

平成23年度

筑波大学情報学群情報科学類

卒業研究論文

題目
複数磁気センサを用いた
携帯端末周辺における3次元位置計測と
インタラクションへの応用

主専攻 ソフトウェアサイエンス主専攻

著者 PHAM THANH SON

指導教員 高橋伸 志築文太郎 三末和男 田中二郎

要 旨

携帯端末は持ち歩くためのものであるため、軽く、小さくなればなるほど、ユーザにとって便利になる。しかし、携帯端末を操作するための一般的な入力インタフェースであるタッチ入力などを行うためには、携帯端末を現在より小さくすることは難しいことである。

そこで本研究は複数センサを利用して、磁石の3次元位置情報を計測し、携帯端末の周辺空間を活用する入力インタフェースを提案する。3次元位置情報を利用することで、入力空間を端末の周辺空間に拡張することができる。これにより、入力用のスペースを確保する必要をなくし、携帯端末の小型化の壁を破ることができるようになる。本研究はこのような入力インタフェースの試作デバイスを実装し、試作デバイスの精度、有用性について実験を行った。また、磁石を用いる入力インタフェースの応用の携帯アプリケーションを開発した。

目次

| | | |
|------------|-----------------------|-----------|
| 第1章 | 序論 | 1 |
| 1.1 | 背景 | 1 |
| 1.2 | 磁気センサを用いるインタラクション | 2 |
| 1.3 | 研究の目的とアプローチ | 2 |
| 1.4 | 論文構成 | 3 |
| 第2章 | 関連研究 | 4 |
| 2.1 | 3次元位置情報を利用した研究 | 4 |
| 2.2 | 磁気センサを利用したインタラクションの研究 | 5 |
| 第3章 | 3次元位置情報取得の検討 | 6 |
| 3.1 | 磁石による磁場 | 6 |
| 3.2 | 線形の位置情報計算方法 | 7 |
| 3.3 | 位置情報計算過程 | 7 |
| 3.3.1 | 2次元位置の計算 | 7 |
| 3.4 | 位置情報の高さの取得 | 8 |
| 第4章 | 実装 | 10 |
| 4.1 | 磁気センサの調査 | 10 |
| 4.2 | ハードウェア構成 | 11 |
| 4.3 | 開発環境 | 11 |
| 4.4 | 位置情報取得の実装 | 12 |
| 4.4.1 | 磁気センサのデータの送信 | 12 |
| 4.4.2 | 位置情報の計算 | 13 |
| 4.5 | 位置情報精度の評価実験 | 13 |
| 第5章 | 高さの感覚の実験 | 17 |
| 5.1 | 実験の目的 | 17 |
| 5.2 | 実験内容 | 17 |
| 5.2.1 | 高さの感覚の実験 | 17 |
| 5.2.2 | 移動量感覚の実験 | 19 |
| 5.3 | 実験の結果 | 19 |
| 5.4 | インタラクションへの応用の検討 | 21 |

| | | |
|--------------|---------------------------|-----------|
| 第 6 章 | 応用 | 23 |
| 6.1 | 地図アプリケーション | 23 |
| 6.1.1 | 応用アプリケーション作成の意図 | 23 |
| 6.1.2 | アプリケーションの機能 | 23 |
| 6.1.3 | 実装と評価 | 23 |
| 6.2 | 文字入力アプリケーション | 24 |
| 6.2.1 | 応用アプリケーションの意図 | 24 |
| 6.2.2 | アプリケーションの機能 | 25 |
| 6.2.3 | 実装と評価 | 25 |
| 第 7 章 | まとめと今後の課題 | 28 |
| | 謝辞 | 29 |
| | 参考文献 | 30 |

目次

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | 操作中、画面が指で隠される例 - 指で文章を選択するとき、現在どこまで選択しているか正確に見えない | 1 |
| 2.1 | 高速カメラによる空中タイピングインタフェース | 4 |
| 2.2 | Abracadabra | 5 |
| 2.3 | iPhone の磁気センサで数字入力 of 認識 | 5 |
| 3.1 | 磁石の磁場 | 6 |
| 3.2 | 磁石による磁束密度 | 8 |
| 4.1 | 調査した磁気センサ - 左 : HMC5883L、真ん中 : Mag3110、右 : MicroMag | 10 |
| 4.2 | システム構成図 | 12 |
| 4.3 | 試作デバイスの精度評価の設置 | 14 |
| 4.4 | 表面位置情報の精度 - 上 : 高 3cm の場合、下 : 高さ 6cm の場合 | 15 |
| 4.5 | 高さ情報の精度 | 16 |
| 5.1 | 高さの実験の画面 | 18 |
| 5.2 | 高さ感覚の実験 - 左 : 表面で指定する場合; 右 : 裏面で指定する場合 | 18 |
| 5.3 | スライド式の高さ感覚の実験 | 19 |
| 5.4 | 移動量感覚の実験 | 20 |
| 5.5 | 高さ感覚の実験の結果 (フィードバックあり) | 20 |
| 5.6 | スライド式とボタン式の結果比較 | 20 |
| 5.7 | 表面 - 裏面別の実験結果 | 21 |
| 5.8 | フィードバックなし絶対高さの実験結果 | 21 |
| 5.9 | 移動量感覚の実験結果 | 21 |
| 5.10 | 高さによりメニュー項目の選択 | 22 |
| 6.1 | 地図アプリケーションの実験 | 25 |
| 6.2 | イヤホンで文字入力する | 26 |
| 6.3 | 認識用のサンプルライブラリ | 26 |
| 6.4 | 被験者 1 の入力した結果 | 27 |
| 6.5 | 被験者 2 の入力した結果 | 27 |

第1章 序論

1.1 背景

携帯端末はその名前が意味するように、携帯するための端末である。携帯端末ができるだけ、軽く、小さくなることにより、便利になると言える。最近、電子工学技術が進んで、電子部品は日々小さくなっている。しかし、携帯端末、あるいは一般的にすべての電子デバイスを現在より小さくすることには大きな障壁がある。Olsen 氏はこの障壁について、次のように述べた。

”If I can fit my entire PC in a cubic inch, how will I interact with it?”¹

「もし私が PC を立体の 1 インチのサイズに収めることができれば、どうやってそれとインタラクションすることができるか？」

この障壁は電子デバイスが小さくできて、人間の指、手のヒューマンファクターはいつまでも変わらないという事実に起因する。他の電子デバイスと同じように現在の携帯端末の操作はボタン、キーパッド、ジョイスティック、ジョグダイヤル、タッチ画面などの入力手法により行われる。デバイスを小さくするほど、指でこれらの物理的な入力インタフェースを用いて操作するのは難しくなる。

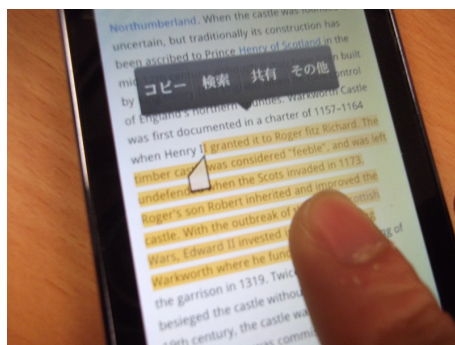


図 1.1: 操作中、画面が指で隠される例 - 指で文章を選択するとき、現在どこまで選択しているか正確に見えない

このため、機器表面にこれらの入力のためのスペースを確保しようとした場合、携帯端末を現在より小型化することは困難である。これらの入力手法の中で現在、一番普及しているタッチ入力は、入力領域が出力領域と一致しているため、スペースを節約することができ、他

¹Olsen, D. 2007. UIST 2.0 Interviews . Dan Olsen. <http://www.acm.org/uist/archive/uist2.0/DanOlsen.html>

の入力方法と比べて優れるが、操作中に画面が指で部分的に隠されるという問題もある。ディスプレイによるフィードバックが隠されるため、誤動作を起こしてしまうことが多くなる(図 1.1)。

これらの問題を解決することを目的とし、最近では携帯端末の周辺スペースを活用する手法が注目されている。これらの手法のコンセプトは携帯に搭載する物理的な入力インタフェースに限らず、携帯周囲の3次元空間を入力空間として利用し、入力を行うというものである。具体的には携帯端末にセンサ(カメラ、距離センサ、磁気センサなど)を搭載し、携帯周辺で行われる手のジェスチャを認識して入力を行う。

1.2 磁気センサを用いるインタラクション

携帯端末周辺スペースを利用する手法の中に磁気センサと磁石を利用する方法がある。この手法は磁気センサでユーザが持っている磁石から発生する磁場を検出し、磁石の位置を推定して入力に用いる。この手法では、端末と磁石の間に布やプラスチックなどの障害物があっても入力することができる。カメラ、距離センサなどの場合、センサの前でジェスチャを行わなければならないため、センサはデバイスの外側に配置しなければならないが、磁気センサの場合では、この理由により、自由に配置することができる。磁気センサと磁石を利用するとき、ユーザは磁石を装着する負担があるが、磁石は電池が必要なく、小型の携帯ストラップにすれば持ち歩くこともでき、また、イヤホンなどの磁石がついている生活用品などを利用することも可能である。

