

# AR 観光システムのための全周レンジファインダを用いた ランドマークデータベース構築に基づく幾何的位置合わせ

武富 貴史<sup>†</sup> 佐藤 智和<sup>†</sup> 横矢 直和<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科

〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

E-mail: †{takafumi-t,tomoka-s,yokoya}@is.naist.jp

あらまし 拡張現実感では、一般に、現実環境を撮影した画像を CG の合成対象として用いるだけでなく、カメラ位置・姿勢推定にも用いることで、精度の高い位置合わせを実現している。このような、画像に基づくカメラ位置・姿勢推定手法として、現在までに様々な手法が提案されている。なかでも、従来提案されている structure-from-motion(SFM)法を用いて自動でランドマークデータベースを構築する手法は、データベース構築の人的コストが低く、広域な環境を対象とした場合にもカメラ位置・姿勢推定の誤差が累積しないという特長を持つ。しかし、従来手法では、SFM 法により得られる疎な奥行き情報のみを用いてランドマークの見え方を補正しているため、ユーザの近くに存在するランドマークを入力画像上の自然特徴点と正しく対応付けることが難しく、AR 観光のようなアプリケーションにおいてユーザの近くに存在する CG を高精度に位置合わせすることが難しいという問題があった。本研究では、全周レンジファインダにより取得した密な奥行き情報を用いてランドマークの見え方を補正することで、ユーザの近くに存在するランドマークを効果的に対応付け、高精度な位置合わせを実現する。

キーワード 拡張現実感, ランドマークデータベース, カメラ位置・姿勢推定, 全周レンジセンサ

## Geometric Registration Based on Feature Landmark Database Constructed by Omnidirectional Range Sensor for AR Sightseeing

Takafumi TAKETOMI<sup>†</sup>, Tomokazu SATO<sup>†</sup>, and Naokazu YOKOYA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

Takayama 8916-5, Ikoma, Nara 630-0192, Japan

E-mail: †{takafumi-t,tomoka-s,yokoya}@is.naist.jp

**Abstract** In the field of augmented reality, extrinsic camera parameter estimation is required to achieve geometric registration between real and virtual worlds. To estimate extrinsic camera parameters, many kinds of pre-knowledge of the target environments have been used. A feature landmark-based camera parameter estimation method is one of effective methods in outdoor augmented reality. In this method, a feature landmark database was constructed automatically using a structure-from-motion technique in a target environment. However, the accuracy of estimated camera parameter is not sufficient for some applications which need overlay CG objects at the position close to the user's viewpoint. This is due to the difficulty in compensation of visual pattern change of landmarks only from the sparse 3-D information obtained by structure-from-motion. In this report, visual patterns of landmarks are compensated for by using dense omnidirectional range data to find corresponding landmarks existing close to the user. By using these landmarks, more accurate geometric registration is achieved.

**Key words** augmented reality, feature landmark database, extrinsic camera parameter estimation, omnidirectional laser range sensor

### 1. はじめに

現実環境を撮影した画像中に CG などの仮想物体を描画することで情報を付加するビデオスルー型拡張現実感では、ヒューマンナビゲーション [1], [2], 景観シミュ

レーション [3], 教育支援 [4] などの様々な分野への応用が期待されている。このような拡張現実感技術を利用したアプリケーションでは、現実環境と仮想環境の位置合わせを実現するためにカメラの位置・姿勢を推定する必要があり、現在までに様々な手法が提案されている。こ



