ステレオ時系列画像処理に基づく 両眼・モーションステレオ統合法

古賀 由紀夫^{1,†1,a)} 鹿嶋 雅之^{1,b)} 佐藤 公則^{1,c)} 渡邊 睦^{1,d)}

概要:ステレオ時系列画像処理に基づく両眼・モーションステレオの統合法を提案する. 本報告では、両眼・モーションステレオ各々の基礎行列間の関係式を計算することによりカメラ位置関係 の変化検出を行う手法の定式化を行い、計算機シミュレーションによりその有効性を確認した結果を中心 に述べる.

カメラ位置関係の変化検出は、2台の単眼ロボットによる高精度な3次元復元に有効である.

キーワード:ステレオ時系列画像,オプティカルフロー,基礎行列,3次元復元,カメラキャリブレーション

Binocular and Motion Stereopsis Integration Method by Processing Stereo Image Sequences

Abstract: A binocular and motion stereopsis integration method by processing stereo image sequences is proposed. This paper focusing describes on a formulization of the automatic detection of finding the change of spatial relationship of cameras by calculating the fundamental matrices of binocular and motion stereo, and its usefulness is checked by computer simulation.

This is useful to calculate highly precise 3-D reconstruction by two monocular camera robots.

Keywords: Stereo Image Sequences, Optical Flow, Fundamental Matrix, 3D-Reconstruction, Camera Calibration

1. はじめに

1.1 概要

一般に、カメラを使用する場合には、カメラパラメータ の設定が必要である.カメラパラメータには、焦点距離、 画像の原点の位置、歪みパラメータといった内部パラメー タと、カメラの位置・姿勢情報などの外部パラメータがあ る.内部パラメータは一度求めておくと使用時は不変であ るが、外部パラメータは使用時に変化する場合がある.外 部パラメータが変化すると、その後の3次元復元の精度に

^{b)} kashima@ibe.kagoshima-u.ac.jp

影響を与えるため、外部パラメータの変化を検出すること は重要である.

また,ステレオカメラは,左右カメラの位置関係が固定 された一体型ステレオカメラと,単眼カメラを組み合わせ た非一体型ステレオカメラに大別される.

非一体型ステレオカメラによるステレオ視の例として,

- 単眼カメラを有する2台のロボットが協調動作を行う 場合
- 一体型ステレオカメラが設置できない基線長が長い大型の移動体の場合

などがある.

ー体型ステレオカメラはカメラの外部パラメータが不変 であり、高精度な3次元復元結果が得られる.しかし、非 ー体型ステレオカメラでは、特徴点の対応付けに必要な十 分な視差を得にくい、使用途中でカメラの位置関係が変化 するとカメラの外部パラメータが変化する、といった問題 点がある.従来研究では、カメラの外部パラメータの変化

鹿児島大学大学院理工学研究科(工学系) Graduate School of Science and Engineering (Enginneing Course), Kagoshima University, 1-21-40, Korimoto, Kagoshima-shi, 890-0065, Japan
 現在,無所属

Presently with Independence

a) ykoga@hh.iij4u.or.jp

c) kimi@ibe.kagoshima-u.ac.jp

d) mutty@ibe.kagoshima-u.ac.jp

に応じて動作するものの,変化自体を検出することは行っていない.

本研究では、非一体型ステレオカメラを想定し、使用途 中でのカメラの外部パラメータの変化(カメラの位置関係 の変化)を、両眼・モーションステレオで得られる基礎行 列間の関係式の値を使用して自動検出を行う手法を提案す る.本提案手法について計算機シミュレーションを行い、 計算機シミュレーション上は、+0.001[°]のカメラ角度変 化を自動検出可能であることを確認した.

1.2 従来技術と課題

非一体型ステレオカメラのカメラパラメータの推定手法 として、Structure from Motion (SfM)を用いた手法が知ら れている. SfM は、あるシーンをカメラの視点を変えなが ら撮影した複数枚の画像から、そのシーンの3次元形状と カメラの位置を同時に復元する手法である. SfM を行うプ ログラムとしては、"Bundler"[1]がある.

