

画像特徴点によるランドマークデータベースを用いた 動画像からのカメラ位置・姿勢推定

大江 統子[†] 佐藤 智和[†] 横矢 直和[†]

[†] 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: †{motoko-o,tomoka-s,yokoya}@is.naist.jp

あらまし 近年、動画像からのカメラの位置・姿勢推定手法が盛んに研究されており、拡張現実感やロボットナビゲーションに応用されている。これらの分野では、カメラの絶対位置・姿勢が必要とされるため、GPS や磁気センサを用いる手法や、カメラからの入力画像を用いる手法などが提案されている。しかし、センサ類を用いる手法ではカメラとセンサの同期をとることが難しい、利用可能な環境が制限されるなどの問題がある。また、カメラからの入力画像を用いる手法には、広範囲に人工的なランドマークを多数配置しなければカメラ位置の推定誤差が累積するという問題や、広範囲な屋外環境内での利用は難しいという問題がある。本研究では事前に撮影された動画像から検出された自然特徴点をランドマークとして用いることで、センサ類や人工的なマーカを必要としない、広範囲な環境におけるカメラ位置・姿勢推定手法を提案する。

キーワード カメラ位置・姿勢推定, 自然特徴点, ランドマークデータベース, 拡張現実感

Camera Position and Posture Estimation from Image Sequence Using Feature Landmark Database

Motoko OE[†], Tomokazu SATO[†], and Naokazu YOKOYA[†]

[†] Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

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

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

Abstract Camera position and posture estimation from image sequence can be applied to the fields of augmented reality and robot navigation. In these fields, to obtain absolute position and posture of the camera, methods using GPS and magnetic sensors, and methods using input images from the camera have been investigated. However, methods using sensors are difficult to synchronize the camera and sensors accurately, and usable environments are limited according to selection of sensors. On the other hand, methods using input images of a camera needs to allocate many artificial markers otherwise an estimation error will accumulate. Thus, it is difficult to use such methods in large and natural environments. In this research, we propose a camera position and posture estimation method for large environments, which does not require sensors and artificial markers by detecting natural feature points from image sequence taken beforehand and using them as landmarks.

Key words camera position and posture estimation, natural features, landmark database, augmented reality

1. はじめに

動画像を用いたカメラ位置・姿勢推定は拡張現実感やロボットナビゲーションなどの分野に応用されている。これらの分野では、カメラの絶対位置・姿勢が必要とされ、GPS や磁気センサを用いる手法 [1] [2] や、カメラからの入力画像を用いる手

法 [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] などが研究されている。

センサ類を用いる手法では、一般的に GPS やジャイロセンサが用いられており、広範囲な屋外で利用可能であるが、カメラとセンサの同期をとることが難しいという問題がある。また、センサの組み合わせによって利用できる環境が大きく異なるために、様々な環境でカメラ位置・姿勢を推定するためには、多

数のセンサを組み合わせなければならず、システムが複雑になるという問題がある。一方、カメラからの入力画像を用いる手法としては、ARToolkit [3] などの人工的なマーカを用いる手法 [4] [7] や入力画像上の自然特徴点を用いる手法 [5]、それらの手法のハイブリッド [6] などが従来研究されてきた。これらの手法では、マーカに基づいて位置・姿勢の推定を行うため、人工的なマーカを広範囲に多数配置する必要があり、マーカの設置に多くの人的コストがかかるという問題や、マーカによって景観が損なわれるという問題がある。

このような問題を解決するために、近年、物体の三次元モデルを人工的なマーカの代わりに用いる手法 [8] [9] が提案され、注目されている。Lepetit らは対象とする物体や環境の三次元モデルと特徴点情報を用いて三次元モデルと入力画像の対応関係を求めることで、カメラ位置・姿勢を推定する手法を提案している [8]。この手法では、三次元モデルと前フレームのカメラ位置・姿勢情報を用いることで、物体の見え方の変化やオクルージョンにロバストなカメラ位置・姿勢推定が可能であるが、対象となる物体の三次元モデルを事前に人手で作成しておく必要があるため、自然物を対象とした場合や広範囲な環境での利用は難しいという問題がある。また、Gordon らは小物体を撮影した複数枚の画像からセルフキャリブレーションによって特徴点の三次元復元を行い、スケールや回転に不変な SIFT 特徴量を用いて対応付けを行う手法を提案している [9]。この手法では特別な事前知識を必要としないが、広範囲な環境への適用を考えた場合、三次元復元の推定誤差が累積するという問題があり、小物体、小領域への適用にとどまっている。

