

ランドマークデータベースと姿勢センサを用いた 高速な回転にロバストなカメラの位置・姿勢推定

松田 幸大[†] 池田 聖[†] 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: †{kodai-m,sei-i,tomoka-s,yokoya}@is.naist.jp

あらまし カメラの位置及び姿勢を推定する技術は、拡張現実感、ロボットナビゲーションなど様々な分野で応用が可能である。従来提案されている、環境の特徴点の三次元位置や画像テンプレートが登録されたランドマークデータベースを用いたカメラの位置及び姿勢の推定手法は、物理的なインフラの整備を必要とせず、カメラの絶対的な位置及び姿勢が得られるという特長がある。しかし、ランドマークデータベースを用いた手法では、入力画像中の特徴点と登録されたランドマークをテンプレートマッチングによって対応付けることで各フレームのカメラの位置及び姿勢を推定するため、カメラが高速な回転を伴う場合に誤対応が生じ、カメラの位置及び姿勢の推定誤差が増大する問題がある。本稿では、ランドマークデータベースと姿勢センサにより得られる角速度情報を併用したカメラの位置及び姿勢の推定手法を提案する。提案手法では、まず角速度情報を用いてデータベース中の多数のランドマークから推定に用いるランドマークを効果的に選択する。次に、データベース中の画像テンプレートに対してモーションブラーを再現することで、カメラが高速に回転する場合に生じるモーションブラーによる誤対応を防ぐ。

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

Robust Estimation of Position and Posture of Camera with High-speed Rotation Using Landmark Database and Inertial Sensor

Kodai MATSUDA[†], Sei IKEDA[†], Tomokazu SATO[†], and Naokazu YOKOYA[†]

[†] Nara Institute of Science and Technology,

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

E-mail: †{kodai-m,sei-i,tomoka-s,yokoya}@is.naist.jp

Abstract This paper describes a novel camera position and posture estimation method using an inertial sensor and feature landmark database which basically consists of three-dimensional positions of natural feature points (landmarks) and their image templates. This method is widely applicable to a number of fields such as robot navigation and augmented reality system for wearable computer users. In such fields, it is frequently required to estimate absolute position and posture of cameras for environment without using any physical infrastructures such as markers. A conventional method using feature landmark database has already been satisfying this requirement. However, the estimation error is increased due to miss tracking of image features caused by high-speed rotation of camera. To solve this problem, in the proposed method, the landmarks are first selected from the database by using angular velocity acquired from the inertial sensor. The motion blur is then reproduced on the image templates of landmarks, and blurred templates are used for matching with those in the input images. In experiments, camera position and posture have been successfully estimated using an inertial sensor in real environments.

Key words camera position and posture estimation, landmark database, inertial sensor, augmented reality

1. はじめに

カメラの位置及び姿勢を実時間で推定する技術は、拡張現実感 [1], [2] やロボットナビゲーション [3], [4] など、様々な分野への応用が可能である。特に、屋外などの広範囲な環境を対象としたシステムでは、カメラの絶対的な位置及び姿勢の取得が必要である。従来から、赤外線マーカなどのセンサ [5] ~ [8], 画像マーカ [9] ~ [12] などの物理的なインフラを用いた手法、予め作成された環境のモデルを用いた動画像処理による手法 [13] ~ [16] など、多くの手法が提案されてきた。物理的なインフラを用いた手法 [5] ~ [12] では、センサからの信号やマーカのパターンから個々を識別することが容易であるため、時系列的な情報なしでカメラの位置及び姿勢の推定が可能であり、高速な動きに対してロバストな推定が実現できる。しかし、これらの手法では、環境中に物理的なインフラを整備する必要があり、自然環境などインフラの設置が困難な環境においては利用できない。一方、環境のモデルを用いた手法では、センサやマーカなどのインフラを用いずに、カメラの位置及び姿勢の推定が可能である。環境のモデルとして、ワイヤースケルトンモデル [13] や自然特徴点群 [14], [15], テクスチャ付きのポリゴンモデルを用いる手法 [16] が提案されているが、これらの手法では、エッジや自然特徴点などの入力画像中の特徴とモデルとを対応付けることによりカメラの絶対的な位置及び姿勢が推定される。一般的に、こういった環境モデルの生成には多大な労力を要するが、自然特徴点を用いた手法 [14], [15] では、動画像から structure-from-motion の技術を用いてモデルが自動生成されるため、広範囲な景観内の自然特徴点のモデルを容易に構築できるという特長を持つ。しかし、これらの環境のモデルを用いた手法 [13] ~ [16] では、画像中の個々の特徴を一意に識別することが難しく、カメラの回転及び並進が大きい場合、モーションブラーや特徴の探索範囲の拡大によりモデルと入力画像において誤対応が生じ、カメラ位置及び姿勢の推定誤差が増大する問題がある。