また,非一体型ステレオカメラのカメラの外部パラメー タ推定手法としては以下のような手法がある.

単眼カメラを有する2台のロボットが協調動作を行う場合の例としては, 鷲見[2]堂前ら[3]の手法がある.

鷲見・堂前らは、2台のロボットアームに取り付けられ た単眼カメラを使用し、レーザスリット光を照射して得ら れた特徴点の位置関係から、ケーブルの3次元形状の復元 を行っている.しかし、2台のロボットアームのキャリブ レーションはカメラではなくロボット側で行っている.

一体型ステレオカメラが設置できない基線長が長い大型の移動体の場合の例としては, Scale-Invariant Feature Transform (SIFT)に基づく手法 [4] や,目黒ら [5],早川ら [6],酒井ら [7]の手法がある.

一般に,基線長の変化に伴うステレオ画像間の変形にロ バストな対応付け手法として,SIFTに基づく手法がよく知 られている.SIFTに基づく手法は,特長ベースの対応付 け手法であるため,対応点数が少なかったり,ある領域に 偏っていたりする.SIFTで得られた対応点は,カメラパラ メータを推定するには十分であるが,物体の詳細な立体構 造を復元するには不十分である.しかしこの手法では,特 徴点対応付けに処理時間がかかるという問題がある.

目黒らは、GPS と各種センサの複合(GPS/DR 複合)に より計測される正確な位置姿勢を基にエピポーラ線を算出 し、それを利用した幾何学的拘束により高精度なステレオ マッチングを実現している.さらにカメラは横方向の視野 を大きく取れる OmniDirectional Vision system(ODV)を 利用し、進行方向側面に存在する対象物に対しても長く基 線長を設定することを可能にしている.しかしこの手法で は、カメラの基線長変化は考慮しているが角度変化は考慮 していない.

早川らは、任意の非剛体運動を行う物体を運動するカメ

ラから観測した場合に成り立つ多視点幾何で基礎行列をテ ンソルとして扱うことにより、3次元形状復元を行うこと ができるとしている.しかしこの手法では、カメラは並進 運動としており角度変化は考慮していない.

酒井らは、まず、SIFT に基づく特徴ベースマッチング を用いてステレオ画像間の対応付けを行い、得られた対 応点から各視点のカメラパラメータを推定する.次に、求 めたカメラパラメータを用いてステレオ画像を平行化し、 Scaled Window Phase-Only Correlation (SW-POC)に基づく 対応付け手法を用いることで、ステレオ画像間の変形にロ バストな対応付けを実現し、汎用デジタルカメラを用いた 移動撮影による2視点の画像から、高精度かつ高密度な3 次元復元を行っている.しかしこの手法では、特徴点対応 付けに処理時間がかかるという問題がある.

上記いずれの場合も、カメラの外部パラメータの変化に 応じて動作するものの、変化自体を検出することは行って いない.本研究では、非一体型ステレオカメラを用いた際 に生じるカメラ位置関係の変化を自動検出することを目的 の一つとする.カメラ位置関係の変化検出ができれば、そ の時点でカメラ位置関係の修正が可能となる.

以下,2章では,提案手法の概要について述べ,カメラ 位置関係変化を,両眼・モーションステレオの基礎行列間 の関係式を計算することにより検出する手法について詳述 する.3章では提案手法の有効性を確認するために行った 実験(計算機シミュレーション)を示し,4章では3章の 実験結果について考察を行い,最後に5章で本報告をまと める.

2. 両眼・モーションステレオ統合法

2.1 アルゴリズム

提案手法の概念図を図1に,提案手法のブロック図を図 2に示す.

図1において、 $x_L(t)$ は時刻tにおける左画面座標値、 $x_R(t)$



Fig. 1 Concept Figure of the Proposal Technique.



Fig. 2 Block diagram of the Proposal Technique.

