

傾斜牧草地における自律走行トラクタ Autonomous tractor on the forage land

○ 沈海*, 武田 純一*, 鳥巢 諒*
○ Hai Shen*, Junichi Takeda*, Ryo Torisu*

*農学研究科, 岩手大学大学院

Graduate school of Agriculture, Iwate University

キーワード: 自律走行トラクタ (autonomous tractor-like robot), ニューラルネットワーク (neural network), 遺伝的アルゴリズム (genetic algorithm), 教師信号 (desired output), BP 学習 (back propagation)

連絡先: 〒020-8550 盛岡市上田 18-8, 岩手大学農学部農業生産環境工学科生物機械研究室
鳥巢 諒, Tel: 019(621) 6184, Fax: 019(621)6184, E-mail: ryotorisu@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

日本農業では、労働人口の減少と高齢化の問題が益々深刻になっている。この一つの解決策として農作業の自動化・無人化の基礎となる農業移動ロボット研究が行われている。他方、日本の国土の大半が山地で占められており、耕地面積を確保するために緩やかな斜面上にも畑地や牧草地が存在する。このような場所において、人がトラクタを等高線方向に直進走行させる場合には、地球の重力により下方に引っ張られ、そのために車輪が横滑りを起こし、重力という外乱が車輪に生じるために複雑な非線形モデルとなることが予想され、一般的な運動学モデルである車両方程式で記述することが困難である。そこで本研究では、非線形モデルに適したニューラルネットワーク (NN) を用いることにより、この運動を

記述した。また、最適制御法として遺伝的アルゴリズム (GA) をトラクタの操舵角の決定に採用して最適化を行い、その制御則を明らかにした。

2. 車両エミュレータ

2.1 車両エミュレータの選択

本研究における車両シミュレータとは、「斜面上におけるトラクタの運動を記述する運動モデル」とする。斜面上において、ある地点におけるトラクタの状態から、ある時間が経過した次の状態に移る時の法則を構築する。本来、ニューラルネットワーク¹⁾ (NN) は、複雑な非線形モデルの構築に適しており、斜面上でのタイヤの横滑り現象を再現するのに適している。

2.2 モデルの構造

本研究に用いる NN の構造¹⁾ は Fig.2.2.1 に示すように、4 層 6 入力 3 出力の階層型

ニューラルネットワークである。ニューロンの入出力関数には、連続で非線形であるシグモイド関数（式 2-2-1）を用いている。

$$f(i_j^k) = \frac{1}{1 + \exp(-\varepsilon \cdot i_j^k)} \quad (2-2-1)$$

入力積算値 i_j^k はと出力値 o_j^{k-1} は式 2-3-3 と 2-2-3 に示す（Fig.2.4.1 を参照）。

$$i_j^k = \sum_{i=1}^n o_i^{k-1} \cdot w_{i,j}^{k-1} \quad (2-2-2)$$

$$o_j^k = f_j^k(i_j^k) \quad (2-2-3)$$

ニューラルネットの入力信号には、トラクタの操作量 u_k と状態量 Z_k を採用し、出力信号には、 Δt 秒後の次の状態量 Z_{k+1} を採用している。

入力信号：操作量 $u_k = (\alpha_k, \Delta\alpha_k)^T$

状態量 $Z_k = (Vx_k, Vy_k, \omega_k, \theta_k)^T$

出力信号：

状態量 $\hat{Z}_{k+1} = (Vx_{k+1}, Vy_{k+1}, \omega_{k+1})^T$

ここで、

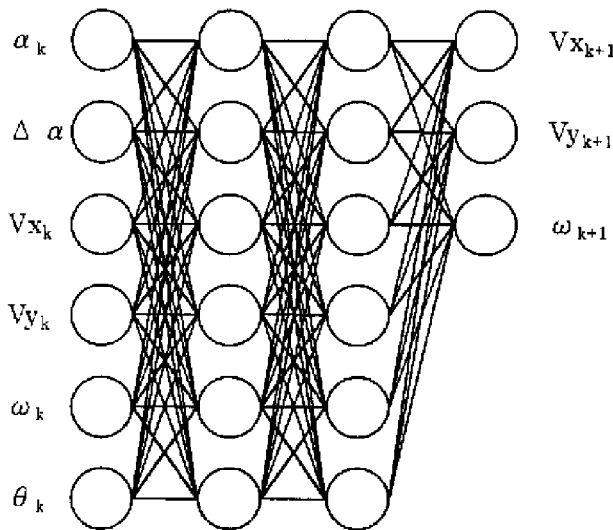


Fig.2.2.1 ニューラルネットワークモデル

α : トラクタの舵角 [°]

$\Delta\alpha$: トラクタの操舵角速度 [° /s]

Vx : トラクタの座標系の X 速度成分 [m/s]

Vy : トラクタの座標系の Y 速度成分 [m/s]

ω : 斜面の座標系の姿勢角速度 [° /s]

θ : トラクタの姿勢角 [°]

