

トラクタ走行軌跡の写真計測

佐藤 邦夫

Photogrammetric Analysis of Traveling Locus of Tractor

Kunio SATO

I. 緒 言

1. 農業用トラクタの走行軌跡の計測

トラクタの運動特性を研究する場合、その走行軌跡を計測する必要があるが、現在のところ有効な手段は非常に少なく、一般的な方法はまだ確立されていない。ここで農用トラクタの走行軌跡の計測法が満たすべき条件を挙げると次のようになる。

(a) 路面状態を選ばないこと。

土壌路面での計測が可能であり、水田や湿地などにも適用できることが必要である。

(d) 路面形状に左右されないこと。

自動車の軌跡の計測では、路面が平坦であることを前提とする場合が多いが、農業機械では凹凸地や斜面などでの挙動が問題になる場合が多い。

(c) 十分な精度が得られること。

農用トラクタでは自動車の場合のように高速特性が問題となることが少ない代わりに、最小旋回時の特性など比較的狭い範囲での挙動が問題になる。従ってその分だけ絶対的な精度が高くなければならない。

2. 既存の方法とその問題点^{1) 2)}

(a) わだち記録法

車両自身の残したわだちを記録する方法で、旋回半径の計測などでは設備が全く不要で簡便であるが、一般的な軌跡に対しては必ずしも容易でない。また当然わだちの残らない場所では使用できない。

(b) 残跡装置法

自動車において、前後バンパ中心より着色液をジェットとして路面に吹き付ける方法であるが、湿润土壌路面

では不可能であり、また(a)と同様の問題点も持つ。精度は±1cm程度である。

(c) 第5輪法

第5輪の首ふり角と回転数を検出することにより走行軌跡を計算するもので、首ふりの時間遅れと積分誤差により、精度は±25cmと悪い。

(d) 磁界法

路面下に縦横に埋設されたケーブルに、3周波の音声帯域電流を供給することによって生ずる多周波磁場を検出し、位置を計算する。この方法は設備が高価な割りに精度は±10cm程度であり、また路面状態も制限され、土壌路面では用いることができない。

(e) その他

加速度計やスタンプ装置を使用する方法などが若干見られるが、精度に問題があったり土壌路面での使用が不可能なものが多い。

3. 本研究で採用した方法

以上の諸計測法の問題点と前述の条件を考え、新たに写真計測法を開発した。これはトラクタの位置を3次元で求めるもので、その主要な原理は「3辺が既知の三角形の写真フィルム上の像を計測することにより、三角形とカメラの位置関係が計算される」ことで、2つの方法「平面对応法」と「方向余弦法」をそれぞれⅡ、Ⅲで説明する。走行軌跡の計測は「方向余弦法」を利用してトラクタの位置を求め、その速度、姿勢についても計算するもので、ほぼ所期の条件が満たされたのでⅣで報告する。またこれを用いてホイール型トラクタの旋回性能を種々の条件の下で計測したので合わせて報告する。

Ⅱ. 平面对応法

図-1に示すように、カメラと3点 A_1 、 A_2 、 A_3 が決定

する平面の位置関係を h , θ , δ により表わす。記号の説明を以下に示す。

- κ : 3点が決める対象平面
 λ : フィルム平面 (または像平面)
 L : カメラレンズ主点 (本研究では主点間距離は特別な意味を持たないので, 物点側, 像側の両主点を同一点とし, 単に主点と呼ぶ)
 O : L から κ へ下した垂線の足
 P : レンズ光軸と κ の交点
 M : レンズ光軸と λ の交点
 y : O を原点とし, P の方向を正とする座標軸
 x : y 軸と直交する座標軸
 X : カメラに固有で M を原点とする λ 上の座標軸
 Y : X 軸と直交する λ 上の座標軸
 X' : x 軸と平行で M を原点とする λ 上の座標軸
 Y' : X' 軸と直交する λ 上の座標軸
 A : κ 上の任意な物点
 D : λ 上に投影された A の像
 D_r : 直線 AL と λ の交点
 F : A から y 軸へ下した垂線の足
 H_r : 直線 FL と λ の交点
 a : 点 D の X' 座標値
 b : 点 D の Y' 座標値
 a_r : 点 D_r の X' 座標値
 b_r : 点 D_r の Y' 座標値
 φ_A : $\angle ALP = \angle D_r LM$
 φ : $\angle FLP = \angle H_r LM$
 Φ_b : $\angle DLM$
 f : レンズ焦点距離
 h : 線分 OL の長さ (主点と対象平面の距離)
 θ : $\angle PLO$ (カメラが対象平面を見込む角)
 δ : X 軸と X' 軸の成す角 (光軸回りの回転角)

次の2つの仮定を置いて (x, y) , (X, Y) 両座標系の関係を求める。

- (1) 点 A , P , L を含む平面は点 M , D も含む。
(2) φ_A と Φ_b の関係 $\varphi_A = g(\Phi_b)$ は1対1対応で既知である。これはレンズのディストーションで, 技術資料または実測により与えられる。

幾何学的関係により次の諸式が成り立つ。

$$\Phi_b = \tan^{-1}(\sqrt{a^2 + b^2} / f) \quad \dots(1)$$

$$\varphi_A = g(\Phi_b) \quad \dots(2)$$

$$\overline{MD}_r = f \cdot \tan \varphi_A \quad \dots(3)$$

$$a_r = a \cdot \overline{MD}_r / \overline{MD} = a \cdot f \cdot \tan \varphi_A / \sqrt{a^2 + b^2} \quad \dots(4)$$

$$b_r = b \cdot \overline{MD}_r / \overline{MD} = b \cdot f \cdot \tan \varphi_A / \sqrt{a^2 + b^2} \quad \dots(5)$$

$$\varphi = \tan^{-1}(b_r / f) = \tan^{-1}(b \cdot \tan \varphi_A / \sqrt{a^2 + b^2}) \quad \dots(6)$$

$$\overline{FL} = h / \cos(\varphi + \theta) \quad \dots(7)$$

$$\overline{H_r L} = f / \cos \varphi \quad \dots(8)$$

$$\overline{OF} = h \cdot \tan(\varphi + \theta) \quad \dots(9)$$

$\triangle AFL \sim \triangle D_r H_r L$ より

$$\overline{FA} = a_r \cdot \overline{FL} / \overline{H_r L} \quad \dots(10)$$

$$\frac{a \cdot h \cdot \cos \varphi \cdot \tan \varphi_A}{\sqrt{a^2 + b^2} \cdot \cos(\varphi + \theta)} \quad \dots(10)$$

今点 A の (x, y) 座標値をそれぞれ (x, y) 点 D の (X, Y) 座標値をそれぞれ (X, Y) とする。 λ 上での座標回転を考えて

$$\left. \begin{aligned} a &= X \cos \delta + Y \sin \delta \\ b &= -X \sin \delta + Y \cos \delta \end{aligned} \right\} \quad \dots(11)$$

以上により (X, Y) から (x, y) を求める式は

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{a \cdot h \cdot \cos \varphi \cdot \tan \varphi_A}{\sqrt{X^2 + Y^2} \cdot \cos(\varphi + \theta)} \\ y &= h \cdot \tan(\varphi + \theta) \end{aligned} \right\} \quad \dots(12)$$

となる。ただし, a , b は(11)式で, また Φ_b , φ_A , φ はそれぞれ(1), (2), (6)式で与えられる。

今3点 A_1, A_2, A_3 の κ 上の座標値を (x_i, y_i) ($i=1, 2, 3$), λ 上に投影した像の座標値を (X_i, Y_i) とし, A_1, A_2, A_3 のすべての2点間距離

$$\overline{A_1 A_2} = \ell_1, \overline{A_2 A_3} = \ell_2, \overline{A_3 A_1} = \ell_3$$