本研究では事前に撮影された全方位動画画像から検出された自然特徴点をランドマークとして用いることで、センサ類や人工的なマーカを必要としない、広範囲な環境におけるカメラ位置・姿勢推定手法を提案する。提案手法は図 1 に示すように、オフライン処理によるランドマークデータベースの構築 (ステージ 1)、とランドマークデータベースを用いたカメラ位置・姿勢の逐次推定 (ステージ 2)、の二つのステージによって構成される。ステージ 1 では、事前に環境内を全方位動画画像として撮影し、環境の粗な三次元復元を行う。そして、動画画像から検出された自然特徴点の画像テンプレートと、三次元復元によって得られる自然特徴点の三次元位置を、ランドマーク情報としてランドマークデータベースに登録する。ステージ 2 では、これらのランドマークと入力画像上の自然特徴点との対応付けを行うことで、累積誤差を含まないカメラ位置・姿勢を逐次的に推定する。以降、2 章では、オフライン処理で作成するランドマークデータベースの構成要素とランドマーク情報の獲得方法について述べる。3 章では、2 章で構築したランドマークデータベースを用いた逐次的なカメラ位置・姿勢推定手法について述べる。4 章では、実際に全方位カメラによって撮影された屋外全方位動画画像を用いた実験について報告する。最後に、5 章でまとめと今後の課題について述べる。

2. ランドマークデータベースの構築

本章では、次章で述べるカメラ位置・姿勢の推定に必要なラ

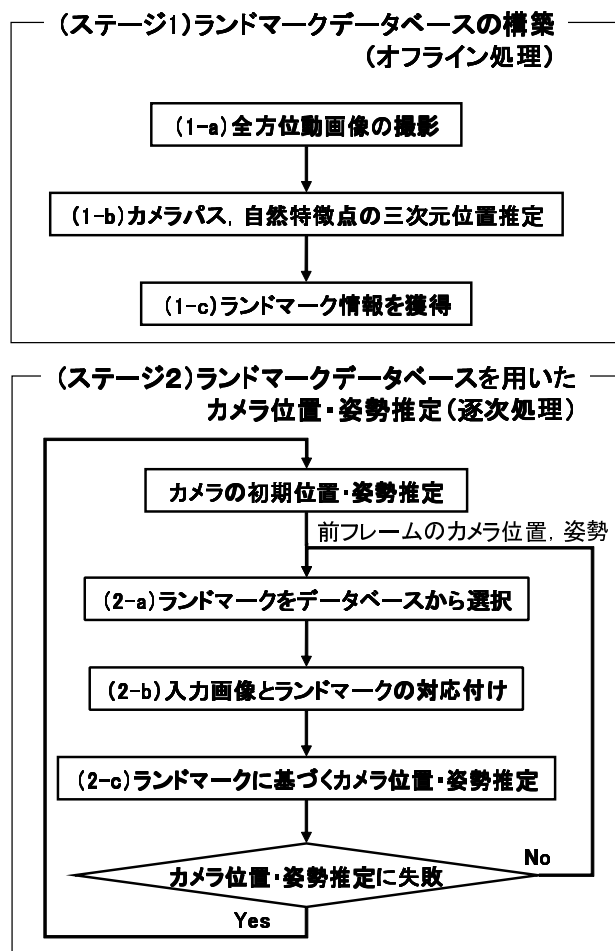


図 1 提案手法のフローチャート

ンドマークデータベースの構成方法 (ステージ 1) について詳述する。本手法では、全方位カメラで撮影された全方位動画画像から検出された自然特徴点をランドマークとして用いる。

