

## 環境の三次元モデルと魚眼カメラを利用した 屋外複合現実感システムのためのユーザ位置推定

天目 隆平<sup>†</sup> 平岡 貴志<sup>‡1</sup> 海川 真佑<sup>‡</sup> 柴田 史久<sup>‡</sup> 木村 朝子<sup>†\*</sup> 田村 秀行<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>立命館大学総合理工学研究機構 〒575-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

<sup>‡</sup>立命館大学理工学研究科 〒575-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

\* 科学技術振興機構 さきがけ 〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8 川口センタービル

E-mail: tenmoku@rm.is.ritsumeai.ac.jp

**あらまし** 本稿では、現実世界と仮想世界を継ぎ目なく融合する複合現実感アプリケーションのための屋外環境、特に都市環境での位置合わせ手法を提案する。提案手法では、ユーザに上向きに取り付けた魚眼カメラから得られる屋外環境の魚眼画像と、環境の三次元モデルをもとに生成した仮想の魚眼画像を比較することにより、実時間でユーザ位置の推定を行う。これらの魚眼画像の比較には、各画像から検出した周囲の建物のシルエットを利用する。本稿では、提案手法によるユーザ位置計測精度および処理時間を示し、提案手法を用いたモバイル複合現実型屋外ナビゲーションについて述べる。

**キーワード** ユーザ位置推定、複合現実感、魚眼画像、三次元モデル、シルエット

## Estimation of the User's Position for Outdoor MR Systems Using 3D Models and a Fisheye Camera

Ryuhei TENMOKU<sup>†</sup> Takashi HIRAOKA<sup>‡1</sup> Shinsuke KAIGAWA<sup>‡</sup>

Fumihisa SHIBATA<sup>‡</sup> Asako KIMURA<sup>†\*</sup> Hideyuki TAMURA<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Research Organization of Science and Engineering, Ritsumeikan University  
1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan

<sup>‡</sup> Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University  
1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan

\* PRESTO, Japan Science and Technology Agency Kawaguchi Center Building,  
4-1-8, Honcho, Kawaguchi, 332-0012, Saitama, Japan

E-mail: tenmoku@rm.is.ritsumeai.ac.jp

**Abstract** This paper describes the positioning method of the outdoor mobile users in urban environments for mixed reality (MR) which can merge real and virtual worlds seamlessly. The proposed method estimates the user's position in real time by comparing silhouettes of real and virtual fish-eye images. Real fish-eye images are captured with the fish-eye camera which is attached to the mobile user upward. Virtual fish-eye images are generated from 3D models. This paper describes accuracy and processing time of the proposed method and a mobile outdoor MR navigation application using the proposed method.

**Keyword** Estimation of User's Position, Mixed Reality, Fish-eye Images, 3D Model, Silhouette

### 1. はじめに

近年、実世界に仮想物体をシームレスに重ね合わせる技術である複合現実感(Mixed Reality; MR)の研究が盛んに行われている[1,2]。いくつかの屋内型のMRシステムは既に実用化されており、近年では急速に発展してきたウェアラブルPC、携帯端末、携帯電話等のモ

バイル端末上でMRシステムを実現しようという試みも数多くなされている[3,4]。モバイルMRシステムにより、任意の場所において実オブジェクトに対してCGで描画された注釈情報を重畳してユーザに提示したり[5]、街中や観光地等でユーザ位置に応じた情報を直感的に提示することが可能となる[6,7]。屋外でMRを実現するためには、屋外の広域環境におけるユーザ位置

<sup>1</sup>現在は KDDI 株式会社に所属。

の実時間および高レートでの計測が課題となる。

屋外環境での位置計測手法は、センサベース方式、ビジョンベース方式、それらを組み合わせたハイブリッド方式に分類される。神原らは RTK-GPS と慣性航法センサを併用したウェアラブル型複合現実感システムを提案した[8]。神原らの手法では、GPS 特有の計測周期の低さと慣性航法センサの持つ誤差が蓄積する欠点を互いに補うことで精度を向上させている。しかし、RTK-GPS の利用には特殊なインフラ整備が必要であり、周囲に高い建物がある場所ではマルチパスの影響により大きな誤差が生じるという問題がある。

