

マルチカメラシステムによる 全方位動画像からのカメラ外部パラメータの復元

佐藤 智和 池田 聖 横矢 直和

あらまし: 全方位型マルチカメラシステムを用いて取得した全方位動画像を基に, カメラブロックの位置・姿勢であるカメラ外部パラメータを推定する手法を提案する. 本稿ではまず, 三次元位置が既知の基準マーカと全方位画像から, PnP(Perspective n-Point) 問題を解くことにより, カメラ外部パラメータを推定する手法について述べる. 次に, 動画像中の基準マーカと自然特徴点を画像上で同時に追跡し逐次 PnP 問題を解くことで, 全方位動画像からカメラ外部パラメータを復元する手法について述べる. 実験では, 実際に全方位型マルチカメラシステムを用いてカメラブロックの外部パラメータを復元し, 定量的評価を行なう.

Extrinsic Camera Parameter Recovery of a Moving Omni-directional Multi-camera System

Tomokazu SATO Sei IKEDA Naokazu YOKOYA

Abstract: Recently, many types of omni-directional cameras have been developed and much attracted attention in a number of different fields. Especially, the multi-camera type of omni-directional camera has advantages of high-resolution and almost uniform resolution for any direction of view. In this paper, an extrinsic camera parameter recovery method for a moving omni-directional multi-camera system (OMS) is proposed. First, we discuss a perspective n-point (PnP) problem for an OMS, and then describe a practical extrinsic camera parameter recovery method from multiple image sequences obtained by an OMS. The proposed method is based on using the shape-from-motion and the PnP techniques.

1 はじめに

近年, 全方位を一度に撮影可能な全方位型カメラシステムが多数開発され, テレプレゼンスや遠隔ロボット操縦, ビデオサーベイランスなどの幅広い分野に応用されはじめている [1, 2, 3, 4, 5, 6]. これら全方位カメラのなかでも, 多数のカメラを放射状に配置することで一度に全方位を撮影する全方位型マルチカメラシステム (Omni-directional Multi-camera System, 以降 OMS)[4, 5, 6] は, カメラシステムの校正が難しい反面, 高解像度であることや, 視線方向によって解像度があまり変化しないという特長から, 注目され始めている. しかし従来, 各カメラの投影中心の不一致を考慮した統合的なカメラ外部パラメータの推定手法が提案されていないために, OMS の利用はテレプレゼンスなどのカメラパラメータを必要としない分野に限定されてき

た. そこで本稿では, OMS によって得られる全方位動画像からカメラブロックの位置・姿勢を表すカメラ外部パラメータを推定する手法について述べる.

まず, 単眼カメラにおけるカメラ外部パラメータの推定手法について述べる. 単眼カメラで撮影される静止画像において, 複数の基準マーカの三次元座標とその画像上の二次元座標の組から, カメラ外部パラメータを推定する問題は, PnP 問題 (Perspective n-Point problem) と呼ばれ, 現在までに多くの研究が成されている [7, 8, 9]. 一般に, PnP 問題は 6 点以上の基準マーカを画像上で観測できれば, 最小自乗法によって解くことができる [10]. しかし, 三次元位置が既知の基準マーカが常に画像フレーム内に撮影されている必要があるため, 広い範囲の移動を伴うカメラパラメータの復元には, 多数の基準マーカを広く配置することが必要となる.

一方で, 単眼カメラで撮影される動画像において, 画像上の自然特徴点を追跡することで, カメラの外部

パラメータを推定する Shape from motion と呼ばれる手法が研究されている [11, 12, 13]. また, これらを全方位カメラに適用する手法 [14, 15, 16] が複数提案されている. これらの手法では, 三次元位置が既知の基準マーカを必要としないが, 自然特徴点の誤追跡によるカメラパラメータの推定誤差が累積するために, 多くの画像を扱うことが困難であるという問題がある. また, これらの手法はカメラが一点透視投影であることを仮定しているため, 複数の投影中心を持つ OMS への適用は困難である.

そこで本稿では, まず校正済みの OMS の各カメラユニットの相対的な位置関係を利用して, カメラ外部パラメータを統合的に推定する手法を提案する. 加えて, 三次元位置関係が既知の基準マーカと自然特徴点を全方位動画像上で同時に追跡することで, 広範囲の移動を伴う長時間の全方位動画像においてもカメラ外部パラメータを安定に推定する手法を提案する. ただし, 本研究で扱う OMS は, 位置関係が固定された複数のカメラユニットで構成されており, カメラブロックの内部パラメータ (各カメラユニット間の位置・姿勢関係および各カメラユニットの内部パラメータ) は既知であるものとする. また, 基準マーカは, 全方位動画像の初期フレームおよび最終フレームの画像上で各 6 点以上が観測可能であるものとする.