図 1 拡張現実感を用いた景観シミュレーション例

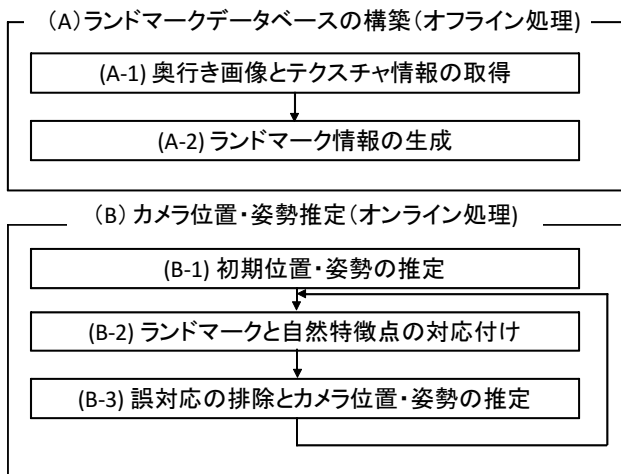


図 2 提案手法の処理の流れ

のような分野では、近年、高精度な位置合わせを目的とした、画像に基づくカメラ位置・姿勢推定手法が盛んに研究され、多くの場合において、現実環境に対する仮想物体の提示位置を決定するために、環境に関する事前知識が利用されている。なかでも、従来我々が提案したランドマークデータベースを用いた手法 [5] は、全方位カメラで撮影した動画像に対して SFM 法を適用することによって、広域な屋外環境においても低い人的コストで利用環境の事前知識を取得できるという特長を持つ。しかし、従来手法では、SFM 法によって得られる疎な奥行き情報のみを用いてランドマークの見え方の情報を生成しているため、オンラインでのカメラ位置・姿勢推定時にユーザの近くに存在するランドマークの見え方を補正することが難しいという問題がある。そのため、図 1 に示す AR 観光のアプリケーションのように、ユーザの近くに仮想物体を描画する場合には、表示される CG にジッタが生じていた。

本研究では、全周レンジファインダを用いて得られる密な奥行き情報を新たに利用し、ランドマーク周辺の局所的な三次元形状を考慮することで、入力画像中の自然特徴点と正しく対応づくようにランドマークの見え方を補正する。これにより、従来手法よりも高精度な位置合

わせを実現することで、CG の合成におけるジッタを抑制する。

提案手法の処理の流れを図 2 に示す。ランドマークデータベースを用いたカメラ位置・姿勢推定は、オフラインでのデータベースの構築処理 (A) とオンラインでのカメラ位置・姿勢の推定処理 (B) からなり、推定手法の枠組みは従来手法 [5] と同一であるが、本研究では新たにオフライン処理において密な奥行き情報を用いたランドマーク情報の生成を行い、オンライン処理ではオクルージョンを考慮したランドマークの探索を行う。

以下、2 節では、カメラ位置・姿勢推定の関連研究と本研究の位置づけについて述べる。3 節では、ランドマークデータベースの構成要素および全周型レンジファインダを用いたオフラインでの構築処理について述べ、4 節では、オンラインでのカメラ位置・姿勢推定処理について述べる。5 節では実験により、カメラ位置推定精度の向上効果を検証する。最後に、6 節でまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 関連研究

本節では、画像に基づくカメラ位置・姿勢推定手法を事前知識を用いない手法と事前知識を用いる手法に大別し概観した後、本研究の位置づけについて述べる。

事前知識を用いない手法は visual-SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) と呼ばれ、入力画像中の自然特徴点を追跡することによって、自然特徴点の三次元位置およびカメラの位置・姿勢を同時に推定する [6] ~ [8]。この手法は、事前準備無しに、その場で拡張現実感環境を構築できるという特長を持つが、visual-SLAM 単体では、絶対的なカメラ位置・姿勢やスケール情報を取得できないために、位置に依存した情報を利用するナビゲーションなどのアプリケーションへの応用には向かない。このような問題に対して、Bleser ら [7] は、環境の一部のワイヤフレームモデルと visual-SLAM を併用することで基準となる座標系を設定している。また、Klein ら [8] は、初期化の際にインタラクティブな操作によって、おおまかなスケール情報を取得している。しかし、これらの手法においても、広域で複雑な環境においてはモデル作成のための多くの人的コストが必要であるという問題や事前に基準となる座標系を定義できないために位置に依存した情報を利用できないという問題が残っている。

一方、環境の事前知識を用いる手法は、環境の三次元モデル [9], [10] やランドマークデータベース [5] を用いることで、絶対的なカメラ位置・姿勢を推定している。Drummond ら [9] は、ワイヤフレームモデルを用い、入力画像中のエッジとワイヤフレームモデルを対応付けることでカメラ位置・姿勢の推定を行っている。また、Reitmayr ら [10] は、テクスチャ付のポリゴンモデルを作成し、モデルの形状情報とテクスチャ中のエッジを併