が既知であるとする。ここで (X_i, Y_i) がフィルム上で計測されたとすると(12)式より (x_i, y_i) が求まるはずであるが, 一般には (h, θ, δ) が未知数であるため, 先にこれらを求めなければならない。計測された (X_i, Y_i) を(12)式に代入すると x_i, y_i はそれぞれ (h, θ, δ) の関数となり, 次の Z_i もこれらの変数の関数となる。

$$Z_i = (x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 - \ell_i^2 \quad \dots(13)$$

$$(i=1, 2, 3 \text{ ただし } i=3 \text{ のとき } i+1 \text{ は } 1 \text{ とする})$$

実際の (h, θ, δ) は

$$Z_i = 0 \quad (i=1, 2, 3) \quad \dots(14)$$

の3式を満たすはずであるから逆にこの3式を解いて

(h, θ, δ) を求めればよい。今回の研究ではこれを最小2乗法で解くため

$$Q = \sum_{i=1}^3 Z_i^2 \quad \dots(15)$$

$$Q = 0 \quad \dots(16)$$

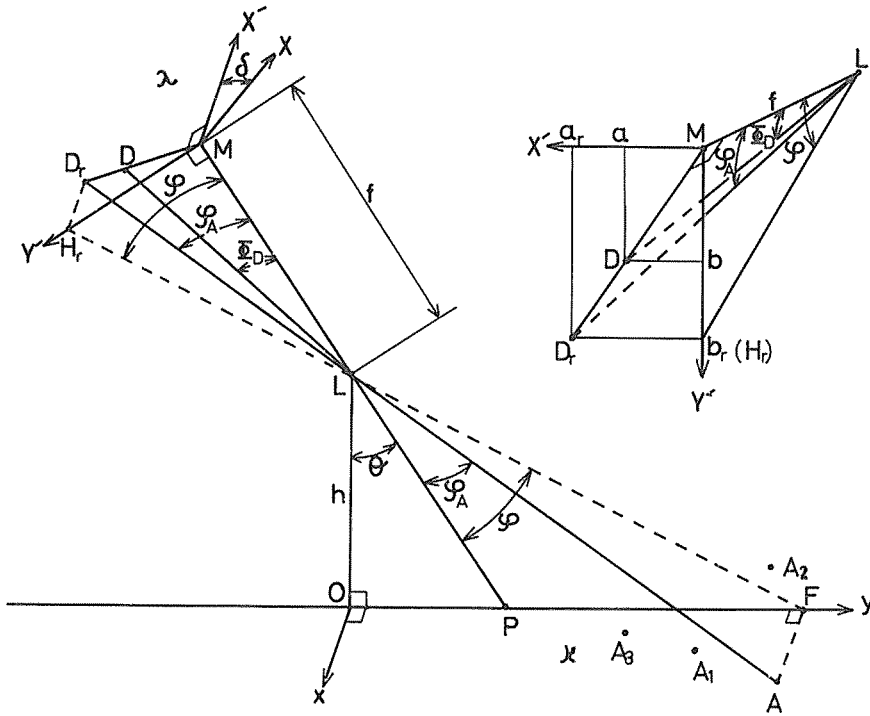


図-1 対象平面とフィルム平面の関係

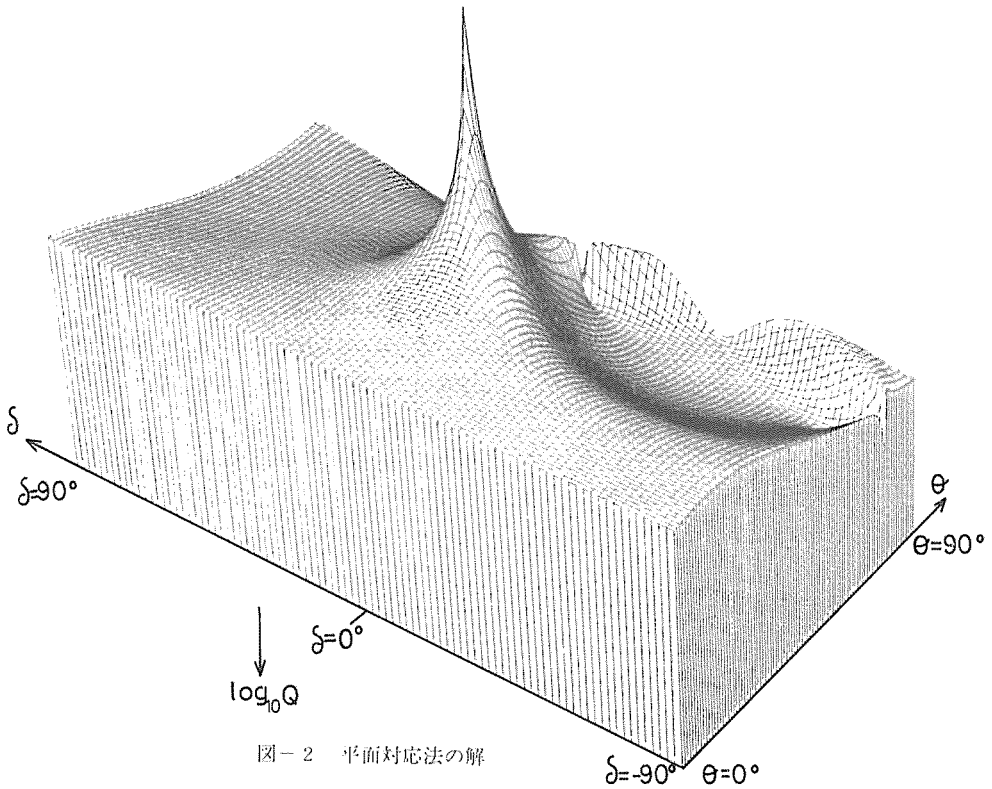


図-2 平面对応法の解

を満たす (h, θ, δ) を求めることを試みた。この方法の有効性を確かめる実験についてはⅢで述べるが

$$h > 0, \quad 0 < \theta < 90^\circ, \quad -90^\circ < \delta < 90^\circ$$

において(16)式を満たす (h, θ, δ) の組みは1組に決まり、2組以上存在する事例は起きていない。図-2に評価関数 Q と θ, δ の関係の一例を3次元的に表示する。なお h については $\partial\theta/\partial h = 0$ とするような h ($h \neq 0$) を代入し、 Q が最小値をとるようにした。これによると有効な解は数値計算により得られた値と同一で1点であることがわかる。

平面対応法の特徴は、得られる解がカメラ(詳しくはフィルム平面とレンズ主点)と対象三角形の存在する平面の関係であり、その三角形以外のフィルム上に記録されている点も、対象平面内にあることが分かっている場合には、得られた (h, θ, δ) と(12)式により直ちにその平面の座標系 (x, y) で表わし得ることである。またフィルム上の点が、対象平面と平行で主点からの距離が h' であるような平面上の点であることが分かっている場合には (h', θ, δ) を(12)式に代入してやればその点の位置を (x, y) 座標系で表わすことができる。

Ⅲ. 方向余弦法

1. 概要

研究の初期の段階では、地表面に3つの標識点を置き、Ⅱで述べた方法で地表面とカメラの関係を算出して、フィルム上に写ったトラクタの代表点の位置を地表座標系で表わそうとした。しかしカメラがカバーする地表面の範囲に対し、供試路面の凹凸またはうねりが無視しえず誤差が生ずることが分かった。そこでトラクタ上に3つの発光点を搭載し、各瞬間の位置を直接算出することにした。このときトラクタの位置の記述として3次元座標値を採用し、計算の方法も以下で述べるように方向余弦を使用するものとした。

