

画像処理による車輛の位置を計測する方法の研究

Research on a method of positioning vehicles by image processing

高木陽市*, 米丘孝幸*, 森英雄**, 酒井邦造***, 小林芳樹***

*日立プロセスコンピュータエンジニアリング(株) / 茨城県日立市大みか町5丁目2-1

**山梨大学教授 工学博士 / 山梨県甲府市武田4-3-11

*** (株)日立製作所 / 東京都千代田区神田駿河台4丁目6番地

Yoichi Takagi*, Takayuki Yoneoka*, Hideo Mori**, Kunizo Sakai***, Yoshiki Kobayashi***

*Hitachi Process Computer Engineering, Inc., / 5-2-1, Omika-cho, Hitachi-shi, 319-1293, Japan

**Yamanashi University of Science, / 4-3-11, Tkeda, Kofu-shi, 400-8511, Japan

***Hitachi, Ltd. / 4-6, Kanda Surugadai, Chiyodaku, Tokyo, 101-8010, Japan

Abstract

This document describes a geometric model and an algorithm for measuring an object's position by analyzing a camera image set diagonally upward. This method requires only half as many cameras and image processors as those required by a conventional three-dimensional position measuring method with stereo images. While the coordinate transformation method from an image coordinate system, using a 3 x 4 matrix, to an oblique plane is known, this method requires six or more known reference points in order to decide all the parameters of a determinant and also has a problem of not being able to use the object's height information. The method described herein has advantages such as having only two reference points and also being able to incorporate a function of correction using the object's height information.

Key Words : Image processing, positioning

1 はじめに

カメラ画像を解析して、3次元空間の位置を認識する手法は、高度な技術を必要とする分野のひとつである。コンピュータビジョンの世界では、前方3次元空間の対象物の形状が与えられると、幾何光学の手法により2次元のカメラ画像は容易に決定される。しかし、これから問題とする、カメラでとらえられた2次元の画像から、カメラ前方の3次元世界の状況を決めることは、まだ、未完全な技術の分野である。2次元のカメラ画像を使用して、3次元の世界(形状、位置)を決定するには1シーンに2台のカメラを必要とする。カメラを1台しか使用しないで計測する場合は、計測対象物が平面上にある場合に限定される。前者はステレオ画像による3次元位置決め技術として知られており、完全な3次元

空間での位置計測が可能である¹⁾。後者は、透視投影行列を使用した座標変換方式に関する報告がある²⁾。この場合、行列式のすべてのパラメータを決定するためには、6点以上の既知の基準点(すべて同一平面上不可)が必要とされるが、路上に多くの基準点を設置することは望ましくなく、基準点の設定や教示作業も煩雑であった。また、この方式は、対象物の高さ補正処理機能をモデルに組み込むことが困難である等の問題があり、今回のシステムには採用しなかった。筆者等は、カメラ設置位置等の幾何学条件を計測モデルに固定パラメータとして組み込み、基準点の数を1シーン当たり最小2点(同一面上)にまで減らすことができた。本技術は、侵入者監視システムや環境システム計測制御の分野にも広く適用可能な技術である。