図 1 に示すように、本ステージでは、まず環境を全方位動画画像として移動しながら撮影する (1-a)。次に、全方位動画画像の三次元復元を行い、自然特徴点の三次元位置と動画画像のカメラパスを推定することで、自然特徴点の三次元位置、自然特徴点撮影時のカメラ位置・姿勢情報を取得する (1-b)。最後に、撮影された全方位画像とそのカメラ位置・姿勢、自然特徴点のランドマークの三次元位置に基づき、ランドマークの情報を自動的に作成し、ランドマークデータベースを構築する (1-c)。以下では、まずランドマークデータベースの構成要素について述べ、次に各ランドマークの構成要素作成のための手順について述べる。

2.1 ランドマークデータベースの構成要素

ランドマークデータベースは図 2 のように、複数のランドマークによって構成される。これらのランドマークは次章で述べるカメラ位置・姿勢推定処理において、入力画像中の特徴点と対応付けられ、カメラ位置・姿勢の推定 (ステージ 2) で用いられる。それぞれのランドマークに対して、1 個の (1) ランドマークの三次元位置、複数の (2) 撮影地点ごとの情報、から構成される。撮影地点ごとの情報は、(A) 撮影時の全方位カメラ

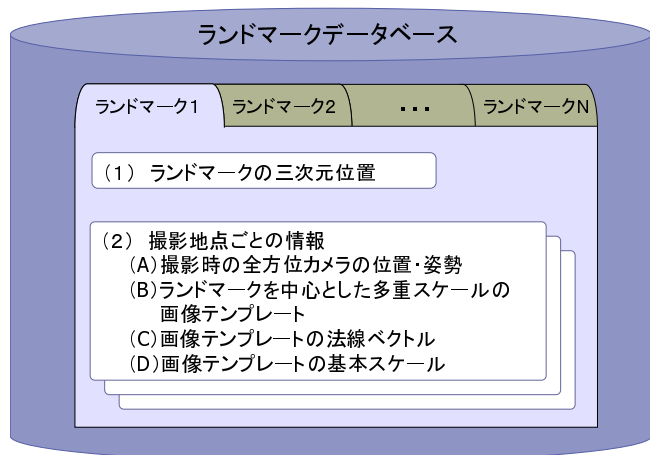


図 2 ランドマークデータベースの構成要素

の位置・姿勢, (B) ランドマークを中心とした多重スケールの画像テンプレート, (C) 画像テンプレートの法線ベクトル, (D) 画像テンプレートの基本スケールから成る. 以下にそれぞれの要素について詳述する.

(1) ランドマークの三次元位置

本研究ではステージ 2 においてランドマークの三次元位置と画像上の二次元座標の対応からカメラパラメータ推定を行うため, ランドマークの三次元位置が必要となる. ランドマークの三次元位置は, 次節で述べる環境の三次元復元によって得られるものであり, カメラパス推定 (1-b) の際に使用する環境に固定された世界座標系で保持されている.

(2) 撮影地点ごとの情報

ランドマークと入力画像を対応付けるために必要な情報である. ランドマークの見え方は撮影地点によって異なるため, 単一方向から撮影された画像のみでは高精度な対応付けは難しい. そこで, 見え方の変化に対応するため, 各ランドマークに対して複数の撮影地点ごとの情報を保持する.

(A) 撮影時の全方位カメラの位置・姿勢: 入力画像と対応付けるランドマークを選択する際に用いる. 全方位カメラの位置は世界座標系で保持されている.

(B) ランドマークを中心とした画像テンプレート: 図 3 のように, 世界座標系において撮影カメラ位置からランドマークへのベクトルに対して垂直な面に撮影画像を投影したものであり, 撮影カメラ姿勢やレンズ歪みの影響を受けない. 画像テンプレートはステージ 2 において入力画像の中からのランドマークの探索に用いられる. 本研究では, 図 4 のように, 各撮影地点につきスケールの異なる画像テンプレートを保持し, スケールが異なっても画像テンプレートの画素数は常に一定とする.

