

マルチディスプレイシステムのための 可用性を保った端末向き推定法の提案

鈴木 広人^{1,a)} 小林 亜樹^{2,b)}

概要：タブレットやスマートフォン等の端末を複数台並べ、カメラで撮影した映像からそれぞれの端末の相対的な位置情報を取得し、仮想的に1つのディスプレイ（マルチディスプレイ）を作る研究が進められている。このような研究では、マーカや画像特徴量を用いて端末の位置情報を取得している。しかし、マーカを用いた方法は、端末に表示されているコンテンツを遮ってしまい、画像特徴量を用いた方法は、複数台の端末で同一のコンテンツを表示している場合、位置情報を取得できない。そこで、本稿では、これらの問題を解決することができる一種の電子透かしのような方法で端末の位置情報を取得する。可用性を保った端末向き推定法を提案し評価する。

Proposal of Keep Availability Device Orientation Estimation Method for Multi-display System

1. はじめに

会議や商談等の多人数での話し合いの場では、大型ディスプレイやテーブルトップ型ディスプレイを用いた情報共有が有用である。しかし、これらは高価であり、大型であるため、持ち運びは困難である。そのため、会議等を行う際には、予め大型ディスプレイやテーブルトップ型ディスプレイが備え付けられた会議室等で行うことになる。これは、大型ディスプレイ等の利用が設置場所に制約されることを意味しており、利便性の面からも問題である。そこで、広く普及しているタブレットやスマートフォン等の端末を複数台並べて、仮想的に1つのディスプレイ（マルチディスプレイ）を作ることを考える。マルチディスプレイを用いることで、大型ディスプレイ等が備え付けられていない会議室等であっても、ディスプレイを用いた情報共有が可能である。

マルチディスプレイシステムの一般的な構成では、各端末で共有する仮想画面並びに画面配信等を管理するサーバに各端末が接続する形をとり、各端末はサーバから配信されてきた画面を表示する。このとき、端末毎に異なる画

面領域を担当することとなるため、各端末が仮想画面上で分担する領域を特定できる必要がある。この領域を固定した場合、単に動画像の分割表示ということになり、現状の技術での困難は特にない。しかしマルチディスプレイシステムでは、端末の移動を許容するため、端末の仮想画面上での担当領域を動的に特定できる仕組みが必要となる。後で述べるようにいくつかの方式が提案されているが、端末の移動後の位置を的確に把握でき、2台以上の端末が互いを隠す（オクルージョン）場合への対処、特に同一内容（例えば複製された画像や単なる空白領域など）を表示した端末が互いにすれ違うと、端末形状や表示画面を手がかりとした形状認識等の手法では端末の取り違えを起こす可能性がある。マルチディスプレイシステムであるHuddleLampシステム[1]では、3D-RGB-Dカメラを使用している。HuddleLampシステムでは、端末識別、位置識別に奥行き情報を加えた3Dで端末検出を行っている。これは、2Dのみでは精度、時間といった性能面に問題があるためと見られる。本稿では、2Dのみからの端末識別を目指す。オクルージョン等で、撮影画面内の端末を見失った場合は、各端末で異なるマーカを表示し、そのマーカを検出することで、端末識別、及び位置と向きを特定している。マーカは端末画面全体に表示され、かつ端末の検出には1, 2秒の時間を必要とする。

¹ 工学院大学大学院 工学研究科 電気・電子工学専攻

² 工学院大学 情報学部 情報通信工学科

^{a)} cm19026@ns.kogakuin.ac.jp

^{b)} aki@cc.kogakuin.ac.jp

本稿では、端末の取り違えを起こさない固有パターンを画面表示し、これを外部設置したカメラ映像で識別する枠組みの下、表示パターンの視認性を下げ、コンテンツ表示における可用性を保ったまま端末の確実な認識と位置推定を行う方式を提案する。外部設置カメラの性能から、本来の電子透かしほど不可視パターンとすることは適わないが、認識に係る短時間でかつ、表示コンテンツをできるだけ阻害しないで表示し続けることで、システム全体の使い勝手に寄与するものと考えられる。

