

GPS 測位の信頼度と外れ値を考慮した 動画像と GPS からのカメラ位置・姿勢推定

桑 秀 行^{†1} 武 富 貴 史^{†1}
佐 藤 智 和^{†1} 横 矢 直 和^{†1}

本報告では、広域屋外環境における動画像からのカメラ位置・姿勢推定において、測位の信頼度情報を取得可能な GPS を併用することで蓄積誤差を抑制する手法を提案する。従来提案されている動画像と GPS の併用手法は、GPS の測位誤差として暗に平均値 0 の正規分布を仮定しているため、特に GPS の信頼度が低い場合などのように、短時間の観測において平均測位位置が真値から大きく外れる（バイアス誤差が大きい）場合においてカメラ位置・姿勢の推定精度が大きく低下するという問題がある。本研究では、この問題に対処するために、(1) 動画像との併用に適した GPS 測位位置に関する新たなモデルの提案、(2) 動画像からの推定値を用いた GPS 測位の外れ値除外法の提案を行う。具体的には、GPS 受信機の真の位置が GPS の測位位置を中心とする GPS の信頼度に依存した一定の範囲内に存在することを仮定し、この仮定に基づくペナルティ項をバンドル調整のエネルギー関数に加え最小化する。これにより、GPS 測位におけるバイアス誤差の影響を排除しながら GPS の信頼度に応じて動画像からのカメラの位置・姿勢推定結果を補正する。また、GPS 測位に含まれる外れ値を、動画像との整合性を検証することにより除外する。

Extrinsic Camera Parameter Estimation Using Video Images and GPS Considering GPS Positioning Confidence and Outlier

HIDEYUKI KUME,^{†1} TAKAFUMI TAKETOMI,^{†1}
TOMOKAZU SATO^{†1} and NAOKAZU YOKOYA^{†1}

This report proposes a method for estimating extrinsic camera parameters using video images and temporally sparse position data acquired by GPS. In conventional methods, the accuracy of estimated camera position largely depends on the confidence of GPS positioning data because they implicitly assume that GPS position error is very small or normally distributed. In order to

solve this problem, we propose (1) novel model about GPS positioning which enables more robust estimation with extended bundle adjustment, and (2) outlier removal for GPS positioning using video information. Concretely, we have employed a simple assumption that true GPS position exists within a certain range from the observed GPS position and the size of the range depends on the GPS positioning confidence. The proposed method estimates camera parameters by minimizing an energy function that is defined by using the reprojection error and the penalty term for GPS positioning. Additionally, outliers are removed by checking the consistency between vision and GPS information.

1. はじめに

現実環境を撮影した動画像に対するカメラの位置・姿勢情報は、三次元形状復元や自由視点画像生成、拡張現実感をはじめとする多くの分野での利用が可能である。近年これらの分野では、広域な屋外環境への手法の適用が試みられ¹⁾、広域屋外環境を移動しながら撮影された動画像に対するカメラの位置・姿勢を高精度に推定することが求められている。しかし、撮影された動画像のみからカメラの位置・姿勢を推定する Structure from Motion 法²⁾ や Visual SLAM 法³⁾ には、推定されるカメラ位置・姿勢に誤差が蓄積するため、特に広範囲を移動する場合に推定精度が低下するという問題がある。

このような誤差蓄積の問題に対し、動画像に加えて環境に関する事前知識や GPS を併用する手法^{1),4)-9)} が提案されている。環境に関する事前知識を併用する手法^{4),5)} は、三次元位置が既知の基準点⁴⁾ やシーン中の一部の領域に対するワイヤフレームモデル⁵⁾ を利用する。これらの手法は、他のセンサなどを必要とせず、カメラの絶対位置・姿勢を推定できるが、広範囲な屋外環境での利用においては基準点やモデルの三次元位置を計測するために多くの人的コストがかかるという問題がある。一方、GPS を併用する手法^{1),6)-9)} は、動画像中の特徴点の追跡によって得られるカメラの位置・姿勢と GPS から得られる位置情報を同時に用いることで、環境に対する事前知識なしに絶対的なカメラ位置・姿勢を推定することができる。このような特徴から、本研究では、GPS と動画像を併用したカメラ位置推定手法に着目する。

動画像と GPS を併用する手法は、情報の融合にカルマンフィルタを用いる手法^{1),6),7)} と

^{†1} 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

バンドル調整 (bundle adjustment) を用いる手法^{8),9)} に大別できる。カルマンフィルタを用いる手法^{1),6),7)} は、動画像と GPS の情報を高速に融合できるため、拡張現実感などのリアルタイムアプリケーションに適している。しかし、過去の状態と現在の観測から逐次的に現在の状態を求めるといったフィルタの設計から、入力全体での最適化を行い精度を高めることは難しい。

