

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

磁石付きスタイラスを用いる
携帯情報端末向け入力手法

阿部 哲也

修士（工学）

（コンピュータサイエンス専攻）

指導教員 志築 文太郎

2017年3月

概要

磁石付きスタイラスを用いる携帯情報端末向け入力手法を示す。本手法では、ユーザはスマートフォン、スマートウォッチ、タブレット端末（以下、携帯情報端末とする）の周囲の平面に対して、磁石付きスタイラスを用いて入力を行う。すなわち、本手法は携帯情報端末に対して入力を行うための領域を画面外へと拡張する。ユーザは本手法を用いることにより、計算機に対してペンタブレットを用いて入力する時と似た方法にて、携帯情報端末に対して入力を行うことができる。本手法は、携帯情報端末に搭載された磁気センサ 1 個のみを用いてリアルタイムにスタイラスの 2 次元座標を推定する。したがって、本手法には携帯情報端末に対して追加のセンサを取り付ける必要がないという利点がある。本手法を用いたアプリケーションとして、数字入力アプリケーション、ペイントアプリケーション、距離測定アプリケーション、メニュー選択アプリケーションを示す。また、本手法を用いた実験として、位置推定可能な範囲の測定、推定座標の精度、図形をなぞる精度をはかる実験を示す。結果、位置推定可能な範囲は磁気センサを中心として半径 15 cm の円内かつ半径 4 cm の円外であることが分かった。推定座標は平均 8.03 mm の誤差があることが分かった。図形をなぞる精度を測る実験では、3.49 mm から 4.29 mm の誤差があることが分かった。さらに、被験者実験では、指定された図形を描くタスクおよび自由に図形を描くタスクを行い、被験者が指定された図形のみでなく様々な図形を描くことができた。

目次

第1章	序論	1
1.1	目的とアプローチ	3
1.2	貢献	3
1.3	本論文の構成	3
第2章	関連研究	4
2.1	携帯情報端末の周囲における入力手法	4
2.2	物体の表面を用いた入力手法	4
2.3	磁石を用いた入力手法	5
2.4	スタイラスを用いた入力手法	6
第3章	設計	7
3.1	設計方針	7
3.2	入力方法	7
3.3	システム構成	8
第4章	実装	10
4.1	スタイラスの製作	10
4.1.1	永久磁石式スタイラス	11
4.1.2	電磁石式スタイラス	14
4.2	位置推定アルゴリズム	16
第5章	著者実験	19
5.1	実験1：位置推定可能な領域の測定	19
5.1.1	手順	19
5.1.2	結果	19
5.1.3	考察	19
5.2	実験2：推定座標の精度	21
5.2.1	手順	21
5.2.2	結果	21
5.2.3	考察	22
5.3	実験3：図形をなぞる精度	22
5.3.1	手順	23

5.3.2	結果	23
5.3.3	考察	23
第 6 章	アプリケーション	25
6.1	数字入力アプリケーション	25
6.1.1	設計	25
6.1.2	数字認識部の実装	25
6.1.3	数字入力部の実装	29
6.2	ペイントアプリケーション	29
6.3	距離測定アプリケーション	31
6.4	メニュー選択アプリケーション	31
第 7 章	被験者実験	35
7.1	タスク 1	35
7.1.1	手順	35
7.1.2	結果	37
7.2	タスク 2	39
7.2.1	手順	39
7.2.2	結果	39
7.3	アンケート調査	40
7.4	考察	41
第 8 章	議論	44
8.1	机の材質	44
8.2	位置推定可能範囲	44
8.3	ペンタブレットとの比較	44
8.4	永久磁石式スタイラスの接地判定	45
8.5	複数端末を用いたインタラクション	46
8.6	設計目標について	46
第 9 章	まとめ	48
	謝辞	49
	参考文献	50
	著者論文リスト	57
付 録 A	被験者実験にて用いた実験同意書，説明書，アンケート用紙	59
A.1	実験同意書	60
A.2	実験に関する説明書	61

A.3 アンケート用紙	65
A.4 SUS 用紙	67

目 次

1.1	ソフトウェア QWERTY キーボードの例	2
1.2	Bluetooth キーボード	2
1.3	ユーザによる入力の例	2
3.1	システム構成	9
4.1	永久磁石式スタイラスの材料	11
4.2	プロトタイプ A (直線)	12
4.3	プロトタイプ B (関節) 2 自由度	13
4.4	プロトタイプ B (関節) 1 自由度	13
4.5	プロトタイプ C (斜め)	14
4.6	電磁石式スタイラスの材料	15
4.7	電磁石式スタイラス	15
4.8	設定した座標系	16
4.9	点 A および z 軸を含む平面の抜粋	17
5.1	実験 1 の様子	20
5.2	実験 1 の結果	20
5.3	実験 2 にて用意した紙	21
5.4	実験 2 の結果	22
6.1	デバッグ用アプリケーションの画面	26
6.2	特徴量の抽出方法	27
6.3	教師データの収集に用いた紙	28
6.4	作成した手本	28
6.5	数字認識部の画面表示	29
6.6	サードパーティ製メモアプリケーションに対する本 IME を用いた入力	30
6.7	ペイントアプリケーションのスクリーンショット	30
6.8	Length および Distance の計測方法	31
6.9	距離測定アプリケーションのスクリーンショット	32
6.10	距離測定アプリケーションを用いた手指の長さの計測	32
6.11	メニュー選択アプリケーションを用いたメニュー選択	33
6.12	5×5 のスマートウォッチ向けメニュー選択アプリケーション	34

7.1	入力のための領域を提示する紙	36
7.2	実験の様子	36
7.3	タスク 1 の画面	37
7.4	四角形の結果の例 (P4)	38
7.5	四角形の結果の例 (P1)	38
7.6	丸の結果の例 (P3)	38
7.7	菱形の結果の例 (P5)	38
7.8	タスク 2 の画面	39
7.9	車 (P3)	40
7.10	矢印 (P3)	40
7.11	自転車 (P6)	40
7.12	アンケートにおけるリッカート尺度の設問の結果	41
7.13	SUS の結果	41
7.14	SUS の各項目ごとの結果	42
7.15	誤った把持姿勢	43
8.1	ペンタブレットの例	45

表 目 次

3.1	本実装にて用いた端末およびそのスペック	8
5.1	スタイラスを置いた座標の範囲および平均誤差, 平均誤差率	23
5.2	実験 3 の結果, 平均誤差および標準偏差	23

第1章 序論

スマートフォン、スマートウォッチ、タブレット端末等の携帯情報端末への入力手法として、タッチパネルを用いるもの、追加のデバイスを用いるものがある。タッチパネルを用いる入力手法には、指を用いるものとスタイラスを用いるものがある。指を用いてタッチパネルに対して入力を行う手法は、手軽である一方、ターゲットが小さいと押し分けにくいという Fat Finger 問題 [SRC05] がしばしば発生する。Fat Finger 問題は、たとえばソフトウェア QWERTY キーボード (図 1.1) において、キーを押し分ける際に発生する。スタイラスを用いてタッチパネルに対して入力を行う手法は、Fat Finger 問題は解消される一方、ターゲットがスタイラスにより隠れて見えないというオクルージョンの問題がしばしば発生する。携帯情報端末に対して追加のデバイスを用いる手法には Bluetooth キーボード (図 1.2) 等があるが、これらのデバイスはしばしば大きく、持ち運びに不便であるという問題がある。

本研究では、これらの手法に加えて、携帯情報端末のタッチパネル外の平面に対してスタイラスを用いて入力を行う手法を示す。本手法は、タッチパネル外の平面に対して入力を行うため、Fat Finger 問題ならびにオクルージョンの問題は発生しない。また、本手法にて用いられるスタイラスは、一般的なペンの大きさに製作することができるため、持ち運びが容易である。また、本手法は、タッチパネルを用いる既存の入力手法ならびに Bluetooth キーボード等の追加のデバイスを用いる手法と同時に使用できる。

スタイラスを用いた入力はペンタブレット等にも用いられ、ペンを用いて紙に書く動作と似ているため、慣れやすく親しみやすい入力インタフェースであると考えられる。したがって、スタイラスを用いたインタフェースは直感的であり事前の学習なく使用できると考えられる。スタイラスを用いた携帯情報端末向け入力手法は複数存在する (例: [Inc, YHR15]) が、本研究では特に画面外を入力面とする手法に着目する。これは、携帯情報端末の画面はしばしば小さく、入力が限られるからである。携帯情報端末の画面外の広い領域において入力を行うことにより、ユーザは狭い画面にとらわれずに入力を行うことができる。

本研究では、対象となる携帯情報端末としてスマートフォン、スマートウォッチおよびタブレットを扱う。本手法を用いるユーザは図 1.3 のように、スマートフォンおよびタブレットを机等の上に置き、端末の周囲の平面に対してスタイラスを用いて入力を行う。また、スマートウォッチを腕に装着し、手の甲に対してスタイラスを用いて入力を行う。特にスマートウォッチにおいてはタッチパネルの大きさが非常に限られているため、本手法を用いると入力に用いることのできる領域が大きく広がる。このように、本手法は特に小型の携帯情報端末に対して有用であると考えられる。

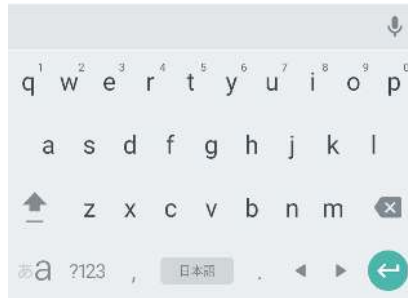


図 1.1: ソフトウェア QWERTY キーボードの例



図 1.2: Bluetooth キーボード

スマートフォン



タブレット



スマートウォッチ



図 1.3: ユーザによる入力の例

1.1 目的とアプローチ

本研究の目的は、既存の入力手法と同時に使用可能であり、それらより広い入力面にて入力可能な携帯情報端末向け入力手法を示すことである。それにより、携帯情報端末への入力に関する Fat Finger 問題およびオクルージョンの問題を解決する。そのために、磁石付きスタイラスを用いて携帯情報端末の周囲の平面に対して入力を行う。携帯情報端末の周囲の平面を入力面とすることにより、ユーザは携帯情報端末のタッチパネルよりも広い領域にて入力を行うことができる。本手法は、携帯情報端末に内蔵された 3 軸磁気センサ 1 個のみを用いるため、センサを追加する必要がない。また、本手法にて用いられるスタイラスは、一般的なペンの大きさに製作することが可能であるため、持ち運びが容易である。

1.2 貢献

本研究の貢献を以下に列挙する。

- 携帯情報端末の入力領域をタッチパネル外に拡張した。
- 本手法に用いるスタイラスとして、永久磁石式スタイラスおよび電磁石式スタイラスを示した。
- 携帯情報端末に内蔵された磁気センサのみを用いて磁石の位置をリアルタイムに推定するアルゴリズムを考案、実装し、その精度を明らかにした。
- 本手法を用いるアプリケーションを実装した。
- 被験者実験により、本手法のユーザビリティを明らかにした。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を述べる。2 章にて、本論文に関連する研究ならびに本研究の立ち位置を述べる。3 章にて、本手法の目標および設計を述べる。4 章にて、本手法の具体的な実装方法を述べる。5 章にて、本手法の有用性を調査するために行った、位置推定可能な範囲の測定、推定座標の精度、なぞる精度に関する実験を述べる。6 章にて、本手法を用いたアプリケーションとして数字入力アプリケーション、ペイントアプリケーション、距離測定アプリケーション、メニュー選択アプリケーションを述べる。7 章にて、本手法のユーザビリティを調査する被験者実験の内容を述べる。8 章にて、本手法に関する議論を述べる。9 章にて、本論文のまとめを述べる。また、付録 A として被験者実験にて用いた資料を示す。

第2章 関連研究

本手法にてユーザは携帯情報端末の周囲の平面にて、磁石をとりつけたスタイラスを用いて入力を行う。関連研究として、携帯情報端末の周囲における入力手法、物体の表面を用いた入力手法、磁石を用いた入力手法、スタイラスを用いた入力手法に関する研究が挙げられる。

2.1 携帯情報端末の周囲における入力手法

携帯情報端末の周囲を用いる研究のうち、磁石を用いないものを述べる。Hinckley らは、携帯情報端末に対して距離、タッチ、チルトセンサを取り付けインタラクションを行う研究 [HPSH00] ならびにタブレットおよびスタイラスを用いた把持姿勢および動作を取得する研究 [HPB⁺14] を行った。Song ら [SSP⁺14] は、携帯情報端末に内蔵されたカメラを用いて手を用いたジェスチャを撮影することにより、携帯情報端末の周囲においてジェスチャ入力を行う研究を行った。SideSight[BiH08] は、スマートフォンの側面に赤外線距離センサを取り付けることにより、スマートフォンの周囲の平面における指によるタッチを検出する。TapSkin[ZBR⁺16] は、スマートウォッチを取り付けた腕において、スマートウォッチの周囲の皮膚に対するタッチ入力を検出する。SkinTrack[ZZLH16] は、スマートウォッチおよびスマートウォッチを装着する腕とは逆の腕の人差し指に電極を取り付け、それらに流す電気信号をもとに手の甲および腕に対するタッチおよびホバーを検出する。GlassHands[GOP⁺16] は、机上に設置されたスマートフォンのインカメラを用いてユーザが装着したサングラスを撮影することにより、指によるスマートフォンの周囲に対する入力を検出する。Skin Buttons[LXC⁺14] は、スマートウォッチに内蔵されたレーザープロジェクタを用いてスマートウォッチを装着した腕に対してボタンを照射し、ボタンに対するタップを検出する。

本研究では、ユーザは携帯情報端末の周囲を入力面として磁石を取り付けたスタイラスを用いた入力を行う。

2.2 物体の表面を用いた入力手法

ユーザが通常入力に使用しない物体の表面を用いて入力を行う研究としては、次のものが挙げられる。Scratch Input[HH08] は、壁等の平面に取り付けられたマイクを用いて平面に対する操作を識別する。Anywhere Surface Touch[NW14] は、カメラおよびマイクを用いて任意の面上におけるユーザの指のジェスチャを認識する。OmniTouch[HBW11] および Skinput[HTM11] は、腕または手等に対してピコプロジェクタを用いてボタン等を投影し、それらに対するタッ

チを検出する。Ghost Touch[MMM⁺15] は、超音波を用いて砂が敷き詰められた平面または着色された液面に対する入出力を行う。

本研究では、ユーザは磁石および携帯情報端末に内蔵された磁気センサを用いて携帯情報端末向けの入力を行う。

2.3 磁石を用いた入力手法

磁石を用いた入力手法は数多く研究されてきた。Han ら [HSYH07] は、2 個の 2 軸磁気センサおよび磁石を用いる計算機向けの文字入力手法を研究した。MagiTact[KYR10] は、スマートフォンの周囲において磁石を用いることにより 3 次元のジェスチャ入力手法である。Abracadabra[HH09] は、磁石が取り付けられた指を用いる小型端末向けの入力手法である。uTrack[CLWP13] は、手に取り付けた 1 個の磁石および 2 個の磁気センサを用いた 3 次元入力手法である。MagPen[HBAW13] は、磁石を内蔵したペンを用いてスマートフォンを操作する。TMotion[YHR16] は、スタイラスに埋め込んだ磁石からの磁場を、スタイラスに埋め込んだ磁気センサおよび机上に設置されたスマートフォンの磁気センサを用いて検出し、スタイラスの位置を推定する手法である。IM6D[HMT⁺15] は、指に取り付けられた電磁石から発せられる磁場を磁気センサアレイを用いて検出し、磁石の 3 次元位置および方向を計測する手法である。MagNail[KS14, 門村 14] は、爪に装着した磁石を用いてスマートフォンに対して入力を行う手法である。Son ら [Pham13] は、磁気センサアレイおよび磁石を用いて計算機に対する 3 次元入力を行った。FingerPad[CLT⁺13] は、人差し指の爪に磁気センサグリッドを、親指に磁石を取り付け、人差し指と親指を用いたジェスチャ入力を行う。本研究では、ユーザは携帯情報端末に内蔵された 3 軸磁気センサ 1 個と磁石 1 個を用いて携帯情報端末に対する入力を行う。

磁石を用いたジェスチャ入力に関する研究がある。Magnetowear[VG16] は、ゴム製のブレスレットに強さの異なる 4 つの磁石を取り付け、ある磁石をタップした時の磁力の変化をスマートフォンを用いて読み取り、どの磁石をタップしたかを検出する。TRing[YZHR16] は、指に取り付けられた 9 軸 IMU センサを用いて、磁石が埋め込まれた物体に対する操作を検出する。MagnifiSence[WLM⁺15] は、日常使用する機械が発する電磁波を腕に取り付けられたセンサを用いて検知し、ユーザがどの機械を操作しているかを検出する。Smus ら [SR15] の研究および Google Cardboard[Gooa] は、スマートフォンにおける VR ゴーグルの側面に磁石を 2 つ取り付け、磁石に対する操作をスマートフォン内蔵の磁気センサを用いて認識した。本研究は、ジェスチャ入力にも応用できるが、スタイラスの座標を取得する点に主眼を置く。

