートフォンを把 持している場合,タッチ面・背面のいずれの面に力を 加えてもパネルは変位する. この性質を用い、タッ チ入力判定の有無により力の印加される面(タッチ 面・背面)を区別する、以上に述べた実装により、4 種類の入力を外部電源なしに実現できる.また,力 の入力時には弾性フィードバックが得られるため, より正確な入力操作に寄与する [17] と期待できる.

本稿では、TetraForce の設計とプロトタイプの 実装,及びその性能を調べるユーザスタディについ て述べ,最後にアプリケーション例を紹介する.な お,本稿は ACM ISS 2022 で発表した内容 [14] に, アプリケーションの実装例とハードウェアの改良を 追記したものである.

## 2 TetraForce

TetraForce は、スマートフォンの背面で 3DoF で 可動するパネル部と、そのパネル部の動きをトラッ キングするための磁気センシングにより、4 種類の 入力を単一の機構で実現するインタフェースである. 以下では、本インタフェースのプロトタイプ実装に ついて述べる.なお、本インタフェースが実現する4 種類の入力を、以降では図1に示すように定義する.

<sup>\*</sup> 東北大学

<sup>†</sup> ヤフー株式会社



#### 2.1 ハードウェア実装

(a) 背面

図2にプロトタイプの概観を示す.この実装には Google Pixel 2を用いているが,他の数種類のス マートフォンでも同様に動作する見込みがあること を確認している.

パネル部

ケース部

(c) 内部構造

図 2. プロトタイプ実装の概観

(b) 側面

3 mm 3 mm

本インタフェースは、スマートフォンに取り付け るケース部と、それと複数のバネで接続された可動 のパネル部からなる.ケース部は FDM 方式の 3D プリンタで PLA フィラメントを使用し印刷したも ので、市販のスマートフォンケースと同様の形状で ある.パネル部は同様の素材による長方形の板であ る.パネル部は、スマートフォンのカメラを覆わな い位置及びサイズとした.このパネル部をユーザに よる力の印加に応じて 3 DoF で可動とするため、パ ネル部とケース部との間には平面バネと押しバネの 2 種類を組み合わせたものを 5 箇所(パネル部の四 隅と中央)に配置する. 平面バネはケース部及びパ ネル部と同様に 3D プリンタ製で,外周部分を接着 剤でケース部に固定してある. 作成した平面バネは 方向によってわずかに可動域が異なっていたため,5 つの平面バネをそれぞれ異なる向きに配置すること でバランスをとった.また,市販の押しバネの一端 をこの平面バネにあるくぼみに,他端をパネル裏面 にある同サイズのくぼみにはめ込み,接着剤で固定 した.

パネル部表面上には、ネオジム磁石を接着剤で取 り付けた.磁石の位置は、予備検討により磁気セン サの値が得られやすい位置として決定した(磁気セ ンサの位置から一定距離離すことで磁気ベクトルの 変化が読み取れるようであった).

入力可能な力の最大値に関して,言及のあった先 行研究 [7,4,12] を参考にし,かつ実装時点で購入 可能であったバネを複数検討し,押圧力入力の際に は約12.5 N,剪断力入力の際には約13.0 Nとした. この力の大きさは,異なるバネ定数のバネや異なる 可動域を持つ平面バネで置き換えることで調整が可 能である.

#### 2.2 ソフトウェア実装

ソフトウェアの実装として,以下ではキャリブレー ション,4種類の入力の識別,押圧力・剪断力それ ぞれの推定アルゴリズムについて順に述べる.

**キャリブレーション** 磁気センサで取得される値は 地磁気の影響を受けるため,力の入力の推定前にそ の影響を取り除くためのキャリブレーションが必要 である.キャリブレーションでは,本インタフェー スをスマートフォンから一旦取り外し,十分に距離 を取った状態で取得した磁気ベクトルを地磁気ベク トルとして保存する.後述の推定アルゴリズムでは, 保存した地磁気ベクトルを測定値から差し引いて使 用する.

4 つの入力タイプの識別 力の印加面(タッチ面・背 面)の識別は、タッチパネルへのタッチ入力が検出さ れているかどうかで行う.すなわち、タッチを伴う 入力であれば FoS、タッチを伴わない入力であれば FwC として扱う.剪断力と押圧力は後述する個々の アルゴリズムで認識され、同時の認識も可能である.

