情報処理学会論文誌 Vol.58 No.5 1037–1048 (May 2017)

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の研究

池田 昂平[1,†1,a)] 沖 真帆[1,b)] 塚田 浩二[1,c)]

受付日 2016年8月5日, 採録日 2017年2月9日

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ともない，導電性パターンを接触させ，マーカ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 枚を重ね合わせることで，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複数の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，その制約と可能性について議論する．

キーワード：2 次元コード，導電性パターン，静電容量式タッチディスプレイ

Novel Interaction Method Using Visual Marker Integrated with Conductive Pattern

Kohei Ikeda[1,†1,a)] Maho Oki[1,b)] Koji Tsukada[1,c)]

Received: August 5, 2016, Accepted: February 9, 2017

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 and discuss its limitations and posibilities.

Keywords: Visual Marker, conductive pattern, capacitive touch display

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さかんに行われている．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], [10] は古くからさか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という欠点があり，たとえば，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，静電式マーカとして扱う研究も多数提案されている [4], [11], [12], [13], [15]．これらの手法は，タッチパ

[1] 公立はこだて未来大学
Future University Hakodate, Hakodate, Hokkaido 041–8655, Japan
[†1] 現在，東京大学
Presently with The University of Tokyo
[a)] ikeda@nae-lab.org
[b)] okimaho@acm.org
[c)] tsuka@acm.org

© 2017 Information Processing Society of Japan

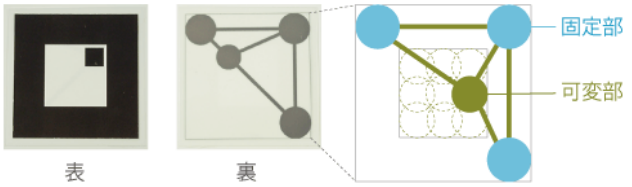


図 1 CapacitiveMarker の構成．AR マーカと静電マーカを 2 層に重ねている
Fig. 1 The configuration of the CapacitiveMarker.

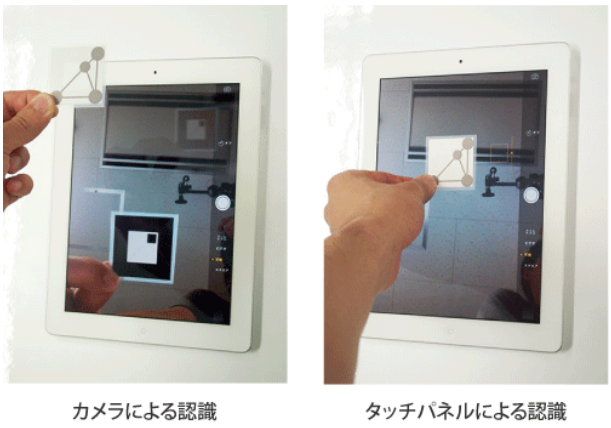


図 2 CapacitiveMarker の特徴．端末から一定距離離れている状態と接触した状態の双方でマーカを検出できる
Fig. 2 The basic concept of the CapacitiveMarker.

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ができる 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．

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．

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 [13] 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ことにより，操作を行うことができる．くるみる [11] 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 [12] は，タッチパネル接触時に得られる情報の 1 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ことができる．PUCs は，電気的に接続した 2 つのマーカのうち，一方のマーカのタッチ領域を接地点として利用し，もう一方のマーカ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 [15]．

2.1.2 赤外光反射方式/超音波方式

タッチパネルの認識方法では静電容量式のほかに，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 とカメラの組合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から映像を投影することにより，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を入れることで，2 次元マーカ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 のよう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ことは困難である．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り，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

© 2017 Information Processing Society of Japan

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．また，タッチディスプレイと物理タグを組み合わせた研究として，小型の超音波送信器を物理タグとして使用し，画面内のオブジェクトを操作する手法も提案されている [9]．しかしこの手法ではタグの角度情報が取得できなかったり，物理タグ側に電力を必要としたりし，コストもかかる．本提案手法は，接地状態と空中状態で角度情報が取得でき，マーカ側に電力を必要とせず，安価で手軽に製作が可能である．

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さか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，マーカ上に 3D オブジェクトを表示させることができる．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 ActiveCyberCode [10] や，自己相似性を持つレイアウトデザインを用いてカメラから認識可能な範囲を広げる Fractal Codes [8] を提案している．AR マーカ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．たとえば，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したり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 [14]．本研究では，この手法を用いて静電マーカを制作し，大量かつ手軽に製作できるマーカを提案する．

3. CapacitiveMarker

本研究で提案する CapacitiveMarker の概要と，実装として「マーカの構成」,「静電マーカの認識方法」,「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 [*1]準拠の 2 次元コード（以下，AR マーカ）を採用する．導電性のパターン（以下，静電マーカ）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でも変化しないが，可変点の位置はマーカによって変動し，固定点からの相対位置の変化で ID 認識を行う（図 1 右）．この静電マーカを印刷したフィルムを AR マーカ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ことができる．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として認識される．