この問題を解決するために、環境のモデルとセンサから得られる情報を併用してカメラの位置及び姿勢を推定するハイブリッドな手法 [17] ~ [19] が研究されている。探索範囲外にモデルとの対応点が存在することによる誤対応を防ぐ手法として、Reitmayr ら [17] や Jiang [18] らは、姿勢センサによる計測結果と動画像処理による推定を拡張カルマンフィルタにより統合することで、カメラの回転に対してロバストに位置及び姿勢の推定を行う手法を提案している。Klein ら [19] は姿勢センサにより得られる角速度情報からブラーを考慮したエッジ探索ウィンドウを作成することで、ワイヤースケルトンモデルと入力画像中の物体のエッジがモーションブラーによって誤対応を起こす問題を解決し、モーションブラーが生じた入力画像に対するカメラの位置及び姿勢の推定を可能にしている。しかし、従来のポリゴンモデル [17] やワイヤースケルトンモデル [18], [19] とセンサによる情報を併用した手法では、対象とする環境の規模が大きく複雑な場合、モデルの作成自体が難しいという問題がある。

本稿では、自然特徴点群の三次元位置と画像テンプレートを

データベース化したランドマークデータベース [14] 及び姿勢センサにより得られる角速度情報を併用することで、カメラの高速な回転が生じた場合においても位置及び姿勢をロバストに推定する手法を提案する。提案手法では、まず、現フレームにおけるカメラの暫定的な位置及び姿勢を求め、フレーム毎にデータベース中の多数のランドマークから推定に用いるランドマークを適切に限定する。次に、限定されたランドマークの画像テンプレートに対して入力画像と同様のモーションブラーを再現し、モーションブラーによる入力画像とランドマーク間の類似度の低下を防ぐ。さらに、カメラの並進を考慮した大きさの検出ウィンドウによって検出された入力画像内の特徴点とランドマークをテンプレートマッチングによって対応付け、カメラの位置及び姿勢を推定する。実験では、並進移動するカメラに高速な回転を与えて取得した動画像からカメラの位置及び姿勢を推定し、特徴点とランドマークの対応や推定されたカメラの位置及び姿勢の推定精度を検証することにより提案手法の有効性を示す。ただし、本稿では、カメラの内部パラメータは既知であり、カメラと姿勢センサの同期とキャリブレーションは完了しているものとする。

以下、2 節では、ランドマークデータベースと姿勢センサを用いたカメラ位置及び姿勢推定について述べる。3 節では、カメラの位置及び姿勢推定の精度評価実験について報告する。最後に、4 節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と姿勢センサを用いたカメラ位置及び姿勢推定

提案手法は、ランドマークデータベースの構築、ランドマークデータベースを用いたカメラ位置及び姿勢の逐次推定の 2 つのステージによって構成される。まず、ランドマークデータベースの構成について述べ、次に、これを用いたカメラの位置及び姿勢の推定手法について述べる。

2.1 ランドマークデータベース

ランドマークデータベースは、多数のランドマークから成り、各ランドマークの情報として、ランドマークの 3 次元位置と画像テンプレート情報を保持している。様々な位置からのランドマークの見え方の変化に対応するために、画像テンプレート情報は各ランドマークの撮影地点毎に、以下の情報を含む [14]。

- (A) ランドマークを撮影したカメラ位置
- (B) 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スケール

以上の情報は、事前に環境の撮影及び基準となる自然特徴点の三次元位置の計測を行い、環境内の自然特徴点を三次元復元することで取得する [20]。

2.2 カメラ位置及び姿勢の推定手法

上記のランドマークデータベース、姿勢センサからの角速度情報及び入力画像から、カメラの絶対的な位置及び姿勢を推定する手法について述べる。本手法の処理の流れを図 1 に示す。各フレームにおける処理は以下の通りである。まず、姿勢センサで得られた角速度情報から暫定的なカメラの位置及び姿勢を

