

CapacitiveMarker: 接触認識可能な 2 次元コードを用いたインタラクション手法

池田 昂平^{†1} 沖 真帆^{†2} 塚田 浩二^{†2}

概要: 現在広く普及している 2 次元コードは、読み取り時に入力部となるカメラとの間に一定の距離を作らなければ認識されないという空間的制約がある。一方、近年タブレット端末等の静電容量式マルチタッチディスプレイの普及に伴い、導電性パターンを接触させ、マーカーのように扱う研究事例が多く報告されている。そこで本研究では、両者を統合し、2 次元コードを印刷した紙と導電パターンを印刷した透明フィルムの 2 枚を重ね合わせる事で、カメラ／静電式タッチディスプレイのどちらからも認識可能な新しい 2 次元コード「CapacitiveMarker」を提案する。さらに、CapacitiveMarker を用いた様々なインタラクション手法について応用アプリケーションを通して紹介する。最後に、評価実験を通して CapacitiveMarker の基礎的な性能を調査した。

CapacitiveMarker: Novel Interaction Method using Visual Marker Integrated with Conductive Pattern

KOHEI IKEDA¹ MAHO OKI^{†2} KOJI TSUKADA^{†2}

Abstract: The visual markers have spatial limitations to require certain distances between a camera and markers. Meanwhile, as capacitive multi-touch displays on mobile devices have become popular, many researchers proposed interaction techniques using conductive patterns and a capacitive display. In this study, we propose a novel visual marker, “CapacitiveMarker”, which can be recognized both by a camera and capacitive display. The CapacitiveMarker consists of two layered markers: a visual marker printed on a seal and a conductive pattern on a plastic lm. In addition, we propose a new interaction method using CapacitiveMarker through several applications. Finally, we performed evaluation to confirm the performance of the CapacitiveMarker.

1. はじめに

近年、スマートフォンやタブレット等のモバイル端末と実世界を連携させたインタラクションの研究が盛んに行われている。特に端末内蔵カメラを用いて 2 次元コードを認識させるインタラクション手法 [1][2][3][8] は古くから盛んに取り組まれている。こうした 2 次元コードを用いたインタラクションは安価で手軽に実現できる反面、カメラの画角の制約を受ける欠点があり、例えば、カメラを近づけすぎると認識できなかった。一方、近年では静電容量式マルチタッチディスプレイ（以下、タッチパネル）に着目し、物理的なモノに銅箔等の複数の導電素材を取り付け、静電式マーカーとして扱う研究も多数提案されている [4][9][10][11][13]。これらの手法は、タッチパネル上でのモノの ID 認識や位置検出を実現するが、タッチパネルから離れると認識が困難であった。本研究では、導電性インクによるパターンを 2 次元コードに内包させることにより、カメラによる認識だけでなく、タッチディスプレイに接触させても認識させることのできる 2 次元コード

「CapacitiveMarker」を提案する（図 1）。これにより、端末（カメラ）から一定距離離れている状態と、端末（タッチパネル）に接触した状態の双方でマーカーの ID／位置／向き等を用いたインタラクションを行うことができる（図 2）。本稿では、CapacitiveMarker を使って操作するアプリケーションの実装を行い、応用方法を検討する。また、CapacitiveMarker の操作性と認識精度、認識範囲を検証するための実験とその評価を行う。

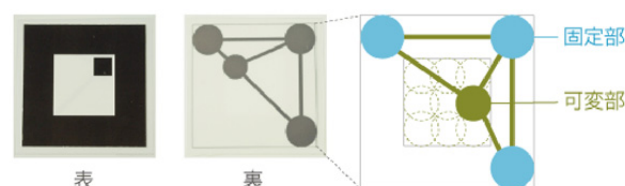


図 1 CapacitiveMarker の構成。

AR マーカーと静電マーカーを 2 層に重ねている。

Figure 1 The configuration of the CapacitiveMarker

2. 関連研究

本研究に関連する研究事例について、「タッチパネルを用いたインタラクション」、「2 次元コードを用いたインタラクション」、「導電性インクを用いたプロトタイピングの支援」という領域から紹介する。

^{†1} 東京大学大学院
The University of Tokyo
^{†2} 公立はこだて未来大学
Future University Hakodate

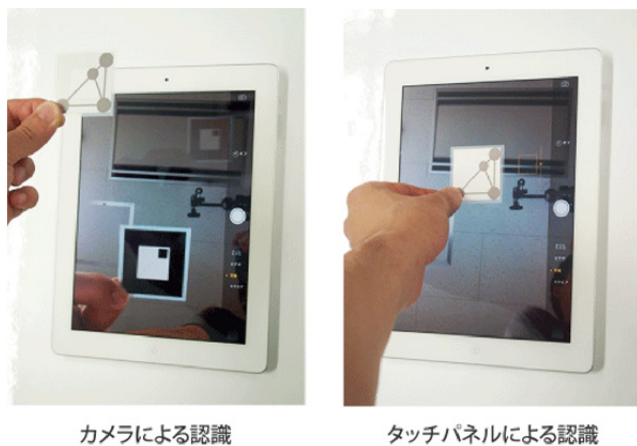


図 2 CapacitiveMarker の特徴. 端末から一定距離離れている状態と接触した状態の双方でマーカーを検出できる。

Figure 2 The basic concept of the CapacitiveMarker.