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 マーカの構成

マーカのサイズは全体を 40 mm × 40 mm とした．前述したように，マーカは 2 層構造であり，AR マーカは通常のインクジェットプリンタで，静電マーカは 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で出力する．AR マーカは，厚さ約 0.07 mm の

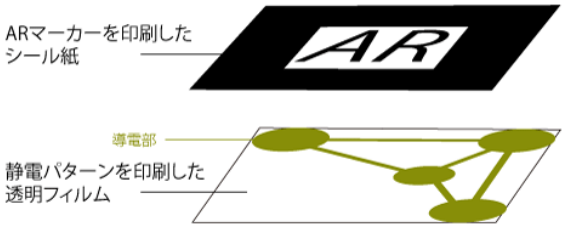


図 3 CapacitiveMarker の階層構造．静電パターンの印刷面がシール紙の粘着面と合わさるように重ねる

Fig. 3 The layered configuration of the CapacitiveMarker.

[*1] http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/

© 2017 Information Processing Society of Japan

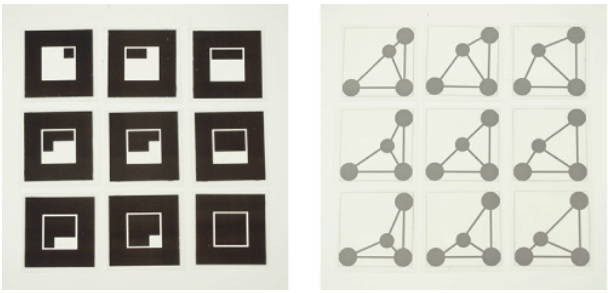


図 4 製作した 9 種類のマーカ
Fig. 4 Examples of the CapacitiveMarker.

シール紙に，静電マーカは厚さ約 0.13 mm の透明プラスチックフィルムに印刷した．次に，静電マーカの詳細について説明する．静電マーカは，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，マーカの周辺部に直径 10.0 mm の固定点を 3 点，中央部に直径 8.0 mm の可変点を 1 点配置し，それぞれを導電性の接続線（太さ 1.0 mm）でつなぐ．これにより，ユーザがマーカの周辺部を持ってタッチパネル上に置くと，すべ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．タッチポイントの直径と接続線の幅は，先行研究の手法 [14] を参考にしつつ，提案する静電マーカの特性に応じて決定した．先行研究では，タッチポイントの直径は約 10.0 mm，接続線の幅は約 0.5 mm が適切とされていた．本研究では，マーカ/タッチパネルの環境が異なるため，タッチポイントの直径と接続線の幅を複数調整し，1 点のタッチポイントに指で触れた際にすべてのタッチポイントが安定して検出される条件を調査した．その結果，タッチポイントは固定点 3 点の直径を 10.0 mm/中央の可変点を 8.0 mm とし，接続線の幅は 1.0 mm とした．ここで，周辺部 3 点の固定点を認識することで，マーカ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もとに，マーカの ID を検出する．なお，固定点の位置は AR マーカの黒枠部分の 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．

3.2.2 静電マーカの認識方法

静電マーカの認識は，マーカ領域の認識と，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．このとき，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

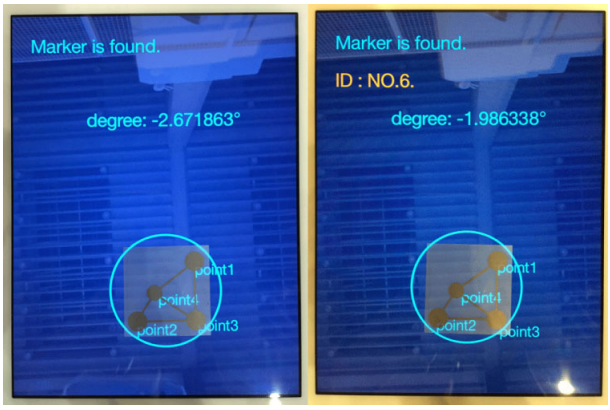


図 5 静電マーカの認識．マーカ領域の認識（図左）と ID の認識（図右）に分けられる．画面中の「Degree」の数値は，マーカの回転角を示している
Fig. 5 The detection of the CapacitiveMarker.

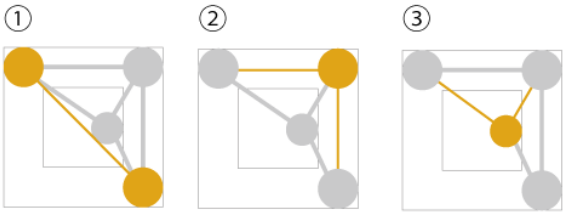


図 6 静電マーカにおけるタッチポイントの認識順序．(1) まず，対角線上の固定点 2 点を検出．(2) 残りの固定点 1 点を検出．(3) 可変点の相対位置を計測
Fig. 6 The detection procedures of the conductive patterns.