は右画面座標値, $F_B(t)$ は両眼ステレオの基礎行列, $F_L(t)$ は左モーションステレオの基礎行列, $F_R(t)$ は右モーション ステレオの基礎行列を示す. $x_L(t)$, $x_R(t)$, $F_B(t+1)$, $F_L(t)$, $F_R(t)$ を使用して3次元復元を行い,また, $x_L(t)$, $F_B(t)$, $F_L(t)$, $F_R(t)$ を使用してカメラの位置関係変化を自動検出 する.

図 2 を説明する. (a) 左右画像を同期入力する(時刻 t, t+1). (b) 次に,左右画像の SIFT 特徴量を抽出する. (c) 求 めた左右画像の SIFT 特徴量を使用して時刻 t, t+1 間での 特徴点対応付けを行い,オプティカルフローを計算する. (d) 次に,RANSAC により基礎行列を求め,外れ値を除去 することにより,オプティカルフローのアウトライアを除 去する. (e) 次に,消失点推定残差法 [8] を用いて,SIFT 特 徴量を静止物体のものと移動物体のものに分離する. (f) 次 に,静止物体の SIFT 特徴量を使用して,左右モーションス テレオ画像の基礎行列 $F_L(t)$, $F_R(t)$ を計算する [9]. (g) 計 算された $F_L(t)$, $F_R(t)$ を分解し [10],回転行列 $R_L(t)$, $R_R(t)$ と並進ベクトル $t_L(t)$, $t_R(t)$ を計算する. (h) 得られた $R_L(t)$, $R_R(t) と t_L(t)$, $t_R(t)$ を使用して, それぞれ 3 次元復元(左 右それぞれのカメラから特徴点までの距離計測)を行う. (i) 更に,左右モーションステレオのオプティカルフローの長さを求めておき,静止物体でフロー長さが基準範囲内の(すなわち等距離と考えられる)フロー始点(SIFT 特徴 点)を求め,SIFT 特徴量を使用して時刻 t+1の左右画像間の特徴点対応付けを行う.(j)両眼ステレオ画像の基礎行列 $F_B(t+1)$ を計算する[11].(k)計算された $F_B(t+1)$ を分解 し,(l)3次元復元を行う.(m)また, $F_B(t) \ge F_L(t)$, $F_R(t)$ の間で成立する関係式の値を計算し,カメラ位置関係(カ メラ角度)の変化を自動検出する.(n)両眼ステレオ画像 から得られた3次元復元結果を統合し,3者の結果の一致したものを出力する.

2.2 カメラ位置関係の変化検出方法の定式化

時刻 t,t+1 の両眼ステレオ画像間と時刻 t,t+1 のモーションステレオ画像間の基礎行列には,以下のような式が成立する.

| $x_L(t)^T F_B(t) x_R(t) = 0$ | (1) |
|------------------------------|-----|
|------------------------------|-----|

$$x_L(t+1)^T F_B(t+1) x_R(t+1) = 0$$
(2)

$$x_L(t)^T F_L(t) x_L(t+1) = 0$$
(3)

$$x_R(t)^T F_R(t) x_R(t+1) = 0$$
(4)

式(1)~(4)より式(5)のような基礎行列間の関係式が成 立する.

$$x_L(t)^T F_B(t) (F_R(t)^T)^{-1}$$

$$F_B(t+1)^T F_L(t)^{-1} (x_L(t)^T)^{-1} = 0$$
(5)

もし,両眼ステレオカメラの相対的な姿勢が変化していなければ,式(5)の*F_B(t*+1)を*F_B(t*)とおいた

$$x_L(t)^T F_B(t) (F_R(t)^T)^{-1}$$

$$F_B(t)^T F_L(t)^{-1} (x_L(t)^T)^{-1} = 0$$
(6)

が成立する.ここで,

$$M(t) = F_B(t)(F_R(t)^T)^{-1}F_B(t)^TF_L(t)^{-1}$$
(7)

とおく. *M*(*t*) は,両眼・モーションステレオを統合した系における再投影誤差に相当する量である.

$$\overline{M(t)} = \frac{\sum_{n=1}^{N} |x_{Ln}(t)^T M(t) (x_{Ln}(t)^T)^{-1}|}{N}$$
(8)

の値はカメラの位置関係が変化していれば、大きな値をとる.特徴点数 N で正規化する意味は、特徴点数に依存しないようにするためである.式(8)の値を評価基準として、両眼ステレオカメラの位置関係変化の有無を自動検出する.