2. マルチディスプレイシステム

本研究の目的は、複数のタブレット端末を組み合わせ、大きな画面を構成することである。各端末はサーバによって統括され、サーバは表示すべき仮想画面を用意する。各端末は、サーバとの協調動作によって、仮想画面内の自端末位置に相当する部分画面を表示する。このような動的な相対端末位置追従型マルチディスプレイシステムでは、端末 ID、位置、向き の取得が問題となる。端末上に特定のパターンを表示しておき、これを外部カメラで撮影して、画像認識技術により端末の識別や位置検出を行う方式を採用する。本研究では、このパターンを人にとって不可視なものにすることを目標としている。本稿では、図 1 に示すようなマルチディスプレイシステムの使い勝手の向上を目指した方式を提案する。提案方式は、端末検出に必要な最小限の変化を表示画面に加えることで不可視パターンを目指す、一種の電子透かし方式である。パターンを加えた工夫によって、端末識別、端末位置検出、端末向き検出を実現する。

マルチディスプレイシステムでは、システムに接続されている全ての端末の ID、位置、向きを把握しておかなければならない。図 2 は、端末 ID が不明な場合に起こる問題の例である。システムが全ての端末の位置と向きを把握していても、それぞれの端末を識別できなければ、各端末で表示する部分画面が定まらない。図 3 は、端末位置が不明な場合に起こる問題の例である。システムが全ての端末の ID と向きを把握していても、端末の相対的な位置を知ら

なければ、各端末で表示する部分画面が逆になったりしてしまう。図 4 は、端末向きが不明な場合に起こる問題の例である。システムが全ての端末の ID と位置を把握していても、それぞれの端末の向きを知らなければ、端末で表示する部分画面が逆さまになったりしてしまう。以上のことから、マルチディスプレイシステムでは、システムに接続されている全ての端末の ID、位置、向きを把握しておかなければならない。それらをマークを使って検出する研究、画像特徴量を使って検出する研究について紹介する。

2.1 マークを用いた方法

Ballendat らのインタラクティブメディアプレーヤー [2] は、動画像を再生することができる大型ディスプレイであ



図 2 端末 ID
Fig. 2 Device ID.



図 3 端末位置
Fig. 3 Device position.

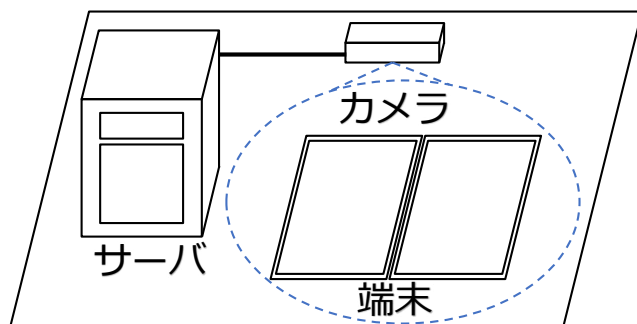


図 1 マルチディスプレイシステム
Fig. 1 Multi-display system.



図 4 端末向き
Fig. 4 Device orientation.

り、ユーザとのインタラクションを可能にする。ユーザは、携帯電話等の端末で、大型ディスプレイに表示されている動画コンテンツを選択し、再生することができる。インタラクティブメディアプレーヤー周辺を常にカメラで撮影する。撮影画面内の端末の位置は、赤外線放射カメラと端末に取り付けられた赤外線反射マーカを使用して検出する。しかしながら、ユーザは赤外線放射カメラとそれを反射するマーカを用意しなければならない。これは、必要な物を用意するという点で、ユーザにとっては手間にほかならない。私たちの端末位置検出法では、端末の表示画面に変化を加え、その変化を検出することで端末位置を検出するので、ユーザにとって手間の掛からない方法といえる。

Ballagas らの提案している技術である Point & Shoot[3] は、大型ディスプレイ上に表示されている各オブジェクトを、マーカを用いて識別している。マーカはシステム利用者にとって邪魔になるので、Ballagas らのシステムでは、マーカは点滅表示される。しかし、点滅表示されるマーカがディスプレイ上のコンテンツを妨害することに変わりはない。Li ら [4] は、端末の前面カメラを使用して、天井の基準マーカを検出し、各端末の相対的な位置を計算している。

