

天井画像を用いた特徴点マッチングによる 机上のタブレット端末の位置推定手法

湯浅 健太^{1,a)} 飯田 隆誠^{2,b)} 高田 秀志^{1,c)}

概要: 近年、協調作業においてテーブルトップ環境を用いる研究が進んでいる。しかし、テーブルトップ環境には、巨大なディスプレイや外部機器が必要であり利便性が低い。これに対して我々は、タブレット端末を用いることによって、外部機器を用いずにテーブルトップ環境と同等の機能を提供する、仮想テーブルトップ環境を構築している。本研究では、仮想テーブルトップ環境において、タブレット端末の位置をフロントカメラで撮影した画像を用いて推定する手法を提案する。また、このタブレット端末の位置推定の精度について評価を行う。さらに、端末の回転に合わせて画面を回転させる機能を実現し、タブレット端末の回転角度についての評価も行う。

1. はじめに

近年、テーブル上に巨大なディスプレイを設置、もしくはプロジェクタで画面を投影することによって構築されるテーブルトップ環境を協調作業に用いる研究が行われている (例えば [1])。また、テーブルトップ環境を構築する上での指針も示されている [2]。テーブルトップ環境を用いた協調作業では、テーブル上に設置されたディスプレイもしくはプロジェクタから投影された画面を、作業者が取り囲んで同時に作業を行う。このようなテーブルトップ環境は、巨大な画面を用いることによって、作業内容や作業者の様子を互いに共有しやすいという利点がある。一方で入出力に関わる専用の機器が必要になるという欠点もある。

そこで、この課題を解決するため、我々は専用の機器を用いずタブレット端末のみを用いてテーブルトップ環境を構築している [3]。このようなテーブルトップ環境を仮想テーブルトップ環境と呼ぶ。仮想テーブルトップ環境では、作業をするための場所として仮想作業空間を構築する。タブレット端末は、この仮想作業空間の一部を表示すると同時にオブジェクトとのインタフェースの役割を果たす。本研究では、タブレット端末の位置推定手法において、これまで利用してきたマウスを利用する方法に代わって、端末に付属するフロントカメラを用いて天井画像を撮影し、その画像の特徴点から推定する手法を構築する。

本稿では、仮想テーブルトップ環境で用いるタブレット端末の位置推定精度の評価と、端末の回転に対応するための回転角度の推定についての評価を行う。

2. 研究背景

2.1 テーブルトップ環境における入力機器

ディスプレイを用いたテーブルトップ環境では、ディスプレイに触れている位置から操作が行われている場所を判別できる。しかし、プロジェクタが投影した画面では、どの場所にどのような操作を行なったのか判別できない。そのため、作業者が行った操作を判別するための外部機器が必要になる。これには赤外線センサや深度カメラのような外部機器を用いて操作が行われる場所を判別する [4]。また、操作が行われた場所の位置推定にカメラとペンを用いた研究も行われている [5]。この他にも入力的位置を推定するための新たなインタフェースの研究が行われている [6]。

2.2 関連研究

本研究と同様に、モバイル端末をインタフェースとした研究が行われているが [7]、動作環境としてプロジェクタを設置している場所が前提となっている。この研究では、プロジェクタを用いて作業空間の表示を行っており、位置測定にはモバイル端末のカメラで撮影した天井画像を用いる。この画像内に写っているプロジェクタが放つ光の座標をもとに、モバイル端末の位置を推定している。

我々が行ってきたタブレット端末を用いた仮想テーブルトップ環境の研究では、タブレット端末にマウスを装着し、マウスの移動量をもとに端末の位置を推定している。

¹ 立命館大学 情報理工学部

² 立命館大学 情報理工学研究科

a) is0435kk@ed.ritsumei.ac.jp

b) is0293sr@ed.ritsumei.ac.jp

c) htakada@cs.ritsumei.ac.jp

しかし、操作性が悪い、回転に対応できないといった課題がある。

3. 仮想テーブルトップ環境の機能と位置推定手法

3.1 機能

仮想テーブルトップ環境の概要図を図1に示す。仮想テーブルトップ環境では、テーブルトップ環境で用いられるような大きな画面を仮想作業空間として実装する。この仮想作業空間の一部分をタブレット端末を用いて表示する。タブレット端末に表示される画面は、端末の移動に合わせてスクロールし、仮想作業空間内に配置されたオブジェクトがあたかもその場にあるように表示する。