磁気センサが検出する磁場の強度から3次元の位置情報を取得することはできる。しかし、今までこの手法をインタラクションに応用する研究は2次元の位置情報しか取得しておらず、またその位置情報を利用したインタラクションを携帯端末で行うという応用研究はなかった。これは磁気強度による磁石の位置情報計算は複雑なタスクであり、3次元位置情報まで取得することは時間がかかるため、インタラクションとしてはまだ適切ではなかったからだと考えられる。しかし2次元位置情報に制限すると、携帯周辺を全体的に活用できず、入力空間が一層狭くなって、インタラクションの自由度が下がる。また操作の精度を保つため他の入力インタフェースと統合することも必要となる。

1.3 研究の目的とアプローチ

本研究の目的は磁気センサを利用し、携帯端末の3次元位置情報を用いるインタラクションを行うことである。本研究のアプローチは複数の3次元磁気センサを利用して、磁石の位置を取得することで、携帯端末の3次元のインタラクションを実現する。複数の磁気センサを利用することにより、位置情報取得計算を簡単にし、処理能力の制限がある携帯端末での計算を可能にする。これにより、ユーザの指につけた磁石の位置またはイヤホンなどの磁石の位置を検出し、3次元的な動きを認識することで、携帯端末の周辺スペースを利用する入力システムを実現する。

1.4 論文構成

本論文は以下の通りに構成されている。2章では関連研究を紹介する。3章で本研究で利用する3次元位置情報取得の流れについて述べ、4章で試作デバイスの実装について説明する。5章でユーザによる高さの感覚について、試作システムを用いて実験した結果を述べ、その結果に基づいて、試作のシステムのインタラクションを検討する。6章ではそれらのインタラクションにより作成した応用アプリケーションについて述べる。最後に7章で本研究の結果をまとめ、今後の課題について説明する。

第2章 関連研究

本章では携帯端末のインタラクションの関連研究を紹介する。本研究は磁気センサを利用した携帯端末周辺を活用するインタラクションを実装するので、携帯端末周辺を活用する研究と磁気センサを利用した研究を先行研究とする。

2.1 3次元位置情報を利用した研究

現在ほとんどの携帯端末にカメラが搭載されており、このカメラを利用して周辺スペースを活用しようとする研究が多くなされている。カメラは2次元情報しか取得しないが、画像認識技術を用いて、3次元位置情報を検出することもできる。例として廣部らは高速カメラを利用して、携帯端末向け空中タイピングインタフェースを提案した [4]。この研究ではカメラでユーザの指の3次元位置情報を検出し、仮想 qwerty キーボードでテキスト入力させるシステムを開発した (図 2.1)。Henrysson らは AR 技術を応用して、携帯のカメラとマーカーを用いる 3D インタラクションを実現した [2]。

Ken らは IR 距離センサを利用して携帯端末のインタラクションに応用することを提案した [3]。Sven らは IR 距離センサを利用して、手の動きを認識して入力を行う HoverFlow システムを提案した [1]。Alex らは IR 距離センサを利用して、携帯の辺にマルチタッチのインタラクションを可能にする SideSight デバイスを開発した [5]。Kei らは IR 距離センサで指の2次元情報を取得し、圧電素子でタッチを認識し、手の裏上のタッチ操作で入力を行うインタフェースを提案した [4]。

本研究はこれらの研究と携帯端末周辺を活用しようとし、同じ目標を目指す、磁気センサで位置情報を検出するというアプローチでこれらの研究と異なる。



図 2.1: 高速カメラによる空中タイピングインタフェース

2.2 磁気センサを利用したインタラクションの研究

入力インタフェースとして磁気センサを利用する研究の一つに、Chris らの磁気センサを利用した極の1次元と2次元の入力インタフェースのプロトタイプ Abracadabra がある [11]。この研究は磁気センサのコンパス機能の方位検出計算方法で極の1次元位置を検出している。また高さを一定と仮定し、反復法で2次元位置情報を検出している。これらの位置情報を応用し、彼らは小型のデバイス用の簡単なインタフェース Abracadabra を提案した (図 2.2)。本研究はこの研究の結果を拡張し、3次元の位置情報を利用する入力インタフェースを開発し、携帯端末に応用する。

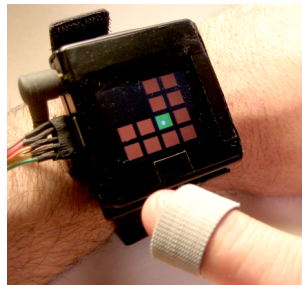


図 2.2: Abracadabra

Daniel らはリング形の永久磁石を利用して Nanya という入力デバイスを開発した [12]。ユーザが自分の指につけた磁石のリングを回してナビゲーション入力を行う手法である。リングの回転角度はユーザの手首に巻かれる磁気センサで認識を行った。Han らは磁石を指につけて、指の文字入力手法を提案した [14]。

また違うアプローチで Hamed らは iPhone に搭載されている方向検出用の磁気センサを使って磁気変化を検出し、パターン認識で入力を区別する手法を提案した [7]。この手法で数字の入力 [8](図 2.3)、や仮想楽器の操作 [10] などに応用できることを彼らは示した。しかし、この手法は現在携帯端末に搭載される磁気センサでインタラクションが行えるが、認識できるパターンは限定され、また学習の過程が必要となる。本研究は複数の磁気センサを必要とするが、3次元位置情報を用いてより自由な入力が可能になる。

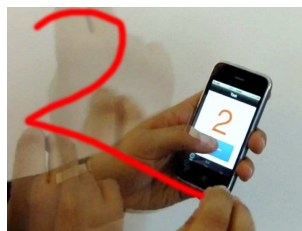


図 2.3: iPhone の磁気センサで数字入力の認識

第3章 3次元位置情報取得の検討

本章は複数磁気センサを用いて位置情報を取得する流れについて説明する。

3.1 磁石による磁場

磁場の強度から位置情報を取得する過程について説明する前に、磁石による磁場はどのような性質を持っているか説明する。

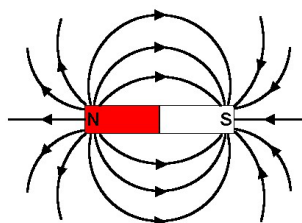


図 3.1: 磁石の磁場

磁石は2つの極（磁極）N-Sを持ち、双極性の磁場を発生させる源となる物体である。外部からの磁場や電流の影響を受けることなく磁石としての性質を比較的長きにわたって保持し続ける物体は永久磁石と呼ばれる。また磁性材料の芯のまわりに、コイルを巻き、通電することによって一時的に磁力を発生させる磁石は電磁石と呼ばれる。本研究で利用するのは永久磁石で、本論文内で「磁石」と書くときは「永久磁石」のことを指す。

図 3.1 で磁石の磁場を表す磁力線を示す。鉄など強磁性体または他の磁石はこの磁場の影響を受ける。その影響は磁石の相対位置によって変わり、影響の強さとして磁束密度 B (単位 Wb/m^2)、または磁場強度 H (単位 A/m) で表される。磁気センサが計測するのはこの磁束密度である。磁束密度ベクトル \mathbf{B} と磁石の相対位置 $\mathbf{X}(x,y,z)$ の関係は式 3.1 で表される [15]。

$$\mathbf{B} = B_T \left(\frac{3(\mathbf{H}_0 \cdot \mathbf{X})\mathbf{X}}{R^5} - \frac{\mathbf{H}_0}{R^3} \right) \quad (3.1)$$

ここで B_T は磁石の磁性を表すパラメタであり、 $\mathbf{H}_0(m,n,p)$ は磁石の磁気モーメントの正規化された方向ベクトルである。 R はその位置から磁石の中心までの距離であり、

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3.2)$$

で表せる。この関係から磁石の方向が分かっている場合、または複数の点から磁束密度が計測できる場合、磁石の位置が計算できる。

3.2 線形の位置情報計算方法

磁束密度（磁場の強度）から磁石の位置情報 (a,b,c) を取得するため 3.1 の式 of 非線形連立方程式を解かなければならない。この連立方程式を解くためには、反復法により近似解を求める手法を用いることが多いが、処理能力の制限がある携帯端末で、3変数の非線形連立方程式を解き、磁石の位置を検出することは困難である。そのために、Chaoら [13] が利用した磁石位置トラッキング方法の方針に従い、複数の磁気センサから線形連立方程式を立て、位置情報を計算する。Chaoらの計算方法では線形の方法で 6DOF（位置情報 + 磁石の方向）の情報を取得することができ、従来の反復方法と比べ 10 倍ほど早くなる。しかし、精度を求めるためには、センサの位置、方向を正確に配置しなければならず、また、計算の過程はまだ複雑である。本研究では 3 次元情報だけを求めるので、計算を簡単化するため、磁石の方向ベクトル $\mathbf{H}_0 = (0,0,1)$ と固定する（つまり、磁石は携帯の画面と平行するように持つことを仮定する）。これにより、本研究に適切なすばやく磁石の位置情報が取得できる方法を確立する。次のセクションで、具体的に 3 次元位置情報の取得過程を説明する。