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とき（タッチイベント時）または，接触した状態でタッチパネル上を移動したとき（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，イベント発生ごとに固定点 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させる（**図 7**）．また，時系列上の複数の座標情報を用いることにより，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

© 2017 Information Processing Society of Japan

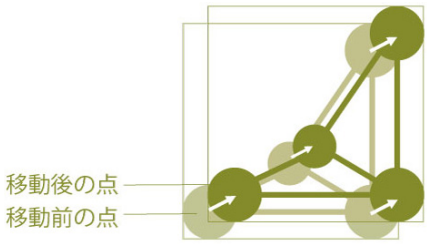


図 7 静電マーカの時系列による同一点の検出方法．マーカの位置が変動したときに，直前の座標から最も近い座標の点をそれぞれ同一点とする

Fig. 7 The calibration method of conductive patterns.

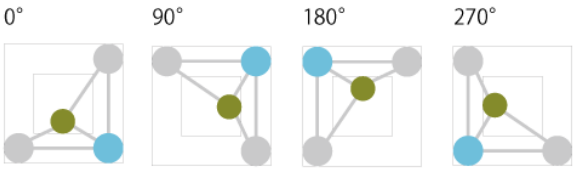


図 8 静電マーカの回転角の大きな分類．2 つの固定点に挟まれた固定点 1 と，中央の可変点の位置関係で判定

Fig. 8 Rough classification of rotation angle.

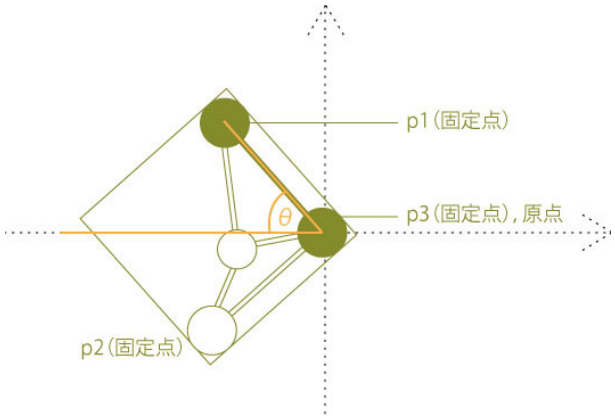


図 9 静電マーカの細かな回転角の計測．対角線上で対にならない固定点 p3 を原点とし，対角線上の固定点 p1 の座標から回転角度を求める

Fig. 9 Detailed calculation of rotation angle.

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）を判別するために行う．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）．

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 [*2] を利用する．Metaio SDK は，スマートフォンアプリに画像認識/重畳等の 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．

[*2] http://www.metaio.com/products/sdk/

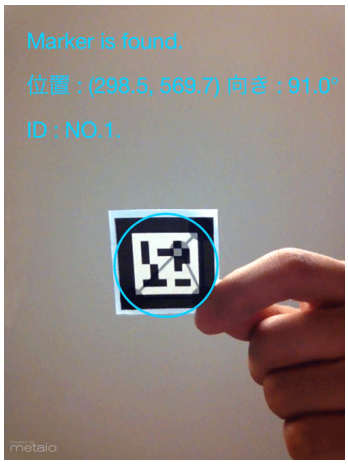


図 10 AR マーカの認識．ID/位置/向きが検出される

Fig. 10 Detection of the AR marker: ID/position/direction.



図 11 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

Fig. 11 Physical knob for the CapacitiveMarker.

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 を使用することにより，端末のカメラから AR マーカを認識させることができる．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ことができる（**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．このとき取得した 3 次元座標の z 軸成分をカメラからの奥行きとする．

3.2.4 操作性向上のための補助具

前述したとおり，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たりして，誤認識が起こる要因となりうる．そこで，CapacitiveMarker の物理的操作性を向上させるための補助具として，マーカに取り付ける立体形状のつまみを実装した（**図 11**，**図 12**）．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うえで，CapacitiveMarker

© 2017 Information Processing Society of Japan

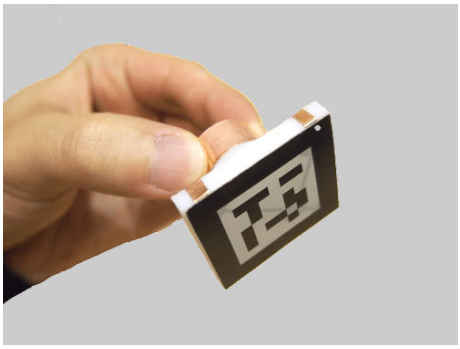


図 12 CapacitiveMarker を取り付けた立体形状のつまみ．つまみ周囲の導電テープが静電マーカの導電部に触れるように接着させた

Fig. 12 The CapacitiveMarker attached on the physical knob.