磁石を用いたタンジブルな物体に関する研究が行われている。MagGetz[HAW13] は、スマートフォンの周囲に設置した磁石を内蔵したタンジブルなコントローラを用いる入力手法である。Liang らは、磁石およびスマートフォンを用いるタンジブルなコントローラを提案した [LSW⁺12, LCS⁺12, LCT⁺14, LKC⁺14]。GaussBits[YZHR16] および GaussMarbles[KLLC16] は、携帯情報端末裏面に取り付けられた磁気センサアレイを用いて、磁石が埋め込まれた小物体を用いた端末表面付近に対する入力を行う手法である。本研究は、携帯情報端末に内蔵

された1つの磁気センサのみを用いて、携帯情報端末付近の平面上において磁石が取り付けられたスタイラスの座標を推定する。

磁石を用いてスマートフォン上にて個人認証を行う研究を述べる。山本ら [山本 13] は、イヤホンスマートフォンの周囲において特定のパターンにて動かす動作を、イヤホンに内蔵された磁石から発せられる磁気をスマートフォンの磁気センサを用いて検出することにより個人認証を行った。Samami Shirazi ら [SSMKS12] は、既存のスマートフォンをアンロックする手法に変えて、磁石を用いてスマートフォンをアンロックすることにより、動画記録によるアンロックパターンの盗難に強いアンロック手法を開発した。Ketabdar ら [KMNR12, KYJ⁺10] は、指に取り付けた磁石からの磁気を携帯情報端末の磁気センサにより検知し、指の動きのパターンを認識することにより、ユーザを認識または認証した。本研究は、これらの研究と同様に個人認証を行うことも可能であると考えられるが、磁石の位置推定を主眼においた研究である。

その他の磁石を用いた入出力には次のものが挙げられる。El Ali ら [EAK13] は、磁気にもとづくスマートフォン周囲のインタラクションとして Disk Jockey インタフェースおよびエアギターインタフェースを開発し、それらの評価実験を行った。Geckos [LH11] は、感圧センサ、磁石、鉄板を用いたタンジブルオブジェクトであり、オブジェクト中の磁石の位置を感圧センサを用いて検出し、オブジェクトの向きまたはオブジェクトの重なりを検出する。本手法は、携帯情報端末の周囲の平面を入力面とする入力手法である。

2.4 スタイラスを用いた入力手法

スタイラスを用いて入力を行う研究を述べる。MEMO-PEN[NYAT95] は、ボールペンの先端に CCD カメラを取り付け、カメラの映像を計算機に入力し、ペンのストロークを計算機上にて再現する。Airpen Pocket[ペン], MVPen[株式] および DigiMemo A402[ACE] は、ペンから信号を送出しレシーバーで信号を取得しレシーバーを接続した計算機上にてペンの筆跡を再現する商品である。アノトペン [Gro, 今井 07] は、特殊な紙およびペンを用いて筆跡をペンに保存する商品である。NanoStylus[XGF15] は、極小のスタイラスを指に取り付け、スマートウォッチに対する入力を行う。Apple Pencil[Inc] は、iPad Pro のタッチパネルに対してスタイラスを用いて様々な入力を行う製品である。鈴木ら [鈴木 12] は、PC の画面外におけるスタイラスの動作を用いてペイントアプリケーションの操作を行った。

本研究では、開発者はスタイラスに対して電源を供給せずとも実装可能であり、また携帯情報端末に内蔵されたセンサの他に追加のセンサを必要としない。また、ユーザは携帯情報端末の画面外の平面を用いて入力を行う。

第3章 設計

本章にて，本手法の設計を述べる．

3.1 設計方針

本手法を設計するにあたり，次の項目を目標とすることとした．

- 携帯情報端末に対する一般的な入力手法と同時に使用できる．
- 携帯情報端末のタッチパネルよりも広い範囲において入力を行う．
- 追加のセンサを必要しない．
- 容易に持ち運びできるスタイラスを用いる．
- スタイラスの位置をリアルタイムに推定することができる．

これらの項目を満たすため，次の要領にて本手法を実装することとした．

- 携帯情報端末のタッチパネルまたは Bluetooth 等を用いずに入力を行う．
- 磁石を取り付けたスタイラスを用いて，携帯情報端末の画面外の平面に対して入力を行う．
- 携帯情報端末に内蔵された磁気センサのみを用いる．
- 小さく軽量のスタイラスを製作する．
- できるだけ計算量の少ないアルゴリズムを用いる．

3.2 入力方法

本手法を用いた入力方法を述べる．まずユーザはスタイラスを用意する．スタイラスは，磁石が取り付けられた棒状の筆記具である．ユーザは磁性体を含まない棒に磁石を取り付けることにより簡単に本手法にて用いるスタイラスを製作することができる．次に，スマートフォンまたはタブレットユーザは，端末を机等の平面の上に置き，その平面に対してスタイラス

を用いることにより端末に対する入力を行う。スマートウォッチユーザはスマートウォッチを装着した手の甲に対して、スタイラスを用いることによりスマートウォッチへ入力する。図 1.3 にユーザによる入力の例を示す。

ユーザが本手法を用いて入力する時、スタイラスに取り付けられた磁石は、入力面に対して垂直になっている必要がある。なぜならば、本手法にて用いられるアルゴリズムは、この制約のもと動作するからである。この制約は、携帯情報端末に内蔵された 1 つの 3 軸磁気センサのみを用いてスタイラスの座標を推定するために設けられた。さらに、この制約はアルゴリズムの簡単化にも貢献した。

本手法は、3 軸磁気センサを搭載する任意の携帯情報端末にて動作する。本論文では動作確認のため、スマートウォッチとして Sony Smartwatch 3 を、スマートフォンとして Sony Xperia Z5, Sony Xperia Z3 Compact, ASUS Zenfone 5 を、タブレットとして Sony Xperia Z Ultra を用いた。スペック詳細を表 3.1 に示す。ただし、OS はすべて Android, CPU はすべて Qualcomm 製 Snapdragon である。

表 3.1: 本実装にて用いた端末およびそのスペック

機種	Android	大きさ (mm)	CPU 周波数	RAM	磁気センサ
SmartWatch 3	6.0.1	51 × 36 × 10	1.2GHz	512MB	EM7180
Xperia Z5	6.0.1	146 × 72 × 7.3	2.0GHz+1.5GHz	3GB	Invensense
Xperia Z3 Compact	6.0.1	127 × 65 × 8.6	2.5GHz	2GB	AK09911
Zenfone 5	4.4.2	148 × 73 × 10.3	1.2GHz	2GB	AK09911
Xperia Z Ultra	5.1.1	179 × 92 × 6.5	2.2GHz	2GB	AK8963

3.3 システム構成

本システムの構成を述べる。本システムは図 3.1 のように、スタイラスおよび携帯情報端末により構成される。携帯情報端末には、1 個の 3 軸磁気センサが内蔵されている。システムは磁気センサの値をもとにスタイラスの位置を推定する。

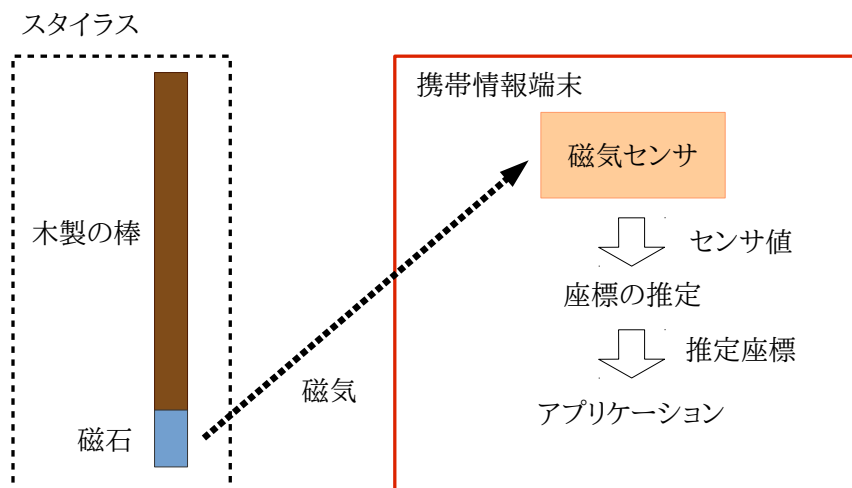


図 3.1: システム構成

第4章 実装

本システムの実装を述べる。本システムは、スタイラスおよび位置推定アルゴリズムより構成される。システムの実装方法を以下に述べる。

実装時に動作させた端末は、3.2 節にて示した物を用いた。開発に用いた端末は、Thinkpad X1 Carbon (OS: Ubuntu 14.04 LTS; CPU: Intel Core i7-3667U 2.00 GHz Quad-core; RAM: 8 GB) である。開発は、Eclipse 上にて Java 言語を用いて行われた。

4.1 スタイラスの製作

本手法にて用いられるスタイラスに取り付ける磁石として、永久磁石および電磁石を用いた。それぞれ、永久磁石式および電磁石式スタイラスと呼ぶ。それぞれのスタイラスは、磁石のN極が入力面と接するように製作された。ユーザが本手法を用いて入力する時、スタイラスに付属した磁石が入力面に対して垂直になっている必要がある。

永久磁石式スタイラスは、スタイラスに電源を供給する必要がある一方、ユーザの入力・非入力の状態をソフトウェア側で識別する必要がある。なぜなら、ユーザが非入力の状態（すなわち、スタイラスが入力面から離れている状態）の時もスタイラスから磁力が発せられ、端末の磁気センサがスタイラスからの磁気を検知するからである。この識別のため、本手法はスタイラスが動いているかどうかを検知し、それをもとに入力状態を判別する。たとえば、入力の前後にスタイラスを一定時間留める手法およびユーザがスタイラスを一定時間留めている点を入力とする手法がある。

電磁石式スタイラスを用いる場合、スタイラスにおける磁石と入力面が接する箇所に電磁石を入切するためのスイッチが取り付けられているため、上記の検出を行う必要がない一方、スタイラスに対して電源を供給する必要がある。

ユーザは永久磁石式または電磁石式スタイラスのいずれかを用いて入力を行う。いずれを用いるかはアプリケーションの設計者が決定するものとした。なぜなら、どちらのスタイラスを用いるかによって実装すべき内容が変わるからである。永久磁石式スタイラスを用いる場合は、ソフトウェア側にて入力・非入力状態の識別を行う必要がある。電磁石式スタイラスを用いる場合は、スタイラスに対して電源を供給するため、使用できる環境に制限がある。

4.1.1 永久磁石式スタイラス

永久磁石式スタイラスは、直径 10 mm×長さ 100 mm の木製の棒および直径 10 mm×長さ 10 mm のネオジム磁石（587 mT）2 個からなる。ネオジム磁石の個数は本来 1 個でよいが、本実装においては磁力を強くするため 2 個直列に接続された。永久磁石式スタイラスの材料を図 4.1 に示す。



図 4.1: 永久磁石式スタイラスの材料

プロトタイプ A（直線）

プロトタイプ A（直線）は、磁石および木製の棒を接着剤を用いて一直線状に固定したものである（図 4.2）。ただし、押木ら [押木 03] によると、現在典型とされている筆記具の持ち方は入力面に対して 60 度筆記具を傾ける持ち方である。しかし、ユーザはプロトタイプ A（直線）を入力面に対してスタイラスを 90 度に把持しなければいけないので、プロトタイプ A には持ちにくいという問題が発生した。

プロトタイプ B（関節）

プロトタイプ A における、把持角度が 90 度であり持ちにくいという問題を解決するため、磁石および木製の棒の間に関節機構を取りつけたプロトタイプ B（関節）を製作した。図 4.3



図 4.2: プロトタイプ A (直線)

は 2 自由度の関節機構，図 4.4 は 1 自由度の関節機構を取り付けたものである．関節機構は，FlashForge 社製 3D プリンタ Dreamer を用いて製作された．プロトタイプ B を用いて実際に入力を行ったところ，スタイラスが入力面と接触際に関節が曲がってしまい，入力に支障をきたす現象が確認された．

プロトタイプ C (斜め)

プロトタイプ A および B にて生じた問題を解決するため，プロトタイプ C (斜め) を製作した．プロトタイプ C は，入力面に対して 60 度の角度になるように木製の棒と磁石を取り付けたスタイラスである (図 4.5) ．プロトタイプ C の重さは約 14.9 g であった．

取り付け角度は，次のようにして決められた．筆者を含む 6 名の大学生・大学院生 (年齢 22–24，男性) を対象に，ペンを自然に持ってもらい，入力面とのなす角を計測した．結果，平均 59.65 度 (SD=3.94 度) であった．これは，押木らの研究 [押木 03] による，現在の典型とされている筆記具の持ち方である 60 度にも合致する．これらのことから，プロトタイプ C では木製の棒 (把持部分) と入力面のなす角を 60 度となるようにスタイラスを製作した．以降の節において単に永久磁石式スタイラスと述べた場合には，プロトタイプ C を指すものとする．



図 4.3: プロトタイプ B (関節) 2 自由度



図 4.4: プロトタイプ B (関節) 1 自由度



図 4.5: プロトタイプ C (斜め)

4.1.2 電磁石式スタイラス

電磁石式スタイラス (図 4.7) は、フェライト棒 (直径 10 mm× 長さ 50 mm) の周囲に 0.4 mm のポリウレタン銅線を約 480 回巻きつけて製作された。この時、LCR メータ¹を用いて電磁石のインダクタンスを計測したところ、11.4 mH (@1kHz) であった。さらに、電磁石の接地部分すなわち N 極部分にマイクロスイッチを取り付け、マイクロスイッチが ON の時すなわちスタイラスが入力面に接地している時だけ、電磁石に対して電流が流れるようにした。電磁石式スタイラスに対しても、4.1.1 節にならい、60 度の角度にて木製の棒が取り付けられた。電磁石に対して直流安定化電源を用いて 5V の電圧を印加し、およそ 0.5A の電流が流れた。電磁石式スタイラスの重さは約 53.7 g であった。

¹DER EE Electrical Instrument Co., Ltd 製 DE-5000

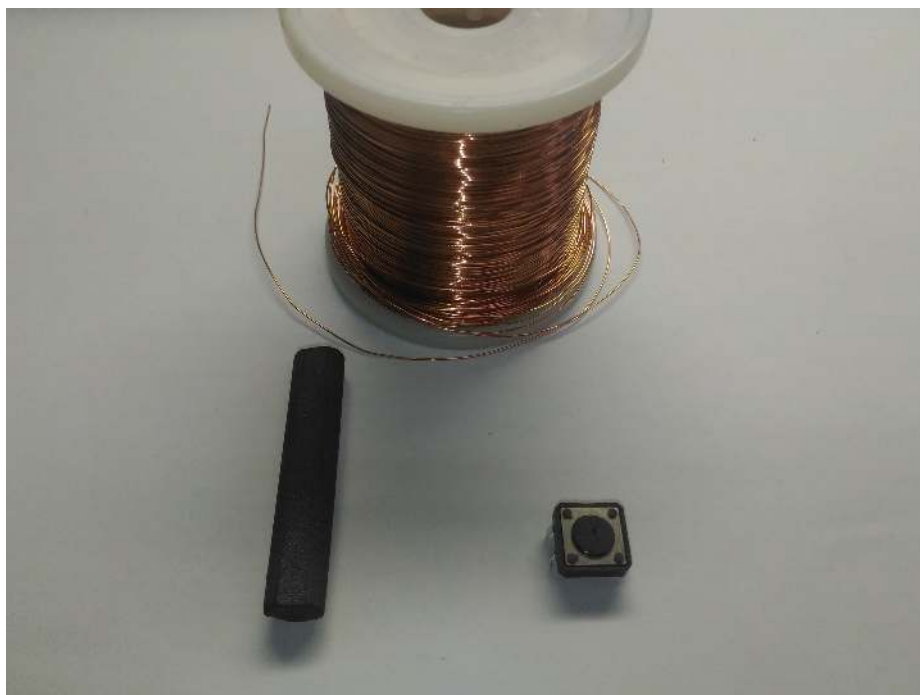


図 4.6: 電磁石式スタイラスの材料



図 4.7: 電磁石式スタイラス

4.2 位置推定アルゴリズム

本節にて本システムのアルゴリズムを述べる。

システムは，磁気センサの値を定期的を取得する．本実装においては，取得間隔を 20 ms とした．すなわち，磁気センサの値をもとにスタイラスの座標を 20 ms ごとに推定する．

