

縞状パターンステレオによる3次元位置検出

A Fast Method for Extraction of 3-D Information

Using Multiple Stripes and Two Cameras

越後 富夫⁺
Tomio. Echigo⁺谷内田 正彦⁺⁺
Masahiko. Yachida⁺⁺⁺ 日本アイ・ビー・エム(株)
⁺ IBM Japan, Ltd. Yasu Plant⁺⁺ 大阪大学基礎工学部
⁺⁺ Osaka University Department of Control Engineering

This paper describes a method to extract 3-D information from two cameras in the scene on which multiple stripes are projected. Multiple stripes and two cameras give two constraints so as to identify each stripe. One is the geometric constraint and another is the local constraint that features between images lie in constant order. After applying the geometric constraint, utilization of the local constraint enables identification of each stripe in a scene and its image. Also we give a new method for computing camera parameters of 6 degrees of freedom which influence accuracy of 3-D information. They are derived mathematically by seeing the known cube.

1. はじめに

知能ロボットが物体を認識するには、入力情報から対象物を再構成することが必要である。その有力な手がかりとなる3次元位置情報を抽出する方法が、これまでに数多く提案されている。その一つとして、異なる2方向から入力した画像から、3角測量の原理に基づいて位置情報を得る方法が、ステレオ法として知られている。しかしステレオ法は、画像間の対応づけの問題があり、今なお議論されている。一方、ステレオ法の一環を、スポットライトやスリット光に置き換えた投光法は、対応づけがいらぬ。また周囲が暗いような限られた環境では、特徴抽出が容易である。しかし投光法は、完全なシーンの情報を抽出するには、シーンを横切る光を投光しなければならず、非常に時間を要する。

そこで本報告では、シーンに投光した縞状パターンから3次元情報を抽出

する。もしシーンに非凸状物体や物体の重なりがあったとき、縞は不連続となり、1台のカメラでは、シーンと画像を対応づけることができない。それでもう1台カメラを用いると、2台のカメラと既知の縞の間に幾何学的拘束条件を見出すことができる。これは対応づけのための必要条件である。また対象物の前に小さな物体が存在しない場合には、画像間で特徴の並ぶ順序が変わらない単調性の拘束条件が利用できる。本報告では、2つの拘束条件を用いてシーンと画像の対応づけを行なう。

一方、3次元位置検出精度に影響するカメラパラメータは、Gennery²⁾によって数値解析的に決定された。しかしこの方法は初期値を正確に与えねばならず、初期値を誤ると、偽の値を最適値とみなす危険性があった。本報告では、カメラパラメータを求める式を幾

何学的に導出し³⁾、既知物体の画像より一意に決定している。

2. 座標系の設定

シーンの3次元情報を求めるための座標系を図1のように設定する。右手系O-XYZを物体座標系とする。物体座標系を回転・平行移動し、カメラレンズ中心を原点とするカメラ座標系を、F-xyzで表わすと、次の関係式が得られる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + P_0 \quad (2.1)$$

ここでTはX,Y,Z各軸回りに α, β, γ 回転させた回転マトリクスで、 P_0 はレンズ中心の平行移動成分である。

3. カメラパラメータの算出

3.1 視線の抽出

ここで用いるカメラはピンホールカメラに近似し、透視影法によって幾何学的関係式を得る。

レンズ中心から画像面までの距離を l とし、物体座標原点Oの画像への射影点を $p_0(x_0, y_0, l)$ とする。物体Pの位置ベクトルを P 、その射影点を $p(x, y, l)$ としたとき、3角比より

$$\frac{x}{l} = \frac{(P - P_0) \cdot e_x}{(P - P_0) \cdot e_z} \quad (3.1)$$

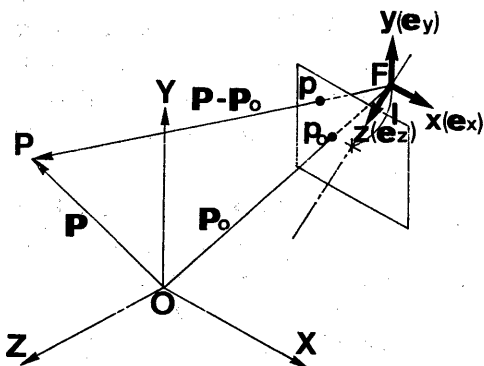


図1 座標系の設定

$$\frac{y}{l} = \frac{(P - P_0) \cdot e_y}{(P - P_0) \cdot e_z} \quad (3.2)$$

が得られる。同様に原点Oに対して

$$\frac{x_0}{l} = \frac{P_0 \cdot e_x}{P_0 \cdot e_z}, \quad \frac{y_0}{l} = \frac{P_0 \cdot e_y}{P_0 \cdot e_z} \quad (3.3)$$