Rädle らの HuddleLamp システム [1] では、撮影画面内の端末の識別、及び端末位置と向きを検出に、3D-RGB-D カメラを使用した。RGB カラー画像に対しての端末位置検出の結果と深度画像に対しての端末位置検出の結果の両方を利用して、端末の位置等を検出及び追跡するハイブリッドセンシングという手法を提案している。しかし、3D-RGB-D カメラは高価であるため、一般的な単眼カメラを利用した手法が望まれる。HuddleLamp システムでは、端末は Roman らのサイトにアクセスすることで、システムに接続される。そして、撮影画面内の端末を識別、及び各端末の位置と向きを検出するために、それぞれの端末で異なるマーカを表示する。マーカを用いた端末検出には、1, 2 秒程の時間を要する。また、オクルージョン等で、撮影画面内の端末を見失った際も、同様の方法で端末検出を行う。マーカは端末画面全体に表示されるので、端末検出が行われるまでの間、システム利用者は待たされることになる。短時間で端末検出を行うことができ、且つユーザの利便性を損なわない方法が好ましい。Dippon ら [5] も、RGB 画像と深度画像を組み合わせた端末検出法を提案している。まず、スマートフォン等の端末でマーカを表示し、RGB 画像内の端末の位置等を検出する。次に、RGB 画像内の端末位置と深度画像内のプロブとの対応付けを行う。対応付けが完了すると、端末で表示されていたマーカは非表示になる。以降、撮影画面内の端末を追跡することができる。しかし、システムが RGB 画像内の端末位置と深度画像内のプロブとの対応付けが完了するまでの間、システム利用者は、端末を操作することができない。また、特殊なカメラを必要とすることも問題である。

2.2 画像特徴量を用いた方法

Dearman らの Orienteer[6] は、携帯電話等の端末の背面カメラで撮影する映像を用いて、近接端末の相対的な位置を検出する。Orienteer は、端末にインストールするアプリケーションである Orienteer client と、サーバで実行されるサービスである Orienteer web-service で構成される。Orienteer client は、GPS または無線 LAN 位置情報システムを利用して端末位置を取得する。背面カメラで撮影したユーザ毎の撮影画像（ユーザの足等が写った画像）から、SURF によりそれぞれ特徴量を抽出する。ユーザ毎の端末位置、撮影画像、特徴量をサーバに送信する。Orienteer web-service では、各ユーザから送信されるユーザ毎の位置情報、撮影画像、共通の特徴から、各端末の相対的な位置を計算する。マルチディスプレイシステムにおいて、画像特徴量を用いた方法で端末位置を検出する場合、複数端末で同一の画面を表示している際に、各端末の相対的な位置を検出できないという問題がある。私たちの端末検出法 [7] は、複数端末で同一の画面を表示している場合にも、各端末の相対的な位置を検出することが可能である。

Herbert ら [8] は、大型ディスプレイとユーザの携帯電話とのインタラクションを実現するために、SURF 特徴量を利用している。大型ディスプレイ上のどこかを写した携帯電話の撮影画像から得られる特徴量と、大型ディスプレイ画面上の特徴量とをマッチングすることで、撮影画像が大型ディスプレイ上のどの部分にあたるかを計算する。Leigh らは、大型ディスプレイの画面背景は、多くの特徴を抽出することができる複雑な背景画像の方が望ましいことに言及している。これは、SURF 特徴量を用いた位置検出は、ディスプレイで表示するコンテンツの影響を受けることを意味している。

2.3 超音波を用いた方法

Hazas らの Relate system[9] では、ノート PC の相対的な位置を検出するために、超音波を利用している。ノート PC に取り付けられた機器から超音波を互いに放射及び受信し、各ノート PC の相対的な位置を計算する。超音波を利用するためには、専用の機器を用意しなければならない。これは、システム利用者にとっては手間となるため、専用の機器を要しない方法の方が良いといえる。Randell ら [10] も、超音波を利用した位置検出システムを提案している。4つの超音波送信機を天井に取り付け、これらの送信機から放射された超音波をハンドヘルドコンピュータに取り付けた超音波受信機で受信することで、位置検出を行う。しかし、システム利用者は、超音波送信機を用意及び設置しなければならないため、手軽に利用することができる方法が望ましい。

