

# 単眼カメラと慣性センサを組み合わせた 複合センサ導入の有効性の検討

椎屋 和久<sup>1)</sup> ・ 黒田 健晴<sup>2)</sup> ・ 泉田 喜一郎<sup>3)</sup>

## Validity Study of the Introduction of the Compound Sensor that combined a Monocular Camera and an Inertial Sensor.

Kazuhisa SHIYA, Takeharu KURODA, Kiichiro IZUMIDA

### Abstract

This paper is concerned with the introduction of the compound sensor that combined a monocular camera and an inertial sensor. And we handle the problem of the matching between the moving camera images. Almost all of existing methods has restraints on movement of a camera. The purpose of our research is extension of logic that can be applied even if a camera carries out movement of 6 degrees of freedom. And we show the validity of this method which used the compound sensor by the experiment using the moving camera images and the inertial sensor's data.

### Key Words :

Monocular Camera, Inertial Sensor, Moving Camera Image, Epipolar Line, Edge Segment

## 1. まえがき

移動ロボットに単眼カメラを搭載することを想定した場合、ロボットの移動と共にカメラも移動するため、時系列で得られるカメラ画像の位置・姿勢が変動するという問題が生じる。従って、カメラ画像間の対応付けを逐次処理的に行うためには、まず、単眼カメラの6自由度の運動を推定してカメラ画像の位置・姿勢の変動を補正する必要がある。時系列画像からカメラの運動を推定して画像上の空間的な特徴点を対応付ける手法として、画像平面上での変動を拘束することでカメラの運動の一部をあらかじめ既知と仮定できることを前提とした方法<sup>1), 2)</sup>が提案されているが、カメラの回転運動・並進運動に様々な制約を設けているので、いずれもカメラが6自由度の運動を行う実環境下での応用には適していない。これらの問題を解決して実環境下での応用を実現するためには、従来の論理を拡張してカメラの運動の制約をはずした論理が必要となる。そこで本論文では、単眼カメラと慣性センサを組み合わせた複合センサを導入し、慣性センサを用いて単眼

カメラの6自由度の運動を逐次的に計測する方法を提案する。以下、**2.**で本論文で定義する観測モデルについて述べ、**3.**および**4.**で単眼カメラの6自由度の運動パラメータの導出について述べる。また、移動カメラ画像上の空間的な対応付けの問題は、エピポーラ幾何の概念を通じて、時系列画像のエピポーラ線上の1次元探索問題として取り扱うことができる<sup>3)</sup>。このことから、**5.**でこれまでに得られたカメラ画像間の関係を用いた画像の平行化について述べ、**6.**で平行画像間でのエピポーラ線の算出について述べる。次に、**7.**でエピポーラ線算出の実験結果について述べ、さらに、画像上の空間的な特徴点であるエッジセグメントをエピポーラ線に基づいて対応付けを行った実験結果について述べる。最後に、**8.**で本論文の結論について述べる。

