

# 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

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, ††sugimoto@nii.ac.jp

あらまし 2眼独立注視点制御は、2台のアクティブカメラを独立に注視点制御するカメラ制御であり、これを通して得られる注視点対応と注視点周辺の直線対応を利用した、3次元空間内におけるカメラ装着者の運動推定手法が提案されている。しかし、この手法には、直線の選び方によっては、装着者の運動が制限されるという問題がある。そこで、本稿では、直線対応の代わりに注視点周辺のオプティカルフローを利用することで、この問題の解決をはかる。具体的には、オプティカルフローからカメラの運動に関する拘束式を導出し、それと注視点対応から得られる拘束式を用いてカメラの自己運動を推定する手法を提案する。そして、注視点間の距離を長くとればとるほど、自己運動の推定精度が向上することを実験によって確認する。

キーワード オプティカルフロー、自己運動推定、基線長、注視点、アクティブカメラ

## Ego-Motion Estimation based on Fixation Control using Active Cameras

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, ††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 estimate human motion where the correspondence of the fixation point between two frames and the correspondence of lines nearby the fixation point are used. The method, however, has a problem that it fails in the estimation unless lines are appropriately selected. To avoid falling into such a problem, we propose to employ optical flow instead of lines and to use the point displacement obtained from the flow field for the ego-motion estimation. Our intensive experiments demonstrate the effectiveness of our method, showing that ego-motion is robustly and accurately estimated independent of the baseline length of two mounted cameras.

**Key words** optical flow, ego-motion estimation, baseline length, fixation point, active camera

### 1. はじめに

ロボットビジョンやウェアラブルビジョンの分野において、カメラを搭載したロボットやカメラを装着した人間の、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。ロボットビジョンの分野では、ロボットのナビゲーションに関する研究が盛んに行われているが、このためには、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ことが必要である [3], [6], [13], [17], [18]。また、ウェアラブルビジョンの分野では、人間が装着したセンサから得られる情報を基に、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を目指した研究が盛んである [11]。例

として、装着者のナビゲーションを考えると、ロボットの場合と同様に、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が重要となる [1], [4], [16]。

ロボットや人物の運動を推定するために、ステレオ視を利用する手法が一般的である。Gonçalves ら [8] は、3次元空間中の点をステレオ視により復元し、それとオプティカルフローを利用することで運動推定を行っている。また、Molton ら [12] は、3次元空間中の複数の点をステレオ視により復元し、運動前後におけるそれらの点の画像上での対応を求めることにより、運動推定を行っている。Davison ら [5] は、ロボットの運動が平面的であるという前提の下で、ステレオ視により復元された空間中の点の情報と、平面運動における幾何拘束を利用したロボッ

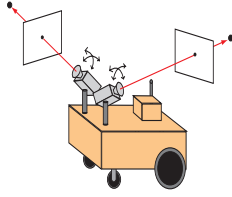


図 1 2 眼独立注視点制御

トの運動推定手法を提案している。

しかし、ステレオ視を用いた場合、2 台のカメラの視野を共有させることが不可欠となる。その上で、運動推定のためには 2 枚の画像において複数の特徴を対応付ける必要があるが、正確に対応付けることは困難である [7]。また、ステレオ視を利用する場合、その推定精度は 2 台のカメラの基線長に依存する [10], [15] が、ロボットにカメラを搭載する場合や人間がカメラを装着する場合、基線長が長くなるように 2 台のカメラを配置するのは困難であり、高精度な運動推定が期待できない。

一方、杉本ら [16] 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が期待される運動推定手法を提案した。ここでは、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を利用することで、運動推定を行っている。しかし、この手法には、直線の選び方によっては、装着者の運動が制限されるという問題点がある。

そこで、本稿では、注視点周辺の情報として直線対応の代わりに、オプティカルフローを利用する手法を提案する。具体的には、オプティカルフローからカメラの自己運動に関する拘束式を導出し、それと注視点対応から得られる制約式を用いてカメラの自己運動を推定する手法を提案する。オプティカルフローからは、カメラの運動を制限することなく、運動パラメータに関する拘束式が得られるので、直線対応を利用した場合のような問題は生じない。実験によって、提案手法による運動推定精度が注視点間の距離に依存してどのように変化するかを評価し、注視点間の距離を長くすればするほど、推定精度が向上することを確認した。