スタイラスの座標推定方法を述べる．システム起動後，はじめて取得した磁気センサの値を地磁気成分として保存する．以降，磁気センサの値から地磁気成分を引いた値を磁場ベクトルとして計算する．図 4.8 のように，携帯情報端末のセンサを原点とした直交座標系 x, y, z を考える． xy 平面は入力面に，原点 O は携帯情報端末の磁気センサに相当する． xy 平面上の点 $A(x, y, 0)$ に，長さ ℓ の磁石の N 極を z 軸負方向に向けて置く．これは 4.1 節にて製作したスタイラスに取り付けられた磁石に相当する．本実装においては， $\ell = 0.02 \text{ m}$ （永久磁石式スタイラス）または 0.05 m （電磁石式スタイラス）である．原点において測定された x, y, z 軸方向の磁場ベクトルをそれぞれ b_x, b_y, b_z とする．さらに， $r = |OA| = \sqrt{x^2 + y^2}$ とする．図 4.8 のうち，点 A および z 軸を含む平面のみを抜き出したものを図 4.9 に示す．

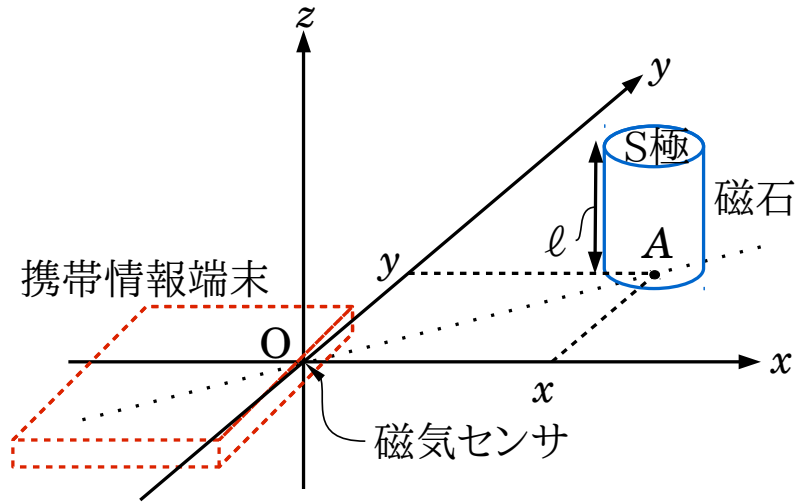


図 4.8: 設定した座標系

クーロンの法則より，磁気量 m の磁極から距離 r_0 だけ離れた位置における磁場の大きさは，真空の透磁率を μ_0 として，

$$\frac{m}{4\pi\mu_0 r_0^2}$$

と表される．したがって，原点が磁石の N 極および S 極から受ける磁場ベクトルはそれぞれ

$$\frac{-m}{4\pi\mu_0 r^2} \frac{1}{r} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix}, \frac{m}{4\pi\mu_0 R^2} \frac{1}{R} \begin{pmatrix} x \\ y \\ \ell \end{pmatrix}$$

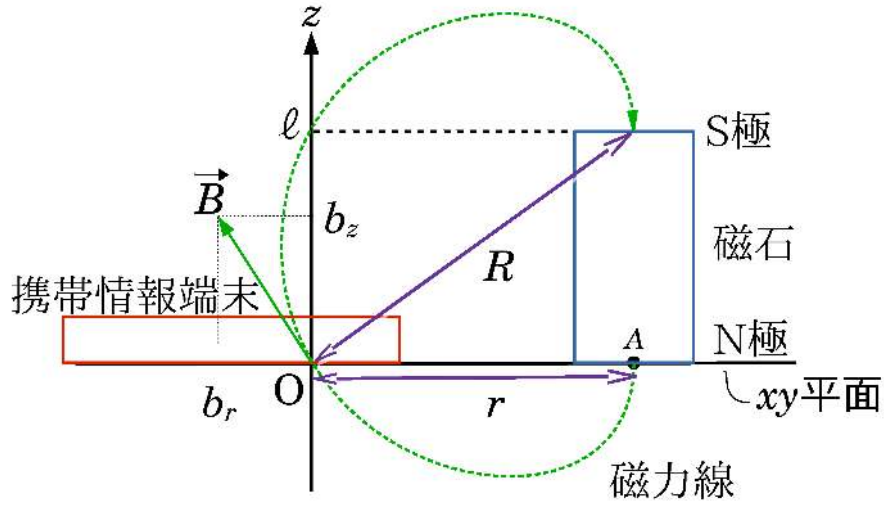


図 4.9: 点 A および z 軸を含む平面の抜粋

である．ただし， $R = \sqrt{x^2 + y^2 + \ell^2} = \sqrt{r^2 + \ell^2}$ とする．したがって，図 4.9 において原点 O が磁石から受ける磁場ベクトルは， $b_r = -\sqrt{b_x^2 + b_y^2}$ とすると，

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} b_r \\ b_z \end{pmatrix} &= \frac{-m}{4\pi\mu_0 r^2} \frac{1}{r} \begin{pmatrix} r \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{m}{4\pi\mu_0 R^2} \frac{1}{R} \begin{pmatrix} r \\ \ell \end{pmatrix} \\ &= \frac{m}{4\pi\mu_0} \begin{pmatrix} r \left(\frac{1}{R^3} - \frac{1}{r^3} \right) \\ \frac{\ell}{R^3} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

となる．よって

$$\begin{aligned}
\frac{b_r}{b_z} &= \frac{r \left(\frac{1}{R^3} - \frac{1}{r^3} \right)}{\frac{\ell}{R^3}} \\
&= \frac{r^3 - R^3}{\ell r^2} \\
&= \frac{r}{\ell} \left(1 - \frac{\sqrt{r^2 + \ell^2}^3}{r^3} \right) \\
&= \frac{r}{\ell} \left(1 - \left(1 + \left(\frac{\ell}{r} \right)^2 \right)^{3/2} \right) \\
&\Rightarrow \left(1 + \left(\frac{\ell}{r} \right)^2 \right)^3 \\
&\Rightarrow 1 + 3 \left(\frac{\ell}{r} \right)^2 + 3 \left(\frac{\ell}{r} \right)^4 + \left(\frac{\ell}{r} \right)^6 \\
&\Rightarrow \left(\frac{\ell}{r} \right)^5 + 3 \left(\frac{\ell}{r} \right)^3 + \left(3 - \left(\frac{b_r}{b_z} \right)^2 \right) \frac{\ell}{r} + 2 \frac{b_r}{b_z} = 0
\end{aligned} \tag{4.1}$$

が得られる．

図 4.9 より，磁石を xy 平面に対して垂直に設置するため， $|b_r| < |b_z|$ としてよい．よって， $3 - (b_r/b_z)^2 > 0$ であるため，4.1 式の左辺は ℓ/r に関して単調増加関数である．したがって， $0 < \ell/r < 1$ の範囲で 4.1 式を数値計算法を用いて解くことにより， r を求めることができる．本実装においては，数値計算法として二分法を用いた．また，センサの取得間隔が 20 ms であるため，計算は 20 ms 未満で終了するように実装した．ここでは，二分法の終了条件が

$$-0.0001 < (4.1 \text{ 式の左辺}) < 0.0001 \tag{4.2}$$

となるように実装した．これは，二分法を用いるときに使用される再起関数がスタックオーバーフローしない限界の桁である．

第5章 著者実験

4章において実装したシステムの有効性および制約事項の調査のため，著者による実験を行った．具体的には，机上にてスタイラスの位置を推定可能な範囲（実験1），推定されたスタイラスの位置の精度（実験2）および図形をなぞる精度（実験3）を調査した．実験に用いた機材は3.2節にて述べたスマートフォンである．実験には，プラスチック製の机を用いた．

5.1 実験1：位置推定可能な領域の測定

スマートフォンの周囲の領域のうち，磁石の位置を推定することができる領域を調査した．実験の様子を図5.1に示す．

5.1.1 手順

著者はまず，机上に白色のA3用紙をセロハンテープを用いて固定し，スマートフォンを紙面の中央付近に設置した．次に，ボールペンを用いてスマートフォンの周囲を1周なぞり，スマートフォンが置かれている位置を記録した．次に，永久磁石式および電磁石式スタイラスを用紙の全領域において動かし，スタイラスの座標が推定されうる領域を調査し，紙に記録した．

5.1.2 結果

実験1の結果を図5.2に示す．ただし，点Oはスマートフォンの磁気センサの位置を表し，斜線は位置推定可能な領域を表す．実験1の結果から，永久磁石式スタイラスの位置推定可能な領域は磁気センサを中心とする半径約15cmの円の内部かつ半径4cmの円の外部の領域であることがわかった．その面積は約580cm²であった．また，電磁石式スタイラスの位置推定可能な領域は磁気センサを中心とする半径約12cmの円の内部かつ半径2.5cmの円の外部の領域であることがわかった．その面積は約350cm²であった．

5.1.3 考察

本実験にて用いたスマートフォンのタッチパネルは112mm×63mmであった．したがって，永久磁石式スタイラスの入力可能領域はスマートフォンのタッチパネルの約8.2倍，電磁石



図 5.1: 実験 1 の様子

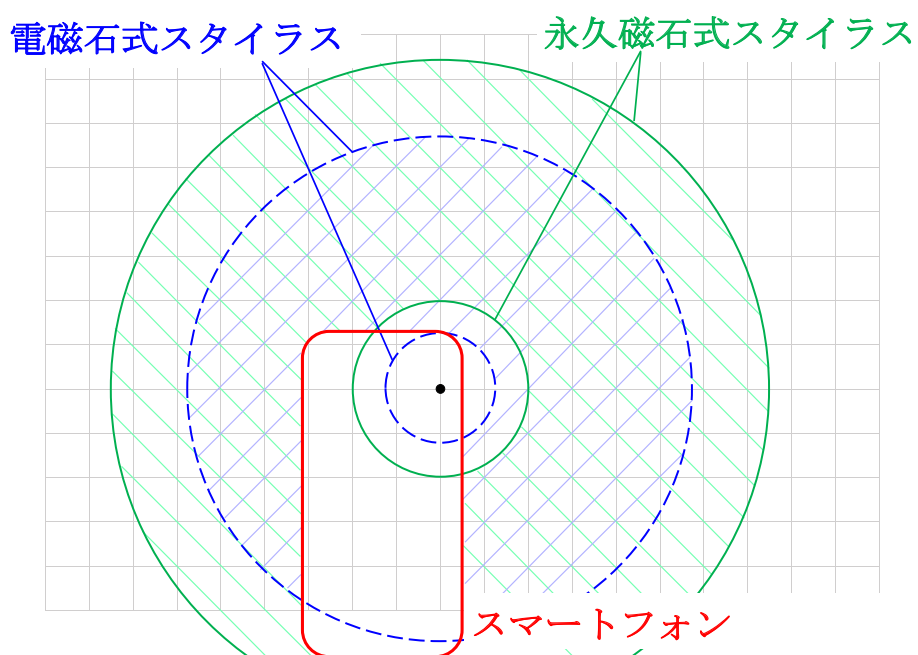


図 5.2: 実験 1 の結果

式スタイラスの入力可能領域はスマートフォンのタッチパネルの約 5.0 倍であることがわかる。それゆえ，本実装においては両スタイラスを用いて入力可能な領域は広いということがわかった。

5.2 実験 2：推定座標の精度

実験 2 においては，Han らの論文 [HSYH07] を参考とし，実験 1 の結果より得られた領域内において，実座標と推定された座標のずれを計測した。

5.2.1 手順

著者はまず，A3 用紙を 2 cm の方眼にて区切り実験 1 にて得られた領域を重ねた。作成した紙を図 5.3 に示す。領域内にある方眼の各交点に順に永久磁石式スタイラスを設置し，推定された座標を記録した。

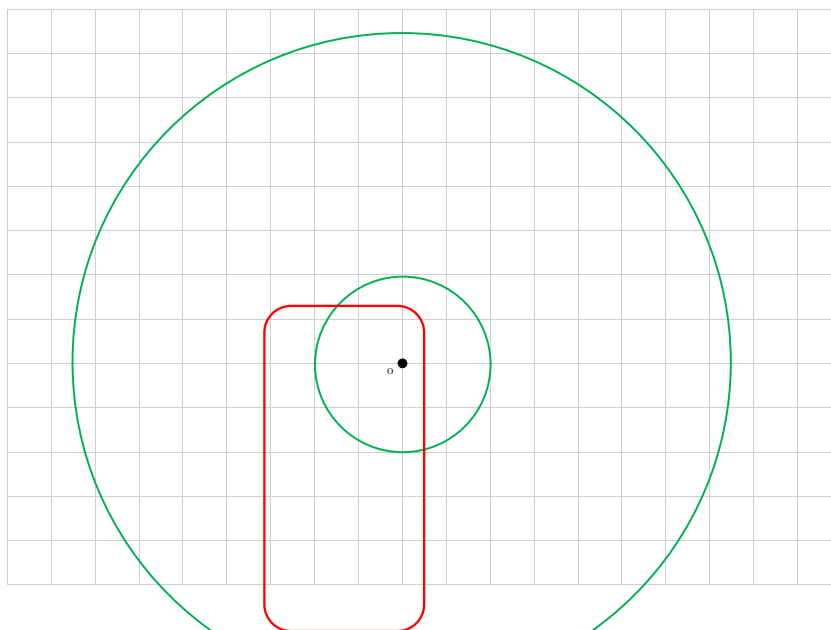


図 5.3: 実験 2 にて用意した紙

5.2.2 結果

実験 2 で得られた結果を図 5.4 に示す。ただし，格子の交点はスタイラスを設置した実座標を，× 印は推定された座標を，青線は実座標と推定された座標のずれを表す。スタイラスを

おいた座標の範囲とその範囲内における推定された座標の平均誤差および平均誤差率を表 5.1 に示す。ただし、

$$(\text{平均誤差率}) = \frac{(\text{実座標と推定座標の距離})}{(\text{実座標と原点の距離})}$$

である。表 5.1 から、永久磁石式スタイラスを用いると平均 7.37%の精度にて入力が可能であることが示された。

5.2.3 考察

実験 2 の結果から、実座標と推定された座標とのずれは、スタイラスが点 O から離れるほど大きいことがわかった。これは、[HSYH07] の結果と合致する。さらに、表 5.1 より平均誤差率はセンサとの距離に関係ないことが分かった。また、図 5.4 から推定された座標は一方向にずれていることがわかる。したがって、本手法はキャリブレーションによる精度の向上が期待できる。

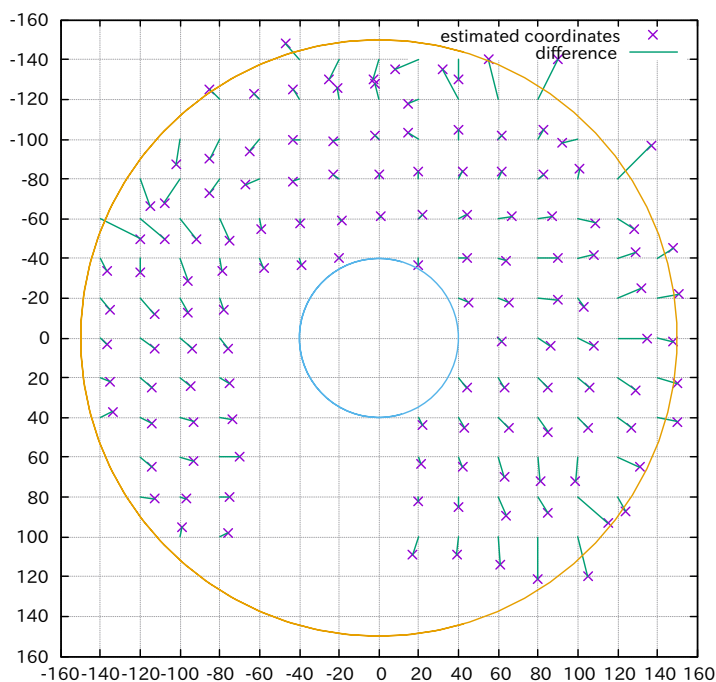


図 5.4: 実験 2 の結果

5.3 実験 3 : 図形をなぞる精度

実験 3 においては、永久磁石式スタイラスを用いて実物体をなぞり、なぞった軌跡の精度をはかった。この実験内容は、TMotion[YHR16] を参考とした。

表 5.1: スタイラスを置いた座標の範囲および平均誤差, 平均誤差率

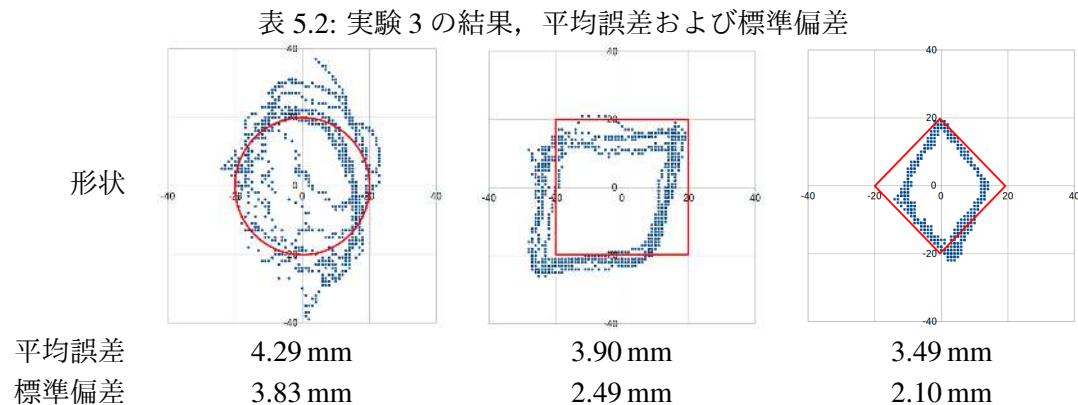
センサとの距離 (mm)	平均誤差 (mm)	平均誤差率 (%)
40 – 70	3.55	6.47
70 – 90	5.26	6.40
90 – 110	7.49	7.64
110 – 130	8.26	6.98
130 – 150	11.3	8.24
40 – 150	8.03	7.37

5.3.1 手順

スマートフォンの磁気センサの位置の 80 mm 左を中心とする位置に 3 種類の図形を印刷した紙を用意し, それらの図形を永久磁石式スタイラスを用いてなぞった. なぞる図形として, 丸, 四角, 菱形を用意した. 著者は, 各図形を 20 秒間なぞり続け, 推定された座標を記録した. 結果として, 各図形に対して 1000 以上の座標が記録された.