## 2. 観測モデル

本論文では、移動ロボットに単眼カメラと慣性センサを同じ姿勢となるように平行に取り付けているものとする。なお、移動する単眼カメラの運動パラメータ

<sup>1)</sup>電気電子工学科助手

<sup>2)</sup>電気電子工学専攻大学院生

<sup>3)</sup>電気電子工学科教授

は、3自由度の回転運動成分と3自由度の並進運動成分の6自由度として考えることができる。

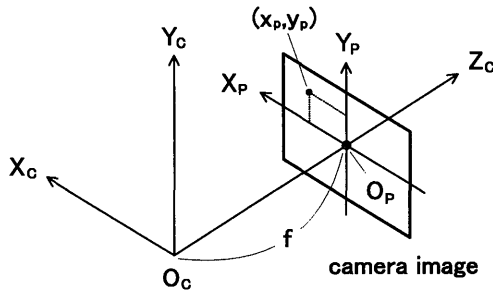


図1 カメラ座標  $\Phi_C$  とカメラ画像  $\Phi_P$  の関係

ここで、本論文における観測座標を図1のように定義する。単眼移動カメラの姿勢を表す座標系であるカメラ座標  $\Phi_C(X_C, Y_C, Z_C)$  は、原点  $O_C$  をカメラ光学中心（レンズ中心）、 $Z_C$  軸をカメラ光軸方向、 $Y_C$  軸をカメラ視野鉛直上方向にとり、右手直交系で定義する。また、撮影された時系列画像を記述する座標系であるカメラ画像  $\Phi_P(X_P, Y_P)$  は、原点  $O_P$  を画像中心で  $Z_C$  軸上のカメラ焦点距離  $f$  の位置、 $X_P$  軸と  $Y_P$  軸をそれぞれ  $X_C$  軸と  $Y_C$  軸に平行にとり、平面座標系で定義する。なお、このときの射影点の座標を  $(x_p, y_p)$  とし、画素濃度を  $F(x_p, y_p)$  として表す。

3. カメラの回転運動成分

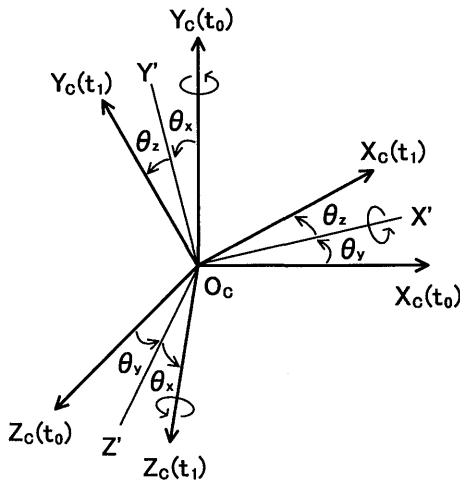


図2 カメラの回転運動

ここではまず、カメラの3自由度の回転運動成分について考える。本論文では、カメラが時刻  $t_0$  から時刻  $t_1$  の間に、図2のように  $Y_C(t_0)$ ,  $X'$ ,  $Z_C(t_1)$  軸回りに順次  $\theta_y, \theta_x, \theta_z$  ずつ回転するものとする。但し、各軸回りの回転角はそれぞれ右ねじの方向を正方向とする。このときのカメラの回転運動パラメータ  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  は、カメラと慣性センサの姿勢が同じなので、

時刻  $t_0$  から時刻  $t_1$  の間に生じる慣性センサ自身の姿勢変動量と同じ量であり、慣性センサデータとして逐次的に得られる値である。ここで、時刻  $t_0$  と時刻  $t_1$  のカメラ座標の関係は以下の式で与えられる。なお、 $[C_1 C_{C_0}]$  は時刻  $t_0$  のカメラ座標と時刻  $t_1$  のカメラ座標の関係を与える座標変換行列である。また、 $\bar{s}, \bar{c}$  はそれぞれ  $\sin, \cos$  の演算子を表し、以降の式でも同様に扱う。

$$\Phi_C(t_1) = [C_1 C_{C_0}] \Phi_C(t_0) \tag{1}$$

$$[C_1 C_{C_0}] = \begin{bmatrix} \bar{c}\theta_y \bar{c}\theta_z + \bar{s}\theta_x \bar{s}\theta_y \bar{s}\theta_z & \bar{c}\theta_x \bar{s}\theta_z \\ -\bar{c}\theta_y \bar{s}\theta_z + \bar{s}\theta_x \bar{s}\theta_y \bar{c}\theta_z & \bar{c}\theta_x \bar{c}\theta_z \\ \bar{c}\theta_x \bar{s}\theta_y & -\bar{s}\theta_x \\ -\bar{s}\theta_y \bar{c}\theta_z + \bar{s}\theta_x \bar{c}\theta_y \bar{s}\theta_z & \\ \bar{s}\theta_y \bar{s}\theta_z + \bar{s}\theta_x \bar{c}\theta_y \bar{c}\theta_z & \\ \bar{c}\theta_x \bar{c}\theta_y & \end{bmatrix} \tag{2}$$

