

ウェアラブル PC のための画像マーカを用いた 屋内位置検出手法とその評価

羽原 寿和[†] 町田 貴史[‡] 清川 清[‡] 竹村 治雄[‡]

大阪大学大学院情報科学研究科[†]

大阪大学サイバーメディアセンター[‡]

1. まえがき

近年、カーナビゲーションや、携帯電話に代表されるように、GPS を利用したナビゲーション支援や注釈情報の表示などのユーザの位置情報を利用したサービスが注目されている。一方、屋内環境における情報提示に関しては、人工衛星からの電波が届かないため GPS を利用することは困難である。そこで屋内環境におけるユーザの位置情報を取得する研究が数多く存在する。

特殊な機器を導入せずユーザに応じた情報を提供するシステムとして NaviCam が存在する[1]。これは、画像マーカを認識することで、そのマーカのパターンに応じた情報を提示するものであり、マーカが配置された離散的な場所でのみ、ユーザの視点位置に応じた情報の表示が可能である。

視点位置に応じて 6 自由度で情報提示を行なうシステムを容易に構築できるライブラリとして ARToolkit が存在する[2][3]。これは、画像マーカを利用してカメラに対するマーカの位置や傾きを推定している。しかし、カメラとマーカとの相対的な位置情報しか取得できないため、ユーザの広域での位置情報を得ることは困難である。

また、画像マーカを用いてユーザの広域な位置情報を求めているものでは ARQuake が存在する[4]。これは、屋外では GPS を、屋内では画像マーカを利用することにより、ユーザの位置に合わせた情報の提示を行なうことが出来る。この機構では、あらかじめ全ての画像マーカの位置を正確に測り、データベースを作る必要があり、広域な位置情報の取得には多くの労力が必要である。

我々は、以上を踏まえ画像マーカとカメラを利用することで、特殊な機器を用いず、また、コストや労力の問題を緩和することの出来る、屋内位置検出手法の開発を行ってきた[5]。本稿では従来法に対して屋内位置検出の精度の向上を図る。以下、2 章では、屋内位置検出のアルゴリズムを説明する。3 章では提案手法による評価実験と推定されたユーザの位置情報を利用したナビゲーションシステムにつ

いて説明する。最後に 4 章で本論文のまとめを述べる。

2. 屋内位置検出のアルゴリズム

図 1 に基本的な処理のフローチャートを示す。ユーザの位置情報は天井に配置された画像マーカの世界座標系に対する位置情報と、画像マーカに対するカメラの相対的な位置情報から得られる。

最初、カメラで位置検出を始める場所を示す特別な画像マーカを取り込む(図 1 a),b)). この画像マーカは世界座標系に対する位置が既知のマーカである。次に、その他の画像マーカの位置情報については、位置情報が既知の画像マーカからの相対的な位置情報を基に順次推定する(図 1 c)). また、位置情報が一度推定されたマーカに対しても、改善が見込める場合は、位置情報の再推定を行なう(図 1 d)). このようにして求められた画像マーカの位置情報を基にユーザの位置推定を行なう(図 1 e)). なお、画像内からの画像マーカ検出と、画像マーカに対するカメラの相対的な位置情報の推定には、ARToolkit を用いている。

以下では、提案手法で利用する画像マーカを説明し、画像マーカとユーザそれぞれの位置情報の取得方法を説明する。

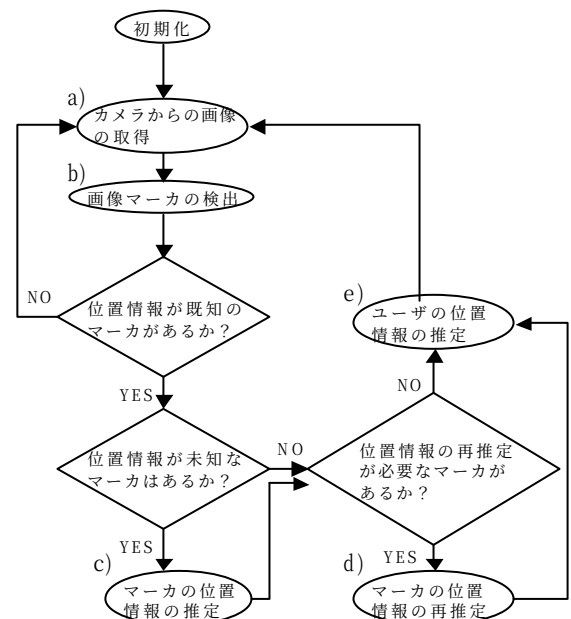


図 1: 位置情報取得のフローチャート

Evaluation of Indoor Position Detection for Wearable PC Using Fiducial Markers

[†] Toshikazu HABARA, Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

[‡] Takashi MACHIDA, Kiyoshi KIYOKAWA, Haruo TAKEMURA, Information and Education Division, Cybermedia Center, Osaka University

