

論文

平面移動カメラからの実動画像による位置・姿勢・自己運動の推定

山本 正信[†] 小山 剛弘^{†*} 速水 康晴^{†**}

Pose and Ego Motion of Mobile Camera from Real Image Sequence

Masanobu YAMAMOTO[†], Takehiro KOYAMA^{†*}, and Yasuharu HAYAMI^{†**}

あらまし 本論文では、移動するカメラからの動画像とシーンの形状モデルを使って、カメラの位置・姿勢及び運動を決定する手法を提案する。カメラは、平らな床面上を走行する移動ロボットに、光軸が床面に平行になるように搭載する。2種類の対応付け、すなわち画像間の特徴点対応及び特徴点とモデルの平面パッチとの対応、からカメラの位置・姿勢及び運動を解析的に求める。解析解を初期解として数値最適化により最適解を求める。実際の動画像からカメラの位置・姿勢・運動が十分な精度で得られた。その際、特徴点の位置がサブピクセル精度で与えられ、観測する面の数と特徴点の数が多いほど測定精度の向上が見られた。

キーワード 動画像解析, カメラの位置・姿勢, 自己運動, 解析解, 数値最適化

1. まえがき

本論文は、床面上を移動するカメラからの動画像とシーンの3次元モデルを照合し、カメラの位置・姿勢及び自身の運動を決定する手法の提案である。

画像とモデルとの照合による位置と姿勢の決定問題は、コンピュータビジョンの基本問題として、既に数多くの手法 [1], [2], [8] が提案されている。これらの研究では、物体の頂点や稜線は画像上では特徴点やエッジとして観測でき、モデルの頂点や稜線と1対1に対応づけることが前提である。

物体面上に模様が描かれている場合には、模様の特徴点を利用することができるが、特徴点の位置がモデルに記載されていることは少ない。この場合、モデルと物体間の特徴点同士の対応付けはできないが、模様の特徴点とモデル面との対応付けは可能である。しかし、1枚の静止画像上の特徴点とモデル面との対応付けからカメラの位置・姿勢を決定することはできない。

この決定は動画像を利用すれば可能であり、カメラの運動まで同時に決定することができる。実際、シーンが1枚の平面でモデル化されているとき、画像間の

対応付けからカメラの向きと運動^(注1)を決定する手法は数多く提案されている [4]~[7], [10]~[12], [14], [15]。これらの手法の限界として、(1) 偽の解と真の解の区別がつかない、(2) 向きは決定できるが位置までは決定できない、が指摘されている。

これに対して、速水と山本 [3] は位置・姿勢・運動の決定には、少なくとも3枚の平面の観測が必要であり、七つの特徴点から解が解析的に得られることを示した。しかしながら、ノイズに極めて弱いことが明らかになり、実画像への適用は行われていない。

本論文ではノイズ対策として、(1) 7点以上の多数の点からの解析解法と最適解を示し (3.), (2) 特徴点の位置をサブピクセル精度で求める (4.)。実験では、様々な実動画像からカメラの位置・姿勢・自己運動が十分な精度で得られることを実証する (5.)。

2. 問題の定式化

カメラの運動及び位置・姿勢の推定式を導く。

2.1 座標系

移動ロボットは平らな床面上を走行する。カメラがロボットに搭載され、その光軸は常に床面に平行であるとする。図1に示すようにシーンに絶対座標系 (u, v, w) を設定する。この $u-w$ 平面を床面とし、鉛直方向を v 軸の正方向とする。カメラ座標系を (x, y, z) とする。カメラ光軸を z 軸方向、鉛直方向を y 軸と

[†] 新潟大学工学部情報工学科, 新潟市

Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-2181 Japan

* 現在, 奈良先端科学技術大学院大学

** 現在, 日本電算機株式会社

(注1): 本論文では物体の運動もカメラの運動とみなす。

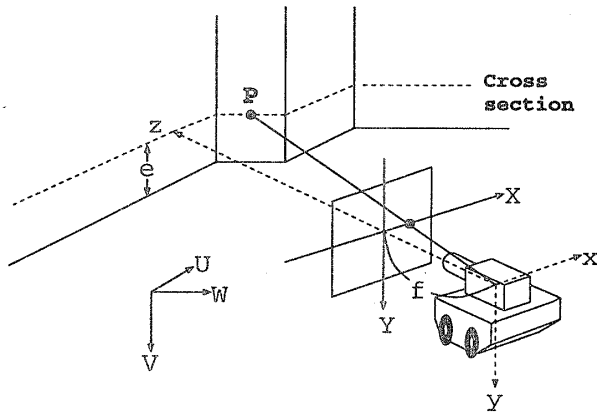


図1 移動ロボットに搭載したカメラ座標座標系とシーン座標系

Fig.1 Camera coordinates system and scene coordinates system.

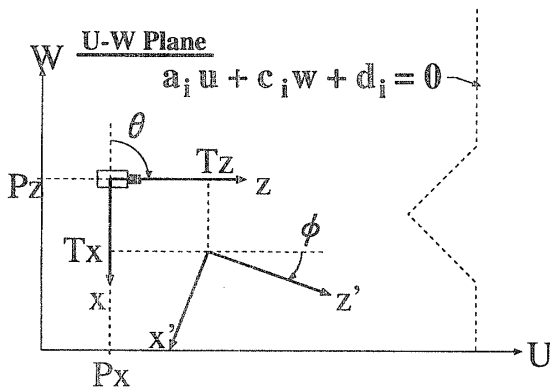


図2 カメラの位置・姿勢と自己運動

Fig.2 Pose and ego-motion of the camera.

する。視点を原点に置き、床面からの高さは常に e とし、シーンは投影面 $z = 1$ 上に中心投影される。投影面の座標系 (X, Y) は光軸と投影面との交点を原点に、 X 軸、 Y 軸ををそれぞれ x 軸、 y 軸に平行になるように設定する。このとき $x-z$ 平面上の点は X 軸上の1次元画像に次式で中心投影される。

$$X = \frac{x}{z} \tag{1}$$

2.2 カメラの位置・姿勢・運動

カメラは移動ロボットと一体であるので、本論文では特に両者を区別しない。シーン座標系でのカメラの位置を図2に示すように (p_x, p_z) とする。カメラの向きを w 軸方向から鉛直軸周りに角度 θ とする。このとき、カメラ座標系での位置 (x, z) はシーン座標系では次のように表される。

$$\begin{cases} u = x \cos \theta + z \sin \theta + p_x \\ w = -x \sin \theta + z \cos \theta + p_z \end{cases} \tag{2}$$

カメラの運動は、カメラ座標系の座標変換と考えることができる。今、カメラが光軸 (z 軸) 方向に T_z 、横 (x 軸) 方向に T_x 進み、鉛直軸 (y 軸) 周りに ϕ 回転したとする。図2に移動前と移動後のカメラ座標系を示す。移動前のカメラ座標系で表された点 (x, z) が、移動後のカメラ座標系では (x', y') で表されるととき、両者の関係は次式で与えられる。

$$\begin{cases} x = x' \cos \phi + z' \sin \phi + T_x \\ z = -x' \sin \phi + z' \cos \phi + T_z \end{cases} \tag{3}$$

2.3 物体面のモデル

平面 $x-z$ はカメラの光軸を含み床面に平行な面であり、シーン座標系で表せば $v = -e$ である。この平面上の点は、カメラの移動前も移動後も投影面の X 軸上に1次元画像として投影される。したがって、カメラの動きはこの1次元画像を観測することで知ることができる。

物体面のモデルは、物体を平面 $v = -e$ で切ったときの輪郭線を考えれば十分である。物体面を平面パッチの張り合わせで構成するとすれば、輪郭線は折線で表すことができる。折線を次の1次方程式で表す。

$$au + cw + d = 0 \tag{4}$$

2.4 推定式の導出

カメラの移動前と移動後とで2枚の1次元画像が得られたとする。画像間で特徴点に対応づけられ、それぞれの特徴点には対応する輪郭線モデルが教示されているとする。

移動前の1次元画像で位置 X に観測された特徴点が、移動後には位置 X' に観測されたとする。このとき、 X' はカメラ座標系での位置 (x', z') の投影であるとすれば、式(1)より、

$$X' = \frac{x'}{z'} \tag{5}$$

となる。

位置 (x, z) を式(2)よりシーン座標系での位置 (u, w) に変換する。この位置が輪郭線(4)上にあるとすれば、

$$\begin{aligned} & ((aX + c) \cos \theta + (a - cX) \sin \theta) z \\ & + (ap_x + cp_z + d) = 0 \end{aligned} \tag{6}$$