となる。

式(3.1)～(3.3)を用いて

$$\begin{aligned} (e_x - \hat{x}e_z) \cdot P &= (\hat{x}_0 - \hat{x})P_0 \cdot e_z \\ (e_y - \hat{y}e_z) \cdot P &= (\hat{y}_0 - \hat{y})P_0 \cdot e_z \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \hat{x} &= x/l, \quad \hat{y} = y/l \\ \hat{x}_0 &= x_0/l, \quad \hat{y}_0 = y_0/l \end{aligned}$$

が得られる。これは物体Pの射影点 p ($\hat{x}, \hat{y}$)が得られたときのPの視線を表わす。

3.2 回転移動成分の算出

カメラ座標系の方位を示す単位方位ベクトル e_x, e_y, e_z を

$$e_x = \begin{pmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{pmatrix}, \quad e_y = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix}, \quad e_z = \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

で表わす。物体座標系における直線Gを画像面に射影したとき、その射影直線 g がカメラ座標系で

$$a\hat{x} + b\hat{y} + c = 0 \quad (3.6)$$

と表わされるとする。(図2)

このとき直線Gとカメラ中心Fを含む

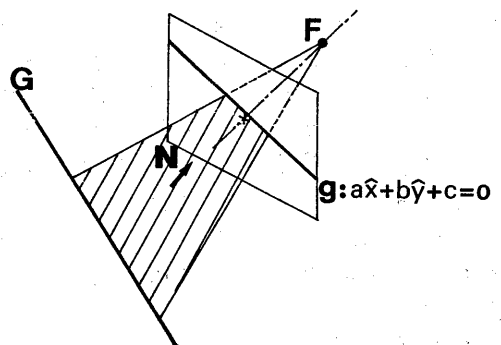


図2 空間直線の射影

も平面に垂直なベクトル $\mathbf{N}$ は

$$\mathbf{N} = a\mathbf{e}_x + b\mathbf{e}_y + c\mathbf{e}_z \quad (3.7)$$

で表わされる。ここで直線 G と $\mathbf{N}$ は垂直に交わるので、 $\mathbf{G} \cdot \mathbf{N} = 0$ の関係がある。

回転に関する自由度は3つあるので、 G として、その方位ベクトルが一次独立である3つの既知直線によって回転パラメータを決定できる。

ここで簡単のため、3つの既知直線を $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$, $(0, 0, 1)$ とし、その射影直線の係数を a_i, b_i, c_i ($i=1, 2, 3$) とすると

$$\left. \begin{aligned} a_1 S_x + b_1 T_x + c_1 U_x &= 0 \\ a_2 S_y + b_2 T_y + c_2 U_y &= 0 \\ a_3 S_z + b_3 T_z + c_3 U_z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

である。式 (3.8) は α, β, γ に関する式に変換できるので、その解より回転パラメータが決定できる。

3.3 平行移動成分の算出

平行移動成分は、物体座標系における既知の1点とその射影点によって求まる。空間の既知の点を $\mathbf{P}_1$ とし、その射影点をカメラ座標系で $P(x_1, y_1, z_1)$ と表わすと、式 (3.4) より

$$\mathbf{P}_0 \cdot \mathbf{e}_z = \frac{(\mathbf{e}_x - \hat{x}_1 \mathbf{e}_z) \cdot \mathbf{P}_1}{\hat{x}_0 - \hat{x}_1} \quad (3.9)$$

が得られる。

したがってレンズ中心 $F(X_f, Y_f, Z_f)$ は式 (3.3) より

$$\begin{pmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \end{pmatrix} = \mathbf{P}_0 \cdot \mathbf{e}_z \begin{pmatrix} \mathbf{e}_x^* \\ \mathbf{e}_y^* \\ \mathbf{e}_z^* \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{y}_1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