2.1 画像マーカ

本研究で利用する画像マーカ（以下、マーカ）を図 2(a)に示す。このパターンを基にして 32 種類のマーカを生成し、ID を割り振る。このマーカを天井に多数配置し、ユーザの位置情報の取得に利用する。

本研究では、最初に検出したマーカの世界座標系に対する位置情報が必要である。そのため、世界座標系に対する位置情報が既知であるマーカを示すための特別なマーカ（以下、特殊マーカ：図 2(b)) を設ける。これには、図 2(a)の 32 種のマーカと混同しないマーカを用いる。特殊マーカは、その最近傍のマーカの世界座標系に対する位置情報が既知であることを示すために使用される。この 2 種類のマーカを組み合わせると、初期マーカと呼ぶ。このように特殊マーカを利用すると、マーカの種類を増やさなくとも、位置情報が既知のマーカを環境内に複数配置することが出来るという利点がある[5]。

2.2 マーカの位置情報の取得

提案手法における位置情報の取得の際に利用する座標系の説明を行なう。

M^C : スクリーン座標系 (M^C 上の点 N の座標は p_N^C と表記)

M^A : マーカ A の中心を原点とした座標系 (M^A 上の点 N の座標は p_N^A と表記)

M^W : 世界座標系 (M^W 上の点 N の座標は p_N^W と表記)

マーカの位置情報は、初期マーカに対しては対応する既知の位置情報を直接用いる。その他のマーカは、位置情報の求まったマーカからの相対的な位置情報を利用して求める。

図 3 において、 M^W 上でマーカ A の位置情報 p_A^W が推定されたとし、マーカ B の位置情報 p_B^W を推定する場合を考える。まず、 p_B^W は p_A^W と、 M^W 上でのマーカ A から B へのベクトル $V_{A \rightarrow B}^W$ により求まる(式(1))。ここで $V_{A \rightarrow B}^W$ は、 M^C 上のマーカ A から B へのベクトル $V_{A \rightarrow B}^C$ と、 M^C から M^B への変換行列 $M^{B \leftarrow C}$ 、 M^B から M^W への変換行列 $M^{W \leftarrow B}$ から求まる(式(2))。 $M^{A \leftarrow C}$ 、 $M^{B \leftarrow C}$ と p_A^C 、 p_B^C は、カメラでマーカ A、B を取り込むことで求まる。これにより、 $V_{A \rightarrow B}^C$ が求まる(式(3))。また、 p_A^W を取得する際に、 M^A から M^W への変換行列 $M^{W \leftarrow A}$ が求まっているので、 $M^{A \leftarrow C}$ と $M^{B \leftarrow C}$ から $M^{W \leftarrow B}$ が求まる(式(4))。

$$p_B^W = p_A^W + V_{A \rightarrow B}^W \quad (1)$$

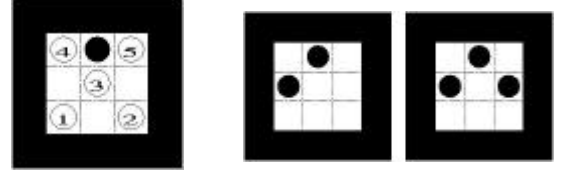
$$V_{A \rightarrow B}^W = M^{W \leftarrow B} \cdot M^{B \leftarrow C} \cdot V_{A \rightarrow B}^C \quad (2)$$

$$V_{A \rightarrow B}^C = p_B^C - p_A^C \quad (3)$$

$$M^{W \leftarrow B} = M^{W \leftarrow A} \cdot M^{A \leftarrow C} \cdot (M^{B \leftarrow C})^{-1} \quad (4)$$