図1 仮想テーブルトップ環境概要図

これまで構築してきた仮想テーブルトップ環境の試作版では、仮想作業空間に協調作業を行うためのオブジェクトとして、写真を配置している。この写真をスワイプすることにより、タブレット端末の画面内で移動させることができる。また、画面に表示されている写真をタップしたままタブレット端末移動させることにより仮想作業空間の任意の場所に移動させることもできる。その他にも、写真をフリックすることにより、フリックした方向にある他の端末の位置に飛ばすことができる。

3.2 提案手法概要

本研究では、タブレット端末の移動量を計算するために、端末のフロントカメラで撮影された天井画像の特徴点を用いる。この時、タブレット端末は平面上を平行移動することを想定しているため、常に天井画像を撮影することができる状況下にあるものとする。

位置推定では、まず撮影された画像から特徴点抽出を行うことで特徴点を取得する。特徴点抽出の次に、前回撮影された画像との間で特徴点マッチングを行う。その後、特徴点マッチングによって一致した特徴点同士の座標の差から移動量を求める。また、タブレット端末を回転させても位置測定を行えるようにするため、アフィン変換を用いて回転角度に応じた座標の補正を行う。

3.3 特徴点抽出

本手法の特徴点抽出アルゴリズムには、OpenCVで提供されているORBを用いる。OpenCVには、同じく特徴点抽出アルゴリズムであるAKAZEも提供されている。

AKAZEはORBと比較して、拡大、縮小、回転、輝度変化といった画像処理に対して強い耐性を持つが、特徴点抽出に約1秒を必要とする。これに対してORBは、画像処理の耐性に関してAKAZEより劣るが、処理が完了するまでに約0.04秒しか必要としない。そこで、本手法では画面スクロールのスムーズさを考慮して、処理の間隔を0.125秒に設定しているため、高速で特徴点抽出を行えるORBを採用する。

3.4 特徴点マッチング

特徴点マッチングには2枚の画像から得られる特徴点の情報を用いる。これらの画像は3.2節で述べた特徴点抽出によって特徴量記述を得られているものを用いる。

特徴点マッチングアルゴリズムは、各特徴点に対し、総当たり方式で最も類似度の高い特徴点を見つける。この処理は、1枚目の画像で抽出された特徴点から2枚目の画像で抽出された特徴点への探索と、2枚目の画像で抽出された特徴点から1枚目の画像で抽出された特徴点への探索の双方向で行われる。そのため、実行速度は遅くなる代わりに最も信頼できる特徴点の組み合わせを見つけることができる。また、特徴点の類似度はハミング距離を用いて計算される。

本手法で特徴点マッチングに用いる特徴点は、現在位置で撮影した天井画像から抽出したものと、0.125秒前に撮影した1つ前の画像で得られたものを用いる。特徴点の情報を随時更新することで、特徴点マッチングには最も新しい2枚の画像から得られた特徴点を用いられることになる。これにより、1枚目の画像で抽出した特徴点全てが2枚目の画像では写っておらず、一致する特徴点が見つけれないという問題を避けることができる。ただし、原点や開始地点のような基準となる場所を設定していないため、絶対的な位置を知ることができず、累積誤差が生じる可能性がある。

3.5 回転角度の計算

本手法で用いた特徴点の向きによるタブレット端末の回転角度の推定について述べる。特徴点は0から360度までの範囲で向きを持っている。本手法で用いるORBでは、特徴点と特徴点の周囲のピクセルの輝度の重心を結ぶ直線によって向きが得られる。このことから、特徴点マッチングの結果によって得られた特徴点同士の角度情報の差を求める。また角度においても、移動量と同様に、マッチした特徴点の組み合わせの分だけ角度が得られるため、外れ値の削除を行ってから残った値で平均値を求める。この平均