ビジョンベース方式の代表例として、大江らによる、事前に撮影した映像から抽出した自然特徴点をデータベース化し、入力画像中の特徴点群からカメラ位置・姿勢を推定する手法[9]が挙げられる。しかし、現段階では実時間でのカメラ位置推定が困難なことや、データベース作成時のカメラパスから離れると精度が低下するという問題がある。また、Reitmayr らは、事前に準備した屋外環境の三次元モデルとカメラから得られるユーザの眼前の風景のエッジベースでのマッチングを行い、実時間でカメラ位置をトラッキングする手法を提案した[10]。Reitmayr らの手法は、建物が立ち並ぶ都市環境を対象としており、位置推定の誤差は 2~3メートル以内である。また、建物の壁面等のテクスチャを利用して計測精度の向上を図っており、一時的なオクルージョンに頑健であるという特徴を持つ。しかし、Reitmayr らの手法はカメラに建物が映っていないかったり、建物から離れすぎたり近づきすぎるとトラッキングに失敗することが予想される。

センサとビジョンを組み合わせることで計測精度の向上を図るハイブリッド方式もいくつか提案されている。興枙らは、環境中であらかじめ撮影したおいた全方位画像とユーザ視点付近に取り付けられたカメラから得られる画像のマッチング、および慣性センサを利用して、ユーザ位置の実時間推定を試みた[11]。しかし、興枙らの手法は照明条件等の環境の変化に対して脆弱である。このように、屋外環境でのユーザ位置の計測手法には、いまだ決定的な手法はない。そこで本稿では、(1)屋外の広域環境、特にビルが立ち並ぶ都市環境で利用可能、(2)実時間かつ MR システムに利用可能な計測レートおよび計測精度、の 2 点を満たすユーザ位置の推定手法を提案する。想定環境である都市環境では、マルチパスの影響により GPS の精度が著しく低下する。本研究では、GPS と相補可能な実時間位置推定手法の確立を目指す。

提案手法は、事前に準備した環境の三次元モデルから得られる仮想の魚眼画像と、ユーザに上向きに取り付けた魚眼カメラから得られる魚眼画像のマッチング

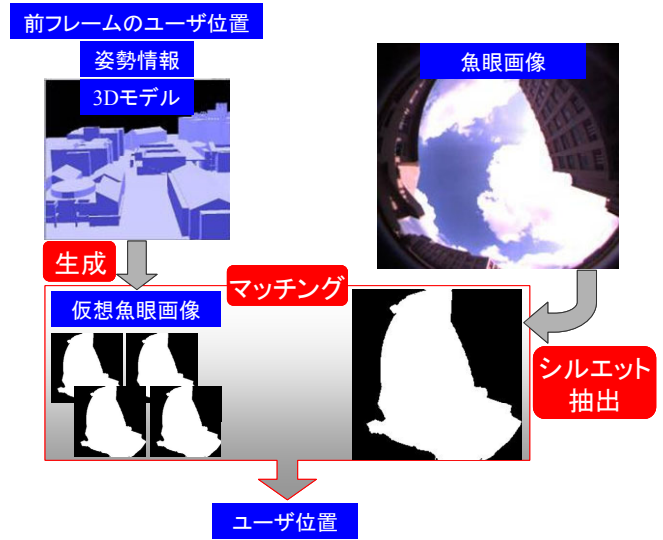


図 1:処理の流れ

によりユーザ位置をトラッキングする。ユーザの初期位置および姿勢はセンサを用いて計測することを想定しており、計算時間の削減のため、ユーザ位置の鉛直成分は地上面から一定の高さであると仮定して、水平面上の 2 自由度においてユーザ位置のトラッキングを行う。