2.1 タッチパネルを用いたインタラクションの研究

タッチパネルを用いたインタラクションの研究は数多く行われている。ここでは、「静電容量方式」と「赤外光反射方式」の 2 つの認識方法から研究事例を紹介し、それらの研究と本研究の差分を述べる。

2.1.1 静電容量方式

近年、手指の検出だけでなく、物理的なモノに銅箔等の複数の導電素材を取り付けて静電式マーカーとして扱うインタラクション研究が多数提案されている。

Rekimoto は、ユーザの手指が触れた位置の静電容量変化を計測し、複数の手指の位置や形状、センサ表面からの距離を検出する SmartSkin を提案している[4]。さらに、物体に銅箔を取り付け、センサ上での物体認識を可能にしている。紙窓[11] は、カードに複数の導電部を配置し、タッチパネル上に置くことで、導電性パターンに対応したアプリケーションを起動できる。カードに空けられた穴に沿ってタッチする事により、操作を行うことができる。くるみる[9] は、複数導電部を持つ枠型の物理オブジェクトをディスプレイ上で回し、操作に対応した表示を枠の中から見るインタフェースを提案している。池松ら[10] は、タッチパネル接触時に得られる情報の一つとして指等の接触面積を利用し、マルチタッチインタラクションの拡張を提案している。タッチパネル上における複数本の指やタッチペン等の接触面積を利用し、そこから指とペンの判別、接触状態や疑似押下圧力の推定を行うことで、アプリケーション中の入力を切り替える事ができる。PUCs は、電気的に接続した 2 つのマーカーのうち、一方のマーカーのタッチ領域を接地点として利用し、もう一方のマーカー直下にある電極の格子点に静電容量の変化を与えることで、タッチパネル上でユーザが非接触状態において継続的なウィジェットのトラッキングを可能とする。[13]。

2.1.2 赤外光反射方式

タッチパネルの認識方法では静電容量式の他に、タッチパネルの背面に赤外線カメラを設置して、赤外線を反射するマーカーをトラッキングする手法が多数提案されている。SLAP Widgets[5] は、アクリルやシリコン製の半透明な物理ウィジェットの複数部に反射材を取り付け、ディスプレイ下の赤外光 LED とカメラの組み合わせによりウィジェットの位置を認識する。さらにディスプレイ下に設置したプロジェクターから映像を投影する事により、ユーザは仮想ウィジェットと物理ウィジェットを混合した操作を行うことができる。Lumino[6] は、物理的なブロックの内部にガラスファイバーを入れることで、2 次元マーカーから反射した赤外線をタッチパネル下のカメラへ送り、画像のパターン認識を行う。

前述した静電容量方式のマルチタッチ検出手法の多くは、タッチパネルから離れると認識が困難になるという問題がある。SmartSkin はユーザの手指がタッチパネルから離れた状態でもタッチパネル表面からの距離を計測できるが、現在普及している iPad の様な携帯端末のタッチパネル上で接触していない手指や物体を認識する事は困難である。赤外光方式については、タッチパネル下部に赤外光を発する LED とカメラを設置する必要がある、静電容量式タッチディスプレイと比べて環境構築の負担が大きい。

本研究では、現在普及している一般的な静電容量式タッチパネル搭載型の携帯端末上で、端末（カメラ）から一定距離離れている状態と、端末（タッチパネル）に接触した状態の双方でマーカーの ID/位置/向き等を用いたインタラクションを行うことができる。

2.2 2次元コードを用いたインタラクションの研究

2 次元コードを用いたインタラクションは古くから取り組まれており、特に、端末内蔵カメラを用いて認識させるインタラクション手法は盛んに研究されている。Rekimoto らは、CMOS や CCD 等の安価なカメラを利用して認識できる 2 次元コード「CyberCode」と、それを利用した拡張現実環境を提案している[3]。CyberCode は、ID 認識とともに 2 次元コードを貼り付けた実物体の 3 次元位置も計測することができ、マーカー上に 3D オブジェクトを表示させる事ができる。綾塚らは、コード内の可変部分を手や指で隠すことにより 2 次元コードを拡張した操作を行う Active CyberCode を提案している[8]。AR マーカーを使ったアプリケーションを開発するためのソフトウェアライブラリ「AR-ToolKit」を用いた研究も多く行われている。例えば、頭部に装着したヘッドマウントディスプレイを通して、AR マーカーの上に重ねて表示される仮想オブジェクトに対する操作を可能にしたり、遠隔ビデオ会議を支援する研究が行われている[1][2]。

既存の 2 次元コードは、カメラに対して一定の距離までマーカーを近づけると認識が困難になるという欠点がある。

本研究では、マーカーがカメラに対して認識できない近い距離にある場合、タッチパネルによって認識を補足する。

2.3 導電性インクを用いたプロトタイピングの支援

安価で素早いラピッドプロトタイピングを支援するために、家庭用複合機と導電性インクを用いて導電性パターンを生成する手法が Kawahara らによって提案されている[7]。これにより、タッチパネル上でイベント検出が可能な電極パターンの開発を容易に行うことができる[12]。本研究では、この手法を用いて静電マーカーを制作し、大量かつ手軽に製作できるマーカーを提案する。

3. CapacitiveMarker

本研究で提案する CapacitiveMarker の概要と、実装として「マーカーの構成」、「静電マーカーの認識方法」、「2次元コードの認識方法」について述べ、応用例を紹介する。