2.3 ユーザの位置情報の取得

ユーザ頭部の座標系とカメラ座標系は一致していると(式(5))、 p_B^W を利用してユーザの位置情報



(a) 画像マーカのパターン (b) 特殊マーカの例
図 2：使用する画像マーカ

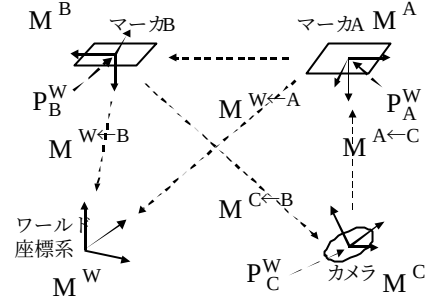


図 3：各座標系の関係

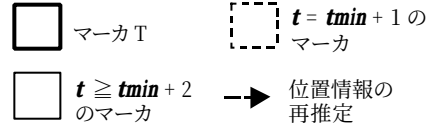
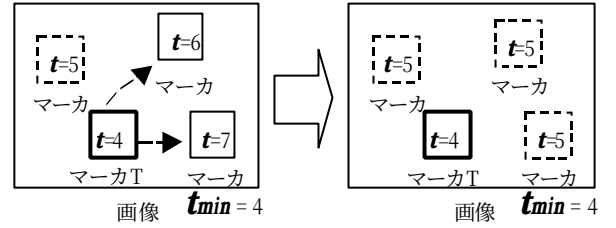


図 4：マーカ T によるマーカの位置情報の再推定

p_U^W を推定する場合について説明する。これは、 p_B^W と、マーカ B からカメラへのベクトル $V_{B \rightarrow C}^W$ により推定される(式(6))。ここで、 $V_{B \rightarrow C}^W$ は、マーカ B をカメラから取り込むことで得られる $V_{B \rightarrow C}^B$ と $M^{W \leftarrow B}$ により求まる(式(7))。 $M^{W \leftarrow B}$ はマーカの位置情報を求める際に同時に求められる。

$$p_U^W = p_B^W \quad (5)$$

$$p_C^W = p_B^W + V_{B \rightarrow C}^W \quad (6)$$

$$V_{B \rightarrow C}^W = M^{W \leftarrow B} \cdot V_{B \rightarrow C}^B \quad (7)$$

2.4 ユーザの位置推定の改善

これまでに開発した従来法[5]による位置推定のジッタ及び蓄積誤差の軽減を図る。従来法では、ユーザの位置推定は画像の中央に近い 1 つのマーカからの位置情報だけで行なっていた。本稿の手法では、画像内に位置の推定されたマーカが複数ある場合は、それぞれのマーカからユーザの位置情報を算出し、それらの平均を最終的なユーザの位置情報とすることで、ジッタの軽減を図る。

また、従来法ではマーカの位置情報は、1 回の推定だけで求めていた。本稿の手法では、マーカの位置情報は、そのマーカが写っている最初の数十フレーム分の位置情報の平均とすることでマーカの位置情報に対する誤差の軽減を図る。必要なフレーム数分の位置情報が得られるまでは、それまでの位置情報の平均をそのマーカの位置情報とする。

さらに、位置情報が一度推定されたマーカに対しても、改善が見込める場合は、位置情報の再推定を行なう。具体的には、初期マーカから経由したマーカの数(ステップ数) t を利用する。マーカの位置情報の誤差はステップ数が増えるほど蓄積する。そこで、画像上に複数のマーカが存在する場合、その中で t が最小の値 t_{min} であるマーカ T を検出し、 t が $t_{min}+2$ 以上のマーカに対して、マーカ T を基準とした位置情報の再推定を行なう(図 4)。例えば、初期マーカは $t = 0$ である。 $t_{min} = 4$ の画像内に $t = 7$ のマーカが存在する場合、 $t = 7$ のマーカの位置情報を T を利用して再推定し、 $t = 5$ とする。

3. 実験

提案手法の有効性を検証するための評価実験を行った。実験環境としては、ノート PC に Inspiron 8100 (DELL 社, PentiumIII 1.2GHz, メモリ 512MB), カメラに DragonFly (Point Grey Research 社, IEEE1394 デジタルカメラ), 表示デバイスに Clip-on Display (MicroOptical 社) を用いた(図 5)。本手法ではカメラは天井を写すために、上方向を向いている。そのため、ビデオシースルーでの情報提供は行えない。しかし、ユーザは Clip-on Display を付けていない方の目で仮想物体が表示されている範囲の実世界の様子を見ることで、あたかも仮想物体が現実環境に重畳表示されるように見ることが可能である。世界座標系の原点は、初期マーカの真下の床にあり、XY 平面は水平で、Z 軸は鉛直方向上向きが正である。天井の高さは 270cm であり、マーカの大きさは 16cm 角である。