## 2. 2 眼独立注視点制御に基づくカメラ運動推定 [16]

2 眼独立注視点制御とは、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。この制御を通して得られる注視点対応からカメラ運動のパラメータに関する制約式が得られる (式 (1), (2) 参照)。しかし、注視点対応から得られる制約式だけでは、カメラ運動のパラメータに対する制約式が不十分であるため、カメラ運動を推定することができない。そこで、杉本ら [16] は、注視点周辺の直線対応を利用し、十分な制約式を得ることで運動推定を行っている。

左カメラのカメラ座標系を右カメラのカメラ座標系に一致させる回転行列を、右カメラのカメラ座標系で表したものを  $R_{in}$  とし、左カメラのカメラ座標系を右カメラのカメラ座標系に一致させる並進ベクトルを、左カメラのカメラ座標系で表したものを  $T_{in}$  とする (図 2)。このとき、右カメラの注視点対応から

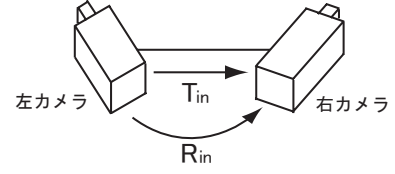


図 2 外部パラメータ

カメラ運動の制約式 (1) が得られる。

$$\det [R_0 \mathbf{v}_r^t \mid R_0 R \mathbf{v}_r^{t+1} \mid \mathbf{T}] = 0. \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{v}_r^t$  は、時刻  $t$  において、右カメラの投影中心から注視点へ向かう単位ベクトルを、時刻  $t$  の右カメラ座標系で表したものであり、 $R$ 、 $\mathbf{T}$  は、時刻  $t$  から  $t+1$  の間におけるカメラ運動のパラメータである。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。また、 $R_0$  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。

一方、左カメラの注視点対応からは、制約式 (2) が得られる。

$$\det [R_0 R_{in}^T \mathbf{v}_l^t \mid R_0 R R_{in}^T \mathbf{v}_l^{t+1} \mid \mathbf{T} - R_0 (R - I) R_{in}^T \mathbf{T}_{in}] = 0. \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{v}_l^t$  は、時刻  $t$  において、左カメラの投影中心から注視点へ向かう単位ベクトルを、時刻  $t$  の左カメラ座標系で表したものである。式 (1) は、 $\mathbf{T}$  に関する同次方程式となっている。また、カメラの運動が並進のみ場合、式 (2) も  $\mathbf{T}$  に関して同次方程式となる。

2 眼独立注視点制御は、各カメラの注視点から見れば、そのカメラを搭載したロボット、もしくは、そのカメラを装着した人物を対象として、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に相当する。したがって、2 眼独立注視点制御を用いた推定手法の精度は、注視点間距離に依存すると考えられる。そこで、注視点間距離が長くなるように 2 台のカメラの向きを設定し、2 眼独立注視点制御を実行することで、2 台のカメラの基線長に依存せず、高精度な運動推定が可能となる。

しかし、注視点周辺の直線対応を利用すると、カメラの自己運動を推定できない場合がある。具体的には、ある時刻におけるカメラの投影中心と注目する直線によって張られる平面上をカメラが運動する場合や、カメラ運動が並進運動のみの場合である。これは、直線対応から得られるカメラ運動の制約式が恒等式となるので、直線対応から新たにカメラ運動のパラメータに関する制約式を得ることができないためである。したがって、直線対応の利用は、カメラの運動を制限してしまうという問題を抱えている。

## 3. オプティカルフローとカメラ運動

カメラ運動の自由度は、回転、並進ともに 3 であり、合計で 6 の自由度がある。これに対し、注視点対応から得られるカメラ運動の制約式は、2 個 (式 (1), 式 (2)) である。したがって、注視点対応から得られる制約式だけでは、カメラ運動を推定することができない。