図3 仮想空間内の立方体配置

Fig. 3 Position of cubes to experiment of camera pan angle change detection.

3. 実験

3.1 実験方法

本研究の提案手法の理論的検証のため,計算機シミュ レーションを行った.図3のように,計算機の仮想空間内 に3つの立方体を配置した.

仮想空間の中央,距離 5.5[m]の地点に一辺 1[m]の立方体の頂点と各辺の中点と立方体中心の計 27 点,仮想空間 の左奥上,距離 7[m]の地点に一辺 50[cm]の立方体の頂点 の計 8 点,仮想空間の右手前下,距離 4.5[m]の地点に一辺 30[cm]の立方体の頂点の計 8 点,合計 43 点を特徴点とし た.また,仮想カメラは中央の立方体の中心から 6[m]離れ た地点に基線長 L=20[cm],輻輳角 θを 10[°]として左右 2 台内向きに配置した.人間の歩行速度を 1[m/s]と考え, 1 回の処理時間を 200[ms]と仮定して,立方体へ向かって 1 フレームに 20[cm]ずつ接近した.画像平面は無限平面と した.仮想カメラの画像サイズは 2000×1500[画素]とし た.特徴点画面座標は別途計算により求めた実数データ, その対応付けは手動で行ったデータを用い,基礎行列を計 算した.その際,倍精度浮動小数点数を使用した.

基礎行列の計算アルゴリズムは、モーションステレオで は EFNS 法を採用した [9]. EFNS 法はモーションステレオ の基礎行列のように、エピ極点を結ぶ場合には高精度の結 果を得ることが可能である、しかしながら、両眼ステレオ のようにエピ極線が比較的並行になる場合に正しい基礎行 列を得られないことがあった.*¹そこで、両眼ステレオでは RANSAC アルゴリズム [11] を採用した.また、基礎行列 の値には定数倍の任意性があるため、基礎行列の (3,3) 成 分の値が1になるように、EFNS 法の各成分の値を正規化 して使用した.

図4にパン方向のカメラ角度変化検出実験のカメラ配置 を示す.仮想空間中央の立方体の中心からの距離が5[m]



図4 パン方向のカメラ角度変化検出実験のカメラ配置

Fig. 4 Position of cameras to experiment of camera pan angle change detection.





(frame no.5) となった地点で、右カメラのみパン方向のカメラ角度 θ を更に内向きに変化させた.パン方向のカメラ 角度 θ の変化量は、±0,+1,+2,+3,+4,+5,+10,+20,+30,+40,+50[°]とした.検出限界を求めるために、+0.001,+0.005[°]といった小さな値でも計算を行った.

図 5 にチルト方向のカメラ角度変化検出実験のカメラ配 置を示す. 仮想空間中央の立方体の中心からの距離が 5[m] (frame no.5) となった地点で,右カメラのみチルト方向の カメラ角度 φ を下向きに変化させた. チルト方向のカメラ 角度 φ の変化量は,±0,+1,+2,+3,+4,+5[°] とした.

3.2 実験結果

図6に frame no.5 でパン方向のカメラ角度 $\theta \varepsilon \pm 0,+0.001,$ +0.005[°]変化させた場合の frame no. と評価基準値 $\overline{M(t)}$ の関係を表すグラフを,図7にその際のパン変化角度 $\theta \varepsilon$ 評価基準値 $\overline{M(t)}$ の関係を表すグラフを,図8に frame no.5 でパン方向のカメラ角度 $\theta \varepsilon \pm 0,+1,+2,+3,+4,+5[°] 変$ 化させた場合の frame no. と評価基準値 $\overline{M(t)}$ の関係を表す グラフを,図9にその際のパン変化角度 $\theta \varepsilon$ 評価基準値 $\overline{M(t)}$ の関係を表すグラフを,図10に frame no.5 でパン方

^{*1} 後に,エピ極線の描画プログラムの問題であることが判明した.



