

## RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット (第3報)

—拘束条件を有した経路生成による枕地旋回精度の向上—

木瀬道夫\*<sup>1</sup>・野口 伸\*<sup>1</sup>・石井一暢\*<sup>1</sup>・寺尾日出男\*<sup>1</sup>

## 要 旨

ロボットトラクタのための枕地旋回アルゴリズムを考案した。前進のみで旋回する場合、前進と後退を用いて旋回する場合の2種類の旋回法に対して、旋回経路を3次スプライン関数を用いて生成した。トラクタの最小旋回半径と最大操舵速度に関する拘束条件を設け、これらの拘束条件を満たさない場合は経路を再計算して、走行可能な経路を生成する機能を有する。旋回経路に2つの拘束条件を適用することの有効性をコンピュータシミュレーションによって確認した。最後にはほ場で実機実験を行い、従来法と比較して開発したアルゴリズムが有効であることを確認した。

[キーワード] 旋回経路生成, スプライン関数, 運動拘束条件, 前進旋回, 切り返し旋回

## Field Mobile Robot Navigated by RTK-GPS and FOG (Part 3)

—Enhancement of Turning Accuracy by Creating Path applied with Motion Constraints—

Michio KISE\*<sup>1</sup>, Noboru NOGUCHI\*<sup>1</sup>, Kazunobu ISHII\*<sup>1</sup>, Hideo TERAO\*<sup>1</sup>

## Abstract

Turning algorithm for a robot tractor was developed in this paper. Two types of turning paths were created by applying third-order Spline function; forward turning, and switch-back turning. The constraints relating to the tractor characteristics, minimum turning radius and maximum steering speeds, were introduced for creating a feasible turning path. The turning path was recalculated while created path wasn't fulfilled these constraints.

Validity of the constraints was confirmed by a computer simulation. The developed algorithm was tested in the field with the robot tractor developed in a previous paper, and it showed higher following accuracy in comparison to conventional method.

[Keywords] Turning path planning, Spline function, Motion constraints, Forward turning, Switch-Back turning

## I 緒 論

本研究は畑作・水田作・粗飼料生産におけるすべてのトラクタ作業に対応できる汎用性の高いほ場作業ロボットの開発が最終目的である。第1報ではRTK-GPSとFOGのセンサフュージョン手法について<sup>1)</sup>, 第2報では目標経路や変速段数などの情報を有する「作業計画マップ」を定義し、それに基づいた無人作業について報告した<sup>2)</sup>。これら2報においてほ場で無人作業を行い概ね満

\*1 会員, 北海道大学大学院農学研究科 (〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目 TEL 011-706-3884)

Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Kita-9, Nishi-9, Kita-ku, Sapporo, Japan, 060-8589

足な作業精度を得たが、枕地旋回精度の低さに起因して作業開始地点付近で目標経路からの偏差が生じることが明らかとなった。よって本報ではこの問題を解決するために新しい旋回アルゴリズムを考案したので報告する。

既報で採用した枕地旋回アルゴリズムは、例えば左旋回の場合、1) 最大舵角で90°左旋回する、2) 舵角0°で後退する、3) 最大舵角で90°左旋回する、というものであった。1) で算出される旋回半径に応じて2) の後退距離を調節することによって傾斜や路面状態による最小旋回半径の空間的变化を補償し、理論上は旋回終了位置が次行程の目標経路上の点となる。しかしトラクタの操舵遅れや2) の後退動作において操舵角を0°にしたことに

より偏差が大きくなったことが原因となって、旋回終了位置と次行程の目標経路との間に偏差を生じた。すでに枕地旋回アルゴリズムに関しても幾つか研究成果が報告されている。鳥巣らは旋回時間を最短にする最適制御問題として定式化した枕地旋回アルゴリズムを考案した<sup>3)・6)</sup>。この手法は拘束条件として操舵速度に制限を与えた現実的な手法であるが、精度の高い運動方程式を記述する必要がある、また解を数値計算によって得るため解が収束しない場合がある。

そこで本報ではスプライン関数によって滑らかな旋回経路を生成することを考えた。トラクタの最小旋回半径と操舵速度に関する拘束条件を設け、生成された経路がこれらの条件を満たさないときには経路を再計算して実現可能な経路を生成する。本手法では前進のみで旋回する手法(前進旋回)と前進と後退によって切り返して旋回する手法(切り返し旋回)の2通りについて考案した。第II章では経路生成法と拘束条件について、第III章では本法によって生成された経路に対して走行シミュレーションと実機による走行実験を行い、その結果をまとめた。