一方、バンドル調整を用いる手法^{8),9)} は、動画像からのカメラ位置・姿勢推定において用いられるバンドル調整の誤差関数に、GPS の測位位置に関する誤差の項を追加することで、動画像と GPS の情報を融合する。横地⁸⁾ は、GPS の測位誤差が単一の正規分布で近似できることを前提に、定義した誤差関数を最小化することで、カメラ位置・姿勢を推定している。この手法は、動画像全体でカメラ位置・姿勢を最適化することができる。しかし、実際には、GPS 測位の信頼度は GPS 電波の遮蔽や反射、衛星の配置等によって大きく変化するため、単一の正規分布により測位誤差をモデル化することは難しく、特に GPS 測位の信頼度が低い場合にカメラ位置・姿勢の推定精度が大きく低下するという問題がある。これに対して、Anai ら⁹⁾ は GPS 受信機から得られる信頼度情報に応じて正規分布の分散を変化させることにより、測位の信頼度を考慮する手法を提案している。しかし、短時間の観測において測位に大きなバイアス誤差が含まれる場合に、推定精度が低下するという問題は依然として解消されていない。これは、GPS の測位誤差として平均値 0 の正規分布を仮定する一方で、実際の短時間における GPS の測位誤差の分布がこのような正規分布で適切に近似できないことに起因している。

また、GPS 測位には、GPS 測位の信頼度からの見積りと比較して、誤差が非常に大きい外れ値が含まれる。従って、GPS とカメラや他のセンサの情報を融合する場合には、GPS 測位の外れ値を考慮する必要がある。Maier ら¹⁰⁾ は、オドメトリと GPS の融合によるロボットの位置推定において、周辺環境をレーザレンジファインダによって計測することで不可視衛星を測位時に排除し、マルチパスによる外れ値の発生を抑制する手法を提案している。この手法では、より正確な GPS 測位を得ることができるが、周辺環境を計測可能な機器が必要となる。Anai ら⁹⁾ はバンドル調整を用いた動画像と GPS の融合によるカメラ位置・姿勢推定において、GPS 測位に関する項に M 推定を適用することにより GPS 測位の外れ値を考慮している。しかし、M 推定における、適切な influence function の設定が難しいという問題が残されている。

本研究では、三次元形状復元や自由視点画像生成などオフラインで高精度なカメラ位置・姿勢を必要とするアプリケーションへの適用を想定し、広範囲な環境を移動しながら撮影し

た動画像に対するカメラの位置・姿勢推定において、比較的高精度な絶対位置情報を推定可能なバンドル調整による GPS と動画像情報の融合手法^{8),9)} を基礎とした上で、GPS 測位の信頼度が低い場合にカメラ位置・姿勢の推定精度が低下するという問題を解決する。具体的には、GPS の測位誤差を単一の正規分布でモデル化する代わりに、GPS 受信機の真の位置が GPS の測位位置を中心とする、GPS 測位の信頼度 (RTK-fix, RTK-float 等) に依存した一定の範囲内に存在することを仮定し、この仮定に基づくエネルギー関数を最小化することで、GPS 測位の信頼度に応じて動画像からのカメラの位置・姿勢推定結果を補正する。また、GPS 測位に含まれる外れ値を、動画像との整合性を検証することにより除外する。

以下、2 節では、GPS 測位の信頼度を考慮したエネルギー関数の定義と、GPS 測位の外れ値除外法について詳述する。3 節では、屋外環境を移動しながら撮影した動画像を用いてカメラの位置・姿勢推定を行い、従来手法と比較することで精度を検証する。最後に 4 節でまとめと今後の課題について述べる。

2. GPS 測位の信頼度と外れ値を考慮したカメラ位置・姿勢推定

本研究では、カメラと GPS 受信機の相対位置関係を固定して撮影した動画像と GPS の測位値から、GPS 測地座標系におけるカメラの位置・姿勢を推定する。ただし、カメラと GPS 受信機の相対位置関係は既知であり、動画像と GPS の測位値は同期して得られるものとする。

提案手法はバンドル調整による GPS と動画像情報の融合手法^{8),9)} を基礎とし、これらの手法と同様に、特徴点の再投影誤差と GPS の測位位置に関するエネルギーを同時に最小化することにより、動画像からのカメラ位置・姿勢の推定結果を補正する。提案手法の処理の流れを図 1 に示す。まず、フレーム毎の処理として、特徴点の追跡によるカメラ位置・姿勢推定 (A)、特徴点の三次元位置の推定と特徴点の追加・削除 (B) を行う⁴⁾。ここで、現フレーム (第 f フレーム) において、GPS 測位が得られた場合 (GPS 測位時刻に対応する動画像のフレームの集合 G に f が含まれる場合)、GPS 測位の外れ値を考慮した GPS の測位値を用いた狭区間最適化 (C) を行い、カメラの位置・姿勢と特徴点の三次元位置を最適化する。これにより、逐次的に蓄積誤差を抑えたカメラの位置・姿勢を得る。これらの処理 (A)~(C) を初期フレームから最終フレームまで繰り返すことで、逐次的にカメラ位置・姿勢および特徴点の三次元位置の初期値を得た上で、最後に動画像全体での最適化処理を行う (D)。以下では、まず、本研究で新たに提案する GPS 測位の信頼度を考慮したエネルギー関数について述べる。次に、処理 (C)、(D) について詳述する。