以下, 2 章では, 三次元位置が既知の基準マーカと全方位を撮影した静止画像から, PnP 問題を解くことにより, カメラブロックのカメラ外部パラメータを推定する手法について述べる. 3 章では, 動画像中の基準マーカと自然特徴点を画像上で同時に追跡し逐次 PnP 問題を解くことで, 動画像からカメラ外部パラメータを復元する手法について述べる. 4 章では, 実際の OMS を用いた復元実験と定量的評価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 OMS における PnP 問題の解決

本章では, PnP 問題を解くことで, 全方位型マルチカメラシステム (OMS) のカメラ外部パラメータを復元する手法について述べる. ここでは, 各カメラユニットの内部パラメータおよび, カメラユニット間の相対的な位置・姿勢の関係は既に校正済みで既知であるものとする. また, 入力としてカメラユニット全体で合計 6 点以上の基準マーカの三次元位置および二次元位置が与えられるものとする.

以下では, まず, OMS のカメラ外部パラメータと基準マーカの投影誤差について定義を行なう. 次に, 定義した投影誤差を最小化することで, OMS のカメラ外部パラメータを推定する手法について述べる.

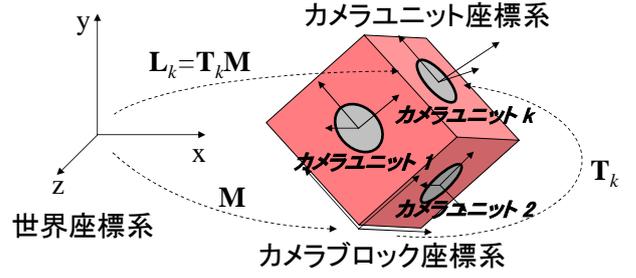


図 1: OMS における座標系の関係

2.1 カメラ外部パラメータの定義

まず, 本稿で扱う座標系について定義する. 図 1 に示すように, 一般に OMS はカメラブロックの特定の位置に固定された複数のカメラユニットから構成されている. 本稿では, OMS の位置・姿勢を表すカメラブロック座標系を設定し, 世界座標系からカメラブロック座標系への変換行列 M を, 位置 (r_1, r_2, r_3) ・姿勢 (t_1, t_2, t_3) の 6 パラメータを用いて以下のように定義する.

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{pmatrix} \mathbf{R}(r_1, r_2, r_3) & (t_1, t_2, t_3)^T \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ただし, \mathbf{R} は 3×3 の回転行列である. また, カメラブロック座標系から k 番目のカメラユニットのカメラユニット座標系への変換を, 同じく 4×4 の行列 T_k で表す. このとき, 世界座標系から k 番目のカメラユニットの座標系への変換行列を L_k とすれば, $L_k = T_k M$ である.

次に, 基準マーカの投影誤差について定義する. 以下では, 簡単のため各カメラユニットの焦点距離は 1 とする. このとき, 基準マーカ p の 3 次元座標 $S_p = (x_p, y_p, z_p, 1)$ と, その k 番目のカメラユニットの画像上への投影座標 (u_p, v_p) には, 以下の関係が成り立つ.

$$\begin{pmatrix} au_p \\ av_p \\ a \end{pmatrix} = L_k S_p = T_k M S_p, \quad (3)$$

ただし, a は媒介変数である. 一般に, 式 (3) によって求まる投影座標 (u_p, v_p) は, 基準マーカの検出誤差や量子化誤差の影響によって, 画像上での基準マーカの検出座標 (\hat{u}_p, \hat{v}_p) とは一致しない. 一般的な単眼カメラにおいては, この (\hat{u}_p, \hat{v}_p) と (u_p, v_p) の距離の二乗和

を評価尺度とし、最小化することでカメラパラメータを推定する手法が一般的に用いられている [13, 17, 18]. 本研究においても、これらの手法と同様に、各カメラユニットの画像上への投影誤差の和を評価尺度とし、誤差関数 E を以下のように定義する.

$$E = \sum_{k=1}^n \sum_{p \in \mathbf{F}_k} \{(u_p - \hat{u}_p)^2 + (v_p - \hat{v}_p)^2\} \quad (4)$$

ただし \mathbf{F}_k は、 k 番目のカメラユニットの画像上において観測可能な基準マーカの集合を、 n は OMS を構成するカメラユニットの数を表す.

2.2 投影誤差の最小化によるカメラ外部パラメータの推定

前節において誤差関数 E として定義した基準マーカの各画像面への投影誤差の和を最小化することで、自由度 6 のカメラ外部パラメータ \mathbf{M} を推定する. この問題は、非線形最小化問題となるため、最適な解を得るためには良い初期値が必要となる.

本研究ではまず、線形手法によって 12 自由度の \mathbf{M} を初期値として算出し、6 自由度への補正を行なった後に、最急降下法によって E を最小化する \mathbf{M} を算出する. 以下では、それぞれの手順について詳述する.