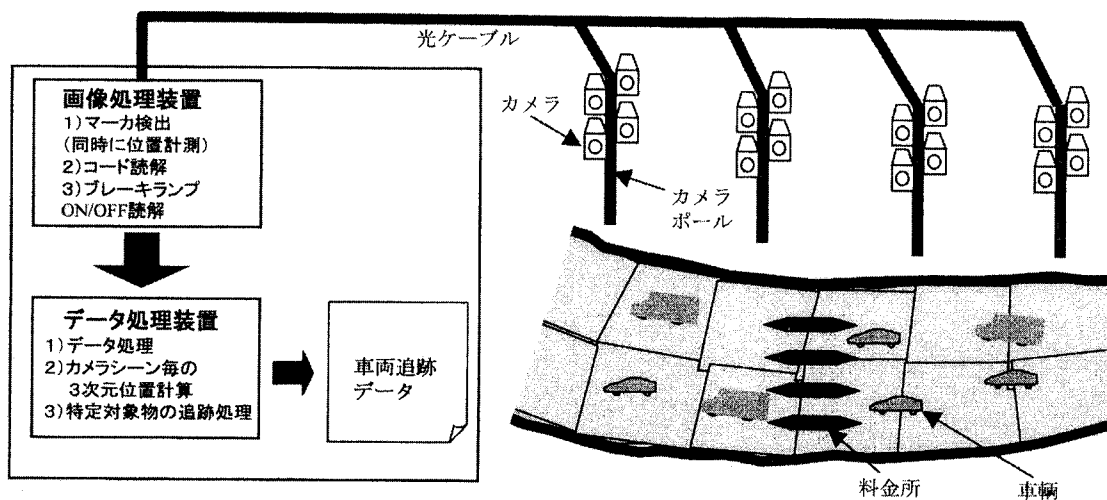


Fig.1 Example of measuring a vehicle position using a camera image

2 適用システムの概要

本計測技術は、料金所付近の車輛挙動の解析を目的としたシステムに適用した。そのシステム全体構成を Fig.1 に示す。計測対象は路上を走行する車両である。CCTV カメラは路側のカメラポール上に設置してある。車上マーカを搭載した車輛 (Fig.2 参照) の走行映像を CCTV カメラでとらえ、その映像を画像処理することによって、車輛識別、走行位置、ブレーキランプの ON/OFF 等を計測し、車輛の走行軌跡等を出力する。試験場平面とカメラ視野を

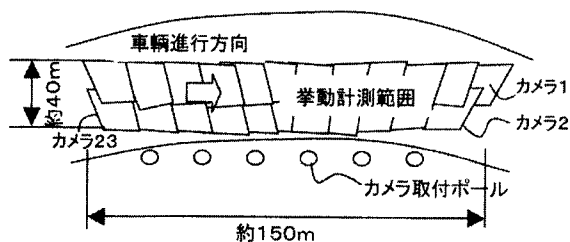


Fig.3 Test site floor plan and a camera field of view

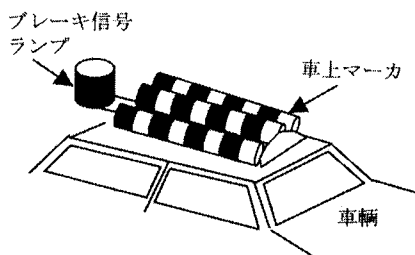


Fig.2 Onboard marker

Fig.3 に示す。指定された挙動計測エリアを 23 台のカメラで網羅する。各エリアに対して 1 台の CCTV

カメラを割り当てた。Fig.4 は、計測モデル構築に使用したカメラ画像の一例である。

システムの概略仕様は、以下のとおりである。

- (1) 車輛検知周期 100ms 以内
- (2) 車輛位置の計測精度 0.5m 以内
- (3) 最高 80km/h の走行車輛の軌跡を表示可能
- (4) 挙動計測エリア (40m × 150m)
- (5) ハードウェア

・カメラ	23 台
・画像処理装置	23 台
・データ収集装置	1 台

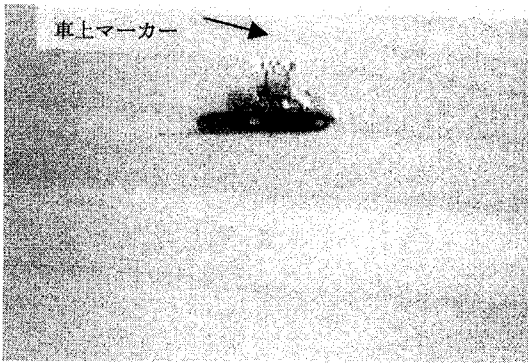


Fig.4 Example of a camera image of a reference point set on a road

3 位置計測処理概要

本画像処理による位置計測の特徴は、以下のよう
な点である。

(1) 計測環境

- ・ 車輛の通過面は平坦な道路面である。
- ・ カメラ画像は道路の側方からのものである。
- ・ 車輛の屋上に設置したブレーキ信号ランプを画像処理により検知して車輛位置とした。
- ・ マーカーを読み取り車種を決定し、車輛毎の高さを決定した。