とする。それぞれの変数は、Fig.2.2.2 に示す通り定義する。

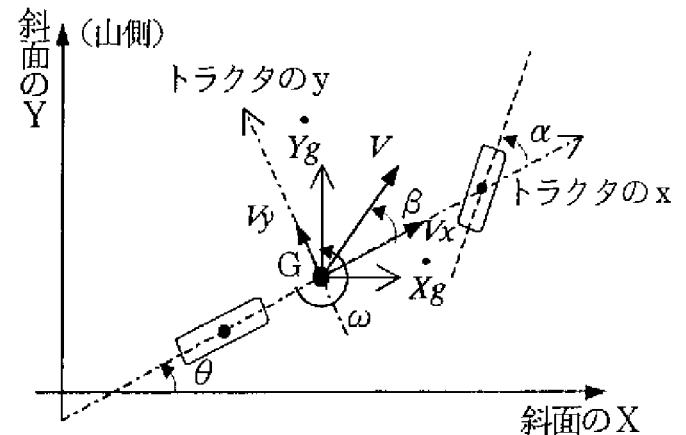


Fig.2.2.2 座標系の設定

2.3 教師信号の取得

NN の性格を決定する結合係数を決定するためには、教師信号が必要となる。本研究での教師信号は、実際にトラクタが斜面上をサインカーブ走行した時の状態を記録したものである。NN の構造を決定するには、この教師信号を用いて結合係数を求める。

実際にトラクタが走行する場合に測定した状態量は、操舵角 α 、姿勢角 θ 、重心座標 $G(Xg, Yg)$ である。これら 3 つの状態量から教師信号に必要なデータを得るために、以下の式を用いて計算する。操舵角速度 $\Delta\alpha$ は

$$\Delta\alpha_k = \frac{\alpha_{k+1} - \alpha_k}{\Delta t}$$

である。車両座標系の速度成分 Vx , Vy を求めるには横滑り角 β を求める必要がある。まず、トラクタの重心座標 $G(Xg, Yg)$ から重心点における速度成分を求める。

$$\begin{cases} \dot{X}_{g_k} = \frac{X_{g_{k+1}} - X_{g_k}}{\Delta t} \\ \dot{Y}_{g_k} = \frac{Y_{g_{k+1}} - Y_{g_k}}{\Delta t} \end{cases}$$

次に、求めた値を用いて横滑り角 β を求める。

$$\beta_k = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{Y}_{g_k}}{\dot{X}_{g_k}} \right) - \theta_k$$

次に、実際の走行速度 V を求める。 V は重心点座標の推移から求める。

$$V_k = \frac{\dot{X}_{g_k}}{\cos(\theta + \beta)}$$

これらの値から車両座標系の V_x , V_y , を求める。

$$\begin{cases} V_{x_k} = V_k \cos \beta_k \\ V_{y_k} = V_k \sin \beta_k \end{cases}$$

姿勢角速度 ω は、姿勢角 θ から求める。

$$\omega_k = \frac{\theta_{k+1} - \theta_k}{\Delta t}$$

以上より、6個の入力信号と3個の出力信号の組み合わせを作成した。しかし、ニューラルネットワークの構造上、取り扱われる信号は0から1までの値でなければならない。そこで、実際に得られた走行データの最大値と最小値から考慮して、以下のように正規化した。

$$\alpha = \frac{\alpha + 50}{100} \quad \Delta\alpha = \frac{\Delta\alpha + 20}{40}$$

$$V_y = \frac{V_y + 0.3}{0.6} \quad V_x = V_x$$

$$\omega = \frac{\omega + 15}{30} \quad \theta = \frac{\theta + 60}{120}$$

この正規化により、構造上取り扱われる信号は以下のように制限される。

$$\begin{aligned} -50 < \alpha < 50 & \quad [^\circ] \\ -20 < \Delta\alpha < 20 & \quad [^\circ/\text{s}] \\ 0 < V_x < 1 & \quad [\text{m/s}] \\ -0.3 < V_y < 0.3 & \quad [\text{m/s}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -15 < \omega < 15 & \quad [^\circ/\text{s}] \\ -60 < \theta < 60 & \quad [^\circ] \end{aligned}$$

1) 教師信号取得実験

供試トラクタには、三菱農機製 MT2501D を使用した。諸元を表 2-3-1 に示す。

表 2-3-1 供試トラクタの諸元

全長	2720mm
全幅	1310mm
全高	1970mm
軸距	1595mm
重量	1125kg
排気量	1415cc
出力	25PS
駆動方式	4WD

供試コンピュータ(表 2-3-2)は PC-AT 互換機である。後述の操舵角, 姿勢角, 回転数の計測及び操舵制御のためのマイクロサイエンス製の AD 変換ボード (MFU-513AT) を搭載している。

表 2-3-2 供試コンピュータ

CPU	AMD 製 K6 166MHz
Mother Board	AOPEN 製 AX5T
Memory	64MB
Hard Disk Drive	2GB
CD-ROM Drive	32 x Speed
Video Card	Trident VRAM 1MB
Display	Century Model4000PCI
OS	Windows95

リアルタイムでの計測を行うために、自動追尾式のトータルステーション (表 2-3-3 TCA1800 Leica 製) を用いて位置計測を行うシステムを構築した。

