

# 局所的整合性評価を取り入れた装着型能動カメラによる 自己運動推定の安定化

池田 友彦<sup>†</sup> 杉本 晃宏<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 千葉大学大学院自然科学研究科知能情報工学専攻

<sup>††</sup> 国立情報学研究所

E-mail: [†ikeike@graduate.chiba-u.jp](mailto:†ikeike@graduate.chiba-u.jp), [††sugimoto@nii.ac.jp](mailto:††sugimoto@nii.ac.jp)

あらかし 2 台の能動カメラを装着して、それぞれのカメラを注視点制御することによりカメラの自己運動を推定する手法が提案されている。しかし、それは逐次的な推定手法であるため、運動の長さに応じて推定誤差が累積し、運動軌跡の推定精度が次第に悪くなるという問題を抱えている。そこで、本稿では、時々刻々に推定された運動がそれまでの入力画像系列と幾何学的に整合するように局所的に推定結果を修正する手法を提案する。そして、この修正によって安定に運動推定を実現することができることを示す。

キーワード 自己運動推定, 局所的整合性評価, 注視点, オプティカルフロー, アクティブカメラ.

## Stabilizing Ego-Motion Estimation by Active Wearable Cameras using Local Bundle Adjustment

Tomohiko IKEDA<sup>†</sup> and Akihiro SUGIMOTO<sup>††</sup>

<sup>†</sup> School of Science and Technology, Chiba University

<sup>††</sup> National Institute of Informatics

E-mail: [†ikeike@graduate.chiba-u.jp](mailto:†ikeike@graduate.chiba-u.jp), [††sugimoto@nii.ac.jp](mailto:††sugimoto@nii.ac.jp)

**Abstract** The binocular independent fixation control is the camera control of two mounted active cameras where each of them independently and automatically fixates its optical axis to its own fixation point. A method using this camera control was proposed to incrementally estimate ego-motion from two time-series frames. The method, however, has a problem that estimation accuracy gradually becomes worse as the motion trajectory becomes longer and longer. This is due to accumulation of estimation errors incurred in each estimation step. To keep estimation accuracy stable even for a long trajectory, we propose to locally apply the bundle adjustment to each estimated motion so that the modified estimation becomes geometrically consistent with time-series frames acquired so far. This modification realizes stable estimation of a long motion trajectory.

**Key words** ego-motion estimation, local bundle adjustment, fixation point, optical flow, active camera.

### 1. はじめに

コンピュータの急速な高性能化, 小型化, 低価格化にともない, コンピュータが我々の生活により身近なものになってきている. そして, そう遠くない将来に, コンピュータを装着したまま日常生活することが現実味をおびつつある [1], [3], [5], [9]. そこでは, 人間が装着したセンサから得られる情報をもとに, 装着者の意図や興味を理解し, 有益な情報を自律的に提供するシステム [12] が必要となるが, そのためには, 装着者が存在する環境とその環境内における装着者の位置の情報を知ることが重要である [1], [5], [17]. 一方, ロボットビジョンの分野でも, ロ

ボットのナビゲーションに関する研究が盛んであり, ロボット自身がどのような環境に存在し, どこに位置しているかを認識する技術が必要となっている [4], [6], [7], [13], [14], [18], [20]. このように, カメラを装着した人間やカメラを搭載したロボットの, 3次元空間中における運動および位置を推定することは, 重要な問題の一つである.

杉本ら [8], [17] は, 2台のアクティブカメラを独立に注視点制御する 2眼独立注視点制御 (図 1) という考え方を導入し, 装着したカメラの基線長に依存しない推定精度を保証する運動推定手法を提案した. そこでは, 2眼独立注視点制御を通じて得られる注視点対応と, 注視点周辺で得られる直線対応 [17] やオ

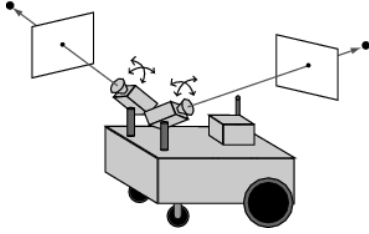


図 1 2眼独立注視点制御

Fig. 1 Binocular independent fixation control.

