単写真による車両の三次元位置計測法*

佐 藤 邦 夫*¹Three-dimensional Measurement of Vehicle Displacement
with Monocular Vision

Kunio SATO

One analytical method of three-dimensional measurement with monocular vision, where the size of the object is known, was revealed. There is a possibility that the number of solution sets amounts to four. Thus, the process which discriminates the efficient set with a computer was given. Further, in order to apply this theory to measuring the three-dimensional displacement of the vehicle, the procedure, which transforms the vehicle coordinate system to the absolute coordinate system, was also shown. In addition, the three-dimensional measuring system of the vehicle displacement, where the 35 mm camera was placed in the vehicle, was organized, and some running experiments were made. Since we execute the measurement with one camera and obtain the solutions analytically, the process of the computation is simple and requires a short time.

Key Words: Measurement, Vehicle Displacement, Monocular Vision, Analytical Solution, Photogrammetry

1. 結 言

一般に、車両など移動体の特性を計測したり制御を行うためには、その位置を三次元的に把握する必要がある。車両走行軌跡の計測に関し、著者は写真計測による方法を開発し、農用トラクタの旋回半径の計測に応用した⁽¹⁾。この方法は、走行車両上の既知の3特徴点を外部の35 mm カメラで写し、そのフィルム像を計測することによってカメラと車両の位置関係を三次元で算出し、これを連続して走行軌跡を求めるものである。

以上の手法のうち写真計測に係わる主要な原理は、3特徴点の相対位置関係が既知の被写体に対する単写真による三次元位置計測問題であって、著者は上記の研究においてその基礎方程式を数値計算により解き、有効解を判別して用いたが、Fischler らは同様な原理の解析的な解法を示した⁽²⁾。また島崎は幾何学的な数値解法を用いて同様の方程式を解いた⁽³⁾。

単写真による三次元位置計測には、このほか被写体の既知4特徴点を用いる方法もあり、解析的な解法も

与えられているが⁽²⁾⁽⁴⁾、このとき4特徴点は少なくとも同一平面上に存在する必要がある。前記の3特徴点による方法においても解を一つに特定するためには、一般に最小限あと一つの特徴点を追加する必要があるが、それらは同一平面上にある必要はない。

本報では3特徴点を用いる三次元位置計測法について、Fischler らのものに比べより直接的な手法により導かれる解析的な解法を新たに示し、さらにこれを車載35 mm カメラによる車両走行軌跡の計測システムに応用する。カメラを車載し、標識点を絶対座標系に固定したため、著者が既に採用した方法に比べ被写体の寸法に制約が少なく誤差を小さくすることができる。また、三次元位置計測の解法が解析的であるため処理速度が速く、解の数が明白なので有効解の特定が容易となった。

2. 単写真による三次元位置計測

カメラ撮影により得られた1枚の二次元像には、ほかに付帯条件が与えられていない場合、三次元的な情報が保存されない。今、図1のように三次元空間上に3標識点 P_1, P_2, P_3 があるとすると、その像 Q_1, Q_2, Q_3 を観測しただけでは P_1, P_2, P_3 の三次元位置を計算することはできないが、 $\overline{P_1P_2}=l_{12}, \overline{P_2P_3}=l_{23}, \overline{P_3P_1}=l_{31}$

* 昭和62年3月14日 関西支部第62期定時総会講演会において講演、原稿受付 昭和61年8月26日。

*¹ 正員、三重大学農学部 (〒514 津市上浜町 1515)。

が与えられれば3点の位置をカメラ座標系で表すことができる。

2.1 基礎方程式の構成 カメラは画面距離 f の理想的な斜影変換を行うものとする (図1)。 O_c を原点、カメラレンズの光軸を z 軸とするカメラ座標系 (O_c-x, y, z) におけるベクトル $\vec{O_cP_i} (i=1\sim3)$ の方向余弦 (λ_i, μ_i, ν_i) は、 Q_i の像平面座標値 (x_i, y_i) を用いると、

$$\lambda_i = x_i/d_i \quad (1)$$

$$\mu_i = y_i/d_i \quad (2)$$

$$\nu_i = f/d_i \quad (3)$$

ただし、

$$d_i = (f^2 + x_i^2 + y_i^2)^{1/2} \quad (4)$$

である。ここで、

$$\alpha_{ii+1} = \lambda_i \lambda_{i+1} + \mu_i \mu_{i+1} + \nu_i \nu_{i+1} \quad (5)$$