4. カメラの並進運動成分（基線）

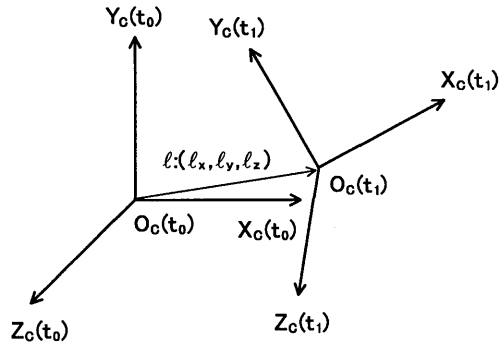


図3 カメラの並進運動

次に、カメラの3自由度の並進運動成分について考える。本論文では、カメラが時刻  $t_0$  から時刻  $t_1$  の間に、図3のように時刻  $t_1$  での各軸方向へそれぞれ  $l_x, l_y, l_z$  ずつ移動するものとする。このときのカメラの並進運動パラメータ  $l_x, l_y, l_z$  は、カメラと慣性センサとの位置（取り付け位置）の違いによって生じる慣性センサの回転による並進成分  $(l'_x, l'_y, l'_z)$  と時刻  $t_0$  から時刻  $t_1$  の間の慣性センサ自身の並進成分  $(l''_x, l''_y, l''_z)$  より次式で求めることができる。なお、このカメラの並進運動成分をそのまま、時刻  $t_0$  と時刻  $t_1$  の2枚のカメラ画像間の基線  $l$  として取り扱うものとする。

$$\begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l'_x + l''_x \\ l'_y + l''_y \\ l'_z + l''_z \end{bmatrix} \tag{3}$$

## 4.1 カメラの取り付け位置

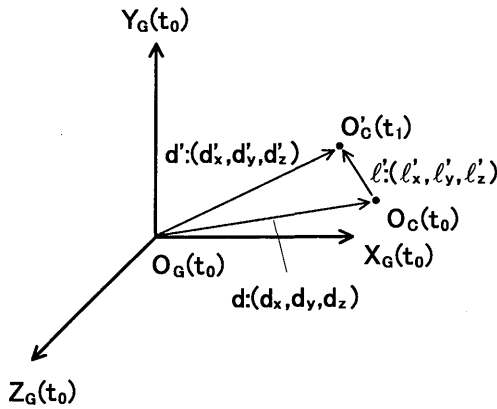


図4 慣性センサの回転によるカメラ位置の移動

ここで、慣性センサとカメラの位置関係について考える。本論文では、慣性センサの姿勢を表す座標系であるジャイロ座標  $\Phi_G(X_G, Y_G, Z_G)$  は、カメラ座標  $\Phi_C(X_C, Y_C, Z_C)$  と平行な関係にあるものとし、図4のようにジャイロ座標の原点  $O_G$  とカメラ座標の原点  $O_C$  の位置が異なっているものとする。また、慣性センサとカメラをもつ計装系の回転中心が慣性センサの原点にあるものとする、慣性センサの回転によってカメラ座標の原点が  $O_C(t_0)$  から  $O'_C(t_1)$  へ移動する。これは、慣性センサが回転運動をすると、カメラには回転成分による変動だけでなく並進成分による変動も加わることを示している。このときの慣性センサの回転によるカメラの並進成分  $l'$  は、時刻  $t_0$  のジャイロ座標から見たカメラ座標の原点の位置を  $\mathbf{d}$  とし、移動後のカメラ座標の原点の位置を  $\mathbf{d}'$  とすると次式で与えられる。

$$\begin{aligned} l' &= [C_1 C_{C_0}] \mathbf{d}' - [C_1 C_{C_0}] \mathbf{d} \\ &= \mathbf{d} - [C_1 C_{C_0}] \mathbf{d} \end{aligned} \quad (4)$$

これより、時刻  $t_1$  のカメラ座標での並進成分は次式で与えられる。但し、 $d_x, d_y, d_z$  はカメラの取り付け位置であり既知とできる。

$$\begin{bmatrix} l'_x \\ l'_y \\ l'_z \end{bmatrix} = \left( [\mathbf{I}] - [C_1 C_{C_0}] \right) \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

## 4.2 慣性センサの並進成分

時刻  $t_0$  から時刻  $t_1$  の間の慣性センサ自身の移動量は、慣性センサデータとして逐次的に得ることができる。但し、慣性センサから得られる並進運動データ