用することでロバストなカメラ位置・姿勢の推定を実現している。しかし、一般に広域で複雑な屋外環境の三次元モデルを作成することは難しく、事前知識の取得に多くの人的コストを必要とするという問題がある。我々が従来提案したランドマークデータベースを用いる手法 [5] では、自然特徴点の三次元位置と自然特徴点周辺の局所的な画像情報をランドマークとしてデータベースへ登録しておき、ランドマークと入力画像中の自然特徴点を対応付けることでカメラ位置・姿勢の推定を行う。自然特徴点の三次元位置はSFM法によって自動で推定されるため、データベース構築の人的コストが低く、広域で複雑な屋外環境を対象とした場合にも比較的容易にデータベースを作成することができる。しかし、従来手法では、SFM法によって得られる自然特徴点の三次元位置のみの疎な奥行き情報を用いてランドマークの見え方の情報を生成しているため、ユーザの近くに存在するランドマークの見え方を補正することが困難であり、高精度な位置合わせを実現することが難しいという課題が残されていた。また、ランドマークの画像テンプレートから特徴量を抽出することで、視点位置の変化に頑健な対応付けを実現する手法 [11] が提案されているが、このような手法を用いた場合においても、ユーザの近くに存在するランドマークのように、少しの視点移動で見え方が大きく変化するランドマークに対して、正しい対応付けを行うことは難しい。

本研究では、従来我々が提案したランドマークデータベースを用いた手法 [5] を基礎とし、厳密な位置合わせが要求される場所におけるスポット的な位置合わせ精度の向上を目的として、全周レンジファインダにより取得した密な奥行き情報を用いることで、ランドマークの見え方の情報を補正し、従来手法と比較してより多くのランドマークを画像上の自然特徴点と対応付ける。なお、取得した奥行き情報には、オクルージョンや計測範囲外にある物体などのようにレーザが照射されなかった未計測部分が存在する。そのため、本研究では、オンライン処理において、ランドマークと入力画像中の自然特徴点の照合処理において、これらの未計測領域をマスクし、類似度を算出する際に除外する。

### 3. 局所的な三次元形状を考慮したランドマークデータベースの構築

本節では、オフラインでのランドマークデータベースの構築処理 (A) について述べる。本研究では、ランドマークの見え方の情報を補正するために、全周レンジファインダによって取得される密な奥行き情報を用いる。ランドマークデータベースの構築処理では、まず、全方位カメラと全周レンジファインダを用いて奥行き情報とテクスチャ情報の取得を行う。次に、これらの情報を用いてランドマーク情報を生成する。以下では、各処理について詳しく述べる。

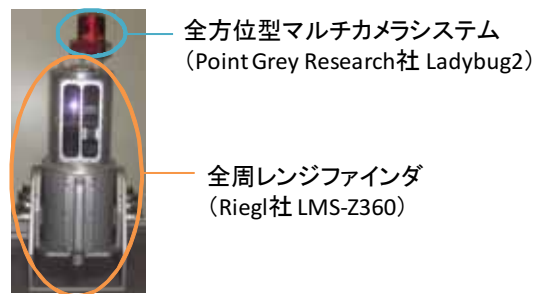


図 3 計測システム



図 4 ランドマークデータベースの構成要素

#### 3.1 奥行き情報とテクスチャ情報の取得

本研究では、まず、全方位カメラと全周レンジファインダを用いて、利用環境のレンジデータおよびテクスチャ情報を取得する。データの取得を行う際、図 3 に示すように、全方位カメラと全周レンジファインダの幾何学的な関係は事前にキャリブレーションを行い固定しておく。取得した三次元形状情報には、空領域などの未計測部分が含まれており、これらの領域をパターンの照合時に単純に除外してしまうと、空と地上との境界部分に存在するランドマークにおいてアパーチャ問題が生じる。しかし、これらのランドマークは、カメラの姿勢を決定するために重要である。本研究では、アパーチャ問題を回避するために、空領域には奥行き情報として無限遠を設定する。具体的には、取得した全方位奥行き画像上で、奥行き情報が設定されていない領域の内、最も大きな領域を空領域として検出する。