(ただし、 $i=3$ のとき $i+1$ を1とする)

$$|\vec{O_cP_i}| = a_i \quad (6)$$

とする余弦定理より、

$$a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2\alpha_{12} - l_{12}^2 = 0 \quad (7)$$

$$a_2^2 + a_3^2 - 2a_2a_3\alpha_{23} - l_{23}^2 = 0 \quad (8)$$

$$a_3^2 + a_1^2 - 2a_3a_1\alpha_{31} - l_{31}^2 = 0 \quad (9)$$

が成り立つ。式(7)~(9)を a_1, a_2, a_3 の三元連立二次方程式とみて解けば、 P_i のカメラ座標系における三次元座標は ($a_i\lambda_i, a_i\mu_i, a_i\nu_i$) と表せる。今後、式(7)~(9)の3式を基礎方程式と呼ぶことにする。

2.2 基礎方程式の解析的解法 式(7)~(9)より a_2, a_3 を消去し、 a_1 の多項式を導く。まず、

$$\pm \{l_{12}^2 - (1 - \alpha_{12}^2)a_1^2\}^{1/2} = M \quad (10)$$

$$\pm \{l_{31}^2 - (1 - \alpha_{31}^2)a_1^2\}^{1/2} = N \quad (11)$$

とおき、以後 M^2, N^2 が出現した時点でそれぞれ $l_{12}^2 - (1 - \alpha_{12}^2)a_1^2, l_{31}^2 - (1 - \alpha_{31}^2)a_1^2$ と書き直すことにする。

このとき式(7)、(9)より

$$a_2 = \alpha_{12}a_1 + M \quad (12)$$

$$a_3 = \alpha_{31}a_1 + N \quad (13)$$

図1 絶対座標系とカメラ座標系

となるので、これらを(8)に代入し、 M, N に a_1 が含まれていることを無視して見かけ上 a_1 について整理し、さらに a_1 の一次の項を分離すると、

$$\begin{aligned} & -2\{(\alpha_{12} - \alpha_{23}\alpha_{31})M + (\alpha_{31} - \alpha_{12}\alpha_{23})N\}a_1 \\ & = \{2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{31}^2 - \alpha_{12}\alpha_{23}\alpha_{31} - 1)a_1^2 \\ & \quad + l_{12}^2 + l_{31}^2 - l_{23}^2\} - 2\alpha_{23}MN \quad (14) \end{aligned}$$

ここで、

$$S = (l_{12}^2 + l_{31}^2 - l_{23}^2)/2 \quad (15)$$

$$T = \alpha_{12}\alpha_{31} - \alpha_{23} \quad (16)$$

$$A = a_1^2 \quad (17)$$

とおいて両辺を二乗し、さらに MN の掛かる項を分離すると、

$$\begin{aligned} & 2(TA + \alpha_{23}S)MN \\ & = UA^2 + VA + S^2 + \alpha_{23}^2 l_{12}^2 l_{31}^2 \quad (18) \end{aligned}$$

を得る。このとき U, V はそれぞれ以下のように整理される。

$$\begin{aligned} U &= 2\alpha_{12}^2\alpha_{31}^2 - 2\alpha_{12}\alpha_{23}\alpha_{31} \\ & \quad - \alpha_{12}^2 - \alpha_{31}^2 + \alpha_{23}^2 + 1 \quad (19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V &= l_{12}^2(\alpha_{31}^2 - \alpha_{23}^2 + \alpha_{12}\alpha_{23}\alpha_{31} - 1) \\ & \quad + l_{31}^2(\alpha_{12}^2 - \alpha_{23}^2 + \alpha_{12}\alpha_{23}\alpha_{31} - 1) \\ & \quad - l_{23}^2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{31}^2 - \alpha_{12}\alpha_{23}\alpha_{31} - 1) \quad (20) \end{aligned}$$