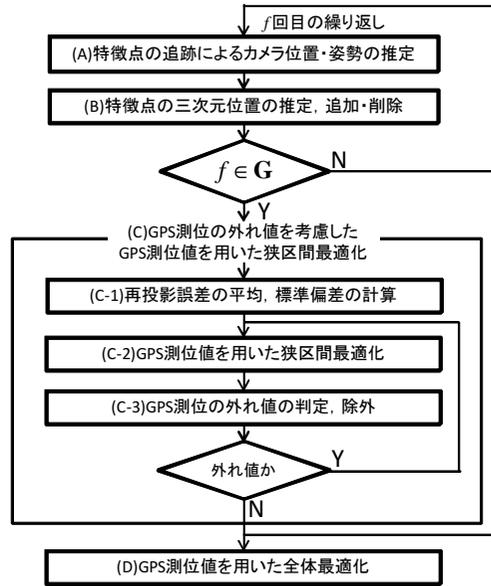


図 1 提案手法の処理の流れ

Fig. 1 Flow diagram of the proposed method.

2.1 GPS 測位の信頼度を考慮したエネルギー関数の定義

本研究では、動画像を対象とした三次元復元の評価尺度として広く用いられている再投影誤差と、GPS に関して本研究で新たに定義するエネルギー項の和を最小化することで、カメラ位置・姿勢および特徴点の三次元位置を推定する。具体的には、エネルギー関数 E を、 i フレームにおける再投影誤差 Φ_i と GPS 測位位置に関するペナルティ項 Ψ_i を用いて以下のように定義する。

$$E = \sum_{i \in F} \Phi_i + \sum_{i \in G} \Psi_i \quad (1)$$

ただし、 F は動画像のフレームの集合を、 G は GPS 測位時刻に対応する動画像のフレームの集合を表す。以下、再投影誤差に関するエネルギー Φ_i と GPS 測位位置に関するペナルティ項 Ψ_i について詳述する。

2.1.1 再投影誤差

再投影誤差は、特徴点の三次元位置を画像上に投影した座標と、画像上で検出された特徴

点の座標の距離の二乗和であり、動画像を対象としたバンドル調整において一般的に用いられている。本研究では、再投影誤差に関するエネルギー Φ_i を以下のように定義する。

$$\Phi_i = \frac{1}{|P_i|} \sum_{j \in P_i} \mu_j (\mathbf{q}_{ij} - \hat{\mathbf{q}}_{ij})^2 \quad (2)$$

ただし、 P_i は第 i フレームの画像上で検出される特徴点の集合である。また、 \mathbf{q}_{ij} は、第 i フレームにおける特徴点 j の画像上での座標、 $\hat{\mathbf{q}}_{ij}$ は特徴点 j の三次元位置を画像上へ投影した座標を表す。 μ_j は逐次処理で得られた特徴点 j の信頼度であり、特徴点 j が第 $(w - m)$ フレームから第 w フレームまで追跡された場合において、以下の式で算出される⁴⁾。

$$\mu_j = \frac{1}{2s_j^2} = \frac{m+1}{2} \left(\sum_{i=w-m}^w (\mathbf{q}_{ij} - \hat{\mathbf{q}}_{ij})^2 \right)^{-1} \quad (3)$$

ただし、 s_j^2 は特徴点 j の再投影誤差の分散を表す。

2.1.2 GPS 測位位置に関するペナルティ

従来手法^{8),9)} は、GPS の測位誤差が平均値 0 の正規分布で近似できることを前提に、以下のような GPS 測位位置に関するペナルティ項を定義している。

$$\text{文献 8) における定義: } \hat{\Psi}_i = \omega (\mathbf{M}_i \mathbf{g}_i - \mathbf{d})^2 \quad (4)$$

$$\text{文献 9) における定義: } \hat{\Psi}_i = \frac{\omega}{\tau^2} (\mathbf{M}_i \mathbf{g}_i - \mathbf{d})^2 \quad (5)$$

ただし、 \mathbf{M}_i は第 i フレームにおける GPS 測地座標系からカメラ座標系への変換行列、 \mathbf{d} はカメラ座標系における GPS 受信機の位置、 \mathbf{g}_i は第 i フレームの GPS 測地座標系における GPS の測位位置を表す。また、 ω は再投影誤差 Φ_i に対する重み係数、 τ は GPS 受信機から得られる GPS 測位位置の RMS を表す。前述したように、これらのペナルティ項を用いた場合において、GPS の平均測位位置が真値から大きく外れる誤差が生じた場合に、推定精度が低下するという問題がある。

本研究では、GPS の測位誤差を正規分布でモデル化する代わりに、GPS 受信機の真の位置が GPS の測位位置を中心とする、GPS 測位の信頼度 (RTK-fix, RTK-float 等) に依存した一定の範囲内に存在するという仮定を用いる。一般に GPS の測位誤差は水平方向と高度方向で異なることから、本稿では、GPS の水平方向の誤差と高度方向の誤差を独立に扱う。すなわち、図 2 に示すように、一定の範囲を円柱であるとし、GPS 測位位置に関するエネルギー Ψ_i を以下のように定義する。