5.3.2 結果

表 5.2 は, 実験 3 の結果, 平均誤差, 標準偏差を表す. 結果の図においては, 青い点群が推定された座標を, 赤い図形がなぞった図形を表す. なお, 座標 (0,80) はスマートフォンの磁気センサにあたる. 平均誤差および標準偏差は, 推定された各座標となぞった図形の距離の平均および標準偏差である.



5.3.3 考察

実験 3 は, スタイラスとセンサとの距離が 60 mm–102 mm の領域にて行われた. 表 5.1 および 5.2 から, 実験 3 では, 実験 2 において求めた誤差よりも小さな値が求められていること

がわかる．これは，実験 3 においては推定された座標と最近傍のなぞった図形上の点の距離を求めていることが原因だと考えられる．

第6章 アプリケーション

本手法を用いるアプリケーションとして、数字入力アプリケーション、ペイントアプリケーション、距離測定アプリケーションおよびメニュー選択アプリケーションを製作した。なお、これらのアプリケーションの実装においては 3.2 節と同じ開発環境を用いた。

6.1 数字入力アプリケーション

数字入力アプリケーションにおいて、ユーザはスタイラスを用いて携帯情報端末に対して数字を入力することができる。数字入力アプリケーションにおいては、ユーザは永久磁石式スタイラスを用いるものとした。また、本アプリケーションはスマートフォンおよびタブレット向けに実装された。

6.1.1 設計

本アプリケーションの設計を述べる。本アプリケーションは、数字認識部と数字入力部に分かれている。数字認識部においては、ユーザは本手法を用いて数字を書き、推定された座標群にもとづき書かれた数字を認識する。数字入力部においては、認識された数字をもとに任意のアプリケーションに対して数字を入力できる Input Method Editor (IME) を実装した。

数字を書く時、ユーザは一筆書きにて数字を書く必要がある。なぜなら、数字認識部は磁石が入力面に接触しているかどうか知ることができないからである。さらに、ユーザはなるべく等速でスタイラスを動かす必要がある。これは、スタイラスを動かす速さが変化すると正しいストローク分割ができないからである。数字入力部の IME は既存の IME とは異なり、ソフトウェアキーボードが不要なため、画面のすべての領域にコンテンツを表示することができるという利点がある。

6.1.2 数字認識部の実装

本手法により推定された点群をもとに数字を認識するアプリケーションを実装した。数字認識部は、次のように動く。

1. ユーザは本システムを用いて数字を書く。
2. 推定された座標データ群をストロークに切り分ける。

3. 切り分けられたストロークにもとづき機械学習を用いて数字を認識する。

さらに、数字認識部におけるデバッグのため、ストロークおよび認識結果を画面に表示するデバッグ用アプリケーションも実装した（図 6.1）。

以下に、各過程の実装を述べる。

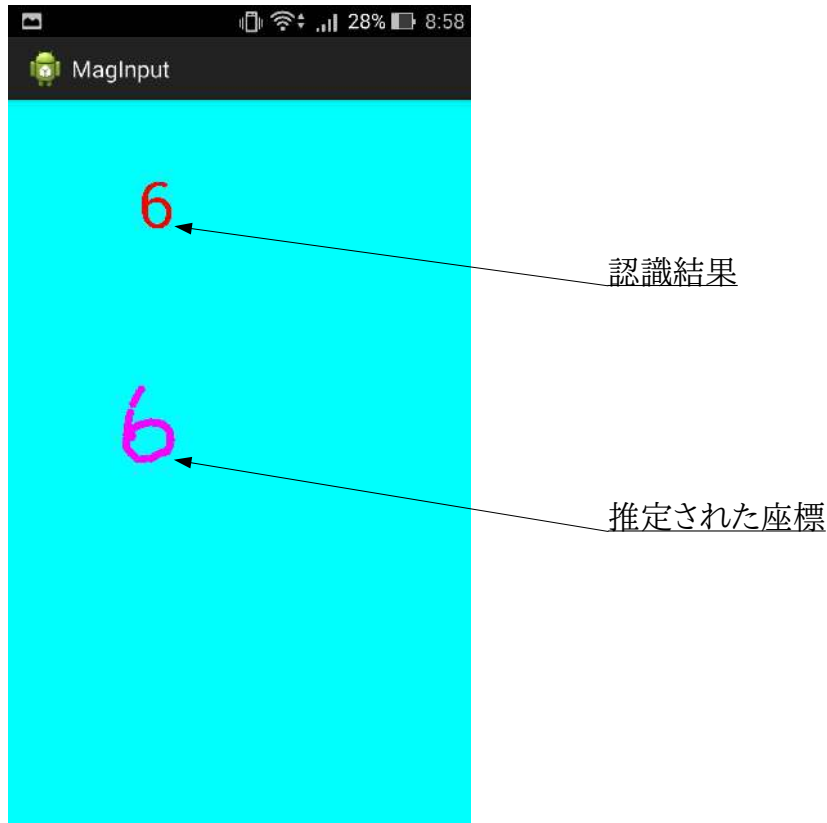


図 6.1: デバッグ用アプリケーションの画面

ストロークの切り分け

本アプリケーションにおいては、ユーザは永久磁石式スタイラスを用いるため、スタイラスが入力面と接しているかどうかを判別する必要がある。本システムにおいては、磁石の推定座標が動いているかによって判断することとした。具体的には、最新の推定座標 20 個のうち、古い 10 個の重心座標と新しい 10 個の重心座標の距離が閾値を上回っていればスタイラスは動いているものと判断した。

機械学習による数字認識

数字の認識方法を図 6.2 を用いて説明する。

数字認識に用いる特徴量を次のように得る．まずスタイラスが動きはじめてから停止するまでの一連の座標（青色点）を，12 組に等分（桃色丸囲み）する．次に，各組の重心座標 $C_n = (x_n, y_n)$ ($n = 0 - 11$)（赤色点）を求める．さらに， $\overrightarrow{C_{i-1}C_i}$ および $\overrightarrow{C_iC_{i+1}}$ ($i = 1 - 10$) のなす角の余弦 $\cos \theta_i$ の値を求める．この 10 個の $\cos \theta$ の値を特徴量とする．

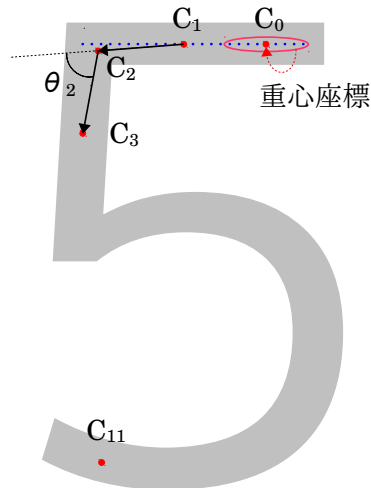


図 6.2: 特徴量の抽出方法

機械学習に用いる教師データは次のように作成した．まず，実験 1 にて得られた領域内に条件統制のため入力用の枠を書いた紙を用意し（図 6.3），机上にセロハンテープを用いて固定した．枠の大きさは縦 110mm×横 50mm であった．ただし，入力用の枠は，実験 2 において実座標と推定された座標のずれが少なく，スタイラスを用いて数字を書くにあたり無理のない位置に設けた．次に，0 から 9 までの数字が紙に印刷された手本を作成し（図 6.4），枠に合うよう切断して枠内に固定した．さらに，手本をスタイラスを用いて 1 数字あたり 20 回なぞり，推定された座標から特徴量を抽出し教師データとした．学習に手本を用いた理由は，条件統制および正確な学習データを作成するためである．

今回，機械学習のアルゴリズムとして SVM を用いた．また，実装には LIBSVM[CL11] を用いた．その際，SVM の種類を C-SVC，カーネルタイプを線形カーネル，gamma 値を 0.1，cost 値を 1 とした．

デバッグ用アプリケーションの画面表示

本手法のデバッグ用アプリケーションの実装を述べる．アプリケーションを起動すると，図 6.5a の画面が表示される．スタイラスを位置推定可能な領域に移動させると画面が青色に変化し，推定されたスタイラスの座標が桃色の点群にて表示される（図 6.5b）．スタイラスの動きを停止させると，数字の認識結果が更新される（図 6.5c）．

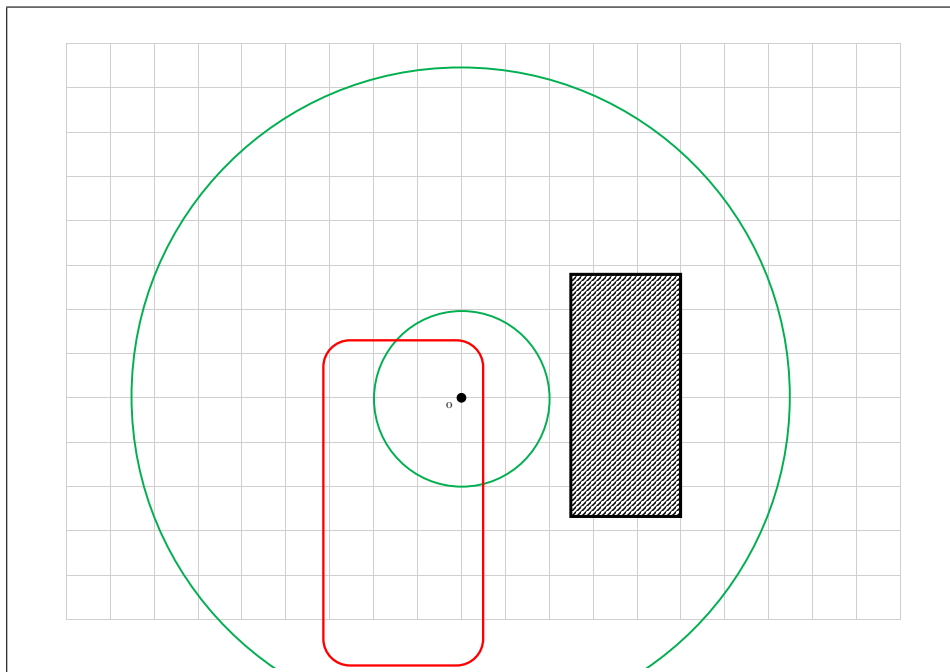


図 6.3: 教師データの収集に用いた紙

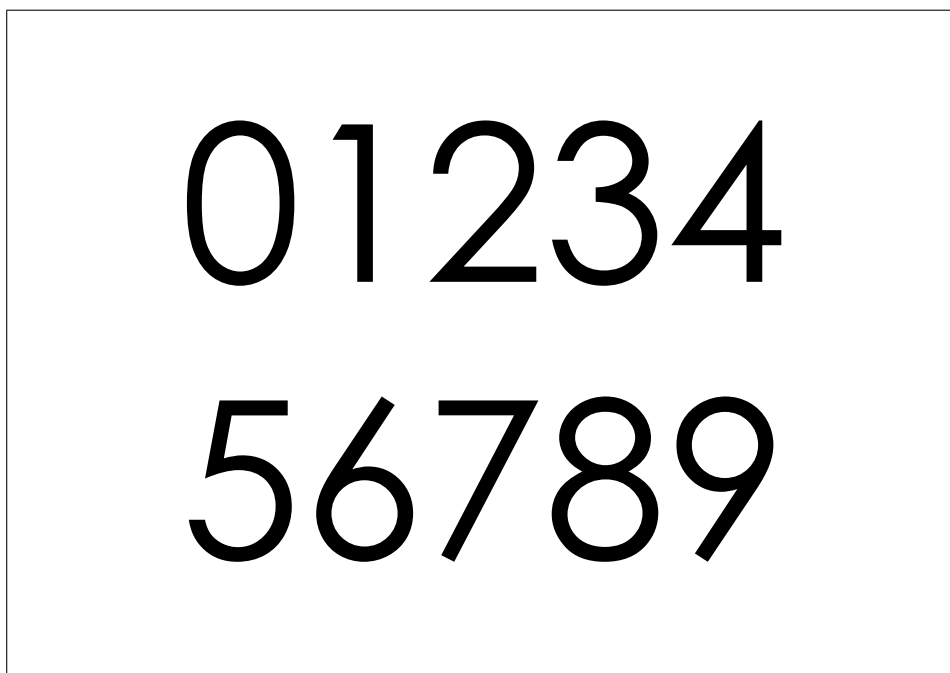


図 6.4: 作成した手本

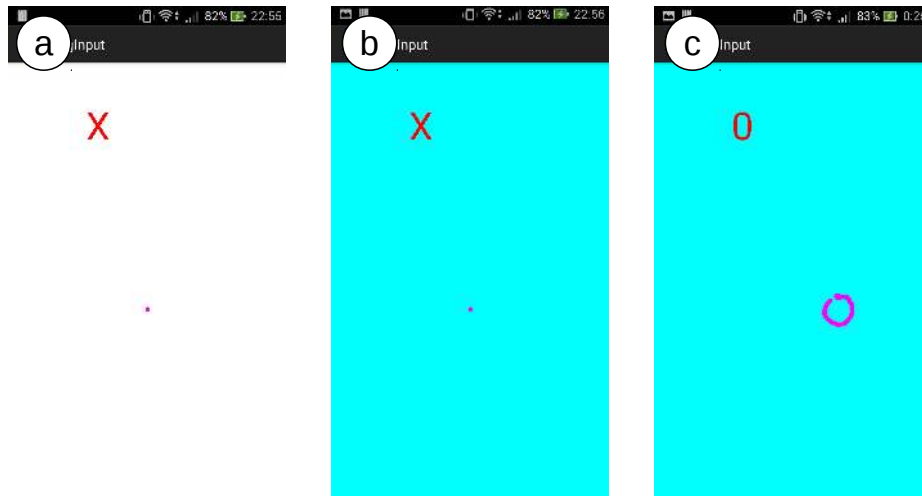


図 6.5: 数字認識部の画面表示

6.1.3 数字入力部の実装

数字認識部で認識した数字を任意のアプリケーションに対して入力する Input Method Editor (IME) を実装した。既存の IME は入力時に画面のおよそ半分をソフトウェアキーボードが占めるのに対し、本 IME はソフトウェアキーボードを表示しないため、コンテンツを画面の全域に表示することができる。本 IME のユーザは、IME を使用する前に数字認識部におけるデバッグ用アプリケーションを用いて数字入力を練習することができる。図 6.6 は、ユーザがサードパーティ製のメモアプリケーションに対して本 IME を用いて入力している様子である。

6.2 ペイントアプリケーション

ペイントアプリケーションにおいて、ユーザはキャンバス上に図形を描くことができる。本アプリケーションにおいては、ユーザは電磁石式スタイラスを用いるものとした。また、本アプリケーションの対象となるデバイスは、スマートフォン、タブレット、スマートウォッチである。