2. 原理

図-3のようにレンズ主点 O を原点とし、光軸を z 軸、フィルム平面に平行でカメラに固有な方向(たとえばフィルム長手方向)を x 軸とする直交座標系 (x, y, z) を考え、これを絶対座標系と呼ぶことにする。またフィルム平面上にはフィルム中心 O' (z 軸とフィルム平面の交点でもある)を原点とし、 x 軸と平行逆向きに X 軸を、 y 軸と平行逆向きに Y 軸を考えることにより、フィルム

座標系 (X, Y) が決まる。図-3のように座標系 (x, y, z) を右手系にとると、座標系 (X, Y, z) も右手系となる。

今物点 A の像 A' の座標を (X, Y) 、 $\overline{O'A'} = r$ 直線 AO とフィルム平面が交わる点を A'' 、 $\overline{O'A''} = R$ とし、さらに焦点距離 f 、ディストーションを与える関数 $R = S(r)$ が既知であるとす。このとき直線 OA の方向余弦 (λ, μ, ν) は次のように表わせる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= R \cdot \cos \theta / \sqrt{f^2 + R^2} \\ \mu &= R \cdot \sin \theta / \sqrt{f^2 + R^2} \\ \nu &= f / \sqrt{f^2 + R^2} \end{aligned} \right\} \quad \dots(17)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} r &= \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad R = S(r) \\ \theta &= \tan^{-1}(Y/X) \end{aligned} \right\} \quad \dots(18)$$

また $\overline{OA} = a$ とおくと、 A の絶対座標値は

$$(a \cdot \lambda, a \cdot \mu, a \cdot \nu) \quad \dots(19)$$

と書ける。

今3つの物点 A_1, A_2, A_3 を考え、すべての2点間距離

$$\overline{A_1 A_2} = \ell_1, \quad \overline{A_2 A_3} = \ell_2, \quad \overline{A_3 A_1} = \ell_3$$

が既知、またフィルム計測と(17)式により、直線 OA_1, OA_2, OA_3 のすべての方向余弦

$$(\lambda_i, \mu_i, \nu_i) \quad (i=1, 2, 3)$$

が分かっているとき $\overline{OA_i} = a_i$ として関数 Z_i を次のように決める。

$$Z_i = a_i^2 + a_{i+1}^2 - 2a_i \cdot a_{i+1} \cdot (\lambda_i \cdot \lambda_{i+1} + \mu_i \cdot \mu_{i+1} + \nu_i \cdot \nu_{i+1}) - \ell_i^2 \quad \dots(20)$$

($i=1, 2, 3$ ただし $i=3$ のとき $i+1$ は1とする) これは余弦定理による三角形の辺の長さの2乗と実際の長さの2乗の差を、 a_1, a_2, a_3 の関数として表わしたもので(13)式と同様の意味を持つ。

$$Z_i = 0 \quad (i=1, 2, 3) \quad \dots(21)$$

を解いて a_i を得るため、評価関数

$$Q = \sum_{i=1}^3 Z_i^2 \quad \dots(22)$$

を作り、最小2乗法により

$$Q = 0 \quad \dots(23)$$

を満たす a_i ($i=1, 2, 3$) を求める。

実験によると(23)式を満たす (a_1, a_2, a_3) の組は

$$a_1 > 0, \quad a_2 > 0, \quad a_3 > 0$$

の範囲に2組存在し、そのうちの1組は(16)式の解のうち

$$h > 0, \quad 0 < \theta < 90^\circ, \quad -90^\circ < \delta < 90^\circ$$

の範囲の組と全く同値の有効な解であり、他の1組の解

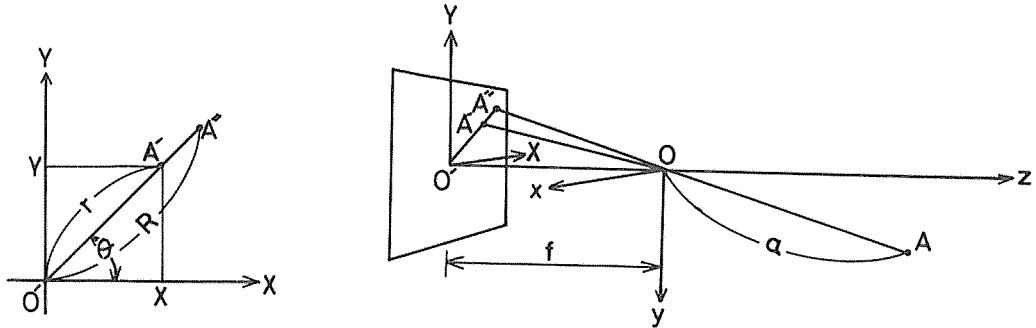


図-3 絶対座標系とフィルム座標系

はその三角形平面の方向余弦を判別して容易に棄却できることが分かった。

図-4 は実験の一例について(22)式による評価関数Qと a_1, a_3 の関係を

$0 < a_1 < 64, 0 < a_3 < 64$ (単位はm) の範囲で図示したもので、(23)式を満たす2つの解が存在している。このうち図中左側の解は有効でない。

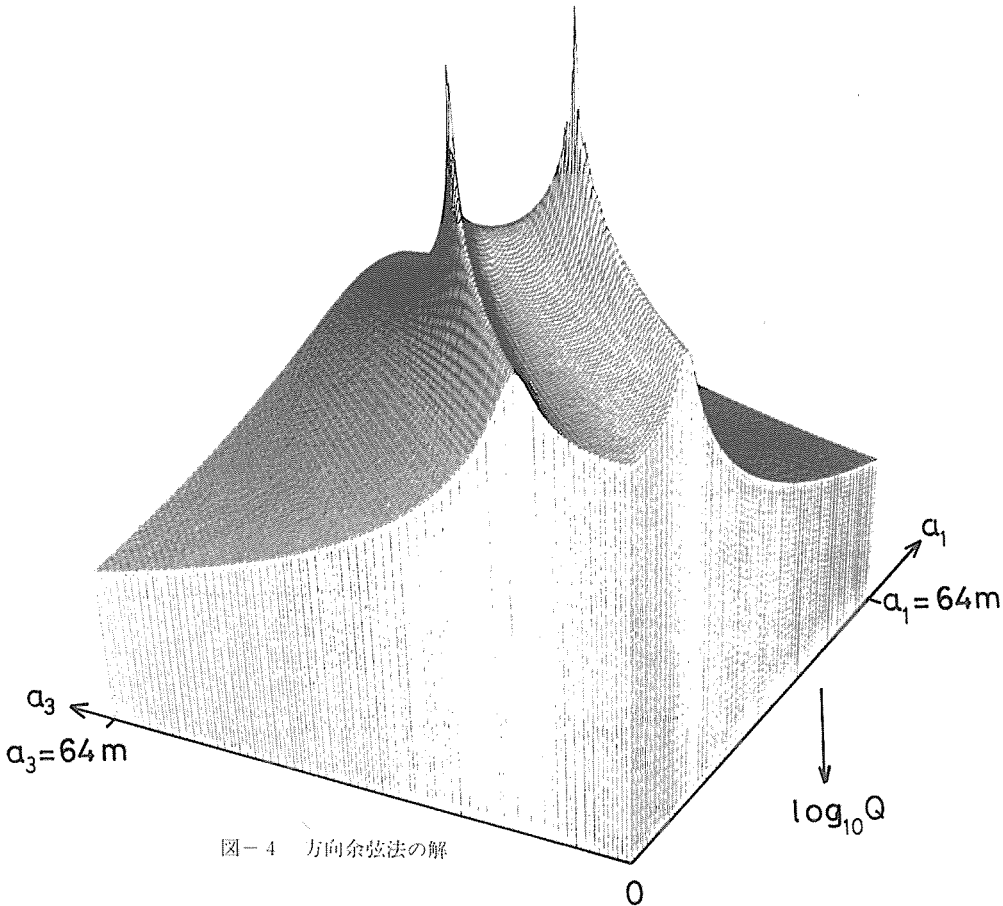


図-4 方向余弦法の解

注) a_2 については(21)式を変形し、 a_1, a_3 の値に対し

$$a_2 = \frac{a_1^2 - a_3^2 - \ell^2 + \ell'^2}{2\{a_1 \cdot (\lambda_1 \cdot \lambda_2 + \mu_1 \cdot \mu_2 + \nu_1 \cdot \nu_2) - a_3 \cdot (\lambda_2 \cdot \lambda_3 + \mu_2 \cdot \mu_3 + \nu_2 \cdot \nu_3)\}} \quad \dots(24)$$