以下、2 章では提案する三次元モデルと魚眼カメラを利用したユーザ位置推定手法について述べる。3 章では、提案手法の計測精度および処理時間を示し、提案手法を利用して構築した屋外ナビゲーションシステムについて述べる。最後に 4 章で本研究を総括し、今後の展望について述べる。

## 2. 三次元モデルと魚眼カメラを利用したユーザ位置推定

### 2.1. 処理概要

提案手法の各フレームにおける処理の概要を図 1 に示す。提案手法では、前フレームにおいて推定されたユーザ位置・姿勢情報・環境の三次元モデルから、前フレームのユーザ位置とその近傍における現在の姿勢の魚眼画像を生成する。また、魚眼カメラから現実環境の鉛直方向上向きの魚眼画像を獲得し、周囲の建物のシルエット画像を生成する。生成された仮想の魚眼画像群と実環境の魚眼画像のマッチングを行い、最もマッチングスコアが高い点を現フレームにおけるユーザ位置であると判断する。周囲の建物のシルエットを用いて比較を行うことで、日照条件等の変化にロバストで、高速な処理を実現している。本節では、2.2 節で魚眼カメラの射影方式について述べた後、仮想魚眼画像の生成およびマッチングに関してそれぞれ 2.3 節、2.4 節で詳述する。