表 2-3-3 トータルステーションの諸元

モデル	TCA1800
測角精度	3"/1"
測距精度	2mm+2ppm
測距範囲	2.5km
特徴	自動視準 自動追尾

操舵角の計測には、変位計（DTP-05MDS 共和製）を用い、前輪車軸中心付近に取り付け、タイロッドにワイヤーを結びつけた。変位計からの出力電圧をストレインアンプ（DPM-305A 共和電業製）で増幅し、AD変換ボードからコンピュータに入力した。姿勢角は、トラクタ重心点付近に取り付けた光ファイバージャイロ(FOG TA7345 多摩川精機製)を用いて計測した。

2) 実験方法と結果

教師信号取得実験は、東北農業試験場の斜度約 14 度の傾斜地で行った。まず、斜面上に Fig.2.3.2 のように基準線 x を引き、基準座標とした。走行軌跡は、周期 16m で片振幅 0.5, 1.0, 2.0m (Fig.2.5.1) のサインカーブが 3 本と、舵角を 0 度に固定して走行したもの 1 本とした。また、人間が制御する等高線走行を行ったもの 2 本(Fig.2.5.2)も合わせて計測した。

サンプリングタイムは 0.5 秒とし、この間隔毎に、重心の座標 Xg と Yg、操舵角 α 、姿勢角 θ 、エンジン回転数 rpm をコンピュータで計測した。トラクタの走行条件設定は、主変速 2 速、副変速 M、4WD モード、エンジン回転数約 1100rpm とした。

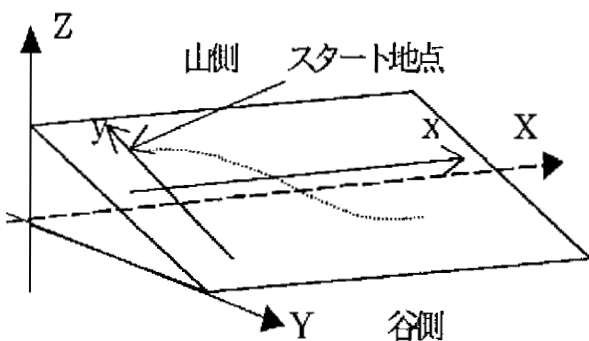


Fig.2.3.2 基準軸の設定

2.4 BPによるNNの学習

Fig.2.4.1 に示す一方向結合のみの多層ネットワークの教師付き学習アルゴリズム²⁾を、式で書くと次のようになる。

出力値 o と教師信号 t の二乗誤差は

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{Nn} (t_i^n - o_i^n)^2$$

E を W_{ij} に関して最小化するアルゴリズムは次のようになる。 W_{ij} の修正量を ΔW として

$$\Delta W_{i,j}^{k-1,k} = \eta \cdot \delta_j^k \cdot o_i^{k-1}$$

ただし、 δ_i は次のように与える。

第 n 層が出力層の時

$$\delta_j^n = (t_j^n - o_j^n) f_j'(i_j^n) (1 - o_j^n)$$

第 n 層が出力層でない時

$$\delta_j^n = o_j^k (1 - o_j^k) = \sum_{s=1}^{N_{k+1}} (\delta_s^{k+1} \cdot w_{j,s}^{k,k+1})$$

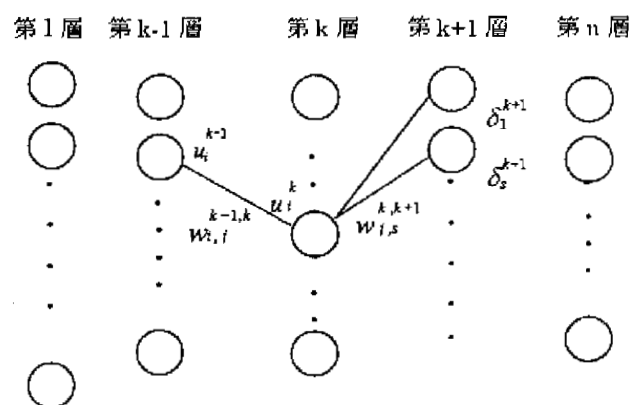


Fig.2.4.1 ネットワーク

誤差が少なくなり学習がうまく行けば、既学習パターンに対して正しい出力が得られる。さらに汎化能力により、学習していない入力パターンに対して既学習パターンと近いパターンであれば、正しい出力に近い値が得られる。

2.5 シミュレータの精度

上述の学習により NN に必要な結合係数が求められたが、作成した車両シミュレータが斜面上でのトラクタの運動を再現できるのかを検証するために、教師信号の操作量を与えた時の車両シミュレータの軌跡と教師信号の軌跡を比較した。