#### 3.2 ランドマーク情報の生成

本研究で用いるランドマークデータベースには図 4 に示すように、(a) 自然特徴点の三次元位置、(b) 撮影地点ごとの情報が保持される。撮影地点ごとの情報は、(b-1) 多重スケールの画像テンプレート、(b-2) テンプレート作成時の視点位置から成る。以下ではそれぞれの情報の取得方法について述べる。

(a) ランドマークの三次元位置：4 節で述べるオンラインでのカメラ位置・姿勢推定では、ランドマークの三次元位置と画像上の二次元座標を対応付けることによりカメラの位置・姿勢を推定するため、ランドマークの三次

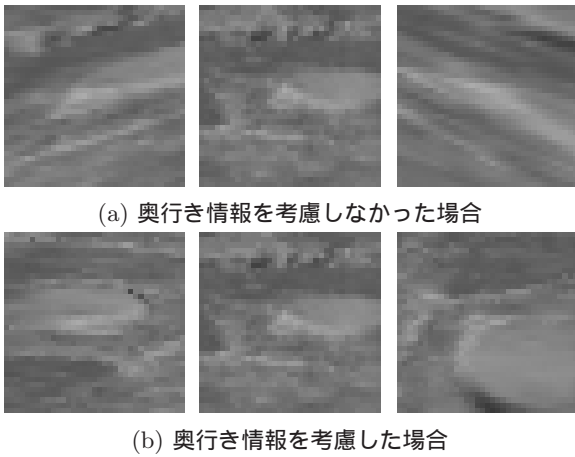


図 5 ランドマークの画像テンプレートの補正例

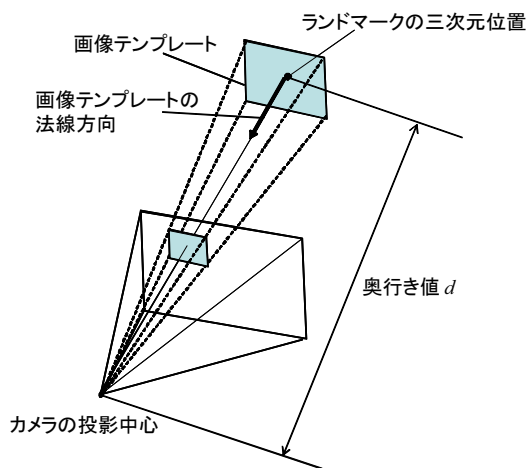


図 6 画像テンプレートの作成

元位置情報が必要となる．本研究では，まず，取得した全方位画像より Harris オペレータ [12] を用いて自然特徴点を検出する．次に，全周レンジファインダによって取得したレンジデータを用いて，自然特徴点の三次元位置を決定し，これらの自然特徴点をランドマークとしてデータベースへ登録する．

(b) 撮影地点ごとの情報の取得：撮影地点の違いによるランドマークの見え方の変化に対応するため，地面を奥行き情報・テクスチャ情報の取得位置を中心とした格子状に分割し，各格子点上から見たランドマークの画像テンプレートを生成する．図 5(a) に，従来の SFM 法に基づく手法 [5] によって生成されたランドマークの画像テンプレートを示す．左側から，データ取得位置からランドマークに対して右に 5 m 移動した場合，データの取得位置，データ取得位置からランドマークの方へ 5 m 移動した場合である．従来手法では，SFM 法によって疎な奥行き情報しか得られないため，図 6 に示すように，世界座標系において，カメラの投影中心とランドマークの三次元位置を結ぶ直線に対して垂直な面を仮定し，画像テンプレート中の全ての画素に対して同一の奥行き値  $d$  を設定することで，テンプレートを作成していた．そのた