3.3 位置情報計算過程

位置情報を取得する流れは 2 次元の位置情報の取得と高さ情報の取得という 2 段階に分けられる。

3.3.1 2次元位置の計算

磁石の位置を (a,b,c) とし、最初に磁石の 2 次元位置 (a,b) を計算する。利用する複数センサの中で、ある L の磁気センサの位置を (x_l, y_l, z_l) とすると、3.1 の式により、そのセンサの位置での磁束密度は式 3.3 のようになる。

$$\mathbf{B}_l = B_T \left(\frac{3(\mathbf{H}_0 \cdot \mathbf{X}_l)\mathbf{X}_l}{R_l^5} - \frac{\mathbf{H}_0}{R_l^3} \right) \quad (3.3)$$

この中に相対距離ベクトル $\mathbf{X}_l = (x_l - a, y_l - b, z_l - c)$ 、また

$$R_l = \sqrt{(x_l - a)^2 + (y_l - b)^2 + (z_l - c)^2} \quad (3.4)$$

で表せる。3 軸別々に分解すると式 (3.3) は式 (3.5) になる。

$$\begin{cases} B_{lx} = B_T \left(\frac{3[m(x_l - a) + n(y_l - b) + p(z_l - c)](x_l - a)}{R_l^5} - \frac{m}{R_l^3} \right) \\ B_{ly} = B_T \left(\frac{3[m(x_l - a) + n(y_l - b) + p(z_l - c)](y_l - b)}{R_l^5} - \frac{n}{R_l^3} \right) \\ B_{lz} = B_T \left(\frac{3[m(x_l - a) + n(y_l - b) + p(z_l - c)](z_l - c)}{R_l^5} - \frac{p}{R_l^3} \right) \end{cases} \quad (3.5)$$

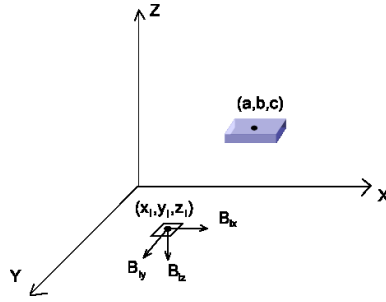


図 3.2: 磁石による磁束密度

方向ベクトル $\mathbf{H}_0(m,n,p) = (0,0,1)$ を代入すると式 3.6 が求められる。

$$\begin{cases} B_{lx} = B_T \left(\frac{3(z_l - c)(x_l - a)}{R_l^5} \right) & (1) \\ B_{ly} = B_T \left(\frac{3(z_l - c)(y_l - b)}{R_l^5} \right) & (2) \\ B_{lz} = B_T \left(\frac{3(z_l - c)^2}{R_l^5} - \frac{1}{R_l^3} \right) & (3) \end{cases} \quad (3.6)$$

複雑な B_l と R_l の部分を除外するため、(1) を (2) で割り、式 (3.7) が求められる。

$$\frac{B_{lx}}{B_{ly}} = \frac{(x_l - a)}{(y_l - b)} \quad (3.7)$$

同じように、各センサから (2) の式を求め、線形の連立方程式をたてることができる。最小二乗法で連立方程式を解くことで、 a と b は求められる。変数が 2 つだけなので、厳密的に 2 つの方程式 (つまり 2 つのセンサ) があれば、その連立方程式を求めることができるが、センサのノイズ、また方向ベクトルを $(0,0,1)$ を正確に維持することは難しいので、できるだけ多くのセンサで計算した方が位置が正確に取得できる。この計算の流れでは、磁石の強さによって変わっていくパラメタ B_T の値は必要がない。すなわち、磁石の磁性と関係なく、どの磁石でもこの流れで、2次元の位置を計算することができる。

3.4 位置情報の高さの取得

式 (3.6) の (3) を (2) で割ると式 (3.8) が求められる。

$$\frac{B_{lz}}{B_{ly}} = \frac{3(z_l - c)^2 - R_l^2}{3(y_l - b)(z_l - c)} \quad (3.8)$$

a と b を代入することで (3.8) は c の 2 次方程式になる。各のセンサから (3.8) を求め、また最小二乗法で c を求めると、3次元位置情報を磁石の磁性パラメタと関係なく計算することができる。しかし、実際にこの計算を行うと、センサのノイズにより、誤差が大きくなり、計算できる範囲は狭くなる。そのため、今度の実装は事前に磁石の強さを測り、 B_T の値を確定し、式 3.8 の (1) か (2) で Newton-Raphson の反復法を利用して c を求める。

例えば式 3.5 の (2) を利用する場合、 a と b をに代入することで、式 3.9 が求められる。

$$\frac{B_{ly}}{3B_T(y_l - b)} \left(\sqrt{(x_l - a)^2 + (y_l - b)^2 + (z_l - c)^2} \right)^5 - (z_l - c) = 0 \quad (3.9)$$

式を簡単にするため、

$$M = (x_l - a)^2 + (y_l - b)^2; N = \frac{B_{ly}}{3B_T(y_l - b)} \quad (3.10)$$

とおく。これにより次の c の方程式が求められる。

$$M(\sqrt{N + (z_l - c)^2})^5 - (z_l - c) = 0 \quad (3.11)$$

$$f(c) = M(N + (z_l - c)^2)^5 - (z_l - c) \quad (3.12)$$

とおき、 $f(c)$ の微分は

$$f'(c) = -5 * M(N + (z_l - c)^2)^3(z_l - c) + 1 \quad (3.13)$$

初期値 c_0 を決め、

$$c_{n+1} = f(c_n)/f'(c_n) \quad (3.14)$$

を繰り返して計算すると、 c の近似解が求められる。Newton-Raphson 法では必ず収束すると言えないが、携帯周辺の解であれば、範囲が狭く、初期値を工夫して設定すれば、発散する場合を少なくすることができる。また、今回の実装では処理を早くするため、計算の流れではまだ地磁気の影響はまだ考慮していない。

第4章 実装

本章は試作デバイスの実装について述べる。

4.1 磁気センサの調査

位置情報取得の過程に利用できる磁気センサ選択するため、磁気センサの調査を行った。本研究は複数センサを携帯端末に接着するのでできるだけ小型で安価な磁気センサが望ましいが、位置情報を正確に計算するため、ノイズが少なく、精度が良い必要があり、高分解能の性質も必要とする。

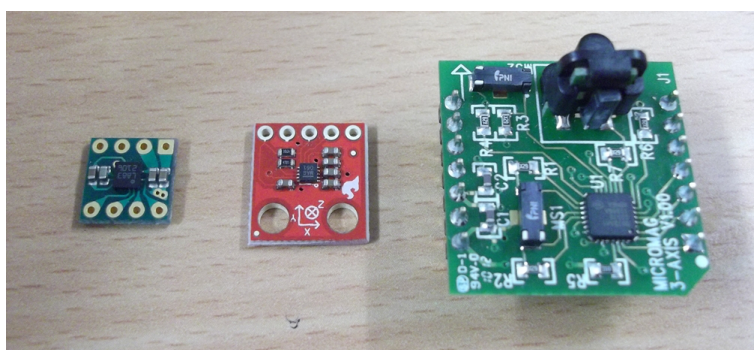


図 4.1: 調査した磁気センサ - 左 : HMC5883L、真ん中 : Mag3110、右 : MicroMag

3種類の3軸磁気センサの調査を行った(図 4.1)。各センサの情報は表 4.1 にまとめる。

| 種類 | 範囲 | 分解能 | サイズ (mm) | インタフェース |
|-----------------------|------------|---------------|------------------|---------|
| HMC5883L ¹ | ± 8.1Gauss | 0.00043 Gauss | 10 x 10 x 1 | I2C |
| Mag3110 ² | ± 10Gauss | 0.001Gauss | 13.3 x 14.5 x 1 | I2C |
| MicroMag ³ | ± 11Gauss | 0.00015 Gauss | 25.4 x 25.4 x 19 | SPI |

表 4.1: 調査した磁気センサの情報

各センサを Arduino と接続し、磁石をまわりで動かし、取得されたデータを監視した。3種類の磁気センサの中の方位検出専用センサ HMC5883L は一番安価で、小型である。しかし、取得できる範囲が狭く (± 8.1 Gauss)、磁石がセンサから 0.5 c mの距離で近づけたばあい、