3.1 提案

CapacitiveMarker は、2次元コードを印刷したシール紙と、導電性インクで特定のパターンを印刷したプラスチックフィルムの2枚を重ね合わせた構造を持つ(図3)。パターン作成の自由度と手軽さを重視して ARToolKit [a] 準拠の2次元コード(以下、ARマーカー)を採用する。導電性のパターン(以下、静電マーカー)は、周辺部に3点の固定点を、中央部に1点の可変点を設置する。固定点の位置はどのマーカーでも変化しないが、可変点の位置はマーカーによって変動し、固定点からの相対位置の変化で ID 認識を行う(図1右)。この静電マーカーを印刷したフィルムを ARマーカーが印刷されたシール紙で隠すように上から貼り合わせることで、見た目は通常の ARマーカーであるが、タッチパネル上での ID / 位置 / 向き等の認識を行う事ができる。CapacitiveMarker は、スマートフォンやタブレットのようなカメラとタッチパネルが取り付けられた端末上で利用する。端末を机等に水平に置いた状態で、マーカーを端末から一定の高さに持ち上げると、端末カメラから ARマーカーとして認識され、そこから垂直方向に下げてタッチパネルの上に置くと静電マーカーとして認識される。

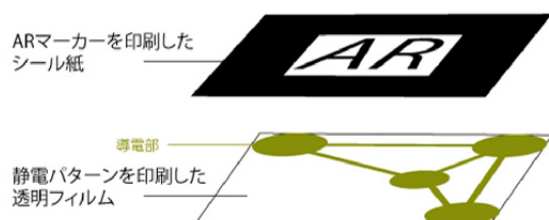


図3 CapacitiveMarker の階層構造. 静電パターンの印刷面がシール紙の粘着面と合わさるように重ねる。

Figure 3 The layered configuration of the CapacitiveMarker

a <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>

3.2 実装

本研究では、CapacitiveMarker の認識を行う端末に iPad2 を採用し、iOS で動作するアプリケーションをプログラミング言語 Objective-C で開発する。

3.2.1 マーカーの構成

マーカーのサイズは全体を 40mm × 40mm とした。前述したように、マーカーは2層構造であり、ARマーカーは通常のインクジェットプリンターで、静電マーカーは Kawahara らの提案手法[7]を用いて、銀ナノインクを用いたインクジェットプリンターで出力する。ARマーカーは、厚さ約 0.07mm のシール紙に、静電マーカーは厚さ約 0.13mm の透明プラスチックフィルムに印刷した。

次に、静電マーカーの詳細について説明する。静電マーカーは、タッチパネル上で検出可能な4点の円形導電部(以下、タッチポイント)を中心に構成される。タッチポイントは、マーカーの周辺部に直径 10.0mm の固定点を3点、中央部に直径 8.0mm の可変点を1点配置し、それぞれを導電性の接続線(太さ 1.0mm)でつなぐ。これにより、ユーザがマーカーの周辺部を持ってタッチパネル上に置くと、全てのタッチポイントにおいてタッチイベントが検出される。ここで、周辺部3点の固定点を認識することで、マーカーの位置と向きを検出する。次に、固定点と可変点の相対位置を元に、マーカーの ID を検出する。なお、固定点の位置は ARマーカーの黒枠部分の3つの頂点に合わせている(図1右)。また、可変点の位置は ARマーカーの内枠に収まる範囲で変動させ、図4のように9つのパターンを作成した。

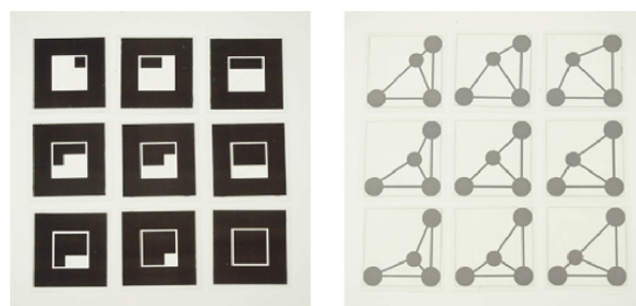


図4 製作した9種類のマーカー

Figure 4 Examples of the CapacitiveMarker

3.2.2 静電マーカーの認識方法

静電マーカーの認識は、マーカー領域の認識と、ID認識の2段階に大きく分けられる(図5)。マーカー領域の認識は、一定の間隔で配置した周辺部の固定点3点を検出する。まず、マーカーが接触すると各タッチポイントに対応して4つのタッチイベントが生成される。次に、これらの座標間の直線距離を計算し、そのうち距離が最大となる2点を対角線上の固定点とする(図6の1)。さらに、対角線上にある固定点2点からの距離が等しい1点を残りの固定点と

する。この時、距離が等しい座標が2つある場合は、距離が長い方を固定点とする（図6の2）。以上の固定点3点を検出し、最初に静電マーカの領域を認識する。ID認識は、4点のうち残りの1点を中央の可変点として特定し、2つの固定点からの距離によって、マーカのIDを判別する（図6の3）。

マーカの位置は、固定点2つ以上の座標から特定できる。今回は、対角線上の固定点2点の座標から求めたマーカの中心座標(x, y)を、マーカの位置とする。各タッチポイントの座標は、マーカがタッチパネルに接触した時（タッチイベント時）又は、接触した状態でタッチパネル上を移動した時（ドラッグイベント時）に更新される。この際、プログラムで取得する各点の座標情報は不規則に並べ替えられてしまうため、イベント発生毎に固定点3点を再度検出し、特定し直す必要がある。そこで、直前に保存した固定点3点の座標と、新たに更新された4つの座標を比較し、固定点3点を推定する。すなわち、直前の各固定点の座標から最も近い座標の点をそれぞれ同一の固定点とする。これにより、マーカの位置検出を安定化する（図7）。また、時系列上の複数の座標情報を用いる事により、前後左右の移動方向も検出する。