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，回転させたりする動作が容易となる．このほかにも，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. 応用

本章では，CapacitiveMaker の展開例として，地図アプリケーションとシューティングゲームへの適用，その他の応用可能性について示す．

4.1 視点切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 1 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 13**）．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 14**）．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ときは，俯瞰視点の操作を停止し，誤動作を軽減するよう配慮した．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 15**）．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 13 視点の切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

Fig. 13 Map application using the CapacitiveMarker.

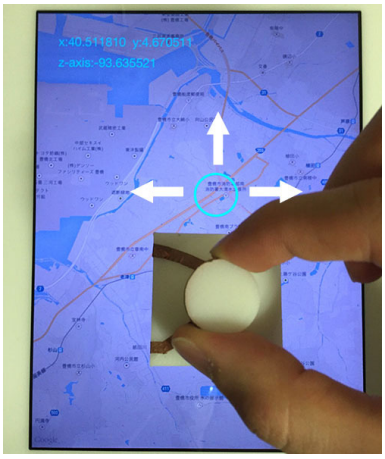


図 14 俯瞰視点モード．マーカを浮かせた状態で水平/垂直方向に移動させることで，地図を移動させる

Fig. 14 The control method of overhead view.

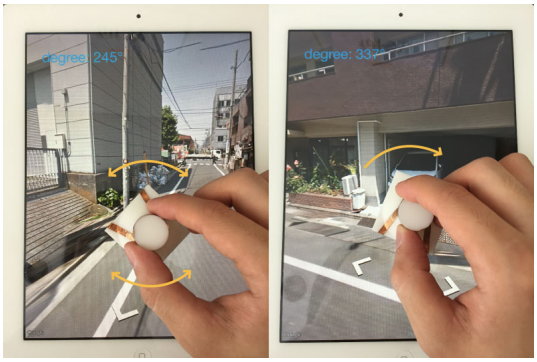


図 15 地上視点モード．静電マーカを接地させた状態で，マーカの向きに応じて，Google ストリートビューの視線方向が回転して変化する

Fig. 15 The control method of street view.

4.2 操作キャラクタの切替えが可能なシューティングゲーム

2 つ目の応用例として，マーカをタッチパネルに接触させた状態と浮かせた状態で操作キャラクタのモードを切り替えるシューティングゲームの実装を行った（**図 16**）．操作

© 2017 Information Processing Society of Japan

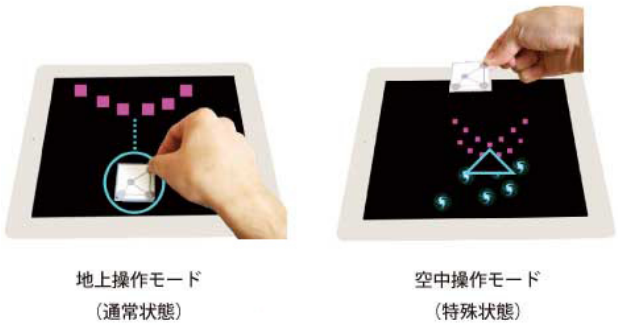


図 16 操作キャラクタの切替えが可能なシューティングゲーム．マーカを接地させた状態で地上から弾を発射する地上操作（通常）モードと，マーカを浮かせて空中から地上へ弾を垂直に投下する空中操作（特殊）モードを使い分ける

Fig. 16 Shooting game using the CapacitiveMarker.

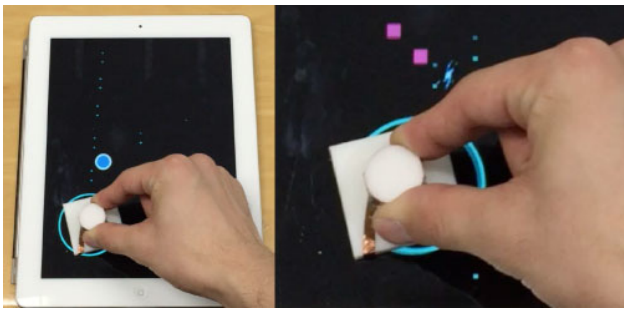


図 17 地上操作（通常）モード．静電マーカを接地させた状態で移動と回転動作を行うことにより，周囲の敵キャラクタを避けつつ迎撃する

Fig. 17 The control method of ground mode.

方法と詳しいゲームの内容について説明する．本ゲームでは，操作キャラクタが地上から弾を発射する地上操作（通常）モードと，空中から地上へ向けて弾を投下する空中操作（特殊）モードの 2 つのモードを切り替えながら，マーカを動かして地上の敵キャラクタを迎撃する．弾は操作キャラクタから自動的に発射され，マーカを回転することで発射方向を調整することができる．通常の地上操作モードでは，マーカをタッチパネルに接地させた状態で移動と回転操作を行い，敵キャラクタを避けつつ弾の発射方向を調整して，周囲の敵を迎撃する（**図 17**）．次に空中操作モードは，マーカを浮かせた状態で移動と回転操作を行い，地上の敵キャラクタからの攻撃を受けずに空中から地上へ向けて垂直方向に弾を投下することが可能となる（**図 18**）．ただし，空中操作モードは時間制限があるため，ユーザはこれら 2 つのモードをうまく切り替えながらゲームをプレイすることが要求される．このように，マーカの 2 つの状態を活かした新たなシューティングゲームのルール設計と実装を行った．