今、注視点制御により、カメラの視線が注視点方向を向いていることを考えると、注視点周辺の特徴は対応付けが容易である

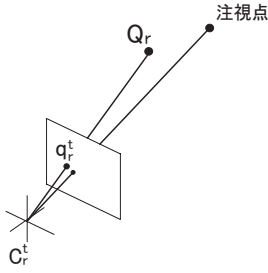


図3 右カメラの注視点  
周辺の点

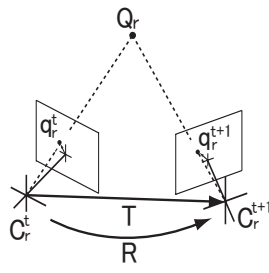


図4 右カメラの注視点周辺  
における点对応

と考えられる。そこで、本稿では、オプティカルフローを利用することを考える。そして、オプティカルフローから新たにカメラ運動のパラメタに関する制約式を導出することを考える。なお、オプティカルフローは、簡単な画像処理により高速に算出が可能である。

まず、右カメラの場合について考える。時刻  $t$  において、右カメラの投影中心が、空間中の位置  $C_r^t$  にあるとする。そして、時刻  $t$  の右カメラの画像面において、注視点の像の周辺に投影される空間中の点  $Q_r$  を考える。時刻  $t$  における点  $Q_r$  の像の座標は、時刻  $t$  の右カメラの画像座標系において  $q_r^t$  であるとする(図3)。また、右カメラが時刻  $t$  から  $t+1$  の間に、時刻  $t$  の右カメラのカメラ座標系で  $R$  だけ回転し、ワールド座標系で  $T$  だけ並進した後で、その投影中心が  $C_r^{t+1}$  に移動したとする(図4)。このとき、点  $Q_r$  を時刻  $t+1$  の右カメラの画像面上に投影して得られる点の座標が、時刻  $t+1$  の右カメラの画像座標系において  $q_r^{t+1}$  で表されるとする(図4)。また、時刻  $t$  から  $t+1$  の間の右カメラの運動  $R, T$  によって生じた、その点のオプティカルフローを  $u_r^t$  とする。

時刻  $t$  で得られた画像と、時刻  $t+1$  で得られた画像から  $u_r^t$  が算出されているとすると、以下のオプティカルフローの定義より  $q_r^t$  に対応する  $q_r^{t+1}$  を求めることができる(図5)。

$$u_r^t = q_r^{t+1} - q_r^t. \quad (3)$$

今、右カメラの焦点距離  $f_r$  を用いて、 $\tilde{q}_r^t = ((q_r^t)^\top, f_r)^\top$ 、 $\tilde{q}_r^{t+1} = ((q_r^{t+1})^\top, f_r)^\top$  とすると、 $\tilde{q}_r^t, \tilde{q}_r^{t+1}$ 、および  $T$  の間に以下の関係式が成り立つ。

$$\alpha R_0 \tilde{q}_r^t = \alpha' R_0 R q_r^{t+1} + T. \quad (4)$$

ただし、 $\alpha, \alpha'$  は、非零の定数である。ここで、式(3)を式(4)に代入すると次のように表せる。

$$\alpha R^\top \tilde{q}_r^t = \alpha' [M u_r^t + \tilde{q}_r^t] + R^\top R_0 T. \quad (5)$$

ここで、

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}^\top$$

とする。式(5)から、カメラ運動のパラメタに関する以下の制約式が得られる。

$$\det [R(M u_r^t + \tilde{q}_r^t) \mid \tilde{q}_r^t \mid R_0^\top T] = 0. \quad (6)$$

左カメラの場合も同様で、時刻  $t$  の左カメラの画像座標系で

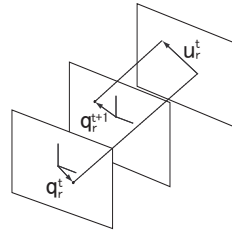


図5 オプティカルフローと  
点対応

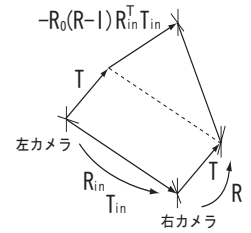


図6 右カメラの回転によって生じる  
左カメラの並進

みた、注視点周辺のある点の座標を  $q_i^t$  とし、時刻  $t$  から  $t+1$  の間に生じた、その点のオプティカルフローを  $u_i^t$  とする。このとき、左カメラの焦点距離  $f_l$  を用いて、 $\tilde{q}_i^t = ((q_i^t)^\top, f_l)^\top$  とすると、左カメラのオプティカルフローに基づくカメラ運動のパラメタに関する制約式は、次式で表される。

$$\det [R R_{in}^\top (M u_i^t + \tilde{q}_i^t) \mid R_{in}^\top \tilde{q}_i^t \mid R_0^\top T + (I - R) R_{in}^\top T_{in}] = 0. \quad (7)$$