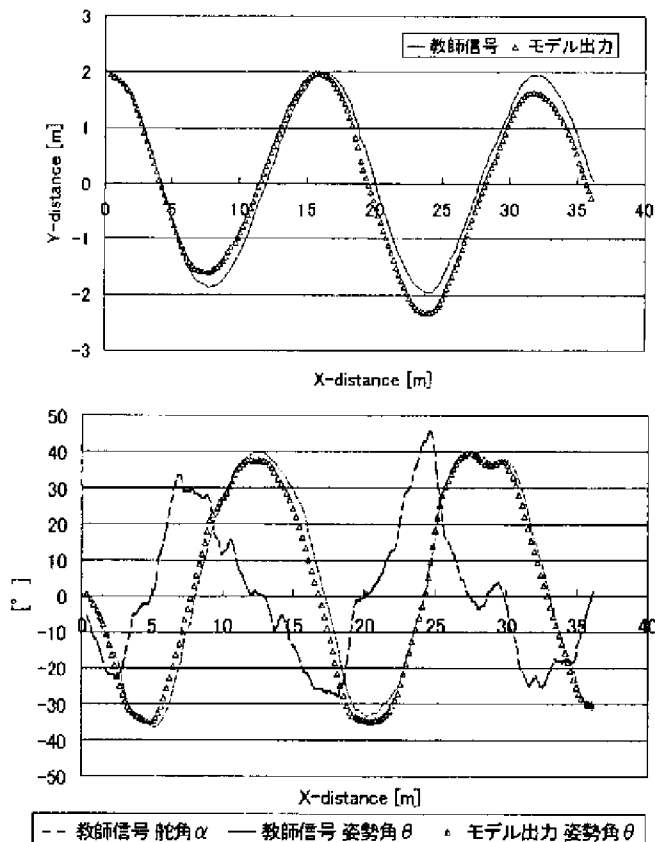


Fig.2.5.1 片振幅 2.0mのスラローム走行

Fig.2.5.1 は片振幅 2.0m のスラローム走行の場合の比較である。モデルの軌跡は教師信号とほとんど重なっている。この程度の誤差なら満足できる範囲と判断した。よって、この作成した車両シミュレータを斜面上での実機実験でも用いた。

3. 最適制御則

3.1 最適化の方法選択

本研究の最適化とは、トラクタの操舵角を最適化することである。最適化法に、ランダム探索の機能を持つ遺伝的アルゴリズム⁵⁾を採用する。

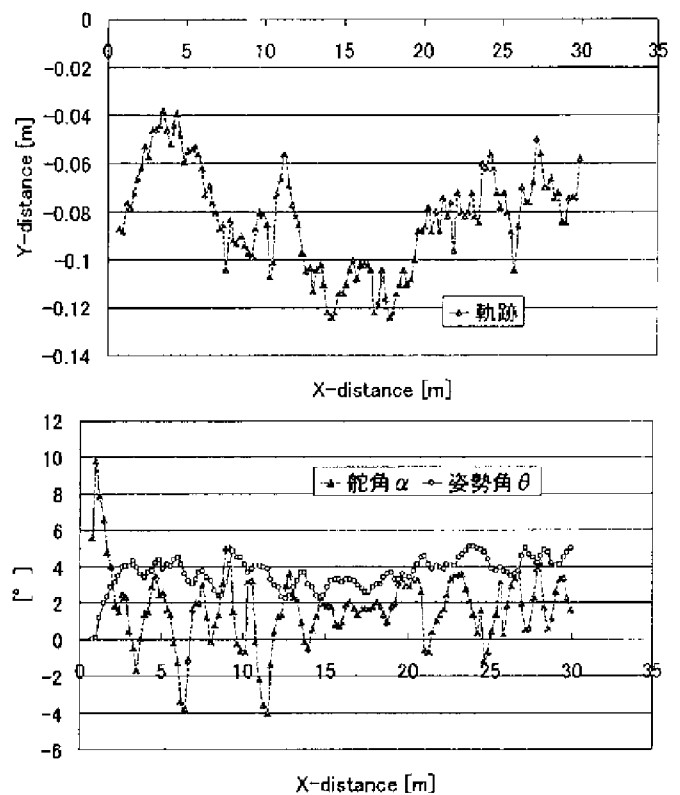


Fig.2.5.2 人が等高線走行をした場合の走行軌跡と角度変化

コンピュータ制御でトラクタを動かす場合に、さまざまな状態においてどういった制御を行えば良いかをあらかじめ求める必要がある。本研究の制御は操舵機構のみであるため、トラクタの走行状態に応じた操舵の制御則を求める。

3.2 最適化問題

本研究において、最適化の対象とするのは、トラクタの操舵角 α である。不整地での等高線走行には、時々刻々の状態を予測することが困難で、トラクタの状態量をフィードバックする方法を用いる。この方法は、トラクタの状態空間を任意の次元で分割し、それぞれの次元ごとに遺伝子座を設け、それらを羅列して遺伝子列とする方法である。制限された状態空間を基準線との偏差とトラクタの姿勢角に分割し、2次元のマトリクスとして遺伝子座を設ける方法で

ある。その時々状態に応じた遺伝子座から操作量を得る。

Fig.2.3.2 のように斜面上に等高線に沿う方向に x 軸をとり、 x の垂直方向に y 軸をとる。この座標系において $y=0$ を基準直線とし、直進走行を最適化問題の目標とし、この目的関数 J を式 3-2-1 のように定義した。トラクタは一定速度で走行し、操作量は舵角 α のみとした。

$$J = \int_0^{if} \varepsilon^2 dt = \int_0^{if} \{Y_g\}^2 dt \quad (3-2-1)$$

斜面上で直線走行を行うトラクタの走行状態において、2つの重要な状態量がある。一つは目標値 $y=0$ と走行中のトラクタの重心点 G における座標 Y_g との偏差 ε で、もう一つはトラクタと基準直線 $y=0$ とのなす角度すなわち姿勢角 θ である。この ε と θ を用いて最適舵角 α を導くこととする。これを式に表すと式 3-2-2 となる。

$$\alpha = f(\varepsilon, \theta) \quad (3-2-2)$$

ただ、舵角 α は ε と θ の 2 変数で表される単純な関数として表されるのではなく、Fig.3.2.1 のように ε と θ をある状態量で区切ったマトリクスを作成し、そのマトリクスの一つ一つに舵角 α を設定した。このマトリクスを制御マトリクスと呼ぶ。