値を推定した端末の回転角度とする。

3.6 移動量の計算

本研究においては、タブレット端末のフロントカメラが移動した量によって移動量を算出する。移動量は特徴点マッチングによって一致した特徴点同士の座標を比較して推定する。この移動量は x 軸方向と y 軸方向の 2 方向で算出する。

タブレット端末を平行移動させた場合、抽出される特徴点は全て同じ方向に平行移動する。そのためマッチングした特徴点同士の x 座標と y 座標の差分をとることで移動量を算出することができる。タブレット端末が回転していた場合、図 2 のように特徴点は同じ方向に平行移動しない。

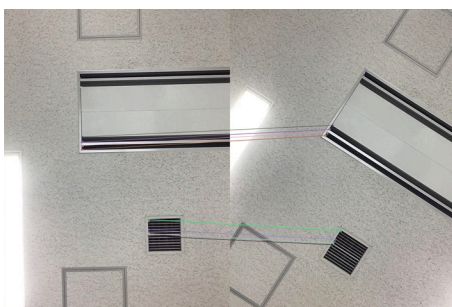


図 2 特徴点マッチング結果

そのため、特徴点の座標同士の差分を取るだけでは移動距離を算出することができない。したがって、特徴点が全て同じ向きに平行移動するように、画像の中心を軸に、特徴点の座標を特徴点マッチングの結果から得られた回転角度分回転させる。座標を回転させるための計算式を以下に示す。ここで、回転前の特徴点の座標と回転後の特徴点の座標をそれぞれ (x, y) , (x', y') とし、特徴点マッチングの結果から得られた回転角度を θ とする。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

この計算により、端末の向きに関係なく、タブレット端末のフロントカメラの移動量を算出することができる。本手法において、移動量は特徴点マッチングの結果によってできた組み合わせの数だけ算出される。したがって、これらの値から外れ値を削除し、残った値の平均値をとることで移動量を一つに定める。

4. 実験・評価

4.1 実験環境

本手法による位置推定の精度を評価するために、実験を行った。

実験には iPad Pro の 10.5 インチモデルを使用した。この端末のフロントカメラで撮影された写真は 2320px ×

3088px であるが、OpenCV によって 1080px × 1920px に修正されている。

今回の実験環境において、モバイル端末と天井との距離は 200cm であった。設定した仮想作業空間の大きさは 4000px × 4000px であり、端末のディスプレイに表示された 400px × 400px のラベルの大きさが 7.7cm であったことから、実空間では 77cm 四方であるものとする。また、特徴点マッチングの結果から算出した特徴点の移動量 (px) から画面のスクロール量 (px) を求めるために、定数倍をする必要がある。今回の実験ではこの定数を 7.0 としている。

4.2 位置推定

位置推定の精度を検証する実験は、端末を回転させず、向きを固定して行なった。また、本研究の位置推定手法は、相対的な移動量を算出するため、累積誤差に関する実験も行った。端末は図 3 に示すように移動させた。

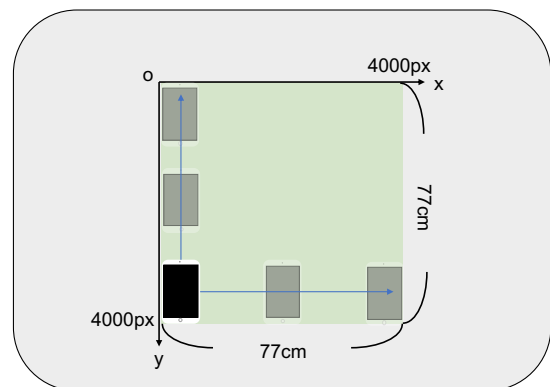


図 3 実験環境

4.2.1 位置推定精度の検証

仮想作業空間の左下を始点とし、縦方向と横方向にタブレット端末を移動させた。この時、タブレット端末をなるべく回転させないようにメジャーに沿って移動させた。タブレット端末の位置の測定は 10cm ごとに行なった。この実験によって得られた位置推定結果を図 4、図 5 に示す。青色のグラフはタブレット端末の移動量を積算していったものである。また、赤色のグラフは理想的な推定を行ったときに取る値を示している。