3.1 カメラを固定した際のジッタ

ユーザに対して注釈情報の提示などを行う場合、ユーザの位置情報のジッタは、仮想のオブジェクトの動きとして直接現れるため違和感が生じる。そこで、カメラを三脚に固定して、推定された位置情報に対してどの程度のジッタが生じるかについての測定を行なった。本手法では、ユーザの位置情報を算出する際に、画像内に存在するマーカを複数利用する。そのため、画像内に写っているマーカの数の違いで、ジッタも異なる。画像内のマーカの数とジッタに関する実験結果を図 6 に示す。カメラの高さは床から約 135cm である。実験中のフレームレートはどの場合でも約 30fps である。

図 6(a), (b) はそれぞれ世界座標系の X-Y 方向, X-Z 方向において、マーカを 3 つ利用した場合と 6

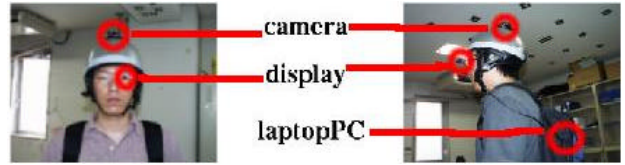
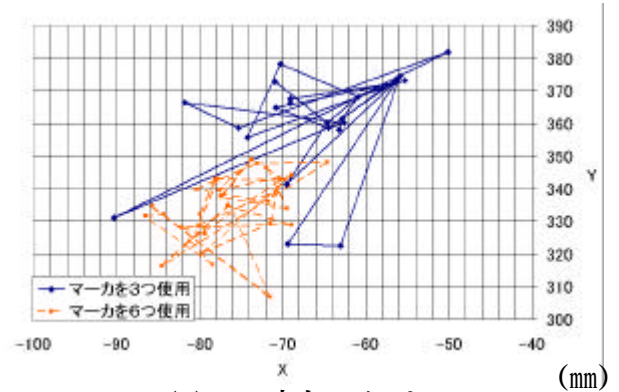
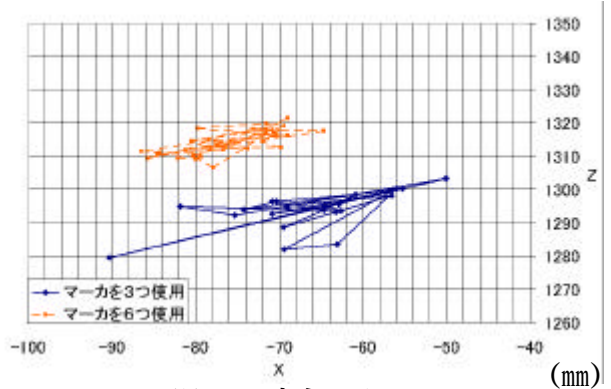


図 5：実験環境



(a) X-Y 方向のジッタ



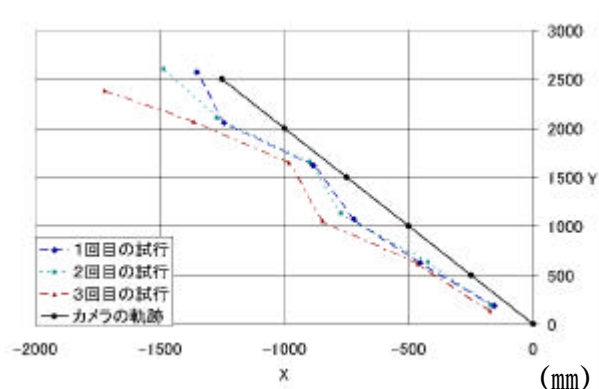
(b) X-Z 方向のジッタ

図 6：カメラが静止状態での誤差評価

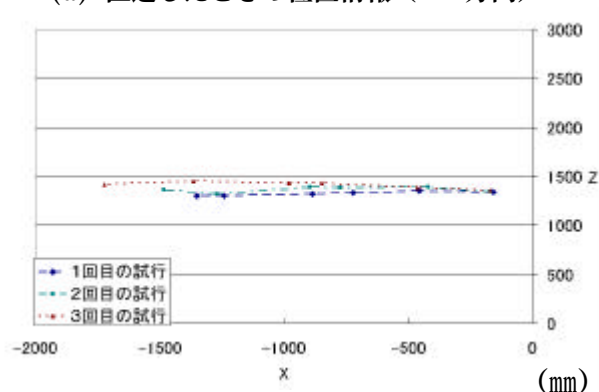
つ利用した場合を示している。グラフは、マーカの位置情報が安定した後、1 秒間に得られた位置情報の変動を表している。なお、各図の 2 つのグラフの位置が異なるのは、実際のカメラ位置は変えていないが、それぞれの試行で求まるマーカの位置情報に差が生じたためである。図から、マーカを 6 つ使用して推定した位置情報のジッタの振れ幅が狭くなっていることが分かる。これは、マーカの数が多いほうが、外れ値による影響が少なくなるためである。しかし、さらに多くのマーカを利用する場合、位置情報の推定に要する時間が増加するという問題があり、位置推定に利用するマーカの適切な数を決定する必要がある。