マーカの回転角の計測は、回転角の大きな分類と、細かな回転角の測定に分けられる。まず、マーカの向きを 0° 、 90° 、 180° 、 270° の4種類に大きく分類する。対角線上にない固定点と中央の可変点の位置関係からマーカの回転角は4種類に分類される（図8）。回転角の分類は、対角線上の固定点2点（図9のp1とp2）を判別するために。次に、細かな回転角の測定を行う。対角線上の固定点p1と対角線上にない固定点p3の2つの座標から、回転角を測定する。p3を原点とし、p1の座標から角度を決定する（図9）。

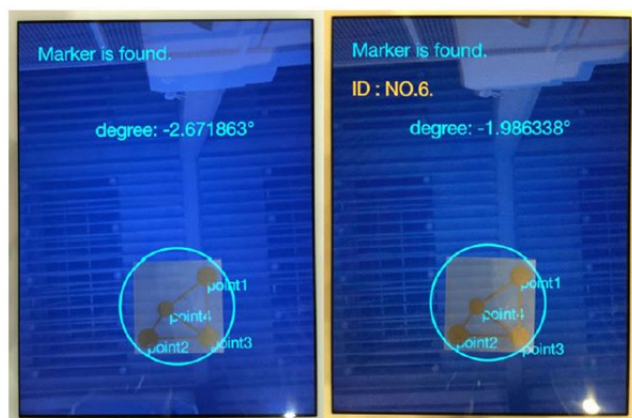


図5 静電マーカの認識。マーカ領域の認識（図左）とIDの認識（図右）に分けられる。画面中の「Degree」の数値は、マーカの回転角を示している。

Figure 5 The detection of the CapacitiveMarker.

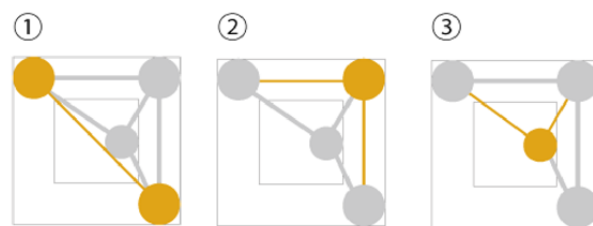


図6 静電マーカにおけるタッチポイントの認識順序
(1) まず、対角線上の固定点2点を検出。(2) 残りの固定点1点を検出。(3) 可変点の相対位置を計測。

Figure 6 The detection procedures of the conductive patterns.

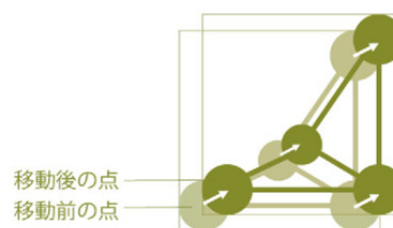


図7 静電マーカの時系列による同一点の検出方法。マーカの位置が変動した時に、直前の座標から最も近い座標の点をそれぞれ同一点とする。

Figure 7 The calibration method of conductive patterns.

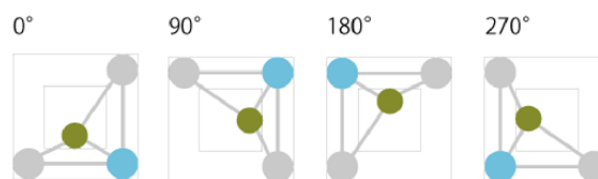


図8 静電マーカの回転角の大きな分類。2つの固定点に挟まれた固定点1と、中央の可変点の位置関係で判定。

Figure 8 Rough classification of rotation angle

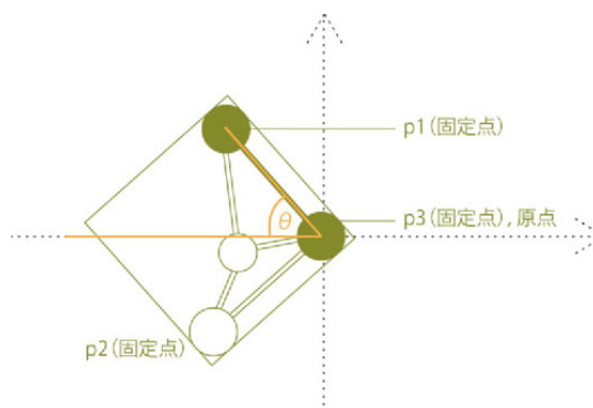


図9 静電マーカの細かな回転角の計測。対角線上で対にならない固定点p3を原点とし、対角線上の固定点p1の座標から回転角度を求める。

Figure 9 Detailed calculation of rotation angle

3.2.3 2次元コードの認識方法

2次元コードの認識は、metaio 社が提供している metaio SDK[b]を利用する。Metaio SDK は、スマートフォンアプリに画像認識／重量等の AR (Augmented Reality) 用の機能を追加できるライブラリである。さらに、AR マーカの自動生成、トラッキング設定ファイルの自動生成を行うため、専用アプリケーション metaio Creator を利用する。トラッキング設定ファイルは、端末に AR マーカを登録するための、マーカ情報を保持したファイルである。上記の metaio SDK と metaio Creator を使用する事により、端末のカメラから AR マーカを認識させる事ができる。マーカの ID に加えて、カメラから見たマーカの 3 次元座標や回転角、カメラからの奥行きを検出する事ができる (図 10)。位置の計測は、まずカメラを基点とした座標系で 3 次元座標を取得し、ディスプレイ幅のピクセル数に合わせて、3 次元座標から 2 次元座標へ変換を行っている。この時取得した 3 次元座標の z 軸成分をカメラからの奥行きとする。