(2) 計測の原理

以下説明するカメラによる位置計測の外観を Fig.5
に示す。カメラ設置位置のような精度よく実測可能

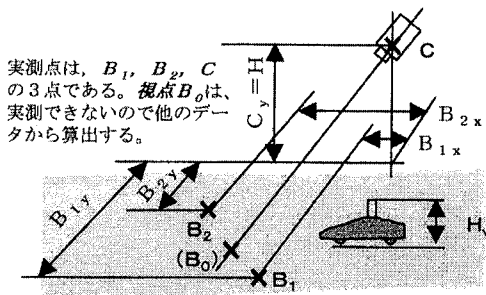


Fig.5 Concept of measuring an object's position on an opposite slope

なパラメータは、直接その値を計測モデルに組み入れ、カメラ取付姿勢(向きや回転)、倍率等のように予め精度よく計測できないパラメータは、直接パラメータとして使用せず、基準点の画像処理により求めた。カメラ視線と地上の交点(本稿では以下視点と呼称する)は他のパラメータから計算する。

計測モデルに入力する固定パラメータは以下のとおりである。

- ・ カメラ設置位置 (C 点: 3 次元)
- ・ 基準点 2 点 (B₁ 点, B₂ 点: 3 次元)
- ・ 対象物の高さ (H_v: 1 次元)

前もって決定しなければならない自由度の数は、上記のように 3 次元座標点 3 個と対象物の高さ 1 個であり、合計 10 個である。カメラ視線の向きを 1 個と計算すると、合計 11 個で、カメラの内的外的自由度の数と一致する²⁾。

4 画像による位置計測モデル

Fig.6 に計測の幾何学モデルの構成を示す。以下、本モデルの仕様を記述する。

4.1 座標系の定義

(1) 世界座標系 Σ₀ (X, Y, Z)

対象物やカメラの設置位置の関係を記述するための座標系で 3 次元である。(X, Y) 面が地表面である。

(2) 画像座標系 Σ₂ (ρ, σ)

カメラ撮像板に撮像される画像と等価な画像がカメラ前方 f(焦点距離)の点に作られると考えた時の 2 次元座標系である。

$$\text{面}(\rho, \sigma) \perp \text{視線 } CB_0 \quad (1)$$

(3) 中間座標系 Σ₁ (u, v, w)

カメラ視線と地上の交点を視線点 B₀ とすると、視線点 B₀ を通り、視線に垂直な面を (u, v) とし、カメラ視線を w 軸に一致させた 3 次元座標系である。

$$\text{面}(u, v) \perp \text{視線 } CB_0 \quad (2)$$

$$\text{面}(\rho, \sigma) // \text{面}(u, v) \quad (3)$$

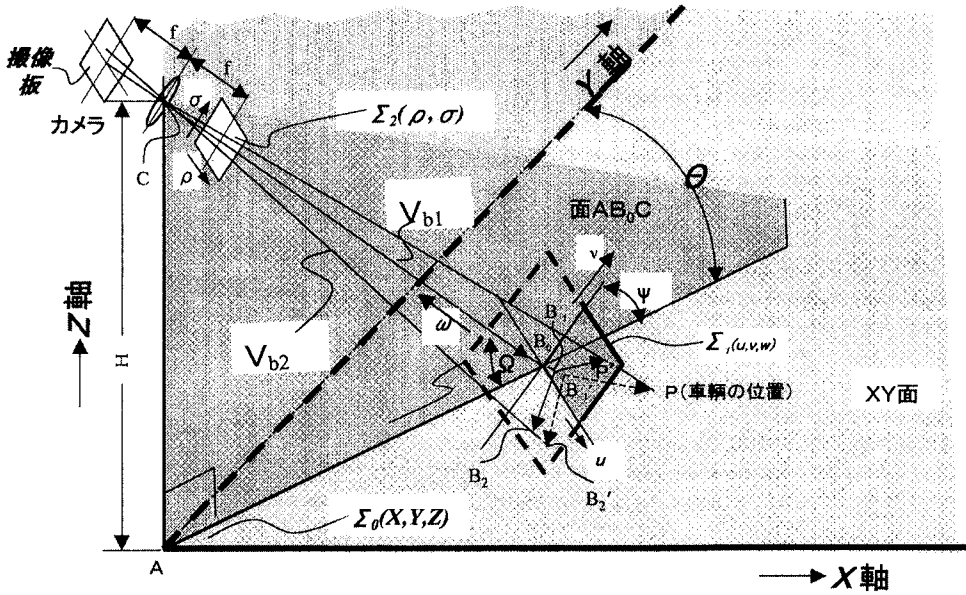


Fig.6 Geometric model of measurement

本座標系は世界座標系 Σ_0 を下記座標変換により得られる。

- 原点を A から B_0 へ移動
- Z 軸を中心にして時計方向に θ だけ回転
- X 軸を中心にして反時計方向に Ψ だけ回転

4.2 基準点

地上の 1 個のカメラシーン内に最低 2 個の基準点を設けた。

- $B_1(X_{b1}, Y_{b1}, Z_{b1} = 0)$: 第 1 の基準点
- $B_2(X_{b2}, Y_{b2}, Z_{b2} = 0)$: 第 2 の基準点