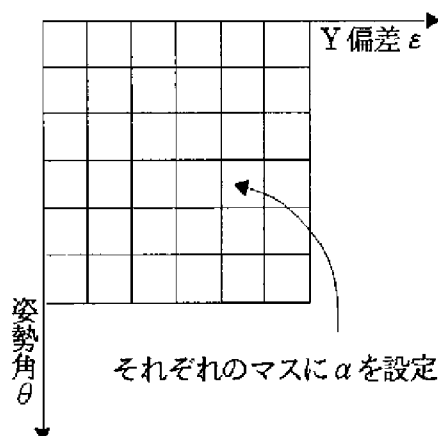


Fig.3.2.1 制御マトリクスの概念

制御マトリクスは、試行錯誤の結果、 6×6 とした。まず姿勢角 θ は、Fig.2.5.2 示すように人間等高線走行時の値がおおむね $0^\circ \sim 5^\circ$ の範囲を推移していることから、 5° 刻みを基本に分割した。Y 偏差 ε は 10cm 刻みを基本に分割した。これにより、合計 36 通りの状態に操舵角 α を設定した。

3.3 最適軌道の計算

本研究での遺伝子列 (Fig.3.3.1) は、上述の 6×6 のマトリクスを一行に並べた遺伝子座に、その状態で操作される操舵角 α を格納したものである。

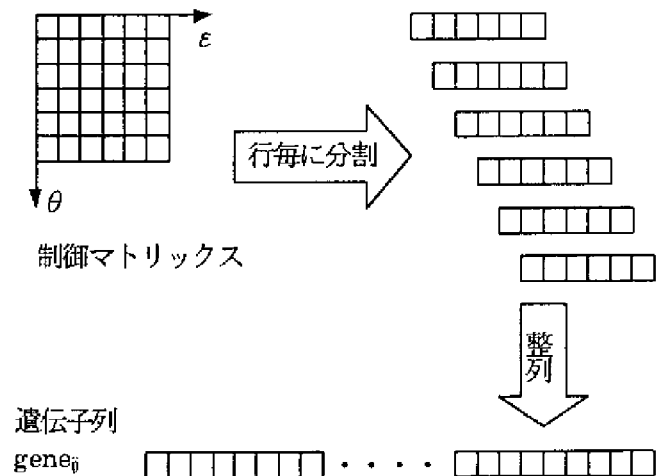


Fig.3.3.1 制御マトリクスの遺伝子列への変換

遺伝オペレータ⁶⁾として、単純GAで定義されている、選択、交差、突然変異を用いた。本研究では、次のように定義した。

$$\alpha \in \{\pm 20, \pm 18, \pm 16, \pm 14, \pm 12, \pm 10, \pm 8, \pm 6, \pm 4, \pm 2, 0\} [\text{deg}]$$

3.4 GAによる最適化の手順を示す。

1) パラメータの設定

最適化を行うにあたって、以下に示す 5 つのパラメータの値をあらかじめ設定する。

- T : 計算終了までの世代数
- M : 集団のサイズ (個対数)
- L : 遺伝子座の数
- P_c : 交差率

P_m : 突然変異率

2) 個体の遺伝子の初期化

一様乱数を用い、ランダムに個体の遺伝子型を決定し、 M 個の個体を生成する。

3) 個体の適応度の計算

集団における各個体の適応度を計算する。各個体ごとに、車両シミュレータに遺伝子を代入し、その個体の示す軌道を求め、それから表現型である適応度 f を計算する。適応度の計算は、式 3-3-1 で行われる。

$$f = (E + LP)^{-1} \quad (3-3-1)$$

$$E = \sum_{i=0}^{if} \{y_g\}^2$$

ここで、 E : 基準直線との偏差

LP : 到達しなかった場合のペナルティとした。

4) 次世代に残す個体を選択

5) 2点交差の実行

6) 突然変異の実行

設定世代交代数 T に達するまで手順(2)から(6)を繰り返す。世代交代サイクル中に最も適応度の高い個体の遺伝子を取り出し、最適制御則とする。Fig.3.3.2 にその流れを示す。本研究では、 $T=10000$ 回、 $M=50$ 、 $L=36$ 、 $P_c=0.6$ 、 $P_m=0.05$ とした。

基本的には初期座標を(0,0)として計算をすればよいが、これだけでは 6×6 の制御マトリクスをすべてを最適化することはできない。なぜなら、この状態で最適化の計算を行うと、最適軌道はほぼ直線状となり、 Y 偏差が $\pm 5\text{cm}$ 、姿勢角も $\pm 5^\circ$ の範囲しか使わなくなるからである。これだけ最大でも制御マトリクスの 4 マスしか最適化され