ただし、時刻  $t$  から  $t+1$  の間の、右カメラの回転運動により、左カメラは、ワールド座標系で  $-R_0(R - I)R_{in}^\top T_{in}$  だけ並進することに注意する(図6)。式(6)は、 $T$  に関する同次方程式となっている。また、カメラの運動が並進のみの場合、式(7)も  $T$  に関する同次方程式となる。

直線対応を利用する手法[16]では、並進運動のみの場合、直線対応から得られる制約式が恒等式となるため、運動を推定することができなかったが、式(6)、式(7)は、並進運動のみの場合でも、カメラ運動のパラメタに関する制約式として成立する。したがって、オプティカルフローを利用すると、直線対応を利用したときのような問題は生じない。

#### 4. カメラの自己運動の推定

カメラ運動のパラメタは12個あるので、独立なカメラ運動の制約式が12本あれば、そのパラメタを求めることができる。今、行列  $R$  が回転行列であるための必要十分条件 ( $RR^\top = I$ ) から、6個の制約式が得られる。また、注視点対応から2個の制約式(式(1)、式(2))が得られる。したがって、あと4個の制約式があれば、カメラ運動のパラメタを求めることができる。

オプティカルフローに基づく制約式(式(6)、式(7))は、1点に対して、1個ずつ独立に得られる。よって、不足分の制約式は、オプティカルフローに基づく制約式を複数の点に対して得ることで補うことができる。このようにして得られた制約式を Newton-Raphson 法や Powell 法などの非線形最適化手法を用いることで、カメラ運動のパラメタを求めることができる。ただし、カメラの運動が並進運動のみの場合、全ての制約式が並進ベクトル  $T$  に関して同次方程式となるので、 $T$  には推定のたびに定数倍の不定性が残る。したがって、推定された並進ベクトル間のスケールの整合性をとる必要がある<sup>(注1)</sup>。

#### 5. 実験

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。

(注1): 2フレーム間でのカメラ運動が並進のみの場合、常にこの不定性が残る。しかし、この問題は杉本ら[16]により解決されている。

まず始めに、シミュレーションによって2台のカメラの注視点間距離と推定精度の関係を評価した。次に、注視点間の距離を長くとした場合に、本手法のノイズに対する頑健性を評価した。最後に、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。なお、実験では、最適解への収束性が早いことが保証されている Newton-Raphson 法 [14] を非線形最適化手法として採用した。

### 5.1 シミュレーションによる本手法の定量的評価

まず、シミュレーション実験について説明する。ここでは、カメラの基線長を距離の単位とした。また、カメラの画角は  $21^\circ$  とし、焦点距離を 0.025 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。一方、注視点の基線からの奥行きを 10.0 とした。

#### 5.1.1 注視点間距離と推定精度の関係

2眼独立注視点制御を用いた運動推定法の場合、推定精度は2台のカメラの注視点間の距離に依存すると考えられる。そこで、注視点間距離を徐々に長くしていったときに、推定誤差がどのように変化するかを評価した。このとき、各注視点の周りに、更にオプティカルフローを算出する点を2点ずつ発生させた。これらの点は、画像上で注視点を中心とする  $20\text{pixel} \times 20\text{pixel}$  の領域内で発生させた。また、カメラの並進ベクトルは、ノルムが 0.25 になるようにランダムに発生させ、回転行列は、回転角が床面に垂直な軸周りに  $1^\circ$  となるように発生させた。

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、平均  $0\text{pixel}$ 、標準偏差  $2.0\text{pixel}$  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、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  $\hat{\mathbf{T}}$  の誤差は、以下の式で評価した。ここでは、誤差評価のため回転行列  $\hat{R}$  を、回転軸  $\hat{\mathbf{r}}$  ( $\|\hat{\mathbf{r}}\| = 1$ ) と回転角  $\hat{\theta}$  に分解した。