め，図 5(a) のように，ユーザの位置に近いランドマークの画像テンプレートは大きく歪んでしまうという問題がある．

本研究では，全周レンジファインダによって計測されたレンジデータを用いて，ランドマークの画像テンプレートを生成する．具体的には，まず，画像テンプレートの画素  $i$  の奥行き値  $d_i$  を，取得したレンジデータより算出する．次に，算出した奥行き値  $d_i$  を用いて，全方位画像を投影することで，画像テンプレートの各画素に対する輝度値を決定する．ただし，画像テンプレートの生成時点において，オクルージョンが生じている領域に関しては，オンラインでの照合処理の際に除外するためにマスク領域とする．図 5(b) に，提案手法によって生成された画像テンプレートを示す．提案手法では，密な奥行き情報を用いることで，適切な画像テンプレートが生成できている．

#### 4. 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

本節ではオンラインでのカメラ位置・姿勢推定処理 (B) について述べる．本研究では，図 2 に示したように，まず初期フレームでのカメラ位置・姿勢を取得し (B-1)，続いて逐次的なカメラ位置・姿勢推定処理 (B-2)，(B-3) を繰り返す．初期フレームのカメラ位置・姿勢はランドマークデータベースを用いた静止画像からのカメラ位置・姿勢推定手法 [13] によって自動で取得する (B-1)．以下では，処理 (B-2)，(B-3) について詳しく述べる．

##### 4.1 ランドマークと自然特徴点の対応付け

ここでは，データベース中のランドマークと入力画像中の自然特徴点を対応付ける．ランドマークと自然特徴点の対応付け処理は，フレーム間でのランドマークの追跡による対応付け処理とデータベース中の画像テンプレートとの照合による対応付け処理とに分かれており，データベース中の画像テンプレートとの照合の際に，マスク領域を除外して類似度を算出する点を除いて手法 [5] と同一の手順に従う．以下では，それぞれの対応付け処理について述べる．

フレーム間でのランドマークの追跡による対応付け：ここでは，入力画像中のランドマークを追跡することにより，現フレームの暫定的なカメラ位置・姿勢を推定する．暫定的なカメラ位置・姿勢の推定では，まず，前のフレームで自然特徴点と対応付けられ，誤対応として排除されずにカメラ位置・姿勢の推定に用いられたランドマークを選択し，現フレームにおける対応点を探索する．ランドマークの対応点の探索において，連続フレーム間ではパターンの変形や明るさの変化は微小であることから，ランドマークの前フレームの画像上の位置を中心とする一定のウィンドウ内に存在する自然特徴点を対象として SSD (Sum of Squared Differences) を評価尺度とし

たテンプレートマッチングによりランドマークの追跡を行う。

次に、追跡した自然特徴点を用いて現フレームの暫定的なカメラ位置・姿勢を推定する。カメラ位置・姿勢の推定では、まず、LMedS 基準 [14] を用いて誤対応を排除する。次に、正しい対応関係を用いて、カメラ位置・姿勢の推定を行い、再投影誤差を最小化することによって現フレームの暫定的なカメラパラメータを推定する。データベース中の画像テンプレートとの照合による対応付け：まず、推定された暫定的なカメラ位置と最も近いランドマークの撮影位置に登録されている画像テンプレートの内、入力画像の画角内に存在するものをデータベース中より選択する。次に、暫定的なカメラパラメータを用いて、選択されたランドマークを入力画像上へ投影する。最後に、投影したランドマークの画像上の位置を中心とする一定ウィンドウ内の全ての自然特徴点周辺の画像パターンとランドマークの画像テンプレートを照合する。ここでは、オフラインでのデータベース構築時とオンラインでのカメラ位置・姿勢推定時における明るさの変化に対応するために正規化相互相関法により類似度の算出を行う。ただし、本研究では、ランドマーク情報を生成する際にマスクされた領域以外の領域を用いて相関値を算出し、相関値が最大となる自然特徴点をランドマークと対応付ける。