次に式(18)の両辺を二乗し、 A について整理すると、

$$K_4A^4 + K_3A^3 + K_2A^2 + K_1A + K_0 = 0 \quad (21)$$

(K_n は表1に示す)

となる。これは a_1 の八次方程式であると同時に A の四次方程式である。四次方程式は Brown または Ferrari の方法などにより解析的に解くことができるので、式(21)より A を解き、さらに、

$$a_1 = A^{1/2} (>0) \quad (22)$$

を計算すれば a_1 が解析的に求められたことになる。

次に a_2, a_3 は式(12)、(13)から求まるが、ここで解の個数および解の組合せが問題となる。式(21)を a_1 の八次方程式と考えると最大8個の実数解が得られるが、このうち正の解は4個であり、他は正の解と絶対値の等しい負の解であるからこれらは棄却される。ま

表1 基礎方程式多項式の係数

K_4	$(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2 - 2\alpha_{12}\alpha_{23}\alpha_{31} - 1)^2$
K_3	$4T^2\{(1 - \alpha_{31}^2)l_{12}^2 + (1 - \alpha_{12}^2)l_{31}^2\} + 2UV - 8\alpha_{23}ST(1 - \alpha_{12}^2)(1 - \alpha_{31}^2)$
K_2	$8\alpha_{23}ST\{(1 - \alpha_{31}^2)l_{12}^2 + (1 - \alpha_{12}^2)l_{31}^2\} + V^2 + 2U(S^2 + \alpha_{23}^2l_{12}^2l_{31}^2) - 4T^2l_{12}^2l_{31}^2 - 4\alpha_{23}^2S^2(1 - \alpha_{12}^2)(1 - \alpha_{31}^2)$
K_1	$4\alpha_{23}^2S^2\{(1 - \alpha_{31}^2)l_{12}^2 + (1 - \alpha_{12}^2)l_{31}^2\} + 2V(S^2 + \alpha_{23}^2l_{12}^2l_{31}^2) - 8\alpha_{23}STl_{12}^2l_{31}^2$
K_0	$(S^2 - \alpha_{23}^2l_{12}^2l_{31}^2)^2$

た a_2, a_3 の求めるべき解も正の実数であることを考慮すると、式(12)、(13)によって無効な a_1 は棄却されるが、いずれにしても最大4個の a_1 が有効解となる可能性がある。

次に式(12)を用いると、各 a_1 に対し二つの a_2 が求まるが、式(8)および(9)を辺々引いて得られる式

$$a_3 = \frac{a_2^2 - a_1^2 - l_{12}^2 + l_{31}^2}{2(a_{23}a_2 - a_{31}a_3)} \dots\dots\dots (23)$$

を用いると、各 a_1, a_2 の組に対して a_3 が一つ決まる。したがって一つの a_1 に対し2組の (a_2, a_3) が考えられる。

一方、島崎によって示されたように、例えば基礎方程式から a_3 を消去するとその解は a_1^2 および a_2^2 を変数とする二つのだ円の交点で表され、解の数は最大4個である。このとき各解は1組の (a_1, a_2) で表されるが、さらに式(23)を考慮すると1組の (a_1, a_2) に対し a_3 も1組決まる。

したがって一つの a_1 に対し、式(12)および(23)から計算される2組の (a_2, a_3) のうち、いずれか1組は無効である。計算機により解を求める場合には、得られた (a_2, a_3) を式(8)に代入し、有効解を判別することができる。以上により、基礎方程式の有効解として (a_1, a_2, a_3) の組が最大4個得られる。求めるべき解はそのうちの1組であるが、基礎方程式の範囲ではこれを判別できず、実際の運用時には他の要素を考慮する必要がある。本研究で採用した方法については4・1節で述べる。

3. 車両の三次元位置計測

ここではカメラを搭載する車両に対し2章の原理を応用し、車両の三次元位置を求める方法を示す。

まず、3標識点の三次元座標値が、路面に固定された絶対座標系で与えられているものとし、それらの像の測定から計算されるカメラ座標値を前記の絶対座標値と比較することにより、カメラの三次元位置を絶対座標系で算出する。