3. 提案手法

前述したように、マルチディスプレイシステムでは、システムに接続されている全ての端末の ID、位置、向きを、サーバが把握する必要がある。本稿では、端末の向きを推定する方法を提案する。疑似透かし埋め込み、疑似透かし抽出の順に説明していく。

3.1 疑似透かし埋め込み

端末画面解像度 $W \times H$ のカラー画像を原画像 I とする。 I の上側と下側それぞれの幅 $2N$ の領域の画素値を変更させる。本来の透かしとは異なり、単なる異なる画素値に変更する。以降、これを疑似透かしと呼ぶ。図 5 に示すように、 $2N$ 中の前半 N の領域と後半 N の領域は、異なる画素値に変更させ、疑似透かし入り画像 I' を作成する。

3.2 疑似透かし抽出

平面上に端末を置き、端末で疑似透かし入り画像を表示する。サーバに接続されたカメラで上方から撮影する。撮影画面内の端末画面位置は、既存の端末位置推定法 [7] を用いることで取得できていることを前提とする。従って、端末画面の 4 頂点の座標は既知である。図 6 に示すように、撮影画面の左上頂点を原点とし、原点から右に水平に x 軸を、原点から下に垂直に y 軸を設定する。端末の長辺方向を端末向きと定義し、撮影画面の x 軸正方向から反時計回りの角度を θ とする。

3.2.1 短辺座標列

端末画面の 4 頂点の座標を、 $C_1(x_1, y_1), C_2(x_2, y_2), C_3(x_3, y_3), C_4(x_4, y_4)$ とする。

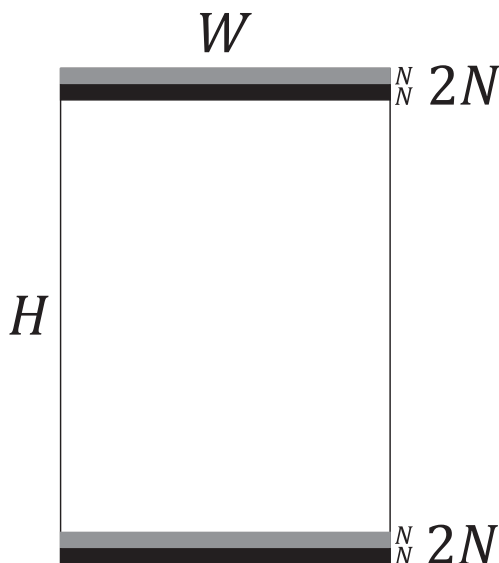


図 5 画素値変更対象領域

Fig. 5 Pixel value change target area.

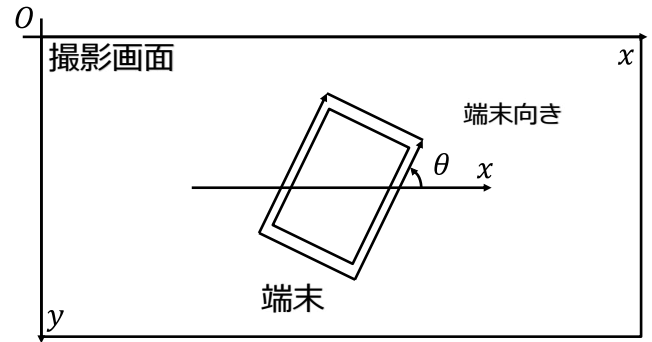


図 6 端末向き (定義)

Fig. 6 Device orientation (Definition).

4 頂点の全 6 組の組み合わせで (1) 式によりマンハッタン距離を計算する。マンハッタン距離が 3 番目に大きい頂点の組み合わせで引かれる近似直線と、4 番目に大きい頂点の組み合わせで引かれる近似直線を端末画面長辺とする。マンハッタン距離が最も小さい頂点の組み合わせで引かれる近似直線と、2 番目に小さい頂点の組み合わせで引かれる近似直線を端末画面短辺とする。直線の近似には、ブレゼンハムのアルゴリズムを利用する。2 つの端末画面長辺上の座標を全て取得する。長辺座標列はそれぞれ L_1, L_2 とする。同様に、2 つの端末画面短辺上の座標を全て取得する。短辺座標列はそれぞれ S_1, S_2 とする。撮影画面内の端末画面は全て長方形であると仮定している点に注意する。