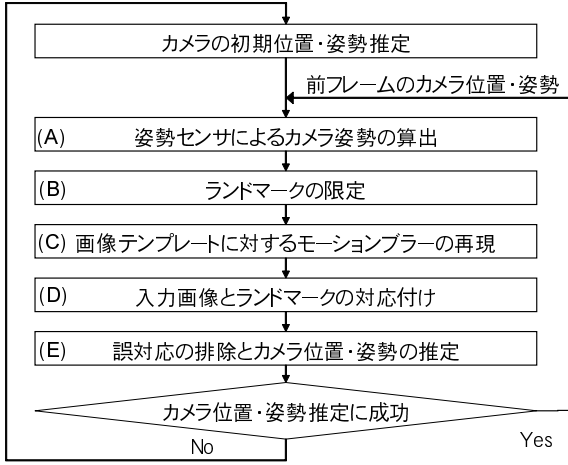


図 1 全体の処理の流れ

算出し (A), データベースから推定に利用するランドマークを限定する (B). 限定されたランドマークの画像テンプレートに対して入力画像と同じモーションブラーを再現する (C). 生成したテンプレートと入力画像のテンプレートマッチングにより, 入力画像中の自然特徴点とランドマークとを対応付け (D), 最後に, それらの対応関係を用いて PnP 問題 [21] を解くことによりカメラの位置及び姿勢を推定する (E). ただし, 初期フレームのカメラの位置及び姿勢は何らかの手法によって取得済みとする. なお, 各フレームの処理において, 再投影誤差が大きく, カメラ位置及び姿勢の推定が失敗したと判断された場合には, カメラの初期位置及び姿勢の推定処理から, 成功したと判断された場合には (A) から処理を繰り返す. 以下, 処理 (A) ~ (E) について詳述する.

(A) 姿勢センサによるカメラ姿勢の算出

図 2 に示す, 第 i フレームにおける姿勢センサから得られる角速度 ω_i と世界座標系から第 $(i-1)$ フレームのカメラ座標系への 3×3 の変換行列 (回転行列) R_{i-1}^c を用いて, 第 i フレームにおけるカメラの暫定的な姿勢 \tilde{R}_i^c を算出する処理について述べる. ここで, センサから得られる角速度情報のみを用いて姿勢を推定すると, ドリフトによる累積的な誤差の影響を受けるため, 本手法では, ドリフト誤差を含まないカメラの姿勢を計測するために, 第 $(i-1)$ フレームで推定された絶対的なカメラの姿勢 R_{i-1}^c と角速度 ω_i , および予めキャリブレーションにより得たカメラ座標系からセンサ座標系への変換行列 R^{cg} のみからカメラの姿勢 \tilde{R}_i^c を算出する. 以下では, カメラの姿勢 \tilde{R}_i^c の算出方法について述べる.

第 i フレームにおける姿勢センサの姿勢 R_i^g は, カメラの姿勢 \tilde{R}_i^c とカメラ座標系から姿勢センサ座標系への回転行列 R^{cg} から $R_i^g = R^{cg} \tilde{R}_i^c$ で表される. また, 第 $(i-1)$ フレームから第 i フレームへの姿勢センサの回転を $R_{i-1,i}^g$ としてあらわすと, $R_i^g = R_{i-1,i}^g R_{i-1}^g$ が成立する. 以上より, 第 i フレームにおけるカメラの暫定的な姿勢 \tilde{R}_i^c は以下の式で算出される.

$$\tilde{R}_i^c = (R^{cg})^{-1} R_{i-1,i}^g R^{cg} R_{i-1}^c \quad (1)$$

ここで, 第 $(i-1)$ フレームから第 i フレームにおける微小な

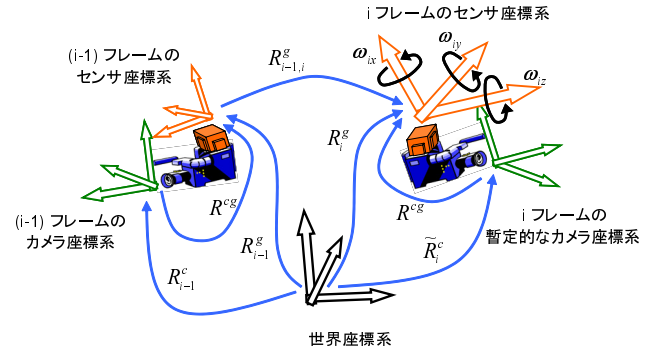


図 2 座標系の定義

回転を $\Omega_i = (R_{i-1}^g)^{-1} R_{i-1,i}^g$ で表せば, 式 (1) は次式のように変形できる.