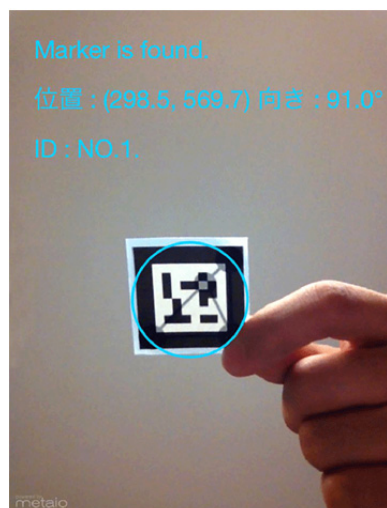


図 10 AR マーカの認識. ID/位置/向きが検出される。
Figure 10 Detection of the AR marker: ID / position / direction

4. 応用

本章では、CapacitiveMaker の展開例として、地図アプリケーションへの適用、物理的なハードウェアの工夫、その他の応用可能性について示す。

4.1 視点切り替え機能付き地図アプリケーション

CapacitiveMarker を使った応用例の一つとして、マーカをタッチパネルから浮かせた状態と接地させた状態で視点を切り替える地図アプリケーションの実装を行った (図 11)。ユーザがマーカを端末から一定の高さに持ち上げると、俯瞰視点の Google マップを表示し、マーカを下ろして端末表面に接地させると、地図上の接触部分の緯度／経度に対応する場所を Google ストリートビューで表示す

る。マーカを浮かせた状態ではカメラによる認識を行い、マーカの ID / 位置 / 向き / カメラからの奥行きを検出する。これにより、Google マップの移動 / 回転 / 拡大縮小等の操作をすることができる (図 12)。さらに、マーカを端末に近づけてカメラからの奥行きが一定距離以下に小さくなった時は、俯瞰視点の操作を停止し、誤動作を軽減するように配慮した。

タッチパネルによる認識時は、静電マーカの向きを検出し、Google ストリートビューのパノラマ写真上で視線方向を 360° 回転させる操作を行うことができる。マーカを回転させると、パノラマ写真の風景も水平方向に回転し、視線方向が変化する (図 13)。

このように、本アプリケーションでは 1 つのマーカの接地状態に応じて直感的に 2 タイプの地図の操作を行うことができる。

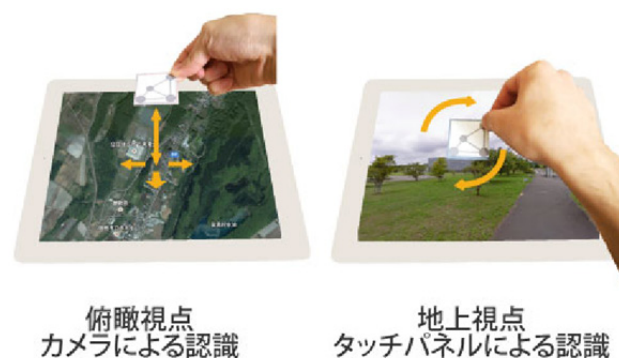


図 11 視点の切り替えが可能な地図アプリケーション。
マーカを浮かせた状態と接地させた状態で、Google マップと Google ストリートビューを切り替える。

Figure 11 Map application using the CapacitiveMarker

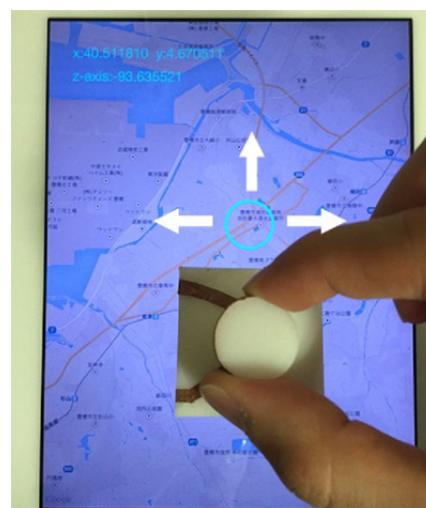


図 12 俯瞰視点モード。マーカを浮かせた状態で水平／垂直方向に移動させることで、地図を移動させる。

Figure 12 The control method of overhead view

b <http://www.metaio.com/products/sdk/>

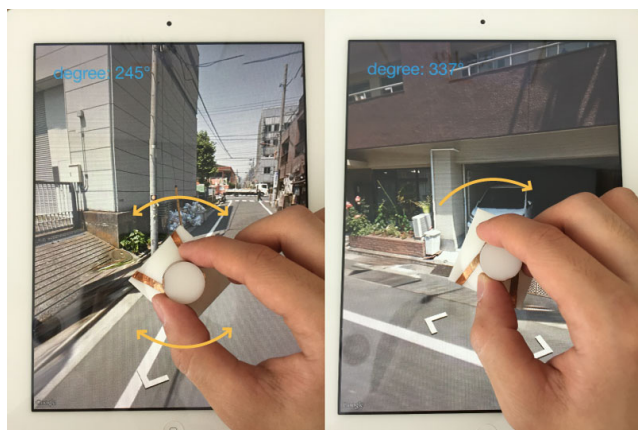


図 13 地上視点モード. 静電マーカを接地させた状態で、マーカに向きに応じて、Google ストリートビューの視線方向が回転して変化する。

Figure 13 The control method of street view.