4.3 視点 B_0

カメラ視線と地上の交点を B_0 とする。 B_0 は、当初わからないので、 B_1 点と一致させて仮の計測モデルを作成する。仮の計測モデルを使用して、視点 B_0 を再計算することにより正しい B_0 点を求める (収斂計算)。

4.4 カメラ設置仕様

カメラ位置を C 点 (X_c, Y_c, Z_c)、カメラポールの地上座標を A ($X_a, Y_a, Z_a = 0$) とした。ここで、 $X_c = X_a, Y_c = Y_a$ である。

4.5 カメラ視線を含む垂直面

面 AB_0C は、カメラ視線を含む垂直面である。面 AB_0C と Y 軸とのなす角を θ とすると

$$\theta = \tan^{-1}((X_{b0} - X_a) / (Y_{b0} - Y_a)) \quad (4)$$

4.6 カメラ仰角

カメラ仰角を Ω とすると

$$\Omega = \tan^{-1}(H / ((X_{b0} - X_a)^2 + (Y_{b0} - Y_a)^2)^{1/2}) \quad (5)$$

4.7 座標系 Σ_1 の (u, v) 面の傾き角 Ψ

$$\Psi = \pi / 2 - \Omega \quad (6)$$

4.8 任意の地上点 P (たとえば、車輛検知点)

P 点と C 点を結ぶ直線と面 (u,v) との交点を P'、面 (ρ, σ) との交点を P'' と定義する。

4.9 地上点と C 点を結ぶ直線と各座標面との交点

B₁ 点とカメラ中心 C を結ぶ直線と面 (u,v) との交点を B₁' とし、面 (ρ, σ) との交点を B₁'' とする。B₂ 点、B₀ 点についても同様に、B₂'、B₂''、B₀'、B₀'' を定義する。

4.10 画像座標系と中間座標系の幾何学的関係

Fig.7 において、B₁' B₂' 及び B₁' P' をベクトルとする。同様に、Fig.8 において、B₁'' B₂''

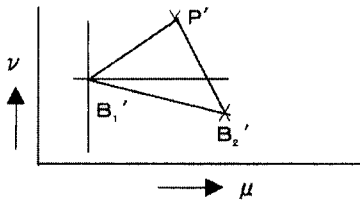


Fig.7 Intermediate coordinate system Σ₁

及び B₁'' P'' をベクトルとする。∠B₁' B₂' P' と

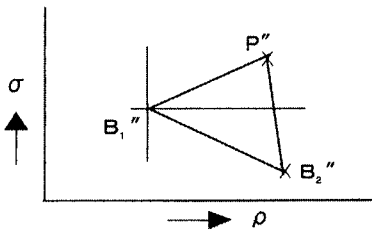


Fig.8 Image coordinate system Σ₂

と ∠B₁'' B₂'' P'' はモデルの幾何学的な関係から

相似形であることがわかる。すなわち、

$$\triangle B_1'' B_2'' P'' \sim \triangle B_1' B_2' P' \quad (7)$$

従って、次の式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \text{ANG}(B_1' P') &= \text{ANG}(B_1' B_2') + \angle P' B_1' B_2' \\ &= \text{ANG}(B_1' B_2') + \angle P B_1'' B_2'' \\ &= \text{ANG}(B_1' B_2') + \text{ANG}(B_1'' P'') - \text{ANG}(B_1'' B_2'') \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、

$$\Delta \beta = \text{ANG}(B_1'' B_2'') - \text{ANG}(B_1' B_2') \quad (9)$$

とおくと

$$\text{ANG}(B_1' P') = \text{ANG}(B_1'' P'') + \Delta \beta \quad (10)$$

と表記できる。Δβ は教示の際に決定できる定数である。また、ベクトルの絶対値の大きさについては、次式が成り立つ。

$$\text{NORM}(B_1' P') = \text{NORM}(B_1'' P'') \cdot \text{NORM}(B_1' B_2') / \text{NORM}(B_1'' B_2'') \quad (11)$$