測定の結果、縦方向の移動の平均絶対誤差は 95.16px、最大絶対誤差は 236px、横方向の移動の平均絶対誤差は 149px、最大絶対誤差は 236px であった。これらのことから、画面上に表示されるラベルの位置の誤差は最大で 4.5cm 程度であることがわかる。

また、同様の実験を 3 回行い、タブレット端末を 10cm 動かしたときの移動量を計測した。この時、縦方向の移動量の平均は 488px、分散は 41 であった。また、横方向の移動量の平均は 476px、分散は 35 であった。最大誤差は縦方向と横方向ともタブレット端末を端まで移動させた時に

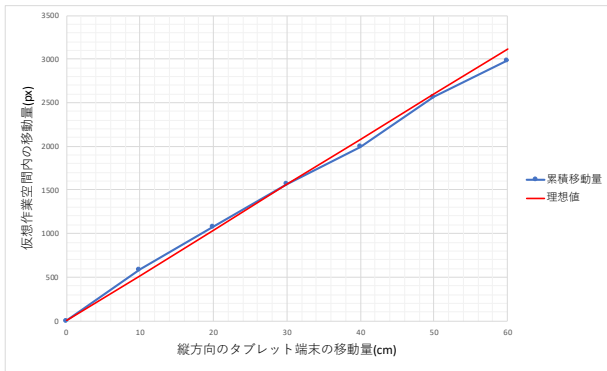


図 4 縦方向の位置推定結果

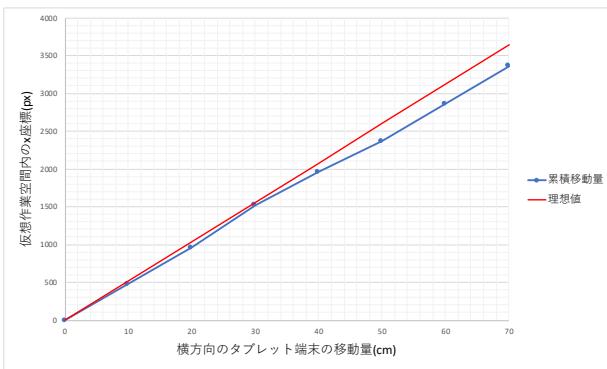


図 5 横方向の位置推定結果

測定したものであり、徐々に理想値から離れていく結果となった。また、縦方向に移動させた時より横方向に移動させたときの方が誤差が大きくなった。

理想値から離れていった原因として、特徴点の移動量と画面をスクロールさせる量を対応付させるための定数の調整不足が考えられる。これに加えて、特徴点座標が輝度や回転の影響を受けて、本来の位置とずれて抽出されることも、理想値から離れる原因になったと考えられる。

4.2.2 累積誤差の測定

端末を縦方向に往復させることで、1 往復ごとに生じる累積誤差を測定した。累積誤差は始点から縦方向 77cm の地点まで移動させ、そこから再び始点に戻した時に生じているズレを計測した。計測した後、連続して往復動作を行う。実験結果を図 6 に示す。ここで、青色のグラフは累積誤差で、点線のグラフは累積誤差のグラフの線形近似のグラフを示している。

グラフからは多少ばらつきがあるものの、往復回数を重ねるごとに誤差は大きくなっていることが読み取れる。このデータの線形近似式の傾きから、1 往復ごとに 10px ずつ誤差が発生し、ラベルの位置が約 0.2cm 程度ずれることが予想される。累積誤差についても、先述のスクロール量を調節するための定数を調節することで改善することが予想される。

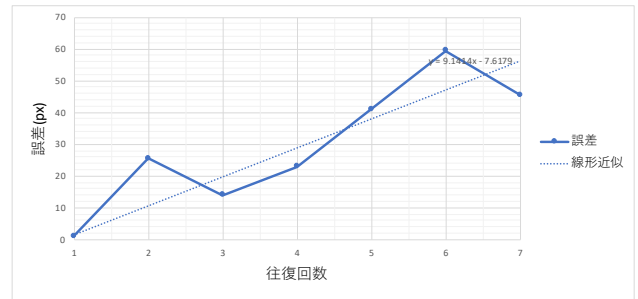


図 6 累積誤差

4.3 回転角度推定

回転角度は、現実でタブレット端末を回転させた角度と、特徴点マッチングの結果から推定した角度を比較し、計算の正確性を評価する。端末を 30 度ずつ回転させ、その都度計算された角度が何度かを測定する。