$$\begin{aligned} d_{12}(C_1, C_2) &= |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| \\ d_{13}(C_1, C_3) &= |x_1 - x_3| + |y_1 - y_3| \\ d_{14}(C_1, C_4) &= |x_1 - x_4| + |y_1 - y_4| \\ d_{23}(C_2, C_3) &= |x_2 - x_3| + |y_2 - y_3| \\ d_{24}(C_2, C_4) &= |x_2 - x_4| + |y_2 - y_4| \\ d_{34}(C_3, C_4) &= |x_3 - x_4| + |y_3 - y_4| \end{aligned} \quad (1)$$

3.2.2 画素値差分列

S_1, S_2 の要素番号を i とし、同一要素番号の 2 点の座標を用いて、近似直線上の画素値の隣接差分値を計算し、画素値差分列 D_i を取得する。 D_i の要素数は、 S_1, S_2 の要素数の内、小さい方の要素数である。

図 7 に、 $2N$ 中の前半の N が灰 (128, 128, 128)、後半の N が黒 (0, 0, 0) の例を示す。左側の赤い矢印の方向に隣接画素値の差分を計算すると、 $2N$ の範囲では、灰-灰 (0, 0, 0)、灰-黒 (+128, +128, +128)、黒-黒 (0, 0, 0) になる。同様に、右側の赤い矢印の方向に隣接画素値の差分を計算すると、 $2N$ の範囲では、黒-黒 (0, 0, 0)、黒-灰 (-128, -128, -128)、灰-灰 (0, 0, 0) になる。左側の赤い矢印の方向に隣接画素値の差分を計算すると、2 つの $2N$ の範囲では、正の符号を持つ差分値が 2 つ検出され、右側の赤い矢印の方向に隣接画素値の差分を計算すると、2 つの $2N$ の範囲で

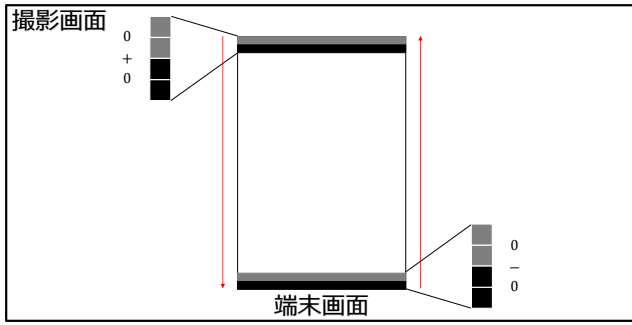


図 7 画素値差分列

Fig. 7 Pixel value difference sequence.

は、負の符号を持つ差分値が2つ検出される．この符号を利用して、端末の向きを推定する．この例では、左側の赤い矢印の方向に隣接画素値の差分を計算し、正の符号が2つ検出された場合、端末画面の上辺は、前半の $2N$ の範囲を含む端末画面短辺で、端末画面の下辺は、後半の $2N$ の範囲を含む端末画面短辺になる．同様に、右側の赤い矢印の方向に隣接画素値の差分を計算し、負の符号が2つ検出された場合、端末画面の上辺は、後半の $2N$ の範囲を含む端末画面短辺で、端末画面の下辺は、前半の $2N$ の範囲を含む端末画面短辺になる．

3.2.3 符号判定

D_i の差分値の始めと終わりのいくつかの差分値を符号検出対象差分とするかという問題がある． D_i の差分値の始めと終わりの符号検出対象差分を R とする．長辺座標列 L_1, L_2 の要素数の内、小さい方を E とする．検出対象差分 R は、(2) 式で計算される．少数点以下は切り上げ、整数値を算出する． D_i の差分値の始めと終わりの R 個の差分値で、符号検出対象となる代表差分値をそれぞれ決定する． R 個の差分値の RGB 値の総和の絶対値をそれぞれ計算し、最も大きいものを代表差分値とする．2つの代表差分値の RGB 値の総和の符号が共に正の値を取る場合 + 判定を、共に負の値を取る場合 - 判定を行う．2つの代表差分値の RGB 値の総和の符号が異なっている場合、その他に分類される．図 8 に、符号判定の例を示す．この場合、 D_i は + 判定、 D_{i+1} は - 判定、 D_{i+2} はその他に分類される．短辺座標列 S_1, S_2 の要素数の内、小さい方の要素数回だけ、符号判定が行われることに注意する．