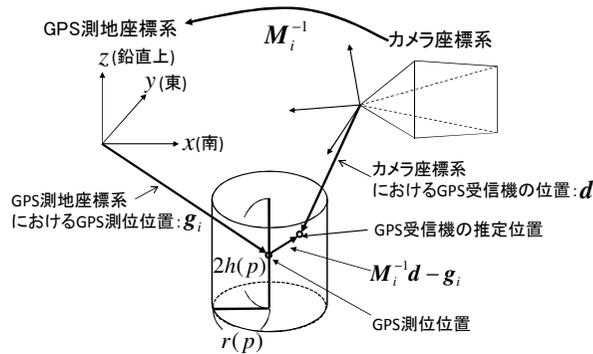


図2 GPS 測位位置に関するペナルティ
Fig. 2 Penalty for GPS positioning.

$$\Psi_i = \left(\frac{1}{r(p)} \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \right)^{2n} + \left(\frac{1}{h(p)} z_i \right)^{2n} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{pmatrix} = M_i^{-1} d - g_i \quad (7)$$

ただし、 M_i^{-1} は第 i フレームにおけるカメラ座標系から GPS 測地座標系への変換行列、 r は円柱の半径、 h は円柱の高さの $1/2$ 、 p は GPS 測位の信頼度を表す。また、 n はあらかじめ与える定数であり、 n に大きな自然数を与えることで、GPS 受信機の位置が測位位置を中心とした円柱の中に存在する場合には Ψ_i が 0 に近い値となり、円柱の外となる場合には非常に大きな値となる。なお、 Ψ_i は円柱の境界を境として 0 または非常に大きな値を取る連続関数であり、これを用いることで、従来手法^{8),9)} において経験的に決定されていた再投影誤差 Φ_i に対する重み係数が不要となる。また、ここでは、 Ψ_i を微分可能な形で定義することで、後述する最適化処理における勾配計算を可能としている。

なお、GPS の精度に影響を与えるものとして、GPS の種類 (単独測位, DGPS, RTK-GPS), RTK-GPS における解の種類 (RTK-fix, RTK-float), DOP などが考えられる。後述する実験では、GPS として RTK-GPS を用いるが、この場合には解の種類に応じて測位精度が大きく異なることが知られている。本研究では、この解の種類 (RTK-fix, RTK-float)

を測位の信頼度 p として用いる。本稿では、測位の信頼度 p に対する円柱のパラメータ $r(p), h(p)$ を、カメラ位置・姿勢を推定する環境において GPS の定点観測を行うことで実験的に決定する。

2.2 GPS 測位の外れ値を考慮した GPS 測位値を用いた最適化

2.2.1 GPS 測位値を用いた最適化

GPS 測位値を用いた最適化には、図 1 に示したように、逐次処理において範囲を限定して行う狭区間最適化 (C) と、逐次処理の終了後、動画像全体を対象として行う全体最適化 (D) がある。

処理 (A), (B) は、動画像上の情報のみを考慮するため、得られたカメラの位置・姿勢と特徴点の三次元位置には蓄積誤差が生じる。従って、処理 (A), (B) を繰り返すだけでは、以下の問題が生じる。

- (1) 蓄積誤差の影響により、特徴点の追跡に失敗する。
- (2) 逐次処理の終了後に行う全体最適化 (D) において、初期値が真値から離れるため、大域最適解を求めることが難しくなる。

そこで処理 (C) では、逐次処理において、第 $(f-1)$ フレームから現フレーム (第 f フレーム) を用いて、式 (1) で定義した誤差関数 E を勾配法によって最小化することにより、GPS の測位値を用いてカメラの位置・姿勢と特徴点の三次元位置を最適化する。

処理 (D) では、処理 (A) ~ (C) で得られたカメラ位置・姿勢、特徴点の三次元位置、特徴点の信頼度を初期値として、動画像全体を用いて誤差関数 E を最小化することにより、カメラ位置・姿勢の推定精度の向上を図る。

2.2.2 GPS 測位の外れ値の判定と除外

GPS 測位には、GPS 測位の信頼度からの見積りと比べて、誤差が非常に大きい外れ値が含まれるため、これを除外する必要がある。本研究では、狭区間最適化 (C) において、現フレーム (第 f フレーム) に対応する GPS 測位が外れ値であるかを動画像との整合性を検証することにより判定する。すなわち、GPS データおよび動画像データの整合性を、現フレームの再投影誤差 Φ_f を用いて見積もり、これが大きい場合には、現フレームに対応する GPS 測位を外れ値とみなす。これは、GPS 測位が仮に外れ値であった場合において、GPS 測位値を用いた最適化を行うと、カメラ位置が誤った範囲に制限され、そのフレームの再投影誤差が増大するためである。具体的な処理としては、まず、以下の式によって、狭区間最適化前の GPS 測位に対応するフレームの再投影誤差の平均 $\bar{\Phi}_f$ 、標準偏差 σ_f を求める (C-1)。

$$\bar{\Phi}_f = \frac{1}{|G_f|} \sum_{i \in G_f} \Phi_i \quad (8)$$

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{|G_f|} \sum_{i \in G_f} (\Phi_i - \bar{\Phi}_f)^2} \quad (9)$$