すぐオーバーフローしてしまう。また、磁石を 5 cm 以上離すと、磁場の変化を検出することができなくなる。MicroMag の磁気センサはオーバーフローの問題がなく、20cm 以上の距離まで磁石の磁場の変化を検出することができる。しかし、サイズが大きく、また高価で複数利用することは難しい。Mag3110 は、検出できる範囲は 10cm 程度で、オーバーフローの問題が少なく、一番コストパフォーマンスのバランスのいいセンサである。調査により、Mag3110 を本研究の位置情報取得する過程に一番適切であると結論を出した。

4.2 ハードウェア構成

今回の実装は試作デバイスとして携帯端末の外側（裏面）にセンサの配列を取り付け、センサと携帯端末の間の通信をマイコン経由で行う。試作デバイスの詳細構成は以下のようになる。

- 磁気センサの配列：3 × 3=9 個の Mag3110 の 3 次元磁気センサを利用する。Mag3110 は ± 1000 μ T の範囲の磁場を 0.10 μ T の感度で検知することができる。各センサのサイズは 1.33cm × 1.45cm であり、およそ 2.5cm の間隔をあけて配置される。
- マルチプレクサ：マイコンのポートが限定されるため、磁気センサ配列を制御するために CD74HC4067⁴ のマルチプレクサをスイッチとして使い、入力するセンサを切り替えながら、データ通信を行う。
- マイコン：Arduino Duemilanove⁵ を利用した。
- Bluetooth シェル：Bluetooth Mate Gold の Bluetooth シェルを使い、センサ配列からもらったデータを携帯端末に送信する。
- 携帯端末：SHARP 社の GALAPOSS 003SH⁶、Android OS 2.3.4 のスマートフォンを利用する。
- 磁石：1cm x 1.5cm x 0.5cm の長方形ネオジウム磁石を利用する。

図 4.2 に試作デバイスの構成図を示す。

4.3 開発環境

実装は Arduino を制御する部分の開発と、携帯端末側のアプリケーションの開発の 2 段階に分けられる。Arduino 制御部分は Arduino の開発環境 1.0 で開発を行った。携帯端末側のアプ

⁴<http://www.ti.com/product/cd74hc4067>

⁵<http://www.arduino.cc/>

⁶<http://mb.softbank.jp/mb/smartphone/product/003sh/>

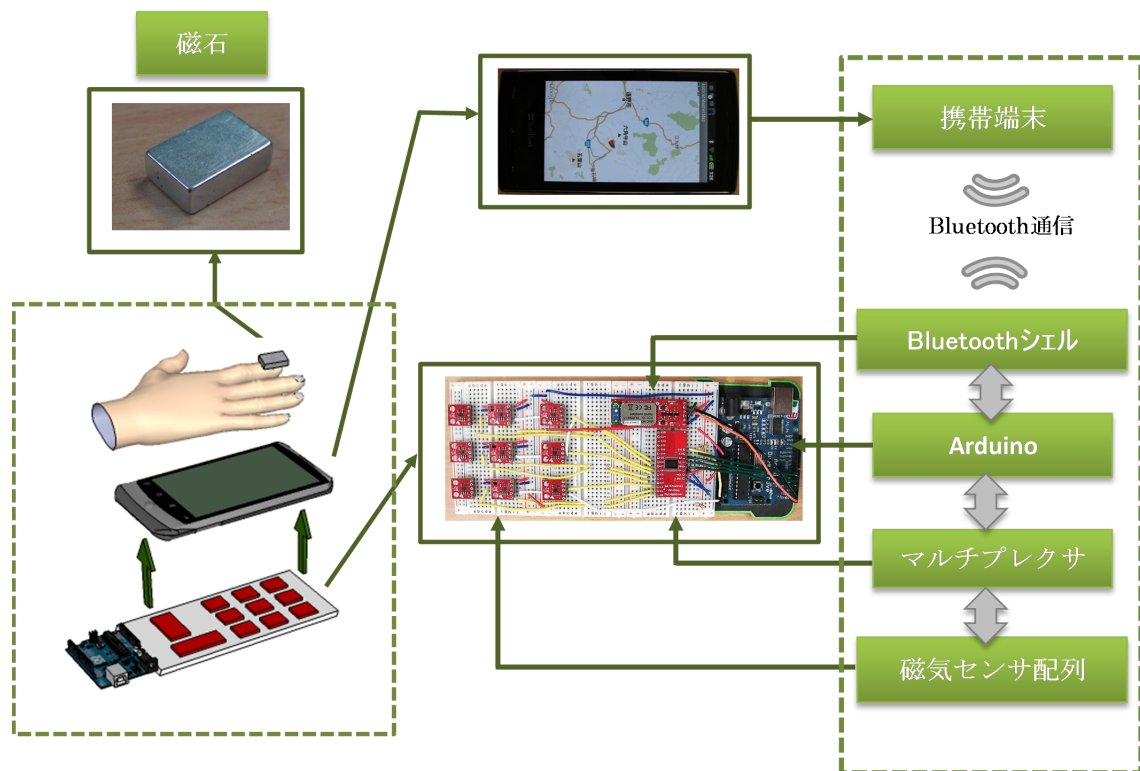


図 4.2: システム構成図

リケーションは Google の Android SDK⁷を利用し、Eclipse 3.6.2⁸の開発環境で開発を行った。プログラミング言語は Java を用いた。両方とも Windows 7 Professional 64bit の PC で実装を行った。

4.4 位置情報取得の実装

4.4.1 磁気センサのデータの送信

Mag3110 の磁気センサは I2C のインターフェースでデータの通信を提供する。I2C のインターフェースはデータラインとクロックラインの二つのラインのアナログ通信であり、平行的に Arduino と接続することが可能だが、各 I2C のセンサは違うアドレスを持たなければならない。しかし、すべて Mag3110 センサのアドレスが同じで、アドレス変更機能が搭載されないため、マルチプレクサの使用が必要となる。マルチプレクサでデータラインの切り替えを行い、すべてのセンサのデータを一つのチャンクとし、50 m s の間隔で Bluetooth で送信する

⁷<http://developer.android.com/sdk/>

⁸<http://www.eclipse.org/>

(それ以下の間隔だと、携帯端末が処理できず、Bluetooth 接続が決断される)。携帯端末で、Arduino と Android の Bluetooth 通信ライブラリ Amari⁹を利用し、データの受信を行う。

4.4.2 位置情報の計算

磁石の位置情報の計算はすべて携帯端末で行う。最初に受信した 10 個のデータを環境の磁気強度として認識し、それらの平均をとり、それ以降のデータからその平均の結果を引くようにする。また、受信したデータから位置情報取得過程に利用できるデータを選択する。方程式 3.7 にあるように、 a と b の値は磁場の強度ではなく x 軸と y 軸の強度の比に依存する。強度の値が小さいデータが入るとノイズの割合が大きくなり、この比を正確に取得することができないため、ある閾値を超えるデータだけを位置情報取得の過程に利用することが必要となる。その後、選択したデータから連立方程式を立てる。連立方程式を Java の配列計算の JAMA ライブラリで解き、 a と b を求める。 a と b を真ん中のセンサのデータと一緒に式 3.8 に代入し、反復法で 0.1 の精度まで繰り返して c を求める。

4.5 位置情報精度の評価実験

実装した試作デバイスにより計算された位置情報の精度について評価を行った。センサの配列から高さ 3cm から 7 cm の平面において、磁石を動かし、システムにより計算された位置 (a, b, c) を記録した (図 4.3)。図 4.4 は代表として高さ 3cm と 6cm の計算結果の表面位置 (a, b) を示している。実際の位置と比較すると、計算した 2 次元位置の誤差は ± 3 mm 以内である (平均: 0.9mm)。この結果から、磁石をカーソルなどとして利用することは十分可能であると考えられる。

図 4.5 は 3cm から 7cm までの高さの平面で計算した高さを示している (各高さごとに 12 個のデータ)。実験から、高さが低いとき (3cm 以下) は精度が下がるが、ある程度の高さ以上であれば ± 5 mm 以内に収められることが分かった。3cm 以下の高さの精度が低い原因はセンサのオーバーフローの問題だと考えられる。

イヤホンの磁石での実験も行ったが、検出できる範囲はデバイス周辺 2cm 以内しかなかった。しかし、検出できる範囲内では、表面の位置の正確さはネオジウムの磁石の場合と同程度であった。実験で Apple 社の MA662G イヤホンを利用した。