を得る。

次に、式(1), (5)から x, x' を式(3)に代入して整理すると、

$$Xz = (X' \cos \phi + \sin \phi)z' + T_x \quad (7)$$

$$z = (-X' \sin \phi + \cos \phi)z' + T_z \quad (8)$$

となる。この二つの式より z' を消去して整理すると、

$$\begin{aligned} & ((X' - X) \cos \phi + (XX' + 1) \sin \phi) z \\ & = X'(T_z \cos \phi + T_x \sin \phi) \\ & \quad + (T_z \sin \phi - T_x \cos \phi) \end{aligned} \quad (9)$$

を得る。

式(6), (9)から z を消去すると、

$$\begin{aligned} & \{(aX + c) \cos \theta + (a - cX) \sin \theta\} \\ & \quad \times \{X'(T_z \cos \phi + T_x \sin \phi) \\ & \quad + (T_z \sin \phi - T_x \cos \phi)\} \\ & \quad + (ap_x + cp_z + d) \\ & \quad \times \{(X' - X) \cos \phi + (XX' + 1) \sin \phi\} \\ & = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

を得る。これはカメラの位置・姿勢 p_x, p_z, θ , カメラの運動 T_x, T_z, ϕ を未知数とする非線形方程式である。

3. 解析解と最適解

式(10)は未知数六つの方程式である。多くの観測点から導かれた方程式を連立させて解を求める。各方程式にはノイズが含まれているので、方程式(10)の左辺の2乗和が最小になるような解を求める。すなわち、添字 i を、観測点の番号として、式(10)の左辺を

$$\begin{aligned} f_i & = \{(a_i X_i + c_i) \cos \theta + (a_i - c_i X_i) \sin \theta\} \\ & \quad \times \{X'_i (T_z \cos \phi + T_x \sin \phi) \\ & \quad + (T_z \sin \phi - T_x \cos \phi)\} \\ & \quad + (a_i p_x + c_i p_z + d_i) \\ & \quad \times \{(X'_i - X_i) \cos \phi + (X_i X'_i + 1) \sin \phi\} \end{aligned}$$

とおくとき、2乗和

$$\sum_{i=1}^n f_i(p_x, p_z, \theta, T_x, T_z, \phi)^2 \quad (11)$$

が最小になるように変数 $p_x, p_z, \theta, T_x, T_z, \phi$ の値

を決定する。ここで、 n は観測点(方程式)の個数である ($n > 6$)。

評価関数(11)は変数に関して非線形であるので、適当な初期値から逐次最適化によって解を得る。このとき偽の解に収束させないようにするためには、正しい解の近傍に初期値を選択する必要がある。ここでは、連立方程式の解析解から与える。この解法は、速水・山本[3]の提案した7点解法を一般化したものである。

方程式(10)について、変数を次のように中間変数 q_1, \dots, q_8 に置き換える。

$$q_1 = T_x \cos \theta \quad (12)$$

$$q_2 = T_x \sin \theta \quad (13)$$

$$q_3 = T_z \cos \theta \quad (14)$$

$$q_4 = T_z \sin \theta \quad (15)$$

$$q_5 = p_x \quad (16)$$

$$q_6 = p_z \quad (17)$$

$$q_7 = \sin \phi \quad (18)$$

$$q_8 = \cos \phi \quad (19)$$

係数についても、

$$h_{i,1} = (a_i X_i + c_i) X'_i \quad (20)$$

$$h_{i,2} = (a_i - c_i X_i) X'_i \quad (21)$$

$$h_{i,3} = a_i X_i + c_i \quad (22)$$

$$h_{i,4} = a_i - c_i X_i \quad (23)$$

$$h_{i,5} = a_i (X_i X'_i + 1) \quad (24)$$

$$h_{i,6} = c_i (X_i X'_i + 1) \quad (25)$$

$$h_{i,7} = a_i (X'_i - X_i) \quad (26)$$

$$h_{i,8} = c_i (X'_i - X_i) \quad (27)$$

$$h_{i,9} = -d_i (X_i X'_i + 1) \quad (28)$$

$$h_{i,10} = -d_i (X'_i - X_i) \quad (29)$$

とおくと、連立方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} & (h_{1,1} q_7 - h_{1,3} q_8) q_1 + (h_{1,2} q_7 - h_{1,4} q_8) q_2 \\ & \quad + (h_{1,3} q_7 + h_{1,1} q_8) q_3 + (h_{1,4} q_7 + h_{1,2} q_8) q_4 \\ & \quad + (h_{1,5} q_7 + h_{1,7} q_8) q_5 + (h_{1,6} q_7 + h_{1,8} q_8) q_6 \\ & = h_{1,9} q_7 + h_{1,10} q_8 \\ & \quad \vdots \end{aligned} \quad (30)$$

$$(h_{n,1} q_7 - h_{n,3} q_8) q_1 + (h_{n,2} q_7 - h_{n,4} q_8) q_2$$

$$\begin{aligned}
& + (h_{n,3q7} + h_{n,1q8})q_3 + (h_{n,4q7} + h_{n,2q8})q_4 \\
& + (h_{n,5q7} + h_{n,7q8})q_5 + (h_{n,6q7} + h_{n,8q8})q_6 \\
& = h_{n,9q7} + h_{n,10q8}
\end{aligned}$$

これは、変数 ϕ , つまり q_7, q_8 を固定すれば、中間変数 q_1, \dots, q_6 に関する線形連立方程式である。ここで、

$$\begin{aligned}
\mathbf{H}_q &= \begin{pmatrix} h_{1,1q7} - h_{1,3q8} & h_{1,2q7} - h_{1,4q8} \\ \vdots & \vdots \\ h_{n,1q7} - h_{n,3q8} & h_{n,2q7} - h_{n,4q8} \\ \\ h_{1,3q7} + h_{1,1q8} & h_{1,4q7} + h_{1,2q8} \\ \vdots & \vdots \\ h_{n,3q7} + h_{n,1q8} & h_{n,4q7} + h_{n,2q8} \\ \\ h_{1,5q7} + h_{1,7q8} & h_{1,6q7} + h_{1,8q8} \\ \vdots & \vdots \\ h_{n,5q7} + h_{n,7q8} & h_{n,6q7} + h_{n,8q8} \end{pmatrix} \\
\mathbf{q} &= \begin{pmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_6 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

$$\mathbf{b}_q = \begin{pmatrix} h_{1,9q7} + h_{1,10q8} \\ \vdots \\ h_{n,9q7} + h_{n,10q8} \end{pmatrix}$$

とおくと、式 (30) は、

$$\mathbf{H}_q \mathbf{q} = \mathbf{b}_q \quad (31)$$

と表せる。この中間変数 \mathbf{q} についての線形連立方程式を解く。式の数未知数より多いとき、式 (31) の両辺の差のノルムが最小となる解を求める。この解は次の正規方程式を解くことにより与えられる。

$$\mathbf{H}_q^T \mathbf{H}_q \mathbf{q} = \mathbf{H}_q^T \mathbf{b}_q \quad (32)$$

さて、ここで、

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & h_{1,3} & h_{1,4} & h_{1,5} & h_{1,6} \\ & & & \vdots & & \\ h_{n,1} & h_{n,2} & h_{n,3} & h_{n,4} & h_{n,5} & h_{n,6} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{h}_9 = \begin{pmatrix} h_{1,9} \\ \vdots \\ h_{n,9} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{h}_{10} = \begin{pmatrix} h_{1,10} \\ \vdots \\ h_{n,10} \end{pmatrix}$$

とし、6次元ベクトル \mathbf{r}' , \mathbf{r}^* を線形連立方程式

$$\mathbf{H} \mathbf{r}' = \mathbf{h}_9$$

$$\mathbf{H} \mathbf{r}^* = \mathbf{h}_{10}$$

の解とする。この場合も、それぞれの方程式について両辺の差のノルムが最小となる解を求める。この解は次の正規方程式の解である。

$$\mathbf{H}^T \mathbf{H} \mathbf{r}' = \mathbf{H}^T \mathbf{h}_9 \quad (33)$$

$$\mathbf{H}^T \mathbf{H} \mathbf{r}^* = \mathbf{H}^T \mathbf{h}_{10} \quad (34)$$