として計算した。

3. 予備実験

前記の計算法の妥当性および精度を調べる実験について述べる。実験に使用したカメラはニコンF2、レンズはマイクロニッコール (F=3.5) で公称の焦点距離は55.0mmであったが実測により54.8mmを採用した。なお像高21.6mmにおける歪曲収差は0.15%であり、これは許容誤差範囲であるとして無視した。実験の手順は以下の通りである。

1) 適当な高所にカメラを設置し、約45°の角度で地表面を見込む。(実験結果によると地表面からの高さ、18m10cm, 見込む角48.3°, 回転角2.53°であった。このデータと(1)式を使用すると、フィルム上の1mm方眼の地表面上への対応は図-5のようになる。)

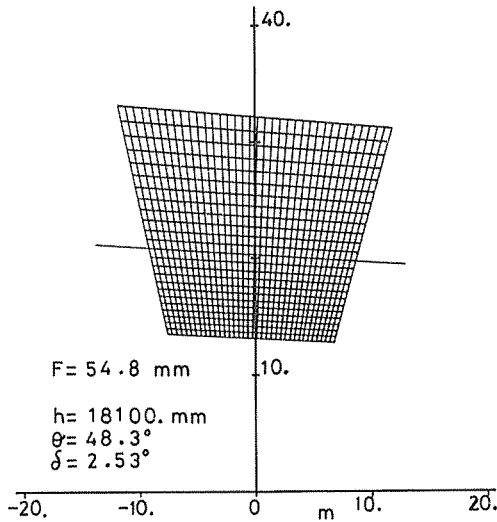


図-5 カメラのカバーする地表面

2) 視野範囲内の地表面に、ほぼ均等の間隔をもって標識点1から6を置き、そのすべての2点間距離を巻尺で計測する。(表-1)

3) レンズの被写体距離を無限遠にセットし、地表面を記録する。

4) フィルムデータの顕微鏡測定値(表-2)と実測2点間距離により、すべての可能な三角形について数値計算を行ない、各標識点の絶対座標値を計算する。(平面对応法と方向余弦法は実質的に同値なので後者を使用した)

5) 得られた各点の絶対座標値より、逆にすべての2点間距離を計算して実測値と比較し誤差を調べる。一例

として標識点(以後単に点と呼ぶ)2-5間を計算する場合、数値計算に使用する2組の三角形はそれぞれ「点2を含み、点5を含まないすべての三角形」と「点5を含み、点2を含まないすべての三角形」の全組み合わせとした。次に得られた結果を考察する。

表-3は点2-5間、表-4は点5-6間について、計算値とその実測値との誤差を、選んだ2組の三角形別に表わしたものである。同様な検討の結果、上記のような実験条件において、2点間距離の測定で最大誤差±0.4%程度の精度が得られた。なお総数20の三角形のうち、(2, 4, 6), (2, 5, 6), (3, 5, 6)は地表面上で強度の鈍角三角形を成し(表-1参照)数値計算が収束しなかった。また最大誤差±0.4%の値は、やはり鈍角三角形で収束の悪かった(1, 4, 6)の組を除外したときに得られた値である。

表-1 標識点 2点間距離

標識点	距離(mm)	標識点	距離(mm)
1-2	6,910.	2-6	7,180.
1-3	14,050.	3-4	9,545.
1-4	14,355.	3-5	15,305.
1-5	7,365.	3-6	7,675.
1-6	7,300.	4-5	10,645.
2-3	9,785.	4-6	7,770.
2-4	14,695.	5-6	7,810.
2-5	12,660.		

表-2 標識点 フィルム座標値

標識点	X (mm)	Y (mm)
1	-0.264	-8.186
2	-11.034	-4.286
3	-11.462	9.722
4	11.559	9.648
5	11.886	-5.520
6	0.090	-0.035

注) 読取り精度は2/100mmであるが、フィルム上で座標変換をしたため端数が出た。表は小数点以下第4位を四捨五入した値である。

誤差の原因としては、焦点距離 f の計測誤差、2点間距離の測定誤差(±1cm程度)、フィルム座標の顕微鏡測定誤差(±0.02mm程度)、フィルムの平面性などが挙げられる。

表-3 標識点2-5間の距離の計算

数値計算に使用した三角形		計算された距離 (mm)	12,660(mm)を真の値としたときの誤差(%)
1-2-3	1-3-5	12,659.	0.0
	1-4-5	12,656.	-0.03
	1-5-6	12,658.	-0.02
	3-4-5	12,663.	0.03
	4-5-6	12,656.	-0.03
1-2-4	1-3-5	12,660.	0.0
	1-4-5	12,657.	-0.02
	1-5-6	12,659.	0.0
	3-4-5	12,665.	0.04
	4-5-6	12,658.	-0.02
1-2-6	1-3-5	12,663.	0.03
	1-4-5	12,660.	0.0
	1-5-6	12,662.	0.02
	3-4-5	12,668.	0.06
	4-5-6	12,661.	0.0
1-3-5	2-3-4	12,658.	-0.01
	2-3-6	12,661.	0.01
1-4-5	2-3-4	12,655.	-0.04
	2-3-6	12,658.	-0.01
1-5-6	2-3-4	12,657.	-0.02
	2-3-6	12,660.	0.0
2-3-4	3-4-5	12,663.	0.02
	4-5-6	12,656.	-0.03
2-3-6	3-4-5	12,666.	0.04
	4-5-6	12,659.	-0.01

注) 「計算された距離」は小数点以下第1位を、「誤差」は小数点以下第3位を四捨五入した。

IV. トラクタ旋回性能の計測

1. 概要

前節で述べた方向余弦法を利用してトラクタの旋回性能を計測した。今回の研究ではハンドル切り角および速度を一定とした定常円旋回運動を扱った。手順は次の通りである。

- 1) トラクタ上に一定時間間隔(可変)で発光する3個のストロボ装置を搭載し、供試路面上を旋回する。
- 2) カメラは前節の予備実験と同様の測定条件(高さ、見込み角など)にセットされ、シャッター開放でトラクタの1旋回を記録する。(この間発光は4~6回が適当であった)

表-4 標識点5-6間の距離の計算

数値計算に使用した三角形		計算された距離 (mm)	7,810(mm)を真の値としたときの誤差(%)
1-2-5	1-2-6	7,813.	0.04
	1-3-6	7,842.	0.40
	1-4-6	7,860.	0.64
	2-3-6	7,819.	0.12
	3-4-6	7,826.	0.20
1-2-6	1-3-5	7,790.	-0.25
	1-4-5	7,782.	-0.35
	2-3-5	7,799.	-0.14
	2-4-5	7,797.	-0.16
	3-4-5	7,802.	-0.10
1-3-5	1-3-6	7,819.	0.12
	1-4-6	7,838.	0.35
	2-3-6	7,797.	-0.17
3-4-6	7,803.	-0.08	
	1-3-6	1-4-5	7,811.
2-3-5	2-3-5	7,828.	0.23
	2-4-5	7,826.	0.21
	3-4-5	7,831.	0.26
1-4-5	1-4-6	7,829.	0.25
	2-3-6	7,789.	-0.27
	3-4-6	7,795.	-0.19
1-4-6	2-3-5	7,846.	0.47
	2-4-5	7,845.	0.44
	3-4-5	7,849.	0.50
2-3-5	2-3-6	7,805.	-0.06
	3-4-6	7,812.	0.03
2-3-6	2-4-5	7,804.	-0.08
	3-4-5	7,808.	-0.02
2-4-5	3-4-6	7,810.	0.0
3-4-5	3-4-6	7,815.	0.06