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

$\mathbf{r}$  ( $\|\mathbf{r}\| = 1$ ) は、回転軸の真値であり、 $\theta$  は回転角の真値である。また、 $\mathbf{T}$  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 7, 図 8 は、その実験結果である。前者は、注視点間距離を 1.0 から 10.0 まで 1.0 ずつ変化させたときのグラフであり、後者は、注視点間距離を 5.0 から 50.0 まで 5.0 ずつ変化させたときのグラフである。今、ロボットや人間がカメラを装着することを考えると、基線長は 20cm 程度が一般的である。したがって、前者は、注視点間距離を 20cm から 2m まで変化させた場合に対応し、これは屋内で本手法を適用した場合を想定した実験となる。逆に、後者は、注視点間距離を 1m から 10m まで変化させた場合に対応し、これは屋外で本手法を適用した場合を想定した実験となる。

図 7(b), 図 8(b) をみると、回転に関しては、注視点間距離が変化しても、推定誤差にあまり差異は生じていない。一方、図 7(a), 図 8(a) をみると、推定された並進ベクトルに関して、注視点間距離が長くなるほど、誤差の平均値が小さくなる傾向がある。また、図 8(a) の方が、図 7(a) よりもその傾向が顕著に現れている。しかし、標準偏差は、注視点間距離が長くなっても値が小さくならない。

以上の結果から、注視点間距離を長くすればするほど、より高精度に運動を推定できていることが分かる。また、各結果において、標準偏差が小さくならない原因としては、非線形最適化の過程で局所解に収束したためであると考えられる。

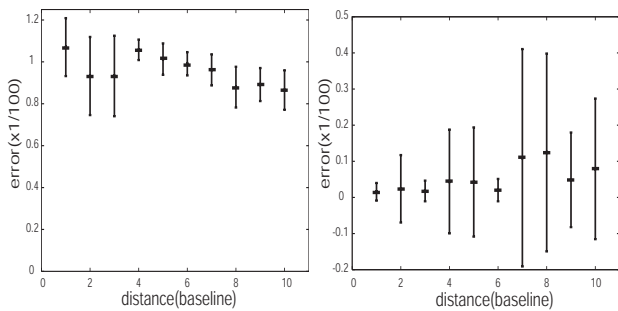
#### 5.1.2 ノイズに対する推定精度の頑健性

ここでは、注視点間距離を長くした場合に、本手法のノイズに対する頑健性を評価した。すなわち、加えるノイズの度合いを徐々に大きくしたときに、推定誤差がどのように変化するかを評価した。上記の実験結果から、カメラの回転の精度は、注視点間距離にあまり依存しないことが分かっているので、本実験ではカメラの並進運動の推定のみに着目した。

注視点間距離が 10.0 の場合、50.0 の場合に対して実験を行った。加えるノイズの度合いを変化させながら、推定誤差を評価した。このとき、平均  $0.0\text{pixel}$ 、標準偏差  $\sigma$  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。ここでは、 $\sigma$  を  $0.5\text{pixel}$  から  $10\text{pixel}$  まで  $0.5\text{pixel}$  刻みで変化させた。

図 9(a), (b) は、注視点間距離が 10.0, 50.0 の場合における実験結果を示した図である。図 9 をみると、加えるノイズの度合いを大きくしても、推定誤差の平均値に関しては、あまり変化がない。また、標準偏差に関しては、加えるノイズの度合いに影響されずほぼ一定の値となっている。

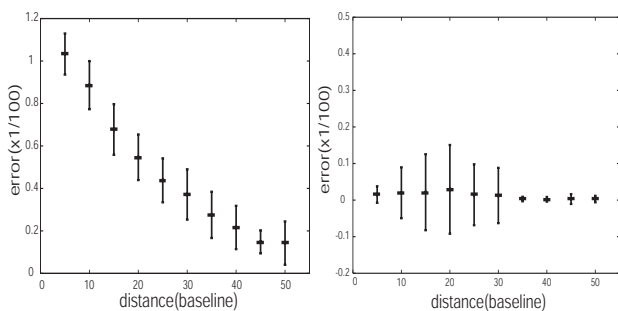
頑健性に関しては、 $2\text{pixel}$  程度のノイズに対して評価をするのが一般的である。ここでは最大  $10\text{pixel}$  のノイズを加えてい