$$\tilde{R}_i^c = R_{i-1}^c \Omega_i R^{cg} R_{i-1}^c \quad (2)$$

また, 微小な回転は各軸周りの角速度ベクトルとの外積で表すことができるため, Ω_i は第 i フレームにおける角速度 $\omega_i = (\omega_{ix}, \omega_{iy}, \omega_{iz})$ の要素のみからなり, 以下の様に 3×3 の歪対象行列で表現できる.

$$\Omega_i = (R_{i-1}^g)^{-1} R_{i-1,i}^g = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_{iz} & \omega_{iy} \\ \omega_{iz} & 0 & -\omega_{ix} \\ -\omega_{iy} & \omega_{ix} & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

1 節で述べたように, 姿勢センサとカメラ間の変換行列 R^{cg} はキャリブレーション済みで既知であり, カメラの姿勢 R_{i-1}^c 及び行列 Ω は累積誤差のない回転をあらわすので, 式 (2) から各フレームにおいて絶対的なカメラの姿勢を表す \tilde{R}_i^c を算出できる.

(B) ランドマークの限定

処理 (A) で算出した暫定的なカメラの姿勢 \tilde{R}_i^c を用いて, 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限定する処理について述べる. ここでは, 第 i フレームに対して予測されるカメラの位置 \tilde{P}_i^c 及び姿勢 \tilde{R}_i^c から, 画角内に入るランドマークを選択し, 入力画像と対応付ける候補とする. 具体的には, 第 $(i-1)$ フレームでのカメラの位置を P_{i-1}^c , ランドマーク j の三次元位置を $l_{(j)}$ とすると, 第 i フレームにおける画像上へのランドマーク j の予測投影位置 $\tilde{c}_{(j)i} = [x_{(j)i}, y_{(j)i}]^t$ は以下の式で表される.

$$\begin{pmatrix} a_{(j)i} x_{(j)i} \\ a_{(j)i} y_{(j)i} \\ a_{(j)i} \end{pmatrix} = \tilde{R}_i^c l_{(j)} + \tilde{P}_i^c \quad (4)$$

ただし, 第 i フレームにおけるカメラの予測位置 \tilde{P}_i^c は次式により算出する.

$$\tilde{P}_i^c = 2P_{i-1}^c - P_{i-2}^c \quad (5)$$

また, $a_{(j)i}$ は第 i フレームにおけるカメラ座標系でのランドマーク j の奥行きを表す. 本処理では, 上式で得られる予測投影位置 $\tilde{c}_{(j)i}$ がカメラの画角内に存在するランドマークのみを選択し, 推定に利用するランドマークとする.

(C) 画像テンプレートに対するモーションブラーの再現

処理 (B) により選択されたランドマークの画像テンプレートから, 入力画像のモーションブラーを再現した画像テンプレートを生成する処理について述べる. 本研究では, 等速直線運動を仮定した PSF モデルを用いて, 各ランドマークに対してデータベースの画像テンプレートにモーションブラーを再現する. モーションブラーの大きさ, 方向は, 以下のベクトル b で表される.

$$b = (c_{(j)i-1} - \tilde{c}_{(j)i})s\Delta t$$

ただし, $c_{(j)i-1}$ は第 $(i-1)$ フレームにおけるカメラ位置 P_{i-1}^c 及び姿勢 R_{i-1}^c と三次元位置 $l_{(j)}$ から算出したランドマークの第 $(i-1)$ フレームにおける画像への投影座標, Δt はフレーム間の時間を表し, シャッタースピード s は既知とする.