注) 表-3の注に同じ。

3) 得られた発光点のフィルムデータは、読取り顕微鏡(または万能投影機)によりそのフィルム座標値が計測される。

4) 方向余弦法により各瞬間のトラクタの位置を算出し、旋回半径、速度などの旋回性能を計算する。(これらのデータ処理はコンピュータによって行なう)

2. データの処理

方向余弦法ではトラクタ上の発光点、またトラクタの姿勢を代表するトラクタ座標軸の取り方に特別な制限はないが、一般的な手法として今回採用した方法を説明する。

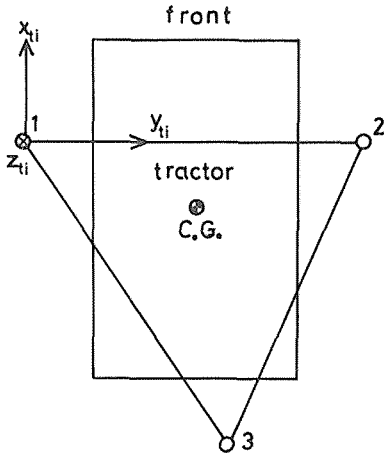


図-6 発光点の位置とトラクタ座標系

(a) トラクタ座標系

トラクタを上から見て図-6のように発光点1, 2, 3を設置し、トラクタの姿勢を代表するトラクタ座標系 (x_{ti}, y_{ti}, z_{ti}) を決める。サフィックス i は時間的順序を表わす。原点は発光点1に取ってあるが、原点が問題となるのは座標変換のときで、他の場合には軸の方向のみが問題となり、後述の旋回座標系との関係を考える場合には座標軸を任意点 Q_i まで平行移動する。今時刻 i における発光点1, 2, 3 (サフィックス j とする) の絶対座標 (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) が方向余弦法で計算されたものとする、 z_{ti} 軸の方向余弦 $(\lambda_{zti}, \mu_{zti}, \nu_{zti})$ は

$$u_{mn} = x_{im} - x_{in}, \quad v_{mn} = y_{im} - y_{in}, \quad w_{mn} = z_{im} - z_{in} \quad (m, n \text{ は } 1, 2, 3)$$

として次の連立方程式を解いて求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{zti} \cdot u_{12} + \mu_{zti} \cdot v_{12} + \nu_{zti} \cdot w_{12} &= 0 \\ \lambda_{zti} \cdot u_{23} + \mu_{zti} \cdot v_{23} + \nu_{zti} \cdot w_{23} &= 0 \\ \lambda_{zti}^2 + \mu_{zti}^2 + \nu_{zti}^2 - 1 &= 0 \end{aligned} \right\} \dots(25)$$

カメラはトラクタの上にあることを考慮すると $\nu_{zti} > 0$ また

$$\alpha = (u_{12} \cdot w_{23} - u_{23} \cdot w_{12}) / (v_{12} \cdot u_{23} - v_{23} \cdot u_{12})$$

$$\beta = (v_{12} \cdot w_{23} - v_{23} \cdot w_{12}) / (u_{12} \cdot v_{23} - u_{23} \cdot v_{12})$$

とすると

$$\left. \begin{aligned} \nu_{zti} &= \sqrt{1 / (\alpha^2 + \beta^2 + 1)} \\ \lambda_{zti} &= \beta \cdot \nu_{zti} \\ \mu_{zti} &= \alpha \cdot \nu_{zti} \end{aligned} \right\} \dots(26)$$

次に y_{ti} 軸の方向余弦 $(\lambda_{yti}, \mu_{yti}, \nu_{yti})$ は

$$\gamma = \sqrt{u_{12}^2 + v_{12}^2 + w_{12}^2}$$

として

$$\lambda_{yti} = -u_{12} / \gamma, \quad \mu_{yti} = -v_{12} / \gamma, \quad \nu_{yti} = -w_{12} / \gamma \quad \dots(27)$$

x_{ti} 軸の方向余弦 $(\lambda_{xti}, \mu_{xti}, \nu_{xti})$ は

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{xti} &= \mu_{yti} \cdot \nu_{zti} - \mu_{zti} \cdot \nu_{yti} \\ \mu_{xti} &= \nu_{yti} \cdot \lambda_{zti} - \nu_{zti} \cdot \lambda_{yti} \\ \nu_{xti} &= \lambda_{yti} \cdot \mu_{zti} - \lambda_{zti} \cdot \mu_{yti} \end{aligned} \right\} \dots(28)$$

と表わせる。以上によりトラクタ座標系の軸の方向はすべて求まる。

次にこれを使用すると、重心を含むトラクタ上任意点 P_i (図-6のトラクタ座標系で (x_{ti}, y_{ti}, z_{ti}) と表わされているとする) の絶対座標値 (x_{ri}, y_{ri}, z_{ri}) は次式で表わされる。

$$\begin{pmatrix} x_{ri} \\ y_{ri} \\ z_{ri} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_{xti} & \lambda_{yti} & \lambda_{zti} \\ \mu_{xti} & \mu_{yti} & \mu_{zti} \\ \nu_{xti} & \nu_{yti} & \nu_{zti} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{ti} \\ y_{ti} \\ z_{ti} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{i1} \\ y_{i1} \\ z_{i1} \end{pmatrix} \dots(29)$$

(b) 旋回座標系

旋回座標系 (x_{ri}, y_{ri}, z_{ri}) について述べる。今までトラクタは3次元空間に何の制限もなく存在するとして述べてきたが、定常旋回を調べる場合前提としてトラクタ上任意点 P の軌跡は一定平面上になければならない。しかし実際にフィルム計測によって得られたデータを使い、(29)式により計算された $P_i (x_{ri}, y_{ri}, z_{ri})$

($i = 1 \sim N, N \geq 4$) は完全には同一平面上にはない。これは地表面の凹凸や、システムの誤差によるものであるが、全体的な精度としては問題にならない程度である。そこで $P_i (i = 1 \sim N)$ によって統計的に得られる平面を各点の旋回平面と呼び、各 P_i から旋回平面に下した垂線の足を Q_i とし、 P_i の修正点として使用する。今回は旋回平面の垂線 z_{ri} 軸の方向をトラクタ重心 $G(x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})$ の軌跡によって求め、他の任意点の旋回平面の垂線もこれと等しいとした。また今回のように定常旋回においては、すべての時刻で z_{ri} の方向は等しいが、今後の応用のためにサフィックス i を残しておく。 z_{ri} 軸の方向余弦を $(\lambda_{zri}, \mu_{zri}, \nu_{zri})$ とすると