ユーザがスタイラスを用いて入力した時、本アプリケーションはキャンバス上のスタイラスに相当する位置に図形を描画する。描画する図形として、四角形、三角形、楕円形、自由線を用意した。図 6.7 にペイントアプリケーションのスクリーンショットを示す。ユーザは画面上に表示されている図形を指を用いてタップすることにより描画する図形を選択することができる。スタイラスが認識可能領域の中に入った時、視覚フィードバックとして水色のフレームが表示されるようにした。

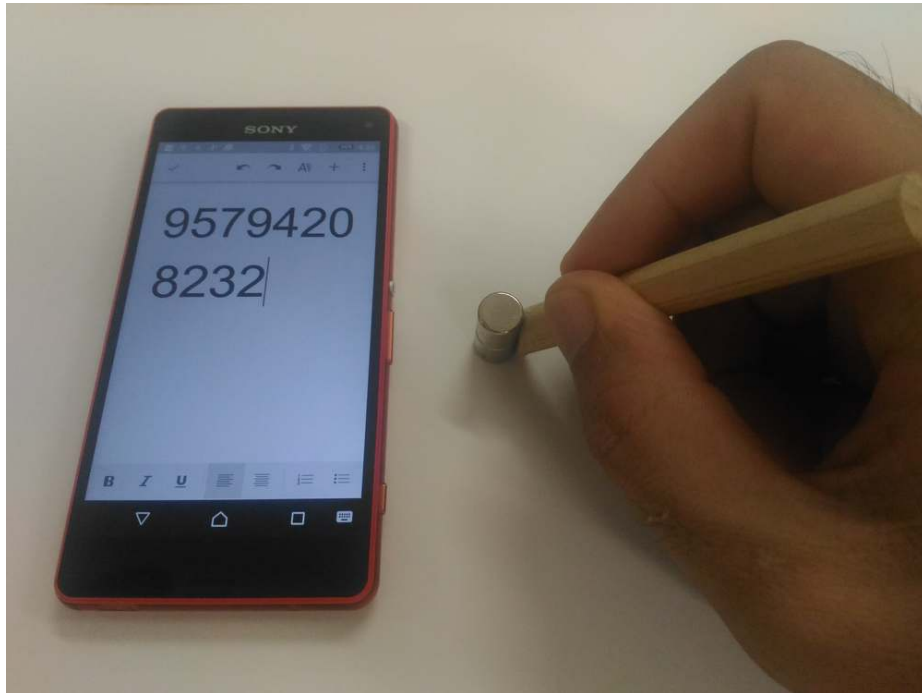


図 6.6: サードパーティ製メモアプリケーションに対する本 IME を用いた入力

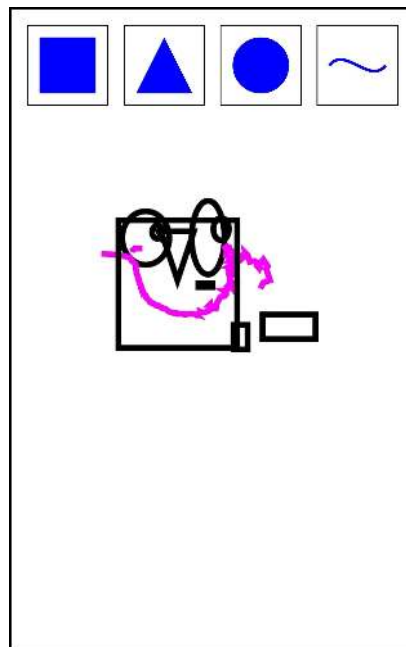


図 6.7: ペイントアプリケーションのスクリーンショット

6.3 距離測定アプリケーション

距離測定アプリケーションにおいて、ユーザはスタイラスの動いた距離を測定することができる。本アプリケーションにおいては、ユーザは電磁石式スタイラスを用いるものとした。また、本アプリケーションの対象となるデバイスは、スマートフォン、タブレットである。

本アプリケーションにおいて、ユーザはスタイラスの動いた距離（Length）および動いた軌跡の始点と終点の距離（Distance）を測定することができる。ここで、Lengthとは推定された一連の座標間のユークリッド距離の総和を、Distanceとは推定された一連の座標の最初の座標と最後の座標の間のユークリッド距離を表す（図 6.8）。本アプリケーションのスクリーンショットを図 6.9 に示す。本アプリケーションを用いることにより、ユーザは携帯情報端末近辺の物体の長さを測定することができる。たとえば、図 6.10 のようにユーザはスマートフォンの横に設置した手指の長さを計測することができる。

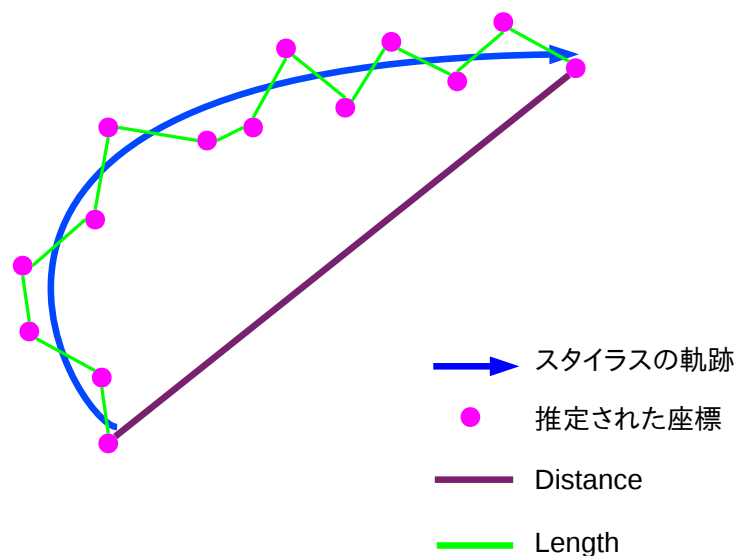


図 6.8: Length および Distance の計測方法

6.4 メニュー選択アプリケーション

小型の携帯情報端末、特にスマートウォッチにおいて、画面が小さいため多数のメニューを配置すると指を用いて押し分けにくいという問題が発生する [SRC05]。そこで、スマートウォッチ向けのメニュー選択アプリケーションを実装した。メニュー選択アプリケーションにおいて、ユーザはスマートウォッチにおけるメニュー選択を行うことができる。本アプリケー



図 6.9: 距離測定アプリケーションのスクリーンショット

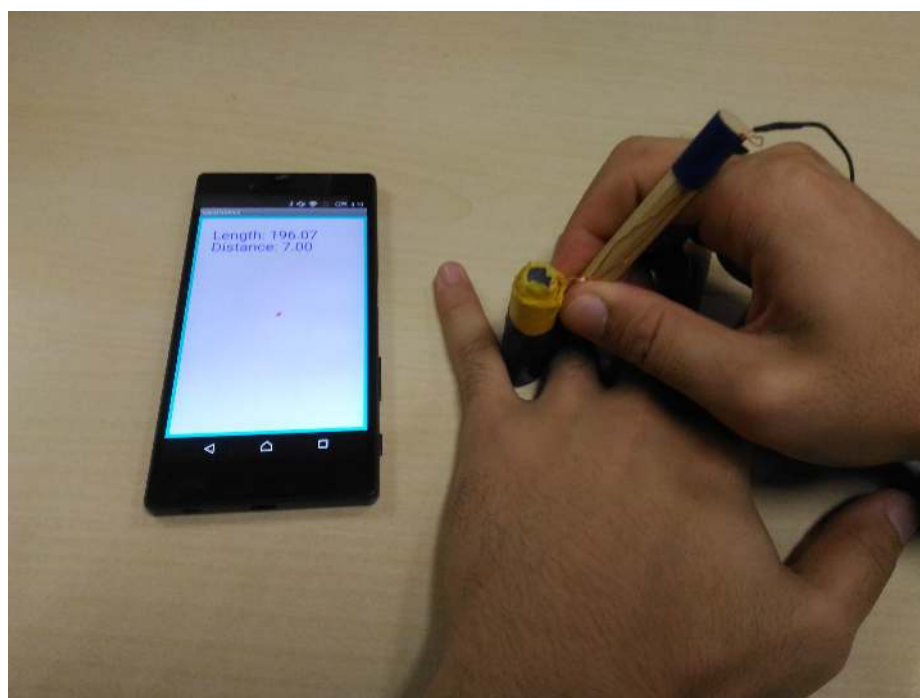


図 6.10: 距離測定アプリケーションを用いた手指の長さの計測



図 6.11: メニュー選択アプリケーションを用いたメニュー選択

ションにおいては、ユーザは永久磁石式スタイラスを用いるものとした。また、本アプリケーションの対象となるデバイスは、スマートウォッチである。

ユーザは画面を 5×5 に区切られた領域の 1 つを本手法を用いて選択することができる（図 6.11）。本アプリケーションのスクリーンショットを図 6.12 に示す。ユーザはポインタ（緑丸）をスタイラスを用いて動かし、目的の箇所の上にポインタを停留させると機能が実行される（赤いマス目）。本実装では、停留時間を 0.5 秒とした。これは、アンドロイドにおけるロングタップの時間と同一である。各領域は縦横およそ 5.7 mm であり、これは Google により提唱されているユーザインタフェースのガイドライン [Goob] におけるタッチするターゲットの最小サイズ（7–10 mm）よりも小さい。本手法を用いると、スマートウォッチの入力領域よりも広い領域において入力が可能であるため、小さいターゲットに対しても選択を行うことができる。

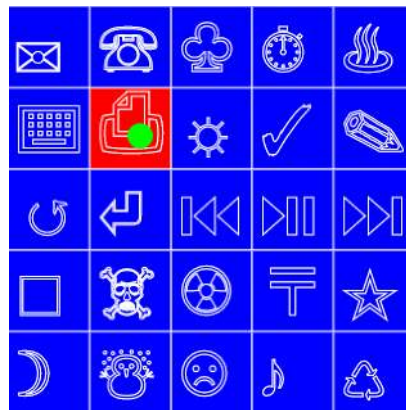


図 6.12: 5×5 のスマートウォッチ向けメニュー選択アプリケーション

第7章 被験者実験

提案手法の有用性およびユーザビリティの調査のため、被験者実験を行った。8名の情報分野の大学生・大学院生（年齢21–31歳（平均24歳，SD=2.9），男性8名，右利き7名，左利き1名）がボランティアとして実験に参加した（P1–P8）。すべての被験者は本手法に関する事前の知識を持っていなかった。実験には3.2節に示したスマートフォンおよび5章と同一の環境を用いた。実験の様子はビデオカメラを用いて録画された。また、本実験には電磁石式スタイラスを用いた。実験同意書を付録A.1に示す。

まず実験者は、被験者に対して本手法の使い方を説明した。説明の際に用いた説明書を付録A.2に示す。実験者は、入力のための領域を提示するために、5.2節にて得られた領域内に矩形を書いたA4用紙（図7.1）を机にテープを用いて固定した。被験者は、机に固定された紙上の指定された領域に対してスタイラスを用いて入力を行うよう指示された。はじめに、練習タスクとして被験者はスタイラスを用いて自由に入力を行った。この時被験者は、スタイラスの軌跡が正しくスマートフォン内に再現出来ていることを確認した。続いて、被験者はタスク1およびタスク2を行った。タスク中は、被験者は磁石が机に対して垂直になるようにスタイラスの木製部分を把持するように指示された。実験の様子を図7.2に示す。最後に、被験者にアンケート（付録A.3，A.4）に回答してもらった。実験者が説明を開始してから被験者がアンケートの回答を完了するまでおよそ30分要した。

7.1 タスク1

タスク1では、被験者が指定された図形を実際に描くことができるか調査を行った。

7.1.1 手順

タスク1では、被験者は画面に表示される図形を本手法を用いて描いた。実験用アプリケーションのスクリーンショットを図7.3に示す。実験が開始されると、画面中央に丸・四角・菱形のうち1つの図形がスマートフォンの画面内にランダム順にて表示された。また、画面左上に現在の試行数が表示された。被験者は、表示された図形を本手法を用いて描くよう求められた。描き終わると、画面右下の「SAVE」ボタンをタップし、次の図形を表示させた。1つの図形を描くことを1試行とし、3種類の図形をそれぞれ5回ずつ、計15試行を行った。

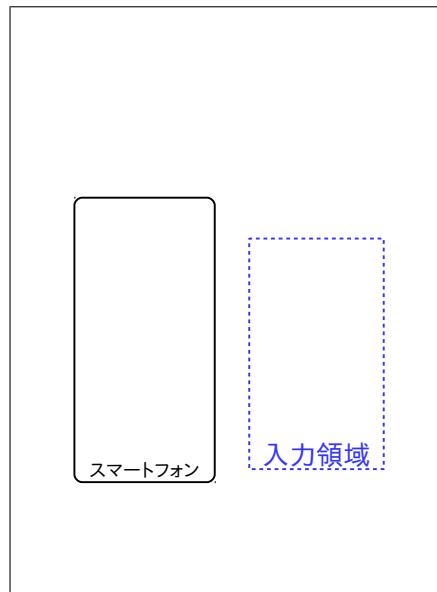


図 7.1: 入力のための領域を提示する紙



図 7.2: 実験の様子

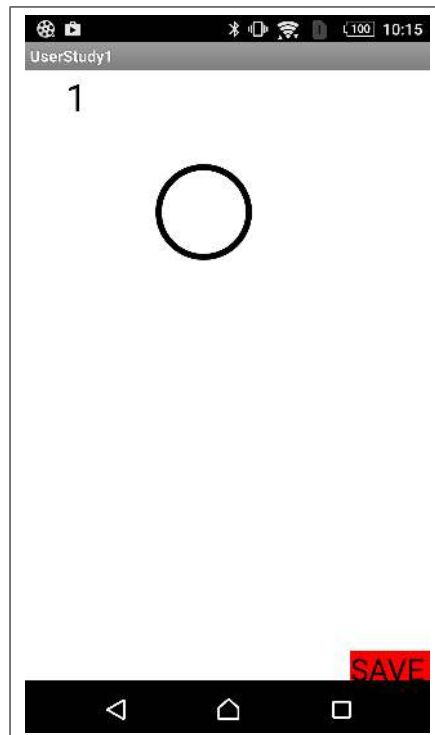


図 7.3: タスク 1 の画面

7.1.2 結果

タスク 1 における被験者の入力例を図 7.4–図 7.7 に示す。すべての被験者は指定された図形を入力した。指定された領域内にて入力を行った被験者は図 7.4 のように正確に図形を描くことができたが、被験者の中には、誤って指定された領域を超えて入力を行った者もあり、スマートフォンに近すぎる場所にて入力を行ってしまった場合は、スタイラスの座標が正しく推定できず、原点（画面の中心）に推定座標が飛んでしまった例も見られた（例：図 7.5）。

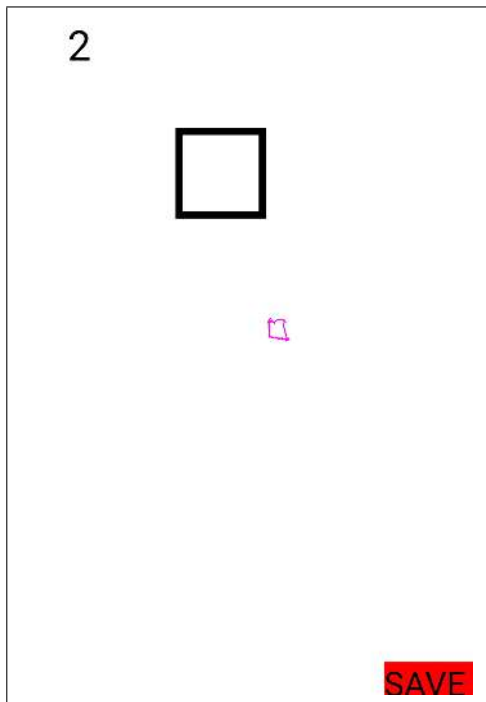


図 7.4: 四角形の結果の例 (P4)

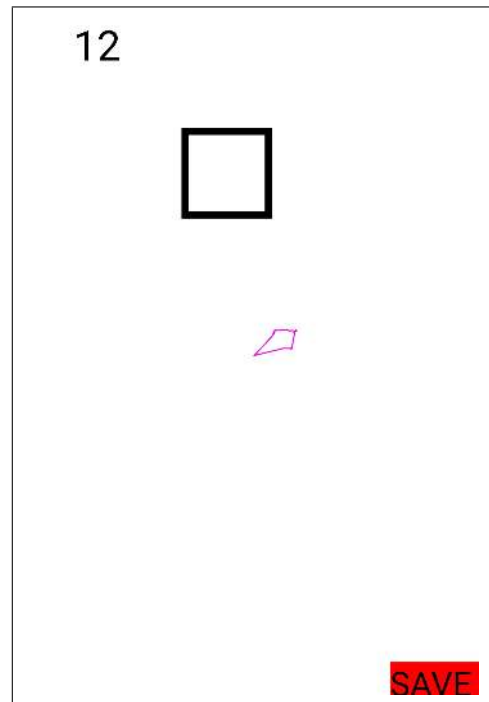


図 7.5: 四角形の結果の例 (P1)