ここで、

$$\epsilon = \text{NORM}(B_1' B_2') / \text{NORM}(B_1'' B_2'') \quad (12)$$

とおくと

$$\text{NORM}(B_1' P') = \text{NORM}(B_1'' P'') \cdot \epsilon \quad (13)$$

と表記できる。ε は、教示の際に決定できる定数である。

5 計測処理

画像による位置計測処理は、Fig.9 に示すように4つの処理からなる。地上の基準点の作成、基準点及びカメラ設置位置の計測、教示処理、オンライン処理である。以下各処理についてその技術的内容について記述する。

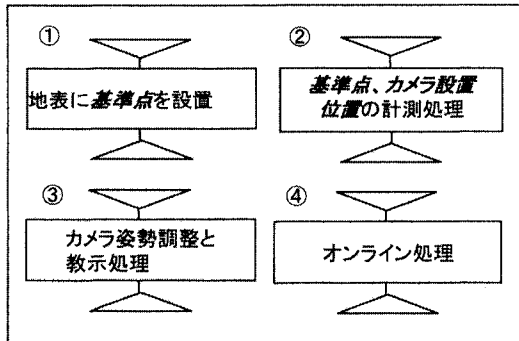


Fig.9 Measurement process using images

5.1 基準点の設置

最終的に 23 個のシーン上の車輛の位置は、統一座標系のもとに追跡処理を行うことになるので、各シーンの基準点は、統一された世界座標系で位置決めし、基準マークを設置する。基準マークの概略仕様は次のとおりである。

- ① 監視エリア内に 5m 間隔の基盤の目を作成し、その格子点を基準点とした。
- ② 格子間隔は 5m とした。
- ③ マークは、座金付ステンレス製釘を使用し一定期間維持できるようにした。

5.2 基準点等の測定

- ① 基準点の計測は、全シーン共通な世界座標系により行った。
- ② カメラ設置位置は、高さを含めて、基準点と同一の座標系で計測した。

5.3 教示処理

Fig.10 に教示処理手順を示す。カメラシーン調整では、対応する監視エリアをカバーするとともに、少なくとも 2 個の基準点がシーン中に入るようにズームと視線向きを調整する。選んだ 2 つの基準点の内、シーン中心に近い基準点を第 1 の基準点 B_1 とする。シーン中心は、モニタ画面の中心と考えてよい（正

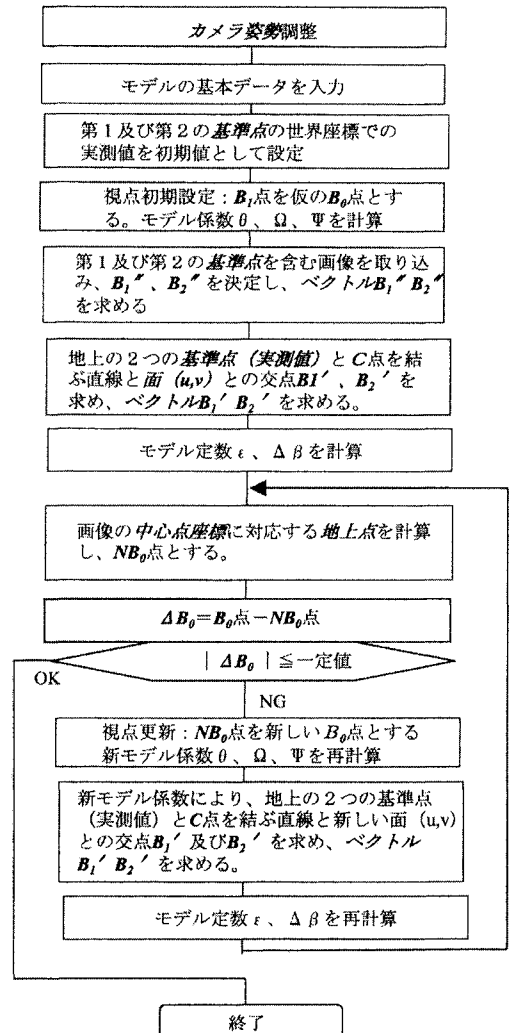


Fig.10 Teaching procedure

確にわかる場合には、それを使う)。カメラの光学的な中心をCとする。画像を解析し、2つの基準点の画像上の座標を得る。B₁''点、B₂''点である。2点を結ぶベクトルの大きさNORMと偏角ANGを次式により計算により求める。