2.2.1 線形演算による初期値の算出

ここでは、 n 台のカメラに写る合計 j 個の基準マーカを統一的に扱いながら線形に PnP 問題を解くための手法について述べる. まず、世界座標系から k 番目のカメラユニットの座標系への変換行列 \mathbf{L}_k を 3 つの行ベクトル $(\mathbf{l}_{x_k}, \mathbf{l}_{y_k}, \mathbf{l}_{z_k})$ を用いて以下のように再定義する.

$$\mathbf{L}_k = \mathbf{T}_k \mathbf{M} = \begin{pmatrix} \mathbf{l}_{x_k} \\ \mathbf{l}_{y_k} \\ \mathbf{l}_{z_k} \end{pmatrix} \quad (5)$$

上式により、式 (3) は以下のように変形できる.

$$\begin{aligned} \mathbf{l}_{x_k} \mathbf{S}_p - \hat{u}_p \mathbf{l}_{z_k} \mathbf{S}_p &= 0, \\ \mathbf{l}_{y_k} \mathbf{S}_p - \hat{v}_p \mathbf{l}_{z_k} \mathbf{S}_p &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

このとき、行列 \mathbf{M} の各成分をパラメータベクトル $\mathbf{m} = (m_{11}, \dots, m_{14}, m_{21}, \dots, m_{24}, m_{31}, \dots, m_{34})^T$ で表せば、式 (6) は合計 j 点の基準マーカについて、以下のようまとめることができる.

$$\mathbf{A} \mathbf{m} = \mathbf{s}, \quad (7)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} s1(k_1) \mathbf{S}_1 & s2(k_1) \mathbf{S}_1 & s3(k_1) \mathbf{S}_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ s1(k_j) \mathbf{S}_j & s2(k_j) \mathbf{S}_j & s3(k_j) \mathbf{S}_j \\ s5(k_1) \mathbf{S}_1 & s6(k_1) \mathbf{S}_1 & s7(k_1) \mathbf{S}_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ s5(k_j) \mathbf{S}_j & s6(k_j) \mathbf{S}_j & s7(k_j) \mathbf{S}_j \end{pmatrix}, \mathbf{s} = \begin{pmatrix} -s4(k_1) \\ \vdots \\ -s4(k_j) \\ -s8(k_1) \\ \vdots \\ -s8(k_j) \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} s1(k_i) & s2(k_i) & s3(k_i) & s4(k_i) \\ s5(k_i) & s6(k_i) & s7(k_i) & s8(k_i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \hat{u}_i & 0 \\ 0 & 1 & \hat{v}_i & 0 \end{pmatrix} \mathbf{T}_{k_i}$$

$$(i = 0, \dots, j) \quad (9)$$

ただし、 k_i は i 番目の基準マーカが撮影されたカメラユニットの番号である.

式 (7) において、 \mathbf{m} 以外の全てのパラメータは既知である. よって、一般に基準マーカの数 j が 6 点以上あれば、 $|\mathbf{A} \mathbf{m} - \mathbf{s}|^2$ を最小化するパラメータベクトル \mathbf{m} は、一般化逆行列により以下のように線形に求めることができる.

$$\mathbf{m} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{s} \quad (10)$$

ただし、 \mathbf{S}_p の分布範囲が、カメラ間の距離に対して非常に大きい場合、 \mathbf{s} のスケールが \mathbf{A} に対して非常に小さくなるために、式 (10) は不安定となり、 \mathbf{m} が誤差に敏感となってしまふ. そこで、 \mathbf{m} の各要素を用いて、新たなパラメータベクトル $\mathbf{m}' : m'_{ij} = m_{ij}/m_{34}$ を定義し、 \mathbf{s} を 0 で近似する. これらを用い、 $\mathbf{A} \mathbf{m}' = \mathbf{0}$ を解くことで、スケールを除く 11 自由度を持つカメラパラメータの初期値 \mathbf{M} を安定に求めることができる. 次に、求めた \mathbf{M} の回転行列成分を正規化することでスケールを決定する.

2.2.2 カメラ外部パラメータの自由度の補正

前述の手法によって得られた 12 パラメータの \mathbf{M} は、正規直交基底を満たしておらずユークリッド復元では無いために、これを用いた三次元復元結果には歪みが生じる. そこで、これを 3 自由度の位置パラメータ (t_1, t_2, t_3) と 3 自由度の姿勢パラメータ (r_1, r_2, r_3) から成る 6 自由度のカメラパラメータに補正する. \mathbf{M} の定義である式 (1),(2) から、OMS の位置成分 (t_1, t_2, t_3) は容易に (m_{14}, m_{24}, m_{34}) として決定可能である. また、姿勢パラメータ (r_1, r_2, r_3) は回転行列に対応する残りの 9 パラメータ $\hat{\mathbf{R}}$ から、特異値分解を用いる手法 [19] によって以下のように最適な回転成分を計算する.

$$\mathbf{R}(r_1, r_2, r_3) = \mathbf{U} \text{diag}(1, 1, \det(\mathbf{UV}^T)) \mathbf{V}^T \quad (11)$$

ここで U と V はそれぞれ、 \hat{R} の左特異ベクトル行列、右特異ベクトル行列である。また、 $diag(x)$ は x を対角成分に持つ対角行列を表す。