#### 4.2 誤対応の排除とカメラ位置・姿勢の推定

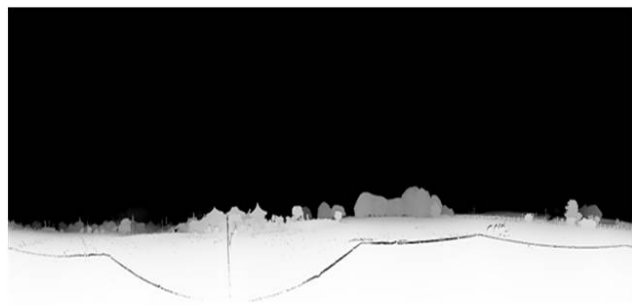
ランドマークと対応付けられた自然特徴点を用いて、現フレームのカメラ位置・姿勢を推定する。カメラ位置・姿勢の推定では、まず、LMedS 基準 [14] を用いて誤対応を排除する。次に、正しい対応関係を用いて、カメラ位置・姿勢の推定を行い、再投影誤差を最小化することによって現フレームのカメラ位置・姿勢を推定する。

### 5. 実 験

提案手法の有効性を示すため、屋外環境において実際にランドマークデータベースを構築し、実験を行った。ここでは、まず、ランドマーク周辺の局所形状を考慮することによる画像テンプレート補正効果について検証する。次に、従来手法 [5] と提案手法のカメラ位置・姿勢推定精度の比較を行った。本実験では、全方位マルチカメラシステム (Point Grey Research 社 Ladybug2) および全周レンジファインダ (Riegl 社 LMS-Z360) を用いて、屋外環境においてデータベースの構築を行った。全方位マルチカメラシステムは、合計 6 つのカメラユニットから構成され、各カメラユニットはそれぞれ  $768 \times 1024$  の解像度の画像を撮影した。また、全周レンジファインダのレーザの有効距離を 150m、データの取得範囲を水平 360 度・垂直 90 度、解像度を  $4500 \times 2800$  に設定した。図 7 にデータベース構築に用いた全方位画像とそれに対応する奥行き画像を示す。ここで、図 7(b) に示す全



(a) 全方位画像



(b) 全方位奥行き画像

図 7 取得した全方位データ

位奥行き画像中に未計測領域が存在するが、これは、全方位カメラと全周レンジファインダの計測位置が異なることによって視差が生じるためである。本研究では、このような領域は未計測領域として扱い、画像テンプレート作成時にマスク領域とする。データベース構築処理では、全方位データの取得位置を中心とする水平方向  $10m \times 10m$  の範囲を 1m 間隔の格子に分割し、各格子点上でランドマーク情報の生成を行った。また、従来手法とカメラ位置・姿勢推定精度の比較を行うために、SFM 法に基づくランドマークデータベースの構築も行った。データベースに登録されたランドマーク数は、提案手法では約 3500 個、従来手法では約 8800 個であった。本実験では、ビデオカメラ (SONY DSR-PD-150) を用いて撮影した動画像 250 フレーム (解像度  $720 \times 480$  画素、プログレッシブスキャン、15fps) に対してカメラの位置・姿勢推定を行った。また、提案手法、従来手法ともにカメラの内部パラメータはあらかじめ Tsai の手法 [15] によって校正し、初期フレームのカメラ位置・姿勢は画像上で自然特徴点の三次元位置を手動で対応付けることで与えた。

#### 5.1 画像テンプレート補正効果の検証

ここでは、従来手法および提案手法の画像テンプレート補正効果について検証する。本実験では、図 5 に示すような提案手法および従来手法を用いて全方位画像から生成したランドマークの画像テンプレートを入力画像上のランドマーク周辺の画像パターンと正規化相互相関法によって比較することで、提案手法によるパターンの補正効果を検証する。ここでは、画像テンプレートの補正

表 1 相関値の比較

	提案手法	従来手法 [5]
平均	0.63	0.47
標準偏差	0.039	0.052



(a) 従来手法 [5]