$$\text{NORM}(B_1'' B_2'') = ((B_2''_{\rho} - B_1''_{\rho})^2 + (B_2''_{\sigma} - B_1''_{\sigma})^2)^{1/2} \quad (14)$$

$$\beta_2 = \text{ANG}(B_1'' B_2'') = \tan^{-1}((B_2''_{\sigma} - B_1''_{\sigma}) / (B_2''_{\rho} - B_1''_{\rho})) \quad (15)$$

次に、地上の2個の基準点B₁、B₂とC点を結ぶ直線と面(u,v)の交点を、それぞれB₁'点、B₂'点とする。B₁'点、B₂'点を求めるために、基準点B₁、B₂を座標系Σ₀表示から座標系Σ₁表示に変換する。

$$\begin{bmatrix} B_{1u} \\ B_{1v} \\ B_{1w} \end{bmatrix} = \text{ROT}_2(\text{ROT}_1(\begin{bmatrix} B_{1x} - B_{0x} \\ B_{1y} - B_{0y} \\ 0 \end{bmatrix})) \quad (16)$$

ここに、

ROT₁は、Z軸を時計方向にθだけ回転マトリックスで

$$\text{ROT}_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

にて表示される。ROT₂は、X軸を反時計方向にΨだけ回転マトリックスで

$$\text{ROT}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Psi & \sin \Psi \\ 0 & -\sin \Psi & \cos \Psi \end{bmatrix} \quad (18)$$

にて表示される。

同様に、B₂点についても次式で表示される。

$$\begin{bmatrix} B_{2u} \\ B_{2v} \\ B_{2w} \end{bmatrix} = \text{ROT}_2(\text{ROT}_1(\begin{bmatrix} B_{2x} - B_{0x} \\ B_{2y} - B_{0y} \\ 0 \end{bmatrix})) \quad (19)$$

次に、カメラ中心C点を座標系Σ₁で表示する。

$$(C_u, C_v, C_w) = (O, O, CB_0) \quad (20)$$

ここに、

$$CB_0 = (B_{0x}^2 + B_{0y}^2 + C_z^2)^{1/2} \quad (21)$$

C点とB₀点を結ぶ直線とΣ₁の面(u,v)の交点は、B₀点であるから、点B₁'の座標値は、

$$\begin{bmatrix} B_{1'u} \\ B_{1'v} \\ B_{1'w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{1'u} \cdot |C_w| / (|C_w| + |B_{1w}|) \\ B_{1'v} \cdot |C_w| / (|C_w| + |B_{1w}|) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

である。C点とB₂点を結ぶ直線とΣ₁の面(u,v)の交点は、Σ₁表示のC点、とΣ₁表示のB₂点を使用して求まる。

点B₂'のΣ₁表示を(B₂'_u, B₂'_v, B₂'_w)とすると

$$\begin{bmatrix} B_{2'u} \\ B_{2'v} \\ B_{2'w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{2'u} \cdot |C_w| / (|C_w| + |B_{2w}|) \\ B_{2'v} \cdot |C_w| / (|C_w| + |B_{2w}|) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

として得られる。

ベクトルB₁' B₂'の大きさは、

$$\text{NORM}(B_1' B_2') = ((B_2'_{u} - B_1'_{u})^2 + (B_2'_{v} - B_1'_{v})^2)^{1/2} \quad (24)$$

$$\beta_1 = \text{ANG}(B_1' B_2') = \tan^{-1}((B_2'_{v} - B_1'_{v}) / (B_2'_{u} - B_1'_{u})) \quad (25)$$