**剪断力の推定** 剪断力の推定のため,先行研究[1]の 4章を参考に,パネルの水平方向の変位を算出する アルゴリズムを実装した.すなわち,磁気センサで 得られた磁気ベクトルの値から,キャリブレーショ ンで得られた地磁気ベクトルを差し引いた値を磁石 の磁気として用い,磁石までの距離および2次元位 置を理論式を用いて求めることで剪断力の方向と強 さを推定する. 押圧力の推定 押圧力の推定方法として、当初は剪断 力と同様の理論的なアプローチを検討したが、出力 の次元が増え計算量が膨大になることから,機械学 習のアプローチを採用した. すなわち, 押圧力の入力 がなされているか否かの確率を, Sigmoid 関数を活 性化関数に用いて出力するニューラルネットワーク モデルを構築することで、出力される確率を力の連 続量として利用できると考えた. 学習データに用い た変数はスマートフォン内蔵のセンサから得られる ものとして、3次元磁気ベクトル、3次元加速度ベク トル、加速度の大きさ、4次元角速度ベクトル、3次 元重力ベクトル、3次元回転率ベクトルを用いた. デ バイスを地面と水平の状態から±45°程度の範囲内 で前後左右に傾けながら画面中央に対して押圧力を 加えた場合 6,752 データと加えない場合 6,560 デー タ、押圧力を加えず剪断力を入力した 13,186 データ の計 26,498 データを収集した. これらのデータの うち80%を学習データ、20%をテストデータに分 割し学習を行った. モデルの精度は 98.18 %であっ た. このモデルを用いて磁石位置を推定することで、 押圧力の推定値を連続値として取得できることを確 認した.

上記のモデルを用いて概ね押圧力の推定が実現で きた一方で、スクリーンの右端や下端に対する PFoS が検出されにくいことがわかった.これは.(磁気セ ンサの位置の都合により)磁石の位置がパネルの中 央からややずれた位置にあることで、磁石から離れ た位置でのパネルの沈み込みが磁気ベクトルの変化 として反映されにくいことによるものであった. こ れを解決するため、ユーザのタッチ位置に応じた推 定値の補正を試みた.具体的には、機械学習アルゴ リズムで推定された力の大きさに、タッチ位置に応 じたゲインを掛け合わせることにより補正する.ゲ インの分布を求めるため、画面を縦 $9 \times$ 横5 = 45の エリアに分割し、それぞれを最大まで3回押したと きの押圧力の推定値の大きさを測定し、平均をとっ た. 表 2(a) は、スマートフォンの画面領域内にお ける押圧力入力の推定値(%)の分布である. ゲイン は各値の逆数で表すことができる.ただし、最右列 (幅 12.5 mm)と最下行(高さ 12.3 mm)の領域で は押圧力の検出がほぼ不可能であったため、本実装 の段階ではこれらの領域の押圧力取得を対象外とし た.この点を解決するハードウェアの改良について は6章で述べる.

#### 3 パフォーマンススタディ

実装したプロトタイプの基本的な性能評価として, ユーザによる実際のインタラクションがユーザの意 図通りに作動するかをユーザスタディを通じて調査 した.具体的には,4種類の入力(PFoS, PFwC, SFoS, SFwC)それぞれで,力を特定の強さで一定 時間加えることで画面上のコンテンツを操作するタ

#### 表 2. PFoS 入力における入力位置ごとの力の推定値の 分布

(a) 実装したプロトタイプ (b) 改良版のプロトタイプ

| 80  | 70  | 52 | 30 | 3 | 100 | 100 | 87 | 83 | 56 |        |
|-----|-----|----|----|---|-----|-----|----|----|----|--------|
| 95  | 79  | 68 | 45 | 3 | 100 | 100 | 90 | 97 | 58 |        |
| 100 | 93  | 78 | 47 | 5 | 100 | 100 | 92 | 98 | 46 | 100-81 |
| 100 | 98  | 86 | 37 | 2 | 100 | 100 | 92 | 87 | 51 | 80-61  |
| 100 | 100 | 81 | 22 | 2 | 100 | 100 | 92 | 72 | 54 | 60-41  |
| 100 | 99  | 58 | 15 | 0 | 100 | 99  | 89 | 68 | 50 | 40-21  |
| 93  | 80  | 39 | 14 | 0 | 91  | 99  | 81 | 69 | 46 | 20-1   |
| 55  | 31  | 12 | 3  | 0 | 81  | 96  | 73 | 64 | 45 | 0      |
| 22  | 5   | 0  | 0  | 0 | 57  | 65  | 51 | 42 | 41 |        |

スクを実験参加者に行ってもらい,その入力成功率 を測定した.