プティカルフロー [8] を利用することで、カメラの自己運動を推定している。

しかし、この手法は、時間的に連続する2フレームの画像を用いて逐次的に運動を推定するため、運動の長さに応じて推定誤差が累積し、運動軌跡の推定精度が次第に悪くなるという問題を抱えている。そこで、本稿では、バンドルアジャストメント [19] を局所時間内に得られた推定結果に適用する [21], [22] という考え方を採用し、時々刻々に推定された運動がそれまでの入力画像系列と幾何学的に整合するようにそのつど推定結果を修正する手法を提案する。そして、この修正によって、長い運動に対しても安定に運動推定を実現することができることを示す。

## 2. 2眼独立注視点制御を用いた運動推定

2眼独立注視点制御 [17] とは、2台の装着型アクティブカメラを独立に注視点制御するカメラ制御のことである (図 1)。この制御は、各カメラの注視点から見れば、そのカメラを装着した人物、もしくは、そのカメラを搭載したロボットを対象として、ステレオ視している状況であると解釈できる。この場合、注視点間距離がステレオ視における基線長 [11], [16] に相当するので、注視点間距離が長くなるように2眼独立注視点制御を実行することで高精度な運動推定が可能となる。このように、杉本ら [8] の手法は、搭載した2台のカメラの基線長に依存せずに、高精度な運動推定を実現する方法となっている。

以下では、2眼独立注視点制御から得られる情報と注視点周辺のオプティカルフローから得られる情報とを統合することによってカメラの自己運動を推定する手法 [8] を概観する。

左右2台のカメラのうち右カメラを基準と考え、2台のカメラを固定した台座の運動によって生じる右カメラの回転、並進運動をカメラ運動とよぶことにする。したがって、カメラ運動には、注視点制御のために行うカメラの首振り運動は含まれないとする。左右のカメラのカメラ座標系を一致させるための回転行列、並進ベクトルを  $R_{in}$ ,  $T_{in}$  とする。また、時刻  $t$  から  $t+1$  の間におけるカメラ運動のパラメタを  $R$ ,  $T$  とする。前者が回転を表す行列であり、後者が並進を表すベクトルである。なお、カメラの内部・外部パラメタは校正済みであるとする。

時刻  $t$  において、右カメラの投影中心から右カメラの注視点に向かう単位ベクトルは、時刻  $t$  の右カメラ座標系で  $v_r^t$  であるとする。このとき、右カメラの注視点対称からカメラ運動のパラメタに関する制約式

$$\det [R_0 v_r^t \mid R_0 R v_r^{t+1} \mid T] = 0$$

が得られる。ここで、 $R_0$  はワールド座標系の姿勢を、時刻  $t$  の右カメラ座標系に一致させるための回転行列である。同様に、左カメラの注視点対称からは、

$$\det [R_0 R_{in}^\top v_\ell^t \mid R_0 R R_{in}^\top v_\ell^{t+1} \mid T - R_0 (R - I) R_{in}^\top T_{in}] = 0$$

が得られる。ここで、 $v_\ell^t$  は、時刻  $t$  において、左カメラの投影中心から左カメラの注視点に向かう単位ベクトルを表す (ただし、時刻  $t$  の左カメラ座標系で表示)。

一方、時刻  $t$  において、右カメラで撮影された画像の注視点周辺の領域内にある点  $q_r^t$  のオプティカルフロー  $u_r^t$  が得られたとすると、それからカメラ運動パラメタに関する制約式

$$\det [R_0 R (M u_r^t + \tilde{q}_r^t) \mid R_0 \tilde{q}_r^t \mid T] = 0$$

が得られる。ただし、 $f_r$  を右カメラの焦点距離として、

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}^\top, \quad \tilde{q}_r^t = ((q_r^t)^\top, f_r)^\top$$

とする。同様に、左カメラで画像の注視点周辺の領域内にある点  $q_\ell^t$  のオプティカルフロー  $u_\ell^t$  が得られたとすると、それからカメラ運動パラメタに関する制約式

$$\det [R_0 R R_{in}^\top (M u_\ell^t + \tilde{q}_\ell^t) \mid R_0 R_{in}^\top \tilde{q}_\ell^t \mid T - R_0 (R - I) R_{in}^\top T_{in}] = 0$$