⁹<http://www.amarino-toolkit.net/>

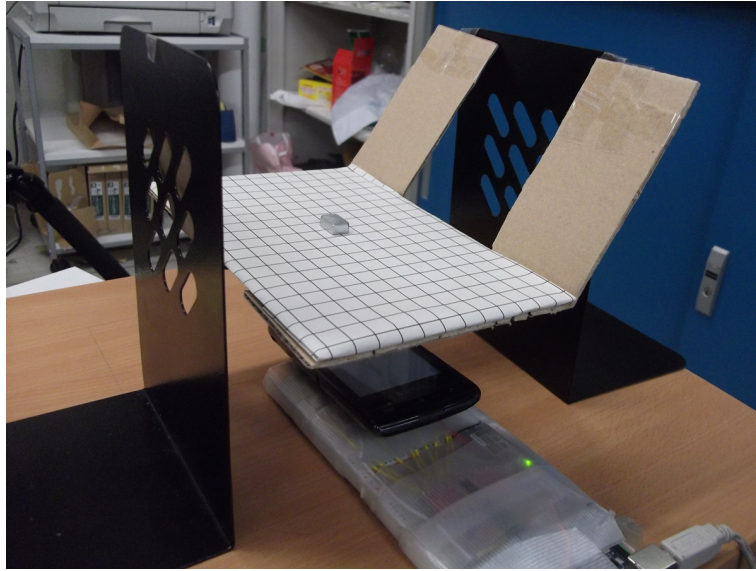


図 4.3: 試作デバイスの精度評価の設置

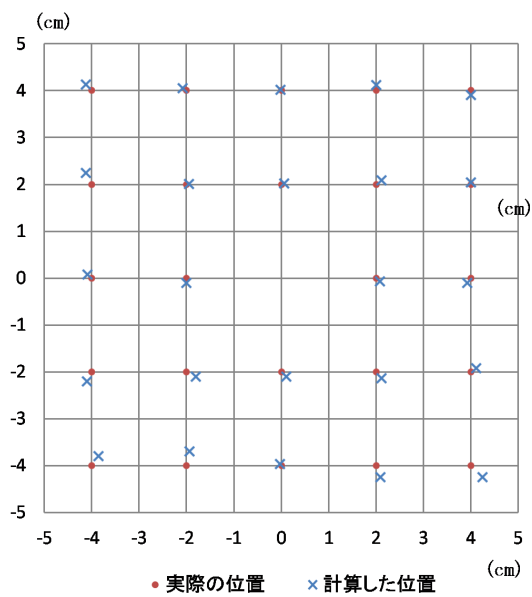
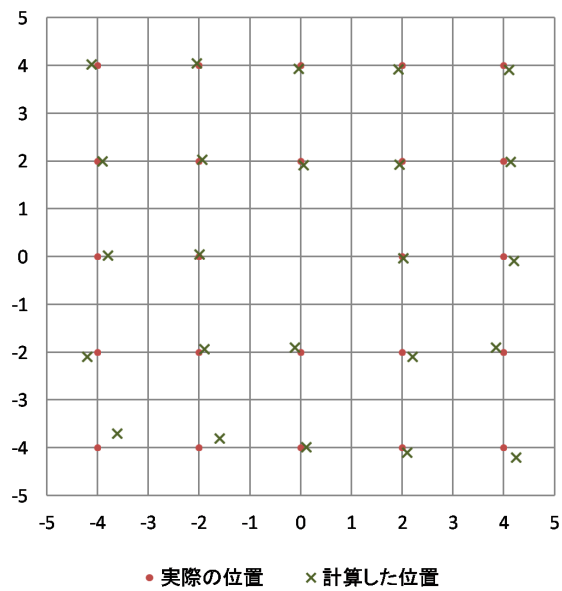


図 4.4: 表面位置情報の精度 - 上 : 高 3cm の場合、下 : 高さ 6cm の場合

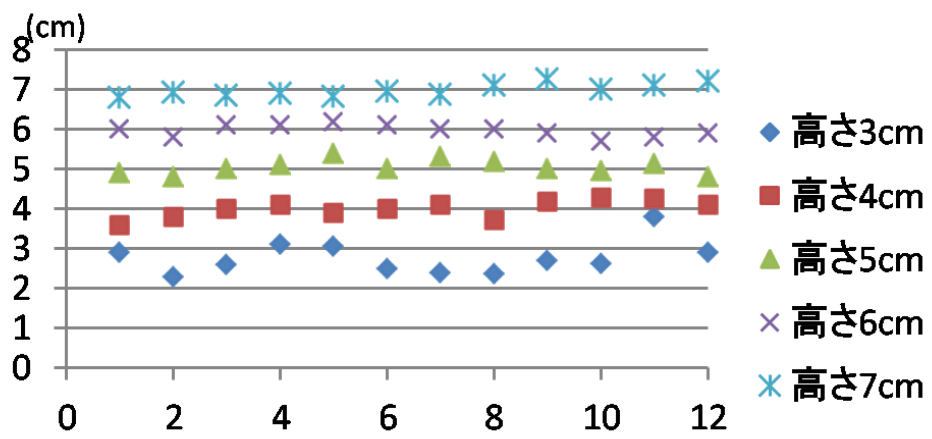


図 4.5: 高さ情報の精度

第5章 高さの感覚の実験

本章ではユーザが携帯周辺の3次元情報をどこまで詳しく指定できるかを調査する実験について説明する。

5.1 実験の目的

ほとんどの携帯端末のユーザはボタンまたはタッチの2次元の入力に慣れてきた。3次元の位置情報をパラメタとして何かを操作することは少ないだろう。そのため、ユーザはどこまでの細かさで3次元位置情報 - 特に高さの情報 - を指定できるのか調査する必要がある。今回は2種類の高さ感覚の実験を行った。

- 高さ感覚の実験：ユーザは画面から指までの高さをパラメタとしてどこまで細かく、どの程度正確に入力できるか調査する実験
- 移動量感覚の実験：ユーザは指の上下移動量をパラメタとしてどこまで細かく、どの程度正確に入力できるか調査実験

5.2 実験内容

5.2.1 高さの感覚の実験

システムが認識できる範囲は画面から10cm程度なので、この範囲を5等分(レベル1)または10等分(レベル2)に分割する。ユーザはその分割された空間を指定できるかどうかの実験を行う。実験中、実験アプリケーションから順々に目的の高さを表示し、ユーザは指に両面テープで磁石をつけ、その高さまで指を移動する。図5.1は実際の実験アプリケーションの画面を表す。

画面の下の長い緑のバーに指の現在の2次元位置(表面位置)を赤カーソルで表示する。目的位置はその上の青いバーで表示する。目的位置は毎回ランダムに生成される。また、試作デバイスでは、表面位置によって認識できる高さの精度を同じようにパラメタチューニングはまだ正確に行っていないため、実験中にユーザは指の位置をTest Areaの領域の上(または下)の空間だけに限定する。被験者が決定したいときは、左手で画面上のOKボタンをタッチする。しかし、この方法では、試作デバイスの入力インタフェースだけを利用する(タッチインタフェースなどによらず)場合での、細かさを評価できないので、ボタン式の実験の

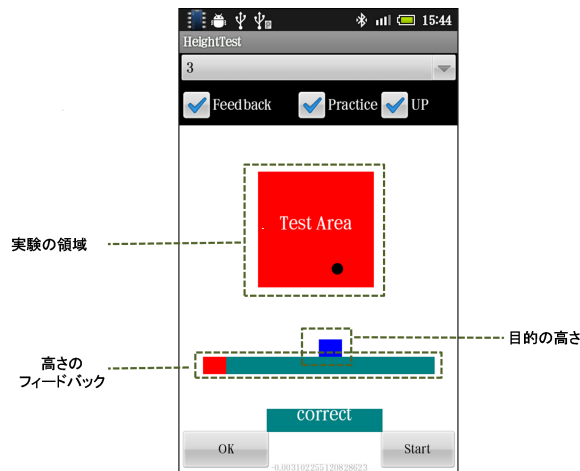


図 5.1: 高さの実験の画面

ほかに、スライド式の実験も行った。スライド式の実験で高さを決定したいとき、ユーザは指を Test Area の領域上の空間から出す（スライドアウト）。ユーザがスライドアウトした後、スライドアウトする前のデータに遡って、それを選択する。10 回の高さの指定（10 回正解する）画面の表と裏で 2 通り、5 等と 10 等分の場合と 2 選択法が 2 と売りで全部で 8 セット（図 5.2）。

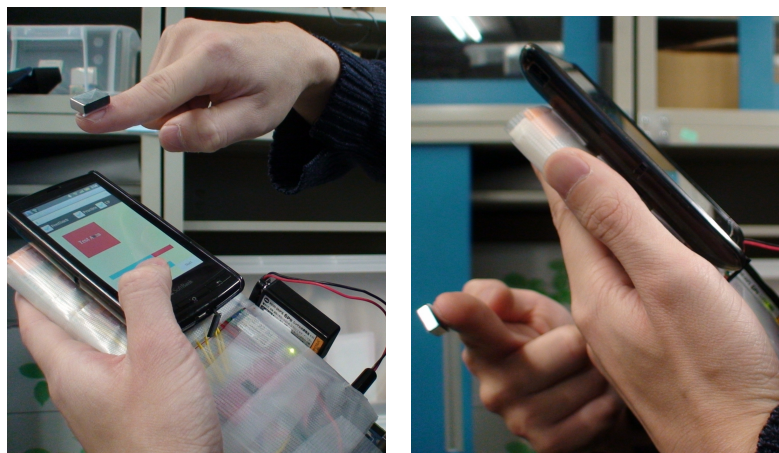


図 5.2: 高さ感覚の実験 - 左：表面で指定する場合; 右:裏面で指定する場合

また、指の位置の視覚フィードバックがない場合の実験も行った。しかし、フィードバックなしの場合は難しく、分割度を 2 等分と 3 等分と 2 レベル鹿しか設定しなかった。これらの実験も視覚フィードバックあり同じ設定で、被験者に 8 セットをやらしてもらった。また実験の前に、システムが認識する高さとなれるように、被験者にフィードバックありの練習を 1 回行ってもらった。