## II 旋回動作の経路生成

### 1. スプライン関数

経路生成には、軌道生成<sup>7)</sup>、関数近似<sup>8)</sup>、または2点境界値問題<sup>9)</sup>などに用いられるスプライン関数を適用した。スプライン関数とは、「分割された区間に対し、それぞれ異なる多項式で構成される、滑らかな区分的多項式関数」と定義される<sup>10)</sup>。本研究では3次のスプライン関数を用いた。後述の拘束条件において、経路の曲率が連続関数となることが必要となる。3次以上のスプライン関数は曲率が連続関数となり、また4次以降の項は与える影響が非常に小さいと考えられることから、次数は3とした。

3次スプライン関数は定義から、与えられた節点の各区間において、2次までの微係数が連続でかつ節点を通る。区間*i*におけるスプライン曲線は、

$$\Omega_i(s) = \begin{bmatrix} x_i(s) \\ y_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0^{(i)} + a_1^{(i)}s + a_2^{(i)}s^2 + a_3^{(i)}s^3 \\ b_0^{(i)} + b_1^{(i)}s + b_2^{(i)}s^2 + b_3^{(i)}s^3 \end{bmatrix} \quad (0 \leq s \leq s_i, i=0, \dots, N) \quad (1)$$

と表わされる。 $x_i(s)$ ,  $y_i(s)$ は区間*i*における、 $x$ ,  $y$ 座標、 $a_j^{(i)}$ ,  $b_j^{(i)}$ ( $j=0, 1, 2, 3$ )はスプライン関数の係数、 $s_i$ は、

$$s_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (2)$$

を満たす各節点間の距離であり、区間ごとに値が異なる。ここでスプライン曲線の*s*の1次微分、2次微分を次のように表わす。

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_i(s)}{ds} \\ \frac{dy_i(s)}{ds} \end{bmatrix} = \Omega_i'(s) \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_i''(s)}{d^2s} \\ \frac{dy_i''(s)}{d^2s} \end{bmatrix} = \Omega_i''(s) \quad (4)$$

さらに各節点 $\Omega_i(0)$ を $\Omega_i(0) = \Omega_i$ と表わすとすると、3次スプライン関数の係数は以下の式によって与えられる。

$$\begin{bmatrix} a_0^{(i-1)} \\ b_0^{(i-1)} \end{bmatrix} = \Omega_{i-1} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} a_1^{(i-1)} \\ b_1^{(i-1)} \end{bmatrix} = \Omega_{i-1}' \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} a_2^{(i-1)} \\ b_2^{(i-1)} \end{bmatrix} = \frac{3}{s_{i-1}^2}(\Omega_i - \Omega_{i-1}) - \frac{1}{s_{i-1}}(2\Omega_{i-1}' + \Omega_i') \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} a_3^{(i-1)} \\ b_3^{(i-1)} \end{bmatrix} = \frac{2}{s_{i-1}^3}(\Omega_{i-1} - \Omega_i) + \frac{1}{s_{i-1}^2}(\Omega_{i-1}' + \Omega_i') \quad (8)$$

または $\Omega_i$ は以下の漸化式を満たす。

$$\begin{aligned} & \frac{s_{i-1}}{3}\Omega_{i-1} - \frac{2s_i + 2s_{i-1}}{3}\Omega_i' - \frac{s_i}{3}\Omega_{i-1}' \\ & = \frac{s_{i-1}}{s_i}\Omega_{i+1} + \left(\frac{s_i}{s_{i-1}} - \frac{s_{i-1}}{s_i}\right)\Omega_i - \frac{s_i}{s_{i-1}}\Omega_{i-1} \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)は次のように表わすことができる。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ q_{10} & q_{11} & q_{12} & 0 \\ 0 & q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ & & \ddots & \ddots \\ & 0 & q_{n-1,n-2} & q_{n-1,n-1} & q_{n-1,n} \\ 0 & \dots & & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_{n-1} \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_{n-1} \\ B_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

$Y_i = \Omega_i'$

$q_{ij}$ :  $\Omega_j$ の係数 ( $j=i-1, i, i+1$ )

$B_i$ : 式(9)の右辺

式(10)は、 $B_0 = Y_0$ ,  $B_n = Y_n$ が与えられれば、左上から順に前進消去、後退代入することによって解くことができる。式(10)から $Y_0, Y_1, \dots, Y_n$ すなわち各節点の1次微分 $\Omega_0', \Omega_1', \dots, \Omega_n'$ が得られると、式(5)~式(8)に代入して3次スプライン関数の係数 $a_j^{(i)}$ ,  $b_j^{(i)}$ を求めることができる<sup>11)</sup>。本システムでは目標経路をナビゲーションポイントとよぶ点の集合で表現する。よってスプライン曲線上の点列を式(1)を用いて算出し、それらの点をナビゲーションポイントとする。