2.2.3 投影誤差の非線形最小化

6 自由度に補正済みのカメラ外部パラメータ ($r_1, r_2, r_3, t_1, t_2, t_3$) から、式 (4) で定義した誤差関数を最急降下法によって最小化する。本手法では、各パラメータを以下のように更新し、収束するまで繰り返すことで、最適なパラメータの推定を行なう。

$$r_i \leftarrow r_i - l_{r_i} \frac{\delta E}{\delta r_i}, \quad t_i \leftarrow t_i - l_{t_i} \frac{\delta E}{\delta t_i} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (12)$$

ただし ($l_{r_1}, l_{r_2}, l_{r_3}, l_{t_1}, l_{t_2}, l_{t_3}$) は導関数のスケール項で、これらは各パラメータ更新の時点で E が最小となるように動的に決定する。この繰り返しの用いる初期値は、真値に近い値であると考えられるため、最適な OMS のカメラ外部パラメータ M を少ない繰り返しの回数で算出することができる。

3 特徴点追跡による OMS のカメラ外部パラメータの推定

本章では、動画像中の特徴点を追跡することで、移動する OMS のカメラ外部パラメータを推定する手法について述べる。本研究では、Shape from motion の分野で一般的に用いられる自然特徴点に加えて、三次元位置が既知の基準マーカを用いることで、世界座標系に対するカメラブロックの絶対位置を推定する。

本手法では、まず基準マーカと自然特徴点を用い、前節で述べた PnP 問題を各フレームで逐次解くことによって、カメラ外部パラメータの初期値を算出する。次に、各特徴点の投影誤差を動画像全体で最小化することによって、最適なカメラ外部パラメータを算出する。

以下では、まず、前節と同様に OMS の動画像における特徴点の投影誤差を定義する。次に、定義した誤差関数を最小化することで、動画像から OMS のカメラ外部パラメータを推定する手法について述べる。

3.1 全方位動画像における投影誤差の定義

前節において式 (4) で定義した各フレームにおける基準マーカの投影誤差 E を動画像に拡張する。本手法では、動画像の第 f フレーム ($f = 1, \dots, v$) における誤差関数を以下のように定義する。

$$E_f = \sum_{k=1}^n \sum_{p \in \mathbf{F}_{kf}} W_p \{ (u_{fp} - \hat{u}_{fp})^2 + (v_{fp} - \hat{v}_{fp})^2 \} \quad (13)$$

ただし、 W_p は特徴点 p の信頼度による重みであり、特徴点 p の投影誤差の分散の逆数として算出される [18]。また、 \mathbf{F}_{kf} は第 f フレームにおいて k 番目のカメラユニットで観測できる特徴点の集合である。

本研究では、全方位動画像全体での誤差関数 E_{total} を E_f を用いて以下のように表す。

$$E_{total} = \sum_{f=1}^v A_f E_f \quad (14)$$

A_f は、フレームの信頼度による重みであり、ここでは、基準マーカが存在しないフレームでは 1 を、基準マーカが存在するフレームでは 1 に対して十分に大きな値を設定する。これにより、基準マーカが存在するフレームでの推定結果を真値とみなすことができる。

一方、第 f_s フレームから第 f_e フレームまで追跡される特徴点 p の投影誤差の和は以下のように表される。

$$EF_p(f_s, f_e) = \sum_{f=f_s}^{f_e} \{ (u_{fp} - \hat{u}_{fp})^2 + (v_{fp} - \hat{v}_{fp})^2 \} \quad (15)$$

3.2 全方位動画像からのカメラ外部パラメータの推定

本節では、カメラ外部パラメータ M_f と自然特徴点の三次元位置 S_p の初期値を逐次的に算出し、投影誤差を動画像全体で最適化する手法について述べる。逐次処理では、統計的手法を用いることで、基準マーカと自然特徴点を動画像上でロバストに追跡し、前節で述べた PnP 問題を各フレームで解くことで、 M_f と S_p の初期値を逐次推定する。動画像全体での最適化では、逐次処理で得られる初期値を用い、前節で定義した誤差関数 E_{total} を非線形最適化の手法によって最小化することで、カメラ外部パラメータの最適化を行なう。本節で述べる手法は、我々が従来提案した、単眼動画像からのカメラ外部パラメータ推定手法の拡張である [18]。

3.2.1 特徴点追跡によるカメラ外部パラメータの逐次推定

以下では、2 章で述べた PnP 問題を各フレームで解くことで、OMS のカメラ外部パラメータを逐次推定する手法について述べる。本手法では、新たな自然特徴点を自動で検出し、三次元位置が既知の特徴点と未知の特徴点を同時に追跡することで、三次元位置が未知の特徴点の三次元位置を推定・更新する。これにより、多数の自然特徴点の三次元位置を推定し、カメラ外部パラメータの推定に用いる。