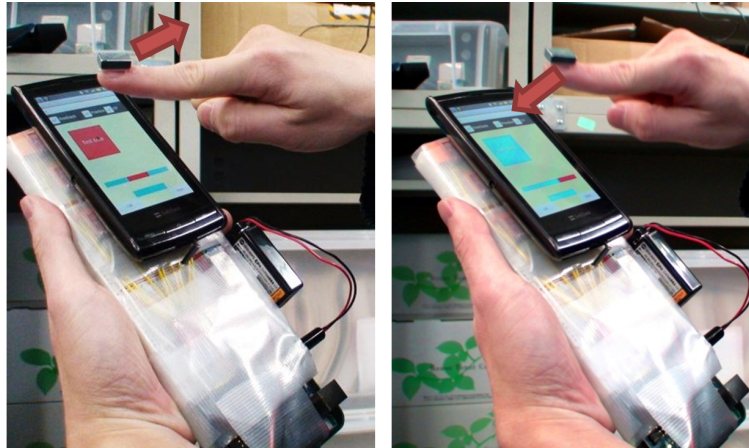


図 5.3: スライド式の高さ感覚の実験

5.2.2 移動量感覚の実験

この実験は移動量、つまり、ユーザが指を動かす相対距離の正確さをテストする実験である。10cm の範囲を 2 段階 (5cm,10cm) または 3 段階 (3cm,6cm,10cm) に分け、被験者にその距離で指を振るように入力してもらった。指を振る動作は以下のように行ってもらった。

- 被験者は最初に指を画面に一番近いところに置く。画面の表面の場合は画面にタッチする。画面の裏面の場合は、試作デバイスのブレッドボードの裏面にタッチする。前の実験と同じように被験者も指を TestArea 領域の上 (または下) に置く。
- 目的の段階の高さまで指を上げる
- 指を下げ、元の場所に戻る。

この動作をゆっくりではなく、できるだけ早くするように被験者に要求した。高さ感覚の実験と違って、移動量の実験はほとんど手の感覚のみで距離を指定するのでフィードバックなしの場合しか行わなかった。

5.3 実験の結果

実験の被験者は 4 人の 22 ~ 26 歳の男性である。

図 5.5 に絶対高さの実験 (ボタン式とスライド式) のレベル別の正解率 (正しい高さを指定した率) を示す。レベル 2 (10 段階) の場合は被験者によると、指で高さを維持するために手が疲れ、また手がぶれて正確に指定できないという意見があった。実際の結果を見るとレベル 2 の正解率は 72 % であり、10cm 以内では 10 段階の高さを指定することは難しいと分かった。しかしレベル 1 (5 段階の場合) では 90 % 以上の正解率が得られたので、実際の入力インタフェースに利用することはできるといえる。

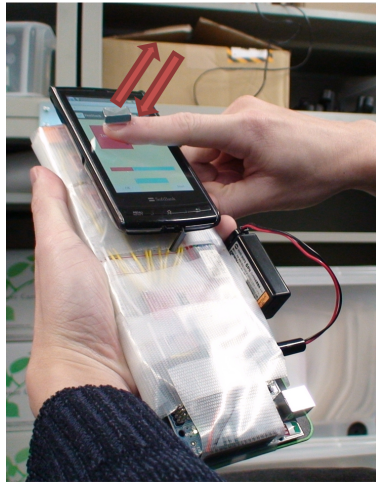


図 5.4: 移動量感覚の実験

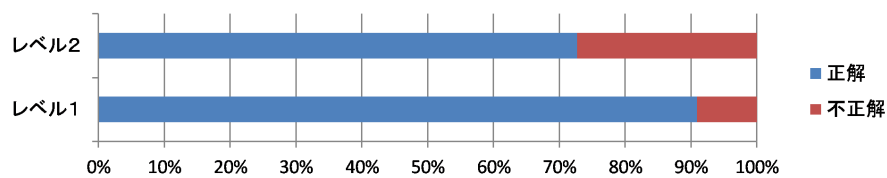


図 5.5: 高さ感覚の実験の結果 (フィードバックあり)

ボタン式の実験は正確さを保つために実装したが、実際にスライド式と比べ精度が悪かった(図 5.6)。これはボタン式の場合両方の手を使用しなければならないので片手でしか動作しないスライド式と比べ、高さを維持するのが難しいからだと一人の被験者からの指摘があった。実験の結果からスライド式の選択方法の実用性も確かめられた。

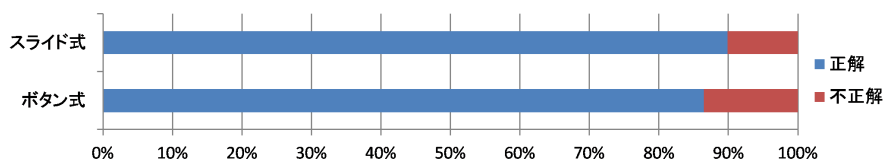


図 5.6: スライド式とボタン式の結果比較

また、被験者から画面の裏面の実験で、指が見えないから操作しにくいと意見があったが、実験の結果を見ると、正解率がほぼ同じだった(図 5.7)。すなわち、画面の下のスペースの操作はユーザに対してまだ不自然な操作だが、利用することは可能である。特に二次元情報をカーソルで表示すれば、ユーザがシステムに慣れてくると、自然に利用できると思われる。

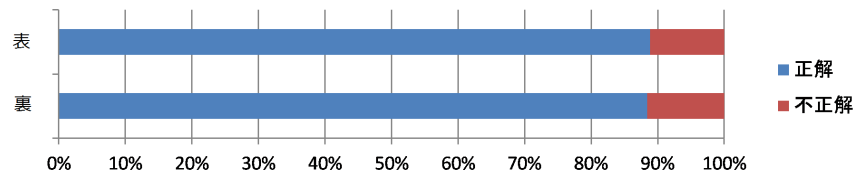


図 5.7: 表面 - 裏面別の実験結果

高さ感覚の実験、フィードバックなしの場合、どちらのレベル（2段階と3段階）もは良い正解率が得られた（図 5.8）。レベル1の場合は100%の正解率も得られたので実用性は十分である。

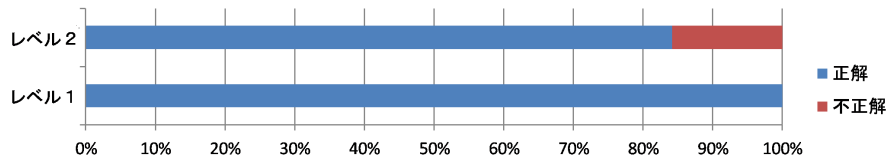


図 5.8: フィードバックなし絶対高さの実験結果

移動量の実験の結果は、図 5.9 で示すように、両方のレベルは85パーセント以上の正解率が求められる。2段階と3段階はまだ少ないが、それでも十分入力インタフェースに应用することができることを次のセクションで詳しく説明する。

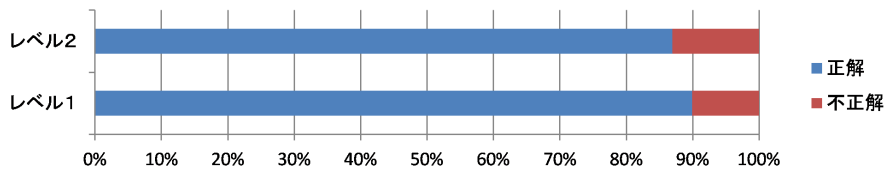


図 5.9: 移動量感覚の実験結果

5.4 インタラクションへの応用の検討

3次元の位置情報の応用として、2次元の位置情報をカーソルとして利用し、高さの情報をを用いてクリック操作や値を変更するスライダの操作などを行うことができる。これらの情報だけでタッチ画面と同じような入力インタフェースとして利用することはでき、磁石の入力インタフェースは画面の裏面に行うこともできるので、タッチのように操作中に画面が隠される問題が起こらない。入力スペースは画面より大きなので、タッチより詳細な操作ができる。

現在の試作デバイスでほぼ画面の4倍の面積の入力スペースを提供することができる。すなわち、その画面を4倍小さくしても、磁石の入力インタフェース利用すれば、現在の画面のタッチインタフェースと同様に利用できる。