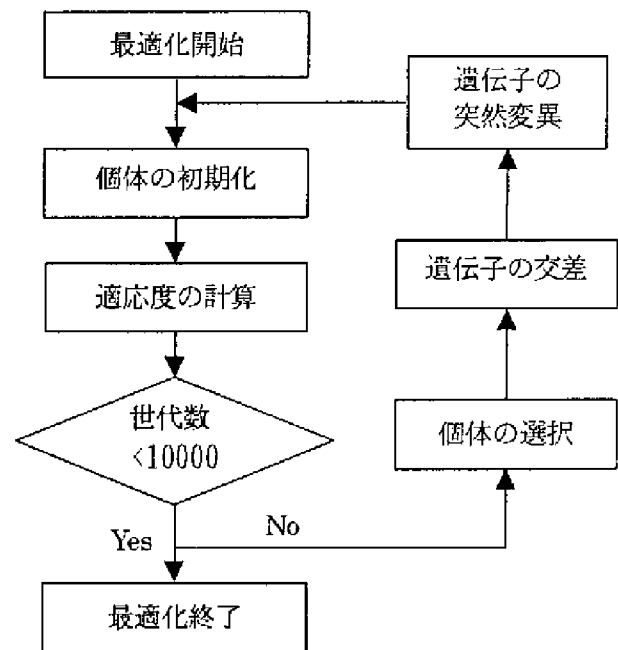


Fig.3.3.2 GAによる最適化の流れ図

ておらず、残りのマスは最適化されているとはいえないからである。これを回避するために、初期座標と初期姿勢角をいろいろ変えてみて、ある特定のマスを必ず使用するようにして、すべてのマスを最適化した。表 3-3-1 にその結果を示す。また、この制御マトリクスと車両シミュレータを用いて計算した最適軌道を Fig.3-3-3 に示す。

表 3-3-1 最適化された制御マトリクス

α		Y 偏差 ϵ [cm]					
		>20	10~20	0~10	-10~0	-10~-20	<-20
姿勢角 θ [°]	>10	-10	-10	-6	-5	-2	0
	5~10	-10	-10	-5	-2	-1	1
	0~5	-6	-4	0	2	7	8
	-5~0	-4	-2	5	6	7	9
	-10~-5	-3	5	8	10	10	10
	<-10	3	5	9	10	10	10

4. 圃場実験

4.1 実験目的

圃場実験の目的は、求めた制御則をトラクタに搭載する制御コンピュータに実装し、トラクタの自律走行による等高線走行を試みた。

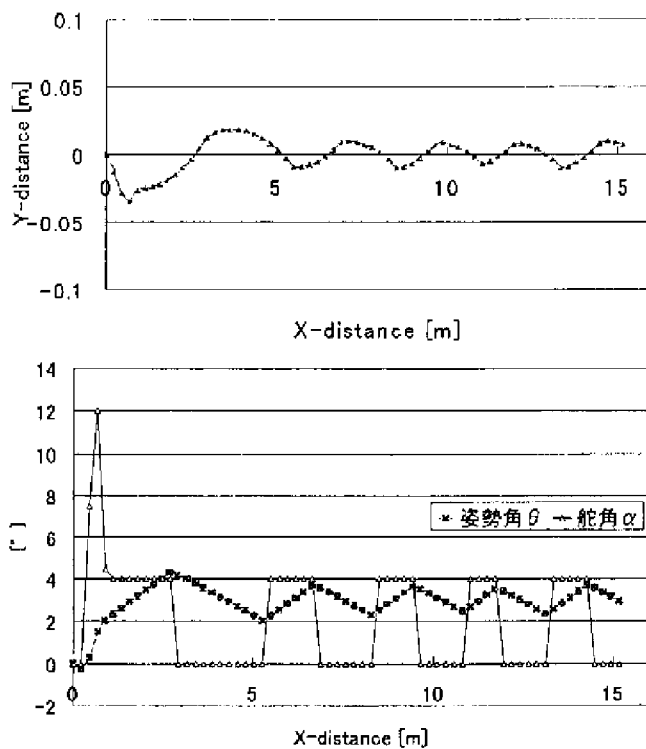


Fig.3.3.3 GAによる最適軌道

4.2 実験装置

舵角を制御するために、DC モータで駆動させる方法を採用することとした。その他、座標、舵角、速度、姿勢角計測システムは教師信号取得実験と同じである。

4.3 実験方法

実験は、教師信号取得実験と同じく東北農業試験場の斜度約 14° の傾斜地で行った。まず基準軸をとり、X 軸上の後方 (-5, 0) にトータルステーションを設置した。トラクタは初期座標目標コース上を若干ずれた初期位置からスタートし、X 軸を基準直線として 15m の直線走行（等高線自律走行）を行う（Fig.4.3.1）。