によって得る。

4. 3次元情報の抽出

4.1 3次元位置の算出

投光する縞状パターンは、複数のスリットを通して空間に形成される平面状の光とし、

$$a_i X + b_i Y + c_i Z = 1 \quad (i=1 \text{ to } n) \quad (4.1)$$

で表わす。

このとき、もし画像面に射影された縞とシーンの縞が対応づけられていると、画像から求まる視線(式 (3.4)) と縞を作る平面(式 (4.1))の交点を求めることにより、縞に沿った3次元位置を求めることができる。

しかし、1台のカメラでは、各縞が不連続となったとき、シーンと画像を同一視できなくなる。例えば、非凸状物体が存在していたり、前後する物体間で縞の一部が隠されたときなどである。そこで本報告では、もう一台カメラを用い、シーンと画像の対応づけを行なうことにする。

4.2 幾何学的拘束条件

2台のカメラを用いたとき、シーンと画像の対応づけは、画像間の対応づけによって実現できる。このとき図3に示すステレオ幾何を利用できる。左右レンズ中心を F_L, F_R とし、それらを結ぶ直線をステレオペアラインと呼ぶ。この直線を含み、両カメラの視野内に張る平面をエピポーラプレーンと呼ぶ。エピポーラプレーンは両画像面を横切

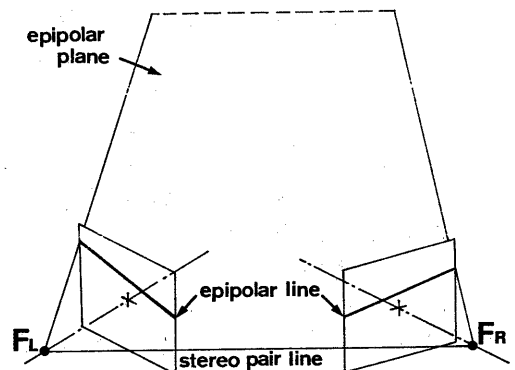


図3 ステレオ幾何

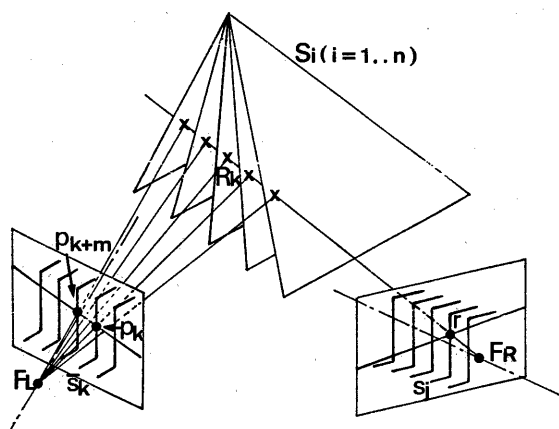


図4 幾何学的拘束条件

り、各面上にエピポーララインを引く。ここで、エピポーラプレーン上の全ての可視点は、両画面のエピポーラライン上に射影されることになり、画像間の2次元の対応づけの問題を、エピポーラライン上の一次元の問題に帰着できる。

次に、縞状パターンを作る平面光は前もって容易に求められているとすると、図4の右画像で、エピポーララインと縞の交点である r における視線は、平面光 S_i と複数の交点 R_i を得る。この交点 R_i を左画像に射影すると、全ての射影点はエピポーラライン上に存在し、 R_L となる。いま右画像で r を含む縞 S_k と左画像の縞 S_k が対応していると仮定すると、 r と真に対応づけられる点 R_L もまたエピポーララインと縞の交点になければならない。その他の射影点 R_i はエピポーラライン上で分散するが、ある射影点 R_{k+m} も R_k と同様にエピポーララインと縞の交点になる可能性がある。このエピポーララインと縞の交点に存在する全ての射影点($R_k, R_{k+m}, \dots$)を、 r における対応候補として以下で扱う。

このように、幾何学的拘束条件は、対応づけを一意に決定することはできないが、対応づけの必要条件となり、対応候補の数を著しく減少させる。

4.3 単調性の拘束

一般のシーンを対象としたとき、シーンにおいて物体が前後して存在すると、エピポーラライン上の特徴の並ぶ順序が逆転することがしばしばある。

図5はこの状態を上から眺めたものである。対象物を P とすると、斜線領域 R_1 は P によって隠されるため、両画像間で対応づけられることはない。いま P 上の点 Q について考察すると、 Q が左右画像で並ぶ順序を交替さ