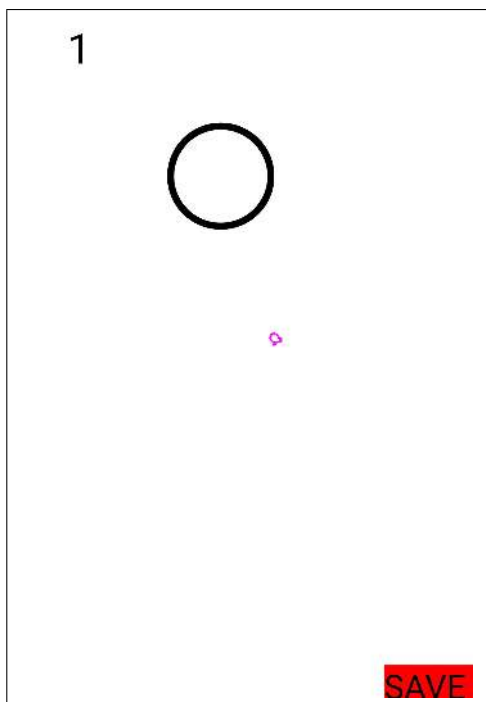


図 7.6: 丸の結果の例 (P3)

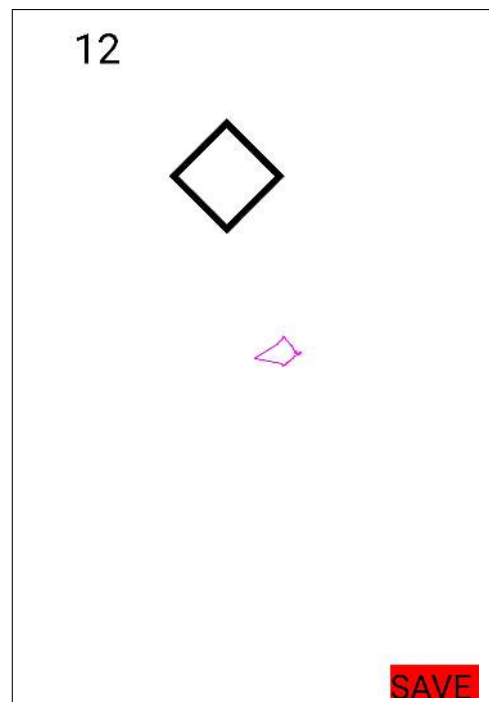


図 7.7: 菱型の結果の例 (P5)

7.2 タスク 2

タスク 2 においては，被験者が自由に図形を描くことができるか調査を行った．

7.2.1 手順

タスク 2 では，被験者に 6.2 節にて示したペイントアプリケーションを用いて自由に絵を描いてもらった．タスク 2 で用いたアプリケーションの実行画面を図 7.8 に示す．被験者はまず，画面上部の 4 つのアイコンのうち 1 つを指を用いてタップすることにより描く図形を選択した．次に被験者は本手法を用いて図形を描いた．このプロセスを絵が完成するまで繰り返した．絵が完成したら，被験者は右下の SAVE ボタンを指を用いてタップし，試行を完了させた．被験者は，1 つの絵を描くことを 1 試行とし，計 3 試行行った．

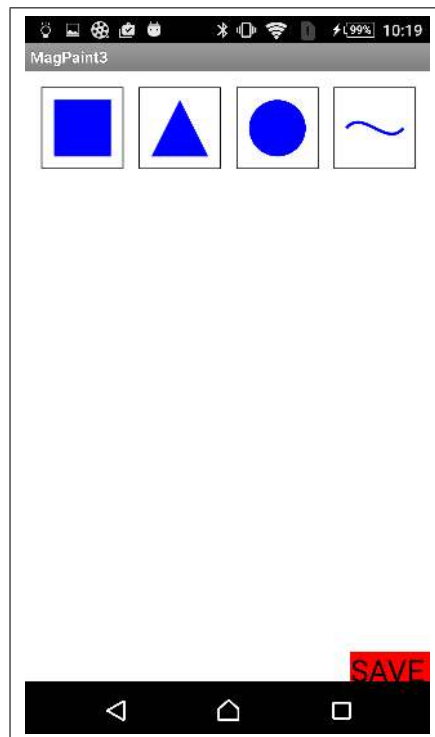


図 7.8: タスク 2 の画面

7.2.2 結果

タスク 2 における被験者の入力例を図 7.9–図 7.11 に示す．他に，鳥，顔，部屋，船，雪だるま，ゴリラを書いた被験者もいた．このように，被験者は様々な絵を描くことができた．

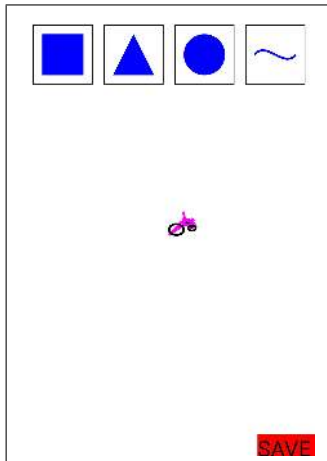


図 7.9: 車 (P3)

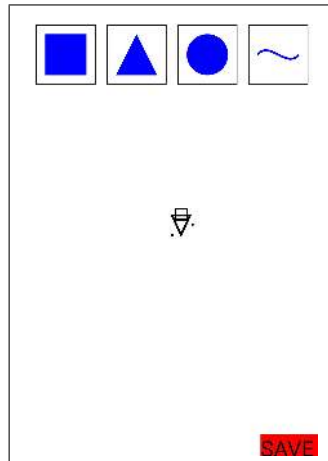


図 7.10: 矢印 (P3)

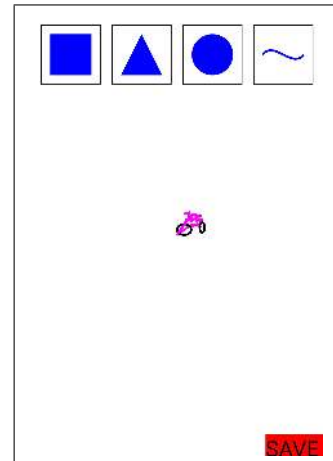


図 7.11: 自転車 (P6)

7.3 アンケート調査

最後に、被験者にアンケートおよび System Usability Scale (SUS) [Bro13] に答えてもらった。アンケート用紙を付録 A.3 に、SUS の用紙を付録 A.4 に示す。アンケートにて、本システムは使いやすかったか、容易に理解できたか、今後使いたいかを 5 段階のリッカート尺度 (1: 強く同意しない, 5: 強く同意する) および自由記述にて、本システムを何のために使いたいか、改善すべき点、感想を自由記述にて問うた。SUS は英語にて記述されており、被験者はすべて日本語を第一言語としていたので、古井らによる日本語版 [古井 14] を用いた。

アンケートのリッカート尺度での設問の結果を図 7.12 に示す。ただし、エラーバーは標準偏差を表す。図 7.12 から、本システムは容易に理解できる一方、使いやすいとは言えないことが分かった。自由記述欄にて、「磁石を垂直に把持するのが難しい」、「スタイラスを机と接触させるときにノイズが乗ったようになり座標がぶれてしまう」、等の意見が得られた。一方、「鉛筆やペンタブレットと同様に使用できるので操作方法は理解しやすかった」、「覚えることが非常に少なかった」等の意見や、「スマートフォンの画面に指紋を付けずに入力できるから便利である」という意見も得られた。

本システムを何のために使いたいかという設問にて、「メモを取る時」、「顔文字の入力」、「図形の描画・編集」等の意見が得られた。また、「携帯情報端末だけでなく計算機に対して本手法を適用し、Web ページの作成、すなわちスタイラスで描いたものを直接 Web ページに埋め込みたいときに使用したい」という意見も得られた。また、「SNS およびチャット等のアプリケーションにおいて自分の書いた絵を相手に送りたいときに使用したい」という意見も得られた。

本システムについて改善すべき点を問うた設問にて、「どのくらい強く押せば電磁石のスイッチが ON になるのかわからなかった」、「把持部分にグリップが欲しい」、「スマートフォンの画面と実際の入力領域のスケール感がわかりにくい」、等の意見が得られた。

本システムについての感想を問うた設問にて、「ペンタブレットよりも簡素な設備で同じことができるので便利だと感じた」、「直感的な操作ができたので初心者向けの手法だと思った」、「事前の学習が不要なので使いやすかった」、「スタイラスを把持する角度がシビアなので使いにくかった」、等の意見が得られた。

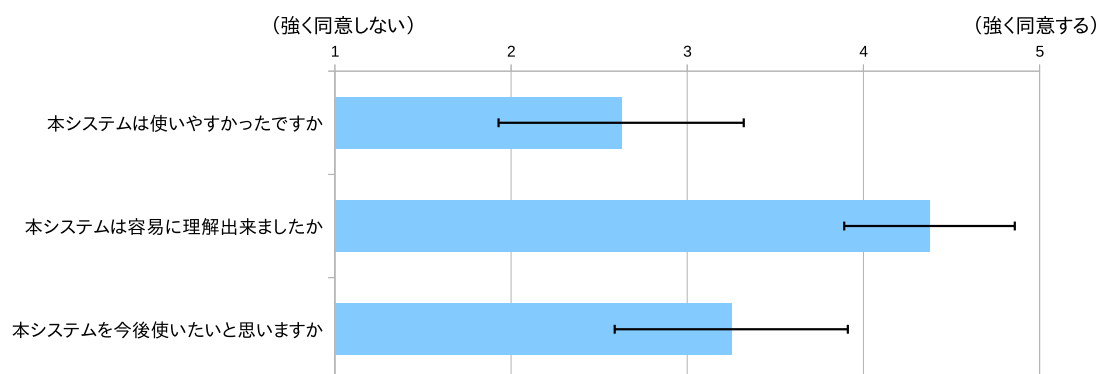


図 7.12: アンケートにおけるリッカート尺度の設問の結果

SUS のスコアは平均 56.875 であった (図 7.13)。SUS の各項目ごとの結果を図 7.14 に示す。ただし、エラーバーは標準偏差を表す。SUS のスコアは数字が大きいほど結果が良いと言える。SUS の各項目について、奇数番目の設問は数字が大きいほど結果が良く、偶数番目の設問は数字が小さいほど結果が良いと言える。

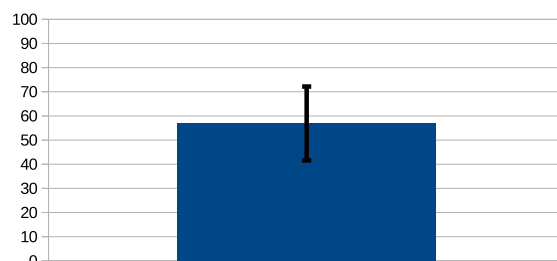


図 7.13: SUS の結果

7.4 考察

実験の録画より、実験を進めるにつれ被験者はスタイラスを正しく把持できていない状況が発生する場合があることが分かった。例を図 7.15 に示す。この状況が発生すると、磁石が垂直ではなくなるため正しく位置推定ができなくなる。この状況は、タスクをすすめるにつれ、スタイラスの持ち方が普段ペンを持つ持ち方に似てくることから発生すると思われる。

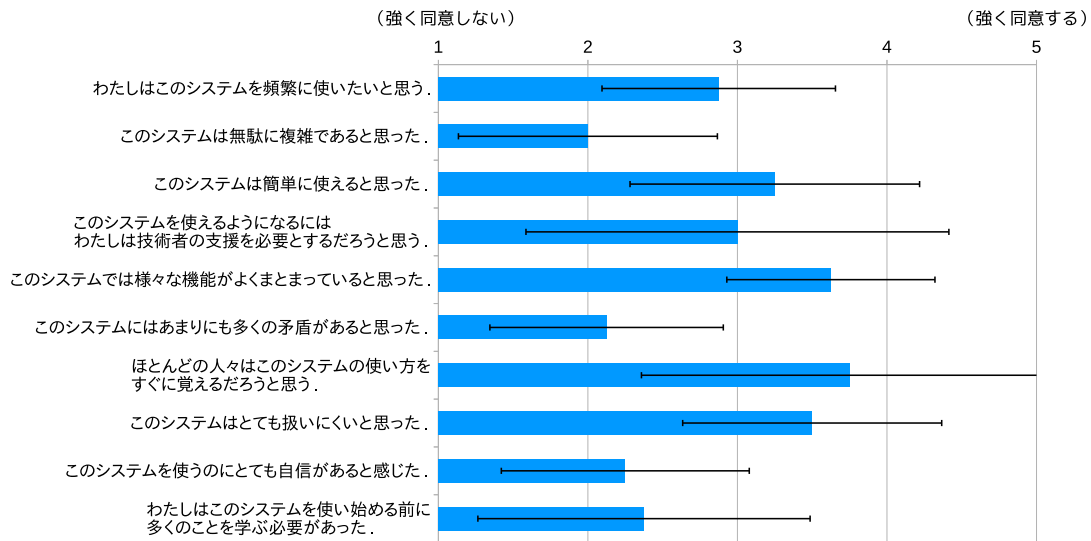


図 7.14: SUS の各項目ごとの結果

このことは、個人個人にあった角度のスタイラスを作成し、十分な練習をすることにより解決できると思われる。

アンケート調査からも、スタイラスを把持することが難しいという指摘を得た。普段ペンを把持する角度または普段使用するペンの太さは個人によって異なるので、このような指摘を得たのだと考えられる。本手法で用いるスタイラスは容易に作成することができるため、今後は、スタイラスを作成してもらうワークショップ等を開催することも考えている。個人にあったスタイラスを用いると、今回の結果も改善するものと考えられる。また、普段ペンを用いて紙に書くときは、指を動かして書くが、本手法を用いるときに指を動かすと、磁石を垂直に保つことが難しくなる。したがって、本手法を用いるときは指を動かすのではなく、手全体を動かすとよいと考えられる。

アンケート調査にて得られた、スタイラスと机を接触させる瞬間にノイズが乗ったように座標がぶれてしまう問題は、認識したストロークの最初と最後を描画しないことにより解決可能である。このノイズは、コイルに印加する電圧を変化させた時に発生する逆起電力によるものと考えられる。したがって、このノイズはソフトウェアにて除去するほかないと考えられる。

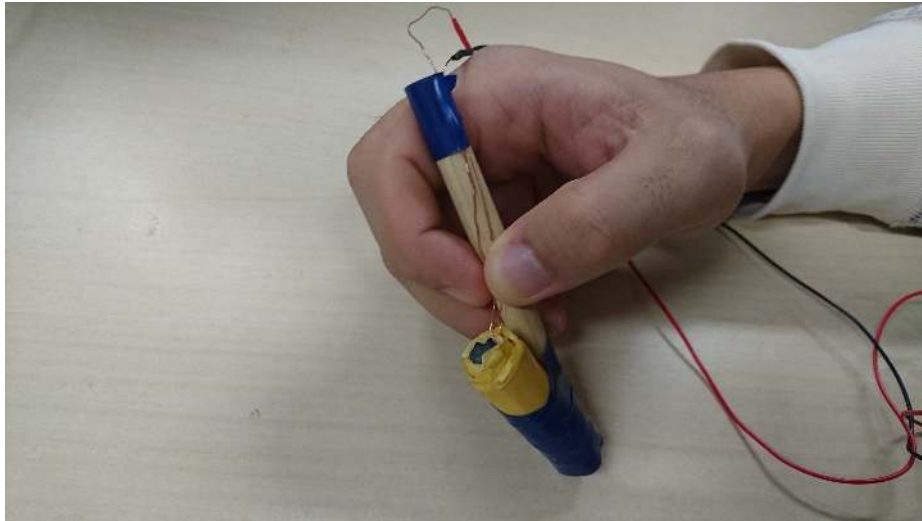


図 7.15: 誤った把持姿勢

第8章 議論

本章では，本手法に関して議論する．

8.1 机の材質

本手法を用いる上で，入力面の材質に制限がある．磁性体は磁力線に影響を及ぼすので，入力面に鉄等の磁性体がいわれている場合，センサ値から正確な磁石の位置を推定できない．この問題は，磁性体の含まれていない机を用いることにより，解決可能である．また，5章および7章における実験においては，プラスチック製の机を用いた．