(C) 画像テンプレートの法線ベクトル: 画像テンプレートの面の向きを表す (図 3). 後述する画像テンプレートの選択や, 入力画像の画像パターン作成に用いる.

(D) 画像テンプレートの基本スケール: (B) で述べた多重スケールの画像テンプレートの中で, 最小スケールの画像テンプレートの空間中でのサイズを表す. 本研究では, 画像テンプレートの解像度が撮影画像の解像度とほぼ等しくなるように基本ス

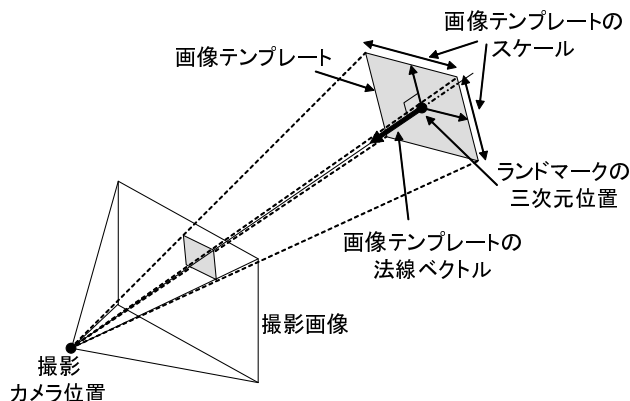


図 3 ランドマークとその画像テンプレート



図 4 スケールの異なる画像テンプレート

ケールを決定する.

2.2 全方位動画からの三次元復元によるランドマーク情報の獲得

本節では, 全方位動画からの三次元復元を利用して, ランドマークデータベースを作成する方法について述べる. ここでは, まず佐藤らの手法 [10] を用いて三次元位置が既知の少数の基準点と Harris オペレータ [11] によって検出された多数の自然特徴点を全方位動画の中で自動追跡し, カメラの動きパラメータを推定する. この手法では, まず基準点の三次元位置をトータルステーションと呼ばれる三次元測量機材を用いて計測し, 少数のキーフレームの画像上で基準点を指定する. 次に, 全方位動画中の自然特徴点をフレーム毎に自動追跡し, 全体での最適化処理を行うことで, カメラパラメータの累積的な推定誤差を最小化する. これにより, 複雑で広範囲な環境を撮影した場合でも, 全方位動画のカメラパスと自然特徴点の三次元位置を基準マーカによる絶対座標系で求めることができる. このようにして三次元位置が推定された自然特徴点をランドマークとして, ランドマークデータベースに登録する.

佐藤らの手法により推定された全方位動画のカメラパスと自然特徴点の三次元位置は, 前節で述べたランドマークの三次元位置 (1), 撮影時の全方位カメラの位置・姿勢情報 (A) として用いる. 次に, 画像テンプレートの法線ベクトル (C), 画像テンプレートの基本スケール (D) を決定し, それらを用いて画像テンプレート (B) を作成する.

画像テンプレートの法線ベクトル (C) はランドマークの三次元位置から撮影カメラ位置への向きのベクトルとする. 画像テンプレートの基本スケール (D) は基本スケールで作成された画

像テンプレートの解像度が撮影画像の解像度がほぼ等しくなるような値とする。画像テンプレート (B) は、法線ベクトルと基本スケールからランドマークを中心とした面を決定し、その面上に撮影画像を投影することで作成する。