$$G_f = \{i \in G | f-l \leq i < f\} \quad (10)$$

ただし、 G_f は第 f フレームを先頭とする狭区間最適化の範囲に含まれる GPS 測位時刻に対応する動画のフレームの集合を表す。次に、狭区間最適化 (C-2) を行った後、以下の式を満たす観測を外れ値として除外する (C-3)。

$$\Phi_f > \bar{\Phi}_f + 2\sigma_f \quad (11)$$

観測が外れ値と判定された場合、 G から f を除外した上で、再度狭区間最適化を行う。

なお、Anai ら⁹⁾ は GPS 測位位置に関するペナルティに対して M 推定を適用することにより外れ値を考慮しているが、提案手法のペナルティは 0 に近い値が非常に大きな値をとるため、この手法を適用することは難しい。

3. 実験

本節では、移動撮影により取得した動画と RTK-GPS の測位値を用いてカメラ位置・姿勢の推定を行い、従来手法との推定精度の定量的な比較を行うことで、提案手法の有効性を示す。ここではまず、GPS を固定して長時間観測を行うことで、2.1.2 で述べた提案手法で用いる測位の信頼度ごとの位置計測の誤差範囲を決定し、次に決定したパラメータを用いた推定結果により評価を行う。

3.1 定点観測による GPS 測位値の誤差分析

本実験では、GPS 測位値の定点観測を行うことで、式 (6) で用いる測位の信頼度 p ごとの円柱のパラメータ $r(p), h(p)$ を決定する。ここでは、GPS 測位の信頼度 p として RTK-GPS の解の種類 (RTK-fix, RTK-float) を用いる。

3.1.1 実験条件

RTK-GPS 受信機 (TOPCON GR-3, 水平測位精度 $\pm 10\text{mm}$, 垂直測位精度 $\pm 15\text{mm}$) を固定し、約 5 時間の連続測位を行った。測位は、後述する実験においてカメラ位置・姿勢推定を行う環境と概ね同じ環境で行った。GPS の測位周期は 1Hz であり、インターネット回線を通して補正データを受信することで、1 台の RTK-GPS 受信機で RTK 測位が可能な仮想基準点方式で測位を行った。

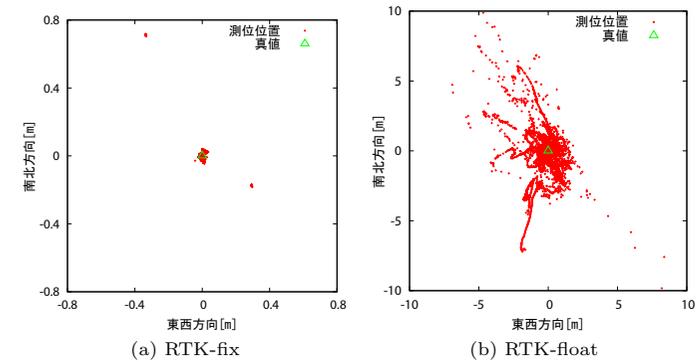


図 3 定点観測における GPS 測位位置の分布
Fig. 3 Distribution of GPS positions in the fixed-point observation

3.1.2 GPS 測位の信頼度に依存した誤差範囲の決定

本実験では、得られた全ての RTK-fix データの平均位置を定点観測を行った地点の真値とし、各測位値に対する誤差を算出した。定点観測によって得られた GPS の水平方向の測位位置の分布を、RTK-GPS の解の種類ごとに図 3 に示す。また、表 1(a) に、解の種類ごとの真値からの誤差の最大値を示す。これらの結果から、解の種類によって誤差のスケールが大きく異なることが分かる。表 1(b) に、解の種類ごとに、水平方向、高度方向それぞれについて誤差が大きい 5% の測位値を外れ値として除外した結果を示す。外れ値を除外することにより、誤差の最大値が大幅に小さくなっていることおよび、図 3 に示した測位位置の分布から、GPS の測位値には誤差が極端に大きい外れ値が含まれていることが確認できる。以降の実験では、GPS 測位の外れ値は 2.2.2 で提案した手法により除外できるものとし、表 1(b) に示した、各解の種類における水平方向の誤差の最大値と高度方向の誤差の最大値を、それぞれ円柱のパラメータ $r(p), h(p)$ とする。

ただし、以降の実験では、カメラと GPS 受信機は移動しているため、 $r(p), h(p)$ の決定

表 1 解の種類ごとの誤差の最大値 [mm]

Table 1 Maximum errors for each solution type [mm].