さらに，本手法は携帯情報端末向けの手法であるため，携帯して使用することが想定される．そのような環境においては，入力を行う際に様々な材質の入力面があることが想定されるため，一部に磁性体が含まれていても他の部分を使用すれば良いので問題とならないと考えられる．

8.2 位置推定可能範囲

5.1.2節にて述べたとおり，本手法を用いてスタイラスの位置を推定することのできる範囲は限られている．強力な磁石が磁気センサの近傍にある場合，センサが飽和しセンサから正確な値を取得できない．このことは，本手法が磁気センサの近傍においては使用できないことを意味する．また，磁石がセンサから遠くにある場合，地磁気による影響が相対的に大きくなる．これにより，座標の推定結果がずれる問題および，座標が推定できない問題が生じる．ただし，正確な位置推定が可能な領域は入力を行う上で十分であると考えられるため，これらは実用上問題にならないと考える．

8.3 ペンタブレットとの比較

本手法はペンタブレットを用いた入力と類似しているため，比較を行う．ペンタブレットとは，特殊な板状の入力面に対してスタイラスを用いて入力を行うデバイスである（例：図8.1¹）．ペンタブレットに用いられる入力面は特別に用意されたものである必要がある一方，本手法にて用いられる入力面には磁性体を含まない任意のもの（例：机，手の甲）を用いる

¹WACOM 社製 CTH-300

ことができる。ペンタブレットに用いられる入力面は、電源を供給する必要があるが、本手法に用いられる入力面には電源を供給する必要がある。ペンタブレットに用いられるスタイラスおよび本手法にて用いられるスタイラスは、電源を供給する必要があるものおよび電源を供給する必要がないものが存在する。



図 8.1: ペンタブレットの例

8.4 永久磁石式スタイラスの接地判定

電磁石式スタイラスを作成した理由は、永久磁石式スタイラスを用いるとユーザが入力状態にあるかを判別できないためであった。永久磁石式スタイラスが入力状態にあるかを判別することができれば、電磁石式スタイラスは不要になり、スタイラスに対して電源を供給する必要がなくなるため、より持ち運びやすいスタイラスを作成することができると考えられる。ユーザが入力状態にあるかどうかは、スタイラスが入力面に接地しているかどうかをもって判断することができる。

この判断のため、携帯情報端末に搭載されたマイクを用いる方法を検討した。この方法では、携帯情報端末に搭載されたマイクを用いて、スタイラスが入力面にこすれる音を取得する。ただしこの方法では、スタイラスが入力面にこすれるときに十分な音が発生しなければならず、また周囲の騒音に対してロバストでないという欠点がある。

別の方法として、センサ値の取得間隔を短くする方法を検討した。ViBand[LXH16] という

研究において、加速度センサの取得間隔を短くすることにより、今まで取得できなかった情報を取得できるようになったことが報告された。本手法においても、磁気センサの取得間隔を短くすることにより、今まで取得できなかったスタイラスの接地情報を取得できる可能性がある。

8.5 複数端末を用いたインタラクション

近年、1人の人が複数の携帯情報端末を持ち歩くことがある（例：タブレットおよびスマートフォン、スマートフォンおよびスマートウォッチ）。また、複数人でのインタラクションを想定した場合、複数の携帯情報端末が存在することが想定される。このように、複数の携帯情報端末が存在する環境にて、それらの端末を連携させ、複数のセンサを用いてスタイラスの位置を取得する方法を検討した。2個以上の3軸磁気センサがあると、取得できる自由度が増加するため、3次元における磁石の位置を推定することができる[YHR16]。したがって、複数の端末を連携させることによりスタイラスの3次元位置を取得できる可能性がある。

8.6 設計目標について

3.1節にて掲げた本手法の設計上の目標について議論する。3.1節の目標は次のものであった。

- 携帯情報端末に対する一般的な入力手法と同時に使用できる。
- 携帯情報端末のタッチパネルよりも広い範囲において入力を行う。
- 追加のセンサを必要しない。
- 容易に持ち運びできるスタイラスを用いる。
- スタイラスの位置をリアルタイムに推定することができる。

第1項目について、磁石を取り付けたスタイラスを用いて携帯情報端末の画面外の平面に対して入力を行うことにより目標を達成した。たとえば、ペイントアプリケーションにおいてはタッチパネルへのタッチにより描く図形を選択し、本手法を用いて図形を描くこととした。

第2項目について、5章にて述べた実験より、本手法はこの目標を達成していることが示された。

第3項目について、携帯情報端末に内蔵された磁気センサのみを用いることにより目標を達成した。この目標を達成するにあたり、携帯情報端末の磁気センサと同一平面上に磁石がN極を下にして存在するという仮定を置いた。このことはスタイラスの可動領域を減らすことにつながった。さらにスタイラスの可動領域を増やすためには、8.5節にて述べた方法または追加のセンサを用いる必要がある。ただし、追加のセンサを用いる方法は、本研究の趣旨とそれるため行わなかった。

第4項目について、4章にて述べたとおり、永久磁石式スタイラスは14.9g、電磁石式スタイラスは53.7gの重さがあった。これらは、現在の携帯情報端末（例: Sony Xperia Z5（153g）、Sony Smartwatch（75g））と比較しても、持ち運びやすいと言える。

第5項目について、できるだけ簡潔なアルゴリズムを用いることにより目標を達成した。すなわち、位置推定を、センサ値の取得間隔である20msより早く終了させられるように実装した。

以上より、本実装は3.1節にて掲げた目標を達成していることがわかる。

第9章 まとめ

本論文では、磁石付きスタイラスを用いる携帯情報端末向け入力手法を示した。本手法では、ユーザは携帯情報端末の周囲の平面に対して、磁石付きスタイラスを用いて入力を行う。すなわち、本手法は携帯情報端末に対して入力を行うための領域を画面外へと拡張する。ユーザは本手法を用いることにより、計算機に対してペンタブレットを用いて入力する時と似た方法にて、携帯情報端末に対して入力を行うことができる。本手法は、携帯情報端末に搭載された磁気センサ1個のみを用いてリアルタイムにスタイラスの座標を推定する。したがって、ユーザは携帯情報端末に対して追加のセンサを取り付ける必要がないという利点がある。

本手法を用いたアプリケーションとして、数字入力アプリケーション、ペイントアプリケーション、距離測定アプリケーション、メニュー選択アプリケーションを示した。ユーザは数字入力アプリケーションを用いて任意の他のアプリケーションに対して数字を入力することができる。ペイントアプリケーションでは、ユーザは特定の図形または自由線をキャンバス上に描くことができる。距離測定アプリケーションでは、ユーザはスタイラスの動いた距離を測ることができる。メニュー選択アプリケーションでは、ユーザはスマートウォッチ上の5×5のメニューを選択することができる。

本手法の有用性を調査するため、位置推定可能な範囲の測定、推定座標の精度、図形をなぞる精度をはかる実験を行った。結果、位置推定可能な範囲は磁気センサを中心として半径15 cmの円内かつ半径4 cmの円外であることが分かった。推定座標は平均8.03 mmの誤差があることが分かった。図形をなぞる精度を測る実験では、3.49 mmから4.29 mmの誤差があることが分かった。

被験者実験では、指定された図形を描くタスクおよび自由に図形を書くタスクを行い、被験者が指定された図形のみでなく様々な図形を描くことができた。

謝辞

本研究を行うにあたり，指導教員である志築文太郎先生には，研究の進め方，論文の執筆方法，研究発表の姿勢など多くのご指導と助言をいただきました．また，高橋伸先生，嵯峨智先生には，研究室内の発表練習において，チーム内の議論にはなかった新たな視点から有益な助言をいただきました．先生方に心より感謝申し上げます．

また，研究室の皆様には，研究活動と日常生活の両面において大変お世話になりました．特に WAVE チームの皆様には研究テーマの決定からプロトタイプの実装，論文の執筆まで数多くのアドバイスやアイデアをいただきました．心より感謝いたします．

参考文献

- [ACE] ACE CAD Enterprise Co., Ltd. ACE CAD Enterprise Co., Ltd. - DigiMemo A402. <http://www.acecad.com.tw/index.php/products/digital-notepad-with-memory/digimemo-a402> (accessed 2016-12-17).
- [BIH08] Alex Butler, Shahram Izadi, and Steve Hodges. SideSight: Multi-“touch” interaction around small devices. In *Proceedings of the 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '08, pp. 201–204, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [Bro13] John Brooke. SUS: A retrospective. *Journal of Usability Studies*, Vol. 8, No. 2, pp. 29–40, February 2013.
- [CL11] Chih-Chung Chang and Chih-Jen Lin. LIBSVM: A library for support vector machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, Vol. 2, No. 3, pp. 27:1–27:27, May 2011.
- [CLT⁺13] Liwei Chan, Rong-Hao Liang, Ming-Chang Tsai, Kai-Yin Cheng, Chao-Huai Su, Mike Y. Chen, Wen-Huang Cheng, and Bing-Yu Chen. FingerPad: Private and subtle interaction using fingertips. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pp. 255–260, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [CLWP13] Ke-Yu Chen, Kent Lyons, Sean White, and Shwetak Patel. uTrack: 3D input using two magnetic sensors. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pp. 237–244, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [EAK13] Abdallah El Ali and Hamed Ketabdar. Magnet-based around device interaction for playful music composition and gaming. *International Journal of Mobile Human-Computer Interaction*, Vol. 5, No. 4, pp. 56–80, October 2013.
- [Gooa] Google. Google Cardboard – Google VR. <https://vr.google.com/cardboard/> (accessed 2016-12-17).

- [Goob] Google. Metrics & keylines - layout - material design guidelines. <https://material.io/guidelines/layout/metrics-keylines.html> (accessed 2016-12-17).
- [GOP⁺16] Jens Grubert, Eyal Ofek, Michel Pahud, Matthias Kranz, and Dieter Schmalstieg. GlassHands: Interaction around unmodified mobile devices using sunglasses. In *Proceedings of the 2016 ACM on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '16, pp. 215–224, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [Gro] Anoto Group. アノトペン. <http://www.anoto.co.jp/> (accessed 2016-12-17).
- [HAW13] Sungjae Hwang, Myungwook Ahn, and Kwang-yun 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*, UIST '13, pp. 411–416, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [HBAW13] Sungjae Hwang, Andrea Bianchi, Myungwook Ahn, and Kwangyun Wohn. MagPen: Magnetically driven pen interactions on and around conventional smartphones. In *Proceedings of the 15th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '13, pp. 412–415, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [HBW11] Chris Harrison, Hrvoje Benko, and Andrew D. Wilson. Omnitouch: Wearable multitouch interaction everywhere. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, pp. 441–450, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [HH08] Chris Harrison and Scott E. Hudson. Scratch Input: Creating large, inexpensive, unpowered and mobile finger input surfaces. In *Proceedings of the 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '08, pp. 205–208, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [HH09] Chris Harrison and Scott E. Hudson. Abracadabra: Wireless, high-precision, and unpowered finger input for very small mobile devices. In *Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '09, pp. 121–124, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [HMT⁺15] Jiawei Huang, Tsuyoshi Mori, Kazuki Takashima, Shuichiro Hashi, and Yoshifumi Kitamura. IM6D: Magnetic tracking system with 6-DOF passive markers for dexterous 3D interaction and motion. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 34, No. 6, pp. 217:1–217:10, October 2015.

- [HPB⁺14] Ken Hinckley, Michel Pahud, Hrvoje Benko, Pourang Irani, François Guimbretière, Marcel Gavrilu, Xiang ‘Anthony’ Chen, Fabrice Matulic, William Buxton, and Andrew Wilson. Sensing techniques for tablet+stylus interaction. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST ’14, pp. 605–614, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [HPSH00] Ken Hinckley, Jeff Pierce, Mike Sinclair, and Eric Horvitz. Sensing techniques for mobile interaction. In *Proceedings of the 13th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST ’00, pp. 91–100, New York, NY, USA, 2000. ACM.
- [HSYH07] Xinying Han, Hiroaki Seki, Kamiya Yochitsugu, and Masatoshi Hikizu. Wearable handwriting input device using magnetic field. In *SICE, the Society of Instrument and Control Engineers, 2007 Annual Conference*, pp. 365–368, Sept 2007.
- [HTM11] Chris Harrison, Desney Tan, and Dan Morris. Skinput: Appropriating the skin as an interactive canvas. *Communications of the ACM*, Vol. 54, No. 8, pp. 111–118, August 2011.
- [Inc] Apple Inc. iPad Pro - Apple Pencil - Apple (日本) . <http://www.apple.com/jp/apple-pencil/> (accessed 2016-12-17).
- [KLLC16] Han-Chih Kuo, Rong-Hao Liang, Long-Fei Lin, and Bing-Yu Chen. GaussMarbles: Spherical magnetic tangibles for interacting with portable physical constraints. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’16, pp. 4228–4232, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [KMNR12] Hamed Ketabdar, Peyman Moghadam, Babak Naderi, and Mehran Roshandel. Magnetic signatures in air for mobile devices. In *Proceedings of the 14th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services Companion*, MobileHCI ’12, pp. 185–188, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [KS14] Azusa Kadamura and Itiro Siio. MagNail: Augmenting nails with a magnet to detect user actions using a smart device. In *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC ’14, pp. 135–136, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [KYJ⁺10] Hamed Ketabdar, Kamer Ali Yukse, Amirhossein Jahnbeke, Mehran Roshandel, and Daria Skirpo. MagiSign: User identification/authentication based on 3D around device magnetic signatures. In *The Fourth International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies*, UBICOMM 2010, pp. 31–34. IAREA, 2010.

- [KYR10] Hamed Ketabdar, Kamer Ali Yüksel, and Mehran Roshandel. MagiTact: Interaction with mobile devices based on compass (magnetic) sensor. In *Proceedings of the 15th International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '10, pp. 413–414, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [LCS⁺12] Rong-Hao Liang, Kai-Yin Cheng, Chao-Huai Su, Chien-Ting Weng, Bing-Yu Chen, and De-Nian Yang. GaussSense: Attachable stylus sensing using magnetic sensor grid. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 319–326, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [LCT⁺14] Rong-Hao Liang, Liwei Chan, Hung-Yu Tseng, Han-Chih Kuo, Da-Yuan Huang, De-Nian Yang, and Bing-Yu Chen. GaussBricks: Magnetic building blocks for constructive tangible interactions on portable displays. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 3153–3162, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [LH11] Jakob Leitner and Michael Haller. Geckos: Combining magnets and pressure images to enable new tangible-object design and interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pp. 2985–2994, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [LKC⁺14] Rong-Hao Liang, Han-Chih Kuo, Liwei Chan, De-Nian Yang, and Bing-Yu Chen. GaussStones: Shielded magnetic tangibles for multi-token interactions on portable displays. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pp. 365–372, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [LSW⁺12] Rong-Hao Liang, Chao-Huai Su, Chien-Ting Weng, Kai-Yin Cheng, Bing-Yu Chen, and De-Nian Yang. GaussBrush: Drawing with magnetic stylus. In *SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies*, SA '12, pp. 11:1–11:2, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [LXC⁺14] Gierad Laput, Robert Xiao, Xiang ‘Anthony’ Chen, Scott E. Hudson, and Chris Harrison. Skin Buttons: Cheap, small, low-powered and clickable fixed-icon laser projectors. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pp. 389–394, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [LXH16] Gierad Laput, Robert Xiao, and Chris Harrison. ViBand: High-fidelity bio-acoustic sensing using commodity smartwatch accelerometers. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 321–333, New York, NY, USA, 2016. ACM.