3. 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

本章では、前章の手法によって事前に作成されたランドマークデータベースを用いたカメラ位置・姿勢推定手法について述べる。本手法のカメラ位置・姿勢推定処理の流れは先に示した図 1 の通りである。まず、入力画像の初期カメラ位置・姿勢を推定する。ただし、本稿では初期カメラ位置・姿勢は何らかの手法によって取得済みとする。次に、前章で作成されたデータベースからランドマークを選択する (図 1 中の 2-a)。ランドマークと入力画像の対応付けでは、まず、入力画像から自然特徴点の検出を行い、検出された自然特徴点とランドマークの画像テンプレートとのマッチングを行うことによって入力画像とランドマークの対応付けを行う (2-b)。最後に、それらの対応関係を用いて PnP 問題を解く事によってカメラ位置・姿勢推定を行う (2-c)。カメラ位置・姿勢推定に失敗していればカメラの初期位置・姿勢推定から、成功していればランドマークの選択から処理を繰り返す。以下、(2-a)~(2-c) について述べる。

3.1 ランドマークの選択 (処理 (2-a))

ランドマークデータベースに登録されている多数のランドマークから、入力画像との対応付けに用いるランドマークを選択する。また、ランドマークの見え方の変化に対応するため、複数の画像テンプレートの中から入力画像と見え方が最も近いものを選択し、マッチングに使用する。本手法では、対応付けに用いるランドマークとその画像テンプレートの組を以下の 3 つの条件によって選択する。ただし、ここでは、現フレームの入力画像のカメラ位置・姿勢は未知であるため、前フレームのカメラ位置・姿勢を代わりに用いる。

(条件 1) ランドマークの撮影時のカメラ位置と入力画像の撮影カメラ位置の距離が閾値以下：ランドマークの撮影位置と前フレームのカメラ位置間の距離を算出し、距離が閾値以下のランドマークを選択する。

(条件 2) ランドマークが入力画像の視野範囲内に存在する：選択したランドマークの三次元位置を前フレームのカメラ位置・姿勢を用いて撮像面に投影する。これにより、入力画像面上に投影されたランドマークのみを選択する。

(条件 3) ランドマークの画像テンプレートの法線ベクトルとランドマークから入力画像の撮影カメラ位置までのベクトルの成す角が閾値以下：ランドマークの三次元位置と前フレームのカメラ位置を結ぶ直線と画像テンプレートの法線ベクトルとのなす角 θ が最小のものを選択する。この際、直線と法線ベクトルのなす角 θ が閾値以上であれば、そのランドマークを用いない。

上記の処理を、ランドマークが一定数選択されるまで、条件 1 の閾値を変化させながら繰り返し行う。

3.2 入力画像とランドマークの対応付け (処理 (2-b))

本節では、データベースから選択されたランドマークを入力

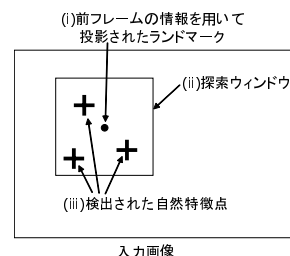


図 5 ランドマークと対応付ける自然特徴点の検出

画像内で探索し、対応付ける手法について述べる。まず、ランドマークの三次元位置を前フレームのカメラ位置・姿勢を用いて入力画像上に投影し、その周辺で検出された自然特徴点を、投影したランドマークと対応付ける候補とする。次に、検出された自然特徴点を中心とした画像パターンと、ランドマークの画像テンプレートとのパターンマッチングを行うことで、前節で選択されたランドマークとの対応付けを行う。以下に、それぞれの処理手順を詳述する。

3.2.1 入力画像中の自然特徴点の検出

まず、前フレームのカメラ位置・姿勢を用いてランドマークの三次元位置を入力画像上に投影する (図 5(i))。投影された座標周辺にランドマークに対応する自然特徴点が存在すると仮定し、投影座標を中心とする一定サイズの探索ウィンドウ内 (ii) で Harris オペレータ [11] により自然特徴点を検出する (iii)。本手法では、特徴量が閾値以上、かつ極大値である点を自然特徴点として検出する。このようにして検出された自然特徴点をランドマークと対応付ける候補とする。