$$R = \frac{2N}{H} \times E \quad (2)$$

4. 実験

提案手法の有用性を評価するために実験を実施した．提案手法同様、疑似透かし埋め込み、疑似透かし抽出の順で述べていく．

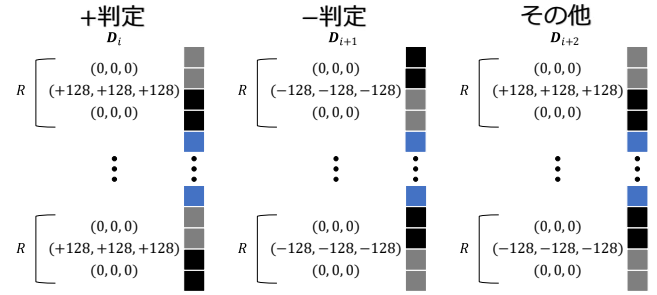


図 8 符号判定

Fig. 8 Sign judgment.

4.1 疑似透かし埋め込み

端末で表示するコンテンツを原画像 I とする． I を図 9 に示す．端末画面解像度 1920×1200 のタブレット端末で原画像を表示し、その上側と下側それぞれ幅 10 ピクセルだけ変化させ、疑似透かし入り画像 I' を作成する． I' を図 10 に示す．前半 5 ピクセルは黒、後半 5 ピクセルは灰に画素値を変更した．

4.2 疑似透かし抽出

平面上に置かれた端末で作成した I' を表示する．サーバに接続されたカメラで上方から撮影した．例として、端末角度 $\theta = 90^\circ$ のときの撮影画像を図 11 示す．撮影画面内の端末の端末角度が常に一定とは限らないので、端末角度を変化させた 12 種類の撮影画像に対して、端末向き推定を行った．実験環境を表 1 に示す．撮影時のカメラの固定には、カメラスタンドを用いた．



図 9 原画像

Fig. 9 Original image.



図 10 疑似透かし入り画像
Fig. 10 Pseudo-watermarked image.

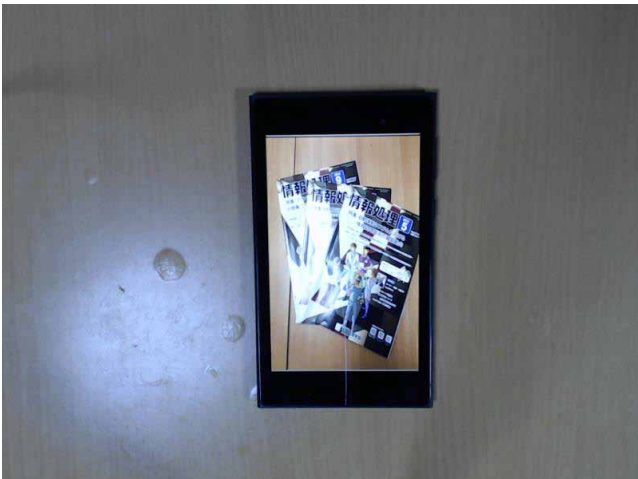


図 11 撮影画像 ($\theta = 90^\circ$)
Fig. 11 Captured image ($\theta = 90^\circ$).

5. 結果と考察

端末角度を変化させた 12 種類の撮影画像に対して、端末向き推定を行った。端末角度毎の撮影画像を図 12 に示す。隣接画素値の差分を計算した方向は、赤い矢印で表している。端末画面の上側は、赤い丸で表している。端末角度毎の符号判定回数を表 2 に示す。図 12、表 2 の見方について説明する。端末角度 90° のとき、端末画面の上側と下側の領域の画素値をそれぞれ灰、黒に変化させているので、赤い矢印の方向に画素値の隣接差分を計算した場合、+ 判定が多ければ、矢印の始点側にある端末画面短辺が端末画面上辺になり、矢印の終点側にある端末画面短辺が端末画面

表 1 実験環境

Table 1 Experiment environment.