磁石を用いる入力インタフェースはマルチタッチと同じなインタラクションを実現することができないが、高さ情報を利用することで、新しいインタラクション手法が考えられる。高さ感覚の実験の応用の例として、全体画面のフィードバックが見えながら、メニュー操作が可能になる。以前、携帯端末でメニュー操作を行うとき、メニュー選択項目を表示し、選択させるため、画面の部分が隠される。またメニューから項目を選択しながら、その選択の結果のフィードバックを見ることは難しい。この磁石の入力インタフェースを利用すれば、2次元方法でメニューを選び、高さで項目を選択し、この問題が解決できる(図 5.10)。



図 5.10: 高さによりメニュー項目の選択

高さ感覚の実験の振る動作はタッチ画面のダブルタッチの動作と同じだが、手を上げるときの高さでそのタッチに違う意味を持たせることが可能である。実験の結果用に2段階、3段階まで、この動作を利用することができるので、それに対して一つのタップ動作で2つまたは3つの機能を持たせる。例えばデジタル地図を利用するとき大きくタップすれば拡大し、小さくタップすれば縮小などと定義することはできる。

また、タッチ入力、ボタン入力の補足入力インタフェースとして利用することもできる。例として、現在のタッチインタフェースと統合して、2次元情報を利用すればパソコンと同じように onmouseover などのイベントを追加することもできる。

第6章 応用

実験の結果を参考にして試作デバイスの2つの応用アプリケーションを実装した。本章はその応用アプリケーションについて説明する。

6.1 地図アプリケーション

6.1.1 応用アプリケーション作成の意図

地図のアプリケーションは携帯端末でよく利用されるアプリケーションである。マルチタッチ画面の場合、ドラッグ操作で移動させ、ピンチ操作で拡大縮小を行い、地図のナビゲーション操作ができる。しかし、序論で述べたように携帯を小型化する場合、画面が小さくなり、これらのインタラクションはを行うことが難しい。ピンチの操作で指がすぐ画面から出てしまう。また操作中、画面が小さい場合指でブロックされる面積の割合も多くなる。磁石のインタフェースでこの問題が解決できるが、タッチインタフェースと同じように地図の操作を行えるかどうか確認するため、この地図アプリケーションを実装した。

6.1.2 アプリケーションの機能

この地図アプリケーションはパンニングの操作を携帯と指の相対位置で行い、直感的な地図操作を提供する。拡大縮小の操作は移動量感覚の実験の振る動作の2段階の場合と同じで、拡大と縮小の操作を行う。画面をブロックしないように、すべての操作は携帯端末の下で行う。表 6.1.2 でアプリケーションの操作をまとめる。

6.1.3 実装と評価

Android SDK の Map View を利用して、地図を表示し、システムにより計算された磁石の位置情報に対して、Map View を動かす方針でアプリケーションを実装した。実装したアプリケーションを二人の被験者に全日本の地図の画面から、筑波大学まで地図を3回ナビゲーションしてもらい、時間を記録した(図 6.1)。二人とも平均として40秒弱の時間がかかった。左右上下方向のパンニングはうまく操作できたが、拡大縮小の認識精度はまだ正確ではないため、まだ簡単に操作できないと被験者から意見をもらった。この認識問題さえ解決できれば、比較的に入力しやすいインタフェースだという意見ももらった。この結果として、アプリケーションの有用性はあるが、今後の課題として、アプリケーション認識精度を上げる必要がある。



表 6.1: 地図ナビゲーション操作

6.2 文字入力アプリケーション

6.2.1 応用アプリケーションの意図

デバイスを小型化する一つの方法としては視覚のフィードバックをあきらめ、画面を使わないようにすることを挙げられる。Apple 社の iPod Shuffle¹はその方法を実現した一つの例である。このデバイスのフィードバックはほとんど音声で行われる。現在の入力インタフェースの中に、そのようなデバイスに対して音声入力ですばやく行うこともできるが、生活中には声を出しにくいシチュエーションがよくある（電車内、会議中など）。ボタンでの操作はデバイスの外側のスペースに限定される。そこで、これらのデバイスに磁石のインタフェースを応用することで豊かな入力、さらに Eyes-Free の操作（デバイスを見なくても操作できる）を実現することが可能となる。この入力方法の可能性、信頼性を調査するため、文字入力の実装したアプリケーションを実装した。

また、磁石による入力インタフェースの特徴は紙、布のような障害物に邪魔されないことである。そのため、このアプリケーションを利用すると、ユーザは携帯端末をポケットを入れたままで、文字入力することも可能である。すなわち、現在の携帯端末にもこのアプリケー

¹<http://www.apple.com/ipodshuffle/>

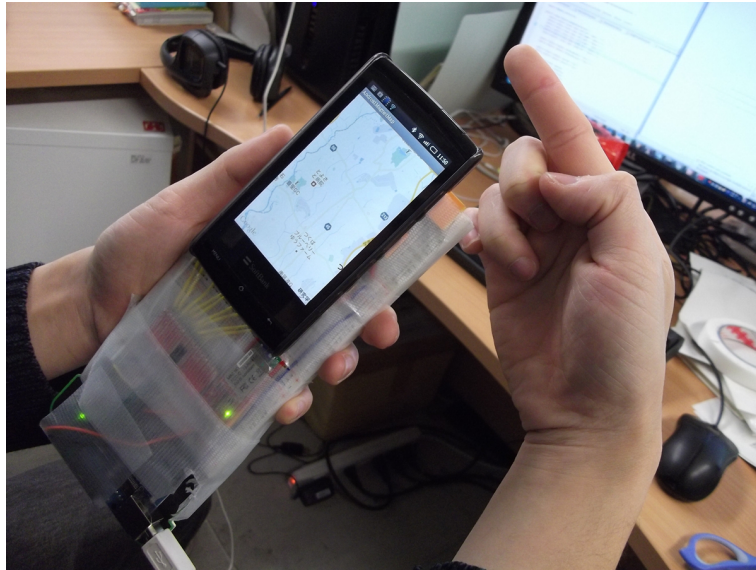


図 6.1: 地図アプリケーションの実験

シオンは使用の価値がある。

6.2.2 アプリケーションの機能

このアプリケーションの操作は簡単である。磁石を携帯に近づけ、文字の図を描き、また磁石をあげたら、書いた図はシステムに認識される。認識できたものは、音声のフィードバックをユーザに与える。現在のアプリケーションは一筆のアルファベット文字しか認識しないが、コマンドの操作を追加することもできる。また、このアプリケーションはイヤホンの磁石も使用できるように設定している。最近の携帯端末は音楽プレーヤーとして利用されることが多いため、イヤホンを携帯と一緒に持ち歩くことが普通になっている。イヤホンで入力できれば、入力用の磁石を携帯する必要がなくなる。4章で説明したようにイヤホンの磁石の検出可能範囲が狭い(2cm)。しかし、2cmはこのアプリケーションには十分な範囲である。また、2次元情報の精度は強力な磁石の場合とほとんど同じであるため、2次元の文字入力では問題がない。

6.2.3 実装と評価

実装には Android のタッチのジェスチャを認識するライブラリ `GestureLibrary`² を利用した。計算された位置情報を利用して、磁石が携帯端末に近づいたときを検出し、位置の記録を開始する。また磁石が携帯端末から離れたら終了し、記録した結果を Android の `GestureLibrary`

²<http://developer.android.com/reference/android/gesture/GestureLibrary.html>



図 6.2: イヤホンで文字入力する

に渡し、認識を行う。GestureLibrary で認識を行うデータサンプルは、GestureBuilder³で作成した(図 6.3)。

| | | | | | |
|--------|-----|-----|-----|---------|-----|
| a a | e e | j j | o o | — space | x x |
| b b | f f | k k | p p | t t | y y |
| — back | g g | l l | q q | u u | z z |
| c c | h h | m m | r r | v v | |
| d d | i i | n n | s s | x x | |

図 6.3: 認識用のサンプルライブラリ

システムを実際に二人の受験者に慣れてもらって、最後に”magnetdevice”という文字列を入力してもらった。今回の実験は、誤認識がある場合、入力したい文字が認識できるまで繰り返して入力してもらった。認識度を保つため、入力はなるべくゆっくりするように被験者に伝えた。入力に利用したイヤホンは Apple 社の MA662G イヤホンである。