$|\mathbf{H}^T \mathbf{H}| \neq 0$ のとき、正規方程式 (33) と (34) は一意な解をもつ。このとき、付録 1. より、

$$\begin{aligned}
q_1 &= r'_1 q_7^2 + r_1^* q_7 q_8 - r'_3 q_7 q_8 \\
&\quad - r_3^* q_8^2 - r'_6 q_7 q_8 - r_6^* q_8^2 \quad (35)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
q_2 &= r'_2 q_7^2 + r_2^* q_7 q_8 - r'_4 q_7 q_8 \\
&\quad - r_4^* q_8^2 - r'_5 q_7 q_8 - r_5^* q_8^2 \quad (36)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
q_3 &= r'_3 q_7^2 + r_3^* q_7 q_8 + r'_1 q_7 q_8 \\
&\quad + r_1^* q_8^2 + r'_5 q_7 q_8 + r_5^* q_8^2 \quad (37)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
q_4 &= r'_4 q_7^2 + r_4^* q_7 q_8 + r'_2 q_7 q_8 \\
&\quad + r_2^* q_8^2 - r'_6 q_7 q_8 - r_6^* q_8^2 \quad (38)
\end{aligned}$$

$$q_5 = r'_5 q_7^2 + r_5^* q_7 q_8 + r'_6 q_7 q_8 + r_6^* q_8^2 \quad (39)$$

$$q_6 = r'_6 q_7^2 + r_6^* q_7 q_8 - r'_5 q_7 q_8 - r_5^* q_8^2 \quad (40)$$

となり、 q_1, \dots, q_6 と q_7, q_8 との関係が求まる。

これをもとの連立方程式 (30) の各式に代入し整理すると、

$$\begin{aligned}
& h_{i,1}(r'_1 q_7 + r_1^* q_8) + h_{i,2}(r'_2 q_7 + r_2^* q_8) \\
& + h_{i,3}(r'_3 q_7 + r_3^* q_8) + h_{i,4}(r'_4 q_7 + r_4^* q_8) \\
& + h_{i,5}(r'_5 q_7 + r_5^* q_8) + h_{i,6}(r'_6 q_7 + r_6^* q_8) \\
& = h_{i,9q7} + h_{i,10q8} \quad (41)
\end{aligned}$$

を得る。この式は q_7, q_8 について整理すると、 q_7 と q_8 に関する斉次 1 次方程式である。

$$\alpha_i q_7 + \beta_i q_8 = 0, (i = 1, \dots, n) \quad (42)$$

ただし,

$$\alpha_i = h_{i,1}r'_1 + h_{i,2}r'_2 + h_{i,3}r'_3 + h_{i,4}r'_4 + h_{i,5}r'_5 + h_{i,6}r'_6 - h_{i,9} \quad (43)$$

$$\beta_i = h_{i,1}r^*_1 + h_{i,2}r^*_2 + h_{i,3}r^*_3 + h_{i,4}r^*_4 + h_{i,5}r^*_5 + h_{i,6}r^*_6 - h_{i,10} \quad (44)$$

斉次1次方程式系(42)の解は, q_7, q_8 の定義から導かれる関係式

$$q_7^2 + q_8^2 = 1 \quad (45)$$

の条件下で, 式(42)の左辺の2乗和

$$J = \sum_{i=1}^n (\alpha_i q_7 + \beta_i q_8)^2 \quad (46)$$

を最小にする解で与えられる.

評価式(46)は, q_7, q_8 に関する2次形式であり, 次のようにも表せる.

$$J = \hat{\mathbf{q}}^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} \hat{\mathbf{q}} \quad (47)$$

ただし, $\hat{\mathbf{q}} = (q_7, q_8)^T$,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 \\ \vdots & \vdots \\ \alpha_n & \beta_n \end{pmatrix}$$

とする. このとき, $\alpha_i = \beta_i = 0 (i = 1, \dots, n)$ でない場合, 評価式 J を最小とする解は $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ の最小固有値に対する単位固有ベクトルになる.

ここで, $\mathbf{M} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}$ とおき, 更に,

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_1 & m_3 \\ m_3 & m_2 \end{pmatrix} \quad (48)$$

とすれば, 対称行列 \mathbf{M} の最小固有値 λ は

$$\lambda = \frac{m_1 + m_2 - \sqrt{(m_1 - m_2)^2 + 4m_3^2}}{2} \quad (49)$$

となる. 単位固有ベクトルは,

$$q_7 = \pm \frac{m_3}{\sqrt{m_3^2 + (m_1 - \lambda)^2}} \quad (50)$$

$$q_8 = \mp \frac{m_1 - \lambda}{\sqrt{m_3^2 + (m_1 - \lambda)^2}} \quad (51)$$

となる. これを式(35)~(40)に代入して整理すれば, q_1, \dots, q_6 の値が決定される.

得られた中間変数の値より, もとの方程式の解を求める.

式(16), (17)より, 直ちに,

$$p_x = q_5 \quad (52)$$

$$p_z = q_6 \quad (53)$$

を得る.

次に, $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = 0$ でない場合, 式(12)~(15)と $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$ より, $\cos \theta, \sin \theta$ が次のように求まる.

$$\cos \theta = \pm \sqrt{\frac{q_1^2 + q_3^2}{q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + q_4^2}} \quad (54)$$

$$\sin \theta = \pm \sqrt{\frac{q_2^2 + q_4^2}{q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + q_4^2}} \quad (55)$$

ただし, 復号同順である. これより, θ の解は二つ得られるが, それぞれの解を式(6)を距離 z_i について解いた

$$z_i = -\frac{a_i p_x + c_i p_z + d_i}{h_{i,3} \cos \theta + h_{i,4} \sin \theta} \quad (56)$$

に代入する. この式は, $\sin \theta, \cos \theta$ の符号の変化が z_i の符号の変化となっている. 観測点はカメラから見えていなければならないため, 距離は正の値をとる必要がある. よって, 距離 z_i が正となる方を θ の解とする.

式(12), (13)より T_x , 式(14), (15)より T_z が得られる.

$$T_x = \frac{q_1 + q_2}{\cos \theta + \sin \theta} \quad (57)$$

$$T_z = \frac{q_3 + q_4}{\cos \theta + \sin \theta} \quad (58)$$

となる.

最後に, 式(50), (51)より,

$$\cos \phi = \pm \frac{m_3}{\sqrt{m_3^2 + (m_1 - \lambda)^2}} \quad (59)$$

$$\sin \phi = \mp \frac{m_1 - \lambda}{\sqrt{m_3^2 + (m_1 - \lambda)^2}} \quad (60)$$

ただし, 復号同順である. これより, ϕ の解は二つ得られるが, それぞれの解を式(6)と式(8)より求まる

$$z'_i = \frac{T_z (h_{i,3} \cos \theta + h_{i,4} \sin \theta) + a_i p_x + c_i p_z + d_i}{(\cos \phi - X'_i \sin \phi)(h_{i,3} \cos \theta + h_{i,4} \sin \theta)}$$

に代入する。この式は、 $\sin \phi, \cos \phi$ の符号の変化が z_i の符号の変化となっている。よって、距離 z_i が正となる方を ϕ の解とする。

以上の解法を整理すると、次のようになる。

(1) $|\mathbf{H}^T \mathbf{H}| \neq 0$ のとき、二つの線形連立方程式 (33), (34) を解く。

(2) 求まった解より $\alpha_i = \beta_i = 0 (i = 1, \dots, n)$ でないとき、中間変数 $q_1 \dots q_8$ を求める。

(3) 中間変数の解より $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = 0$ でないとき、カメラの位置・姿勢 p_x, p_z, θ , カメラの運動 T_x, T_z, ϕ を求める。

(4) 得られた解を初期値として、評価式 (11) を最小とする解を逐次最適化により探索する [13]。

4. エッジ位置のサブピクセル検出

特徴点エッジの位置をサブピクセル精度で検出するために、微分型のエッジ検出器ではなく、モデル規範型エッジ検出器を用いた。本論文では、エッジの濃淡分布を関数 \tanh でモデル化する Nalwa-Binford オペレータ [9] を使用した。付録 2. でこのオペレータの簡単な紹介をしている。