(D) 入力画像とランドマークの対応付け

処理 (B) で限定された各ランドマークに対して入力画像中の自然特徴点を対応付ける処理について述べる. 具体的には, 処理 (B) で算出された $\tilde{c}_{(j)i}$ を中心とする大きさ δ のウィンドウ内において, 処理 (C) で生成されたテンプレートを用いて, 正規化相互相関を指標としたテンプレートマッチングを行う. ウィンドウの大きさ δ は, カメラの並進移動と姿勢センサの計測精度を考慮して設定する. 具体的には, ランドマーク j のカメラからの奥行き $a_{(j)i}$ と, 経験的に設定したカメラの最大並進速度 V_{max} から算出される検出ウィンドウの大きさ $\delta_{(j)i}$ を以下の式で算出する.

$$\delta_{(j)i} = \frac{V_{max}\Delta t}{a_{(j)i}} + \delta' \quad (6)$$

ただし, δ' は姿勢センサの精度から設定する定数である.

(E) 誤対応の排除とカメラ位置及び姿勢推定

本処理では, ランドマークの画像上への投影座標 $\tilde{c} = (x, y)$ と, ランドマークに対応づけられた自然特徴点の画像上での検出座標 (x', y') の自乗距離の和 $E = \sum \{(x - x')^2 + (y - y')^2\}$ を再投影誤差として定義し, これを最小化することで第 i フレームにおけるカメラの位置 P_i^c 及び姿勢 R_i^c の推定を行う. 再投影誤差の最小化は非線形最小化問題であり, 局所解の問題や計算量の問題を伴うため, まず線形解法を用いてまずカメラ位置・姿勢の初期値を求める [21]. 次に, 補正後, 最急降下法によって再投影誤差 E を最小化する. また, RANSAC [22] によって誤対応を除去し, 正しい対応関係のみから再投影誤差を最小化することでカメラの位置及び姿勢の推定精度を高める. ここで, 最終的に利用可能な対応点数が 6 点を下回る場合, 推定が失敗したとみなす.

3. カメラの位置及び姿勢推定の精度評価実験

提案手法の有効性を検証するために, 実動画をを用いた 4 つの精度評価実験を行った. 以下, まず実験環境について述べ,

次に, 提案手法の定量的な評価実験について述べる.

3.1 実験環境

本実験では全ての実験において共通の動画像, 角速度情報, ランドマークデータベースを用いた. 以下に, これらのデータの取得方法について述べる. 動画像は手持ちのビデオカメラ (SONY DSR-PD150, 解像度 720×480 pixel, 15fps), 姿勢情報はカメラに固定された姿勢センサ (TOKIMEC TISS-5-40, 方位角誤差: ± 2 度, ドリフト誤差: ± 3 度/時, ロール角・ピッチ角誤差: ± 0.5 度) で得た. ランドマークデータベースの生成には, 放射状に固定された複数のカメラにより全天球の動画像を取得できる全方位型マルチカメラシステム (Point Grey Research 社 Ladybug, 解像度 $768 \times 1024 \times 6$ 台) を用いた. このカメラシステムにより屋外環境を移動撮影し, 佐藤らの手法 [23] によりカメラパスと自然特徴点の三次元位置を推定することによりランドマークデータベースを構築した.

ビデオカメラで得られた動画像は 200 フレームであり, その一部を図 3 として示す. これらは, 入力画像撮影時において自動設定されたシャッタースピード $1/15$ 秒で撮影した. ランドマーク数は約 7500 個であり, 1 つのランドマークあたりの撮影地点数は平均 8 ヶ所であった. また, 定量的な評価に用いるカメラ位置及び姿勢の真値は, 環境内の特徴点の三次元位置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, 真値の計算時の再投影誤差が 1.5 pixel 以上であるフレームは評価対象にできなかった.

3.2 定量的な評価実験

上記の実験環境において, 以下に述べる 3 つの比較手法と提案手法で推定されたカメラの位置及び姿勢を真値と比較することで推定精度を調べた. 以下, 各比較手法の説明, 実験結果の順に述べる.

提案手法では暫定的なカメラ姿勢の算出処理 (A) で得られた角速度情報を各処理 (B) ~ (D) に用いることでロバスト性の向上を図る. これらの処理 (B) ~ (D) の有効性を確認するために, 全ての比較手法は, 提案手法中の処理 (B) ~ (D) のうち, 1 つの処理を他のものに置き換えたものとなっている. 以下, 比較手法について詳述する. 比較手法 (1) は, ランドマークの限定処理 (B) において, 本手法で用いるカメラの予測位置及び姿勢の代わりに前フレームで推定したカメラの位置及び姿勢を用いることで, ランドマークの限定を行う. 比較手法 (2) は, 画像テンプレートのモーションブラーの再現処理 (C) を行わず, 通常のテンプレートマッチングによって対応付けを行う. 比較手法 (3) は, 入力画像とランドマークの対応付け処理 (D) において, 各ランドマークに対するウィンドウサイズの動的な設定を行わず, 全ランドマークに対して固定ウィンドウサイズで対応点を探索する.