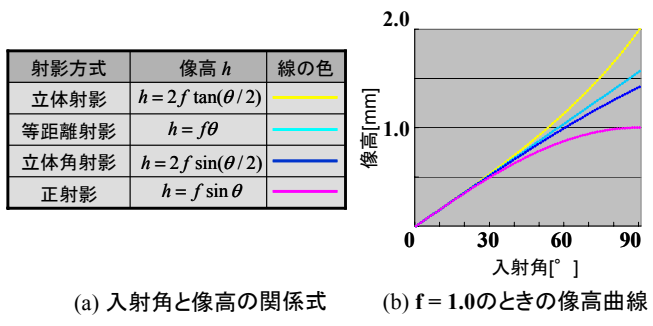


図 2: 入射角と像高の関係

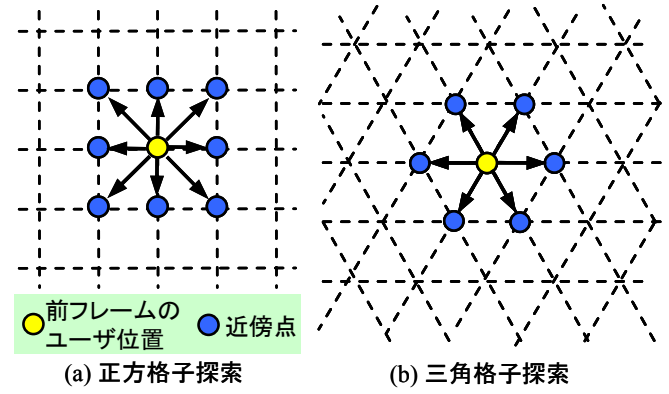


図 4: 前フレームのユーザ位置と近傍点の例

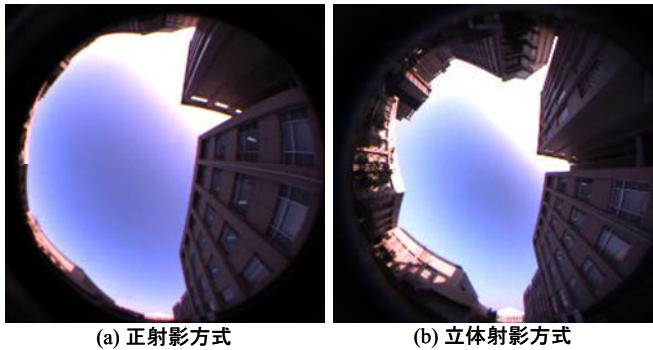


図 3: 魚眼画像の例

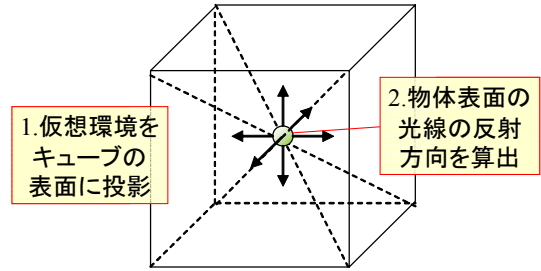


図 5: キューブマッピングの概念

### 2.2. 魚眼カメラの射影方式

魚眼カメラには立体射影方式，等距離射影方式，立体角射影方式，正射影方式の4つの射影方式がある．それぞれの方式における，焦点距離  $f$  としたときの入射角  $\theta$  と像高  $h$  の関係式および， $f = 1.0$  のときの像高曲線を図 2 に示す．入射角  $\theta$  は魚眼カメラの光軸と入射光がなす角である．図 2 より， $\theta$  が 30 度を越えたあたりから，像高に差が出始める．正射影方式では撮画

像の中心部の情報量に比べて周辺部の情報量が少なく，立体射影方式ではその逆となる．図 3 にそれぞれの方式の魚眼カメラで撮影した魚眼画像を示す．提案手法では，使用する魚眼カメラの射影方式に合わせて仮想の魚眼画像を生成する．

### 2.3. 仮想魚眼画像の生成

提案手法では，ユーザ位置のトラッキングを行うために，仮想の魚眼画像を生成して実画像との比較に用いる．仮想魚眼画像は，仮想環境内の前フレームでのユーザ位置およびその近傍点において，センサで計測された姿勢の仮想魚眼カメラに環境のモデルを投影して生成する．提案手法では，地表面に平行で高さが一定（ユーザに取り付けたカメラの高さ）であるような水平面を図 4 に示すように正方格子または三角格子に区切り，その格子点上に仮想カメラを移動させて仮想魚眼画像を生成する．以後，これらの探索方式をそれ

ぞれ正方格子探索，三角格子探索と，また，これらの格子点の間隔を探索幅と呼ぶ．探索幅は提案手法の位置計測分解能となるが，これはユーザが 1 フレームの間に移動できる距離をもとに設定する．ユーザが 1 フレームの間に探索幅以上の距離を移動すると，正しくトラッキングできない．すなわち，探索幅を  $h[m]$ ，1 フレームの処理にかかる時間を  $t[s]$ ，ユーザの歩行速度を  $v[m/s]$  とすると， $v \leq h/t$  であるならば，ユーザが立ち止まっていようが，急に歩行方向を変えようが，ユーザ位置をトラッキングすることが可能である．屋外環境の三次元モデルは，建物の CAD データに基づいて事前に作成しておく．このモデルを実環境と同じスケールで配置した仮想環境内の前述の各地点においてキューブマッピングを利用して仮想の魚眼画像を生成する．図 5 に示すキューブマッピングにより，物体の表面各点の法線ベクトルをもとに光線の反射方向を算出することで，キューブ内部の物体への環境の映りこみを実時間でシミュレートすることができる．提案手法では，仮想魚眼画像の生成を行う地点から各方向画角 90 度で仮想空間を映したテクスチャをキューブの内側に貼り，これをキューブ中央に配置した仮想魚眼カメラに投影することで，仮想の魚眼画像を生成する．仮想魚眼カメラの各頂点における法線ベクトルは，レンズメーカーから提供される像高曲線の実測値を多項式近似して求める．