は加速度である。時刻  $t_0$  から時刻  $t_1$  の間の慣性センサデータのサンプリング数を  $M$  とすると、各サンプリング時のジャイロ座標での加速度  $\alpha_{xm}, \alpha_{ym}, \alpha_{zm}$  ( $m = 0, 1, \dots, M-1$ ) より、時刻  $t_1$  のカメラ座標での並進成分  $l''$  は以下の式で与えられる。但し、 $[C_1 C_{G_m}]$  は時刻  $\frac{t_1 - t_0}{M} \cdot m$  から時刻  $t_1$  までの慣性センサの姿勢変動を表す座標変換行列 ( $[C_1 C_{C_0}] = [C_1 C_{G_0}]$ ) であり、各サンプリング時の姿勢変動量  $\theta_{xm}, \theta_{ym}, \theta_{zm}$  を代入して逐次決定する。なお、時刻  $t_0$  での初速度  $v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}$  は既知とする。

$$\begin{bmatrix} l''_x \\ l''_y \\ l''_z \end{bmatrix} = (t_1 - t_0) [C_1 C_{C_0}] \begin{bmatrix} v_{x0} \\ v_{y0} \\ v_{z0} \end{bmatrix} + \left( \frac{t_1 - t_0}{M} \right)^2 \sum_{m=0}^{M-1} \left\{ \left( M - m - \frac{1}{2} \right) [C_1 C_{G_m}] \begin{bmatrix} \alpha_{xm} \\ \alpha_{ym} \\ \alpha_{zm} \end{bmatrix} \right\} \quad (6)$$

但し、

$$[C_1 C_{G_m}] = \begin{bmatrix} \bar{c}\Delta\theta_{ym}\bar{c}\Delta\theta_{zm} + \bar{s}\Delta\theta_{xm}\bar{s}\Delta\theta_{ym}\bar{s}\Delta\theta_{zm} \\ -\bar{c}\Delta\theta_{ym}\bar{s}\Delta\theta_{zm} + \bar{s}\Delta\theta_{xm}\bar{s}\Delta\theta_{ym}\bar{c}\Delta\theta_{zm} \\ \bar{c}\Delta\theta_{xm}\bar{s}\Delta\theta_{zm} - \bar{s}\Delta\theta_{ym}\bar{c}\Delta\theta_{zm} + \bar{s}\Delta\theta_{xm}\bar{c}\Delta\theta_{ym}\bar{s}\Delta\theta_{zm} \\ \bar{c}\Delta\theta_{xm}\bar{c}\Delta\theta_{zm} \quad \bar{s}\Delta\theta_{ym}\bar{s}\Delta\theta_{zm} + \bar{s}\Delta\theta_{xm}\bar{c}\Delta\theta_{ym}\bar{c}\Delta\theta_{zm} \\ -\bar{s}\Delta\theta_{xm} \quad \bar{c}\Delta\theta_{xm}\bar{c}\Delta\theta_{ym} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_{xm} \\ \Delta\theta_{ym} \\ \Delta\theta_{zm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_x - \theta_{xm} \\ \theta_y - \theta_{ym} \\ \theta_z - \theta_{zm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

## 5. 画像の平行化 (基準画像)

ここでは、時刻  $t_0$  と時刻  $t_1$  の2枚のカメラ画像を平行なステレオ視の関係に変換するために、3. で求めた回転運動によって生じる時刻  $t_0$  のカメラ画像上での射影位置の変位量を補正し、時刻  $t_0$  のカメラ画像  $\Phi_P(t_0)$  を基準画像  $\Phi$  へ射影変換する。ここで基準画像  $\Phi(X, Y)$  とは、原点  $O$  を並進運動を考慮しない場合の時刻  $t_1$  のカメラ画像の原点  $O_P(t_1)$  と同じ位置にとり、 $X$  軸と  $Y$  軸をそれぞれ時刻  $t_1$  のカメラ画像  $\Phi_P(t_1)$  の  $X_P(t_1)$  軸と  $Y_P(t_1)$  軸に平行にとることで、時刻  $t_0$  のカメラ画像を時刻  $t_1$  のカメラ画像と平行になるように変換した画像である。時刻  $t_0$  のカメラ画像での射影位置  $(x_{p0}, y_{p0})$  に対応する基準画像での射影位置  $(x_0, y_0)$  は次式で与えられる。但し、 $N_x, N_y$  はカメラ画素数、 $D_x, D_y$  はカメラ視野角  $[\circ]$  であ