#### 3.1 実験参加者

実験参加者は12名(男性10名,女性2名,平均 年齢22.3歳,SD=1.23,右利き10名)の大学生で あった.COVID-19に関する規制により外部の参加 者の募集が困難であったため、参加者のうち8名は 本研究についてある程度の知識があり3名は実際に デバイスを使用した経験があったが、実験タスクで 用いられたコンテンツの使用は初めてであった.参 加者には謝礼(大学の規定に基づき学年により異な る額、約1,000円)が支払われた.

#### 3.2 実験環境

実験には、Android(バージョン11)を搭載する Google Pixel 2(解像度: 1920 × 1080, ディスプ レイ: 110.7 mm × 62.3 mm)に、TetraForce の プロトタイプを取り付けて用いた.実験ソフトウェ アは Unity(バージョン 2020.3.2f1)で実装し、プ ログラムは C#で記述した.なお、毎回の実験開始 前には、2.2 章に記載したキャリブレーションを予 め実施した.

#### 3.3 タスクデザイン

実験タスクは、4種類の入力それぞれについて、 特定の強さの力を一定時間入力してもらうものとし た.タスクは先行研究 [13, 10] に倣い、力の強さに 応じて1次元方向に動く画面上のバーをインジケー タの4段階のターゲットエリアのうちのいずれかに 1秒間収めることができた場合にタスク成功とし、 入力開始後にバーがターゲットエリア外にある状態 で1秒間以上経過した場合には失敗とした.4種類 の入力に関するタスクごとに、全試行に占める成功 試行の割合である成功率を測定した.

4種類の入力それぞれに関する4つのタスクで提示された実際の画面例を図3に示す.ターゲットと

WISS 2022



3. 力の強さに応じてバーが移動する

4. バーをターゲットエリアに1秒間収めると次の試行へ移る

. ハーをターククトエクアに1秒間収めると火の試行へ後る

図 3.4 つのタスクで提示される画面と手順

なる力の強さは4段階(Lv. 0-3)とし、インジケー タにより表現された.このエリアの割り振りは先行 研究[3]を参考に決定した.具体的には、押圧力では 12.5 N, 剪断力では 13.0 N を最大とし、Lv. 0 で は 0-10 %, Lv. 1 では 10-40 %, Lv. 2 では 40-70 %, Lv. 3 では 70-100 %となるようマッピングし た. PFoS タスクでは、押圧力を印加する際のタッ チ位置は3×3=9つのエリア(2.2に述べた,入 力が困難な領域は除外)からランダムに指示した. 一方で, PFwC タスクでは押圧力の印加位置を特に 指示しなかった. SFoS と SFwC タスクでは、上下 左右斜めの8方向の剪断力の入力をランダムに指示 した、参加者には、タスクごとにスマートフォンの 持ち方をあらかじめ提示した.具体的には、FoSの タスク2種類ではスマートフォンを縦向きにし、利 き手で持ち親指でタッチ操作してもらうようにした. FwCのタスク2種類では横向きにして両手で持ち, 親指が前面に、その他の指が背面側にあるような把 持姿勢とした.

#### 3.4 実験手順

実験は4種類の入力に対応する4つのタスクに分かれていた.タスク内容について参加者の混乱がないよう,全参加者に共通して,よりシンプルなタスク内容である押圧力のタスク2種(PFoSとPFwC)を実施後,剪断力のタスク2種(SFoSとSFwC)を実施した.ただし,押圧力のタスク内,剪断力のタスク内での2種のタスクの提示順序は参加者間でランダムとした.

各タスクでは、実験者からの説明の後、参加者は 練習タスクと計測を伴う本タスクを行った.練習タ スクでは、本番タスクと同様のタスクを操作に慣れ るまで数分程度行ってもらった.練習タスク・本タ スク中、各試行が完了した際には画面に「指を離し てください」というメッセージが表示され、その2 秒後に次の試行が自動的に開始された.前半2タス クが終了した時点で、参加者は必要に応じて数分の 休憩をとった.全4タスクが終了した時点で実験は 終了した.実験全体の所要時間は参加者によってば らつきが大きかったが、いずれの参加者も50分以 内で実験を終了した.