(a) 並進ベクトル

(b) 回転行列

図 7 注視点間距離を 1.0 から 10.0 まで 1.0 刻みで変化させた際の推定誤差

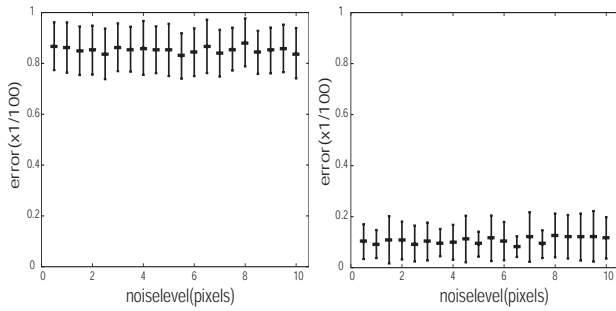


(a) 並進ベクトル

(b) 回転行列

図 8 注視点間距離を 5.0 から 50.0 まで 5.0 刻みで変化させた際の推定誤差





(a) 注視点間距離 10.0 (b) 注視点間距離 50.0  
 図 9 注視点間距離を大きくしたときの推定誤差

るが、推定誤差の平均値に関しては、加えるノイズの度合いに関係なくほぼ一定である。よって、注視点間距離を長くとした場合、本手法はノイズに対して頑健であるといえる。このことから、注視点が高精度に検出できない場合においても、本手法を用いることで、安定な推定が期待できる。また、標準偏差が大きい原因としては、上記の実験同様、非線形最適化によって局所解に陥ったことが考えられる。

### 5.2 実画像を用いた運動推定

ここでは、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。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 2m から 3m 程度になるように、2 台のカメラの向きを設定した (図 10)。このとき、カメラ座標系の Z 軸は、カメラの光軸と平行であるとし、ワールド座標系は、初期位置における右カメラのカメラ座標系と一致しているとした。

図 11 に示す軌跡 (約 4m) に沿って実験室内でカメラを運動させ、本手法を用いることで、その運動を推定した。ここでのカメラ運動の軌跡は図 12 に示す構成であり、カメラ運動の過程を 85 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、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を適用した。注視点制御における注視点の対応付けは手動で行った。実験時に選択した注視点の例を図 13 に示す。図 13 をみると、左右のカメラは視野を共有していないことが分かる。また、運動の過程において、注視点が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 5 回であった)。そして、注視点を中心とする 100pixel×100pixel 領域において、オプティカルフローを算出し [2], [9], さらに、注視点を中心とする



図 10 実験時のカメラ配置



図 11 実験環境

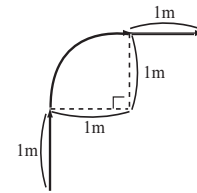


図 12 カメラ運動の軌跡



(a) 右カメラ



(b) 左カメラ

図 13 実験時に選択した注視点の例



(a) カメラ運動前



(b) カメラ運動後

図 14 オプティカルフローを算出する右カメラの画像の例

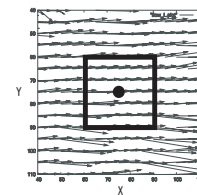


図 15 実験で得られたオプティカルフロー

30pixel×30pixel の領域からランダムに 2 点を選んだ (図 14, 図 15)。

ワールド座標系におけるカメラ運動の真値、および、推定結果を重ね合わせて 3 次元表示したものを図 16 に示す。また、推定結果と真値をワールド座標系の XZ 平面, YZ 平面にそれぞれ投影し、重ね合わせて表示した結果を図 17, 18 に示す。図 17, 18 において、実線が推定結果であり、点線が真値である。カメラ位置推定の誤差を図 19 に示す。

図 17, 図 18 をみると、円弧前後の直線部分においては、推定結果が真値と概ね一致しているが、円弧の部分では、推定結果が真値と一致していない。しかし、図 19 をみると、始めの直線部分において、カメラの位置に関する誤差が徐々に累積している。逆に、円弧部分の前半では、あまり誤差が生じていない。また、終端で約 25cm の誤差が生じている。

全体としては、真値と推定結果が概ね一致していることが分かる。最初の直線部分においては、推定された並進ベクトルは、方向は正しいがノルムが不正確であったために、誤差が生じていると考えられる。そして、円弧部分前半の推定誤差とそれ以前の直線部分の推定誤差が相殺したために、円弧部分前半において誤差が減少していると考えられる。