次に、与えられた車両とカメラの位置関係を用い、絶対座標系における車両の三次元位置を計算する。

なお、カメラおよび車両の三次元位置という言葉には、その三次元座標値のほかに方向または姿勢の概念をも含むものとする。

3・1 絶対座標系におけるカメラの三次元位置

絶対座標系(O-X, Y, Z)のとりかたは問題の本質に影響を与えないが、特に3・3節で行う計算を容易とするため、ここでは鉛直上向きをZ軸とするような右手系を絶対座標系とする。

いま、標識点 $P_i (i=1\sim 3)$ の座標値 (X_i, Y_i, Z_i) が絶対座標系で与えられているものとする。これらの像の計測からカメラ座標系における標識点の位置 (x_i, y_i, z_i) を計算し、絶対座標値と比較してカメラ座標系原点(レンズ主点)の三次元座標値 $P_c(X_c, Y_c, Z_c)$ および回転ベクトル

$$R = \begin{bmatrix} \lambda_x & \mu_x & \nu_x \\ \lambda_y & \mu_y & \nu_y \\ \lambda_z & \mu_z & \nu_z \end{bmatrix} \dots\dots\dots (24)$$

を求める。ただし R において $(\lambda_x, \mu_x, \nu_x), (\lambda_y, \mu_y, \nu_y)$ および $(\lambda_z, \mu_z, \nu_z)$ はそれぞれ絶対座標系における、カメラ座標系各軸 $(x, y$ および z 軸)の方向余弦である。

まず、与えられた $(X_i, Y_i, Z_i) (i=1\sim 3)$ より

$$l_{ii+1} = \{(X_i - X_{i+1})^2 + (Y_i - Y_{i+1})^2 + (Z_i - Z_{i+1})^2\}^{1/2} \dots\dots\dots (25)$$

を計算し、次に2章で述べた方法で各標識点の $(\lambda_i, \mu_i, \nu_i)$ および a_i を計算すると、それらのカメラ座標系における座標値は

$$(x_i, y_i, z_i) = (a_i \lambda_i, a_i \mu_i, a_i \nu_i) \dots\dots\dots (26)$$

と表すことができ、結局問題は式

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_i - X_c \\ Y_i - Y_c \\ Z_i - Z_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (27)$$

($i=1\sim 3$)

から P_c の座標値と R を求めることに帰結する。

両座標系が直角座標系であるから

$$\lambda_x^2 + \lambda_y^2 + \lambda_z^2 = 1 \dots\dots\dots (28)$$

$$\mu_x^2 + \mu_y^2 + \mu_z^2 = 1 \dots\dots\dots (29)$$

$$\nu_x^2 + \nu_y^2 + \nu_z^2 = 1 \dots\dots\dots (30)$$

また、式(27)より λ_y および λ_z を λ_x で表すと、

$$\lambda_y = \frac{F_{12}W_{13} - F_{13}W_{12} - (u_{12}W_{13} - u_{13}W_{12})\lambda_x}{v_{12}W_{13} - v_{13}W_{12}} \quad (31)$$

$$\lambda_z = \frac{F_{12}v_{13} - F_{13}v_{12} - (u_{12}v_{13} - u_{13}v_{12})\lambda_x}{w_{12}v_{13} - w_{13}v_{12}} \quad \dots\dots (32)$$

となる。ただし $F_{mn} = X_m - X_n, u_{mn} = x_m - x_n, v_{mn} = y_m - y_n, w_{mn} = z_m - z_n$ とする。

式(31)、(32)を式(28)に入れ λ_x について解き、これを式(31)、(32)に代入すれば λ_y, λ_z が計算される。同様に $\mu_x, \mu_y, \mu_z, \nu_x, \nu_y, \nu_z$ も求まる。式(28)～(30)は二次式であり、これらを解くと結局2組の R が求まるが、そのうち一方は左手系となるので x, y および z 軸の方向の関係から有効な解を判別することができる。

なお、計算精度が問題となるときには、 λ_x を計算した後にこれを式(31)、(32)に代入して λ_y, λ_z を計算すると誤差が増大するので、 λ_x を求めたのと同じ手法により λ_y, λ_z を計算すべきである。他の要素についても