が得られる。ここに、 $\tilde{q}_\ell^t = ((q_\ell^t)^\top, f_\ell)^\top$  である ( $f_\ell$  は左カメラの焦点距離)。

回転、並進ともに3自由度あるので、カメラ運動の自由度は6である。これに対し、注視点対称から得られるカメラ運動の制約式は2個である。また、オプティカルフローに基づく制約式は、1点に対して1個ずつ独立に得られる。したがって、4点以上に対してオプティカルフローに基づく制約式を得ることで不足分の制約式を補い、それらをまとめて非線形最適化問題として捉え、最適化手法を適用することで、カメラ運動のパラメタを推定することができる。

## 3. 局所的整合性評価

2章で述べた自己運動推定手法は、時間的に連続する2フレームでの運動推定となっているので、それ以前に得られた画像系列の情報との幾何学的な整合性を保証しない。そこで、連続する2フレームを用いて逐次的に推定された運動パラメタを、それまでに得られた画像系列と幾何学的に整合するように修正することを考える。この修正を行うことで、連続する2フレーム間で求められた運動パラメタがそれ以前の入力画像系列と整合性を保つようになり、その結果、逐次的に推定された運動パラメタに含まれていた誤差が軽減され、推定精度の向上が期待される。以下で、この修正法についての説明を行う。

今、時刻  $s$  から時刻  $t$  ( $t > s+1$ ) までのカメラの自己運動パラメタが連続する2フレーム間で逐次的に求められているとす

る．すなわち，時刻  $i (i = s, \dots, t-1)$  から時刻  $i+1$  の間の運動パラメタ  $R_{i,i+1}, T_{i,i+1}$  が求められているとする．ここで， $R_{i,i+1}$  は時刻  $i$  から時刻  $i+1$  におけるカメラの回転行列を表し， $T_{i,i+1}$  は時刻  $i$  から時刻  $i+1$  におけるカメラの並進ベクトルを表すとする．また，時刻  $s$  から時刻  $t$  の間の各画像間で，注視点  $P$  の像  $p_i (i = s, \dots, t)$  の対応が得られているとする．

このとき，時刻  $j (j = s+1, \dots, t)$  の画像において，注視点の像  $p_i (i = s, \dots, j-1; j < i)$ ，および，時刻  $i$  から時刻  $j$  の間のカメラの運動パラメタ  $R_{i,j}, T_{i,j}$  からなるエピポーラ線  $l_{i,j}$  を考える．運動パラメタ  $R_{i,j}, T_{i,j}$  は，時刻  $i$  から時刻  $j$  の間で時間的に連続する 2 フレーム間で推定された運動パラメタ  $R_{k,k+1}, T_{k,k+1} (k = i, i+1, \dots, j)$  を用いて表すことができる (図 2)．しかし，運動パラメタ  $R_{k,k+1}, T_{k,k+1}$  は，時刻  $k$ ，および，時刻  $k+1$  の 2 枚の画像のみを用いて推定されているため，それ以前の入力画像系列と幾何学的な整合が取れているとは限らない．この整合が取れていない場合，エピポーラ線  $l_{i,j}$  と注視点の像  $p_i$  との間にずれが生じる (図 3)．このずれが誤差となり，運動の軌跡が長くなればなるほど累積し，推定精度に悪影響を与える．

そこで，そのずれを最小化するように運動パラメタ  $R_{i,j}, T_{i,j}$  を修正する．そのための評価関数として，

$$\sum_{j=s+1}^t \sum_{i=s}^{j-1} \left( \frac{\tilde{p}_i^T E_{i,j} \tilde{p}_j}{\sqrt{a_{i,j}^2 + b_{i,j}^2}} \right)^2 \quad (1)$$