- 図6 パン方向のカメラ角度変化量と基礎行列間の関係式の値の関係 (角度変化量:±0~+0.005[°],角度変化時刻:frame no.5)
- Fig. 6 The relation between the amount of change of camera pan angle, and the value of the expression of relations during fundamental matrices (the amount of change pan angle: $\pm 0 \sim +0.005[^{\circ}]$, change time: frame no.5)



- 図7 パン方向のカメラ角度変化量と基礎行列間の関係式の値の関係 (角度変化量:±0~+0.005[°],角度変化時刻:frame no.5)
- Fig. 7 The relation between the amount of change of camera pan angle, and the value of the expression of relations during fundamental matrices (the amount of change pan angle: ±0~+0.005[°], change time: frame no.5)

向のカメラ角度 $\theta \varepsilon \pm 0$, +10, +20, +30, +40, +50[°]変化 させた場合の frame no. と評価基準値 $\overline{M(t)}$ の関係を表すグ ラフを,図11にその際のパン変化角度 θ と評価基準値 $\overline{M(t)}$ の関係を表すグラフを,図12に frame no.5 でチルト方向 のカメラ角度 $\phi \varepsilon \pm 0$, +1, +2, +3, +4, +5[°]変化させた場 合の frame no. と評価基準値 $\overline{M(t)}$ の関係を表すグラフを, 図13にその際のチルト変化角度 ϕ と評価基準値 $\overline{M(t)}$ の関 係を表すグラフを示す.

図 6, 図 8, 図 10, 図 12 より, カメラ角度を変化させた 時点 (frame no.5) で評価基準値 $\overline{M(t)}$ の値が大きくなるこ とがわかる. 図 11, 図 13 より, カメラ変化角度の大きさ と評価基準値 $\overline{M(t)}$ の関係は単調増加ではなかった. 図 9 よ り, パン角度変化の際, +3[°]のところで $\overline{M(t)}$ の値が少し 下がった. 図 11 より, パン角度変化の際, +10[°]付近を ピークにして $\overline{M(t)}$ の値が下がった. 図 13 より, チルト角 度変化の際, +3, +4[°]のところで $\overline{M(t)}$ の値が下がった.

4. 考察

図7より、パン角度変化の際、+0.001[°]では2.43e+4



- 図8 パン方向のカメラ角度変化量と基礎行列間の関係式の値の関係 (角度変化量:±0~+5[°],角度変化時刻:frame no.5)
- Fig. 8 The relation between the amount of change of camera pan angle, and the value of the expression of relations during fundamental matrices (the amount of change pan angle: $\pm 0 \sim +5[^{\circ}]$, change time: frame no.5)



- 図9 パン方向のカメラ角度変化量と基礎行列間の関係式の値の関係 (角度変化量:±0~+5[°],角度変化時刻:frame no.5)
- Fig. 9 The relation between the amount of change of camera pan angle, and the value of the expression of relations during fundamental matrices (the amount of change pan angle: $\pm 0 \sim +5[^{\circ}]$, change time: frame no.5)



- 図10 パン方向のカメラ角度変化量と基礎行列間の関係式の値の関係(角度変化量:±0~+50[°],角度変化時刻:frame no.5)
- Fig. 10 The relation between the amount of change of camera pan angle, and the value of the expression of relations during fundamental matrices (the amount of change pan angle: $\pm 0 \sim +50[^{\circ}]$, change time: frame no.5)

の値を持ち, ±0[°]の時の値 5.74e-1 よりかなり大きな値 をとる. 図7より,評価基準値 $\overline{M(t)}$ のしきい値を 1.0e+0 に設定すると, +0.001[°]のパン角度変化の検出が可能で ある. 図11より,カメラ変化角度の大きさと評価基準値 $\overline{M(t)}$ の関係は完全な単調増加ではなく,ピーク値を持ち減



- 図11 パン方向のカメラ角度変化量と基礎行列間の関係式の値の関係(角度変化量:±0~+50[°],角度変化時刻:frame no.5)
- Fig. 11 The relation between the amount of change of camera pan angle, and the value of the expression of relations during fundamental matrices (the amount of change pan angle: $\pm 0 \sim +50[^{\circ}]$, change time: frame no.5)