一人目は 43 秒で入力を完了し、誤認識は 3 回起こった (a q,a d,v u)。入力したものは図 6.4 で示す。

二人目は 51 秒で入力を完了し、誤認識は 4 回起こった (a d,n u,d q,e i) 入力したものは図 6.5 で示す。

アプリケーションの練習と実験の後、被験者から、アプリケーションについてコメントをもらった。

³<http://android-developers.blogspot.com/2009/10/gestures-on-android-16.html>

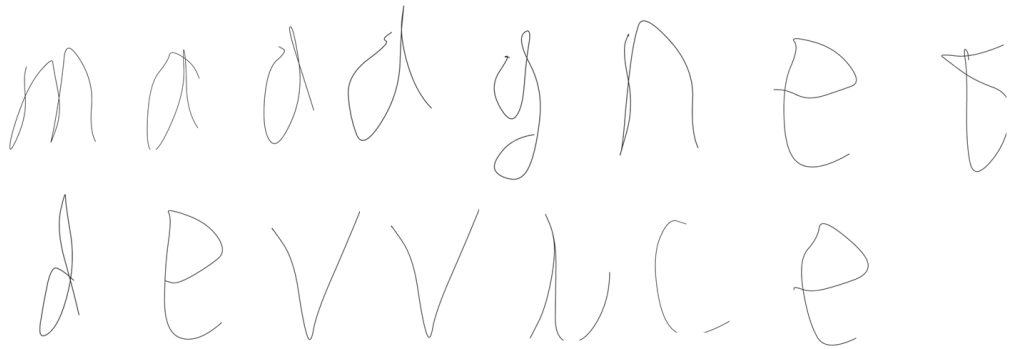
Handwritten input for Subject 1. The first row contains the characters 'm', 'a', 'd', 'd', 'g', 'n', 'e', 't'. The second row contains 'd', 'e', 'v', 'v', 'l', 'l', 'e'. The characters are written in a cursive style with some variations in stroke order and shape.

図 6.4: 被験者 1 の入力した結果

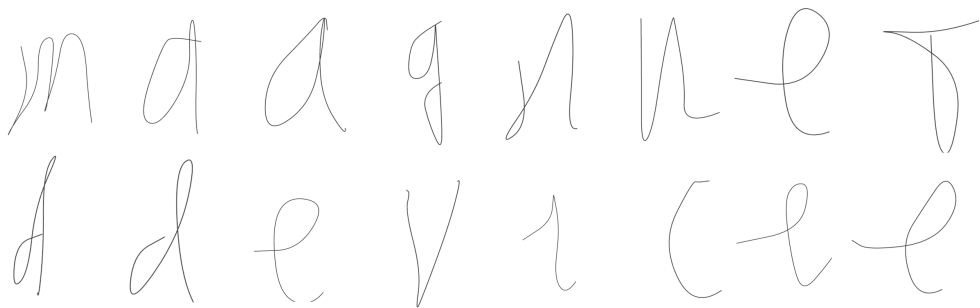
Handwritten input for Subject 2. The first row contains the characters 'm', 'a', 'd', 'g', 'n', 'l', 'e', 't'. The second row contains 'd', 'd', 'e', 'v', 'l', 'l', 'e', 'e'. The characters are written in a cursive style, similar to Subject 1 but with some differences in stroke order and shape.

図 6.5: 被験者 2 の入力した結果

- 入力はかなりできる
- a と d,n と r,i と e はよく誤認識される、また k の入力は難しかった
- t の書き方はちょっと不自然なので覚えにくい

実験から、認識精度はまだ低く、すばやく入力することもまだできないが、実用可能なインタフェースだと言える。また、入力したもの(図 6.4、図 6.5)から、自分が何を入力しようとしたのか判断はできると両者から確認してもらった。すなわち、認識しなくても、そのままに入力したデータを保存するだけで、すばやくメモできるアプリケーションとして利用することもできる。

第7章 まとめと今後の課題

本研究では複数磁気センサを利用して、磁石の3次元位置情報を取得するデバイスを開発し、携帯端末インタラクションへの応用の調査を行った。複数の磁気センサを利用することにより、3次元の位置情報を取得する過程を高速化することができ、携帯端末にインタラクションとして応用することは可能である。その方針に従って、試作デバイスを実装し、またそのデバイスの精度の評価、有用性の調査を行い、それに基づいて二つの応用アプリケーションを実装した。

今後の課題として、入力デバイスの課題とインタラクションの課題がある。入力デバイスの高さの精度はまだ低く、より豊かなインタラクションを得るためには、改善の必要がある。また、現在の計算の流れには、地磁気はまだ考慮していないため、システムを動かしたりすると、計算する位置がずれてしまうので、システムを実際に利用するには地磁気のキャンセリングの必要もある。それで、携帯端末の処理能力の限界を超えないよう、これらの問題を解決する過程に計算量をできるだけ削減するのは入力デバイスとして一番大きな課題である。また、本研究で、現在3次元情報のインタラクションへの応用はまだ徹底的に調査されていない。3次元情報を利用してより直感的なユーザインタフェースに利用することが重大な課題である。

謝辞

本論文を執筆するに当たり、指導教員である高橋伸先生、田中二郎先生をはじめ、三末和男先生、志築文太郎先生には、丁寧なご指導と適切な助言を多数いただきました。深く御礼申し上げます。また、IPLAB(田中研究室)の皆様にもゼミなどを通じて大変貴重なご意見をいただきました。特にユビキタスチームの皆様にはグループでのミーティングだけでなく、日常的に多くのご意見やご指摘を頂きました。ありがとうございました。

最後に、私を支えてくれた家族、友人たちに、心より感謝いたします。

参考文献

- [1] Kratz, S. and Rohs, M. Hoverflow: exploring arounddevice interaction with IR distance sensors. *In Proc. of MobileHCI 2009*, ACM Press (2009), pp 1–4. 2009.
- [2] Henrysson, A., Marshall, J., Billingham, M. Experiments in 3d interaction for mobile phone ar *GRAPHITE '07: Proceedings of the 5th International Conference on Computer graphics and interactive techniques* in Australia and Southeast Asia, ACM, New York, NY, USA, pp 187–194. 2007.
- [3] Hinckley K, Pierce J, Sinclair M, Horvitz E Sensing techniques for mobile interaction *In Proceedings of the 13th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 91–100. 2000.
- [4] 廣部祐樹、船橋一訓、新倉雄大、渡辺義浩、小室孝、石川正俊 単眼カメラを用いた携帯機器向け空中タイピングインターフェース映像情報メディア学会情報センシング研究会・メディア工学研究会 (金沢, 2009.6.16) / 映像情報メディア学会技術報告、IST2009-32, ME2009-108, Vol.33, No.23, pp.65–68. 2009.
- [5] Butler, A., Izadi, S., Hodges, S. Sidesight: multi-“ touch ” interaction around small devices. *In Proceedings of the 21st annual ACM symposium on User interface software and technology*, ACM, New York, NY, USA, UIST '08, pp 201–204. 2008.
- [6] Touch interface on back of the hand Nakatsuma K, Shinoda H, Makino Y, Sato K, Maeno T *In ACM SIGGRAPH 2011 Posters*. 2011.
- [7] Hamed Ketabdar, Kamer Ali Yuksel, and Mehran Roshandel. Towards using embedded magnetic field sensor for around mobile device 3D interaction *In Proc. MobileHCI 2010*, ACM Press (2010), pp 153–156. 2010.
- [8] Hamed Ketabdar, Kamer Ali Yuksel, and Mehran Roshandel. MagiWrite: towards touchless digit entry using 3D space around mobile devices. *In Proc. MobileHCI 2010*, ACM Press (2010), pp 443–446. 2010.
- [9] Hamed Ketabdar, Kamer Ali Yuksel, and Mehran Roshandel. MagiTact: interaction with mobile devices based on compass (magnetic) sensor *In Proc. MobileHCI 2010*, ACM Press (2010), pp 443–446. 2010.

- [10] Hamed Ketabdar, Amirhossein Jahanbekam, Kamer Ali Yuksel, Tobias Hirsch, and Amin Haji Abolhassani. MagiMusic: using embedded compass (magnetic) sensor for touch-less gesture based interaction with digital music instruments in mobile devices. *MagiMusic: using embedded compass (magnetic) sensor for touch-less gesture based interaction with digital music instruments in mobile devices* (TEI '11). ACM, New York, NY, USA, pp 241–244. 2011.
- [11] Harrison, C. and Hudson S. E. Abracadabra: wireless, high-precision, and unpowered finger input for very small mobile devices. *In Proc. UIST 2009, ACM Press (2009)*, pp 121-124. 2009.
- [12] Ashbrook, D., Baudisch, P., and White, S. Nanya : Subtle and Eyes-Free Mobile Input with a Magnetically-Tracked Finger Ring *In Proc. of CHI 2011, ACM.*, pp 121–124. 2009.
- [13] C. Hu, M. Q. Meng, and M. Mandal. A linear algorithm for tracing magnet position and orientation by using Three-Axis magnetic sensors. *IEEE Transactions on Magnetics, (12), Dec. 2007*, pp 4096–4101. 2007.
- [14] Han, X., Seki, H., Kamiya, Y., and Hikizu, M. Wearable handwriting input device using magnetic field. *In Proc. SICE '07*, pp. 365–368. 2007.
- [15] D.K.Cheng *Field and Wave Electromagnetics: Static Magnetic Fields*. MA: Addison-Wesley. 1989.