同様である。

R が計算されたならば式(27)から X_c , Y_c および Z_c が求まる。

3.2 車両座標系とカメラ座標系 本研究では、図2のようにカメラを車両上に装着し、絶対座標系に固定された標識点の像を撮影する。車両上にはけん架装置以上の不動部分に固定した車両座標系 (O_v-x', y', z') を設定する。ここでは図2のように、水平路面上の静止状態における右側前輪直下を原点、進行方向を x' 軸、鉛直上向きを z' 軸とする右手系を車両座標系とした。なお、図2中の E_1, E_2 はカメラ視線である。

このとき、車両座標系におけるカメラの三次元位置が問題となるが、3.1節の議論において絶対座標系を車両座標系に置き換えることにより、

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = R' \begin{bmatrix} x'_i - x'_c \\ y'_i - y'_c \\ z'_i - z'_c \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (33)$$

($i=1\sim3$)

を満たす、車両座標系におけるカメラの三次元座標値 $P'_c(x'_c, y'_c, z'_c)$ および回転ベクトル

$$R' = \begin{bmatrix} \lambda'_x & \mu'_x & \nu'_x \\ \lambda'_y & \mu'_y & \nu'_y \\ \lambda'_z & \mu'_z & \nu'_z \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (34)$$

を計算することができる。このためには車両座標系上で既知の標識点が3点以上必要となるが、本研究ではカメラの視野、および焦点距離の制約上、車両上の点を標識点とすることはできなかった。そこで予備実験

図2 車両座標系と搭載カメラ

として車両外の水平路面上に標識点を設定し測量により車両座標系との関係を計測してから、車両座標系におけるカメラの三次元位置を算出した。この予備実験は車両にカメラを装着するたびに行う。

3.3 車両の三次元位置 予備実験により P'_c と R' が与えられているものとする。走行実験を行い、3.1節の方法を用いて各瞬間(サフィックス k で表す)のカメラ三次元位置 P_{ck} と R_k が計算されれば、車両座標系で (x', y', z') と表される点の絶対座標系における三次元座標値 (X_k, Y_k, Z_k) は

$$\begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix} = {}^tR_k R' \begin{bmatrix} x' - x'_c \\ y' - y'_c \\ z' - z'_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{ck} \\ Y_{ck} \\ Z_{ck} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (35)$$

として計算することができる。

また、絶対座標系に対する車両座標系の回転は ${}^tR' R_k$ で表される。本報では絶対座標系と車両座標系を3.1および3.2節のように定めているので、ここでは車両のピッチ角 θ_p およびロール角 θ_r をそれぞれ、 x' 軸および y' 軸が XY 平面となす角度と定義する。

${}^tR' R_k$ の第1行ベクトルは x' 軸の絶対座標系における方向余弦であり、また XY 平面の方向余弦が $(0, 0, 1)$ であることを考慮すると、

$$\theta_p = \sin^{-1}(\lambda'_x \nu_x + \lambda'_y \nu_y + \lambda'_z \nu_z) \quad \dots\dots\dots (36)$$

同様に

$$\theta_r = \sin^{-1}(\mu'_x \nu_x + \mu'_y \nu_y + \mu'_z \nu_z) \quad \dots\dots\dots (37)$$

次に、絶対座標系における車両のヨー角 θ_y を、 x' 軸の XY 平面上への投影が X 軸となす角度と定義すると、

$$\theta_y = \tan^{-1} \left[\frac{\lambda'_x \mu_x + \lambda'_y \mu_y + \lambda'_z \mu_z}{\lambda'_x \lambda_x + \lambda'_y \lambda_y + \lambda'_z \lambda_z} \right] \quad \dots\dots\dots (38)$$

となる。

4. 実験と考察

具体的な実験の手順とその結果を示し、考察する。

4.1 基礎方程式における解の判別 1組の3点の像の計測により基礎方程式の解が最大4組得られるが、このうち求めるべき解は1組である。これを判別するために標識点を4点設定し、複数の3点の組について矛盾しない解を選ばばよい。その具体的な方法はいくつか考えられるが、本研究では4点のいずれかを用いて形成される3点の組から2組を選び出し、それぞれの組の解から得られる最大4個のカメラ位置の三次元座標値のうち、互いに最も近いものを真のカメラ位置とする。さらにすべての3点の組について同様な検討を行い最も良好なカメラ位置を与える3点の組を選びその解より最終的なカメラ位置、方向を計算する。