- 図12 チルト方向のカメラ角度変化量と基礎行列間の関係式の値の
 関係(角度変化量:±0~+5[°],角度変化時刻:frame no.5)
- Fig. 12 The relation between the amount of change of camera tilt angle, and the value of the expression of relations during fundamental matrices (the amount of change tilt angle: $\pm 0 \sim +5[^{\circ}]$, change time: frame no.5)



- 図13 チルト方向のカメラ角度変化量と基礎行列間の関係式の値の
 関係(角度変化量:±0~+5[°],角度変化時刻:frame no.5)
- Fig. 13 The relation between the amount of change of camera tilt angle, and the value of the expression of relations during fundamental matrices (the amount of change tilt angle: $\pm 0 \sim +5[^{\circ}]$, change time: frame no.5)

少していくが,これは,図 14,図 15 のように,右カメラ 画像から特徴点が外れていくことと関係していると考えら れる.図 11 では,+50[°]の際の $\overline{M(t)}$ の値は小さく見え るが,実際には,3.35e+6の値を持つのでパン角度変化の 検出は可能である.



- 図 14 右カメラパン方向角度変化時の右カメラ画像内の立方体配置 (+10[°])
- Fig. 14 Cube position when right camera pan angle was changed $(+10[^{\circ}])$.



- 図 15 右カメラパン方向角度変化時の右カメラ画像内の立方体配置 (+20[°])
- Fig. 15 Cube position when right camera pan angle was changed $(+20[^{\circ}])$.

図9で、パン角度変化の際、+3[°]のところで少し $\overline{M(t)}$ の値が下がった原因、及び、図13で、チルト角度変化の際、+3、+4[°]のところで $\overline{M(t)}$ の値が下がった原因については現在調査中であるが、特徴点の位置関係が影響しているのではないかと考えている.

シミュレーションデータの作成に当たり,当初は仮想空 間中央の立方体の特徴点27点のみを使用して計算機シミュ レーションを進めていたが,図16のように両眼ステレオ の基礎行列の計算値が不安定になり,本来エピ極線がほぼ 平行線となるところ,エピ極点が現れてしまう状態が現れ た.そこで,奥と手前に新たに立方体を作成し特徴点数を 43点に増やすと図17のようにエピ極線がほぼ平行線とな り,正しいと考えられる基礎行列が得られた.このように 特徴点数及びその位置関係が,得られる基礎行列の精度に 影響を与えるので,実画像を使用した実験により検証する 必要がある.

本研究では,基礎行列の計算に EFNS 法と RANSAC ア ルゴリズムを使用した. Armangue ら [12] によると,計算

図16 両眼ステレオの右カメラ画像に投影された左画像特徴点のエ ピ極線(失敗例)

Fig. 16 The epipolar lines of the left image feature points projected on the right image of the binocular stereopsis (example of a failure)



- 図17 両眼ステレオの右カメラ画像に投影された左画像特徴点のエ ピ極線(成功例)
- Fig. 17 The epipolar lines of the left image feature points projected on the right image of the binocular stereopsis (example of a success)

時間に余裕があれば LMedS 法の方が RANSAC アルゴリズ ムより高精度に計算できるようなので、より高精度なカメ ラ位置関係変化検出、3 次元復元のためには LMedS 法の使 用も検討に値すると考える.

5. むすび

基礎行列計算のための両眼ステレオの対応付けに左右オ プティカルフロー結果を使用した両眼・モーションステレ オの統合法を提案した.カメラ位置関係の変化検出方法の 定式化を行い,計算機シミュレーションにより理論的検証 を行った.本研究により,基礎行列間の関係式を計算する ことにより,理論的には+0.001[°]のカメラ角度変化を検 出することが可能であることが確認された.カメラ位置関 係の変化検出は,2台の単眼ロボットによる高精度な3次 元復元に有効である.今後は,左右画像処理部分のプログ ラムの並列化を行った後,並列処理可能なプロセッサを搭 載した PC,同期可能な実際のカメラを使用して,実空間・ 実時間での実験・検証を行う予定である.