り、すべて既知とできる。なお、 $\bar{t}$ は $\tan$ の演算子を表す。

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{c}\theta_z & \bar{s}\theta_z \\ -\bar{s}\theta_z & \bar{c}\theta_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{p0} - \frac{N_x}{2} \cdot \frac{\bar{t}\theta_y}{\bar{t}\frac{D_x}{2}} \\ y_{p0} + \frac{N_y}{2} \cdot \frac{\bar{t}\theta_x}{\bar{t}\frac{D_y}{2}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

時刻 $t_0$ のカメラ画像に対し、すべての画素について、 $(x_{p0}, y_{p0})$ 位置の濃度 $F(x_{p0}, y_{p0})$ を基準画像の $(x_0, y_0)$ 位置の濃度 $F(x_0, y_0)$ として再構成することで基準画像に変換できる。これにより、時刻 $t_0$ と時刻 $t_1$ のカメラ画像を平行画像として取り扱うことができる。

## 6. エピポーラ線

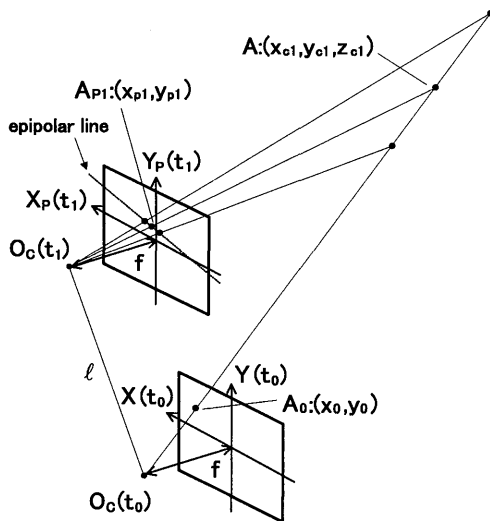


図5 時刻 $t_1$ のカメラ画像 $\Phi_P(t_1)$ 上でのエピポーラ線

次に、4.で求めた基線と5.で求めた基準画像に基づいて、時刻 $t_1$ のカメラ画像上でのエピポーラ線を算出する。図5のように時刻 $t_0$ の基準画像上で $(x_0, y_0)$ に射影される観測点 $A$ の距離が不明であるとき、時刻 $t_1$ のカメラ画像上でどの位置に射影されるかが不明となる。このときの観測点 $A$ の距離を変数とするエピポーラ線は、 $O_C(t_1) - O_C(t_0) - A_0(x_0, y_0)$ を含む平面と時刻 $t_1$ のカメラ画像 $\Phi_P(t_1)$ の2平面の交線として次式で与えられる。

$$\begin{aligned} & -x'_{p1} \left( N_y \ell_y - 2y_0 \ell_z \tan \frac{D_y}{2} \right) \tan \frac{D_x}{2} \\ & + y'_{p1} \left( N_x \ell_x - 2x_0 \ell_z \tan \frac{D_x}{2} \right) \tan \frac{D_y}{2} \\ & = -x_0 N_y \ell_y \tan \frac{D_x}{2} + y_0 N_x \ell_x \tan \frac{D_y}{2} \quad (10) \end{aligned}$$

また、この式(10)を満たすエピポーラ線上の複数の $(x'_{p1}, y'_{p1})$ が対応点候補の射影位置であり、 $(x_0, y_0)$ の

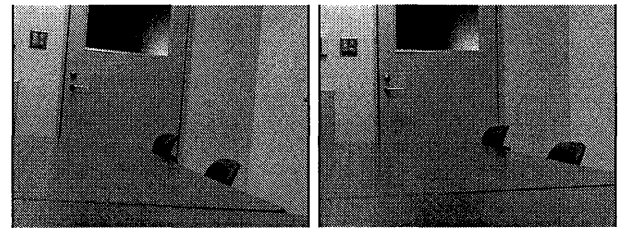
真の対応点 $(x_{p1}, y_{p1})$ は、エピポーラ線上を1次元探索することで求めることができる。