カメラの視点の高さが床面から一定、かつ光軸が床面に平行ならば、視点を通り床面に平行な平面とシーンとの交わりは常に画像面の X 軸上に投影される。したがって、画像間の対応先は X 軸上のみを探索すればよい。しかし、実際の移動ロボットでは視点の高さや光軸の向きも上下に変動するので、 X 軸上の像がシーンの同じ位置に対応しているとは限らない。もし、 X 軸上のエッジの傾きが垂直であれば、カメラの視点や光軸に上下動があっても、エッジの位置は正しい位置と変わることはない。従って、エッジ検出は垂直エッジのみを検出する。

Nalwa-Binford オペレータがエッジをサブピクセル精度で検出できることを実験的に確認する。図 3 左に三角形パターンの画像を示す。同図右には検出したほぼ垂直方向のエッジを示す。

エッジ検出精度の評価は次のように行う。三角形の斜線部のエッジに着目する。検出したエッジに直線を当てはめる。この直線を真のエッジの位置とし、得られたエッジ位置との X 座標値での誤差を求め、エッジ検出精度は誤差の標準偏差で評価する。この実験では、標準偏差が 0.0274 であった。

一方、エッジの位置がピクセル精度で与えられたとき、その誤差の標準偏差は次のように計算することが

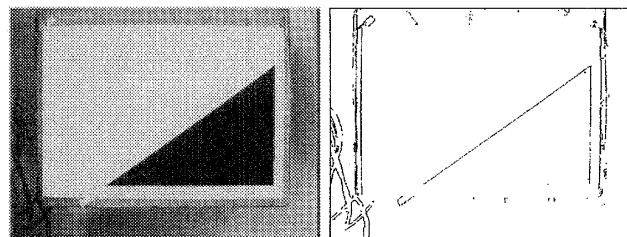


図 3 エッジ検出に用いた原画像 (左), エッジ検出結果 (右)

Fig. 3 Left: original image, and Right: edge map.

できる。ピクセル精度は実数値で与えられる真のエッジ位置を小数点第 1 けたで四捨五入して得られるものとする。すると誤差 ϵ は、 $-0.5 \leq \epsilon < 0.5$ の範囲である。その範囲内の誤差の確率分布は一様分布と考えられ、確率密度関数は $\Pr(\epsilon) = 1$ である。したがって、誤差の期待値は $E[\epsilon] = 0$ であり、分散値は $E[\epsilon^2] = 0.083$ となり、標準偏差は 0.289 である。

Nalwa-Binford オペレータによるエッジ検出精度は、ピクセル精度で検出した場合と比べて、誤差の標準偏差がほぼ 10 分の 1 になっており、サブピクセル精度での検出能力が実証されている。

5. 実動画像からの推定実験

実動画像からカメラの位置・姿勢・運動を推定した。最初の実験では、カメラを走行させ連続的に得られた動画像からの推定を示す。次の実験では、多数の移動前と移動後の画像対からの推定である。

速水と山本 [3] は解がユニークに決定できるための条件について考察した。この条件とは、(1) 少なくとも 3 枚の面 (輪郭線) を観測する必要がある、しかも (2) これらの面は傾きが同じであってはならず、また (3) すべての面の方程式が 1 点に集中してはならない。更に、各面に複数の特徴点が存在すれば解のユニークさは保証される。

実シーンでは三つ以上の独立な面をカメラの視野内にとらえることは困難ではない。例えば、壁の前に箱が置かれているような状況では、箱の 2 面と壁の 1 面で、三つの条件を満たす独立な 3 面が構成される。

5.1 実験 1

カメラの走行環境を図 4 左に示す。カメラの走行開始及び終了位置はそれぞれ P_1, P_2 である。そのときのカメラの位置と向きは付録 3. の表 A.2 に与えられている。この位置・向きの決定法は付録 3. に示されている。

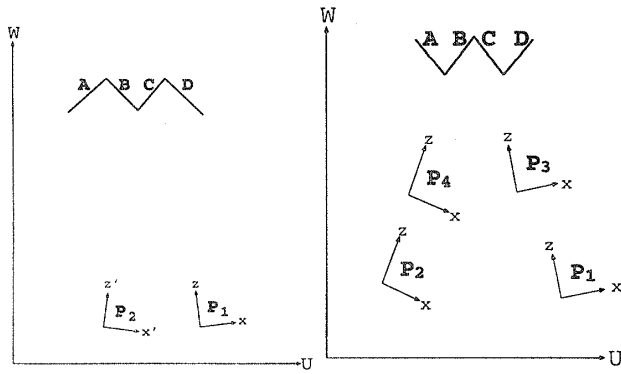


図4 実画像を撮影した実験環境。左：実験1，右：実験2
Fig. 4 Set up in the experiments. Left: experiment 1, and Right: experiment 2.

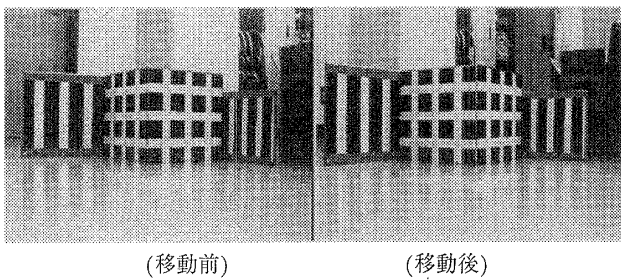


図5 移動前後の画像
Fig. 5 Initial and final images from mobile camera.

走行環境には屏風状の壁が置かれている。この壁は ABCD の四つの面からなり、隣り合う面は直交している。この四つの壁面は独立であり、解をユニークに決定するための三つの条件を満たし、各面とも 6~8 個の特徴点を含んでいる。カメラは常にこの壁を観測しながら約 8.6 秒かけて走行し、259 フレームの画像を得た。図 5 に走行開始時と終了時に得られた画像を示す。

この 2 枚の画像間の対応付けは時空間断面画像 [16] を利用した。すなわち、動画を時間順に並べ 3 次元の時空間画像を構成する。この 3 次元画像空間をカメラ光軸を含み床面に平行な平面で切断すると、図 6 に示されるような時空間断面画像が現れる。この断面画像上にはシーンの特徴点 (エッジ) が連続した軌跡を描いている。断面画像上でエッジを検出し追跡することにより走行開始・終了画像間の対応付けを行うことができる。図 7 は、時空間断面画像での特徴点の追跡結果を示す。ここでは 27 個の特徴点が検出され追跡された。この特徴点と壁の四つの面との対応付けは教示した^(注2)。表 1 に壁面の各面を表す方程式とその面上の特徴点を示している。

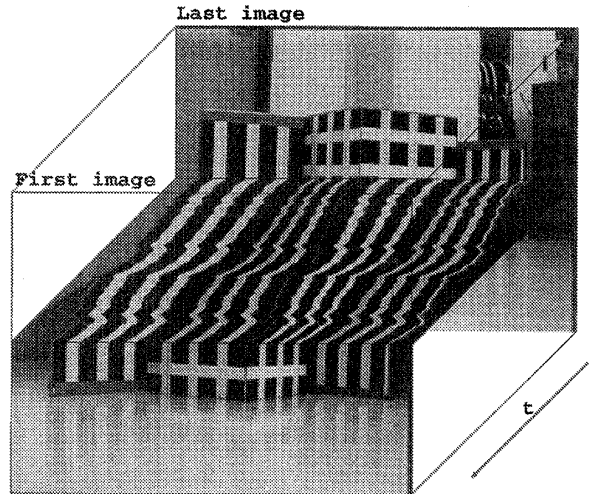


図6 時空間断面画像
Fig. 6 Temporal-spatial cross section image.

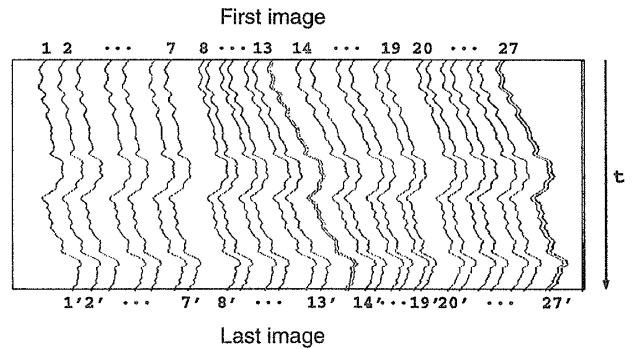


図7 時空間断面画像上での特徴点の追跡
Fig. 7 Tracking feature points on the temporal-spatial cross section image.