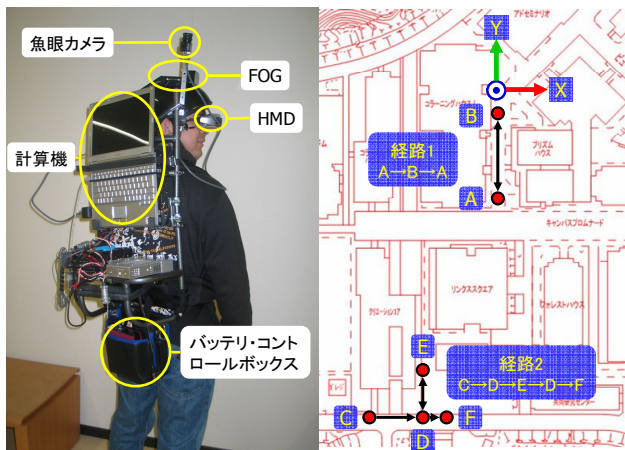


図 6: ユーザ外観

図 7: 実験環境

表 1: 計算機およびセンサのスペック

品名	型番	スペック
計算機	XPS M1210 (Dell)	CPU: Intel Core2Duo 2.16[GHz], メモリ: 2[GB], グラフィックチップ: NVIDIA GeForce Go 7400
姿勢センサ	FOG TISS-5-40 (トキメック)	方位角精度: $\pm 3$ [degree/h], 姿勢角精度: $\pm 0.5$ [degree/h], 計測レート: 250[Hz]
カメラ	FLEA (Point Grey Research)	解像度: $640 \times 480$ [pixels], 最大フレームレート: 60[fps]
魚眼レンズ	FI-15 (FIT)	正射影レンズ
	FI-085 (FIT)	立体射影レンズ

## 2.4. 魚眼画像のマッチング

提案手法では、生成した仮想魚眼画像とユーザ頭部に設置した魚眼カメラから得られる実環境の魚眼画像をエッジベースでマッチングを行い、実環境の魚眼画像と最も類似する仮想魚眼画像が得られる地点をユーザ位置と推定する。マッチングに用いる画像は、実画像・仮想画像ともに、図 1 で示すような周囲の建物のシルエット画像である。現在は、晴天を想定することで安定したシルエット画像の生成を実現しているが、今後、環境の変化に対応可能な手法を考案する必要がある。マッチングスコアは、仮想の魚眼画像と実環境の魚眼画像のシルエット画像間で XOR をとった際の一致する画素数とする。

## 3. 検証実験

### 3.1. 射影方式および探索方式に関する検証実験

提案手法を用いて本学キャンパス内の屋外環境において、モバイルユーザの位置推定実験を行った。その際のユーザの外観および実験環境の様子をそれぞれ図 6、図 7 に示す。ユーザが装着した計算機およびセンサのスペックを表 1 に示す。ユーザは魚眼レンズ付きのカメラと姿勢センサを装着した。姿勢センサは、pitch, roll, yaw を高精度に計測することができる光学

表 2: ユーザ位置の計測精度 [単位: m]

	(i)	(ii)	(iii)	(iv)
B(折り返し地点)	0.34	0.84	1.71	0.80
A(終点)	2.05	2.80	1.69	2.18

表 3: 実行時間 [単位: ms]

	(i)	(ii)	(iii)	(iv)
画像取得	4.25	4.38	5.49	4.26
輪郭線抽出	2.46	2.51	3.32	2.34
姿勢情報取得	4.63	4.28	6.15	5.36
テクスチャ生成	73.73	57.48	73.32	59.43
キューブマッピング	41.90	32.83	41.93	33.68
マッチング	2.03	1.60	2.18	1.61
1フレーム合計	129.1	103.1	132.5	106.7