以下では、第 f フレームにおける逐次処理について詳述する。

- (a) 各カメラ画像内での特徴点追跡: 基準マーカは、標準的なテンプレートマッチングの手法を用いて、自然特徴点の三次元位置が精度良く推定されるまでの一定フレームの間、自動で追跡する。自然特徴点は、Harris オペレータ [20] により追跡の容易な画像特徴を検出して特徴点の候補位置とし、ロバスト推定 [21] によって誤追跡を検出しながら自動で追跡する。本ステップにおける特徴点追跡は、それぞれのカメラユニットの画像内でのみ行なう。
- (b) カメラ外部パラメータの推定: 前章で述べたカメラ外部パラメータの推定手法を用いることで、ステップ (a) で追跡された特徴点の画像上の座標と三次元座標から、カメラブロックのカメラ外部パラメータ M_f を推定する。ここでは、式 (13) で定義した誤差関数 E_f を用いることで、各特徴点の信頼度を考慮したカメラパラメータの算出を行なう。
- (c) カメラ画像間での特徴点追跡: ステップ (a) の追跡処理において、画像からのフレームアウトによって、追跡が失敗した自然特徴点について、他のカメラ画像への追跡処理を行なう。ここでは、ステップ (b) で得られたカメラ外部パラメータ M_f を用い、各カメラユニットへの座標変換行列 $L_{kf}(= T_k M_f)$ によって自然特徴点の三次元位置を全てのカメラユニットの画像上に投影する。ここで、各画像への投影位置の周辺に Harris オペレータにより算出される特徴点の候補が存在する場合には、その点を追跡位置とする。候補位置が存在しない場合には、その特徴点を削除する。
- (d) 自然特徴点の三次元位置の推定: 第 f フレームまで追跡されている全ての自然特徴点について、 $EF_p(fs(p), f)$ を最小化することで自然特徴点の三次元位置 S_p を毎フレームで推定・更新する。ただし、 $fs(p)$ は自然特徴点 p が最初に検出されたフレーム番号である。
- (e) 自然特徴点の信頼度の算出: 自然特徴点の画像上の追跡誤差をガウス分布で近似することにより、特徴点 p の信頼度 W_p を再投影の誤差の分散の逆数として定義し算出する。この信頼度は、毎フレーム更新する。
- (f) 自然特徴点の追加と削除: 特徴点の信頼度やテンプレート間の誤差などの複数の評価尺度を用いて、自然特徴点の追加・削除を自動的に行う [18]

上述の手法を、初期フレームから最終フレームまで繰り返すことで、全方位動画像から OMS のカメラ外部パラメータの初期値を推定することができる。

3.2.2 動画像全体での最適化

式 (14) に示した誤差関数 E_{total} を、最急降下法によって最小化することで、前述の手法によって推定されたカメラ外部パラメータ $M_f(f = 1, \dots, v)$ と自然特徴点の三次元位置 S_p を最適化する。ここでは、2.2.3 項において述べた最適化の手法を全ての動画像のフレームに適用することで最適化を行なう。ただし、ここでは、自然特徴点の三次元位置 $S_p = (x_p, y_p, z_p, 1)$ もパラメータであり、これらは導関数 $(\frac{\delta E_{total}}{\delta x_p}, \frac{\delta E_{total}}{\delta y_p}, \frac{\delta E_{total}}{\delta z_p})$ を用いることで、カメラの外部パラメータと同様の最適化処理を行なう。

誤差関数 E_{total} が収束するまで最適化することで、最適なカメラ外部パラメータと自然特徴点の三次元位置が推定される。この最適化は非線形最小化問題となるが、初期値が真値に近ければ解は大域最小解に収束しやすくなり、また高速に求めることができる。

4 実験

提案手法を用いてカメラ外部パラメータを推定し、定量的評価を行なう。本章ではまず、2章で述べた PnP の解法を用い、計算機シミュレーションによって定量的にカメラ外部パラメータの推定精度を評価する。次に、実環境において、実際に全方位動画像からカメラ外部パラメータを復元し、真値と比較することで提案手法の有効性を確認する。

本実験では、計算機シミュレーション・実環境での実験共に、PointGrayResearch 社製の全方位型マルチカメラシステム Ladybug[22] を用いた。図 2 に示すように、Ladybug には水平方向に 5 つ、上向きに 1 つの合計 6 つのカメラユニットが放射状に配置されており、各カメラユニットはそれぞれ 768×1024 画素の解像度の画像を秒間 15 枚撮影可能である。また Ladybug によって、全天球の 75% の視野を一度に撮影可能である。本実験において、各カメラの内部パラメータおよびカメラ間の位置・姿勢の関係は、マーカボードとレーザ距離計測機器を用いた手法 [6] によって、あらかじめ測定した。この測定結果に基づく各カメラの視錐台を図 2(b) に示す。このキャリブレーション結果から、水平方向のカメラユニット間の距離は $40 \pm 2\text{mm}$ 、また垂直方向の距離は $46 \pm 4\text{mm}$ であった。