表1 実験1で観測した平面とそれに対応する特徴点
Table 1 Observed surfaces and corresponding feature points in Experiment 1.

面	平面の式	対応する特徴点の番号
A	$U - W + 113.14 = 0$	1,2,3,4,5,6,7
B	$U + W - 212.13 = 0$	8,9,10,11,12,13
C	$U - W + 70.71 = 0$	14,15,16,17,18,19
D	$U + W - 254.52 = 0$	20,21,22,23,24,25,26,27

画像間の特徴点对応と各特徴点の壁面对応から、カメラの位置・姿勢と自己運動を推定した。

画像と投影面とのスケール変換を示すカメラの内部パラメータは、あらかじめ測定しておいた。焦点距離が 830 (pixel)、画幅が 638 (pixel)、視野角が約 40°であった。

式 (48) の対称行列 M は、二つの固有値、8.605883、

(注2)：特徴点 (座標値) と物体面 (モデル面の方程式) だけの情報では、対応付けの自動化は難しい。この自動化を行うためには、物体面とその上に描かれた模様との関係をあらかじめ知識として与えておく必要がある。

表2 移動 $P_1 \rightarrow P_2$ を推定したときの中間変数値, 解析解 (反復計算の初期値) と推定値 (最適解)

Table 2 Intermediate solution, closed-form solution and optimal solution of the movement from P_1 to P_2 .

中間変数	中間変数の値	解析解 (初期値)	
q_1	-45.711358	P_x	94.056669
q_2	9.081800	P_z	29.046076
q_3	13.684357	θ	-10.779285
q_4	-0.216589	T_x	-31.323884
q_5	94.056669	T_z	11.517005
q_6	29.046076	ϕ	22.254378
q_7^2	0.278157	⇒	
$q_7 \cdot q_8$	0.448091	⇒	
q_8^2	0.721843	⇒	
		推定値 (最適解)	
P_x	97.932309		
P_z	23.488683		
θ	-11.350210		
T_x	-51.333439		
T_z	15.097091		
ϕ	23.422068		

表3 理論値及びエッジ位置をサブピクセル精度で与えたときの推定値 (1) とピクセル精度で与えたときの推定値 (2)

Table 3 Real values, estimates (1) at edge location with sub-pixel accuracy, and estimates (2) at edge location with pixel accuracy.

	理論値	推定値 (1)	推定値 (2)
$P_x(cm)$	97.88	97.93	98.17
$P_z(cm)$	23.66	23.49	23.29
$\theta(deg.)$	-11.37	-11.35	-11.39
$T_x(cm)$	-51.44	-51.33	-51.06
$T_z(cm)$	14.69	15.10	14.84
$\phi(deg.)$	23.43	23.42	23.23
誤差の総和	—	0.77	1.41

0.019506 をもった。最小固有値 0.019506 の単位固有ベクトルから中間変数 q_7, q_8 を得る。2次の項 $q_7^2, q_7 \cdot q_8, q_8^2$ を求め、これを関係式に代入することにより、残りの中間変数 $q_1 \sim q_6$ を得る。この中間変数から表 2 に示される解析解が得られる。この解析解を初期値として、評価式 (11) が最小になる解を数値計算で求める。得られた結果を推定解として表 2 の最後に示す。推定値と理論値との比較を表 3 推定値 (1) に示す。

特徴点の位置情報をピクセル精度^(注3)で与えたときの推定結果も表 3 推定値 (2) に示す。位置情報がサブピクセル精度で与えたときの方が推定精度が良い。

推定に使用した特徴点の数と推定精度についても調べた。特徴点の数を 27 点から 2 点ずつ 7 点まで減らしたときの推定結果を表 4 に示す。特徴点の数が増すにつれて推定精度が向上している。削減する特徴点の

表4 特徴点の数と推定精度

Table 4 Relation of estimation accuracy and the number of feature points.

	理論値	25点	23点	21点	19点	
$P_x(cm)$	97.88	97.84	97.83	97.83	97.82	
$P_z(cm)$	23.66	23.44	23.44	23.44	23.45	
$\theta(deg.)$	-11.37	-11.30	-11.30	-11.30	-11.30	
$T_x(cm)$	-51.44	-51.38	-51.37	-51.37	-51.37	
$T_z(cm)$	14.69	15.17	15.17	15.17	15.17	
$\phi(deg.)$	23.43	23.45	23.45	23.45	23.44	
誤差の総和	—	0.89	0.91	0.91	0.90	
	17点	15点	13点	11点	9点	7点
P_x	97.80	97.77	97.67	98.10	98.27	98.30
P_z	23.46	23.36	23.35	23.36	23.43	23.24
θ	-11.29	-11.27	-11.22	-11.40	-11.47	-11.47
T_x	-51.36	-51.49	-51.45	-51.68	-51.65	-51.89
T_z	15.18	15.23	15.27	15.28	15.17	15.22
ϕ	23.45	23.49	23.48	23.56	23.54	23.61
誤差の総和	0.95	1.16	1.31	1.51	1.52	2.10

表5 観測した面の数と推定精度

Table 5 Relation of the estimation accuracy and the number of surface patches.

	理論値	推定値			
観測した面	—	A-B-C	A-C-D	A-B-D	B-C-D
$P_x(cm)$	97.88	97.08	95.22	97.37	59.98
$P_z(cm)$	23.66	19.97	19.27	24.60	116.94
$\theta(deg.)$	-11.37	-10.61	-10.17	-11.30	26.94
$T_x(cm)$	-51.44	-52.29	-51.66	-50.51	-3.14
$T_z(cm)$	14.69	16.93	16.90	15.10	11.13
$\phi(deg.)$	23.43	23.51	23.30	23.25	7.53
誤差の総和	—	8.42	10.81	3.04	327.25

選択を数通り変えて調べたが、やはり特徴点数の増加につれて推定精度が向上した。

観測したシーンは 4 枚の平面から構成される壁であった。平面の数が 3 枚であっても一意な解は得られるはずである。4 面のうち 3 面を選びその組合せで推定した結果を表 5 に示す。3 面でも推定できているが、4 面に比べて推定精度は良くない。平面の組合せが B-C-D の場合は推定に失敗している。しかし、理論値を初期値として与えたときは理論値の近傍に収束した。これは、解析解が初期値として適切でなかったことを意味する。初期値の新たな設定法を考慮する必要がある。

5.2 実験 2

カメラの視点を図 4 右に示す P_1, P_2, P_3, P_4 の各位置に移動させシーンの画像を撮った。それぞれの視点でのカメラの位置と向きを付録 3. の表 A.4 に示す。カメラの位置・向きの測定法は付録 3. を参考され

(注3): ピクセル精度はサブピクセルで観測した特徴点の位置の小数点第 1 位を四捨五入したものである。

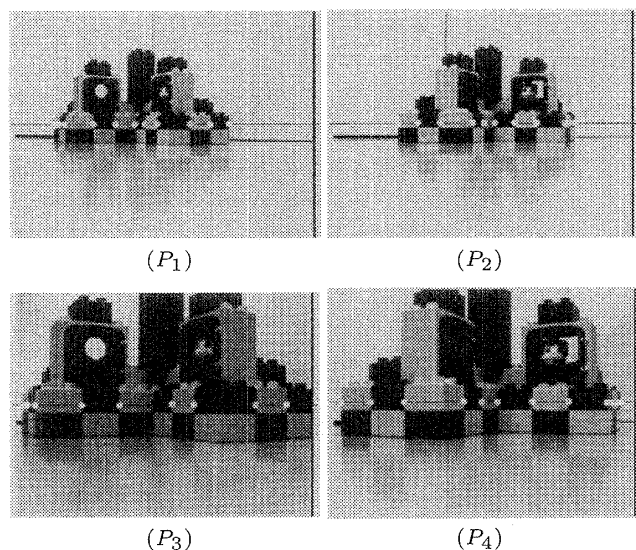


図8 位置 P_1, P_2, P_3, P_4 からの画像に輪郭線とエッジ位置が重ね合わされている

Fig. 8 Overlapping contour line and detected edge over the images from P_1, P_2, P_3 and P_4 .

表6 実験2で観測した平面
Table 6 Observed surfaces in Experiment 2.