#### **3.5** 結果と考察



#### · · · · · · · ·

#### 図 4. 各タスクにおける入力成功率 (%). 括弧内は標準 偏差を示す. 各エリアは力が加えられた (a) 位置 または (b)(c) 方向を示している.

実験の結果,全試行での平均入力成功率は97.4 % であった.タスクごとに見ると,入力成功率はPFoS では99.0 % (SD = 1.28), PFwC では97.7 % (SD= 3.03), SFoS では94.0 % (SD = 4.58), SFwC では99.0 % (SD = 1.34) であった. これらの成功 率は,例えば PFoS について類似タスクを実施した 先行研究 [10, 13] と同程度の高さであり,提案イン タフェースのプロトタイプは4つの入力を十分な精 度で取得可能であるといえる.

図4に、力の印加位置が1通りであった PFwC タスク以外の3タスクにおける印加位置や方向ごと の入力成功率を示す. PFoSの結果(図4(a))に関 して、スクリーンの右側エリア3,6,9ではエラーが 比較的多く見られたことがわかる.これは、タッチ TetraForce: スマートフォンの表裏両面に対する垂直・剪断方向の力を入力可能な磁気式インタフェース

エリアに応じた推定圧力値の違いが影響したと考え られる.すなわち,2.2節に述べたように,当該エ リアでは取得される圧力の推定値が特に小さく(表 2(a)),これを補正するためのゲインが大きく設定 されている影響で,ユーザの意図しないバーの動き があり操作が難しくなったと考えられる.

SFoS の結果(図 4(b))に関して,画面左側への 入力(方向 6, 7, 8,平均 99.5%)に比べて画面右 側への入力(方向 2, 3, 4,平均 89.6%)の入力成 功率が低くなった.SFwCの結果(4(c))では,ス マートフォンを横向きに把持した状態での下方向へ の入力(方向 6, 7, 8)でのみエラーが見られた.こ れらの印加方向による成功率の差異は,運動学的に, それらの方向への入力が右手では難しかったからで はないかと考えられる(剪断力の入力しやすい方向 を調べた研究は我々の知る限り無い).これについ ては参加者を増やすことや左利きのユーザにもテス トしてもらうことで,明らかにできる可能性がある.

## 4 ハードウェアの改良



図 5. 改良版のプロトタイプ実装の概観

実装したプロトタイプの大きな制限である,画面 右または下のエリアで押圧力をほとんど検出できな い点を解消するため,図5に示すように,パネル部の 不均一な沈み込みを発生しにくくする新たなプロト タイプを試作した.この実装は,パネル部のサイズ や用いた磁石は元のプロトタイプと同様である(図 5(a))が,ケース部とパネル部の間に,キーボード 等の機構を参考にした,パンタグラフ構造の3Dプ リントパーツを新たに搭載している(図5(b)).押 圧力によるたわみを防ぐため,ケース部以外のパー ツには基本素材としてOnyx(マイクロ炭素繊維充填 ナイロン)を使用した上,パネル部とパンタグラフ 構造および平面バネには強化素材としてFiberglass を使用して,FDM方式の3Dプリンタで印刷した. パンタグラフ構造は、2つの枠状のパーツとそれら を支える上面・下面の板から成り立っており、2つの 枠状パーツが交差することによりパネル部全体が沈 み込むように可動する(図5(d)).パネル部の適度 な押圧力による沈み込みを実現するため、押しバネ 1つが上面・下面の板の間を支えている.また、こ のパンタグラフ構造自体とケース部との間には、図 5(c) に示すような、平面バネを2つ埋め込んだ長方 形の板を挿入することで、剪断方向の可動を実現さ せた. 平面バネはそれぞれの渦の回転方向を互い違 いにすることで、可動域のバランスをとった. 平面 バネそれぞれの中央をケース部に、平面バネ以外の 周辺部をパンタグラフの下面に接着した.なお.入 力可能な力の最大値に関して、パフォーマンススタ ディでは必要な力が大きすぎるというコメントが複 数得られたことから、本実装では押圧力では約 7.7 N, 剪断力では約 7.5 N を最大とした.

このデバイスを用いて,2.2節で述べたものと同 様の方法で PFoS 入力における入力位置ごとの推定 値の分布を測定した.表2(b) はその分布表である. 提案インタフェースでの分布である表2(a) と比較す ると,全体として分布の偏りに改善が見られた.特 に,元のプロトタイプでは入力を検出できなかった 画面右側と画面下側では,ゲインの設定は未だに必 要ではあるものの,検出が可能となったと言える.