4.2 定常円旋回実験 計測理論を確認するために実際の車両を用いていくつかの走行計測実験を行い、走行軌跡を計測した。供試車両はホイールベース 1780 mm, トレッド 1130 mm, 重量 550 kg の軽四輪トラック, 供試カメラはニコン F3 モータドライブ付き, レンズはマイクロニッコール ($f=55$ mm), フィルムはトライ X である。

一般に, 基本的な車両走行実験として速度および舵角一定の定常円旋回実験が挙げられる。計測すべき主な項目は, 各部の旋回半径, 速度および車体ロール角などである。

通常, 旋回中心は車両後車軸延長線上の一定点付近にあるので, ここでは図 3 のような標識点システムを製作し旋回中心付近に設置して, これが実験中常に車載カメラの視野に収まるようにする。図 2 ではカメラの視線を E_1 のように方向づける。

この標識点システムは, 供試車両が最小旋回を行ったときでも常に 4 点以上の標識点がカメラ視野に収まるように考慮されている。各標識点は直径 4 mm の小電球であり, 発光点の中心の三次元位置は表 2 のように計測されている。これを水平面上に設置すれば, 表 2 を各標識点の絶対座標値とすることができる。実験中はカメラモータドライブを連続動作させてこの標識点システムを記録する。

次に, 表 3 は 3.2 節で述べた方法で求めた, 車両座標系におけるカメラの三次元座標値 $P_c'(x_c', y_c', z_c')$ および回転ベクトル R' である。 R' の表示順序は式 (34) のマトリックスに対応しているものとする。

実際の車両座標系において, カメラレンズ主点の近似点としてレンズの中心の三次元位置を計測したところ, 表 3 の P_c' の値に対して ± 10 mm 以内の相違に収まった。

次に, 走行実験により得られたデータであるが, 表

図 3 標識点システムと絶対座標系

4 は最終的な計算に採用した標識点のフィルム座標値と, それから算出した絶対座標系におけるカメラ位置の三次元座標値 $P_c(X_c, Y_c, Z_c)$ および回転ベクトル R である。 R の表示順序は式 (24) のマトリックスに対応しているものとする。

この実験において, 車両が旋回円を一周するのに要した時間は 10.0 s, 液体残跡装置により計測した後車軸中心の旋回半径は, 3900 mm (誤差 ± 10 mm 程度), シャッタ速度は 1/250 s, モータドライブの動作速度はミラーアップにて, 0.22 s/回であった。

図 4, 5 に表 3 および表 4 から計算された車両の走行状態を示す。まず, 図 4 は路面に投影されたカメラ位置 (×印) と 4 輪の接地点位置 (各長方形頂点) の軌跡である。図 4 中の円は計算によって得られた後車軸中心位置の軌跡に近似させた円で, その旋回中心は (243, 541) (単位は mm) 旋回半径は 3917 mm となり, 残跡装置により得られた値に近い, 妥当な結果が得られたものと考えられる。

次に図 5 はロール角とピッチ角の時間に対する変化で, ロール角は 0.05 rad, ピッチ角は 0.0 rad の付近で一定となった。

4.3 直進走行実験 4.2 節で使用した標識点システムを用い, 直進走行実験を行った。図 2 のカメラ視線は E_2 のように方向づける。カメラのモータドライブは走行開始前 2 s 間, 加速, 減速の走行期間中約 4 s 間, さらに車両停止後約 2 s 間, 合計約 8 s 間連続動作させた。

表 2 標識点の三次元位置 mm

mark no.	X	Y	Z
1	561.500	0.000	171.500
2	0.000	0.000	319.000
3	337.193	845.761	410.500
4	-207.940	674.160	573.000
5	216.945	352.606	974.500

表 3 車両座標系におけるカメラの三次元位置

x_c' y_c' z_c' mm	R'		
-79.032	0.934321	0.316217	-0.164472
1056.040	-0.017530	-0.420114	-0.907302
1888.449	-0.356001	0.850594	-0.386978