謝辞 本研究を進めるに当たり,基礎行列の分解に関し て,岡山大学の金谷健一教授に助言を,基礎行列の計算に 関して,豊橋技術科学大学の菅谷保之准教授にプログラム の提供や助言をいただきました.ここに深謝します.

Vol.2013-CVIM-186 No.21 2013/3/15

参考文献

- N.Snavely, S.M.Seitz, R.Szeliski, "Modeling the World from Internet Photo Collections", International Journal of Computer Vision, Vol.80,No.2,pp.189-210, 2008.
- [2] 鷲見和彦, "柔軟物も扱える生産用ロボットシステムの 開発", 日本ロボット学会誌, Vol.27,No.10,pp.1082-1085, 2009.
- [3] 堂前幸康,奥田晴久,高氏秀則,木村雄太,金子俊一, 田中孝之,"細線形状を持つケーブルに対するロバスト モーションステレオ", View ビジョン技術の実利用ワー クショップ講演論文集,v.2007,pp.265-270, 2007.
- [4] Lowe,D.G, "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints", International Journal of Computer Vision, Vol.60,pp.91-110, 2004.
- [5] 目黒淳一,福安徹也,石川貴一朗,瀧口純一,天野善春, "複数の基線長を利用した GPS/DR 複合型全周モーションステレオによる屋外三次元環境復元",ロボティクスシンポジア予稿集,11th,pp.393-400, 2006.
- [6] 早川和孝,佐藤淳,"時空間における多視点幾何",信学 誌 D, Vol.J90-D,No.8,pp.1878-1887, 2007.
- [7] 酒井修二,高橋徹,伊藤康一,運天弘樹,"汎用デジタル カメラを用いた2視点からの3次元復元",情処学研報, 2011-CVIM-176-4,pp.1-8,2011.
- [8] Mutsumi Watanabe, Nobuyuki Takeda and Kazunori Onoguchi, "Moving obstacle detection and recognition by optical flow pattern analysis for mobile robots", Advanced Robotics, Vol.12,No.7-8,pp.791-816, 1997.
- [9] 菅谷保之,金谷健一,"最高精度の基礎行列計算法",情 処学研報,2007-CVIM-159-29, pp.225-232, 2007.
- [10] 金谷健一,松永力,"基礎行列の分解:焦点距離の直接的 表現",情処学研報, CVIM, Vol.2000,No.7,pp.49-56, 2000.
- [11] P.H.S.Torr and AndrewZisserman, "Robust parameterization and computation of the trifocal tensor", Image and Vision Computing, 15,pp.591-605, 1997.
- [12] Xavier Armangue, Joaquim Salvi, "Overall view regarding fundamental matrix estimation", Image and Vision Computing, Vol.21,pp.205-220, 2003.
- [13] 川西亮輔,山下淳,金子透,"全方位カメラを用いた環境 モデリングのための特徴抽出最適化およびカメラ外部パ ラメータ推定",動的画像処理実利用化ワークショップ 2007 講演論文集,pp.319-324, 2007.
- [14] 横地祐次,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 処論: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.
- [15] 佐藤智和,池田聖,横矢直和,"複数動画像からの全方位 型マルチカメラシステムの位置・姿勢パラメータの推定" 信学論 D-II, Vol.J88-D-II,No.2,pp.347-357, 2005.
- [16] C. Tomasi and T. Kanade, "Shape and Motion from Image Streams under Orthography: a Factorization Method", International Journal of Computer Vision, Vol.9:2,pp.137-154, 1992.
- [17] C. J. Poelman and T. Kanade, "A Paraperspective FactorizationMethod for Shape and Motion Recovery", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.19,No.3,pp.206-218, 1997.
- [18] 藤木淳, "点対応を用いた複数の2次元画像からの 3次元形状復元-因子分解法の数理-",統計数理, Vol.49,No.1,pp.77-107, 2001.
- [19] Richard Hartrey and Andrew Zisserman, "Multiple View Geometry in Computer Vision second edition", Cambridge, 2003.