式ジャイロ(FOG)を利用した。本実験では、まず、図 7 の経路 1(A-B-A, 約 150[m])において、(i)正射影方式・正方格子探索、(ii)正射影方式・三角格子探索、(iii)立体射影方式・正方格子探索、(iv)立体射影方式・三角格子探索、の 4 つのパターンでユーザ位置および処理時間を計測した。なお、正方格子探索・三角格子探索ともに探索幅は 0.5[m]とし、初期位置は経路の始点である A 点の実測値を用いた。また、入力した実環境の魚眼画像のサイズは  $240 \times 240$ [pixels]、仮想の魚眼画像の生成に用いるキューブのテクスチャのサイズは  $128 \times 128$ [pixels]とした。各パターンでの B 地点(折り返し地点)と A 地点(終点)における計測精度、および任意抽出した 100 フレーム分の平均の実行時間をそれぞれ表 2、表 3 に示す。計測精度は、B 点および A 点における提案手法を用いて推定されたユーザ位置と実測値とのユークリッド距離である。

探索方式の違いは処理時間に顕著に現れる。これは、生成する仮想の魚眼画像の数が探索方式によって異なるためである。しかし、本実験の結果により両方式間で位置推定の精度に大差はないことが分かった。また、位置推定の精度は魚眼カメラの射影方式にも依存しないことが分かった。

### 3.2. 探索幅に関する検証実験

次に、最適な探索幅を調べるために、図 7 の経路 2(C-D-E-D-F, 約 80[m])において、探索幅を 0.125[m], 0.25[m], 0.5[m]の場合のユーザ位置推定を行った。本実験では、魚眼カメラは正射影方式のレンズを、探索方式は正方格子探索を用いた。入力画像サイズおよびキューブマッピングの際のテクスチャのサイズは前節の実験と同様の値を用いた。それぞれの場合の推定さ

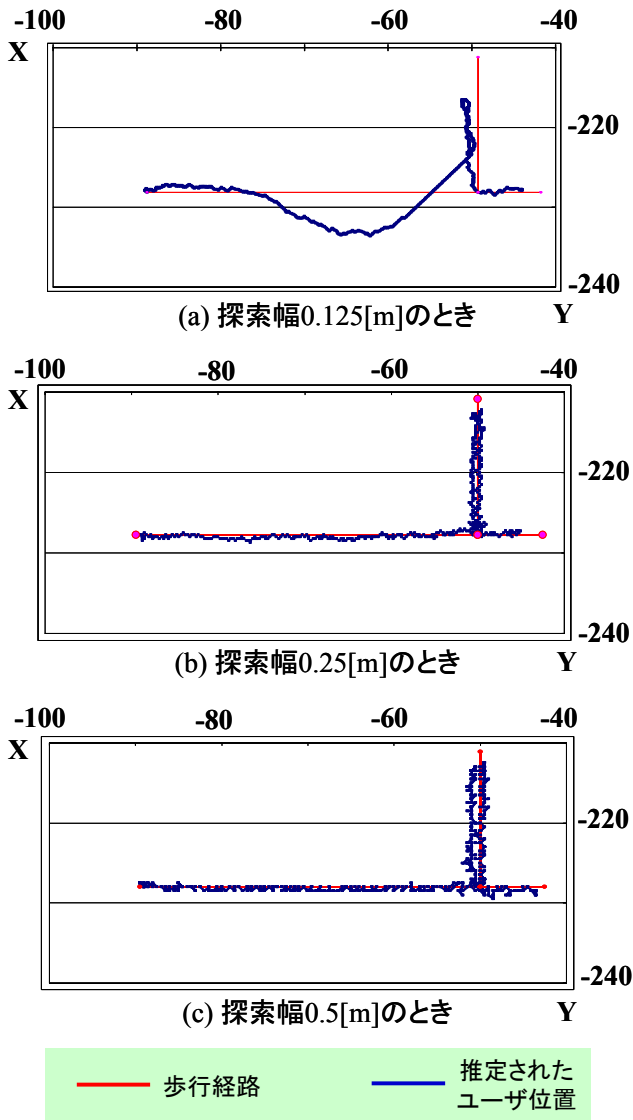


図 8: ユーザ位置推定結果[単位:m]