以上の手法を用いて提案手法との比較を行った. 図 4 に, 各フレームにおける角速度と最終的なカメラ位置及び姿勢推定に用いたランドマークの数を示す. 比較手法 (1) 及び (2) は, それぞれ 4 4 フレーム, 8 4 フレームにおいて, カメラの位置及び姿勢の推定が途中で失敗した. 図 4 から, 推定処理に失敗は,

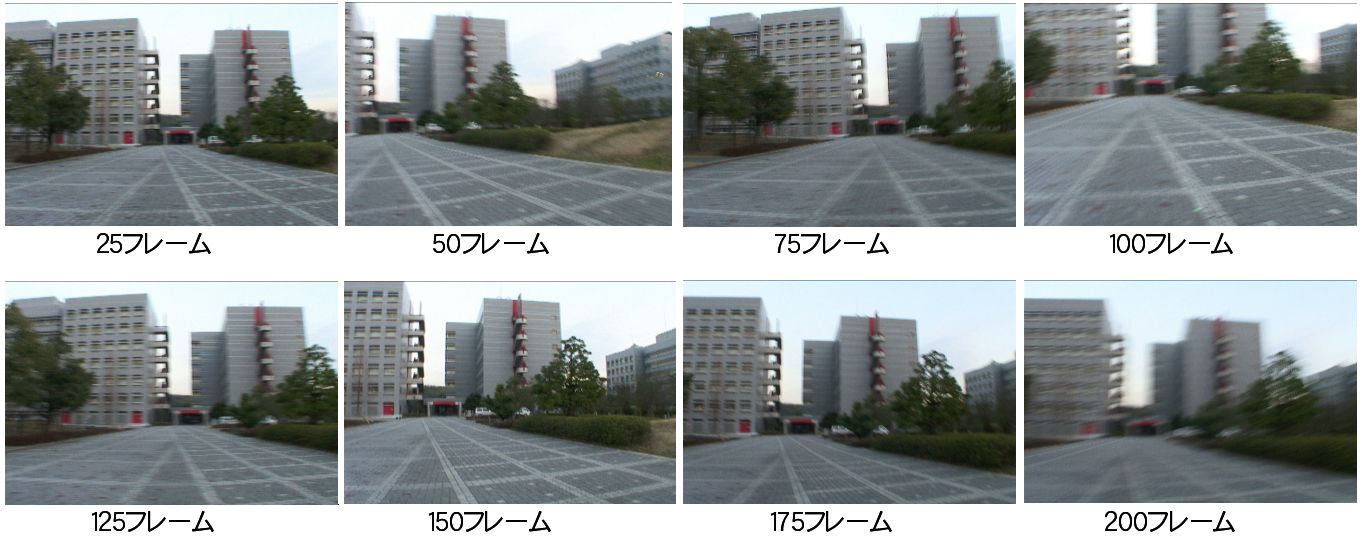


図3 入力画像

共に大きな角速度が発生した直後に発生しており、姿勢センサを用いたランドマークの限定処理 (B) 及びモーションブラーの再現処理 (C) が、高速な回転に対するロバスト性の向上に有効であることが分かる。

また、処理 (C) におけるモーションブラーの再現の例を図5に示す。同図から、モーションブラーを再現する提案手法のテンプレートは従来手法のテンプレートと比較して入力画像と類似していることが分かる。特に、高周波成分を多く含む画像がブラーによって変化しやすいため、複雑な環境の画像テンプレートに対しては、より効果的であることを確認した。