を考える (ただし， $i \neq j$ )．式 (1) に現れる  $E_{i,j}$  は時刻  $i$  から時刻  $j$  の間の運動パラメタ  $R_{i,j}, T_{i,j}$  によって定義される基本行列

$$E_{i,j} = [T_{i,j}]_{\times} R_{i,j}$$

である．なお， $[T_{i,j}]_{\times}$  は， $T_{i,j} = (t_x^{i,j}, t_y^{i,j}, t_z^{i,j})^T$  から構成される歪対称行列

$$[T_{i,j}]_{\times} = \begin{pmatrix} 0 & -t_z^{i,j} & t_y^{i,j} \\ t_z^{i,j} & 0 & -t_x^{i,j} \\ -t_y^{i,j} & t_x^{i,j} & 0 \end{pmatrix}$$

であり， $\tilde{p}_j = (p_j^T, 1)^T$  である．また，式 (1) 中の  $a_{i,j}, b_{i,j}$  は， $E_{i,j} \tilde{p}_j = (a_{i,j}, b_{i,j}, c_{i,j})^T$  とした場合のそれである．

式 (1) は，時刻  $i$  の画像における，エピポーラ線  $l_{i,j}$  と注視点の像  $p_i$  の距離の和を表す．式 (1) を運動パラメタ  $R_{i,j}, T_{i,j}$  に関して最小化することで，各画像におけるエピポーラ線と対応点の距離が最小になる．したがって，この最小化によって，時刻  $s$  から時刻  $t$  までの局所時間において，逐次的に推定された運動パラメタが，その間の画像系列と幾何学的に整合するように修正される．この修正を時々刻々に推定されたパラメタに対して適用することにより，推定誤差の累積を軽減することができると考えられる．なお，式 (1) は，運動パラメタ  $R_{i,j}, T_{i,j}$  に関して非線形な方程式なので，Powell 法 [15] などの非線形最適化手法を用いることで最小化を行うことができる．

## 4. 実験

提案手法を用いて，カメラの自己運動を推定する実験を行っ

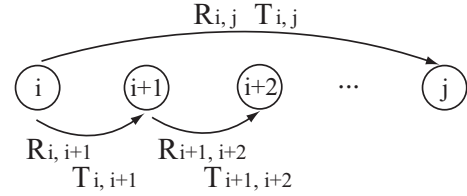


図 2 時刻  $i$  から  $j$  の間におけるカメラの運動パラメタ

Fig. 2 Motion parameters of a camera between time  $i$  and time  $j$

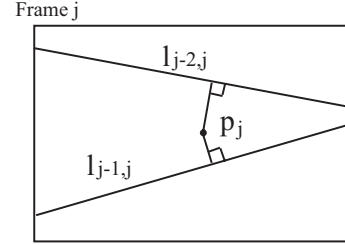


図 3 対応点とエピポーラ線のずれ

Fig. 3 Gap of a point correspondence and the epipolar line

た．まず始めに，シミュレーションにより，提案手法を用いることでどの程度推定誤差が軽減されるかを定量的に評価した．次に，実環境下において，本手法によるカメラの自己運動推定実験を行った．

### 4.1 シミュレーションによる定量的評価

まず，シミュレーション実験について説明する．ここでは，提案手法を用いることで，従来の逐次的な運動推定手法 [8] で生じた誤差がどの程度軽減されるかを定量的に評価した．具体的には，3 章において  $t-s=2$  とした場合，すなわち，過去の 3 フレームとの幾何学的な整合性を考慮した場合の，提案手法と従来手法における運動パラメタの推定誤差を比較した．なお，本実験では，過去 3 フレームにおける左右のカメラの注視点対応について局所的整合性評価を行った．

カメラの画角は  $21^\circ$  とし，焦点距離を  $0.5\text{cm}$  とした．さらに，右カメラと左カメラの姿勢は一致しているとし，得られる画像のサイズを  $512\text{pixel} \times 512\text{pixel}$  とした．

実験では，指定した注視点間距離となるように左右のカメラの注視点を発生させた．このとき，注視点の基線からの距離は  $2\text{m}$  (一定) とした．さらに各画像中で，注視点の周りにオプティカルフローを算出する点を 3 個発生させた．これらの点は，画像上で注視点の像を中心とする  $20\text{pixel} \times 20\text{pixel}$  の領域に投影される領域内でランダムに発生させた．また，第 1 ステップにおけるカメラの並進ベクトルは，ノルムが  $5\text{cm}$  になるようにランダムに発生させ，回転行列は，回転角がカメラ座標系の Z 軸周りに  $-1 \sim 1^\circ$  となるように発生させた．第 2 ステップの並進に関しては，第 1 ステップで発生させた並進ベクトルをカメラ座標系の Z 軸周りに  $-1 \sim 1^\circ$  回転させた．また，第 2 ステップにおける回転に関しては，第 1 ステップにおけるカメラの回転角に  $-1 \sim 1^\circ$  の間でランダムに発生させた回転角を加えることで発生させた．