3.2.2 画像テンプレートとのマッチングによる対応付け

検出された自然特徴点をランドマークと対応付ける候補として、自然特徴点を中心とする画像パターンを作成する。それぞれの画像パターンはランドマークの画像テンプレートと同様に、自然特徴点を中心とした面上に入力画像を投影したものであり、前フレームのカメラ位置・姿勢、対応付けるランドマークの三次元位置、画像パターンの法線ベクトルとスケール情報を用いて作成する。作成する画像パターンのスケールは、対応付けるランドマークの画像テンプレートの基本スケールと同一のものと、その 2 倍、4 倍の多重スケールとする。このようにして作成した画像パターンとランドマークの画像テンプレートを、正規化相互相関法により比較し、最も相関の高い自然特徴点を選択する。ただし、入力画像上の自然特徴点がランドマークを投影した座標と同じ位置に検出されるとは限らないため、相関値が最大となる自然特徴点周辺の全画素を対応付け候補として再度相関を算出し、最終的に相関値が最も高かった点をランドマークと対応付ける。また、相関値が閾値以下の場合には対応付けは行わない。これにより、データベース内の自然特徴点の三次元座標と入力画像上の二次元座標を対応付けることができる。

3.3 ランドマークに基づくカメラ位置・姿勢推定 (処理 (2-c))

入力画像とランドマークの対応付けによって得られた二次元座標と三次元座標の対応関係を用いて PnP 問題を解くことで



図 6 全方位型マルチカメラシステム Ladybug と Ladybug で撮影された全方位画像

カメラ位置・姿勢推定を行う。まず、RANSAC [12] により誤対応を排除する。ここでは、対応付けられた三次元座標と二次元座標の組からランダムに 6 組以上を選択し、暫定的なカメラパラメータを推定する。次に、全ての組を用いて投影誤差を算出する。これらの処理を複数回繰り返し、投影誤差の中間値が最小となる暫定カメラパラメータを選択する。選択されたカメラパラメータによって各特徴点の投影誤差を評価し、閾値を超える結果を誤対応として削除する。最後に、正しい対応関係のみを用いてカメラ位置・姿勢推定を行い、再投影誤差が最小となるカメラパラメータ [10] を最終的な推定結果とする。

4. 実 験

入力画像の自然特徴点とデータベースとの対応付けによるカメラ位置・姿勢推定手法の有効性を検証するために、屋外環境を撮影し、実験を行った。

4.1 屋外環境における実験

まず、図 6 左に示す全方位型マルチカメラシステム (Point Grey Research 社 Ladybug) を用いて図 6 右に示すような屋外環境を複数の系列 (1250 フレーム × 6 台) として撮影した。次に、佐藤らの手法 [10] によってカメラパスと自然特徴点の三次元座標を推定し、ランドマークデータベースを構築した。ただし、データ量削減のため、三次元復元で得られた全フレームのデータに対し、10 フレームおきのデータを用いた。また、それぞれのランドマークにつき、撮影された地点ごとに 15×15 pixel の画像テンプレートを 3 つの多重スケールで作成した。本実験で得られたランドマークの数は約 12400 個であり、一つのランドマークにつき平均 8 ヶ所の異なる地点で撮影された画像テンプレートが登録された。推定された全方位動画のカメラパスと自然特徴点の三次元位置を図 7 に示す。

次に、ビデオカメラ (SONY DSR-PD150) を用いて 1100 フレームの単眼動画 (解像度 720×480 pixel, プログレッシブスキャン, 14.985fps) を撮影し、3 章で述べた手法を用いてカメラ位置・姿勢をフレーム毎に逐次推定した。ただし、本実験では初期フレームのカメラ位置・姿勢はあらかじめ既知とした。また、本実験においてデータベースから一度に選択するランドマークの数は最大 100 個、入力画像中の対応付け候補