図 14 立体形状のつまみ. 左：底面，中央：俯瞰した面，右：側面. 底面に 2 次元コードを接着させていない状態。

Figure 14 Physical knob for the CapacitiveMarker

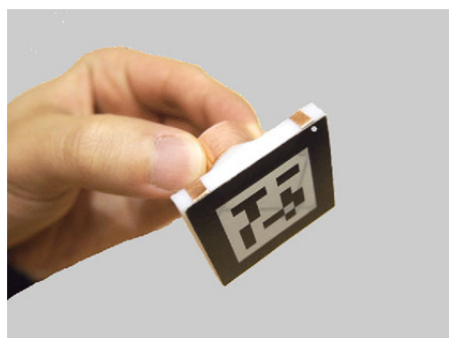


図 15 CapacitiveMarker を取り付けした立体形状のつまみ. つまみ周囲の導電テープが静電マーカの導電部に触れるように接着させた。

Figure 15 The CapacitiveMarker attached on the physical knob.

4.2 CapacitiveMarker の形状に関する検討

提案・実装の章で述べた通り、CapacitiveMarker は薄いシール紙とプラスチックフィルムを重ね合わせた 2 次元コードであるため、そのまま使用するとマーカの端を直接手で持った状態で操作を行うことになる。このため、カメラに対してマーカの一部分が隠れたり、マーカを端末に接地させるときに、マーカを持った手指が直接タッチパネルに触れて、誤認識が起こる要因となり得る。そこで、CapacitiveMarker の物理的操作性を向上させるために、マ

ーカーに立体形状のつまみを取り付ける (図 14, 15)。つまみは、CAD ソフトで設計した 3 次元モデルを 3D プリンタから出力し、つまみ下部から持ち手までを銅テープで配線した上で、CapacitiveMarker の静電マーカ側とつまみ下部を密着させる。これにより、マーカをつまんで持ち上げたり、回転させる動作が容易となる。この他にも、カードと一体化したり、日用品に張り付けたりといった、アプリケーションに合わせた様々な形状を検討する。

4.3 その他の応用例

本稿では、応用例として視点を切り替える地図アプリケーションを提案/実装したが、他に応用例の一つとして、マーカを浮かせた状態と接地させた状態で操作キャラクターを切り替えるゲームを検討している。例えば、見下ろし型のシューティングゲームにおいて、ユーザがマーカをタッチパネルに接触させている時は、地上視点で歩兵を操作し、マーカを持ち上げている時は、空中視点で航空機を操作するような内容である。歩兵が航空支援を受けながら戦うような状況を想定し、両者を素早く切り替えながら操作できるよう工夫したい。

5. 実験と評価

本章では、CapacitiveMarker の基礎的な性能を評価する。

5.1 目的

本実験の目的は、「静電マーカの認識精度」と、「AR マーカの認識可能範囲」を明らかにする事である。まず、静電マーカの認識精度の評価は、タッチパネルに接地した時にマーカ領域が認識される確率と、マーカの ID が正しく識別される確率を調査する。AR マーカの認識可能範囲の測定は、マーカを浮かせた時に端末内蔵カメラから認識が可能な空間を調査する。ここでは、端末に対して垂直方向の高さと、水平方向の縦軸、横軸の認識可能な最大距離をそれぞれ調査する。

5.2 手法

本実験では、静電容量式タッチディスプレイとカメラが内蔵されたタブレット端末 (iPad2) を使用し、端末を机等の上に水平に置いた状態にする。さらに、前章で紹介した立体形状のつまみの底面に CapacitiveMarker を接着させ、つまみを持った状態でマーカの操作を行う。これは、マーカを直接手で持った状態で操作すると、AR マーカの面の一部が手指で隠れたり、タッチパネルにマーカを接地させた時に手指が直接タッチパネルに触れて認識に影響を与える可能性があるためである。

5.2.1 静電マーカ認識精度の評価

静電マーカの評価実験では、マーカ領域の認識と ID 認識の精度評価を同時に行う。マーカを接着させた立体形状のつまみを指で挟み持ち上げた状態から、垂直方向に下ろしてタッチパネルの表面に接地させる。この時のマーカ領域認識の有無と、ID の誤認識の有無を調べる。な

お、マーカー領域のみ認識され、ID が認識されない場合は、ID の誤認識と見なす。実験では第 3 章で述べた仕様に基づく 5 種類のマーカー（図 16）を用意し、試行回数は各マーカーにつき 20 回とする。

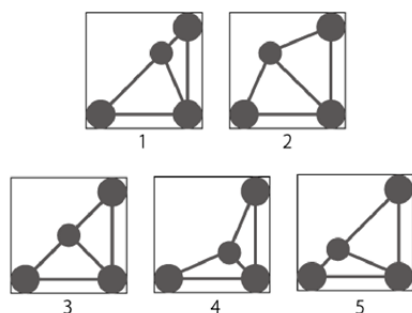


図 16 実験に使用する 5 種類の導電パターン

Figure 16 Conductive patterns used in the evaluation

5.2.2 AR マーカー認識範囲の測定

AR マーカーの認識範囲の測定は、静電マーカーの実験手法と同様に CapacitiveMarker を接着させたつまみを持って測定を行う。まず、マーカーがカメラから認識される最大の高さを調べる。マーカーを端末から垂直方向に持ち上げ、カメラから認識されなくなる位置の直前で止め、端末表面からの高さを計測する。この時、マーカーが常時安定して認識されている事を確認する。

次に、端末の水平方向で認識可能な範囲を調べる。水平方向では、端末上下の縦軸と左右の横軸で、端末の端から認識可能な最大距離をそれぞれ調べる。1 つ前の手順で計測した高さを保った状態で、端末水平方向の縦軸、又は横軸にマーカーを移動させ、マーカーが認識されなくなる位置の直前で止め、端末の端から距離を測定する。この時、マーカーが常時安定して認識されている事を確認する。