## 5 アプリケーション例

本章では、TetraForce の利点や応用場面につい て議論を促したワークショップ(N=12)の結果[14] をもとに筆者らが実装したアプリケーション例を、 ワークショップ参加者が述べた使用上の利点ととも に紹介する.なお、図6に、各アプリケーションの 画面例と、表3に入力のマッピング例を示す.

1人称視点シューティング (FPS) ゲーム 実装例を 図6(a) に示す. PFoS の入力を連射アクションに 割り当てることで,タップでの武器の発射アクショ ンとのシームレスな切り替えが可能となる. PFwC には、ボイスチャット開始操作のジェスチャを割り 当てることで、ゲームのコンテキストに関わらず操 作を実行できる.また、前進や後退等の移動操作は 従来、画面上のジョイスティック UI のドラッグによ り実現することが多かったが、この操作に SFoS を 割り当てることで、ユーザは UI の位置を視認する 必要なく、力覚フィードバックから移動速度を調節 できる.加えて、必要に応じて PFwC での操作に よって画面を指で遮蔽しない視点操作が可能となる.

**動画プレイヤ** 実装例を図6(b)に示す. PFoS や PFwC をジェスチャ入力に割り当てることで,動画 のコンテンツを UI や指で遮蔽することなく操作を 完了できる. SFoS での音量調節はボタンでの操作に

#### WISS 2022



(a) FPSゲーム

(b) 動画プレイヤ

(c) Webブラウザ

(d) 3Dモデルビューワ

図 6. アプリケーションの実装例

|      | FPS ゲーム     | 動画プレイヤ        | Web ブラウザ    | 3D モデルビューワ            |
|------|-------------|---------------|-------------|-----------------------|
| PFoS | 武器の連射       | お気に入り登録       | ブックマーク      | 縮小                    |
| PFwC | ボイスチャットを開始  | 再生・一時停止       | スクリーンショット撮影 | 拡大                    |
| SFoS | アバターを移動     | 音量調整 (上下)     | スクロール (上下)  | カメラの回転<br>(パン,チルト)    |
| SFwC | 視点操作 (ロール軸) | 早送り・巻き戻し (左右) | タブ切替 (左右)   | モデルの回転<br>(ヨー, ピッチ方向) |

表 3. 各アプリケーションでの入力と操作のマッピング例

比べて入力位置によらない操作によって実現できる ほか,直感的に連続量の調節が可能である.SFwC によって,指で画面を遮蔽せずに早送りや巻き戻し の操作が可能となる.

Web ブラウザ 実装例を図6(c)に示す. PFoS や PFwC をジェスチャ入力に割り当てることでスク リーンスペースを削減できる. SFoS をスクロール 操作に割り当てることで,従来のフリック入力より も操作回数の少ない操作が可能になる.また,タブ の切替は,従来2タップ以上を要するが,SFwC に 割り当てることで1回の操作による発動が可能に なる.

**3D モデルビューワ** 実装例を図 6 (d) に示す. 画 面に対する奥行き方向の移動(縮小・拡大)操作を それぞれ PFoS と PFwC に,剪断方向の移動操作 を PFoS に,モデルの回転操作を SFwC にそれぞれ 割り当てることで従来は操作モードの切り替えが必 要であった複数の操作をシームレスに使用できる.

# 6 制限と今後の展望

実験の結果から、本インタフェースを用いて4種 類の入力を実用的な精度で実現できることが明らか になったが、実験で試行した条件以外にも、スマー トフォンの機種やサイズ、使用する際の向き、把持 姿勢、利き手など、様々な変数が考えられ、今後調 査する必要がある.また、加えた力がどの程度正確 に認識されているかといった厳密な意味での性能評 価はしておらず、これも今後の課題である.加えて、 本プロトタイプの厚み(磁石を除き14 mm)は市販 の多くのスマートフォンケースよりも厚く,ユーザ ビリティに影響する可能性がある.今後はケースの 薄型化と合わせてその影響を調査する必要がある.

別の観点として、地磁気(ユーザの物理的な位置) の影響が挙げられる.予備的なテストでは、磁気セ ンサのキャリブレーション後に約500m移動したと ころ、それによる地磁気の影響は無視できる程度で あったが、より大きな移動では問題になる可能性が あり、さらなる調査やキャリブレーションの簡素化 が必要である.加えて、スマートフォンが強く揺れ る場面(例:ポケットの中にある場合や電車内での 使用中)や磁性体オブジェクト(例:指輪などの金 属製品やイヤホンなどの電化製品)の接近による誤 作動の有無やその回避方法についても調べる必要が ある. また, 本プロトタイプで用いたスマートフォ ン (Google Pixel 2) 以外で用いる場合, 磁石の位 置の変更が必要になる可能性がある.このため、今 後はユーザ自身が磁石をスライドさせながら適切な 設置位置を見つけられるようなキャリブレーション ソフトウェアを開発したい.