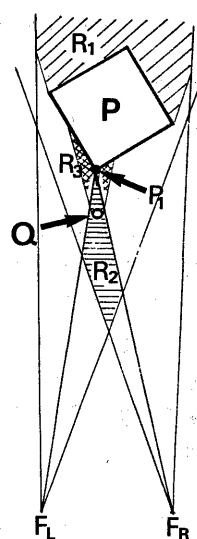


図5 単調性の拘束

せる物体 Q は、横縞領域 R_2 になければならない。ただし、このとき Q によって格子縞領域 R_3 は隠されている。

しかし、より大きな Q は R_3 の領域を広げ、ついには P も隠すため、大きな Q は P の順序を逆転できなくなる。一方、左右カメラがなす角を小さくすると R_2 の領域が細くなり、非常に細い Q しか存在できなくなる。

以上より、対象物を絞ったとき、その前に比較的小さな物体が存在することは非常に希であると考えられるため、本研究では、特徴の並ぶ順序が逆転しない単調性の拘束を利用する。

4.4 対応づけ

対応づけには、初めにエピポーラライン上で、幾何学的拘束条件を適用する。この結果、右画像でエピポーララインと縞の各交点は、左画像の数個の対応候補に絞られる。いま右画像の交点の集合を R とし、左画像における対応候補の集合を C とする。すなわち

$$R = \{ r_i | i = 1 \text{ to } m \}$$

$$C = \{ p_j | j = 1 \text{ to } n \}$$

とする。右画像から左画像への写像を
 f とし、その逆写像を g とすると

$$f: r_e \rightarrow p_k$$

$$g: p_k \rightarrow r_e$$

を満たす p_k が存在するとき、 r_e と p_k を
 対応づける。言い換えると、右画像の
 r_e の対応候補が p_k だけで、 p_k に対して
 逆に右画像の対応候補は r_e だけとなる
 1対1対応のときである。

次に単調性の拘束を適用し、対応づ
 けられた p_k を基準として、単調性の拘
 束を満たさない対応候補を除去する。
 例えば、 r_{e+1} に対し p_{k-1} が候補であるとき
 p_{k-1} は除去される。

この操作を、対応候補が各々1つづ
 つになるか、または対応候補が除去で
 きなくなるまで続ける。

5. 実験と結果

5.1 カメラパラメータ

図7に示す立方体をカメラパラメー
 タの決定に用いる。立方体の各稜を物
 体座標系のX,Y,Z軸とし、上面の格子
 点を既知の点として用いる。

画像上での各軸の射影直線は、

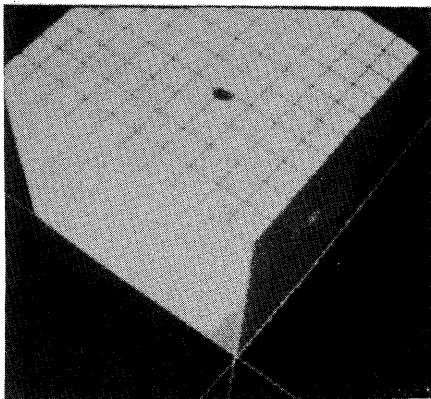


図7 校正用立方体

$$x \cos \theta_i + y \sin \theta_i = p_i \quad (i=1,2,3) \quad (5.1)$$

で表わし、 θ_i 、 p_i は最小2乗法より求
 める。本手法で得られたカメラパラメ
 ータを確認するため、図8に示す回転
 テーブルを用い、Y軸回りの回転角 β
 を確かめた。立方体のY軸を回転軸に
 一致させて、他のパラメータへの影響
 をなくしている。実験結果と測定値の
 比較を表5.1に示す。なお回転角 β は、
 ある角度を始点とする相対角で表わし
 ている。この測定に用いた回転テーブ
 ルは、 0.1° の高精度の測定ができる。

5.2 3次元位置の検出

図7の立方体を用いて求めた左右カ
 メラの各パラメータを表5.2に示す。
 平行移動成分は、立方体上面の格子点
 を既知の点とした、20点の平均値から
 求めている。図9は対象シーンに10面
 のエピポーラプレーンを生成し、右画
 像の対応候補を左画像に射影したもの
 である。図のように、全てがエピポー

表5.1 測定値と実験値の比較

measurement values $\Delta\beta$ (degrees)	experimental results $\Delta\beta$ (degrees)	errors $\Delta\beta$ (degrees)
-10	-9.85	-0.15
-5	-4.85	-0.15
+5	+4.82	-0.18
+10	+10.08	+0.08
+15	+14.97	-0.03
+20	+19.90	-0.03

The start point $\beta = 36.58$ (degrees)

(This value is computed by our method.)