解の種類	(a) 全データ		(b) 外れ値除外後	
	水平方向	高度方向	水平方向	高度方向
RTK-fix	793	677	29	41
RTK-float	12792	20424	3778	9504

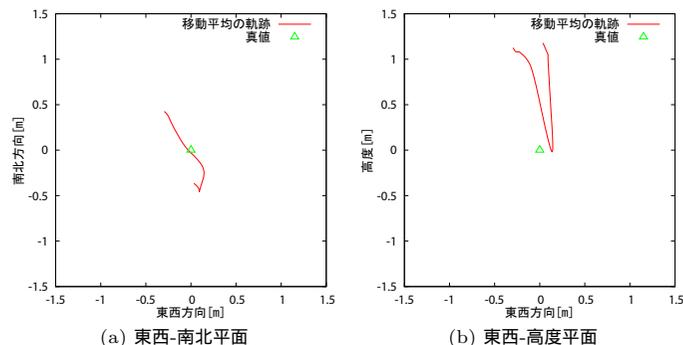


図 4 RTK-float における移動平均の軌跡
Fig. 4 Trace of the moving average in RTK-float

にはこの移動量を考慮する必要がある。すなわち、本研究で用いる式 (1) のエネルギー関数は、1 フレーム以下の精度での画像と GPS の同期を扱えないため、画像の取得と GPS 測位の時刻には、0.5 フレーム分のずれが生じる可能性がある。ここでは、実際の円柱のサイズとして、表 1(b) に示した水平方向、高度方向それぞれの値に、0.5 フレームの間に人が動く距離として 37mm と 5mm を足した値を用いる。^{*1}

3.1.3 GPS 測位誤差におけるバイアス成分の検証

ここでは、定点観測の結果から、短時間の観測における GPS の測位誤差が平均値 0 の正規分布では適切に近似できないことを示す。図 4 は、本実験の定点観測において、最も長く RTK-float が続いた期間の、測位位置の移動平均の軌跡である。ここで、移動平均の範囲は、後述する実験における動画の長さを考慮し、30 秒とした。同図より、GPS の測位にはバイアス誤差があることが確認できる。従って、平均値 0 の正規分布をこの観測に用いた場合には、30 秒程度の狭区間最適化において最大 1m 程度のバイアス誤差の影響を受けると考えられる。

3.2 動画と GPS 測位値を用いたカメラ位置・姿勢推定

3.2.1 実験条件

本実験では、ワイドレンズ (Sony VCL-HG0758) を取り付けられたビデオカメラ (Sony DSR-

*1 後述する実験では、人が手に持ったカメラで歩行中に撮影された 15fps の動画を用いる。このとき、人の歩行速度を時速 4 km とすれば 0.5 フレーム間の移動量は 37mm となる。また、上下運動の振幅を 15 cm とすれば 0.5 フレーム間の移動量は 5mm となる。

PD-150) を用いて約 70m の距離を東から西へ直進しながら、手持ちで撮影した動画 (解像度 720 × 480 画素、プログレッシブ撮影、15 fps、1110 フレーム) と RTK-GPS 受信機 (TOPCON GR-3) から得られた 1 秒間隔で計測された GPS 測位値を入力として用い、カメラ位置・姿勢の推定を行った。ただし、GPS 測位値は全て RTK-fix として取得され、これを本実験における真値として用いる。得られた GPS 測位値から後処理ソフトウェア (TOPCON Tools) を用いて、仮想的に GPS 衛星をマスクすることにより、外れ値を含む、信頼度の低い RTK-float のデータを作成し、これをすべての比較手法の入力として用いた。カメラと GPS 受信機は相対位置関係を固定し、カメラ座標系における GPS 受信機の位置 d およびカメラの内部パラメータはあらかじめキャリブレーション済みで既知とした。また、動画と GPS の測位値は手で開始時刻を同期させた。また、式 (4)、(5) で用いられる GPS 測位位置に関するペナルティの重みを $\omega = 10^{-8}$ 、式 (6) で用いる定数を $n = 70$ 、狭区間最適化の使用フレームを $l = 500$ に設定した。

3.2.2 比較対象

本実験では、提案手法における外れ値除外手法の有効性を確認するため、提案手法において外れ値除外を行う手法と行わない手法の推定結果の比較を行う。また、提案手法における GPS 測位位置に関するペナルティの有効性を確認するため、以下の手法とカメラ位置の推定精度を比較する。

手法 A: GPS 測位値を用いず、動画のみから推定を行う手法。

手法 B: GPS の誤差として正規分布を仮定し、GPS 測位の信頼度を考慮しない従来手法⁸⁾。

手法 C: GPS の誤差として正規分布を仮定し、正規分布の分散を GPS 測位の信頼度を考慮して変化させる従来手法⁹⁾。

手法 D: 提案手法 (外れ値除外なし)。

手法 E: 提案手法 (外れ値除外あり)。

ただし、手法 B、C の入力に対しては外れ値を手動で除外した。また、ここでは手法 A によって推定されるカメラ位置・姿勢を GPS 測地座標系で評価するため、第 1 フレームから第 30 フレームまでのカメラ位置・姿勢を画像上で三次元位置が既知の基準点を指定することによって与えた。これらの基準点は手法 B、C、および提案手法において特徴点の追跡処理の初期化のためにも使用した。

3.2.3 カメラ位置推定精度の定量的評価

各手法における、水平方向および高度方向の GPS 受信機の位置の推定結果と GPS の測位位置をそれぞれ図 5、図 6 に示す。ただし、提案手法における外れ値除外を行わない手法