### 2. 拘束条件

#### 1) 最小旋回半径拘束

スプライン関数によって生成された経路がトラクタにとって追従可能かどうかを判定するために「最小旋回半径拘束」、「最大操舵速度拘束」の2つの拘束条件を導入した。最小旋回半径拘束は生成された経路の各ナビゲーションポイント $\omega_i$ における曲率半径 $r(\omega_i)$ が

$$r(\omega_i) \geq R_{\min} \quad (0 \leq i \leq N-1) \quad (11)$$

$R_{min}$ : トラクタの最小旋回半径

$N$ : ナビゲーションポイントの数

を満たすことが拘束条件となる。本研究では定常円旋回しているときの旋回半径を操舵角  $\delta$  における車両の旋回半径として定義する。また式(11)中の経路  $(x(s), y(s))$  の曲率半径  $r(\omega_i)$  は以下の式で表わすことができる<sup>12)</sup>。

$$r(\omega_i) = \frac{\left\{ \left( \frac{dx}{ds} \right)^2 + \left( \frac{dy}{ds} \right)^2 \right\}^{\frac{2}{3}}}{\frac{dx}{ds} \cdot \frac{d^2y}{ds^2} - \frac{dx^2}{ds^2} \cdot \frac{dy}{ds}} \quad (12)$$

3次スプライン関数は2次の微係数まで連続となることから、生成される経路の曲率も連続関数となり、車両が追従しやすい曲線経路が生成される。

2) 最大操舵速度拘束

最大操舵速度拘束は、「 $i$  番目のナビゲーションポイント  $\omega_i$  の曲率半径  $r(\omega_i)$  をその地点における車両の旋回半径としたとき、その旋回半径によって決定される操舵角  $\delta_a(\omega_i)$  から、 $i+1$  番目のそれに移行するために必要な操舵速度  $u_d(\omega_i)$  がトラクタの最大操舵速度  $U_{max}$  よりも小さい」ことを満たすことが拘束条件となり、これは次式で与えられる。

$$|u_d(\omega_i)| \leq U_{max} \quad (0 \leq i \leq N-1) \quad (13)$$

ただし、

$$u_d(\omega_i) = \frac{\delta_a(\omega_{i+1}) - \delta_a(\omega_i)}{\Delta t} \quad (14)$$

$$\Delta t = \frac{\|\omega_{i+1} - \omega_i\|}{V} \quad (15)$$

ここで  $\Delta t$  は車両が  $\omega_i$  から  $\omega_{i+1}$  まで移動するのに要する時間を表わし、 $V$  は走行速度である。

3. 前進旋回

前進旋回は枕地旋回を前進のみで行う手法である。上にけん引式の作業機を装着したときの旋回手法であり、アメリカなどの大規模ほ場でよく用いられる。図1に前進旋回のアプローチを示した。本図は左旋回の場合を表わし、Aは旋回開始地点(作業終了地点)、Fは旋回終了地点(作業開始地点)である。そして3次スプライン関数に与える節点は、A, B, C, D, Eの5点であり、端点A, Eの微係数はそれぞれ  $0^\circ$  と  $180^\circ$  となる。EF間は直線で結ぶものとし、これはトラクタの姿勢を作業開始前までに安定させるために設けた調整区間である。 $w$  は行程幅、 $d_1$  は調整区間の距離、 $d_2$  は現行程の作業終了地点と次行程の作業開始地点の進行方向のオフセット量である。

前進旋回のキーワードは「3つの円」である。円  $Q_1$  はAを通りy軸に平行な直線とAで接し、円  $Q_3$  はy軸とEで接し、そして円  $Q_2$  は  $Q_1, Q_3$  両円と接する。これら3つの円を拘束条件によって変化させることによって、拘束条件を満足する経路を生成する。まず最小旋回半径拘束を満たさない場合は、そのナビゲーションポイントの属する円の半径を大きくして節点を再設定し経路を再計