## 7. 実験結果

最後に、単眼カメラと慣性センサを組み合わせた複合センサ導入の有効性を調べるために計算機プログラムを作成し、カメラ(ソニー(株)DCR-VX1000)と慣性センサ(多摩川精機(株)TA7512N3130)を計装した台車をゆっくりと移動させ計測した実測データを用いて2通りの実験を行った。ここで、使用したカメラの画素数は $N_x = 640$ ,  $N_y = 480$ , 視野角は $D_x = 44.0[^\circ]$ ,  $D_y = 33.0[^\circ]$ であり、使用レンズの定数は $f = 5.9[mm]$ ,  $F = 1.6$ である。また、慣性センサの各軸ごとの検出精度は角度が $\pm 0.3[^\circ]$ 以下( $Y_G$ 軸のみ $\pm 0.5[^\circ]$ 以下)、加速度が $\pm 0.1[m/s^2]$ 以下である。

### 7.1 エピポーラ線の算出

ここでは、6.で述べたエピポーラ線算出の実験を行った。図6に計測した時系列画像を示す。図6(a)は時刻 $t_0$ のカメラ画像であり、図6(b)は時刻 $t_1$ のカメラ画像である。また、慣性センサデータを用いて3.および4.で述べた単眼カメラの6自由度の運動パラメータを求めた結果は、時間間隔 $t_1 - t_0 = 1.18[sec]$ , 回転成分 $\theta_x = 0.066[^\circ]$ ,  $\theta_y = -0.428[^\circ]$ ,  $\theta_z = 5.746[^\circ]$ , 並進成分 $\ell_x = 44.000[cm]$ ,  $\ell_y = 0.049[cm]$ ,  $\ell_z = 1.749[cm]$ である。



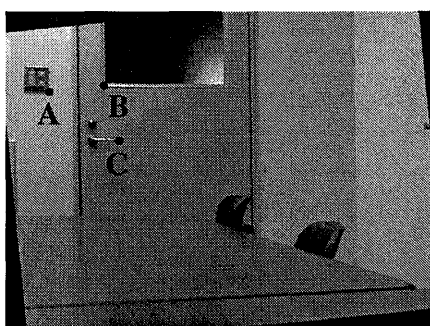
(a) Time  $t_0$ .

(b) Time  $t_1$ .

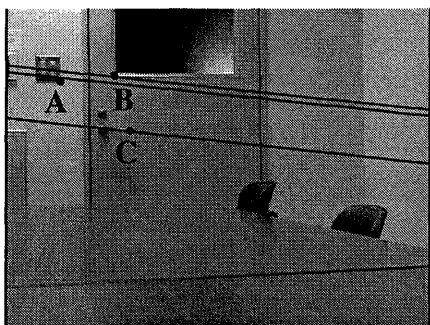
図6 カメラ画像

ここで、図7(a)は図6(a)を5.で述べた基準画像に変換した結果である。このとき、観測点 $A \sim C$ について、時刻 $t_0$ の基準画像上での射影位置を図7(a)に示し、時刻 $t_1$ のカメラ画像上での真の対応点の射影位置および各点のエピポーラ線を図7(b)に示す。また表1は、図7の各点の座標を示したものである。なお、 $(x_0, y_0)$ は図7(a)での観測点の座標、 $(x_{p1}, y_{p1})$ は図7(b)での対応点(真値)の座標、 $(x'_{p1}, y'_{p1})$ は図7(b)のエピポーラ線上で $(x_{p1}, y_{p1})$ に最も近い点(対応点候補)の座標である。表1より各観測点の真の対

応点  $(x_{p1}, y_{p1})$  と対応点候補  $(x'_{p1}, y'_{p1})$  を比較して評価を行う. ここで, 点Aが  $X_P(t_1)$  軸で1画素,  $Y_P(t_1)$  軸で2画素, 点Cが  $Y_P(t_1)$  軸で1画素ずれている. これは, 点Bは式 (10) を満たしており, エピポーラ線に対応点があることを示し, 点Aと点Cはエピポーラ線上には対応点がないことを示している. しかし, カメラ画像では大きさの最小単位が画素であるので, カメラの分解能と慣性センサの精度の問題による限界があることを考えると, エピポーラ線の幅を1画素分ではなく  $\pm 2$  画素程度の幅を持たせることで, すべての対応点をエピポーラ線上に射影することができると考えられる.



(a) Targeted points at time  $t_0$ .



(b) Epipolar lines at time  $t_1$ .