(b) 提案手法

図 8 対応づいたランドマークの画像上の位置

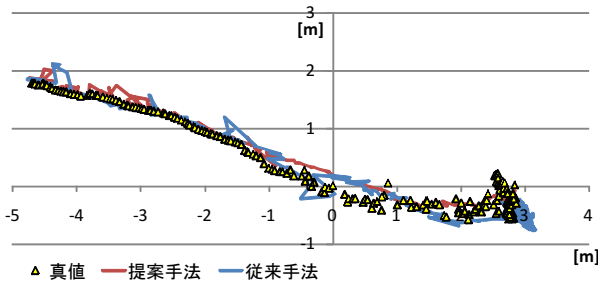


図 9 推定されたカメラパスの比較

に必要な入力画像の撮影位置を入力画像上で自然特徴点の三次元位置を手動で対応付け、PnP問題を解くことで算出した。

ランドマーク 30 個の画像テンプレートに対して算出した正規化相互相関値の平均と分散を表 1 に示す。提案手法によって奥行き情報を考慮して作成された画像テンプレートの相関値の平均値 (0.63) が奥行き情報を考慮しない従来手法による相関値の平均値 (0.47) よりも高いことから、提案手法は従来手法よりも入力画像上のランドマーク周辺の画像パターンに近い画像テンプレートを生成できていることが確認できる。これは、ランドマーク周辺の局所形状を考慮することで、従来手法よりも適切に画像テンプレートの補正が行われたためだと考えられる。

## 5.2 カメラ位置・姿勢推定精度の比較

ここでは、提案手法と SFM 法に基づく従来手法によって推定されるカメラ位置・姿勢推定精度を比較した。図 8 に、カメラ位置・姿勢の推定に利用されたランドマークの画像上の位置を示す。従来手法では、地面に存在するランドマークが全く用いられていないが、提案手法を

表 2 推定精度の比較

	提案手法	従来手法 [5]
平均位置誤差 (mm)	231	342
位置誤差の標準偏差 (mm)	107	164
光軸方向の平均角度誤差 (degree)	1.11	1.41
光軸方向の角度誤差の標準偏差 (degree)	0.52	0.46

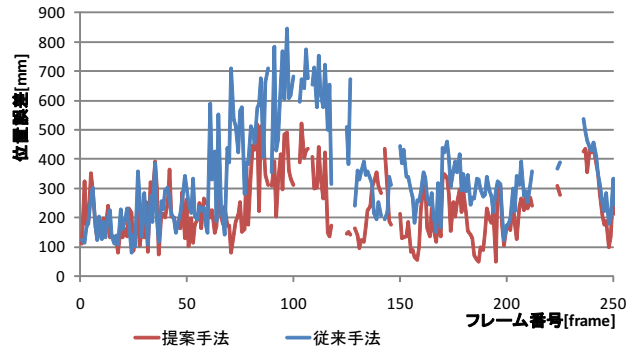


図 10 各フレーム毎の位置誤差

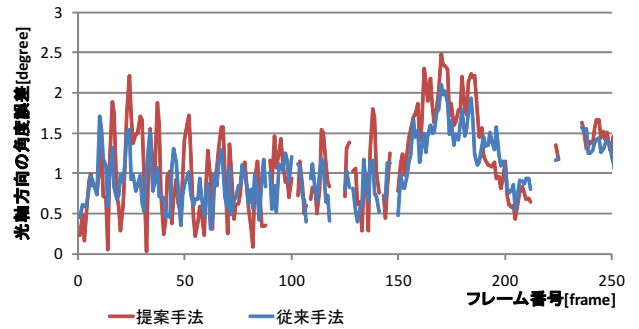


図 11 各フレーム毎の光軸方向の角度誤差

用いた場合にはこれらのランドマークが推定に用いられている。これは、提案手法において、密な奥行き情報を用いて画像テンプレートを補正することで、ランドマークと自然特徴点が正しく対応づいた結果によると考えられる。

図 9 に、推定されたカメラパスを示す。図中の三角の印は、各フレームのカメラ位置の真値を示す。真値は、各フレームの画像上で自然特徴点の三次元位置を手動で対応付け、PnP問題を解くことで算出した。ただし、真値作成の際に、三次元位置を与えた特徴点の画像上の再投影誤差が平均 1.5 画素以上となったフレームについては真値が信頼できないため評価対象にしなかった。提案手法で推定されたカメラパスは従来手法より安定しており、かつ、提案手法で推定されたカメラ位置は従来手法よりも真値に近づいていることが確認できる。推定されたカメラ位置・姿勢の精度を表 2 に示す。有意水準を 5% と設定した t 検定によって、提案手法と従来手法の平均位置誤差の間には有意な差が見られ、カメラ位置推定精度の向上が確認できる。また、各フレームでの位置