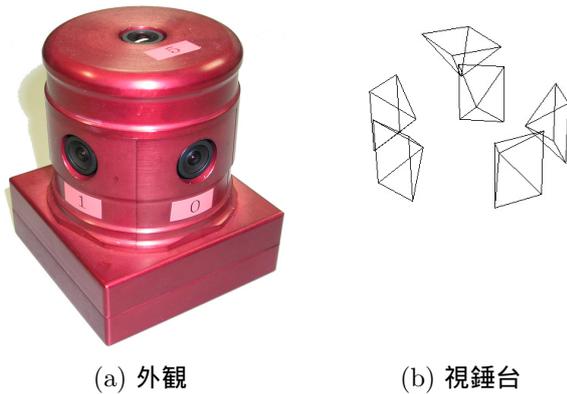


図 2: 全方位型マルチカメラシステム”Ladybug”

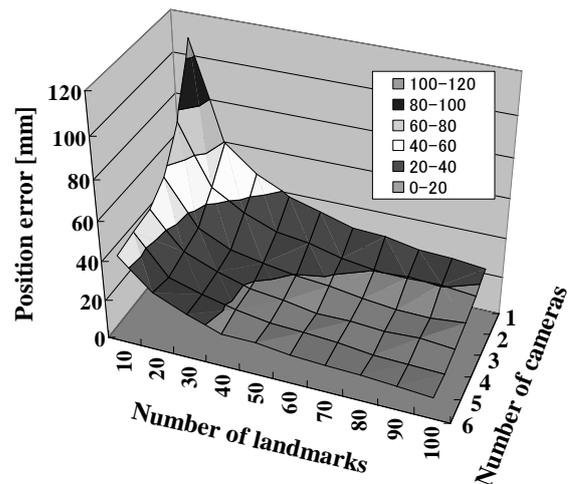
4.1 計算機シミュレーションによる PnP 問題の定量的評価実験

本シミュレーションでは、2章で述べた PnP 問題の解法によるカメラ外部パラメータの推定精度について、定量的評価を行なう。本実験では、仮想空間内で、実物と同じパラメータを持つ仮想 Ladybug を固定し、その周囲半径 50m から 100m の間に、基準マーカをランダムに配置した。これらの基準マーカは、仮想 Ladybug の各カメラ画像上に投影された後に、検出誤差としてガウスノイズが付加され、更に画素単位に量子化される。本実験では、ガウスノイズとして、標準偏差が 2.0 画素のものを用いた。

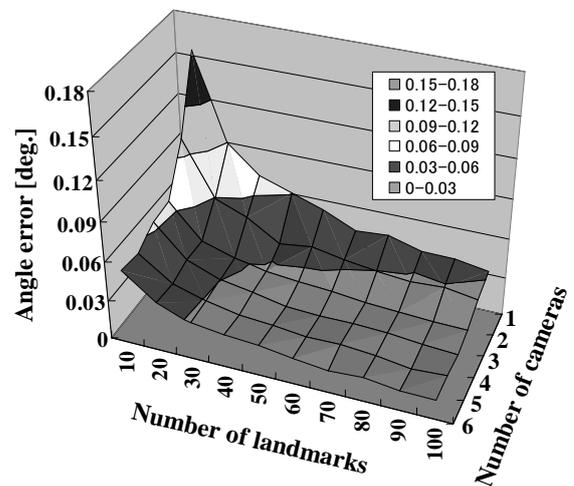
このような仮想環境内で、仮想 Ladybug において利用するカメラユニットの数、および基準マーカの数を変化させながら、2章で述べた手法によってカメラ外部パラメータを推定し、カメラ位置と姿勢に関して、真値との誤差を測定した。図 3 (a), (b) に測定されたカメラ位置と姿勢の誤差を示す。同図から、(a), (b) 共に、カメラの数と基準マーカ数の増加に伴って、誤差が単調減少していることが確認できる。特に、基準マーカ数が一定でも、カメラの数が増加すれば推定精度が向上することから、PnP 問題において、単眼カメラに比べて、OMS を用いることが有利であることが確認できる。

4.2 実環境における実験

3章で述べた手法の有効性を確認するため、Ladybug を用いて実環境を全方位動画として撮影し、実験を行なった。本実験においては、入力として図 4 に示す実環境をそれぞれ 450 フレームから成る 6 つの動画画像系列として撮影した。また、合計 89 点の自然特徴



(a) 位置の推定誤差



(b) 姿勢の推定誤差

図 3: カメラ位置・姿勢の推定誤差 (計算機シミュレーション)

をレーザ距離計測機器 (Leica TCR1105XR) を用いて計測し、基準マーカとして用いた。基準マーカの画像上の位置は、初期フレームと最終フレームの画像上でのみ手動で与えた。