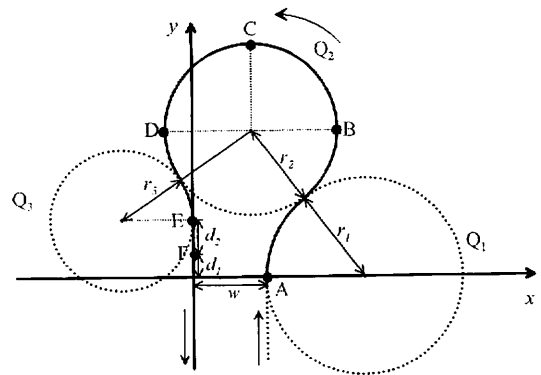


図1 前進旋回の経路生成アルゴリズム  
Fig.1 Algorithm of path creation for Forward turning

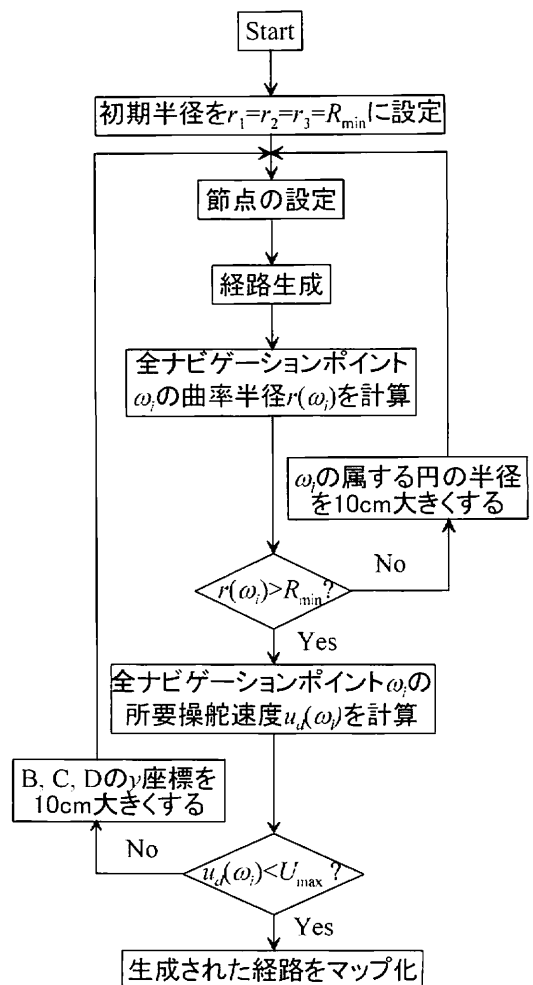


図2 前進旋回の経路生成フローチャート  
Fig.2 Flowchart of path creation for Forward turning

算する。例えばBC間のナビゲーションポイントが条件を満たさないときは、 $r_2$  を大きくして節点を再設定する。一方、最大操舵速度拘束を満たさないときは、B, C, Dのy座標を大きくして再計算する。これはBからDの区間はほぼ同一円上の点となるため曲率の変化量が小さく、この拘束を満たさない場合が考えられるのはAB

間とDE間だけであると判断したことによる。

図2に前進旋回の経路生成フローチャートを示した。まず3円の半径をトラクタの最小旋回半径に設定して節点の座標を計算し、経路を生成する。次に生成された経路に対し最小旋回半径拘束を満たすかどうかを調べる。満たさなければ満たさなかった点の属する円すべての半径を10cm大きくして節点座標を再計算する。もし最小旋回半径拘束を満たせば、最大操舵速度拘束を満たすかどうか調べる。満たさなければ節点B, C, Dのy座標を10cm大きくして経路生成する。ここで新しく生成された経路は最小旋回半径拘束から調べなおす。もし最大操舵速度拘束も満たせば生成された経路はトラクタが追従可能な経路であると判断し、作業計画マップへと座標変換する。

4. 切り返し旋回

切り返し旋回は後退動作を含む枕地旋回手法である。主に直装式の作業機を装着したときの旋回手法であり、前進旋回と比較して枕地部分を小さくできることが利点である。切り返し旋回のアプローチを図3に示した。本図は左旋回の場合を表わし、Aが旋回開始地点、Fが旋回終了地点となり、BC間は後退区間である。本アルゴリズムではまずCE間の経路をスプライン関数によって生成する。そして経路が各拘束条件を満足した後、経路を反転させてA'B間の経路とする。

CE間の経路生成において、3次スプライン関数に与える節点はC, D, Eの3点とした。初期設定においてはC, D, EはPを中心とする半径 $r_1$ の円弧上の点であり、Dは角DPEが45°となる点である。最小旋回半径拘束を満たさない場合は、 $r_1$ の値を大きくすることで対応する。最大操舵速度拘束を満たさない場合はPDの距離 $r_2$ を大きくし、C, E付近の曲率半径を大きくする。これは点CとEにおいて操舵角を0°(曲率半径が無限大)としたため、この付近で要求される操舵量が最も大きくなると判断したことによる。