次に、位置及び姿勢の推定精度の比較を行う。カメラ位置及び姿勢推定の平均誤差を表1に示す。同表から、位置及び姿勢の推定精度については提案手法と比較手法(2)は同程度であることが分かるが、これは、モーションブラーにより誤対応が増加した場合にも、RANSAC アルゴリズムにより正しい対応だけが残り、一定以上の対応数が得られれば、推定精度には大きく影響しないためであると考えられる。比較手法(3)は推定に用いられるランドマークの対応数が提案手法より多いが、位置及び姿勢の推定誤差が共に提案手法と比較して増大している。これは、探索ウィンドウ内に冗長な情報が含まれているため、RANSAC によって誤対応を排除出来ずに推定誤差が増大したと考えられる。このことから、類似パターンなどの誤対応に対してロバスト性を向上する手段として探索範囲の限定は有効であり、位置及び姿勢の推定精度が向上することを確認した。以上のことから、位置及び姿勢の推定精度、推定のロバスト性において、提案手法の有効性を確認した。

4. まとめと今後の課題

ランドマークデータベースと姿勢センサによる角速度情報からカメラ位置及び姿勢を推定する手法を提案した。提案手法では、推定に用いるランドマークの効果的な選択やデータベース中の画像テンプレートに対するモーションブラーの再現により、高速な回転を伴うカメラの位置及び姿勢をロバストに推定する

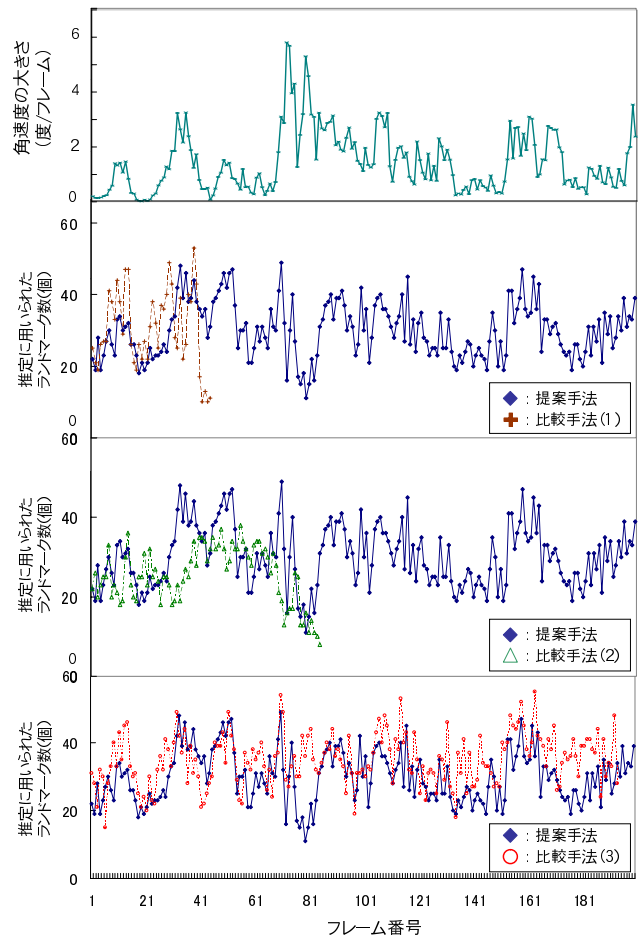


図4 対応付けられたランドマーク数と角速度の大きさ

ことができる。実験では、並進移動するカメラに高速な回転を与えて取得した動画からカメラの位置及び姿勢を推定し、真値と比較する事によって、カメラの位置及び姿勢の推定精度を検証した。実験の結果、モーションブラーが生じた入力画像に対し、平均位置誤差 459mm, 平均姿勢誤差 0.357 度程度で推

表 1 平均推定誤差

| | 位置推定誤差 (mm) | 姿勢推定誤差 (度) |
|---|----------------|---------------|
| 提案手法 | 458.825 | 0.357 |
| (1) 前フレームの位置・姿勢に投影される ランドマークを推定に利用する手法 | 1406.49 | 1.418985 |
| (2) 画像テンプレートにブラーを加工せず テンプレートマッチングする手法 | 571.1688 | 0.39 |
| (3) 全ランドマークに対し同じサイズの ウィンドウで対応点を探る手法 | 738.5083 | 0.6003 |

| スケール小 ↑ 多重スケールの 画像テンプレート ↓ スケール大 | ブラーの 再現なし | ブラーの 再現あり | 入力画像 | ブラーの 再現なし | ブラーの 再現あり | 入力画像 |
|---|--------------------|--------------|------|-------------------|--------------|------|
| | 正規化相互相関値 | 0.40 | 0.72 | | 0.76 | 0.95 |
| | 高周波成分を多く含む画像テンプレート | | | 高周波成分の少ない画像テンプレート | | |