図7 実験結果

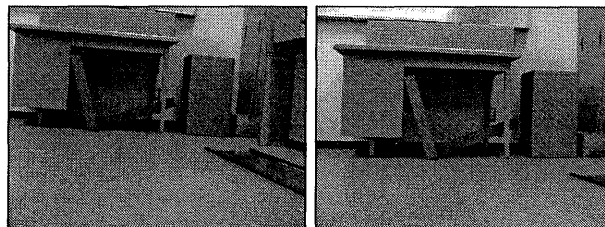
表1 射影位置の比較

	観測点 $(x_0, y_0)$	対応点 $(x_{p1}, y_{p1})$	エピポーラ線 $(x'_{p1}, y'_{p1})$
点A	(256,120)	(238,133)	(237,135)
点B	(175,127)	(159,138)	(159,138)
点C	(152,47)	(135,58)	(135,57)

### 7.2 エッジセグメントの対応付け

次に, 7.1 よりエピポーラ線の算出が可能であることをふまえて, 画像上の空間的な特徴点であるエッジセグメントの対応付け実験を行った. 図8に計測した時系列画像を示す. 図8(a)は時刻  $t_0$  のカメラ画像であり, 図8(b)は時刻  $t_1$  のカメラ画像である. また, 慣性センサデータを用いて 3. および 4. で述べた

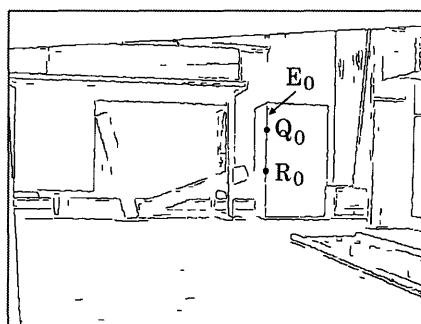
単眼カメラの6自由度の運動パラメータを求めた結果は, 時間間隔  $t_1 - t_0 = 1.66[\text{sec}]$ , 回転成分  $\theta_x = -2.958[^\circ]$ ,  $\theta_y = 0.236[^\circ]$ ,  $\theta_z = 3.157[^\circ]$ , 並進成分  $l_x = 30.382[\text{cm}]$ ,  $l_y = -2.726[\text{cm}]$ ,  $l_z = 30.417[\text{cm}]$  である.



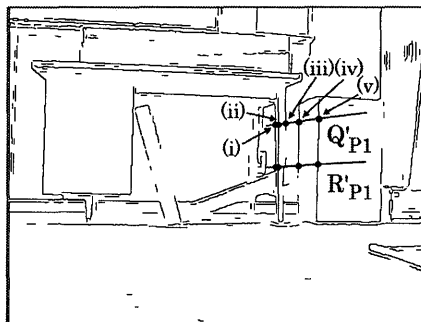
(a) Time  $t_0$ .

(b) Time  $t_1$ .

図8 カメラ画像



(a) Selected points at time  $t_0$ .



(b) Epipolar lines at time  $t_1$ .

図9 実験結果

このとき, 図8の2枚の画像からエッジセグメントを抽出する. 但し本論文では, 新たなエッジ検出法を提案することが目的ではないので, 従来から一般的に用いられている平滑化・微分・2値化という処理によりエッジを抽出し, さらにエッジ画素の追跡処理によりエッジの連結線であるエッジセグメントを抽出するものとする. ここで, 図9(a)は図8(a)を 5. で述べた基準画像に変換し, さらにエッジセグメントを抽出した結果である. このとき, 観測するエッジセグメント  $E_0$  および任意の代表点  $Q_0, R_0$  を図9(a)に示し, 各代表点のエピポーラ線(探索範囲)およびエピポーラ線上の対応点候補  $Q'_{p1}, R'_{p1}$  を図9(b)に示す. なお, エピポーラ線上の探索範囲は観測点までの最短距離を

考慮することで限定できる。また表2は、図9(a)の $Q_0$ 、 $R_0$ の座標および図9(b)の $Q'_{P1}$ 、 $R'_{P1}$ の座標を示したものである。なお、図9(b)のエピポーラ線の左側から順に(i), (ii), ..., (v)とする。このとき、 $Q'_{P1}$  (iii)を含むエッジセグメントと $R_0$ のエピポーラ線とは交わらないので $R'_{P1}$  (iii)は考慮しない。