図4に切り返し旋回のマップ生成アルゴリズムを示した。これはほぼ前進旋回のそれと同じであり、拘束条件を満足しなかったときの節点の再設定方法が異なるだけである。

III コンピュータシミュレーションとほ場実験

1. 経路生成と走行制御シミュレーション

1) 車両運動制御モデル

本アルゴリズムによって生成された旋回経路を適用した走行シミュレーションを行った。走行シミュレーションの目的は考案した拘束条件の有効性を確認することが目的である。

走行シミュレーションは式(10)で表わされる車両の2輪モデル<sup>13)</sup>と、それに位置を表わす2つの式を加えた運動モデルを用いた。

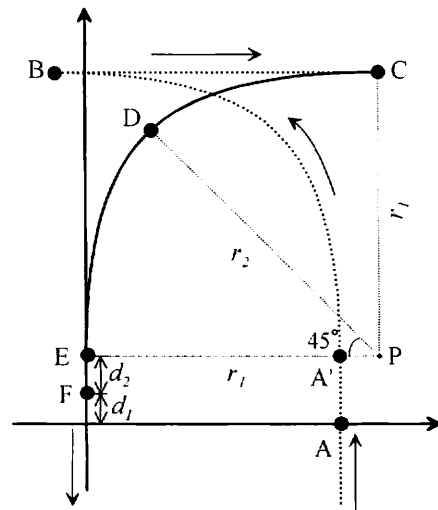


図3 切り返し旋回の経路生成アルゴリズム

Fig. 3 Algorithm of path creation for Switch-Back turning

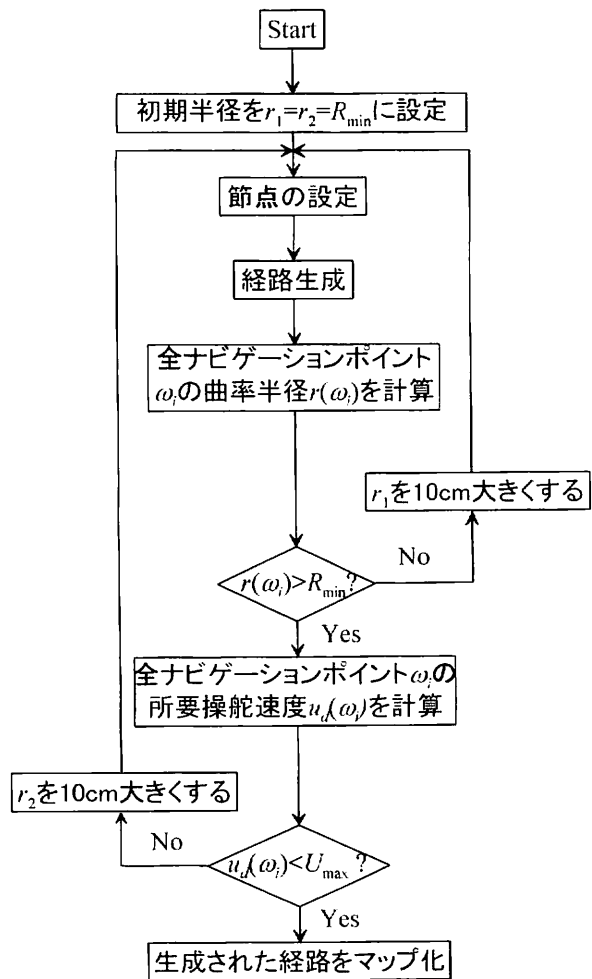


図4 切り返し旋回の経路生成フローチャート

Fig. 4 Flowchart of path creation for Switch-Back turning

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2(K_f+K_r)}{mV} & -1-\frac{2(l_f K_f-l_r K_r)}{mV^2} & 0 \\ \frac{-2(l_f K_f-l_r K_r)}{I} & \frac{-2(l_f^2 K_f-l_r^2 K_r)}{IV} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2K_f}{mV} \\ \frac{2l_f K_f}{I} \\ 0 \end{bmatrix} \delta \quad (16)$$

$$\dot{x} = V \sin(\phi + \beta) \quad (17)$$

$$\dot{y} = V \cos(\phi + \beta) \quad (18)$$

$\beta$ : 滑り角,  $\gamma$ : 角速度,  $\phi$ : 車両方位角,  $x, y$ : GPS 座標系における車両重心位置

ここで,  $K_f, K_r$  はそれぞれ前輪, 後輪のコーナリングパワー,  $l_f, l_r$  は車両の重心から前車軸, 後車軸までの距離,  $m, I$  は車両の重量とヨー方向慣性モーメント,  $V$  は走行速度である。また  $\delta$  は操舵角であり, 本システムの入力となる。

また操舵角を決定するステアリングコントローラは第2報で用いた作業計画マップのアルゴリズムを適用した。

両拘束条件を決定するには車両の旋回半径が必要となる。定常円旋回においては,  $\dot{\beta}=0, \dot{\gamma}=0$  であるから, これらを式(16)に代入すると以下の関係が得られる。

$$\gamma = \left( \frac{1}{1 - \frac{m}{2I^2} \frac{l_f K_f - l_r K_r}{K_f K_r}} \right) \frac{V}{l} \delta \quad (19)$$