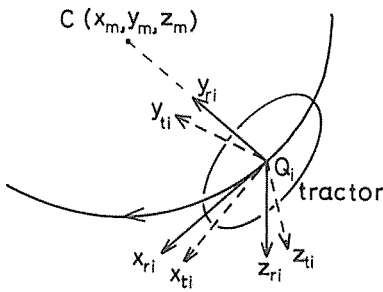


図-7 トラクタ座標系と旋回座標系

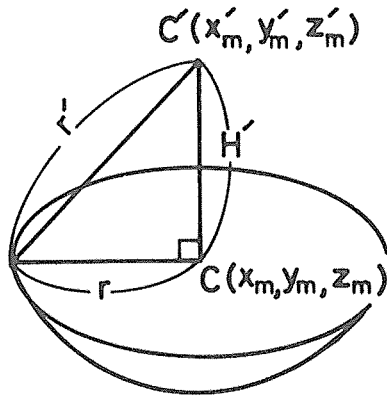


図-8 旋回中心と旋回半径の求め方

$u_{ij} = x_{oi} - x_{oj}, v_{ij} = y_{oi} - y_{oj}, w_{ij} = z_{oi} - z_{oj}$
 として次式が満たされなければならない。

$$\left. \begin{aligned} f_{ij} &= \lambda_{zri} \cdot u_{ij} + \mu_{zri} \cdot v_{ij} + \nu_{zri} \cdot w_{ij} = 0 \\ (i, j &= 1 \sim N, i < j) \\ g &= \lambda_{zri}^2 + \mu_{zri}^2 + \nu_{zri}^2 - 1 = 0 \end{aligned} \right\} \dots(30)$$

$(x_{oi}, y_{oi}, z_{oi}) (i=1 \sim N)$ が(29)式によって求められているとすると(30)式の解は最小2乗法により求めることができる。そこで次のような評価式

$$F_1 = \sum_i \sum_j f_{ij}^2 + \eta g^2 \dots(31)$$

を作り、これを0とするような $(\lambda_{zri}, \mu_{zri}, \nu_{zri})$ を求め解とする。ただし η は適当な「重み」である。絶対座標原点(レンズ主点)からトラクタ上任意点 P_i の旋回平面までの距離を H_i とすると、それぞれの時刻に対し、

$$H_i = \lambda_{zri} \cdot x_{pi} + \mu_{zri} \cdot y_{pi} + \nu_{zri} \cdot z_{pi} \dots(32)$$

が決まるが、旋回平面を1つに決めるため H_i の算術平均を H として

$$H = \lambda_{zri} \cdot x + \mu_{zri} \cdot y + \nu_{zri} \cdot z \dots(33)$$

を旋回平面の方程式とする。今、点 P_i と旋回平面との垂直距離 e_i は

$$e_i = H_i - H \dots(34)$$

で表わされるから P_i から旋回平面に下した垂線の足 $Q_i(x_{qi}, y_{qi}, z_{qi})$ は次のように表わせる。

$$\left. \begin{aligned} x_{qi} &= x_{ri} - \lambda_{zri} \cdot e_i, y_{qi} = y_{ri} - \mu_{zri} \cdot e_i, z_{qi} = z_{ri} - \nu_{zri} \cdot e_i \end{aligned} \right\} \dots(35)$$

点 Q が図-7のように旋回平面上を点 C を中心に定常右旋回しているものとして、 $\overrightarrow{Q_i C}$ の方向を y_{ri} 軸方向、進行接線方向を x_{ri} 軸方向とすると、軸 x_{ri}, y_{ri}, z_{ri} は右手系を成し、原点を Q_i として旋回座標系と呼ぶことにする。左旋回の場合は $\overrightarrow{C Q_i}$ の方向を y_{ri} 軸の方向とする。

$\overrightarrow{Q_i C}$ の方向を決めるために最少2乗法を利用して旋回中心 $C(x_m, y_m, z_m)$ を求める。評価関数として F_2 を次のように決める。

$$\begin{aligned} F_2(x'_m, y'_m, z'_m, r') \\ = \sum_i \{(x_{qi} - x'_m)^2 + (y_{qi} - y'_m)^2 + (z_{qi} - z'_m)^2 - r'^2\}^2 \dots(36) \end{aligned}$$

これにより求められる $C'(x'_m, y'_m, z'_m)$ と r' には図-8のような意味があり、求めるべき旋回中心 (x_m, y_m, z_m) と旋回半径 r は次のように計算される。

$$\left. \begin{aligned} x_m &= x'_m - \lambda_{zri} \cdot H', y_m = y'_m - \mu_{zri} \cdot H', \\ z_m &= z'_m - \nu_{zri} \cdot H' \end{aligned} \right\} \dots(37)$$

$$r = \sum_i \overline{C Q_i} / N \dots(38)$$

ただし

$$H' = \lambda_{zri} \cdot x'_m + \mu_{zri} \cdot y'_m + \nu_{zri} \cdot z'_m - H \dots(39)$$

この部分については種々の計算法が考えられ、改善の余地もあると思われる。

以上の議論の下に、 y_{ri} 軸の方向余弦 $(\lambda_{yri}, \mu_{yri}, \nu_{yri})$ と x_{ri} 軸の方向余弦 $(\lambda_{xri}, \mu_{xri}, \nu_{xri})$ は(27)式、(28)式と同様の手順によって求めることができる。これにより旋回座標系の軸の方向はすべて決まるが、(26)、(27)、(28)式によりトラクタ座標系の軸の方向もすべて決まっており、両座標系の関係を調べるによりトラクタの旋回の姿勢を計算することができる。一例として、任意点 P の横すべり角 (yaw) は、ロール (roll) とピッチ (pitch) が小さいものとして次のような計算により求められる。

$$y_a = \pi/2 - \cos^{-1} (\lambda_{xri} \cdot \lambda_{yri} + \mu_{xri} \cdot \mu_{yri} + \nu_{xri} \cdot \nu_{yri}) \dots(40)$$

次に発光時間間隔 t_i と、その間の y_{ri} 軸の方向が変化す

る量の平均値により旋回角速度 ω を計算し、前に求めた旋回半径 r を使い $v=r\omega$ により旋回速度を計算する。

3. 実験方法

供試トラクタは前後輪同径の汎用トラクタ・ウニモク411型で、セレクトレバーにより後輪駆動(2WDと略す)と4輪駆動(4WDと略す)を選択することができる。実測による主要諸元は軸距(wheel base) 2120mm, 輪距(tread)(前) 1380mm, (後) 1360mm, 重量(1各乗車時) 2230kgである。今回の実験では、ハンドル切り角を右に最大として固定し、前後輪周速差比

$$L = \frac{v_1 - v_2}{v_2} \times 100 = \frac{R_1 - R_2}{R_2} \times 100 \quad \dots(4)$$

ただし v_1, v_2 : 前, 後輪周速度

R_1, R_2 : 前, 後輪有効半径

をタイヤ空気圧により-1.6, 0, 1.6 (%) の3通り, 車速は直進時に換算して0.6, 1.1, 2.0 (m/s) の3通り, 路面をアスファルト, 土壌の2通り, 駆動方式を2WD, 4WDの2通りとしてすべての組み合わせの実験を行なった。ただし, アスファルト路面, 4WD, 車速2.0m/sの実験は, 安全を考えて行なわなかった。また前輪かじ取り角は左29°, 右36°であることを実測により得た。なお図-6のようにトラクタ上に配置した発光点の2点間距離は, 1-2間1980mm, 2-3間2512mm, 3-1間2286mmで, 3点が作る平面が地表面と平行になるように設置した。

当初, 昼間の実験を考えていたが, 露光時間が比較的長くなり, ストロボ発光点の背景に対するコントラストが不足して識別が非常に難しくなった。種々のフィルム, フィルタを使用して実験したが満足のかゆく結果は得られず, 結局実験は夜間行なうことにした。使用したカメラとレンズは前述の予備実験と同一のもので, 絞り 3.5, フィルタ無し, シャッター開放で露光時間は10~40秒とした。

4. 実験結果

表-5は湿潤土壌路面, 表-6は乾燥アスファルト路面における実験結果で重心と外側(左側)前輪中央の位置について, それぞれ r は旋回半径(m), v は速度(m/s), θ_a は横すべり角(度)を表わす。また図-9, 図-10は重心点の旋回半径を, 前後輪周速差比 L を横軸として速度別に表わした図である。これらによるといずれの場合