3.2 カメラを平行移動させた場合の累積誤差

提案手法では、ユーザの位置情報を求める際に、マーカ自体の位置情報を他のマーカとの相対的な位置関係から算出している。そのため、初期位置から遠ざかるほど、マーカの位置情報に対して誤差が蓄積する。そこで、カメラを平行移動させ、位置情報のずれを評価した。実際には、位置検出の初期位置から約 300cm の位置まで平行移動する間、等間隔に



(a) 直進したときの位置情報 (X-Y 方向)



(b) 直進したときの位置情報 (X-Z 方向)

図 7: カメラが直進した場合の誤差評価

5 回の位置検出を行なった。なお、測定時のカメラの高さは一定(床から約 150cm)である。フレームレートはこの場合も約 30fps である。図 7(a),(b)はそれぞれ推定された位置情報の X-Y 方向, X-Z 方向を示している。図 7(a)において、実線は世界座標の原点からのカメラの軌跡である。また、3 つの破線はそれぞれ各試行で推定されたカメラの軌跡である。なお、線上の点はそれぞれカメラの計測地点と推定された位置情報を表している。各破線と実線とのズレはカメラの移動に連れて次第に大きくなっている。これは、マーカの位置情報 $M^{W \leftarrow M}$ に蓄積した誤差のためである。図 7(b)では、マーカの位置情報に蓄積する誤差のため多少上下はするが、ほぼ水平を保っている。

3.3 ユーザの位置情報の利用例

提案手法により推定されたユーザの位置情報を利用して、実験的にアプリケーションを試作した。まず、屋内環境における物体の注釈情報を設定しておく。次に、ユーザの頭部が情報提示可能な物体の方向を向いた場合、物体の近くに仮想的なタグを点灯させる。ここで、タグの点灯中にユーザがハンディマウスを操作して情報の提示を要求することで対象物体の情報が Clip-on Display 上に提示される。図 8(a)はドーム型ディスプレイに対するタグの表示、図 8(b)はドーム型ディスプレイに対してユーザが情報の提示を要求した場合を示している。ただし図 8 は Clip-on Display 上に実際に提示される情報と



(a) 仮想タグの表示 (b) ナビゲーション画面

図 8: ユーザの位置情報を利用したナビゲーションシステム

ユーザの視界の映像を説明のために合成したものである。ここで、提示している注釈情報は CG によるロボットの吹き出しとして提示している。

4. まとめ

本研究では、我々がこれまでに提案した、天井に多数配置した画像マーカから 1 枚のみを利用して屋内位置推定を行なう手法に対して、画像内の複数のマーカを同時に利用するなど幾つかの手法を新たに導入することで、ユーザの位置推定精度の向上を図った。また提案手法の有効性を実験により確認し、本手法を用いたナビゲーションシステムを構築した。

今後の課題としてはユーザの位置推定の精度の更なる向上とその情報を利用したナビゲーション支援システムの構築が挙げられる。

謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科研費補助金(課題番号 14019058)及び、科学技術振興事業団(JST)の戦略的基礎研究推進事業(CREST)「高度メディア社会の生活情報技術」プログラムの支援によるものである。

文献

- [1] J.Rekimoto: NaviCam: A Magnifying Glass Approach to Augmented Reality System, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, MIT Press, Vol.6, No.4, pp.399-412(1997).
- [2] Shared Space/ARToolKit Download Page: http://www.hitl.washington.edu/research/shared_space/download/
- [3] 加藤 博一, M.Billinghurst, 浅野 浩一, 橘啓 八郎: マーカ追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション, 日本 VR 学会誌, Vol.4, No.4, pp.607-616(1999).
- [4] B.Thomas et al: ARQuake:An Outdoor/ Indoor Augmented Reality First Person Application, Proc. 4th ISWC 2000, pp.139-146(2000).
- [5] 羽原 寿和, 町田 貴史, 小川 剛史, 竹村 治雄: 画像マーカを用いた屋内位置検出機構とその評価, 信学技報, IE2002-53, pp.65-70(2002).