れたユーザ位置を図 8 に示す。図 8 より、探索幅が 0.125[m]のときに正しくユーザ位置が推定されなかったことが分かる。これは、ユーザの歩行速度を 4[km/h]であるとすると、1 フレームの間にユーザは約 0.14[m]移動することになる。これは、探索幅の 0.125[m]を超えてしまっているため、トラッキングが追いつかなかったことが原因であると考えられる。探索幅が 0.25[m]および 0.5[m]の場合は、破綻することなくユーザ位置を推定できた。経路 2 の地点 D, E, F における実推定されたユーザ位置と実測値の差の平均は、探索幅が 0.25[m]のときが 2.14[m]、探索幅が 0.5[m]のときが 1.44[m]であった。

### 3.3. 試作アプリケーションによる検証実験

提案手法を利用したユーザ位置に基づいて屋外環

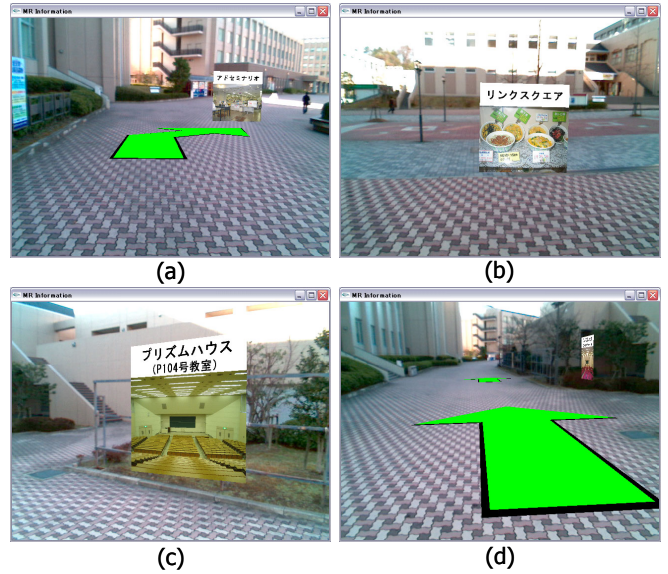


図 9: 屋外ナビゲーションの画像例

境のモバイルユーザの眼前の光景に対して注釈情報を提示するキャンパスガイドシステムを試作した。レンズの射影方式および探索方式には、前節までの検証実験で比較的良好な位置推定結果を示した正射影方式と三角格子探索を採用した。なお、探索幅は 0.5[m]とした。ユーザの姿勢は FOG の出力データを利用した。図 9 に試作したキャンパスガイドシステムの実行結果を示す。提示画像のサイズは 640×480[pixels]で、生成画像の更新レートは 100 フレームの平均で 7.57[fps]であった。これより、提案手法が遠景に CG の注釈情報を重畳させるような MR アプリケーションに有効であることが確認された。

### 3.4. 考察

本研究では、屋外の広域環境、特に GPS の誤差が大きくなる都市環境で利用可能、実時間かつ MR システムに利用可能な計測レートおよび計測精度の 2 点を満たすユーザ位置推定手法の構築を目指した。本節に述べた実験により、目標とした計測レートおよび計測精度をおおよそ達成していることを示した。約 10[Hz]の計測レート、平均 2m の計測誤差は、現時点でも遠景に注釈情報を重畳するような MR アプリケーションへの適用が可能であるが、今後、更なる計測精度および計測レートの向上を図る。これらを含めた提案手法の今後の課題を以下に列挙する。

#### • 計測レートの向上

提案手法では、前フレームのユーザ位置と格子状の近傍点を現フレームのユーザ候補として仮想的魚眼画像を生成しているが、その際に作成するキューブのテクスチャは、前フレームで利用したものを再利用することができる。本処理により表 3 の「テク