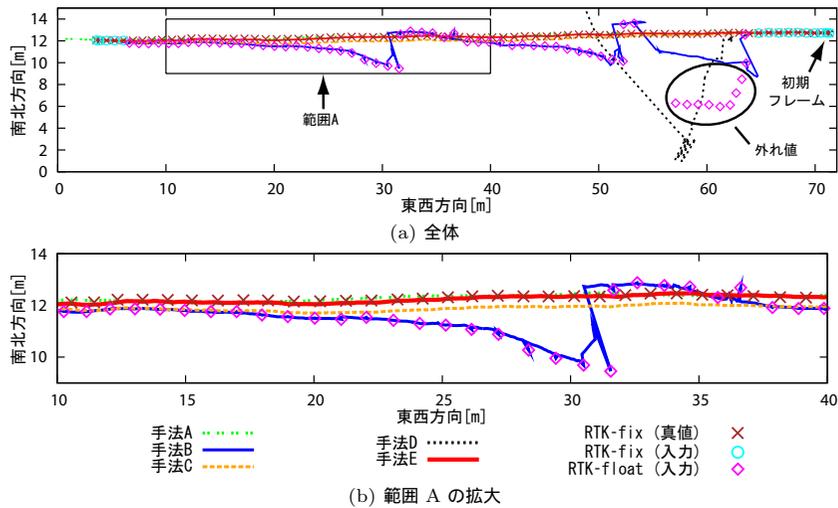


図 5 推定された GPS 受信機の位置 (水平方向)
 Fig. 5 Estimated GPS positions (horizontal).

では、外れ値の影響により第 316 フレームで特徴点の追跡に失敗し、以降のカメラ位置・姿勢は推定されなかったため、逐次的に推定された結果を表している。図 5、図 6 から、提案手法において外れ値除外を行わない場合には、推定結果が外れ値に大きく影響されているが、外れ値除外を行った場合にはそのようなことなく、推定が行われていることがわかる。逐次処理における、第 f フレームを先頭とする狭区間最適化後のフレーム f の再投影誤差 Φ_f および式 (11) に示した外れ値判定の閾値 $\bar{\Phi}_f + 2\sigma_f$ を図 7 に示す。同図から外れ値を含む狭区間最適化後では再投影誤差が非常に大きくなっていることと、すべての GPS 測位の外れ値を除外できていることが確認できる。

また、各手法における、真値との比較による、フレームごとの位置誤差を図 8 に、位置誤差の平均、標準偏差、最大値を表 2 に示す。図 8 より、動画のみを用いる手法 A は手法 C、および提案手法と比較して、位置誤差の増加率が大きいことから、カメラ位置・姿勢の推定結果が蓄積誤差に大きく影響されていることが分かる。これは、手法 A が動画のみを用いており、蓄積誤差を抑える外部指標を持たないためである。また、図 5、図 6 より、手法 B は信頼度の低い RTK-float の測位位置に大きく影響されていることが分かる。これは、手法 B が GPS 測位の信頼度を考慮せず、GPS の測位誤差は小さいと仮定しているた

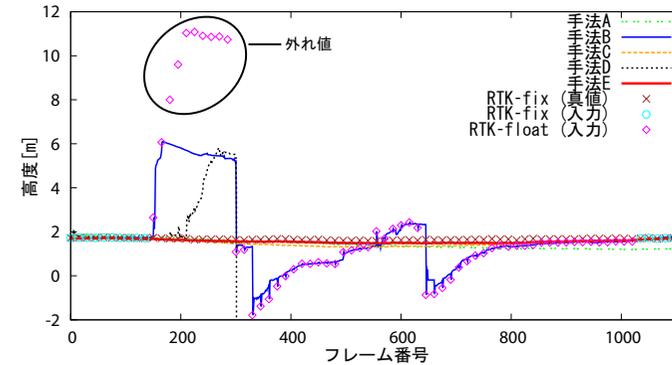


図 6 推定された GPS 受信機の位置 (高度方向)
 Fig. 6 Estimated GPS positions (altitude).

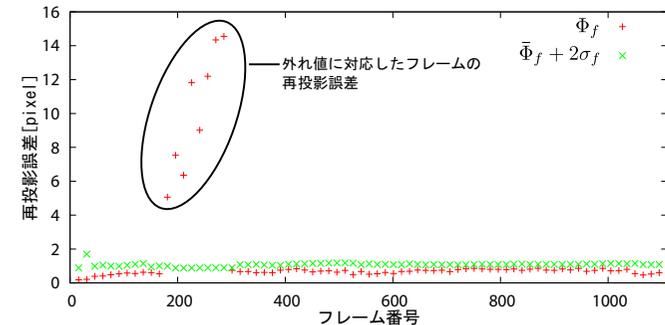


図 7 各フレームの再投影誤差
 Fig. 7 Reprojection errors for each frame.