ここで  $l=l_f+l_r$  であり, 車両の軸距を表わす。すると操舵角  $\delta$  における車両の旋回半径  $R$  は

$$R = \frac{V}{\gamma} = (1 - cV^2) \frac{l}{\delta}, \quad c = \frac{m}{2I^2} \frac{l_f K_f - l_r K_r}{K_f K_r} \quad (20)$$

と表わされる。

$c$  は車両の旋回半径を決定するパラメータであるが, これは車両パラメータである  $K_f, K_r$  などの定数に依存する。シミュレーションでの設定速度を 0.83 m/s とし, この走行速度において後述の表 1 に示す実機の旋回半径と舵角の関係とシミュレーションのそれができるだけ一致するように車両パラメータを設定した。

$K_f = 500 \text{ N/}^\circ, K_r = 1,750 \text{ N/}^\circ, l_f = 1.6 \text{ m}, l_r = 0.7 \text{ m}, m = 3,200 \text{ kg}, I = 1,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

図 5 に実機による旋回半径  $r$  とシミュレーションによる旋回半径  $\hat{r}$  の関係を示した。横軸がシミュレーションによる旋回半径, 縦軸が実機による旋回半径である。旋回半径が大きくなるにつれて偏差は大きくなり, タイヤ-路面間の相互作用が非線形であることが確認された。しかし  $r = \hat{r}$  に対して直線回帰を行ったとき  $r^2 = 0.987$  という結果が得られ, 本モデルは上述したシミュレーションの目的である設定した拘束条件の有効性を検証するには十分な精度を有していると判断した。

つぎに最大操舵速度拘束の式(14)で必要とする経路の曲率半径  $r(\omega_i)$  によって決定される車両の舵角  $\delta_d(\omega_i)$

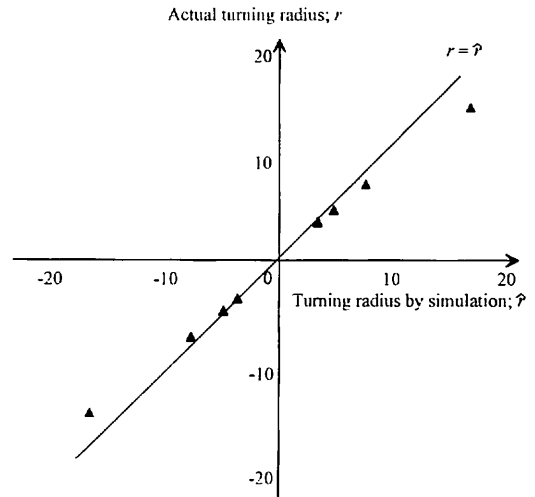


図 5 定常円旋回のシミュレーション結果

Fig. 5 Simulation result of constant steering turning

は, 式(20)から次のように求められる。

$$\delta_d(\omega_i) = (1 - cV^2) \frac{l}{r(\omega_i)} \quad (21)$$

そして時刻  $k$  における操舵速度  $u_k$  を次式にしたがって算出した。

$$u_k = \frac{\delta_{dk} - \hat{\delta}_k}{\Delta t} \quad (22)$$

ここで  $\delta_{dk}$  は作業計画マップから算出される目標操舵角,  $\hat{\delta}_k$  は舵角,  $\Delta t$  は制御インターバルである。式(22)で算出した  $u_k$  が設定された最大操舵速度  $U_{max}$  に対して  $|u_k| > U_{max}$  となった場合,  $\delta_{dk}$  を次のように修正する。

$$\hat{\delta}_{dk} = \begin{cases} \hat{\delta}_k + U_{max} \Delta t & (u_k > 0) \\ \hat{\delta}_k - U_{max} \Delta t & (u_k < 0) \end{cases} \quad (23)$$

### 2) 前進旋回のシミュレーション

走行シミュレーションは初期設定(拘束条件なし)の経路, 最小旋回半径拘束のみを満足した経路, 全拘束を満足した経路の3種類の経路に対して行った。図6に前進旋回のシミュレーションによって得られた走行軌跡を示した。本シミュレーションにおいて走行速度 0.83 m/s, 行程幅 3 m, 調整区間の距離 2 m とした。またそれぞれの拘束条件は最小旋回半径 3.63 m, 最大操舵速度  $25^\circ/\text{s}$  と設定した。経路生成の結果, 最小旋回半径拘束によって3円の半径  $r_1, r_2, r_3$  がそれぞれ  $r_1 = 4.33 \text{ m}, r_2 = 4.33 \text{ m}, r_3 = 3.73 \text{ m}$  と変化した。最大操舵速度拘束では3円の半径は最小旋回半径拘束から変化しなかったものの, B, C, D の y 座標が 2.6 m 大きくなった。拘束条件な