スチャ生成」部分の処理時間が大幅に削減でき、処理速度の向上が見込まれる。

#### • 計測精度の向上

現在の手法では、形状のみのモデルを利用している。今後、テクスチャ付きのモデルを用い、テクスチャ情報を利用して計測精度の向上を図る。

#### • 環境の変化への対応

現状では、晴天を想定して実環境の魚眼画像からシルエット画像を生成している。今後、日照条件や天候等の変化に頑健にシルエットを求められるよう改善する必要がある。

#### • 要求される初期位置計測精度の検討

本稿で述べた実験では、ユーザの初期位置は実測値を手動で与えている。今後、本手法はどの程度正確な初期位置を必要とするか調査する必要がある。

## 4. むすび

本稿では、屋外の都市環境で利用可能なモバイルユーザの位置推定手法について述べた。提案手法は、ユーザに設置した魚眼カメラから得られる実環境の魚眼画像と環境のモデルを投影して作成する仮想の魚眼画像を比較してユーザ位置のトラッキングを行う。実験により、提案手法は約 10[Hz]の計測レート、平均 2m の計測誤差で安定したトラッキングを行えることを示した。提案手法は Reitmayr らの手法[10]と同程度の計測精度であるが、魚眼カメラを用いているため入力画像に周囲の建物が映る可能性が高く、部分的なオクルージョンにも頑健であると考えられる。今後は、オクルージョンに対する頑健性を示すとともに、計測レートおよび計測精度の更なる向上を目指す。

## 謝 辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤研究(B) No. 17300039)及びハイテク・リサーチ・センター整備事業の支援によるものである。

## 文 献

- [1] S. Feiner, B. MacIntyre, and D. Seligmann: Knowledge-based Augmented Reality, Communications of the ACM, Vol. 36, No. 7, pp. 52 - 62, 1993.
- [2] R. Azuma, Y. Baillet, R. Behringer, S. Feiner, S. Juiler, and B. MacIntyre: Recent Advances in Augmented Reality, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 21, No. 6, pp. 34 - 47, 2001.
- [3] S. Mann: Wearable Computing: A First Step Toward Personal Imaging, IEEE Computer, Vol. 30, No. 2, pp. 25 - 32, 2002.
- [4] F. Shibata, T. Hashimoto, K. Furuno, A. Kimura, and H. Tamura: Scalable Architecture and Content Description Language for Mobile Mixed Reality Systems, Proc. of 16th Int. Conf. on Artificial Reality and Telexistence, LNCS 4282, pp. 122 - 131,

2006.

- [5] T. Höllerer, S. Feiner, T. Terauchi, G. Rashid, and D. Hallaway: Exploring MARS: Developing Indoor and Outdoor User Interfaces to a Mobile Augmented Reality System, Computers and Graphics, Vol. 23, No. 6, pp. 779 - 785, 1999.
- [6] D. Stricker, J. Karigiannis, I. T. Christou, T. Gleue, and N. Ioannidis: Augmented Reality for Visitors of Cultural Heritage Sites, Proc. of Int. Conf. on Cultural and Scientific Aspects of Experimental Media Spaces, pp. 89 - 93, 2001.
- [7] 天目隆平, 神原誠之, 横矢直和: 「平城宮跡ナビ」観光案内のためのウェアラブル拡張現実感システム, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)講演論文集, Vol. I, pp. 121 - 126, 2004.
- [8] 神原誠之, 横矢直和: RTK-GPS と慣性航法装置を併用したハイブリッドセンサによる屋外型拡張現実感システム, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2005)講演論文集, pp. 933 - 938, 2005.
- [9] 大江統子, 佐藤智和, 横矢直和: 幾何学的位置合わせのための自然特徴点ランドマークデータベースを用いたカメラ位置・姿勢推定, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 3, pp. 285 - 294, 2005.
- [10] G. Reitmayr, and T. W. Drummond: Going Out: Robust Model-based Tracking for Outdoor Augmented Reality, Proc. of 5th Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp. 109 - 118, 2006.
- [11] 興梠正克, 蔵田武志: ウェアラブルカメラと慣性センサ群のデータ統合に基づくパーソナルポジショニング, 信学技報, PRMU2002 - 180, pp. 67 - 72, 2003.