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と，操作キャラクタを切り替えるシューティングゲームを提案/実装したが，他に複数のマーカを同時に使用する応用例を検討している．アプリケーションの 1 つとして，地上と空中の 2 つのレイヤを使ってプレイする対面型のエアホッケーゲームを検討しており，iPad Pro 等，より大きなタッチディスプレイが搭載された端末を使用して 2 人のユーザが対面形式でゲームをプレイする．ユーザは互いにマーカを浮かせた状態でパッドを打ち返す空中レイヤと，マーカをタッチパネルに接触させた状態でパッドを打ち返す地上レイヤの 2 つの仮想テーブル上で計 2 枚のパッドを打ち返すという内容である．このように，マーカを空中に浮かせた状態と接地させた状態の両方をうまく利用した応用アプリケーションを今後実装していきたい．



図 18 空中操作（特殊）モード．マーカを浮かせた状態で，移動と回転動作を行うことにより，地上の敵キャラクタから攻撃を受けずに空中から弾を垂直に投下する

Fig. 18 The control method of flight mode.

5. 実験と評価

本章では，CapactiveMarker 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」を明らかにすることである．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とき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，マーカを浮かせたとき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

© 2017 Information Processing Society of Japan

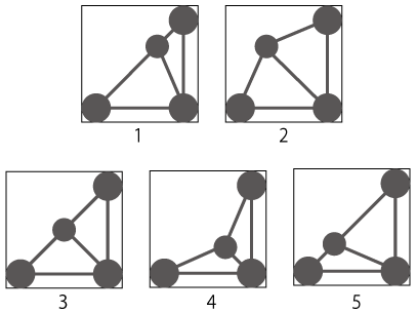


図 19 実験に使用する 5 種類の導電パターン
Fig. 19 Conductive patterns used in the evaluation.

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とき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．このとき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 3 章で述べた仕様に基づく 5 種類のマーカ（**図 19**）を用意し，試行回数は各マーカにつき 20 回とする．

5.2.2 AR マーカ認識範囲の測定

AR マーカの認識範囲の測定は，静電マーカ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，マーカがカメラから認識される最大の高さを調べる．マーカ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．このとき，マーカが常時安定して認識されていることを確認する．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，または横軸にマーカを移動させ，マーカ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．このとき，マーカが常時安定して認識されていることを確認する．

5.3 結果

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

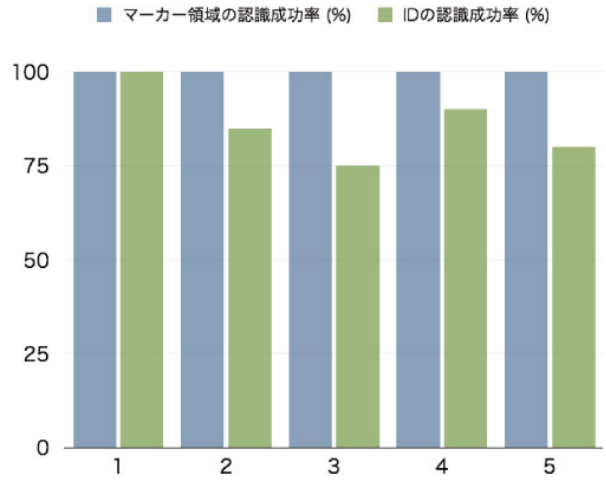


図 20 静電マーカ認識精度評価の実験結果
Fig. 20 Recognition accuracy of conductive markers.

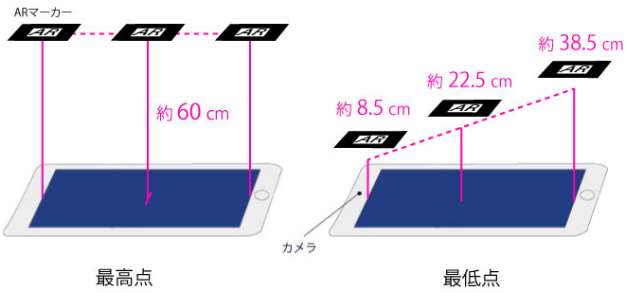


図 21 AR マーカの認識範囲の測定結果（垂直方向）
Fig. 21 Detectable area of the AR marker (vertical).