面	平面の式				
A	-	U	-	W	+ 85.58 = 0
B		U	-	W	+ 35.36 = 0
C	-	U	-	W	+ 98.99 = 0
D		U	-	W	+ 21.95 = 0

たい。各視点からの画像を図8に示す。シーンはおもちゃのブロックで構成され、実験1と同様に輪郭線上に四つの平面ABCDが見えている。各平面を表す方程式を表6に与える。図8には輪郭線の位置が直線で描かれている。また、その直線上での特徴点(エッジ)の位置が○印で記されている。特徴点の個数は10点であったが、カメラの位置によっては9点しか見えない場合もあった。おもちゃの四つの面は独立であり、実験1と同様に解をユニークに決定するための三つの条件が満たされている。また、各面とも特徴点の数が2点以上含まれている。特徴点と物体面との対応付けは教示した^(注2)。また、画像間の特徴点の対応付けも教示した。もし、視点間の移動中の動画像があれば、実験1で示した時空間断面画像を使った対応付けの自動化が可能である。カメラの内部パラメータは実験1と同じである。

本節では、四つの視点から二つを選ぶ6通りの組合せについて、位置・姿勢・自己運動の推定実験を行った。視点の6通りの組合せのうち、 $P_1 \rightarrow P_2$ のみ10個の特徴点で推定し、残り5通りは9個の特徴点で推

表7 エッジの位置をサブピクセル精度で与えたときの推定値(1)とピクセル精度での推定値(2)

Table 7 Real values, estimates (1) at edge location with sub-pixel accuracy, and estimates (2) at edge location with pixel accuracy.

		理論値	推定値(1)	推定値(2)
P_1 ↓ P_2	$P_x(cm)$	50.93	51.11	51.71
	$P_z(cm)$	13.52	13.32	14.18
	$\theta(deg.)$	-15.35	-15.41	-16.32
	$T_x(cm)$	-37.22	-37.25	-37.43
	$T_z(cm)$	12.37	12.14	11.39
	$\phi(deg.)$	35.14	34.82	34.93
誤差の総和		---	1.02	3.81
P_1 ↓ P_3	$P_x(cm)$	50.93	50.84	51.62
	$P_z(cm)$	13.52	13.20	13.89
	$\theta(deg.)$	-15.35	-15.11	-16.00
	$T_x(cm)$	-3.49	-3.25	-2.97
	$T_z(cm)$	22.52	22.74	22.60
	$\phi(deg.)$	0.49	0.02	-0.39
誤差の総和		---	1.58	3.19
P_1 ↓ P_4	$P_x(cm)$	50.93	50.86	50.89
	$P_z(cm)$	13.52	13.13	13.03
	$\theta(deg.)$	-15.35	-15.09	-15.06
	$T_x(cm)$	-25.76	-25.75	-25.76
	$T_z(cm)$	28.89	28.72	28.88
	$\phi(deg.)$	35.39	35.63	35.06
誤差の総和		---	1.14	1.16
P_2 ↓ P_3	$P_x(cm)$	11.76	11.99	12.12
	$P_z(cm)$	15.59	15.07	14.87
	$\theta(deg.)$	19.79	19.36	19.79
	$T_x(cm)$	21.74	21.82	21.83
	$T_z(cm)$	27.71	28.18	28.27
	$\phi(deg.)$	-34.65	-34.76	-34.68
誤差の総和		---	1.84	1.76
P_2 ↓ P_4	$P_x(cm)$	11.76	12.06	16.51
	$P_z(cm)$	15.59	15.72	15.40
	$\theta(deg.)$	19.79	19.67	15.61
	$T_x(cm)$	-0.03	0.28	0.22
	$T_z(cm)$	19.97	19.74	19.28
	$\phi(deg.)$	0.50	-0.06	0.09
誤差の総和		---	1.65	10.47
P_3 ↓ P_4	$P_x(cm)$	41.60	41.81	41.86
	$P_z(cm)$	34.31	34.32	34.33
	$\theta(deg.)$	-14.86	-15.16	-15.24
	$T_x(cm)$	-22.32	-22.48	-22.52
	$T_z(cm)$	6.01	5.90	5.90
	$\phi(deg.)$	35.25	35.16	35.22
誤差の総和		---	0.88	1.00

定した。

特徴点の位置をサブピクセル精度で与えたときの推定結果を表7推定値(1)に示す。ほぼ理論値に近い値が得られている。また、ピクセル精度で与えたときの推定結果も表7推定値(2)に示す。サブピクセル精度で位置情報を与えた場合の方が高い推定精度が得られている。

また、推定精度はカメラの移動方向とも関係するのだが、表7から読み取ることができる。

まず, $P_1 \rightarrow P_2$ と $P_3 \rightarrow P_4$ の移動を比較した結果, 誤差の総和が $P_3 \rightarrow P_4$ の方が少ない. 両者とも対象物体に対しては横方向の移動であるが, $P_3 \rightarrow P_4$ の方が対象物体に近い. すなわち, 対象をより近くで観測する方が推定精度は良くなっている.

次に, $P_1 \rightarrow P_3$, $P_2 \rightarrow P_4$ をグループ 1, $P_1 \rightarrow P_4$, $P_2 \rightarrow P_3$ をグループ 2 としたとき, グループ 2 の方がほぼ良い結果が得られている(注4)グループ 1 の移動はカメラの光軸方向のみの移動であり, グループ 2 の移動は光軸方向の移動に横方向の移動を加えた移動である. すなわち, 光軸方向の移動のみでも測定が可能であるが, 横方向の移動を加えた方が測定精度は向上する.

なお, 上記二つの比較を通して, 画面上での見かけの移動が大きいほど測定精度の向上が見られた. これは, 移動が小さな場合には位置の測定誤差と真の動きとの区別がつかないためであると思われる.

6. む す び

平面移動ロボットにカメラを搭載し, 移動前後の 2 枚の画像からカメラ自身の位置・姿勢・運動の推定法を提案しその評価を行った.

実験の結果, 特徴点の位置がサブピクセル精度で与えられ, 観測する面の数と特徴点の数が多いほど測定精度の向上が見られた.

この推定法は 2 種類の対応付けが必要である. 一つは 2 枚の画像間での特徴点対応付けであり, もう一つは特徴点とモデル面との対応付けである. 本手法は, モデルフィッティングの従来法 [1], [2], [8] と比較すると次のような長所がある. (1) 物体面上に描かれた模様や汚れなど, モデル化されていないパターンを利用できる. (2) 二つ目の対応付けは, 多数対 1 の対応付けであるためロバストである.

今後の課題として, 3次元運動への拡張を検討している. また, 実際に移動ロボットの視覚などへの応用を目指すためには, カメラの上下動, 特徴点の検出感度, 対応付けのミスマッチ, などの影響について検討すべきである. これらの問題の理論的な扱いには統計的な手法を使う必要がある.

文 献

[1] D. DeMenthon and L.S. Davis, "Exact and approxi-

mate solutions of the perspective-three-point problem," IEEE Trans. PAMI, vol.14, no.11, pp.1100-1108, 1992.

- [2] M.A. Fischler and R.C. Bolles, "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," Graphics and Image Processing, vol.24, no.6, pp.381-395, 1981.
- [3] 速水康晴, 山本正信, "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), vol.J80-A, no.3, pp.552-562, March 1997.
- [4] H.C. Longuet-Higgins, "Multiple interpretations of a pair of images of a surface," Proc. R. Soc. London, A418, pp.1-15, 1988.
- [5] X. Hu and N. Ahuja, "Necessary and sufficient conditions for a unique solution of plane motion and structure," IEEE Trans. RA, vol.11, no.2, pp.304-308, 1995.
- [6] 金谷健一, "対応点を用いない物体の運動認識の理論," 情処学論, vol.27, no.3, pp.373-382, 1986.
- [7] K. Kanatani and S. Takeda, "3-D motion analysis of a planar surface by renormalization," IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.E78-D, no.8, pp.1074-1079, Aug. 1995.
- [8] D.G. Lowe, "Fitting parameterized three-dimensional models to images," IEEE Trans. PAMI, vol.13, no.5, pp.441-450, 1991.
- [9] V.S. Nalwa and T.O. Binford, "On detecting edges," IEEE Trans. PAMI, vol.8, no.6, pp.699-714, 1986.
- [10] S. Negahdaripour and S. Lee, "Motion recovery from image sequences using only first order fow information," International Journal of Computer Vision, vol.9, no.3, pp.163-184, 1992.
- [11] S. Sinclair and A. Blake, "Quantitative planar region detection," International Journal of Computer Vision, vol.18, no.1, pp.77-91, 1996.
- [12] M. Subbarao and A.M. Waxman, "Closed-form solutions to image flow equations for planar surfaces in motion," CVGIP, vol.36, pp.208-228, 1986.
- [13] 田中正次, 二宮市三, 鳥居達生, 長谷川武光, 秦野甯世, 秦野和郎, 吉田年雄, 刀根 薫, 古林 隆, 細野敏夫, "科学用サブルーチンライブラリ SSLII," 富士通, 1987.
- [14] R.Y. Tsai and T.S. Huang, "Estimating three-dimensional motion parameters of a rigid planar patch, III: Finite point correspondences and three-view problem," IEEE Trans. ASSP, vol.32, no.2, pp.213-220, 1984.
- [15] J. Weng, N. Ahuja, and T.S. Huang, "Motion and structure from point correspondences with error estimation: Planar surfaces," IEEE Trans. SP, vol.39, no.12, pp.2691-2717, 1991.
- [16] 山本正信, "画像化された運動軌跡による動画像処理," 情処学論, vol.22, no.5, pp.562-569, 1981.