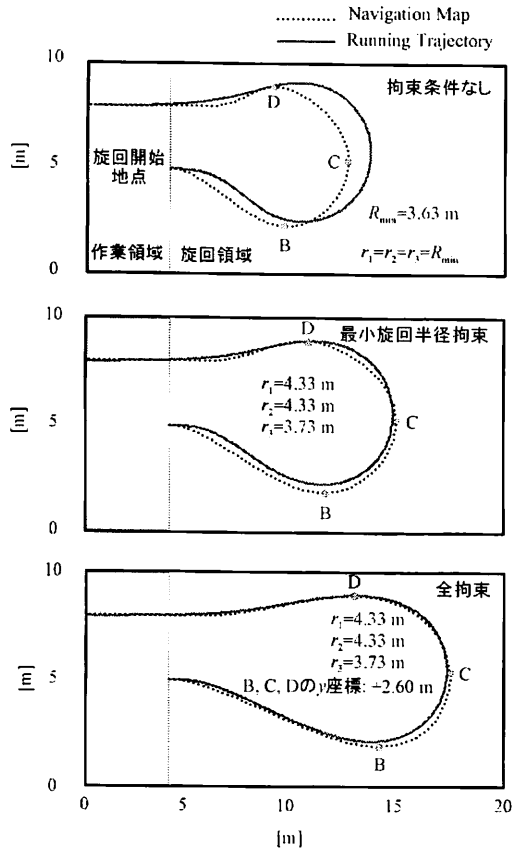


図 6 前進旋回のシミュレーション結果  
Fig. 6 Simulation results of Forward turnings

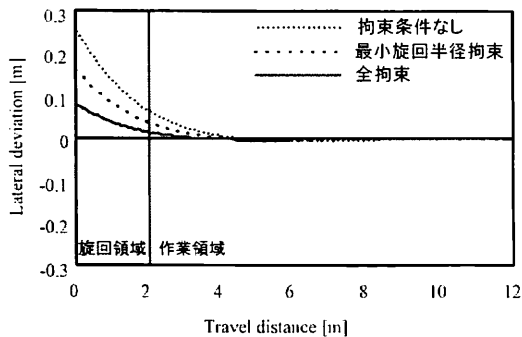


図 7 前進旋回のシミュレーションにおける横方向偏差の推移  
Fig. 7 Lateral deviations of Forward turnings on computer simulation

しの経路ではトラクタが経路追従できずに経路よりも大きな半径で走行している。最小旋回半径拘束と全拘束の走行軌跡を比較すると、BCD区間ではほぼ変わらないものの、旋回終了地点付近での収束は全拘束のほうが良い結果を示した。図7に旋回終了2m手前からの横方向偏差の推移を示した。本図からも全拘束を適用した経路による走行は、他の2走行と比較して旋回終了時の偏差が一番小さく、その後の収束も最も速いことが明らかである。