5.3.1 静電マーカ認識精度の評価

本実験では，5 種類のマーカを用意し，マーカ領域と ID の認識成功率を調査した．実験結果を**図 20** に示す．マーカ領域の認識成功率は，すべてのマーカにおいて 100%であった．ID の認識成功率は，最も高いマーカ 1（図 20 の 1）が 100%となり，最も低いマーカ 3（図 20 の 3）が 75%，全体の平均が 86%となった．また，静電マーカ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 マーカ認識範囲の測定

AR マーカの認識可能範囲は，垂直方向の高さ距離が最大約 60 cm であった（**図 21**）．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 8.5 cm，約 22.5 cm，約 38.5 cm であった．さらに，高さが約 60 cm の状態で，端末の上端から約 30 cm，下端から約 7 cm，左右端から約 11 cm 離れた位置までマーカが認識された（**図 22**）．

5.4 考察

実験結果に基づき，CapacitiveMarker の性能を考察する．

5.4.1 静電マーカの認識精度

実験結果から，静電マーカのマーカ領域の認識精度は高

© 2017 Information Processing Society of Japan

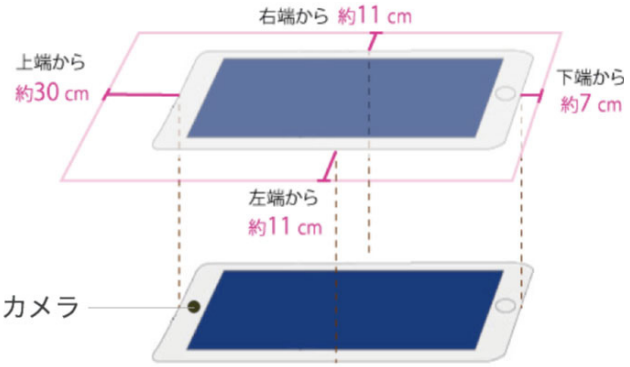


図 22 AR マーカの認識範囲の測定結果（水平方向）．高さ約 60 cm 地点での認識範囲を示す
Fig. 22 Detectable area of the AR marker (horizontal).

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 種類のマーカで異なり，最も高いマーカ ID 1 の認識成功率と最も低いマーカ ID 3 の認識成功率の差は 25%ある．最も認識率が低い（75%）マーカ 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ことと，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 3 が持つ中央の可変点はちょうどマーカ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 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，固定点と可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 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ことで，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ことが起こる．この閾値はマーカごとに設定可能で有り，特にマーカ 3 の場合は，可変点がマーカの中央にあり，他のマーカと誤認識されやすいため，閾値を他のマーカ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．

5.5 AR マーカの認識範囲

AR マーカの認識範囲は，垂直方向の認識可能な最大の高さが約 60 cm 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 30 cm，下端からの認識可能な最大距離が 7 cm で，その差が約 23 cm 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 8.5 cm，カメラから離れた下端で約 38.5 cm で，約 30 cm 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，マーカがカメラと反対方向へ遠ざかるほど（すなわち，端末下端の方向へ遠ざかるほど），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. 議論

本章では，評価実験の結果をふまえて，「マーカの認識範囲のギャップ」「CapacitiveMarker のインタラクションモデル」「マーカの複数個同時使用と課題」について議論する．

6.1 マーカの認識可能範囲のギャップについて

AR マーカの認識範囲の測定結果より，カメラとタッチパネルの双方から認識されない範囲がタッチパネル面から高さ方向に最小で 8.5 cm，最大で 38.5 cm まで一定距離に存在することが明らかとなった．よって，AR マーカと静電マーカを切り替える際に，一度マーカがシステムから認識不可能な状態が生じる．この認識範囲のギャップから生じる制約をふまえたうえで，CapacitiveMarker のインタラクションモデルについて議論する．

6.2 CapacitiveMarker のインタラクションモデル

ここでは，CapacitiveMarker のインタラクションモデルについて議論する．まず基本的な操作モードとして，タッチパネル上で静電マーカを操作する「接地操作」と，AR マーカを持ち上げた状態で操作する「空中操作」の 2 つがある．接地操作は，物理的にマーカとタッチパネルが接触しているため，細かい移動や回転動作に適している．空中操作は，マーカの認識可能範囲が広く，3 次元位置や角度の情報が取得できるため，空間的な自由度を活かした操作に適している．一方，腕を上げた状態で操作するため，疲労が蓄積しやすく長時間の操作には向いていない．

CapacitiveMarker はこれらの接地操作と空中操作をマーカの上下動作のみで切り替えて利用する．ここで，6.1 節で述べたように認識範囲のギャップが存在するため，マーカをタッチパネルから少しだけ浮かせて操作することは困難である．よって，2 つの操作状態を切り替える際に必然的にマーカを大きく上下させる動きをともなうことになる．このような動作を頻繁に繰り返すのは疲労等の観点から不向きであるが，一方「腕を大きく振り上げる（振り下ろす）」というダイナミックな動作の持つ身体性を活用できる可能性がある．**図 23** に，これらの 2 つの操作モードとその切替え手法をまとめた CapacitiveMarker のインタラクションモデルを示す．