も速度が大きくなるに従い旋回半径も増加する, アンダーステアの傾向を示す。さらにほとんどの場合, 速度の増加とともに横すべり角の絶対値が減少しており, これは旋回中心の位置が, アッカーマン・ジャントーの幾何学的中心に一定しておらず, 速度増加に伴い前方へ移動することを示している。また2WDにおいて両路面の旋回半径の間に大きな相違は見られないが, 4WDは2WDに比べ, 土壌路面で約6.5%, アスファルト路面で約10%程度増大している。供試トラクタのようなパートタイム4輪駆動車は, その構造上2輪駆動時に比べ, 4輪駆動時に旋回半径が増大することは周知の通りだが, 路面がスリップしやすいほどその差が縮まる傾向が推測される。次に図-9, 図-10によると, L の増加に伴い旋回半径が減少する傾向が認められるが, この場合 $L=0$ から $L=1.6$ への変化(線分の傾き)は $L=-1.6$ から $L=L=0$ への変化よりも急である。これは特に土壌路面の4WDで顕著である。原因としては, 前述のように L を変化させるためにタイヤ空気圧を操作しており, 前輪タイヤ空気圧が $L=-1.6\%$ と 0% では 1 kg/cm^2 , $L=1.6\%$ のときは 2 kg/cm^2 であることが関与していると考えられる。すなわちタイヤ空気圧の変化がけん引特性やコーナリング特性を変化させ, 特に前輪の特性の変化が旋回性能に大きく影響するものと思われる。これについては今後定量的解析を行なう予定である。

また, アスファルト路面での実験において, 路面に印を付ける方法で本研究の写真による計測法を検証したが, 全体として巻尺による計測と同じ程度の精度が得られることが分かった。

V. 考 察

1. 平面对応法と方向余弦法

平面对応法と方向余弦法は, その方程式の性質や得られた結果などを考えて同値の方法であると考えられるが, その導出の過程が異なり個々の特徴を有している。

まず平面对応法は, 標識点を利用しその平面を決定して標識点以外の対象の位置をその平面, またはその平面と平行な平面の座標値で規定し, 位置を計測しようとするものである。従って対象物が一定平面内に存在, または存在すると近似できる場合に有効で, フィルムに写った像がその平面上のものならば, すべての点はその平面内での座標値を計算することができる。これは航空写真測量などに応用できると考えられる。また標識点を多数置くことにより立体の各平面の座標系を計算し, その表

表-5 湿潤土壌路面における旋回性能

L (%)	駆動	直進時の速度 (m/s)	重 心			外 側 前 輪 中 央		
			r (m)	v (m/s)	y _a (度)	r (m)	v (m/s)	y _a (度)
-1.6	2 WD	0.6	3.745	0.669	- 19.13	4.707	0.841	- 26.34
		1.1	3.771	1.187	- 18.57	4.725	1.488	- 25.86
		2.0	3.823	2.192	- 17.63	4.753	2.723	- 25.08
	4 WD	0.6	3.990	0.587	- 17.00	4.933	0.725	- 24.25
		1.1	3.988	1.079	- 17.24	4.930	1.333	- 24.46
		2.0	4.013	1.902	- 16.10	4.937	2.339	- 23.58
0.	2 WD	0.6	3.695	0.652	- 18.98	4.655	0.822	- 26.33
		1.1	3.732	1.129	- 18.42	4.685	1.417	- 25.85
		2.0	3.812	2.140	- 17.66	4.744	2.662	- 25.20
	4 WD	0.6	3.963	0.566	- 17.46	4.917	0.703	- 24.71
		1.1	4.003	1.096	- 17.07	4.950	1.356	- 24.33
		2.0	4.017	1.960	- 16.50	4.949	2.420	- 23.92
1.6	2 WD	0.6	3.662	0.659	- 18.97	4.629	0.832	- 26.43
		1.1	3.679	1.159	- 18.76	4.633	1.460	- 26.28
		2.0	3.725	2.197	- 17.77	4.660	2.750	- 25.48
	4 WD	0.6	3.868	0.604	- 17.63	4.824	0.752	- 25.01
		1.1	3.873	0.824	- 17.12	4.822	1.025	- 24.61
		2.0	3.909	2.009	- 16.20	4.840	2.487	- 23.89

表-6 乾燥アスファルト路面における旋回性能

L (%)	駆動	直進時の速度 (m/s)	重 心			外 側 前 輪 中 央		
			r (m)	v (m/s)	y _a (度)	r (m)	v (m/s)	y _a (度)
-1.6	2 WD	0.6	3.766	0.674	- 18.57	4.715	0.846	- 25.90
		1.1	3.815	1.208	- 18.23	4.757	1.508	- 25.57
		2.0	3.893	2.067	- 17.25	4.813	2.560	- 24.79
	4 WD	0.6	4.163	0.590	- 16.08	5.101	0.723	- 23.34
		1.1	4.153	1.079	- 15.93	5.090	1.321	- 23.21
0.	2 WD	0.6	3.727	0.638	- 18.40	4.679	0.801	- 25.82
		1.1	3.753	1.168	- 18.00	4.696	1.460	- 25.55
		2.0	3.824	2.114	- 17.41	4.750	2.625	- 25.00
	4 WD	0.6	4.110	0.604	- 15.97	5.043	0.743	- 23.37
		1.1	4.126	1.086	- 16.07	5.064	1.335	- 23.31
1.6	2 WD	0.6	3.664	0.648	- 18.84	4.626	0.817	- 26.35
		1.1	3.709	1.157	- 18.30	4.663	1.454	- 25.85
		2.0	3.704	2.029	- 18.04	4.638	2.540	- 25.75
	4 WD	0.6	3.974	0.595	- 16.84	4.924	0.738	- 24.22
		1.1	3.971	1.065	- 16.44	4.909	1.321	- 24.06

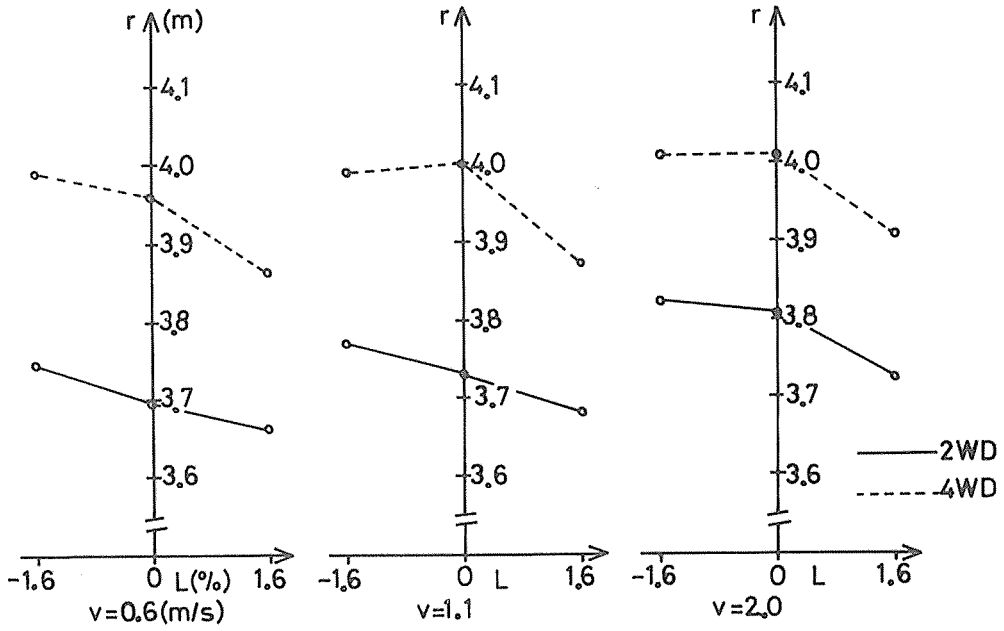


図-9 Lによる旋回半径の変化(土壌路面)