また,先行研究 [9] でも指摘されているように, 磁石を付加するインタフェースは,地図アプリの方 位磁針といった磁気センサの値を用いる他のアプリ ケーションの挙動に影響を与えるため,同時に利用 できないという制約がある.加えて,磁気を活用す る製品への影響も存在する.磁石を使った一般的な アクセサリ (例: MagSafe アクセサリ) と同様に,磁 気カードや無線給電機器への干渉に注意して使用す る必要がある.これらの影響を調べることも今後の 課題である.

### 7 謝辞

本研究は JSPS 科研費 21H03473 の助成を受けた ものである.

# 参考文献

- T. Abe, B. Shizuki, and J. Tanaka. Input techniques to the surface around a smartphone using a magnet attached on a stylus. In *Proceedings* of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp. 2395–2402, 2016.
- [2] L. Besançon, M. Ammi, and T. Isenberg. Pressure-based gain factor control for mobile 3D interaction using locally-coupled devices. In Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1831– 1842, 2017.
- [3] C. Corsten. Use the force: how force touch improves input on handheld touchscreens. PhD thesis, RWTH Aachen University, 2020.
- [4] C. Corsten, B. Daehlmann, S. Voelker, and J. Borchers. BackXPress: Using back-of-device finger pressure to augment touchscreen input on smartphones. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 4654–4666, 2017.
- [5] C. Harrison and S. Hudson. Using shear as a supplemental two-dimensional input channel for rich touchscreen interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 3149–3152, 2012.
- [6] S. Heo and G. Lee. Force gestures: augmenting touch screen gestures with normal and tangential forces. In Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 621–626, 2011.
- [7] S. Heo and G. Lee. ForceDrag: using pressure as a touch input modifier. In *Proceedings of* the 24th Australian Computer-Human Interaction Conference, pp. 204–207, 2012.
- [8] M. Huang, K. Fujita, K. Takashima, T. Tsuchida, H. Manabe, and Y. Kitamura. Shearsheet: Low-cost shear force input with elastic feedback for augmenting touch interaction. In *Proceedings of the 2019* ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, pp. 77–87, 2019.

- [9] S. Hwang, M. Ahn, and K.-y. Wohn. MagGetz: customizable passive tangible controllers on and around conventional mobile devices. In Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 411–416, 2013.
- [10] S. Hwang, A. Bianchi, and K.-y. Wohn. Vib-Press: estimating pressure input using vibration absorption on mobile devices. In *Proceedings* of the 15th international conference on Humancomputer interaction with mobile devices and services, pp. 31–34, 2013.
- [11] T. Miyaki and J. Rekimoto. GraspZoom: zooming and scrolling control model for single-handed mobile interaction. In Proceedings of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, pp. 1–4, 2009.
- [12] K. Suzuki, R. Sakamoto, D. Sakamoto, and T. Ono. Pressure-sensitive zooming-out interfaces for one-handed mobile interaction. In Proceedings of the 20th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, pp. 1–8, 2018.
- [13] R. Takada, T. Ando, B. Shizuki, and S. Takahashi. BaroTouch: A Technique for Touch Force Sensing Using a Waterproof Device's Built-in Barometer. *Journal of Information Processing*, 27:106–115, 2019.
- [14] T. Tsuchida, K. Fujita, K. Ikematsu, S. Sarcar, K. Takashima, and Y. Kitamura. TetraForce: A Magnetic-Based Interface Enabling Pressure Force and Shear Force Input Applied to Front and Back of a Smartphone. *Proceedings* of the ACM on Human-Computer Interaction, 6(ISS):185–206, Nov. 2022.
- [15] R. Xiao, G. Laput, and C. Harrison. Expanding the input expressivity of smartwatches with mechanical pan, twist, tilt and click. In *Proceedings* of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 193–196, 2014.
- [16] W. Yamada, H. Manabe, and D. Ikeda. Cam-TrackPoint: Camera-based pointing stick using transmitted light through finger. In *Proceedings* of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 313–320, 2018.
- [17] S. Zhai. User performance in relation to 3D input device design. ACM Siggraph Computer Graphics, 32(4):50–54, 1998.