5.3 結果

本実験で行った「静電マーカー認識精度の評価」と「AR マーカー認識可能範囲の測定」の実験結果について述べる。

5.3.1 静電マーカー認識精度の評価

本実験では、5 種類のマーカーを用意し、マーカー領域と ID の認識成功率を調査した。実験結果を図 17 に示す。マーカー領域の認識成功率は、全てのマーカーにおいて 100% であった。ID の認識成功率は、最も高いマーカー 1（図 17 の 1）が 100% となり、最も低いマーカー 3（図 17 の 3）が 75%、全体の平均が 86% となった。また、静電マーカー認識時の描画の処理時間について計測したところ、平均処理時間が約 0.019 秒であった（SD 0.040）。

5.3.2 AR マーカー認識範囲の測定

AR マーカーの認識可能範囲は、垂直方向の高さ距離が最大約 60cm であった。また、高さ距離の最小はカメラからの水平距離によって差が生じ、画面の端末の上端、中央、下端でそれぞれの位置で約 8.5cm、約 22.5cm、約 38.5cm で

あった。さらに、高さが約 60cm の状態で、端末の上端から約 30cm、下端から約 7cm、左右端から約 11cm 離れた位置までマーカーが認識された（図 18）。

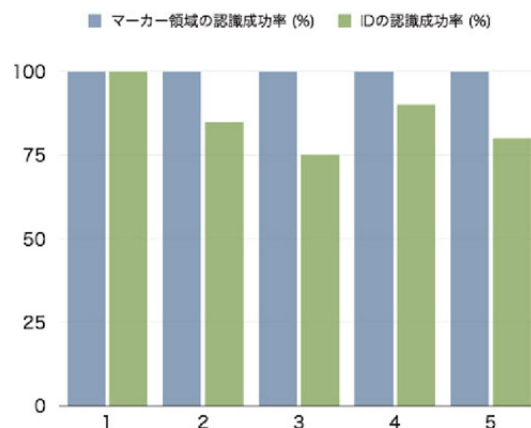


図 17 静電マーカー認識精度評価の実験結果

Figure 17 Recognition accuracy of conductive markers

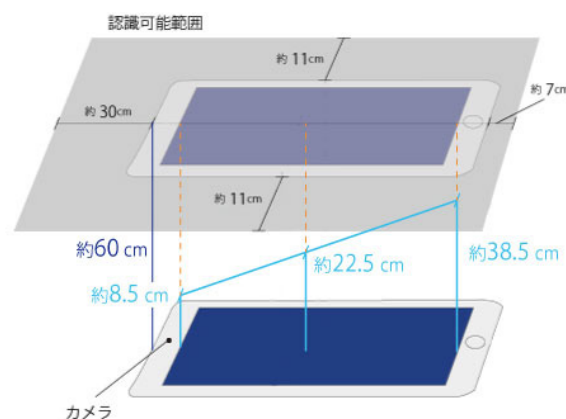


図 18 AR マーカーの認識範囲の測定結果

Figure 18 Detectable area of the AR marker

5.4 考察

実験結果に基づき、CapacitiveMarker の性能を考察する。

5.4.1 静電マーカーの認識精度

実験結果から、静電マーカーのマーカー領域の認識精度は高く、安定していると考えられる。さらに、ID の認識成功率は 5 種類のマーカーで異なり、最も高いマーカー ID 1 の認識成功率と最も低いマーカー ID 3 の認識成功率の差は 25% である。最も認識率が低い（75%）マーカー 3 のケースでは、2 つの認識エラーが発生した。すなわち、異なる ID として誤認識される事と、一致する ID をシステムが検出しないケースである。

前者は、静電マーカーの固定点がタッチパネル上の実際の位置からずれた位置で検出されるために起こる。マーカー 3 が持つ中央の変点は丁度マーカーの中央に位置しているが、固定点検出のずれにより、マーカー 1 として ID が誤認識される場合があった。

後者は、システム側で ID を認識する際の閾値を狭く設定しているために起こると考えられる。前述のように、本システムでは ID を認識する際に、固定点と変点の間の距

離を計測し、この数値に基づいて ID を判別している。しかし、他のマーカーID との誤認識を防ぐために、判別の基準となる閾値の範囲を狭くする事で、実際の値が正しい ID に近い数値を示しても認識されないという事が起こる。この閾値はマーカー毎に設定可能で有り、特にマーカー3 の場合は、可変点がマーカーの中央にあり、他のマーカーと誤認識されやすいため、閾値を他のマーカーより狭く設定していた。今後は認識アルゴリズムの改善を中心とした認識精度の向上を目指す必要がある。

5.4.2 AR マーカーの認識可能範囲

AR マーカーの認識範囲は、垂直方向の認識可能な最大の高さが約 60cm である。このことから、垂直方向の認識可能範囲は広く、マーカーの高さの変化を活かした応用例が考えられる。また、水平方向の縦軸で端末上端から認識可能な最大距離が約 30cm、下端からの認識可能な最大距離が 7cm で、その差が約 23cm ある。さらに高さ距離の最小は、カメラに最も近い端末の上端で約 8.5cm、カメラから離れた下端で約 38.5cm で、約 30cm の差がある。このことから、縦軸においてカメラ側とその反対側で認識範囲に大きな差があり、マーカーがカメラと反対方向へ遠ざかる程（すなわち、端末下端の方向へ遠ざかる程）、視野角から外れやすいと考えられる。このように上下方向の操作可能範囲に対称性がないため、ユーザが違和感を感じる可能性がある。今後は、こうした問題に配慮した操作方法を検討していきたい。