5. 結果と考察

5.1 コンピュータシミュレーションと圃場実験の比較

GA で最適化した制御マトリクスと車両シミュレータを用いて作成した最適軌道を

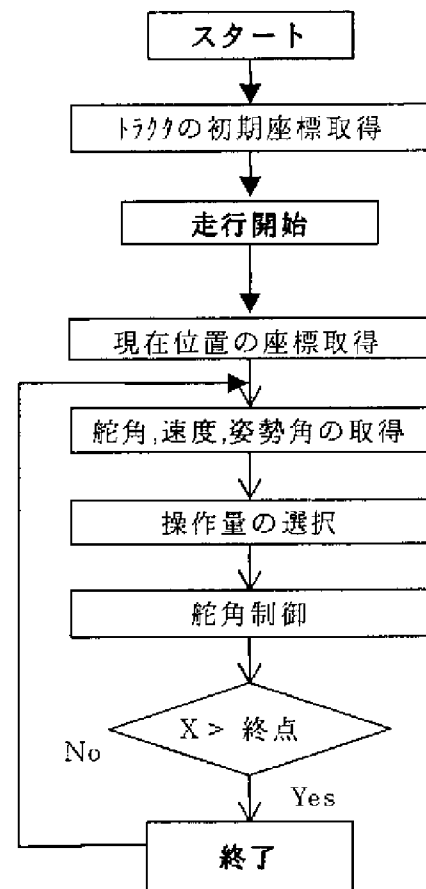


Fig.4.3.1 自律走行の流れ図

見ると(Fig.3.3.3), 軌跡は基準軸とのY 偏差が $\pm 5\text{cm}$ 以内を推移し、姿勢角 θ は $2\sim 4^\circ$ を推移している。一方同じ制御マトリクスを用いた実車実験では (Fig.5.1.1 ~ Fig.5.1.3), 走行中の中盤から後半の部分のデータを見てみると、軌跡は基準軸とのY 偏差が $-30\sim -10\text{cm}$ の範囲で推移し、姿勢角 θ は $3\sim 8^\circ$ となっている。

実験の軌跡で共通していることは、一度も基準軸をプラス側に横切っていないことである。これは教師信号を取得した時と比べて、実車実験を行った時は降雪があった後だったから土壌がかなり湿っていて、同一条件ではなかったことが原因である。ただマクロ的に見ると、等高線走行を行っているのは間違いない。

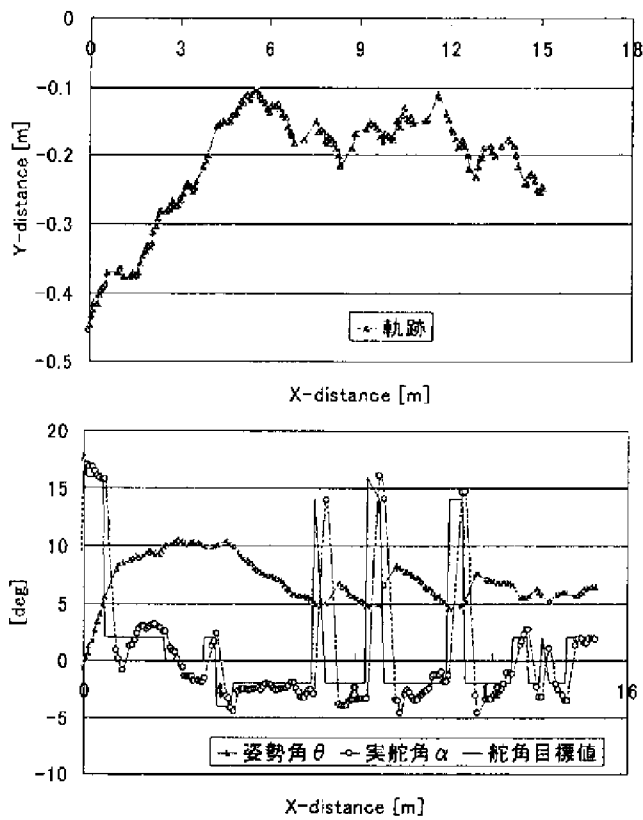


Fig.5.1.1 等高線走行データ (その1)

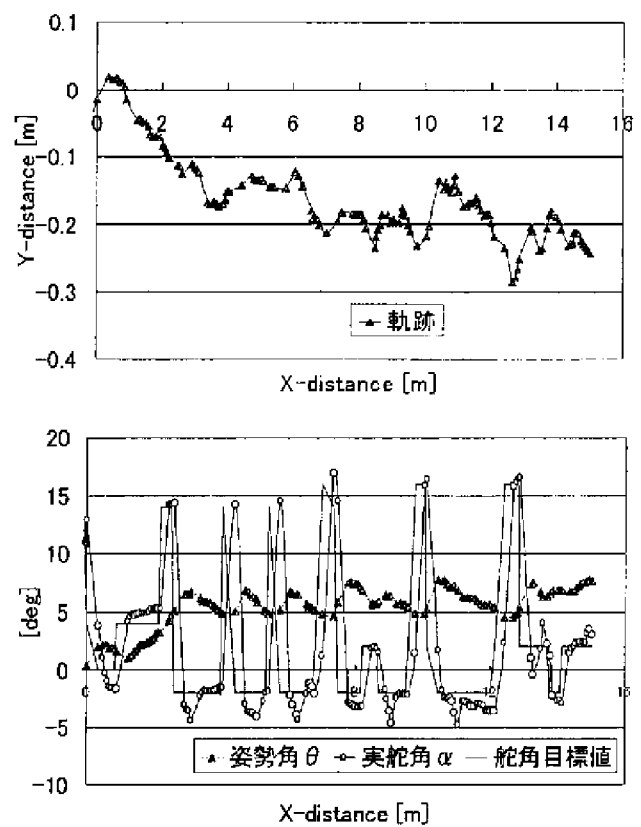


Fig.5.1.3 等高線走行データ (その3)