(注4): ただし, $P_2 \rightarrow P_3$ で, サブピクセル精度で位置を与えたとき, 誤差の総和値 1.84 となりグループ 1 の方がよくなっている.

付 録

1. 正規方程式の解法

クラメルの公式より, 正規方程式 (32) の解は,

$$q_i = \frac{|\mathbf{H}_q^\top \mathbf{H}_q^i|}{|\mathbf{H}_q^\top \mathbf{H}_q|} \quad (\text{A.1})$$

となる. ただし, \mathbf{H}_q^i は \mathbf{H}_q の i 列を \mathbf{b}_q で置き換えたものである.

ここで, 式 (20) から (27) より, 次の関係が成立する.

$$\begin{aligned} h_{i,5} + h_{i,8} &= a_i X_i X_i' + a_i + c_i X_i' - c_i X_i \\ &= a_i X_i X_i' + c_i X_i' + a_i - c_i X_i \\ &= h_{i,1} + h_{i,4} \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

$$\begin{aligned} h_{i,2} + h_{i,6} &= a_i X_i' - c_i X_i X_i' + c_i X_i X_i' + c_i \\ &= a_i X_i + c_i + a_i X_i' - a_i X_i \\ &= h_{i,3} + h_{i,7} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

また, q_7, q_8 の定義より

$$q_7^2 + q_8^2 = 1 \quad (\text{A.4})$$

これらを用いて q_1, \dots, q_6 と q_7, q_8 の関係を求める.

まず, 分母については,

$$|\mathbf{H}_q^\top \mathbf{H}_q| = \sum_{(i_1, \dots, i_6)} |\ddot{\mathbf{H}}_q^\top(i_1, \dots, i_6)| |\ddot{\mathbf{H}}_q(i_1, \dots, i_6)| \quad (\text{A.5})$$

となる. ただし, $\ddot{\mathbf{H}}_q^\top(i_1, \dots, i_6)$ は \mathbf{H}_q^\top の第 i_1, \dots, i_6 列から作った小正方行列, $\ddot{\mathbf{H}}_q(i_1, \dots, i_6)$ は \mathbf{H}_q の第 i_1, \dots, i_6 行から作った小正方行列である. 和において (i_1, \dots, i_6) は n 個の中から 6 個をとったすべての組合せの上をわたる. 以下, 表記の手間を省くため (i_1, \dots, i_6) を省略する.

小行列では,

$$|\ddot{\mathbf{H}}_q^\top| = |\ddot{\mathbf{H}}^\top| \quad (\text{A.6})$$

$$|\ddot{\mathbf{H}}_q| = |\ddot{\mathbf{H}}| \quad (\text{A.7})$$

となることから,

$$\begin{aligned} |\mathbf{H}_q^\top \mathbf{H}_q| &= \sum |\ddot{\mathbf{H}}_q^\top| |\ddot{\mathbf{H}}_q| \\ &= \sum |\ddot{\mathbf{H}}^\top| |\ddot{\mathbf{H}}| = |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}| \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

である.

次に, 分子については,

$$|\mathbf{H}_q^\top \mathbf{H}_q^i| = \sum |\ddot{\mathbf{H}}_q^\top| |\ddot{\mathbf{H}}_q^i| \quad (\text{A.9})$$

である. $|\ddot{\mathbf{H}}_q^i|$ は, それぞれ

$$|\ddot{\mathbf{H}}_q^1| = |\ddot{\mathbf{H}}^1|_{q_7} - |\ddot{\mathbf{H}}^3|_{q_8} - |\ddot{\mathbf{H}}^6|_{q_8} \quad (\text{A.10})$$

$$|\ddot{\mathbf{H}}_q^2| = |\ddot{\mathbf{H}}^2|_{q_7} - |\ddot{\mathbf{H}}^4|_{q_8} - |\ddot{\mathbf{H}}^5|_{q_8} \quad (\text{A.11})$$

$$|\ddot{\mathbf{H}}_q^3| = |\ddot{\mathbf{H}}^3|_{q_7} + |\ddot{\mathbf{H}}^1|_{q_8} + |\ddot{\mathbf{H}}^5|_{q_8} \quad (\text{A.12})$$

$$|\ddot{\mathbf{H}}_q^4| = |\ddot{\mathbf{H}}^4|_{q_7} + |\ddot{\mathbf{H}}^2|_{q_8} - |\ddot{\mathbf{H}}^6|_{q_8} \quad (\text{A.13})$$

$$|\ddot{\mathbf{H}}_q^5| = |\ddot{\mathbf{H}}^5|_{q_7} + |\ddot{\mathbf{H}}^6|_{q_8} \quad (\text{A.14})$$

$$|\ddot{\mathbf{H}}_q^6| = |\ddot{\mathbf{H}}^6|_{q_7} - |\ddot{\mathbf{H}}^5|_{q_8} \quad (\text{A.15})$$

となる. ただし, $\ddot{\mathbf{H}}^i$ は $\ddot{\mathbf{H}}$ の i 列を \mathbf{b}_q で置き換えたものである. したがって, 解 q_1 の分子部は

$$\begin{aligned} |\mathbf{H}_q^\top \mathbf{H}_q^1| &= \sum |\ddot{\mathbf{H}}^\top| (|\ddot{\mathbf{H}}^1|_{q_7} - |\ddot{\mathbf{H}}^3|_{q_8} - |\ddot{\mathbf{H}}^6|_{q_8}) \\ &= |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}^1|_{q_7} - |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}^3|_{q_8} - |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}^6|_{q_8} \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

となる. 同様に, q_2, \dots, q_6 の分子部は,

$$\begin{aligned} |\mathbf{H}_q^\top \mathbf{H}_q^2| &= |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}^2|_{q_7} - |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}^4|_{q_8} \\ &\quad - |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}^5|_{q_8} \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

$$\begin{aligned} |\mathbf{H}_q^\top \mathbf{H}_q^3| &= |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}^3|_{q_7} + |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}^1|_{q_8} \\ &\quad + |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}^5|_{q_8} \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

$$\begin{aligned} |\mathbf{H}_q^\top \mathbf{H}_q^4| &= |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}^4|_{q_7} + |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}^2|_{q_8} \\ &\quad - |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}^6|_{q_8} \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

$$|\mathbf{H}_q^\top \mathbf{H}_q^5| = |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}^5|_{q_7} + |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}^6|_{q_8} \quad (\text{A.20})$$

$$|\mathbf{H}_q^\top \mathbf{H}_q^6| = |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}^6|_{q_7} - |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}^5|_{q_8} \quad (\text{A.21})$$

となる.

さて, クラメルの公式より正規方程式 (33) と (34) の解は, それぞれ

$$r_i' = \frac{|\mathbf{H}^\top \mathbf{H}_{h_9}^i|}{|\mathbf{H}^\top \mathbf{H}|} \quad (\text{A.22})$$

$$r_i^* = \frac{|\mathbf{H}^\top \mathbf{H}_{h_{10}}^i|}{|\mathbf{H}^\top \mathbf{H}|} \quad (\text{A.23})$$

である. ただし, $\mathbf{H}_{h_9}^i$ は \mathbf{H} の第 i 列をベクトル \mathbf{h}_9 で, $\mathbf{H}_{h_{10}}^i$ は \mathbf{H} の第 i 列をベクトル \mathbf{h}_{10} でそれぞれ置き換えたものである.