まず、3章で提案した手法により、カメラ外部パラメータを復元した。本実験において、自然特徴点は各フレームの画像上で 6 つのカメラに対して平均 440 点が自動で追跡された。また、自然特徴点の平均投影誤差は 2.1 画素であった。Ladybug のカメラユニット 1 に関するカメラ外部パラメータの復元結果と自然特徴点の三次元位置の復元結果を図 5 に示す。同図において、曲線はカメラユニットの移動の軌跡を、錘台は 20 フレーム毎のカメラユニットの姿勢を表す。また、黒

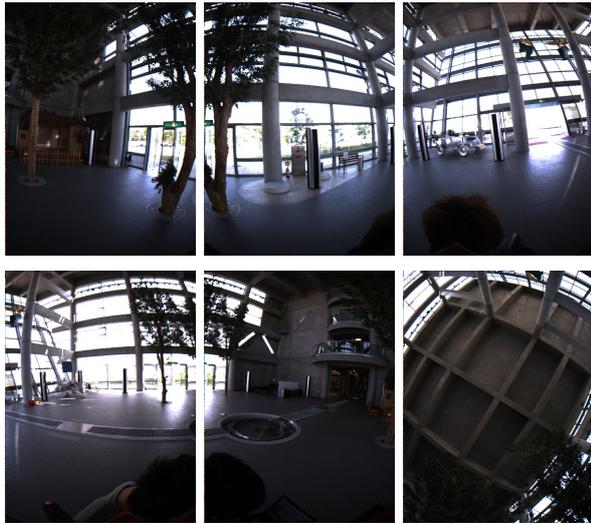


図 4: 入力に用いた全方位動画の 1 フレーム

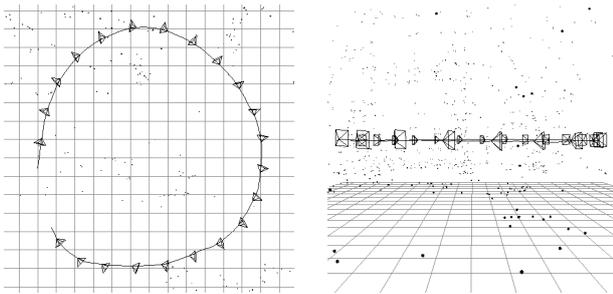
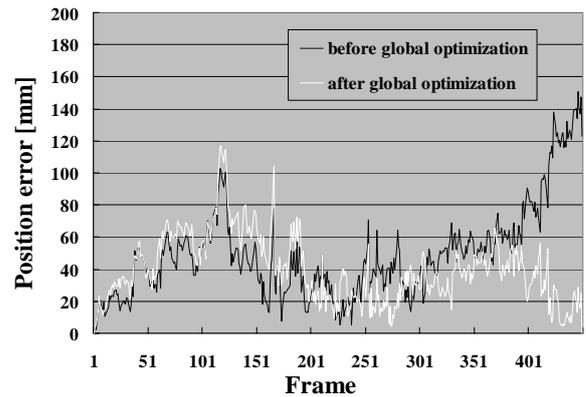


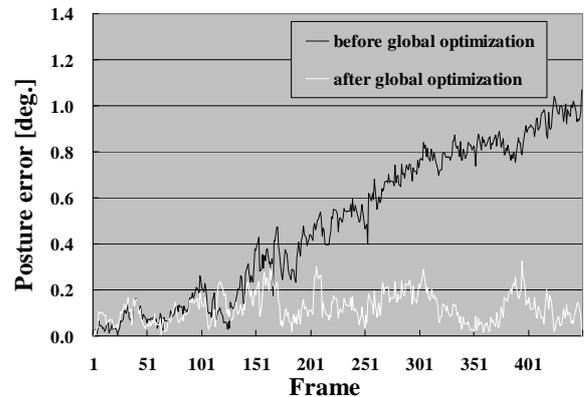
図 5: カメラ外部パラメータと自然特徴点の三次元位置の復元結果

点は復元された自然特徴点の三次元位置である。本実験で復元されたカメラパスの長さは 29m であり、パスの不連続や分断は見られなかった。

次に、復元されたカメラ外部パラメータを真値と比較することで定量的な評価を行なった。ここでは、基準マーカを全てのフレームの画像上で手動で指定し、2章で提案した手法を用いて全てのフレームでカメラ外部パラメータを算出することで、真値を作成した。図 6 に、各フレームにおけるカメラ位置と姿勢に関する推定誤差を示す。同図中、全体最適化前の平均誤差は、位置・姿勢に関してそれぞれ 50mm, 0.49° であり、全体最適化後は、それぞれ 40mm, 0.12° となった。これらの結果から、全体最適化によって、累積的なカメラパラメータの推定誤差が低減されていることが確認できる。また、実験により得られた誤差値は、環境のスケールに対して十分に小さいものであるが、中間フレーム



(a) 位置の推定誤差



(b) 姿勢の推定誤差

図 6: カメラ位置・姿勢の推定誤差 (実環境)