図 5 テンプレート間の正規化相互相関値に対するモーションブラー再現の効果の確認

置及び姿勢推定が可能であり、精度は従来手法と同程度であったが、高速な回転に対するロバスト性の向上を確認した。今後の課題として、様々な角速度の大きさに対する本手法での位置及び姿勢の推定精度の検証、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。

文 献

[1] S. Feiner, B. MacIntyre, T. Höllerer and A. Webster: "A touring machine: Prototyping 3D mobile augmented reality systems for exploring the urban environment," Proc. 1st IEEE Int. Symp. on Wearable Computers, pp. 74-81, 1997.

[2] P. Daehne and J. Karigiannis: "Archeoguide: System architecture of a mobile outdoor augmented reality system," Proc. 1st IEEE Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp. 263-264, 2002.

[3] 松本, 稲葉, 井上: "ビューベースアプローチに基づく移動ロボットナビゲーション", 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.5, pp. 506-514, 2002.

[4] 石岡, 矢晃, 油田: "屋内外に渡って人間を誘導するキャンパスガイドロボットの開発", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, pp. 381-395, 2005.

[5] A. Harter, A. Hopper, P. Steggles, A. Ward and P. Webster: "The anatomy of a context-aware application," Proc. 5th IEEE Int. Conf. on Mobile Computing and Networking, pp. 59-68, 1999.

[6] G. Welch, G. Bishop, L. Vicci, S. Brumback, K. Keller and D. Colucci: "High-performance wide-area optical tracking -the hiball tracking system," Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol.10, No.1, pp. 1-21, 2001.

[7] D. Hallaway, T. Hollerer and S. Feiner: "Coarse, inexpensive, infrared tracking for wearable computing," Proc. 7th IEEE Int. Symp. on Wearable Computers, pp. 69-78, 2003.

[8] InterSense Inc.: "Is-900," <http://www.isense.com/products/prec/is900/>.

[9] 羽原, 町田, 清川, 竹村: "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", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.102, No.216, pp. 65-70, 2002.

[10] 加藤, M. Billinghamurst, 浅野, 橋: "マーカー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", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.4, pp. 607-616, 1999.

[11] L. Naimark and E. Foxlin: "Circular data matrix fiducial system and robust image processing for a wearable vision-inertial self-tracker," Proc. 1st IEEE Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp. 27-36, 2002.

[12] J. Rekimoto: "Matrix: A realtime object identification and registration method for augmented reality," Proc. 3rd on Asia Pacific Computer Human Interaction, pp. 63-68, 1998.

[13] E. Rosten and T. Drummond: "Fusing points and lines for high performance real-time tracking," Proc. 10th IEEE Int. Conf. on Computer Vision, pp. 1508-1515, 2005.

[14] 大江, 佐藤, 横矢: "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.

[15] I. Gordon and D. G. Lowe: "Scene modeling, recognition and tracking with invariant image features," Proc. 3rd IEEE Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp. 110-119, 2004.

[16] V. Lepetit, L. Vacchetti, D. Thalmann and P. Fua: "Fully automated and stable registration for augmented reality applications," Proc. 2nd IEEE Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp. 93-102, 2003.

[17] G. Reitmayr and T. W. Drummond: "Going out: Robust model-based tracking for outdoor augmented reality," Proc. 5th IEEE Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp. 109-118, 2006.

[18] B. Jiang, U. Neumann and S. you: "A robust hybrid tracking system for outdoor augmented reality," Proc. IEEE Conf. on Virtual Reality, pp. 3-10, 2004.

[19] G. S. W. Klein and T. W. Drummond: "Tightly integrated sensor fusion for robust visual tracking," Image and Vision Computing, Vol.22, pp. 769-776, 2004.

[20] 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.

[21] 出口: "射影幾何学による PnP カメラ補正問題の統一的解法", 情報処理学会論文誌, Vol.90, pp. 41-50, 1990.

[22] M. A. Fischler and R. C. Bolles: "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," Communications of the ACM, Vol.24, pp. 381-395, 1981.

[23] 佐藤, 内山, 山本: "UG+B 法: 主観及び客観視点カメラと姿勢センサを用いた位置合わせ手法", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.3, pp. 391-400, 2005.