解 r_i', r_i^* は次の関係式を満たす.

$$\frac{|\mathbf{H}^\top \mathbf{H}^i|}{|\mathbf{H}^\top \mathbf{H}|} = r'_i q_7 + r_i^* q_8 \quad (\text{A.24})$$

なぜならば、

$$\begin{aligned} |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}^i| &= \sum |\ddot{\mathbf{H}}^\top| |\ddot{\mathbf{H}}^i| \\ &= \sum |\ddot{\mathbf{H}}^\top| (|\ddot{\mathbf{H}}_{h_9}^i| q_7 + |\ddot{\mathbf{H}}_{h_{10}}^i| q_8) \\ &= |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}_{h_9}^i| q_7 + |\mathbf{H}^\top \mathbf{H}_{h_{10}}^i| q_8 \end{aligned}$$

であるので、両辺を $|\mathbf{H}^\top \mathbf{H}|$ で除せば関係式 (A.24) が得られる。

したがって、式 (A.1), (A.8), (A.16)~(A.21), (A.24) を使えば、関係式 (35)~(40) が得られる。

2. Nalwa-Binford オペレータ

Nalwa-Binford オペレータは、Hueckel オペレータと同じくモデル規範型のエッジ検出器である。濃淡値は関数 \tanh を使ってモデル化する。垂直方向のエッジを検出するためには、濃淡値を画素の位置 x に関する 1 次元関数でモデル化する。

$$I(x) = I_c + s \tanh\{g(x - p)\} \quad (\text{A.25})$$

ここで、 x, I_c, s, g, p はそれぞれ、1 次元画像上の座標値、濃淡値の平均値、エッジの強度、エッジの鋭さ、及びエッジの位置を表す。

画像の濃淡値とモデル (A.25) との差分値の 2 乗和を方形窓上で求め、パラメータ I_c, s, g, p に関して 2 乗和を最小にする。結果として、エッジの位置が実数値で得られる。実験では、窓の大きさを 5×5 とした。

3. カメラの位置と姿勢の測定

本論文の実験で、推定した結果を評価するためには正確なカメラの位置・姿勢を理論値とし、これと比較する必要がある。しかし、カメラモデルの視点は、実際のカメラの構造と対応づけることは難しく（対応づいたとしてもカメラの内部である）、その位置を正確に知ることは難しい。また、巻尺と分度器で計測した値には測定誤差が多く含まれるため正しい理論値とは言いがたい。

そこで、あらかじめ測定した物体面上の模様シーンの座標値とその画面上の投影位置からカメラの位置と姿勢を推定することにした。

式 (2) の x, z を式 (1) に代入すれば、物体面上の絶対座標値 (u, w) とその投影座標値 X との関係式が得られる。

$$X = \frac{(u - p_x) \cos \theta - (w - p_z) \sin \theta}{(u - p_x) \sin \theta + (w - p_z) \cos \theta} \quad (\text{A.26})$$

ここで、物体面上のシーン座標値を既知としその投影座標値を測定値とすれば、関係式 (A.26) はカメラの位置と姿勢の方程式となる。多数の物体点 (u_i, w_i) とその投影点 X_i から導かれる方程式を連立させることによりカメラの位置・姿勢を決定することができる。しかし、一般に方程式 (A.26) はノイズを含んでいるので、両辺の差の 2 乗和、

$$\sum_{i=1}^n \left\{ X_i - \frac{(u_i - p_x) \cos \theta - (w_i - p_z) \sin \theta}{(u_i - p_x) \sin \theta + (w_i - p_z) \cos \theta} \right\}^2$$

を最小にすることにより解を得ることにした。

この評価式は非線型関数であるので、適当な初期値を与え逐次最適化 [13] により解を求めた。初期値は巻尺と分度器で測定した値を使用した。

3.1 実験 1 でのカメラの位置・姿勢

実験 1 で測定対象となった移動開始時と終了時でのカメラの位置・姿勢を測定する。物体面上の特徴点は、表 1 の面 B 及び C (図 5 中の格子模様面) 上の点を選んだ。これらの特徴点のシーン座標値は物体面にノギスを当てることにより測定した。これら特徴点のシーン座標値と移動開始位置 (図 4 左図の位置 P_1) で観測した投影面座標値を表 A.1 に示す。最適化計

表 A.1 特徴点のシーン座標値と投影面での位置
Table A.1 Image coordinates of feature point and scene coordinates of the corresponding point.

番号	シーン座標値 (u_i, w_i)	投影面座標値 X_i
8	52.89, 159.24	-101.53
9	54.94, 157.19	-93.93
10	58.90, 153.23	-78.00
11	60.95, 151.18	-69.53
12	64.91, 147.22	-51.88
13	66.96, 145.17	-42.34
14	74.39, 145.10	6.04
15	76.37, 147.08	21.92
16	80.40, 151.11	51.57
17	82.38, 153.09	66.16
18	86.41, 157.12	93.86
19	88.39, 159.10	107.03

表 A.2 カメラの初期値 (実測値) と推定値
Table A.2 Initial guess and optimal estimates of pose of the camera.

		初期値 (実測値)	推定値
P_1	P_x	103.59	97.88
	P_z	24.40	23.66
	θ	-12.51	-11.37
P_2	P_x	49.50	44.55
	P_z	26.87	27.92
	θ	11.58	12.05

表 A.3 特徴点のシーン座標値と投影面での位置
Table A.3 Image coordinates of the feature point and scene coordinates of the corresponding point.

番号	シーン座標値 (u_i, w_i)	投影面座標値 X_i
1	20.65, 64.94	-224.75
2	22.88, 62.71	-212.62
3	27.21, 62.56	-153.19
4	29.44, 64.80	-106.45
5	34.05, 64.94	-41.49
6	36.29, 62.71	-18.24
7	40.78, 62.71	53.52
8	42.99, 64.94	95.46

表 A.4 カメラの初期値(実測値)と推定値
Table A.4 Initial guess and optimal estimates of pose of the camera.

		初期値(実測値)	推定値
P_1	P_x	52.04	50.93
	P_z	9.14	13.52
	θ	-13.21	-15.35
P_2	P_x	10.39	11.76
	P_z	10.82	15.39
	θ	21.93	19.79
P_3	P_x	42.92	41.60
	P_z	30.62	34.31
	θ	-15.46	-14.86
P_4	P_x	17.54	18.49
	P_z	30.26	34.39
	θ	23.43	20.28

算の初期値とカメラの位置・姿勢の推定結果を表 A.2 に示す。これらの推定値を理論値とした。

3.2 実験 2 でのカメラの位置・姿勢

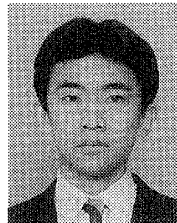
実験 2 で推定対象となった 4 点でのカメラの位置・姿勢を決定した。特徴点は四つの物体面から二つずつ、計八つの点を選んだ。特徴点のシーン座標値はあらかじめ物体面にノギスを当てて測定した。各特徴点について、シーン座標値と図 4 右図の位置 P_1 で観測したときの投影面座標値が表 A.3 に示されている。最適化計算の初期値と推定結果が表 A.4 に示されている。この推定結果をカメラの位置と姿勢の理論値とした。

(平成 10 年 9 月 18 日受付, 11 年 3 月 5 日再受付)



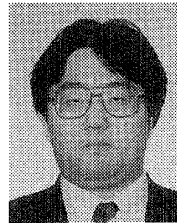
山本 正信 (正員)

昭 48 九工大・工・制御卒。昭 50 東工大大学院修士課程了。同年、電総研入所。動画像処理、コンピュータビジョン等の研究に従事。平 1~2 カナダ国立研究協議会招聘研究員。昭 62 情処学会研究賞受賞。平 4 より新潟大工学部情報工学科教授。工博。情報処理学会、IEEE 各会員。



小山 剛弘

平 10 新潟大・工・情報卒。現在、奈良先端科学技術大学院大学・情報科学専攻博士前期課程在学中。移動ロボットに関する研究に従事。



速水 康晴

平 6 新潟大・工・情報卒。平 8 同大大学院情報工学専攻修士課程了。同年、日本電算機(株)入社。在学中は動画像処理の研究に従事。