カメラ運動の前後において，各点をそれぞれの撮像面に投影し，その投影された点に対してノイズを加えた．ここでは，平

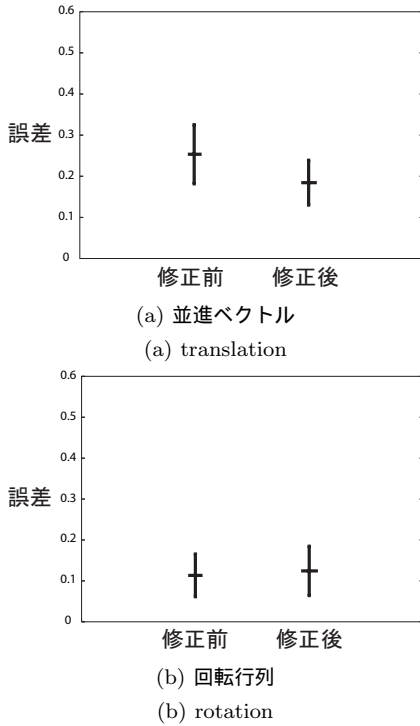


図 4 注視点間距離を 2m とした場合の推定誤差

Fig. 4 Estimation errors when distance of two fixation points is 2m(average with standard deviation).

均 0.0pixel, 標準偏差 2.0pixel の正規分布に従って発生させた乱数をノイズとして加えた。そして、各ステップにおいて、カメラの運動の前後で画像上で各点の対応を算出し、カメラ運動の推定を行った。

推定されたカメラの回転  $\hat{R}$ , および、並進  $\hat{T}$  の誤差は、以下の式で評価した。

$$\frac{\|\hat{\theta}\hat{r} - \theta r\|}{|\theta|}, \quad \frac{\|\hat{T} - T\|}{\|T\|}.$$

ここでは、誤差評価のため回転行列  $\hat{R}$  を、回転軸  $\hat{r}$  ( $\|\hat{r}\| = 1$ ) と回転角  $\hat{\theta}$  に分解した。 $r$  ( $\|r\| = 1$ ) は回転軸の真値であり、 $\theta$  は回転角の真値である。また、 $T$  は並進ベクトルの真値を表す。上記の過程を 200 回繰り返し、200 回の繰り返しにおける推定誤差の平均値と標準偏差を求めた。

図 4 は、注視点間距離を 2m として実験を行った結果を表している。また、図 5 は、注視点間距離を 10m として実験を行った結果を表している。図 4(b), 図 5(b) をみると、回転行列に関しては従来手法と提案手法とで推定誤差にあまり差異がないことが分かる。一方、図 4(a), 図 5(a) をみると、並進ベクトルに関して、提案手法を用いた方が推定誤差の平均値、および、標準偏差が小さくなっていることが分かる。なお、200 回全ての試行において、修正前後で評価関数の値が小さくなっていることを確認しているが、評価関数の値が小さくなるのが必ずしも推定値が真の値に近づくことを意味するとは限らないため、推定精度の改善に限界が見受けられる。以上のことから、提案手法を用いることにより、逐次推定された運動パラメタが入力画像系列と幾何学的に整合し、推定精度が向上すると考えら