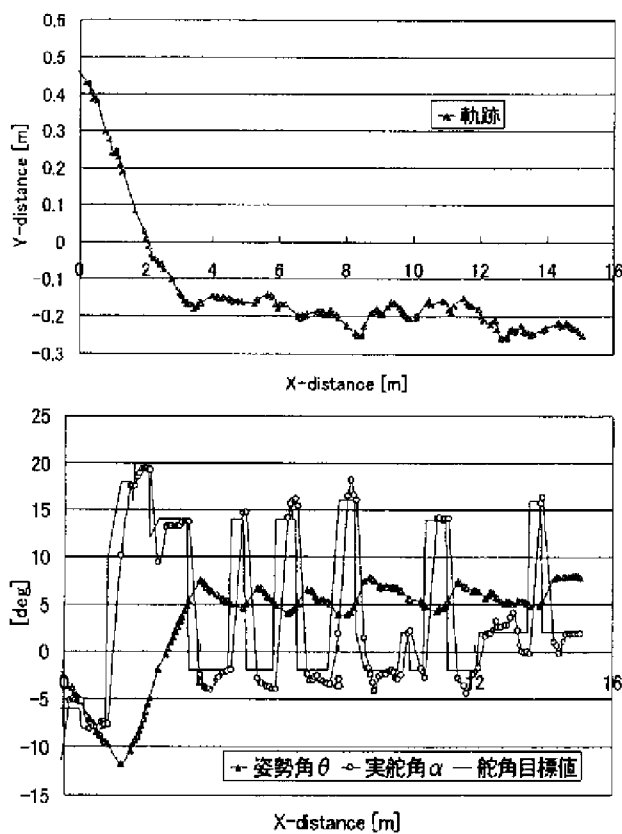


Fig.5.1.2 等高線走行データ (その2)

今回、土壌条件が大きく異なった条件で実車実験を行ったが、かなりの程度の自律走行が行えたことから、GAで最適化した制御

マトリクスが有効であり、さらに汎化機能を持っていることが証明された。ただ、制御マトリクスの姿勢角 θ の区切り方には再考の余地があると思われる。

5.2 人間とコンピュータ制御の比較

Fig.2.5.2 を見るとトラクタが $Y = -0.1\text{m}$ 付近を等高線走行している。オペレータはトラクタの重心点を基準軸上にくるように心がけているが、実際には基準線上を走行することは難しい操作であることを意味している。Fig.3.3.3 のコンピュータシミュレーションと比較した場合、明らかに差があると思われるが、これは仕方がないことである。実車実験 (Fig.5.1.3) と人の制御 (Fig.2.5.2) を、舵のプラスからマイナスまたはマイナスからプラスへの切り返し回数で比較してみると、どちらも 10m 走行する

間におおよそ 5 回となっていて、単位時間あたりの制御回数はおおむね同じである。また、姿勢角や γ 偏差の状態に対しての操舵も同じ傾向が見られる。つまり、GA による最適化は、人の操作を正確に行っているのである。

6. まとめ

14 度の斜面上の自律走行の実験結果から、NN と GA で作った制御則を利用して斜面におけるトラクタの自律走行を実現できることが分かった。今後、斜度が異なる斜面上で自律走行を行い、制御則と斜面の傾斜度と、 $\alpha = f(\varepsilon, \theta)$ をより詳細に解析したい。また、制御マトリクス of 区切り方に関する改善を試みようと考えている。

参考文献

1. 野口伸, 石井一暢, 寺尾日出男: ニューラルネットワークによる農用車両の最適制御(第2報) 農業機械学会誌 56(2), 83/92, (1994)
2. 安居院猛, 長橋宏, 高橋祐樹(編): ニューラルプログラ, 11/16, 昭晃堂, (1993)
3. 福田俊男, 柴田嵩徳: ニューラルネットワーク(基礎編) 農業機械学会誌 52(6), 99/103, (1990)
4. 福田俊男, 柴田嵩徳: ニューラルネットワーク(応用編) 農業機械学会誌 53(1), 103/108, (1991)
5. 野口伸, 寺尾日出男: 遺伝的アルゴリズムによる農用・建機用車両の最適経路生成, 計測自動制御学会論文集 Vol.30, No.1, 64/71, (1994)
6. 安居院猛, 長尾智晴(編): ジェネティックアルゴリズム, 7/27, 昭晃堂, (1993)
7. 玉置久, 喜多一, 0.岩本貴司, 三原信夫: 遺伝的アルゴリズム-I GAの基礎, システム/制御/情報 Vol.39, No.6, 295/302、(1995)
8. 玉置久, 喜多一: 遺伝的アルゴリズム-II GAによる最適化計算1, システム/制御/情報 Vol.39, No.8, 400/407, (1995)
9. 玉置久, 喜多一: 遺伝的アルゴリズム-III GAによる最適化計算2, システム/制御/情報 Vol.39, No.10, 431/438 (1995)
10. 横山直隆(編): パソコン機械制御と制作実習入門, 技術評論社, (1990)
11. 中島信行(編): I/O 制御プログラミング入門, CQ 出版社, (1997)