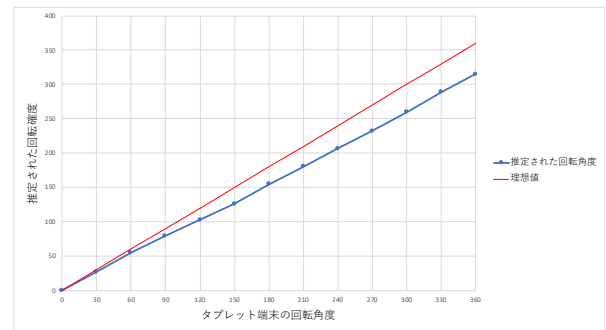


図 7 回転角度

回転角度は、理想値よりも小さい値を取り続け、平均絶対誤差は 26.2 度、最大絶対誤差は 45.2 度となった。特徴点を持つ向きは、特徴点として抽出された点と輝度の重心を結ぶ直線によって算出される。そのため、同じ場所の特徴点であっても特徴点の周囲のピクセルの輝度が少しでも変化していると向きも変化してしまう。このことが誤差を生む原因として考えられる。

5. おわりに

本稿では、仮想テーブルトップ環境を構築するための天井画像を用いた位置推定手法を提案した。この手法を用いると、マウスを装着して位置推定を行ったときに発生する操作性の低下を防ぎつつ、一定の精度で位置を推定することができたと考えられる。また、1 往復ごとに生じた累積誤差が 10px 程度であったことから、端末を動かした継続することによる累積誤差の影響は非常に少ないと考えられる。

本研究で使用した特徴点抽出アルゴリズムの ORB では、特徴点の向きの情報にばらつきが出やすく回転に弱かった。そのため、特徴点の向きを利用したタブレット端末の回転角度の計算や、移動量の計算に影響を与えた。今後、位置測定の精度を向上させるためには、ORB よりも頑強な特徴点抽出アルゴリズムを用いることが推奨される。

今回使用したスクロール量を調節するための定数は、タブレット端末と天井の高さが 200cm の時にしか適用できないため、より実用的にするために、天井の高さに合わせてこの定数を調整できるような機能を加える必要がある。

参考文献

- [1] Morris, M. R., Lombardo, J. and Wigdor, D.: Supporting Collaborative Search and Sensemaking on a Tabletop Display, *Proceedings of the 2010 ACM conference on Computer supported cooperative work*, pp. 401–410 (2010).
- [2] Scott, S. D., Grant, K. D. and Mandryk, R. L.: System Guidelines for Co-located, Collaborative Work on a Tabletop Display, in *ECSCW 2003*, pp. 159–178, Dordrecht (2003), Springer Netherlands.
- [3] Ito, N., Takada, H. and Piumarta, I.: Effectiveness of Tabletop Interaction Using Tablet Terminals in a Shared Virtual Workspace, in *Collaboration and Technology*, pp. 98–114, Cham (2016), Springer International Publishing.
- [4] 英樹小池：実世界インタフェースの新たな展開：5. テーブルトップインタフェース, *情報処理*, Vol. 51, No. 7, pp. 789–794 (2010).
- [5] Jang, byul H., Kim, woon J. and Lee, woo C.: Augmented Reality Cooking System Using Tabletop Display Interface, *International Symposium on Ubiquitous VR 2007* (2007).
- [6] Brandl, P., Forlines, C., Wigdor, D., Haller, M. and Shen, C.: Combining and Measuring the Benefits of Bimanual Pen and Direct-Touch Interaction on Horizontal Interfaces, *Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces*, pp. 154–161 (2008).
- [7] 相馬啓佑, 間博人, 松井健人, 村上広記, 三木光範：プロジェクトとモバイル端末を用いた仮想タッチスクリーンの提案, *マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2016 論文集*, 第 2016 巻, pp. 1369–1373 (2016).