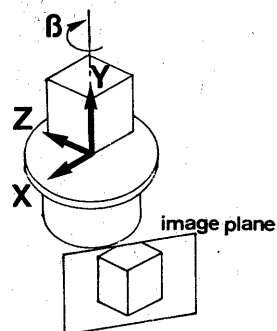


図8 カメラパラメータの検証

ライン上に乗り，幾何学的拘束によってかなり対応候補の数を減少できた。単調性の拘束を適用して，対応づけられた点の3次元情報を平面図にしたのが図10である。高さ方向の位置精度は2.5%以内であった。

6. おわりに

本研究では，2台のカメラとシーンに投光した既知の平面光から生ずる2つの拘束条件を利用して，3次元位置検出を行なった。1つは幾何学的拘束条件で，これはシーンと画像を同一視するための必要条件となる。この条件は，ステレオ法で問題となる左右画像で同時に現れない特徴の問題の解決に役立つ。もう1つは，シーンに依存した単調性の拘束である。兩者を利用することによってシーンと画像を対応づけることができた。本研究ではシーンの3次元情報の抽出を，2台のカメラから各々1枚の画像で処理できるため，動的な環境でも利用できる。

またカメラパラメータの決定では，

表5.2 実験時のカメラパラメータ

		the left image	the right image
rotation (deg.)	α	65.23	60.77
	β	52.11	26.77
	γ	-3.51	-4.03
translation (mm)	X	104.2	88.5
	Y	355.1	368.9
	Z	-57.3	-143.9

初期値を必要とせず，自動的に計算できるため，再現性がある。

謝辞 日頃，有益な御指導を頂いている大阪大学辻三郎教授に深謝します。

参考文献

- 1) 青木, 谷内田, 辻: パターン投光法と2台のカメラを用いた3次元物体の計測, 信学技報, PRL 83-85, 84
- 2) D.B. Gennery: Stereo-camera calibration, Proc. of Image Understanding Workshop, 101-107, 79
- 3) 笠井 et al.: ポジションセンサを用いた3次元運動計測システム, 計測自動制御, 19-12, 997-1003, '83

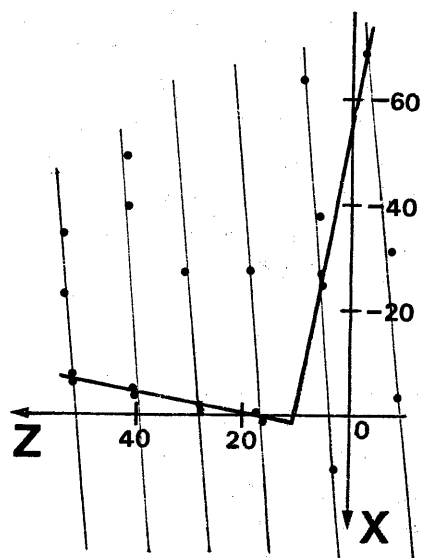
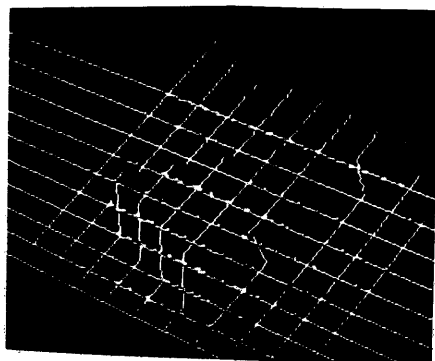
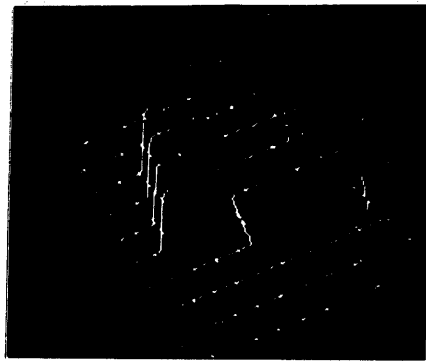


図10 平面図



(a) 左画像



(b) 右画像

図10 エピポーララインと対応候補点