図6～8に実験結果を示す。まず図6は路面に投影されたカメラ位置(×印)と4輪の接地点位置(各長方形頂点)の軌跡である。

走行開始前の静止時にカメラ位置の変動が比較的大きいのは、旋回実験用の小さな標識点システムをそのまま用いたため、遠くから撮影したフィルムの計測では誤差が大きくなったためである。これに対し、標識点システムに近い地点に停止した後に計測したカメラ位置はよくまとまっている。

図7は直進速度の時間に対する変化を示したもので、走行開始した後約6.0 m/sの最高速度まで加速

表4 定常円旋回実験結果

film no.	mark no.	film data		camera position			
		x	y	X _c Y _c Z _c	R		
1	3	-1.0453	-0.2239	-656.572	0.938558	-0.308375	-0.154961
	4	-7.6626	0.1957	-3197.327	-0.246355	-0.284181	-0.926579
	5	-1.9389	-5.4395	1895.316	0.241697	0.907824	-0.342691
2	1	5.2573	6.0271	-84.273	0.974366	-0.163363	-0.154671
	4	-7.4814	-0.3153	-3298.043	-0.200722	-0.320815	-0.925628
	5	-2.3459	-5.5299	1897.215	0.101592	0.932946	-0.345383
3	3	0.3557	-0.3594	538.813	0.988025	-0.000633	-0.154288
	4	-7.0061	-0.5274	-3277.299	-0.144801	-0.349074	-0.925840
	5	-2.6056	-5.3147	1902.529	-0.053271	0.937094	-0.344986
4	3	0.9173	-0.2818	1141.306	0.975710	0.155849	-0.153949
	4	-6.5842	-0.8036	-3183.856	-0.087767	-0.365783	-0.926552
	5	-3.0538	-5.1945	1900.972	-0.200714	0.917558	-0.343219
5	2	-6.5175	5.8753	1728.660	0.937733	0.312313	-0.152040
	4	-5.9437	-0.9964	-2998.385	-0.027336	-0.369996	-0.928630
	5	-3.3744	-5.0220	1894.754	-0.346278	0.874964	-0.338420
6	2	-7.2965	5.6713	2280.626	0.875094	0.459217	-0.152737
	4	-5.2531	-1.2143	-2713.508	0.031833	-0.369540	-0.928669
	5	-3.7215	-4.8999	1902.034	-0.482903	0.807811	-0.338001
7	2	-7.9183	5.2379	2787.557	0.788122	0.596516	-0.151759
	4	-4.5046	-1.5531	-2336.078	0.093241	-0.359411	-0.928509
	5	-4.0584	-4.9506	1904.185	-0.608415	0.717628	-0.338880
8	1	-2.9740	6.8880	3249.016	0.676357	0.720917	-0.151058
	3	2.8956	0.5051	-1884.306	0.149146	-0.334877	-0.930383
	5	-4.2532	-4.8298	1901.932	-0.721315	0.606742	-0.334018
9	1	-4.3759	8.7726	3613.045	0.546951	0.822969	-0.153511
	3	3.1642	0.8315	-1346.385	0.200465	-0.306786	-0.930427
	5	-4.4765	-4.7298	1907.497	-0.812808	0.478124	-0.332774
10	2	-8.4298	3.8757	3858.247	0.407878	0.899722	-0.155351
	3	3.2334	0.8297	-763.398	0.250599	-0.273930	-0.928526
	4	-1.9345	-2.1724	1902.807	-0.877972	0.339795	-0.337200
11	2	-8.1372	3.3353	4027.365	0.259033	0.952813	-0.158264
	3	3.3023	1.0085	-168.174	0.290430	-0.233111	-0.928067
	5	-4.8248	-5.1618	1900.969	-0.921168	0.194435	-0.337110
12	3	3.2003	1.2377	4091.465	0.091557	0.982759	-0.160627
	4	-0.1124	-2.5287	500.217	0.327394	-0.182045	-0.927185
	5	-4.8808	-5.3075	1902.217	-0.940441	0.032302	-0.338417
13	3	2.9304	1.5624	4054.336	-0.075729	0.984075	-0.160812
	4	0.7344	-2.5395	1157.991	0.351382	-0.124592	-0.927904
	5	-4.8652	-5.3743	1898.931	-0.933164	-0.126776	-0.336351
14	2	-6.4423	1.7618	3887.540	-0.238106	0.957312	-0.163887
	4	1.5288	-2.6345	1788.920	0.367757	-0.067310	-0.927482
	5	-4.8209	-5.5822	1886.389	-0.898921	-0.281110	-0.336032
33	1	7.5532	2.4125	-3250.877	0.329691	-0.931212	-0.155394
	2	5.5729	3.8863	-1011.174	-0.379168	0.020132	-0.925108
	5	0.2793	-0.0166	1914.418	0.864601	0.363920	-0.346448