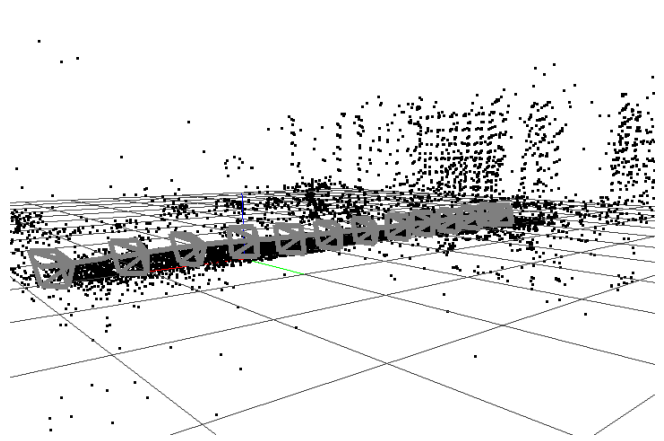


図 7 推定されたカメラパスと自然特徴点の三次元位置

の探索範囲は 120×60 pixel, RANSAC による繰り返し回数は 500 回とした。逐次推定の結果、1 フレームの処理時間は CPU Pentium4 3GHz, メモリ 1.5GB のマシンを用いて約 5 秒であった。また、740 フレーム目でカメラ位置・姿勢推定に失敗したため、そのフレームのカメラ位置・姿勢を手動で与えて続きのフレームのカメラ位置・姿勢推定を行った。

入力画像との対応付けに用いたランドマークの配置を図 8 に、推定されたカメラ位置・姿勢を用いて仮想物体を一定位置に重畳表示させた結果を図 9 に示す。図 9 から、CG で描かれた人物が入力画像と幾何学的に正しく合成されており、カメラ位置・姿勢の推定結果に大きな誤差が含まれていないことが分かる。ただし、類似パターンが多数存在する箇所においては、数 pixel 程度の細かな位置ずれが発生しており、改善が必要である。

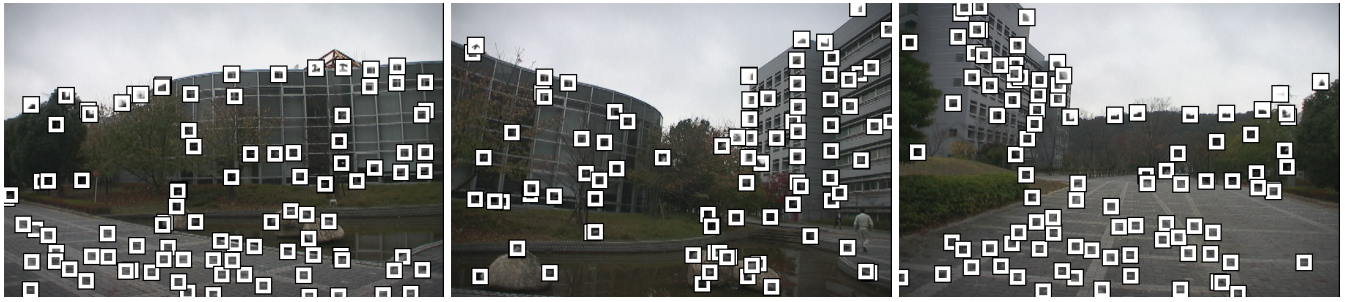
4.2 定量的な評価実験

次に、推定されたカメラ位置・姿勢を真値と比較することで推定精度を評価した。本実験では、環境内の特徴点をトータルステーションを用いて測定し、各フレームの画像上でそれらの特徴点の位置を手動で対応付け、PnP 問題を解くことでカメラパラメータの真値を 10 フレームおきに作成した。ただし、自然物が入力画像の大半を占めるなどの理由でトータルステーションによって得られる特徴点が少ないフレームや、手動で対応付けを行った結果による再投影誤差が 1.5 pixel 以上であるフレームに関しては評価対象にできなかった。

実験の結果、カメラの位置推定誤差は平均約 220mm, カメラの光軸角度の推定誤差は平均約 0.37 度であった。従って、今回用いたカメラではカメラから 14m 以上離れた地点に CG を重畳表示する場合であれば、投影誤差を 1 pixel 以内に収めることができる。また、図 10 に初期フレームから 1100 フレーム目までのカメラパラメータと真値を示す。図 10 から、推定されたカメラ位置・姿勢に累積的な推定誤差が生じていないことを確認した。