次に，応用例であげたシューティングゲームと地図アプリケーションを例として，CapacitiveMarker を用いたイン

© 2017 Information Processing Society of Japan

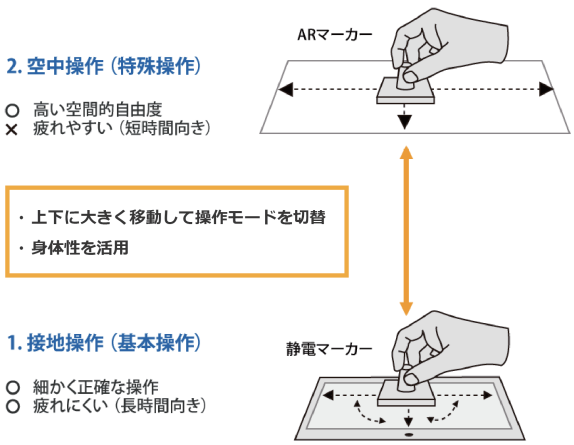


図 23 CapacitiveMarker のインタラクションモデル．接地操作を基本とし，マーカを大きく上下させる動作で操作モードを切り替え，一時的な空中操作を行う

Fig. 23 The interaction model of CapacitiveMarker.

タラクション手法の可能性について議論する．シューティングゲームにおいては，操作キャラクタは地上モードと空中モードを持ち，地上モードではマーカを移動させて敵の弾を避けつつ，マーカを回転させて弾の発射方向を変えて敵を倒していく．一方，空中モードでは一定時間だけ無敵になり地上の敵からの攻撃をいっさい受けずに，キャラクタを敵に重ねるだけで倒すことができる．ここでユーザは，地上モードでは接地操作の得意な「細かい移動や回転動作」を行いつつ，地道な戦闘を繰り広げる．そしてここ一番のときに，「マーカを大きく振り上げる」というダイナミックな身体動作を行って，空中モードに切り替える．さらに空中モードでは空中操作の得意な「（空間的な自由度を活かして）手を大きく動かす動作」を行い，爽快感のある操作を行えると考える．また，空中モードに制限時間を設けることで，空中操作の「疲労しやすく長時間の操作が難しい」特性と合致させている．

地図アプリケーションについては研究の初期段階に実装したため，本章で述べた各操作モードの特性に十分配慮していなかった．具体的には，ユーザは空中操作でマーカを移動させることで俯瞰視点から地図上を移動し，任意にマーカを下降させることで地上視点に移行する．地上視点では，接地操作を行うことで，周囲を見渡すことができる．このように，地図アプリケーションでは疲労しやすい空中操作を基本としており，接地操作でも単純な回転操作しか行っていないため，操作の特性を十分に生かせていなかったと考える．そこで，今後は基本操作を地上視点とし，一時的に俯瞰視点に切り替えられるような，操作体系の変更を検討している．すなわち，地上視点で「移動や回転操作」を行いつつ，一時的にマーカを大きく上昇させることで俯瞰視点のより引いた地図に切り替わり，一定時間だけ滞空しつつ地図上をスクロールできる．そこからマーカを下降させて接地させることで，長距離をジャンプして移動するような操作を検討している．ここで，上昇下降の際に，hiyoshi jump [*3]のように勢いよく離着陸するような映像表現を取り入れることで，マーカを振り上げる際の身体性をより活用できる可能性がある．

最後に，提案手法と従来のタッチパネル操作との比較について議論する．提案手法の提供する操作体系は，タッチパネル等にモード切替えボタン等を用意し，スワイプ/ピンチ操作等を組み合わせることで，機能的にはおおむね実現可能である．しかしながら，提案手法では，2 つの操作モード（接地操作，空中操作）と，モード切替えを，マーカを動かすだけで実現できるため，操作に一貫性があり分かりやすいと考える．さらに，前述したような応用例のように，マーカの操作モードの特性を考慮してアプリケーションを設計することで，身体性を活かした印象的な操作を実現できる可能性がある．今後はこうした操作時の印象等についてもユーザ評価を行い，提案手法の特性をより細かく検証していきたい．

6.3 マーカの複数個同時使用と課題

現在実装済みの応用例では，ユーザが一度に操作するマーカは 1 個であるが，将来的に 2 個のマーカを同時に使用することも検討している．たとえば，4.3 節で述べたように，iPad Pro のような大型タッチディスプレイを搭載した端末において，2 人のユーザが静電マーカを 1 枚ずつ操作する（計 2 個を同時に認識する）対面型ゲームでの使用等が考えられる．この場合，複数のマーカのタッチポイントが混合することで誤認識が発生することが課題としてあげられる．この課題に対しては，以下のような認識アルゴリズムの改善を検討している．まず，各タッチポイントが認識されたときのタイムスタンプと各タッチポイント間の距離を計測する．次に，認識された時刻が比較的近いタッチポイントどうしをグルーピングし，グループ内のタッチポイント間の距離を計測することでマーカ領域の推定を行う．この方法は，マーカが 2 個同時に接地された場合を除いて有効であると考えている．