し、急減速する様子が示されている。走行開始前の静止時に速度が正の値をとり変動しているのは、静止中にもかかわらず計測誤差により計算上の位置が変動するためである。

次に図8はピッチ角の様子であるが、加減速時の変化、停止後の振動の減衰が示されている。走行開始前の変動はやはり計測誤差によるものであるが、その平均値の0 radからの変位は路面の傾斜によるものと考えられる。

4.4 考察 以上の実験により、3章までに述べた計測法は実際の問題への応用が可能であることがわかった。車両など、移動体の位置計測法としては、各瞬間の三次元位置を計測するので、方向を含む位置の情報がすべてわかり理想的である。

また、三次元位置計測法としては、計測が1台のカメラにより行われ、さらに解を解析的に求めることができるので、処理の容易さにおいて優れている。

図4 カメラおよび4輪位置の軌跡(定常円旋回)

図5 ロール角とピッチ角(定常円旋回)

図 6 カメラおよび4輪位置の軌跡 (直進走行)

図 8 ピッチ角の変化 (直進走行)

図 7 速度の変化 (直進走行)

その反面、4・3節の実験でみられたように標識点システムの大きさが計測画面に対して小さく、各標識点間の視角が小さいとき、計測精度に問題を生ずることがある。このような実験では、常に計測画面中に4点以上記録されしかも各点間の視角が大きくなるようにさらに多くの標識点を設置すればよい。

本研究では入力装置として35 mmカメラを用いたが、テレビカメラ入力システムとコンピュータを用いれば、このような方法を位置の自動計測や車両の自律走行へ応用することも可能である。このときは4・1節で述べた有効解判別の観点からも、テレビカメラ入力システムの分解能とひずみ特性が問題となろう。

5. 結 言

寸法が既知の被写体に対する単写真による三次元位

置計測問題の、新たな解析的解法を示した。またその解は最大4組存在する可能性があるので、計算機により有効解を判別する方法も示した。

次に、これを車両の三次元位置計測法に応用するために、カメラ座標系を介して絶対座標系と車両座標系の関係を求める方法を示した。

さらに、この原理を応用して35 mmカメラを車載する車両の三次元位置計測システムを構成し、実車による走行計測実験を行った。その結果、本研究の三次元位置計測法が次のような点で有意であることが確認された。

- (1) 方向を含む三次元位置の計測が可能である。
- (2) 計測が1台のカメラにより行われ、解析的解が得られるので処理が容易である。

終わりに、本研究の遂行に当たり、三重大学農学部田尻功郎助教授に多大なご援助をいただいた。また、実験およびデータの整理に際し、中井正昭氏(当時本学大学院生)および西村元宏氏(同学部生)のご協力を得た。深謝する。

文 献

- (1) 佐藤, トラクタ走行軌跡の写真計測, 三重大学農学部学術報告, 61 (昭55), 319.
- (2) Fischler, M. A. and Bolles, R. C., *Random Sample Consensus*, (1980), 71. Defence Advanced Research Project Agency Image Understanding Workshop,あるいは *Commun. ACM*, 24-6 (1981), 381.
- (3) 島崎, 投影変換の逆変換に関する2, 3の考察, 電子通信学会技術研究報告, 79-43 (昭54), 83.
- (4) 福井, 見込み角測定による位置決めとその応用, 電子通信学会論文誌, 65-D4 (昭57), 427.