5. ま と め

本稿では自然特徴点ランドマークデータベースを事前に構築し、データベースと入力画像中の自然特徴点を対応付けることによりカメラ位置・姿勢をフレームごとに推定する手法を提案



(a)200 フレーム目

(b)400 フレーム目

(c)600 フレーム目

図 8 カメラ位置・姿勢推定に用いられたランドマーク



(d)200 フレーム目

(e)400 フレーム目

(f)600 フレーム目

図 9 カメラ位置・姿勢推定結果を用いた match move

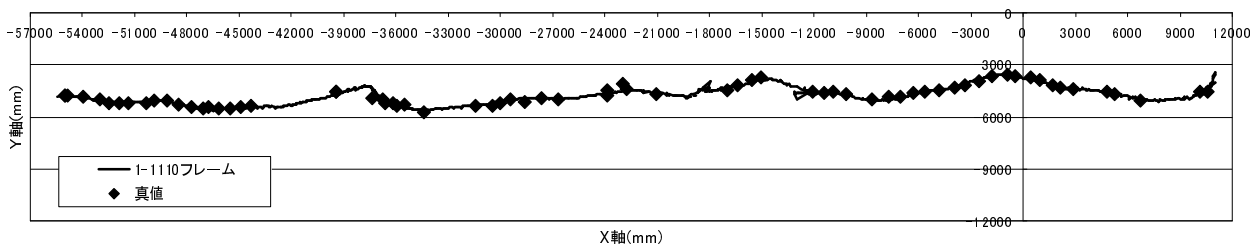


図 10 推定されたカメラパスと正解データ

した．実験では，実際にカメラ位置・姿勢推定を行い，CGを重畳表示することで，カメラ位置・姿勢の推定に大きな推定誤差が含まれていないことを確認した．今後の課題は，データベースと入力画像の自然特徴点の対応付け精度の向上，処理速度の向上による逐次推定のリアルタイム化などが挙げられる．また，推定結果の定量的評価が必要である．

文 献

- [1] A. Ronald, B. Hoff, H. N. III and R. Sarfaty: "A motion-stabilized outdoor augmented reality system," Proc. IEEE Virtual Reality, pp. 252-259, 1999.
- [2] T. Hollerer, S. Feiner and J. Pavlik: "Situated documentaries: Embedding multimedia presentations in the real world," Proc. Int. Symp. on Wearable Computers (ISWC'99), pp. 79-86, 1999.
- [3] H. Kato and H. Billinghurst: "Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system," Proc. Int. Workshop on Augmented Reality (IWAR'99), pp. 85-94, 1999.
- [4] 羽原, 町田, 小川, 竹村: "画像マーカを用いた屋内位置検出機構とその評価", 電子情報通信学会 技術研究報告, Vol. 102, No. 216, pp. 65-70, 2002.
- [5] U. Neumann and S. You: "Natural feature tracking for augmented-reality," IEEE Transactions on Multimedia, Vo. 1, No. 1, pp. 53-64, 1999.
- [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] L. Naimark and E. Foxlin: "Circular data matrix fiducial system and robust image processing for a wearable vision-inertial self-tracker," Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2002), pp. 27-36, 2002.
- [8] V. Lepetit, L. Vacchetti, D. Thalmann and P. Fua: "Fully automated and stable registration for augmented reality applications," Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2003), 2003.
- [9] I. Gordon and D. G. Lowe: "Scene modelling, recognition and tracking with invariant image features," Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2004), pp. 110-119, 2004.
- [10] T. Sato, S. Ikeda and N. Yokoya: "Extrinsic camera parameter recovery from multiple image sequences captured by an omni-directional multi-camera system," Proc. European Conf. on Computer Vision, Vol. 2, pp. 326-340, 2004.
- [11] C. Harris and M. Stephens: "A combined corner and edge detector," Proc. Alvey Vision Conf., pp. 147-151, 1988.
- [12] M. A. Fischler and R. C. Bolles: "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," Comm. of the ACM, Vol. 24, pp. 381-395, 1981.