6. 結論と今後の展望

本研究では、カメラ／タッチパネルのどちらからも認識可能な 2 次元コード「CapacitiveMarker」を提案し、従来のタッチパネルや 2 次元コードを用いたインタラクシオンの課題であった「認識空間の制約」の改善を試みた。CapacitiveMarker は、AR マーカーを印刷したシール紙と導電性パターンを印刷したプラスチックフィルムを重ね合わせて製作した。カメラによる認識時は、画像認識を用いて AR マーカーの ID/3 次元位置／向きの検出を行い、タッチパネルによる認識時は、導電性のパターンに含まれる 3 点の固定タッチポイントと 1 点の可変タッチポイントから、タッチパネル上に置いたマーカーの ID/3 次元位置／向きの検出を行った。さらに、CapacitiveMarker を使った応用例の一つとして、マーカーの状態に応じてなめらかに視点を切り替える地図アプリケーションの実装を行うとともに、マーカーの背面に立体的なつまみを取り付けて、手に持つ時の物理的な操作性を向上させる事を試みた。さらに、静電マーカーの認識精度と AR マーカーの認識可能範囲を調査する基礎的な評価実験を行った。今後は、「静電マーカーの ID 認識精度の向上」、および「応用アプリケーションの開発」を中心に行う。前者については、現状では最大 9 種類のマーカーを製作し

たが、マーカーの種類を 5 つに限定した評価実験で、ID 認識成功率の全体平均が 86%であった。よって、まず 5 種類のマーカーの認識精度を向上させ、次第に認識率が安定するマーカー数を増やしていく必要がある。ID の認識精度を向上させるにあたり、「ID を認識するアルゴリズムの改善」と、「静電マーカーの可変部の配置改善」の両面からアプローチして解決を目指す。さらに、静電マーカーにおける導電部の可変点を 1 点から 2 点に増やす事により、製作可能なマーカーの種類を増やす事も検討する。

後者については、議論の中で前述した見下ろし型シューティングゲームの他に、より実用性を考慮した応用例を検討し、浮遊操作と接触操作の組み合わせを活用できるアプリケーションを構築しつつ、ユーザ評価を行っていききたい。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 25700019 の支援を受けた。

参考文献

- 1) H. Kato and M. Billinghurst. Marker Tracking and HMD Calibration for a video-based Augmented Reality Conferencing System. In Proceedings of the IEEE and ACM IWAR'99, pp. 85-94, 1999
- 2) H. Kato, M. Billinghurst, I. Poupyrev, K. Imamoto and K. Tachibana. Virtual Object Manipulation on a Table-Top AR Environment. In Proceedings of the IEEE and ACM ISAR'00, pp. 111-119, 2000.
- 3) Jun Rekimoto and Yuji Ayatsuka. CyberCode: Designing Augmented Reality Environments with Visual Tags. In Designing Augmented Reality Environments (DARE'00), pp. 1-10, April 2000.
- 4) Jun Rekimoto. SmartSkin: an infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces. In CHI'02, pp. 113-120, April 2002.
- 5) Malte Weiss, Julie Wagner, Yvonne Jansen, Roger Jennings, Ramsin Khoshabeh, James D. Hollan and Jan Borchers. SLAP Widgets: Bridging the Gap Between Virtual and Physical Controls on Tabletops. In Proceedings of ACM CHI'09, pp. 481-490, April 2009.
- 6) Patrick Baudisch, Torsten Becker and Frederik Rudeck. Lumino: Tangible Blocks for Tabletop Computers Based on Glass Fiber Bundles. In Proceedings of ACM CHI'10, pp. 1165-1174, April 2010.
- 7) Y. Kawahara, S. Hodges, and B. S. Cook, and C. Zhang, and G. D.Abowd. Instant Inkjet Circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices. In Proceedings of ACM UbiComp'13, pp. 364-372, 2013.
- 8) 綾塚祐二, 暦本純一. Active CyberCode : 直接操作できる二次元コード. 日本ソフトウェア科学会 WISS2005 論文集, pp. 3-8, 2005.
- 9) 青木良輔, 宮下広夢, 井原雅行, 大野健彦, 千明裕, 小林稔, 鏡慎吾. くるみる : 複数導電部をもつ枠型物理オブジェクトを用いたタブレット操作. 情報処理学会研究報告, HCI-144, pp. 1-8, 2011.
- 10) 池松香, 椎尾一郎. Multi-Press Interaction: 疑似押下圧力を用いたマルチタッチ技法. 情報処理学会インタラクシオン 2014 論文集, pp. 401-404, 2014.
- 11) 加藤邦拓, 宮下芳明. 紙窓 : そこに置くだけで操作可能なカードインタフェース. 日本ソフトウェア科学会 WISS2013 論文集, pp. 163-164, 2013.
- 12) 加藤邦拓, 宮下芳明. 導電性インク複合機を用いたマルチタッチパターン生成手法. 情報処理学会研究報告, pp.1-6, 2014.
- 13) 中島康祐, 伊藤雄一, Simon Voelker, Christian Thoresen, Kjell Ivar Overgard, Jan Borchers. PUCs : 静電容量方式マルチタッチパネルにおけるユーザの接触を必要としないウィジェット検出手法. 情報処理学会インタラクシオン 2014 論文集, pp.108-113, 2014.