図 12 AR 観光への適用例

誤差，光軸方向の角度誤差の大きさを図 10，図 11 に示す．全てのフレームにおいて，提案手法では従来手法と比べカメラ位置の推定精度が同等以上となっていることが確認できる．これは，カメラの位置を決定するために重要となるユーザの近くに存在するランドマークが正しく対応付いたためであると考えられる．

図 12 に，拡張現実感技術の応用例として，提案手法を AR 観光のアプリケーションに適用した例を示す．ここでは，寺院が存在した跡地に，CG によって復元された建物を重畳表示している．重畳表示の結果より，ユーザの近くに存在する仮想物体も幾何学的に正しく描画されていることを確認した．

## 6. ま と め

本稿では，拡張現実感における幾何的位置合わせの精度を向上させることを目的として，全周レンジファインダによって取得される密な奥行き情報を用いてランドマークの画像テンプレートを補正する手法を提案した．生成された画像テンプレートを用いることで，ユーザの近くに存在するランドマークを正しく対応付けることができ，これによって，カメラ位置・姿勢推定精度が向上することを確認した．

今後の課題として，SFM 法に基づく手法との併用によって，より広域な環境へ対応することやジャイロなどのセンサを併用することによるロバスト性の向上などが挙げられる．

謝辞 本研究の一部は，科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業 (CREST) 「デジタルメディア作品の制作を支援する基盤技術」プログラム，総務省・戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) の支援による．

## 文 献

- [1] D. Wagner and D. Schmalstieg: "First steps towards handheld augmented reality," Proc. Int. Symp. on Wearable Computers, pp. 21–23, 2003.
- [2] T. Miyashita, P. Meier, T. Tachikawa, S. Orlic, T. Eble, V. Scholz, A. Gapel, O. Gerl, S. Arnaudov and S. Lieberknecht: "An augmented reality museum guide," Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented

- Reality, pp. 103–106, 2008.
- [3] P. Daehne and J. Karigiannis: "Archeoguide: System architecture of a mobile outdoor augmented reality system," Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp. 263–264, 2002.
- [4] H. Kaufmann and A. Dunser: "Summary of usability evaluations of an educational augmented reality application," Proc. Int. Conf. on Human-Computer Interaction, pp. 22–27, 2007.
- [5] 武富貴史, 佐藤智和, 横矢直和: "拡張現実感のための優先度情報を付加した自然特徴点ランドマークデータベースを用いた実時間カメラ位置・姿勢推定", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J92-D, No. 8, pp. 1440–1451, 2009.
- [6] A. Davison, Y. G. Cid and N. Kita: "Real-time 3D slam with wide-angle vision," Proc. IFAC Symp. on Intelligent Autonomous Vehicles, 2004.
- [7] G. Bleser, H. Wuest and D. Stricker: "Online camera pose estimation in partially known and dynamic scenes," Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp. 56–65, 2006.
- [8] G. Klein and D. Murray: "Parallel tracking and mapping for small AR workspaces," Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp. 225–234, 2007.
- [9] T. Drummond and R. Cipolla: "Real-time visual tracking of complex structures," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 27, pp. 932–946, 2002.
- [10] G. Reitmayr and T. Drummond: "Going Out: Robust model-based tracking for outdoor augmented reality," Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp. 109–118, 2006.
- [11] C. Wu, B. Clipp, X. Li, J. Frahm and M. Pollefeys: "3D model matching with viewpoint-invariant patches (VIP)," Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008.
- [12] C. Harris and M. Stephens: "A combined corner and edge detector," Proc. Alvey Vision Conf., pp. 147–151, 1988.
- [13] 薄充孝, 中川知香, 佐藤智和, 横矢直和: "ランドマークデータベースに基づく静止画像からのカメラ位置・姿勢推定", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 161–170, 2008.
- [14] P. J. Rousseeuw: "Least median of squares regression," J. of the American Statistical Association, Vol. 79, pp. 871–880, 1984.
- [15] R. Y. Tsai: "An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision," Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 364–374, 1986.