めである。これに対して、手法 C、および提案手法 (手法 E) は GPS 測位の信頼度を考慮することにより、手法 B より RTK-float による誤差の影響が小さくなっている。これは、信頼度を考慮することで RTK-float の影響を抑えつつ、動画の初期フレームと最終フレーム付近に存在する RTK-fix の測位位置を用いて蓄積誤差を最小化しているためである。

ただし、手法 C では、提案手法と比較して RTK-float の影響がより大きく、推定されるカメラ位置が RTK-float の測位位置に引き寄せられている。これは、図 4 に示したバイアス誤差の影響であると考えられる。これに対して、提案手法では RTK-float の測位位置に大きく影響されることなく、カメラ位置が推定されている。また、有意水準 5% の t 検定に

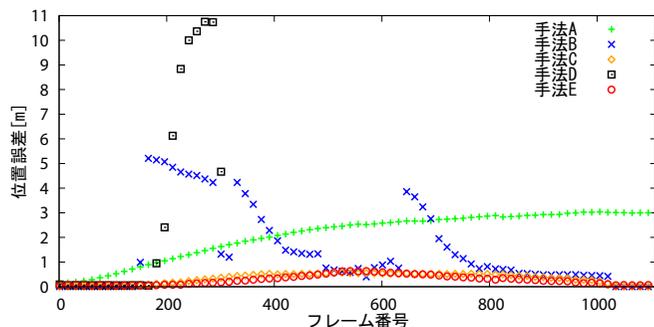


図 8 フレームごとの位置誤差

Fig. 8 Position errors for each frame.

表 2 位置誤差の比較 [mm]

Table 2 Comparison of position errors [mm].

手法	平均	標準偏差	最大値
手法 A	2109.6	915.8	3036.2
手法 B	1464.0	1590.5	5208.3
手法 C	334.9	211.6	574.5
手法 E	273.3	189.7	632.4

より、提案手法と手法 C のカメラ位置推定精度の平均に有意な差があることを確認した。

4. ま と め

本報告では、GPS と動画の併用によるカメラ位置・姿勢推定において、GPS 受信機の真の位置が GPS の測位位置を中心とする GPS 測位の信頼度に依存した一定の大きさの円柱内に存在することを仮定し、この仮定に基づくエネルギー関数を最小化することで、GPS 測位の信頼度が低い場合にも精度良くカメラ位置・姿勢の推定が可能な手法を提案した。また、GPS 測位の外れ値を再投影誤差を評価尺度として除外する手法を提案した。実験では、屋外環境で取得した動画と、外れ値を含む GPS の測位値を用いてカメラ位置・姿勢を推定し、従来手法との推定精度の定量的な比較を行った。実験の結果、GPS 測位の信頼度が低い場合において、提案手法は従来手法より精度良くカメラ位置を推定できることを確認した。このことから、本手法は三次元形状復元や自由視点画像生成などオフラインで高精度なカメラ位置・姿勢情報を必要とするアプリケーションへ適用できると考えられる。今後の課

題として、動画像と GPS の同期の自動化、GPS の解の種類以外の測位の信頼度に影響を与える要因の考慮などがあげられる。

謝辞 本研究の一部は科学研究費補助金(基盤研究(A), No.19200016)、総務省・戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)、文部科学省特別教育研究経費「アンビエント環境知能研究創出事業」による。

参 考 文 献

- 1) Pollefeys, M., Nistér, D., Frahm, J., Akbarzadeh, A., Mordohai, P., Clipp, B., Engels, C., Gallup, D., Kim, S., Merrell, P. et al.: Detailed real-time urban 3D reconstruction from video, *Int. J. of Computer Vision*, Vol.78, No.2-3, pp.143–167 (2008).
- 2) Pollefeys, M., VanGool, L., Vergauwen, M., Verbiest, F., Cornelis, K., Tops, J. and Koch, R.: Visual Modeling with a Hand-Held Camera, *Int. J. of Computer Vision*, Vol.59, No.3, pp.207–232 (2004).
- 3) Klein, G. and Murray, D.: Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces, *Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality*, pp.225–234 (2007).
- 4) 佐藤智和, 神原誠之, 横矢直和, 竹村治雄: マーカと自然特徴点の追跡による動画からのカメラ移動パラメータの復元, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol.J86-D-II, No.10, pp.1431–1440 (2003).
- 5) Bleser, G., Wuest, H. and Stricker, D.: Online camera pose estimation in partially known and dynamic scenes, *Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality*, pp. 56–65 (2006).
- 6) Agrawal, M. and Konolige, K.: Real-time localization in outdoor environments using stereo vision and inexpensive GPS, *Proc. Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.3, pp.1063–1068 (2006).
- 7) Schleicher, D., Bergasa, L.M., Ocana, M., Barea, R. and Lopez, E.: Real-time hierarchical GPS aided visual SLAM on urban environments, *Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.4381–4386 (2009).
- 8) 横地裕次, 池田 聖, 佐藤智和, 横矢直和: 特徴点追跡と GPS 測位に基づくカメラ外部パラメータの推定, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.47, No.SIG5(CVIM13), pp.69–79 (2006).
- 9) Anai, T., Fukaya, N., Sato, T., Yokoya, N. and Kochi, N.: Exterior orientation method for video image sequences with considering RTK-GPS accuracy, *Proc. Int. Conf. on Optical 3-D Measurement Techniques*, Vol.I, pp.231–240 (2009).
- 10) Maier, D. and Kleiner, A.: Improved GPS Sensor Model for Mobile Robots in Urban Terrain, *Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.4385–4390 (2010).