次に，マーカの必要十分な ID 数（パターンの種類）について議論する．本稿では 5 種類のパターンを対象に認識率を調査し，平均 86%の結果を得た．また，現在の実装方式では最大 9 種類（可変点なしのマーカも含めれば 10 種類）のパターンに対応している．ここで，マーカ中央の可変点の数を増やすことで，より多くのパターンを認識できる可能性があるが，評価実験の結果を考慮すると認識率が下がる可能性も高いと考える．その場合，タッチポイント間の距離をとるためにマーカサイズを大きくする必要が出てくると予想される．このように，パターンの種類を増やす場合は，ID 数と認識率（あるいはマーカサイズ）のト

[*3] hiyoshi jump. https://unity3d.com/es/node/10748

© 2017 Information Processing Society of Japan

レードオフに配慮する必要がある．一方，我々が現時点で想定する応用では，同時に 1〜2 枚程度のマーカの利用を行うため，現状の 5 種類〜10 種類程度の ID 数でもある程度十分だと考えている．

7. 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ョンの課題であった「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の ID/3 次元位置/向きの検出を行った．また，マーカの物理的な操作性を向上させるための補助具として，立体的なつまみを設計/実装した．さらに，CapacitiveMarker を使った応用例として，マーカ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と操作キャラクタを切り替えるシューティングゲームの実装を行った．最後に，静電マーカの認識精度と AR マーカ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 種類のマーカを製作したが，マーカの種類を 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．今後は，マーカの認識精度と識別可能数の向上を目指す．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．後者の応用アプリケーションについては，提案した地図アプリやゲームのほかに，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合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] Kato, H. and Billinghurst, M.: Marker Tracking and HMD Calibration for a video-based Augmented Reality Conferencing System, *Proc. IEEE and ACM IWAR'99*, pp.85–94 (1999).

[2] Kato, H., Billinghurst, M., Poupyrev, I., Imamoto, K. and Tachibana, K.: Virtual Object Manipulation on a Table-Top AR Environment, *Proc. IEEE and ACM ISAR'00*, pp.111–119 (2000).

[3] Rekimoto, J. and Ayatsuka, Y.: CyberCode: Designing Augmented Reality Environments with Visual Tags, *Designing Augmented Reality Environments* (*DARE'00*), pp.1–10 (Apr. 2000).

[4] Rekimoto, J.: SmartSkin: An infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces, *CHI'02*, pp.113–120 (Apr. 2002).

[5] Weiss, M., Wagner, J., Jansen, Y., Jennings, R., Khoshabeh, R., Hollan, J.D. and Borchers, J.: SLAP Widgets: Bridging the Gap Between Virtual and Physical Controls on Tabletops, *Proc. ACM CHI'09*, pp.481–490 (Apr. 2009).

[6] Baudisch, P., Becker, T. and Rudeck, F.: Lumino: Tangible Blocks for Tabletop Computers Based on Glass Fiber Bundles, *Proc. ACM CHI'10*, pp.1165–1174 (Apr. 2010).

[7] Kawahara, Y., Hodges, S., Cook, B.S., Zhang, C. and Abowd, G.D.: Instant Inkjet Circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices, *Proc. ACM UbiComp'13*, pp.364–372 (2013).

[8] Ayatsuka, Y.: Fractal Codes: Layered 2D Codes with a Self-Similar Layout, *Pervasive 2007 Advances in Pervasive Computing*, pp.83–86 (May 2007).

[9] Kurata, T., Oyabu, T., Sakata, N., Kourogi, M. and Kuzuoka, H.: Tangible Tabletop Interface for an Expert to Collaborate with Remote Field Workers, *Proc. 1st International Conference on Collaboration Technologies*, pp.58–63 (2005).

[10] 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).

[11] 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).

[12] 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ョン 2014 論文集，pp.401–404 (2014).

[13] 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).

[14] 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).

[15] 中島康祐，伊藤雄一，Voelker, S., Thoresen, C., Overgard, K.I., Borchers, J.: 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ョン 2014 論文集，pp.108–113 (2014).



池田 昂平

1992 年生．2015 年公立はこだて未来大学システム情報科学部情報アーキテクチャ学科卒業．2015 年 4 月より東京大学大学院学際情報学府修士課程に在籍．ユーザ・インタフェースの研究に従事．

© 2017 Information Processing Society of Japan



沖 真帆 （正会員）

1985年生．2013年お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科博士後期課程修了．博士（理学）．同年より公立はこだて未来大学特任研究員．



塚田 浩二 （正会員）

1977年2月神奈川県横浜市生．2000年慶應義塾大学環境情報学部卒業．2005年同大学大学院政策・メディア研究科博士課程修了．博士（政策・メディア）．同年独立行政法人産業技術総合研究所研究員．2008年よりお茶の水女子大学特任助教．2012年より科学技術振興機構さきがけ研究員（専任）．2013年4月よりはこだて未来大学情報アーキテクチャ学科准教授．生活環境に適したユーザ・インタフェースの研究・開発に従事．2012年イグノーベル賞（音響学）受賞．

© 2017 Information Processing Society of Japan