- [MMM⁺15] Asier Marzo, Richard McGeehan, Jess McIntosh, Sue Ann Seah, and Sriram Subramanian. Ghost Touch: Turning surfaces into interactive tangible canvases with focused ultrasound. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Interactive Tabletops & Surfaces, ITS '15*, pp. 137–140, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [NWI14] Takehiro Niikura, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Anywhere Surface Touch: Utilizing any surface as an input area. In *Proceedings of the 5th Augmented Human International Conference, AH '14*, pp. 39:1–39:8, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [NYAT95] Shinji Nabeshima, Shinichirou Yamamoto, Kiyoshi Agusa, and Toshio Taguchi. MEMO-PEN: A new input device. In *Conference Companion on Human Factors in Computing Systems, CHI '95*, pp. 256–257, New York, NY, USA, 1995. ACM.
- [Pham13] Pham Thanh Son, 高橋伸, 田中二郎. G-Shark: 磁石を利用した携帯端末 3 次元入力インタフェース. *インタラクシオン 2013*, pp. 787–789, 2013. 情報処理学会.
- [SR15] Boris Smus and Christopher Riederer. Magnetic input for mobile virtual reality. In *Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers, ISWC '15*, pp. 43–44, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [SRC05] Katie A. Siek, Yvonne Rogers, and Kay H. Connelly. Fat finger worries: How older and younger users physically interact with PDAs. In *Proceedings of the 2005 IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction, INTERACT '05*, pp. 267–280, Berlin, Heidelberg, 2005. Springer-Verlag.
- [SSMKS12] Alireza Sahami Shirazi, Peyman Moghadam, Hamed Ketabdar, and Albrecht Schmidt. Assessing the vulnerability of magnetic gestural authentication to video-based shoulder surfing attacks. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '12*, pp. 2045–2048, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [SSP⁺14] Jie Song, Gábor Sörös, Fabrizio Pece, Sean Ryan Fanello, Shahram Izadi, Cem Keskin, and Otmar Hilliges. In-air gestures around unmodified mobile devices. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '14*, pp. 319–329, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [VG16] Rohan S. Vijay and Sidhant Goyal. MagnetoWear: A magnetic wearable device to interact with the smartphone to perform personalized actions. In *Proceedings of the TEI '16: Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, TEI '16*, pp. 597–602, New York, NY, USA, 2016. ACM.

- [WLM⁺15] Edward J. Wang, Tien-Jui Lee, Alex Mariakakis, Mayank Goel, Sidhant Gupta, and Shwetak N. Patel. MagnifiSense: Inferring device interaction using wrist-worn passive magneto-inductive sensors. In *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '15, pp. 15–26, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [XGF15] Haijun Xia, Tovi Grossman, and George Fitzmaurice. NanoStylus: Enhancing input on ultra-small displays with a finger-mounted stylus. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, UIST '15, pp. 447–456, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [YHR15] Sang Ho Yoon, Ke Huo, and Karthik Ramani. Tmotion: Embedded 3D mobile input using magnetic sensing technique. In *Adjunct Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, UIST '15 Adjunct, pp. 71–72, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [YHR16] Sang Ho Yoon, Ke Huo, and Karthik Ramani. TMotion: Embedded 3D mobile input using magnetic sensing technique. In *Proceedings of the TEI '16: Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '16, pp. 21–29, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [YZHR16] Sang Ho Yoon, Yunbo Zhang, Ke Huo, and Karthik Ramani. TRing: Instant and customizable interactions with objects using an embedded magnet and a finger-worn device. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 169–181, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [ZBR⁺16] Cheng Zhang, AbdelKareem Bedri, Gabriel Reyes, Bailey Bercik, Omer T. Inan, Thad E. Starner, and Gregory D. Abowd. TapSkin: Recognizing on-skin input for smartwatches. In *Proceedings of the 2016 ACM on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '16, pp. 13–22, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [ZZLH16] Yang Zhang, Junhan Zhou, Gierad Laput, and Chris Harrison. SkinTrack: Using the body as an electrical waveguide for continuous finger tracking on the skin. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 1491–1503, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [ぺん] ぺんてる株式会社. デジタルペン | airpenpocket エアペンポケット | ペンてる株式会社. <http://www.airpen.jp/> (accessed 2016-12-17).
- [押木 03] 押木秀樹, 近藤聖子, 橋本愛. 望ましい筆記具の持ち方とその合理性および検証方法について. 書写書道教育研究, pp. 11–20, 2003. 全国大学書写書道教育学会.

- [株式] 株式会社ウルトラエックス. **MVPen**. <http://www.uxd.co.jp/product/peripheral/mvpen/mvpen.html> (accessed 2016-12-17).
- [古井 14] 古井陽之助, 前田環貴, 松本誠義. 講義画面の自動連続キャプチャを行う講義・学習支援システムとその評価実験. 火の国情報シンポジウム 2014, Vol. 8, pp. 1–8, 2014.
- [今井 07] 今井政敬. 端末装置及びそのプログラム. 特願第 2007-295106 号, November 2007. 特開第 2009-122887 号.
- [山本 13] 山本涼太, 宮下芳明. イヤホンを用いたスマートフォンの操作と個人認証. インタラクシオン 2013, pp. 626–631, 2013. 情報処理学会.
- [門村 14] 門村亜珠沙, 椎尾一郎. MagNail: 爪装着型磁石を用いたモバイル端末インタラクシオン. 第 22 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2014), pp. 79–84. 情報処理学会, December 2–4 2014.
- [鈴木 12] 鈴木文佳, 志築文太郎, 田中二郎. 画面外におけるスタイラスの動作を用いるペイントアプリケーション. Technical Report 19, 筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻, 筑波大学システム情報系, 筑波大学システム情報系, jan 2012.

著者論文リスト

本論文に関する論文

査読付き国際会議論文

Tetsuya Abe, Buntarou Shizuki, and Jiro 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 (CHI EA '16). 2016. ACM, New York, NY, USA, pp.2395-2402.

査読なし国内会議論文

阿部 哲也, 志築 文太郎, 田中 二郎. スマートフォンの周囲を入力面とする磁気に基づく数字入力手法. 情報処理学会第 77 回全国大会講演論文集, Vol.4, 情報処理学会, 2015 年 3 月, pp.295-296.

その他の論文

査読付き国内論文誌論文

青山 周平, 阿部 哲也, 志築 文太郎, 田中 二郎. 親指の移動量推定に基づくスマートウォッチの片手操作手法. コンピュータソフトウェア, Vol. 34. (採録決定済)

吉田 有花, 鶴田 真也, 池川 航史, 阿部 哲也, 志築 文太郎, 田中 二郎. 静電容量に基づくブロックシステム. コンピュータソフトウェア, Vol. 34. (採録決定済)

査読付き国際会議論文

Akira Ishii, Tetsuya Abe, Hiroyuki Hakoda, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. Evaluation of a System to Analyze Long-Term Images from a Stationary Camera, pp. 275–286. Springer International Publishing, Cham, 2016.

Koshi Ikegawa, Masaya Tsuruta, Tetsuya Abe, Arika Yoshida, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. 2016. Lightweight Capacitance-based Block System for 3D Space Interaction. In Proceedings of the 2016 ACM on Interactive Surfaces and Spaces (ISS '16). 2016. ACM, New York, NY, USA, 307-312.

査読付き国内会議論文

青山 周平, 阿部 哲也, 志築 文太郎, 田中 二郎. ThumbSlide: 親指スライドジェスチャによるスマートウォッチ操作手法. 第23回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ論文集, 日本ソフトウェア科学会, 2015年12月. pp.79-84.

査読なし国内会議論文

阿部 哲也, 箱田 博之, 石井 晃, 志築 文太郎, 田中 二郎. 長期定点カメラ映像の分析支援システムの評価. 情報処理学会研究報告, Vol.2015-HCI-164-9, 情報処理学会, 2015年8月, pp.1-7.

付 録 A 被験者実験にて用いた実験同意書，説明書，アンケート用紙

7 章にて示した被験者実験において使用した実験同意書，実験に関する説明書，およびアンケート用紙を示す．

A.1 実験同意書

スマートフォン向け入力手法に関する評価実験のお願い

文責: 阿部哲也

この度は実験にご協力いただき、ありがとうございます。

- ☐ 本実験の目的は、スマートフォン向け入力手法を評価することです。
- ☐ 実験中に、写真および動画の撮影を行う場合がありますが、これは実験の様子を撮影するために行い、その写真および動画を発表において利用する場合は、本人の確認を得た上で、研究目的においてのみ利用いたします。
- ☐ この実験によって得られたデータは、個人が特定できないように処理いたします。これらのデータを発表において利用する場合は、研究目的においてのみ利用いたします。
- ☐ 実験への参加は、協力者の自由意思によるものであり、実験への参加を随時拒否・撤回することができます。
- ☐ 学内外において発表する論文に実験内容を利用することがありますが、いかなる場合においても協力者のプライバシーは保全されます。

平成 年 月 日

所属 _____ 署名 _____

説明者 所属 _____ 署名 _____

A.2 実験に関する説明書

実験に関する説明

文責: 阿部哲也

磁気に基づく携帯情報端末向け入力手法(以下, 本手法)を用いて, スマートフォンに対する入力を行っていただきます。

実験手順

- 本手法について説明致します。

本手法は, 机においたスマートフォンの周囲の平面上にて, 磁石を取り付けた棒(以下, スタイラス)を用いてスマートフォンに対して入力を行うものです(図1)。本手法では, **普段ペンを持つ手**で, **磁石が机に対して垂直になるように**スタイラスの**木製部分**を持ってください(図2)。ユーザがスタイラスを用いて画面外に対して入力を行うことにより, 画面内にスタイラスの軌跡が表示されます。

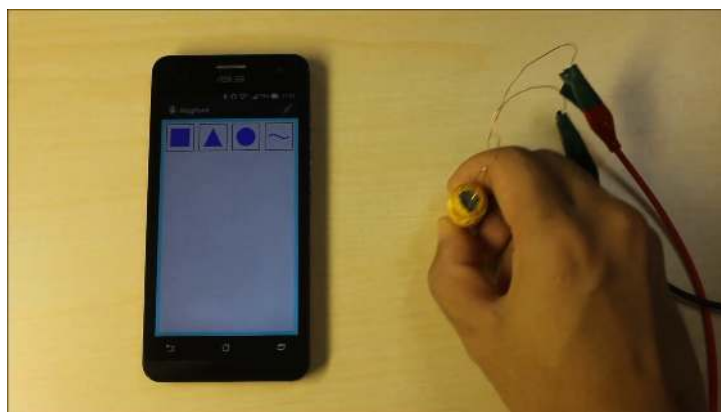


図1 概要.

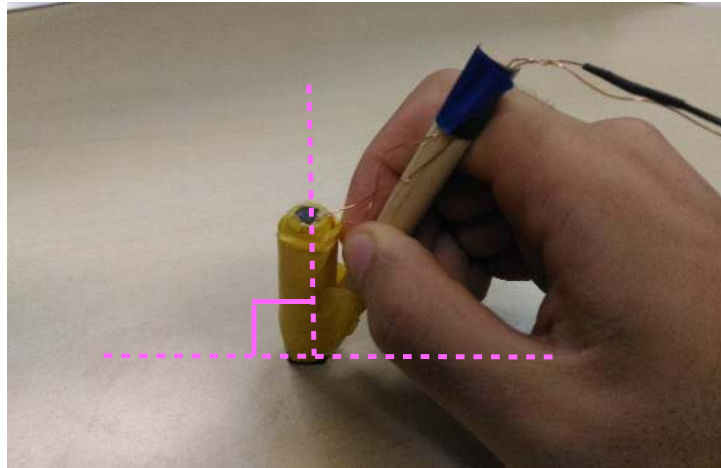


図2 磁石が机に対して垂直になるようにスタイラスの木製部分を持ってください。

- 本手法を用いる練習を行っていただきます（練習タスク）。

練習タスクでは、本手法の使い方を学習していただきます。実験者の指示に従って、机に置かれたスマートフォンの周囲の指定された領域内に対してスタイラスを用いて入力を行ってください。この時、スタイラスの木製部分を持ち、スタイラスについている**磁石が机に対して垂直になるよう**に注意してください。また、スタイラスを用いて描いた軌跡がスマートフォン上に再現出来ていることを確認してください。

- 本手法を用いて、画面に表示される図形を描いていただきます（タスク1）。

タスク1では、指定された図形を本手法を用いて描いていただきます。実験が開始されると、丸・四角・菱型のうち1つの図形がランダム順にスマートフォンの画面内に表示されます（図3）。表示された図形を、机上に設置された紙に示された領

域内にて描いてください。また、机上に設置された紙は転写紙になっているため、強めの筆圧で描いてください。描き終わったら、画面右下の「SAVE」ボタンを指でタップし、次の図形を表示させてください。1つの図形を描くことを1試行とし、3種類の図形をそれぞれ5回ずつ、計15試行行っていただきます。ただし、描いた軌跡がスマートフォン上に再現出来ていないと感じた時は、実験者に申し出てください（実験者が調整します）。

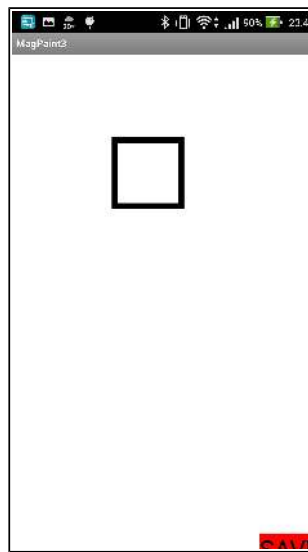


図3 タスク1の画面。

- 本手法を用いて、自由に絵を描いていただきます（タスク2）。

タスク2では、ペイントアプリケーションを用いて簡単な絵を描いていただきます（図4）。本ペイントアプリでは、四角形、三角形、円形、自由曲線を描くことができます。画面上のアイコンを指でタップすることにより描く図形を変更することができます。描く際は、机上に設置された紙に示された領域内にて描いてください。

また、机上に設置された紙は転写紙になっているため、筆圧を強めに描いてください。描き終わったら、画面右下の「SAVE」ボタンをタップしてください。1つの絵を描くことを1試行とし、計3試行行っていただきます。ただし、描いた軌跡がスマートフォン上に再現出来ていないと感じた時は、実験者に申し出てください。

描く絵の題材は自由です。例を次に挙げますが、**次のものでなくても構いません。**

- 顔
- 動物
- 乗り物
- 建物
- 食べ物

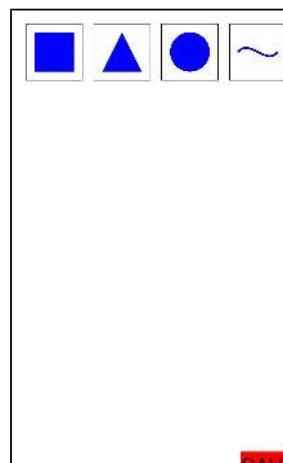


図4 タスク2の画面。

- 最後に、アンケートにお答えいただきます。

A.3 アンケート用紙

実験に関するアンケート

文責:阿部哲也

今回は実験にご協力いただき,ありがとうございました.最後に以下のアンケートにご協力ください.

1. 年齢、性別、利き手についてお答えください。

年齢: 歳 性別: 男・女 利き手: 左・右 普段ペンをもつ手: 左・右

2. 普段使用しているスマートフォンの機種は何ですか？

(例:iPhone4S, docomo Galaxy SII, docomo AQUOS PHONE ZETA SH-01F)

3. スマートフォンの利用歴はどのくらいですか？

_____ 年 カ月

4. 本システムは使いやすかったですか？

(強く同意しない) 1 2 3 4 5 (強く同意する)

理由

5. 本システムは容易に理解出来ましたか？

(強く同意しない) 1 2 3 4 5 (強く同意する)

理由

6. 本システムを今後使いたいと思いますか？

(強く同意しない) 1 2 3 4 5 (強く同意する)

理由

7. 本システムを何のために使いたいですか？(アプリケーション等)

8. 本システムについて、改善すべき点があればご記入ください。

9. 本システムについて感想をご記入ください。

10. その他、何かあればご記入ください。

アンケートは以上になります。ご協力ありがとうございました。

実験者使用欄

被験者#

A.4 SUS 用紙

実験に関するアンケート		SUS ([古井 14]版)
今回は実験にご協力いただき, ありがとうございます。以下のアンケートにご協力ください。 以下の質問に対して最も当てはまる数字を選択してください。		
1. わたしはこのシステムを頻繁に使いたいと思う。	(強く同意しない) 1 2 3 4 5 (強く同意する)	
2. このシステムは無駄に複雑であると思った。	(強く同意しない) 1 2 3 4 5 (強く同意する)	
3. このシステムは簡単に使えると思った。	(強く同意しない) 1 2 3 4 5 (強く同意する)	
4. このシステムを使えるようになるにはわたしは技術者の支援を必要とするだろうと思う。	(強く同意しない) 1 2 3 4 5 (強く同意する)	
5. このシステムでは様々な機能がよくまとまっていると思った。	(強く同意しない) 1 2 3 4 5 (強く同意する)	
6. このシステムにはあまりにも多くの矛盾があると思った。	(強く同意しない) 1 2 3 4 5 (強く同意する)	
7. ほとんどの人々はこのシステムの使い方をすぐに覚えるだろうと思う。	(強く同意しない) 1 2 3 4 5 (強く同意する)	
8. このシステムはとても扱いにくいと思った。	(強く同意しない) 1 2 3 4 5 (強く同意する)	
9. このシステムを使うのにとても自信があったと感じた。	(強く同意しない) 1 2 3 4 5 (強く同意する)	
10. わたしはこのシステムを使い始める前に多くのことを学ぶ必要があった。	(強く同意しない) 1 2 3 4 5 (強く同意する)	
以下, 実験者用		
被験者# _____		