などで基準マーカを指定することで、より精度の高いカメラパラメータの復元を行なうことが可能である。

5 まとめ

全方位型マルチカメラシステム (OMS) によって得られる全方位動画から、カメラ外部パラメータを推定する手法について提案した。本稿では、まず、OMS における PnP 問題とその解法について述べた。次に、基準マーカと自然特徴点を併用し、各フレームで PnP 問題を解くことで、全方位動画からカメラ外部パラメータを精度良く推定する手法を提案した。

実験では、計算機シミュレーションによって、提案した PnP 問題の解法による、カメラ外部パラメータの推定精度について検証し、OMS を用いたカメラパラメータの推定が、単眼カメラに比べて有利であることを示した。加えて、実環境を用いて実験を行ない、提案手法によって精度良くカメラ外部パラメータを推定できることを示した。今後、提案手法で推定したカメラ外部パラメータを用い、マルチベースラインステレオ

法 [23] を適用することで、屋外環境の三次元モデル化を行なう予定である。

参考文献

- [1] K. Miyamoto: "Fish Eye Lens," *Jour. of Optical Society of America*, Vol. 54, No. 2, pp. 1060–1061, 1964.
- [2] K. Yamazawa, Y. Yagi and M. Yachida: "Omnidirectional Imaging with Hyperboloidal Projection," *Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 2, pp. 1029–1034, 1993.
- [3] S. K. Nayar: "Catadioptric Omnidirectional Cameras," *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 482–488, 1997.
- [4] J. Shimamura, H. Takemura, N. Yokoya and K. Yamazawa: "Construction and Presentation of a Virtual Environment Using Panoramic Stereo Images of a Real Scene and Computer Graphics Models," *Proc. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol. IV, pp. 463–467, 2000.
- [5] H. Tanahashi, K. Yamamoto, C. Wang and Y. Niwa: "Development of a Stereo Omni-directional Imaging System(SOS)," *Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, pp. 289–294, 2000.
- [6] S. Ikeda, T. Sato and N. Yokoya: "High-resolution Panoramic Movie Generation from Video Streams Acquired by an Omnidirectional Multi-camera System," *Proc. IEEE Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent System*, pp. 155–160, 2003.
- [7] R. Horand, B. Conio and O. Le Boulleux: "An Analytic Solution for the Perspective 4-Point Problem," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 47, pp. 33–44, 1989.
- [8] J. S. C. Yuan: "A General Photogrammetric Method for Determining Object Position and Orientation," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 5, No. 2, pp. 129–142, 1989.
- [9] R. Krishnan and H. J. Sommer: "Monocular Pose of a Rigid Body Using Point Landmarks," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 55, pp. 307–316, 1992.
- [10] R. Klette, K. Schluns and A. Koschan Eds.: *Computer Vision: Three-dimensional Data from Image*, Springer, 1998.
- [11] P. Beardsley, A. Zisserman and D. Murray: "Sequential Updating of Projective and Affine Structure from Motion," *Int. Jour. of Computer Vision*, Vol. 23, No. 3, pp. 235–259, 1997.
- [12] C. Tomasi and T. Kanade: "Shape and Motion from Image Streams under Orthography: A Factorization Method," *Int. Jour. of Computer Vision*, Vol. 9, No. 2, pp. 137–154, 1992.
- [13] M. Pollefeys, R. Koch, M. Vergauwen, A. A. Deknuydt and L. J. V. Gool: "Three-dimensional Scene Reconstruction from Images," *Proc. SPIE*, Vol. 3958, pp. 215–226, 2000.
- [14] J. Gluckman and S. Nayer: "Ego-motion and Omnidirectional Cameras," *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision*, pp. 999–1005, 1998.
- [15] M. Etoh, T. Aoki and K. Hata: "Estimation of Structure and Motion Parameters for a Roaming Robot that Scans the Space," *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision*, Vol. I, pp. 579–584, 1999.
- [16] C. J. Taylor: "VideoPlus," *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp. 3–10, 2000.
- [17] R. Szeliski and S. B. Kang: "Recovering 3D Shape and Motion from Image Streams Using Non-linear Least Squares," *Jour. of Visual Communication and Image Representation*, Vol. 6, No. 1, pp. 10–28, 1994.
- [18] T. Sato, M. Kanbara, N. Yokoya and H. Takemura: "Dense 3-D Reconstruction of an Outdoor Scene by Hundreds-baseline Stereo Using a Hand-held Video Camera," *Int. Jour. of Computer Vision*, Vol. 47, No. 1-3, pp. 119–129, 2002.
- [19] K. Kanatani: *Statistical Optimization for Geometric Computation: Theory and Practice*, Elsevier Science, 1998.
- [20] C. Harris and M. Stephens: "A Combined Corner and Edge Detector," *Proc. Alvey Vision Conf.*, pp. 147–151, 1988.
- [21] 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, No. 6, pp. 381–395, 1981.
- [22] Point Gray Research Inc.: "Ladybug," <http://www.ptgrey.com/products/ladybug/>.
- [23] M. Okutomi and T. Kanade: "A Multiple-baseline Stereo," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 15, No. 4, pp. 353–363, 1993.