表2 射影位置の比較

	代表点 ( $x_0, y_0$ )			対応点候補 ( $x_{p1}, y_{p1}$ )
点 $Q_0$	(-71, 59)	点 $Q'_{P1}$	(i)	(-85, 61)
			(ii)	(-90, 61)
			(iii)	(-101, 63)
			(iv)	(-121, 65)
			(v)	(-151, 69)
点 $R_0$	(-70, -3)	点 $R'_{P1}$	(i)	(-86, -2)
			(ii)	(-90, -2)
			(iii)	-
			(iv)	(-121, 0)
			(v)	(-150, 1)

また表3は、時刻 $t_0$ の基準画像での $Q_0$ 、 $R_0$ とその8近傍画素の濃度合計 $G(x_0, y_0)$ および時刻 $t_1$ のカメラ画像での $Q'_{P1}$ 、 $R'_{P1}$ とその8近傍画素の濃度合計 $G(x'_{p1}, y'_{p1})$ を示したものである。表3より各代表点の画素濃度 $G(x_0, y_0)$ と対応点候補の画素濃度 $G(x'_{p1}, y'_{p1})$ を比較して評価を行う。ここでは、画素濃度が最も近い対応点候補を真の対応点 $Q_{P1}$ 、 $R_{P1}$ および対応エッジセグメントと決定する。結果は、図9(b)右端の $Q'_{P1}$  (v)、 $R'_{P1}$  (v)を含むエッジセグメントを $E_0$ に対応するエッジセグメントとして正しく検出することができた。

表3 画素濃度の比較

	代表点 $G(x_0, y_0)$			対応点候補 $G(x'_{p1}, y'_{p1})$
点 $Q_0$	1059	点 $Q'_{P1}$	(i)	1328
			(ii)	1153
			(iii)	1331
			(iv)	1238
			(v)	1049
点 $R_0$	1028	点 $R'_{P1}$	(i)	1292
			(ii)	1216
			(iii)	-
			(iv)	825
			(v)	1058

また表4に、同様の方法で図9(a)のすべてのエッジセグメントを対応付けた場合の結果を示す。140個のエッジセグメントのうち、約81[%] (114個)のエッジ

セグメントが正しく対応付けられた。残りの約19[%] (26個)のエッジセグメントについては正しく対応付けることができなかったが、この中には、真に対応するエッジセグメントが図9(b)の画像の外にあるために画像内で対応付けられなかったケース (対応なし) が9個含まれており、これを除くと、間違ったエッジセグメントと対応付けたケース (誤対応) は約12[%] (17個)であった。この誤対応の原因としては、エッジ画像に変換する際に、2枚の画像間で1対1に対応するエッジセグメントが正しく抽出されていなかったことや、対応するエッジセグメントの長さが短く、その周囲に同じようなエッジセグメントが何本もあったことなどが考えられる。しかし、これらはいずれも特徴としては弱いエッジ部分を含むもののみであり、はっきりとした特徴点としての必要な情報である強いエッジ部分を含むエッジセグメントについては、そのほとんどが正しく対応付けられていると考えられる。

表4 すべてのエッジセグメントに対する実験結果

対応 (正解)	114/140	81.43[%]
対応なし	9/140	6.43[%]
誤対応	17/140	12.14[%]

## 8. むすび

本論文では、慣性センサより得られた運動パラメータを用いて画像間の関係を導くことで、ランダムな移動を行うカメラの画像を、2枚の画像の関係を既知とする場合と同様に取り扱うことができた。これは、従来の位置関係が既知の2台のカメラで順次撮影する場合を含んでおり、より一般的・実用的な手法であると考えられることから論理の拡張を行うことができたといえる。また、2通りの実験によって単眼カメラと慣性センサを組み合わせた複合センサの導入が十分有効であることを確認した。

## 参考文献

- 1) 速水康晴他, “動画像からの平面移動カメラの位置・姿勢・自己運動の決定,” 信学論 (A), 1997.
- 2) 佐藤岳晴他, “未校正カメラによる未校正ロボットの視覚サーボ,” 信学論 (D-II), 2000.
- 3) O. Faugeras, “Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint,” The MIT Press, 1993.