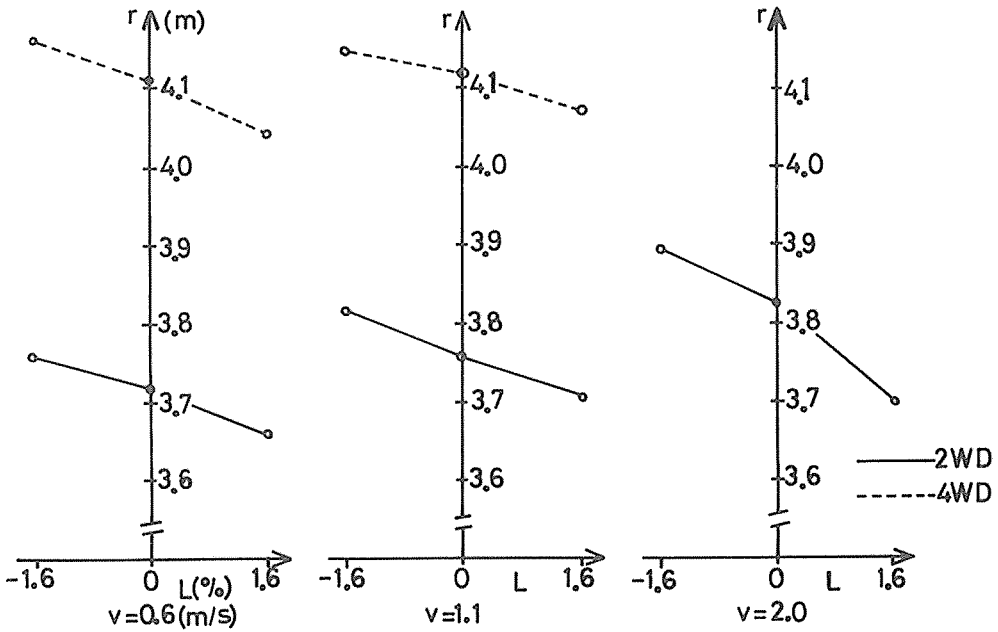


図-10 Lによる旋回半径の変化(アスファルト路面)

面上の対象の位置を記述することも可能である。

一方、方向余弦法は本研究の実験のように運動する対象に対して有効で、その3次元での位置・姿勢を計測することができる。これはトラクタに限らず自動車、航空機、船舶等応用範囲は広い。ただしこのとき問題になるのは、対象に積載された「三角形」が、カメラの分解能や精度に対して小さい場合、それに応じて精度が落ちることである。しかしこの問題は、逆にカメラを対象に搭載し、地表等に設置した標識点を写すことで自己の位置を計測する方法により解決できる。

これとは別に、立体表面に数個の標識点を置き、適当な三角形を選んで計算することにより、物体形状を3次元で記録することも可能である。

しかし方向余弦法では、直接得られる3点までの正の距離 a_1, a_2, a_3 に対する解は2組あった。本研究では点の存在する平面の垂線の方向が光軸と鋭角を成すことで判別し有効な解を得ているが、計測対象によっては判別が困難な場合も起こる可能性があり、またもし判別可能でも有効な解を迅速に求めたいとき、数値計算が一度で済まない場合に問題を生ずる。これを解決するために、4つの標識点を使って計算することが考えられる。1つの明解な例として、カメラ主点Oに対し4点A, B, C, Dを適当に配置し、 $\triangle ABC$ と $\triangle ADC$ に方向余弦法を適用すれば各々2組の解が得られる。そこで各三角形に対する解のうち、 \overline{OA} と \overline{OC} がそれぞれ等しい組を選べばそれが真の解である。これを一連の方程式で解くためには、6つの2点間距離のうち全部の値、あるいは一部を除いた値を使用して(20)式と同様の方程式を立てればよいと考えられる。ただし求める解の数(この場合は4個)に対し、方程式の数が過剰である場合、数値計算の収束性が悪くなることも予想される。解の個数と4点を使用するシステムについては後の機会に詳しく検討する。

なお(17)式に相当する何らかの方法で各点の方向余弦が計算される場合、方向余弦法は必ずしも光学的カメラのみに適用されるものでないことは明らかである。

2. トラクタ走行軌跡の計測

本研究で得られた走行軌跡の計測法は、昼間に実験を行なうことを除いてほぼ所期の目的を達成した。主な特徴は次の通りである。

- (a) 如何なる路面状態においても計測可能である。
- (b) トラクタの位置が3次元で求まる。

(c) 速度、姿勢が同時に求まる。

(d) 屋外作業が少ない。

(e) 精度が高い。

反面、今回の方法ではフィルム計測が人手によるため手間がかかる。また1枚のフィルム上に記録できるデータの量に限りがあり、露光時間等に制約も受ける。これらの問題を解決する最善の方法は、テレビカメラ入力とそのコンピュータによる処理であろう。この場合テレビカメラは計測対象外にあっても、前述のように対象上に搭載されていてもよい。ただしテレビカメラ入力の場合、分解能やその他の技術的問題点も多く残されている。

VI. 摘 要

農用トラクタの走行軌跡を計測するために、新しく写真による方法を開発した。これはすべての2点間距離の分かっている三角形のフィルム上の像を計測することにより、その三角形とカメラの位置関係が計算されることを応用するものである。今回は2つの計算方法「平面对応法」と「方向余弦法」を、その有効性の面から検討した。その結果両方法ともに応用性が広いことが分かった。特に「平面对応法」は測量の分野に、「方向余弦法」は走行車両や飛翔体の位置を3次元で計測することに適していると考えられる。本研究では「方向余弦法」を応用して、トラクタの最小旋回半径を求める実験を行なった。その結果、この方法がほぼ所期の目的を満たし、十分高い精度が得られることが分かった。また実験によって得られた結果を考察して、特に前輪のタイヤ特性が旋回性能に大きな影響を与えること、条件により旋回中心が前後に移動することが確かめられた。

なお、本研究で使用した最小2乗法の数値計算には、東京大学農学部 山本 豊先生⁶⁾のDDM (Dynamic Damping Method) プログラムを使わせていただいた。深謝致します。

参 考 文 献

- 1) 杉 時夫, 曲線にそって走行する自動車の運動解析, 自動車技術誌Vol.23(10), 995-1000, 1969.
- 2) 山崎庸光他, 自動車の軌跡の計測, 自動車技術誌 Vol.29(9), 877-883, 1975.
- 3) 渡邊恵一郎, 写真計測, 共立出版, 1976.
- 4) 藤波重次, 写真計測法, 共立出版, 1977.

- 5) 矢野健太郎, 立体解析幾何学, 裳華房, 1970. 7) G.Krick, Behaviour of Tyres Driven in Soft
6) 山本 愷, 粒子モデルによる土の応力解析法(第2 Ground with Side Slip, Journal of Terrame-
報), 農機誌 Vol.37(3), 309-314, 1975. chanics Vol. 9(4), 9-30, 1973.

Summary

A new photogrammetric method was developed to measure the traveling locus of agricultural tractor. The main principle of this method is that the relative displacement between a marking triangle, whose length of sides are all known, and the camera can be calculated by measuring the image position of the triangle. In this paper, two calculation methods were examined concerning their effectiveness, and the availability of this photogrammetric method was determined.

By employing the above-mentioned method, several turning tests were carried out. As the results of these tests, the following facts were ascertained.

1. The characteristic of the front wheel exerts influence especially upon the turning efficiency of tractor.
2. According to the condition, the turning center moves forward and backward.