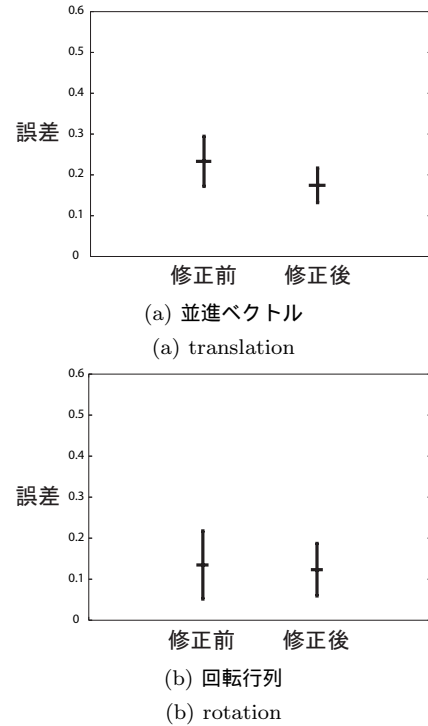


図 5 注視点間距離を 10m とした場合の推定誤差

Fig. 5 Estimation errors when distance of two fixation points is 10m(average with standard deviation).

れる。

本実験では、左右のカメラの注視点対称に対して局所的整合性評価を行ったが、より多くの対応点に対して局所的整合性評価を行うことで、運動パラメタが更に幾何学的に整合し、推定精度が向上すると考えられる。

#### 4.2 実画像を用いた運動推定

実環境下において、本手法を用いてカメラの自己運動を推定する実験を行った。また、本手法の有効性を確認するため、局所整合性評価を行わない逐次的な手法 [8] との比較を行った。

本実験では、アクティブカメラとして SONY 製 EVI-G20 を用いた。そして、基線長が約 20cm となるように 2 台のカメラを三脚に配置し、注視点間距離が 2~3m 程度になるように、2 台のカメラの向きを設定した (図 6)。このとき、ワールド座標系の Z 軸は、初期位置における右カメラ座標系の Z 軸に一致しているとした。

図 7 に示す軌跡 (約 5m) に沿って実験室内でカメラを運動させ、提案手法、および、直線対応を利用した手法を用いて、その運動を推定した。実験では、図 8 に示すカメラ運動の軌跡を、130 ステップに刻んだ (2 つの直線部分がそれぞれ 20 ステップ、2 つの円弧の部分が 45 ステップである)。そして、各ステップごとに提案手法、および、局所整合性評価を行わない手法を適用した。なお、実験では、左右のカメラの画像から均等に 6 点を選び、そのオプティカルフローを用いた。

注視点制御における注視点の対応付けは手動で行った。また、運動の過程において、注視点画像から外れてしまった場合には注視点の更新が必要となるが、この更新は手動で行った (更新回数は左右のカメラともに 7 回であった)。一方、各カメラで



図 6 実験時のカメラ配置  
Fig. 6 Two camera setup.



図 7 実験環境  
Fig. 7 The environment of the experiment.

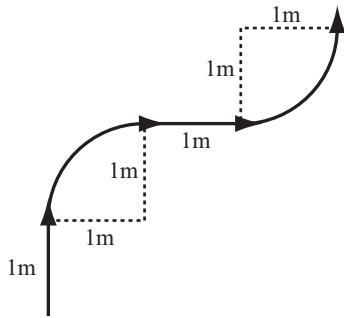


図 8 カメラ運動の軌跡  
Fig. 8 The trajectory of the camera motion.

得られた画像ごとに、注視点を中心とする  $100\text{pixel} \times 100\text{pixel}$  の領域においてオプティカルフローを算出し [2], [10], さらに、注視点を中心とする  $30\text{pixel} \times 30\text{pixel}$  の領域からランダムに 3 点ずつ選んだ。つまり、運動推定には、6 点のオプティカルフローを利用した。また、提案手法に関して、連続する 3 フレームにおける左右のカメラの注視点対応を用いて局所的整合性評価を行った。

提案手法および従来手法を利用してカメラ運動を推定した。得られたカメラの推定位置とその真値をワールド座標系の XZ 平面にそれぞれ投影し、重ね合わせた結果を図 9 に示す。また、提案手法および従来手法を用いて推定を行った際の、各ステップにおけるカメラ位置推定の誤差を図 10 に示す。図 9、図 10 において、実線が提案手法を用いてカメラの自己運動を推定した結果であり、点線が従来手法を用いてカメラの自己運動を推定した結果である。また、1 点鎖線が真値である。表 1 に、130 ステップの運動における位置の推定誤差の平均と標準偏差