撮影条件	
撮影照度	89[Lux]
撮影角度	垂直
撮影距離	45[cm]
サーバ	
OS	Ubuntu 20.04.1 LTS
プロセッサ	Intel Core i5-6500 3.20GHz
メモリ	8[GiB]
カメラ	
製品名	Logicoool HD Pro Webcam C910
解像度	800 × 600
露出	Auto
端末	
製品名	ASUS MeMO Pad 7 (ME572C)
解像度	1920 × 1200

表 2 符号判定回数

Table 2 Number of sign judgments.

端末角度 [°]	+ 判定	- 判定	その他
0	1	84	102
22	0	51	101
45	1	47	87
90	60	21	105
113	89	16	71
135	132	0	6
180	63	0	122
225	100	0	30
265	0	120	64
270	0	102	82
299	0	126	37
315	0	76	60

下辺になる。- 判定が多ければ、矢印の始点側にある端末画面短辺が端末下辺になり、矢印の終点側にある端末画面短辺が端末画面上辺になる。表 2 を確認すると、端末角度 90° のとき、+ 判定が - 判定より多いので、赤い矢印の始点側にある端末画面短辺が端末画面上辺、矢印の終点側にある端末画面短辺が端末画面下辺になるので、正しく推定できているといえる。他の端末角度のときの符号判定回数を確認すると、全ての端末角度で正しく推定できていることが分かる。

端末角度 $0^\circ, 180^\circ, 225^\circ$ の撮影画像は、端末画面及びベゼルで照明が反射しているため、端末向きの誤推定が心配されたが、問題なく端末向き検出を行うことができた。+ 判定と - 判定の回数の差が最も小さいのは、端末角度 90° の撮影画像である。しかし、+ 判定と - 判定の回数の差は 39 であり、差は小さくないといえる。