2つの座標Σ₁ Σ₂間の距離変換係数εは、

$$\epsilon = \text{NORM}(B_2'' B_1'') / \text{NORM}(B_2' B_1') \quad (26)$$

同じく偏角の差Δβは、

$$\Delta \beta = \beta_2 - \beta_1 \quad (27)$$

として計算される。

以上の計算では、B₀点は仮のシーン中心であるから、正しいシーン中心を収斂計算で求める。画面の画素数が512×480の場合、シーンの中心を例えば、画像座標系で(256,240)と仮定して計算する。この画像上の位置に対応する地上点を計算しNB₀とする(計算方法は式28～式37において、P''点を(256,240)とする)。B₀とNB₀の差を計算し、一定値以下であれば、教示処理は終了である。一定値以上の時には、NB₀点をB₀点として、θ、Ω、Ψを再計算する。新しいθ、Ω、Ψを使用して、ε、Δβを再計算する。新しい上記値を使用してNB₀点を再計算する。以上の処理をNB₀点とB₀の差が一定以下になるまで繰り返す。

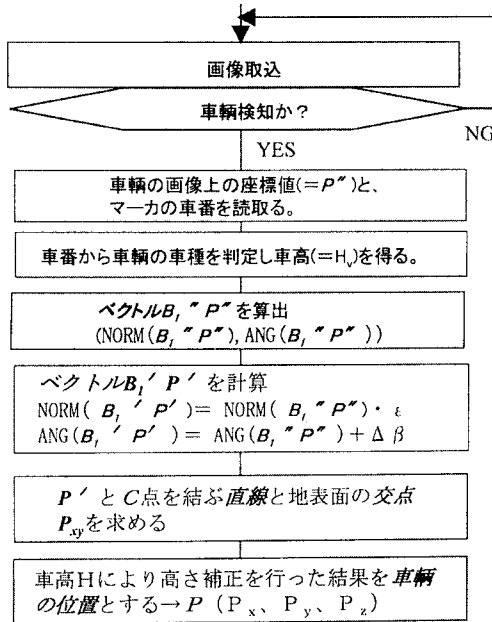


Fig.11 Procedure in the measurement stage

5.4 オンライン処理

Fig.11 にオンライン処理の処理手順を示す。車輛等の通過しているシーンの映像を取り込み、車輛を検知した場合には、その座標とコードを読み取る。コードから車種がわかるので車高 H_v を得る。座標値を

$$P'' (P'' \rho, P'' \sigma) \quad (28)$$

車高を

$$H_v \quad (29)$$

とする。ベクトル $P'' B_0''$ (面 $\rho \sigma$ 上) を計算する。

$$\text{NORM}(P'' B_0'') = ((P'' \rho - B_0'' \rho)^2 + (P'' \sigma - B_0'' \sigma)^2)^{1/2} \quad (30)$$

$$\beta_p = \text{ANG}(P'' B_0'') = \tan^{-1}((P'' \sigma - B_0'' \sigma) / (P'' \rho - B_0'' \rho)) \quad (31)$$

計測モデルで C 点と P'' を結び延長線と面 (u, v) の交点を P' とする。

ベクトル $B_0' P'$ は次式から得られる。

$$\text{NORM}(B_0' P') = \text{NORM}(B_0 P'') \cdot \epsilon \quad (32)$$

$$\text{ANG}(B_0' P') = \beta_p + \Delta \beta \quad (33)$$

として得られる。

P' 点の座標値は、

$$\begin{bmatrix} P'_u \\ P'_v \\ P'_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{NORM}(B_0' P') \cdot \cos(\text{ANG}(B_0' P')) \\ \text{NORM}(B_0' P') \cdot \sin(\text{ANG}(B_0' P')) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

として得られる。 P' 点を世界座標で表現する。

$$\begin{bmatrix} P'_x \\ P'_y \\ P'_z \end{bmatrix} = \text{ROT4}(\text{ROT3}(\begin{bmatrix} P'_u \\ P'_v \\ P'_w \end{bmatrix})) + \begin{bmatrix} B_{0x} \\ B_{0y} \\ B_{0z} \end{bmatrix} \quad (35)$$

ここに、

ROT_3 は、 u 軸を時計方向に Ψ だけ回転する回転マトリックスで

$$\text{ROT}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Psi & -\sin \Psi \\ 0 & \sin \Psi & \cos \Psi \end{bmatrix} \quad (36)$$