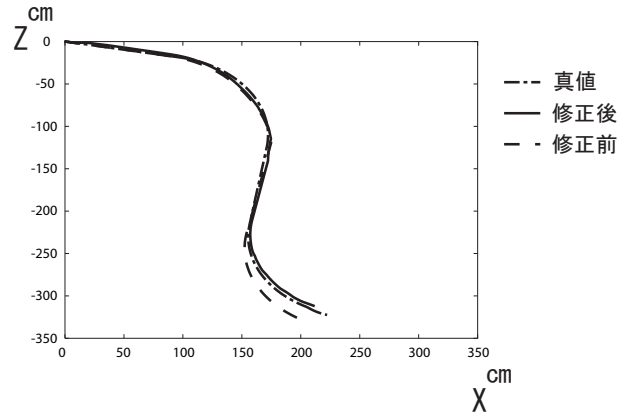


図 9 カメラ位置の推定結果  
Fig. 9 Estimation result of camera positions.

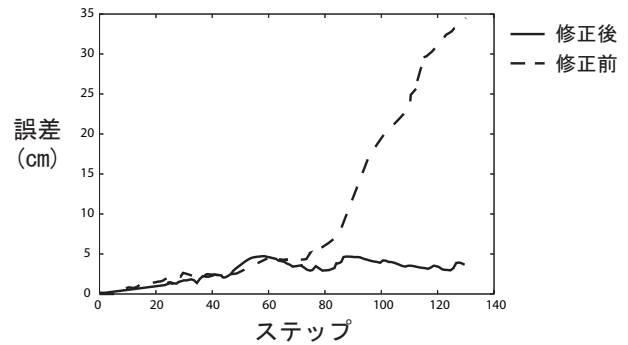


図 10 カメラ位置の推定誤差  
Fig. 10 Estimated errors of the camera position.

表 1 130 ステップにおける推定誤差の平均と標準偏差

Table 1 Mean and standard deviation of estimated errors over the 130 steps.

	修正前	修正後
平均 [cm]	17.51	3.36
標準偏差 [cm]	9.18	1.27

を示す。

図 9 をみると、提案手法を用いて修正を行った方が、修正を行わない場合よりも真値に近い結果が得られていることが分かる。図 10 をみると、特に 2 つ目の円弧部分において、修正を行った場合に誤差が著しく減少していることが分かる。最終的な位置推定の誤差は、修正を行わない場合で約 35cm であり、修正を行った場合で約 4cm である。また、表 1 をみると、修正を行った方が 130 ステップの位置推定における誤差の平均、および、標準偏差が小さくなっていることが分かる。

以上の結果から提案手法を用いることで、逐次推定された運動パラメータを修正できることが示された。したがって、提案手法を用いることで、誤差の累積が抑制され、運動の長さも長くなって安定して自己運動を推定できると考えられる。

## 5. おわりに

2 眼独立注視点制御を用いた運動推定は、時間的に連続する 2 フレームの画像による逐次推定手法であるため、運動の長さ

に応じて推定誤差が累積し、運動軌跡の推定精度が次第に悪くなるという問題を抱えていた。そこで、本稿では、バンドルアジャストメントを局所時間内に得られた運動推定の修正に適用するという考え方を採用し、逐次型運動推定の精度向上を目指した。そして、時々刻々に推定された運動がそれまでの入力画像系列と幾何学的に整合するようにそのつど推定結果を修正する手法を提案した。また、この修正により、長い運動に対しても安定に運動推定を実現することができることを実験によって示した。

本稿の実験では、左右のカメラの注視点対応について局所整合性評価を行ったが、より多くの対応点を用いて総合的に局所整合性評価を行うことで、さらに推定精度の向上が期待される。しかし、多くの対応点に対して局所整合性評価を行う場合、処理時間が増加するため実時間性を損なう恐れがある。その点に関しては、今後検討する予定である。