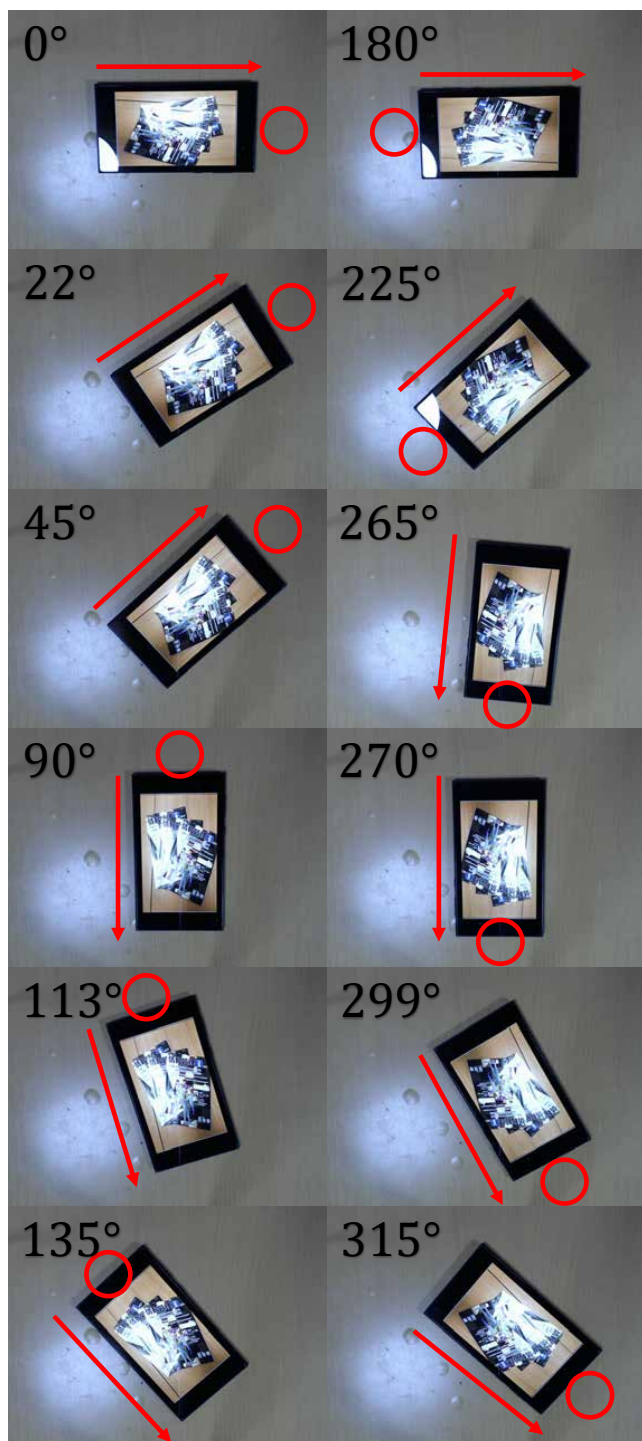


図 12 撮影画像

Fig. 12 Captured image.

6. おわりに

マルチディスプレイシステムにおける端末向き検出問題に対して、システムの可能性を保ったまま利用できる、一種の電子透かしのような端末向き推定法の提案と評価を行った。端末画面端領域のみの画素値変化を一般的な単眼カメラで検出できることを確認した。埋め込みパラメータは環境依存のため、実用では適応的な制御が必要である。

しかし、線状の透かし情報ならば、他の表示画面上のコンテンツに影響を与えずに済むため、利用者への利便性を高めることができることは確認できた。人間が視認しにくい透かしを開発し、端末の画面端領域に埋め込むことで、さらにマルチディスプレイシステムの利用者の利便性を向上することができる。本稿では、端末画面短辺を埋め込み対象領域としていたが、より狭い範囲の領域を埋め込み対象領域とした端末向き推定法の提案が望まれる。例えば、端末画面短辺の内、上辺、若しくは下辺のどちらか一方を、埋め込み対象領域とする方法が考えられる。しかし、この場合、符号検出対象となる代表差分値も 1 つになってしまい、符号判定の精度が低下することが予想される。具体的な透かし方式の採用、多様な環境下での検出実験は今後の課題である。

参考文献

- [1] Rädle, R., Jetter, H.C., Marquardt, N., Reiterer, H. and Rogers, Y: HuddleLamp: Spatially-Aware Mobile Displays for Ad-hoc Around-the-Table Collaboration, Proc. of ITS '14, ACM (2014), 45–54.
- [2] Ballendat, T., Marquardt, N. and Greenberg, S.: Proxemic Interaction: Designing for a proximity and Orientation-Aware Environment, Proc. of ITS '10, ACM (2010), 121–130.
- [3] Ballagas, R., Rohs, M. and Sheridan, J.G: Sweep and Point & Shoot: Phonecam-Based Interactions for Large Public Displays, Proc. of CHI EA '05, ACM (2005), 1200–1203.
- [4] Li, M. and Kobbelt, L: Dynamic Tiling Display: Building an Interactive Display Surface Using Multiple Mobile Devices, Proc. of MUM '12, ACM (2012), 1–4.
- [5] Dippon, A., Wiedermann, N. and Klinker, G: Seamless Integration of Mobile Devices into Interactive Surface Environments, Proc. of ITS '12, ACM (2012), 331–334.
- [6] Dearman, D., Guy, R.T. and Truong, K.N: Determining the Orientation of Proximate Mobile Devices using their Back Facing Camera, Proc. of CHI '12, ACM (2012), 2231–2234.
- [7] Suzuki, H., Kawaai, G., Fujita, T. and Kobayashi, A: Device position estimation for Multi-tablet virtual display system, Proc. of CANDAR '20, CANDAR (2020).
- [8] Herbert, L., Pears, N., Jackson, D. and Olivier, P: Mobile Device and Intelligent Display Interaction via Scale-invariant Image Feature Matching, Proc. of PECCS '11, PECCS (2011).
- [9] Hazas, M., Kray, C., Gellersen, H., Agbota, H., Kortuem, G. and Krohn, A: A Relative Positioning System for Co-located Mobile Devices, Proc. of MobiSys '05, ACM (2005), 177–190.
- [10] Randell, C. and Muller, H: Low Cost Indoor Positioning System, Proc. of UbiComp '01, ACM (2001), 42–48.