にて表示される。

ROT_4 は、 w 軸を反時計方向に θ だけ回転する回転マトリックスで

$$\text{ROT}_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

にて表示される。

$$C \text{ 点 } (C_x, C_y, C_z) = (0, 0, C_z) \quad (38)$$

C 点と P' 点を結び直線と面 XY との交点 $P_{xy}(P_{xx}, P_{yy}, 0)$ を求める

$$\begin{bmatrix} P_{xx} \\ P_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P'_x \cdot (C_z / (C_z - P'_x)) \\ P'_y \cdot (C_z / (C_z - P'_x)) \end{bmatrix} \quad (39)$$

この P_{xy} 座標が、地上の車輛の高さを無視した車輛の位置を表す。

車輛の高さを考慮した車輛の位置 $P(P_x, P_y, P_z)$ を次式のように計算される。

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{xx} \cdot ((C_z - H_v) / C_z) \\ P_{yy} \cdot ((C_z - H_v) / C_z) \\ H_v \end{bmatrix} \quad (40)$$

Table 1 An example of experimental results

カメラ番号	画像座標		地上座標		計測値		誤差	
	横 (m)	縦 (m)	横 (m)	縦 (m)	横 (m)	縦 (m)	横 (m)	縦 (m)
カメラ 1	335.00	62.00	-60.00	10.00	-60.15	9.93	-0.15	-0.07
	256.00	275.00	-60.00	-5.00	-60.03	-4.99	-0.03	0.01
カメラ 2	63.00	114.00	-54.60	7.00	-54.58	6.97	0.02	-0.03
	199.00	83.00	-50.00	10.00	-50.14	9.69	-0.14	-0.31
	217.00	307.00	-50.00	-5.00	-50.12	-4.99	-0.12	0.01
	410.00	131.00	-43.50	6.00	-43.52	5.81	-0.02	-0.19
カメラ 3	264.00	104.00	-60.00	-10.00	-60.07	-10.07	-0.07	-0.07
	191.00	341.00	-60.00	-20.00	-60.00	-19.93	0.00	0.07
カメラ 4	199.00	64.00	-45.00	-10.00	-45.01	-10.00	-0.01	0.00
	258.00	307.00	-45.00	-20.00	-45.04	-20.07	-0.04	-0.07
	444.00	83.00	-36.60	-10.10	-36.53	-10.20	0.07	-0.10
カメラ 5	130.00	98.00	-43.50	6.00	-43.57	6.19	-0.07	0.19
	242.00	57.00	-40.00	10.00	-40.11	9.90	-0.11	-0.10
	164.00	267.00	-40.00	-5.00	-40.07	-4.90	-0.07	0.10

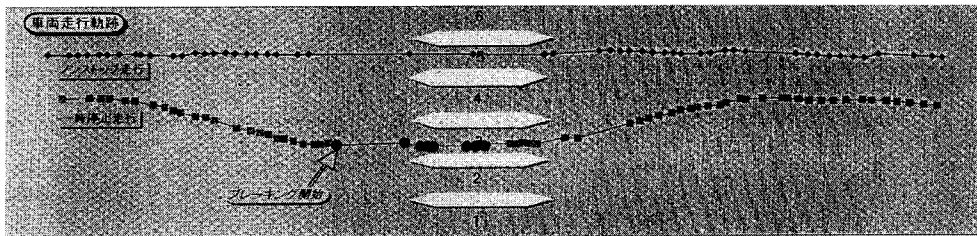


Fig.12 Photo of experimental position measurement (ordinary vehicle)

6 おわりに

Table1 に本システムの計測結果を示す。車輛高さの補正を行っているので、小型車・大型車共に要求精度 ($\pm 50\text{cm}$) 以内を実現できた。Fig.12 は本システムによる車輛の軌跡の出力結果例を示す。

本技術は、車輛の位置計測以外に対象物をカメラで監視計測する場合に有効な基本技術であり、環境システム計測制御等にも広く応用できる技術である。

参考文献

- 1) 出口光一郎：コンピュータビジョンのための幾何学「ステレオの仕掛けを解き明かす」、情報処理、Vol.37, No.7, pp.662-670(1996).
- 2) 出口光一郎：コンピュータビジョンのための幾何学「画像の生成過程を記述する」、情報処理、Vol.37, No.6, pp.549-556(1996).

(受付 2000. 2. 14)

(受理 2000. 2. 23)