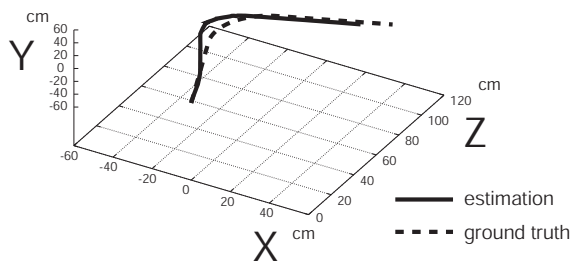


図 16 真値と推定結果の 3 次元表示

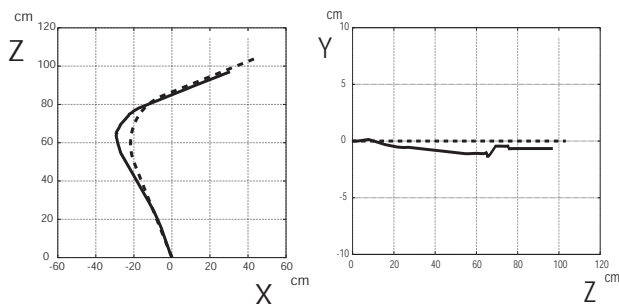


図 17 XZ 平面へ投影した図 図 18 YZ 平面へ投影した図

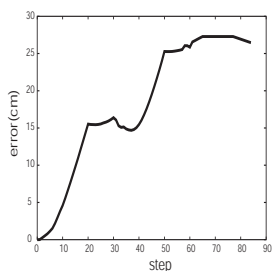


図 19 カメラ位置推定の誤差

## 6. ま と め

本稿では、2 眼独立注視点制御に基づくカメラ運動推定法 [16] の問題点を改善した。

従来、2 眼独立注視点制御を通して得られる注視点対応と注視点周辺の直線対応を利用して運動推定を行っていた。しかし、注視点周辺の直線対応を利用する場合、直線の選び方によっては、その推定が困難になるという問題点があった。そこで、本稿では、直線対応の代わりにオプティカルフローを利用する手法を提案した。具体的には、オプティカルフローからカメラの自己運動に関する拘束式を導出し、それと注視点対応から得られる制約式を用いてカメラの自己運動を推定する手法を提案した。オプティカルフローは簡単な画像処理で算出できるので、実時間性を損なうことなく運動を推定することが可能となる。

また、2 眼独立注視点制御を用いた推定手法における注視点間距離と推定精度の関係を、定量的に評価した。実験により、注視点間距離が長くなればなるほど、推定精度が向上することを示した。さらに、注視点間距離を長くした場合、提案手法がノイズに対して、頑健であることを示した。そして、これらの定量的評価を踏まえた上で、実環境下におけるカメラの自己運動推定実験を行った。その結果、本手法を用いることにより、カメラの自己運動を高精度に推定できることを示した。

今後は、各ステップでの推定精度を向上させることで、累積誤差の緩和を目指す。そのアプローチとして、運動前後の 2 枚の画像から得られる情報のみを用いて運動推定するのではなく、それ以前の画像から得られる情報も利用することを考えている。また、推定誤差の標準偏差を小さくし、本手法の安定化を図るために、非線形最適化手法についても検討する予定である。なお、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 Medelne 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] A. J. Davison: *Mobile Robot Navigation Using Active Vision*, Ph.D thesis, University of Oxford, 1998.
- [4] 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.
- [5] A. J. Davison and D. W. Murray: *Mobile Robot Localisation using Active Vision*, *Proc. of ECCV*, Vol. 2, pp. 809-825, 1998.
- [6] 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.
- [7] D. A. Forsyth and J. Ponce: *Computer Vision : A Modern Approach*, Prentice Hall, 2003.
- [8] N. Gonçalves and H. Araújo: *Estimation of 3D Motion from Stereo Images*, *Proc. of 16th International Conference on Pattern Recognition(ICPR)*, Vol. I, pp. 335-338, 2002.
- [9] 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.
- [10] J. Matas, O. Chum, M. Urban and T. Pajdla: *Robust Wide Baseline Stereo from Maximally Stable Extremeal Regions*, *Proc. of BMVC*, 2002.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] P. Pritchett and A. Zisserman: *Wide Baseline Stereo Matching*, *Proc. of 14th International Conference on Pattern Recognition(ICPR)*, pp. 754-760, 1998.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.