## 謝 辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 13224051、および、14380161 の補助を受けて行った。

## 文 献

- [1] H. Aoki, B. Schiele and A. Pentland: *Realtime Personal Positioning System for Wearable Computers*, Vision and Medline Technical Report, TR-520, Media Lab. MIT, 2000.
- [2] J.-Y. Bouguet: *Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker Description of the Algorithm*, Intel Corporation, Microprocessor Research Labs, OpenCV Documents, 1999.
- [3] B. Clarkson, K. Mase and A. Pentland: *Recognizing User's Context from Wearable Sensors: Baseline System*, Vision and Modeling Technical Report, Vismod TR-519, Medial Lab. MIT, 2000.
- [4] A. J. Davison: *Mobile Robot Navigation Using Active Vision*, Ph.D thesis, University of Oxford, 1998.
- [5] A. J. Davison, W. W. Mayol and D. W. Murray: *Real-Time Localisation and Mapping with Wearable Active Vision*, *Proc. of IEEE/ACM Int. Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 18-27, 2003.
- [6] A. J. Davison and D. W. Murray: *Mobile Robot Localisation using Active Vision*, *Proc. of ECCV*, Vol. 2, pp. 809-825, 1998.
- [7] G. N. DeSouza and A. C. Kak: *Vision for Mobile Robot Navigation: A Survey*, *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 24, No. 2, pp. 237-267, 2002.
- [8] 池田友彦, 杉本晃宏: アクティブカメラの注視点制御に基づく自己運動の推定, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004), Vol. 1, pp. 39-44, 2004.
- [9] M. Kourogi, T. Kurata and K. Sakaue: *A Panorama-Based Method of Personal Positioning And Orientation And Its Real-Time Applications for Wearable Computers*, *Proc. of Int. Symposium on Wearable Computers*, pp. 107-114, 2001.
- [10] D. D. Lucas and T. Kanade: *An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision*, *Proc. of Imaging Understanding Workshop*, pp. 121-130, 1981.
- [11] J. Matas, O. Chum, M. Urban and T. Pajdla: *Robust Wide Baseline Stereo from Maximally Stable Extreme Regions*, *Proc. of BMVC*, 2002.
- [12] 松山隆司, 杉本晃宏, 佐藤洋一, 川嶋宏彰: 人間と共生する情報システムの実現を目指して, 人工知能学会誌, Vol. 19, No. 2, pp. 257-266, 2004.
- [13] N. Molton and M. Brady: *Practical Structure and Motion from Stereo When motion is Unconstrained*, *Int.J.of Computer Vision*, Vol. 39, No. 1, pp. 5-23, 2003.
- [14] T. Nakagawa, T. Okatani and K. Deguchi: *Active Construction of 3D Map in Robot by Combining Motion and Percived Images*, *Proc. of ACCV*, vol. 1, pp. 563-568, 2004.
- [15] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky and W. T. Vetterling: *Numerical Recipes in C [日本語版]*, 技術評論社, 1993.
- [16] P. Pritchett and A. Zisserman: *Wide Baseline Stereo Matching*, *Proc. of 14th International Conference on Pattern Recognition(ICPR)*, pp. 754-760, 1998.
- [17] 杉本晃宏, 長友渉, 松山隆司: 装着型能動視覚センサを用いた人物の位置および運動の推定, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2002), Vol. 1, pp. 215-222, 2002.
- [18] Y. Sumi, Y. Ishiyama and F. Tomita: *3D Localization of Moving Free-Form Objects in Cluttered Environments*, *Proc. of ACCV*, vol. 1, pp. 43-48, 2004.
- [19] B. Triggs, P. McLauchlan, R. Hartley and A. Fitzgibbon: *Bundle Adjustment - A Modern Synthesis*, *Vision Algorithms: Theory and Practice (B. Triggs, A. Zisserman and R. Szeliski eds.) Lecture Notes in CS*, Vol. 1883, pp. 298-372, Springer, 2000.
- [20] M. Werman, S. Banerjee, S. Dutta Roy and M. Qiu: *Robot Localisation Using Uncalibrated Camera Invariants*, *Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR)*, Vol. II, pp. 353-359, 1999.
- [21] Z. Zhang and Y. Shan: *Incremental Motion Estimation through Local Bundle Adjustment*, Technical Report MSR-TR-01-54, Microsoft Research, May 2001.
- [22] Z. Zhang and Y. Shan: *Incremental Motion Estimation through Modified Bundle Adjustment*, *Proc. International Conference on Image Processing (ICIP)*, Vol. II, pp. 343-346, 2003.