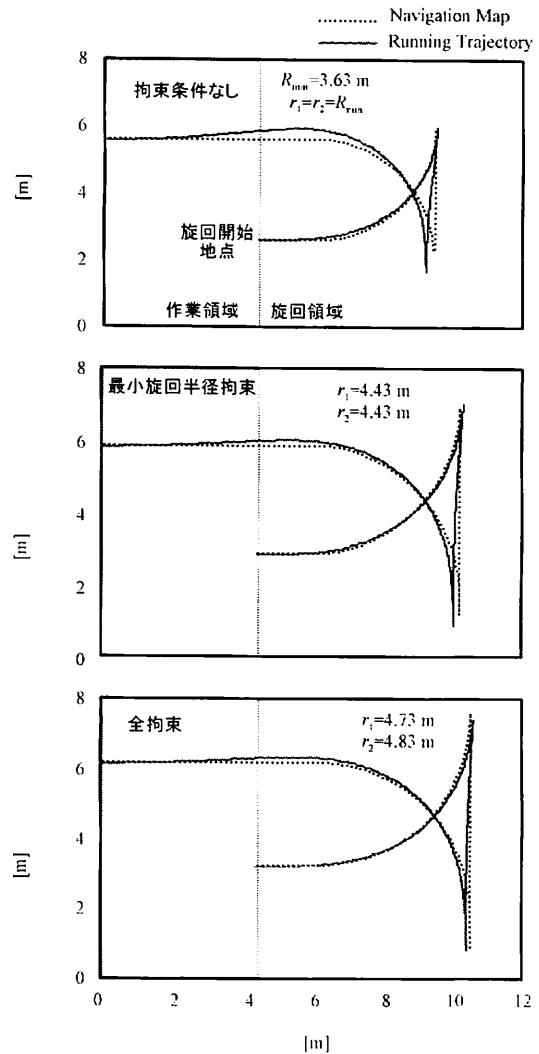


図 8 切り返し旋回のシミュレーション結果  
Fig. 8 Simulation results of Switch-Back turnings

### 3) 切り返し旋回のシミュレーション

図8に切り返し旋回のシミュレーション結果を示した。各種設定値は前進旋回のとおりである。BC間の後退区間における操舵制御は、第2報の作業計画マップの手法で制御ゲインを負にすることで対応した。拘束条件なしの走行では、経路を追従できずに作業開始地点で偏差を有している。それに対し全拘束の走行ではトラクタは経路を精度よく追従し最後の調整区間で偏差が収束できた。これら3走行において、作業開始地点での横方向偏差は拘束条件なしが31cm、最小旋回半径拘束が9cm、全拘束が5cmとなり、切り返し旋回でも2拘束条件を適用することの有効性が証明された。

### 2. ほ場実験

本報で開発した手法を用いてほ場で実機実験を行った。実機実験に用いたロボットシステムは既報において開発されたものである。航法センサにRTK-GPSとFOGを用いて1.5m/sの作業速度で目標経路からの偏

差が r.m.s. 値 6 cm で作業することが可能である。前進旋回、繰り返し旋回共に異なる走行速度で実験を行った。繰り返し旋回に関しては既報で用いた従来の手法との精度の比較を行った。

### 1) 車両パラメータの同定

前節のシミュレーションで用いた旋回半径は式(16)で記述される線形モデルをもとに算出されたものであり、実機に適用することはできない。実機実験を行うに際して、これらに代わって車両特性を同定する式を得るための基礎実験を実施した。舵角を8段階（ $-40^\circ$ 、 $-30^\circ$ 、 $-20^\circ$ 、 $-10^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ ）において定常円旋回を速度別に行い、そのとき得た軌跡から旋回半径を計算した。走行速度は4段階（0.35 m/s, 0.55 m/s, 0.83 m/s, 1.30 m/s）とし、これ以後旋回はこれらの速度（変速段）で行うものとする。供試は場は北海道大学農学部附属農場小麦刈り跡地であり、実験当日の土壌は適度に乾燥していた。この結果を表1に示した。走行速度の変化による旋回半径の変化はほとんど見られない。左右の旋回半径は若干の違いが見られるが、これは供試車両の操舵機構に起因すると思われる。本表の各速度における $\pm 40^\circ$ の旋回半径が、最小旋回半径拘束に適用する左右の最小旋回半径となる。

最大操舵速度拘束を計算するためには、式(21)のように舵角を旋回半径の関数として表わす必要がある。ここでは表1の結果を用い、累乗関数を近似曲線として速度別、左右の旋回別に旋回半径を計算した。また供試車両の最大操舵速度に関しても合わせて実験を行い、 $U_{max} = 25^\circ/s$  という値を得た。

### 2) 前進旋回

上述の4種類の走行速度で前進旋回を行った。ほ場に2本の平行な経路を生成し、その2本を結ぶ旋回経路を生成した。行程幅と調整区間の距離はシミュレーションと同じくそれぞれ3mと2mに設定した。図9に走行速度0.55 m/sのときの走行結果を示した。上図は旋回軌跡と生成された経路を表わす。本走行は左旋回であり、実線が走行軌跡、破線が生成された経路を示している。作業開始地点では走行軌跡と目標経路がほぼ重なり精度よく次行程に移行できた。しかし旋回の左上付近で70 cmの偏差が見られた。ここは経路の旋回半径が最も小さい区間であり、ステアリングコントローラが曲線経路に追従しきれなかった可能性がある。本研究で考案したステアリングコントローラは、第2報で報告したように前方注視距離 $L$ 先の目標点 $\xi_d$ に対して、次式のように操舵角 $\delta$ を計算する。

$$\delta = a_1 d + a_2 \Delta\phi \quad (24)$$

ここで $d$ は目標経路からの横方向偏差、 $\Delta\phi$ は $\xi_d$ に対する車両の方位偏差、 $a_1$ 、 $a_2$ は制御ゲインである。

この式は前方注視距離の長さによって $\Delta\phi$ の大きさが影響を受けることを表している。特に曲線でその影響は大きくなり、 $L$ が長いと車両の追従精度が悪化すること

表1 供試車両の旋回半径

Table 1 Turning radius of tested vehicle

Steering angle [deg]	Travel speed [m/s]			
	0.35	0.55	0.83	1.3
-40	3.50	3.54	3.53	3.52
-30	4.81	4.86	4.86	4.89
-20	7.52	7.58	7.63	7.76
-10	16.18	16.24	16.50	17.08
10	16.75	16.57	16.80	16.37
20	7.60	7.58	7.65	7.68
30	4.79	4.80	4.83	4.93
40	3.45	3.47	3.49	3.60

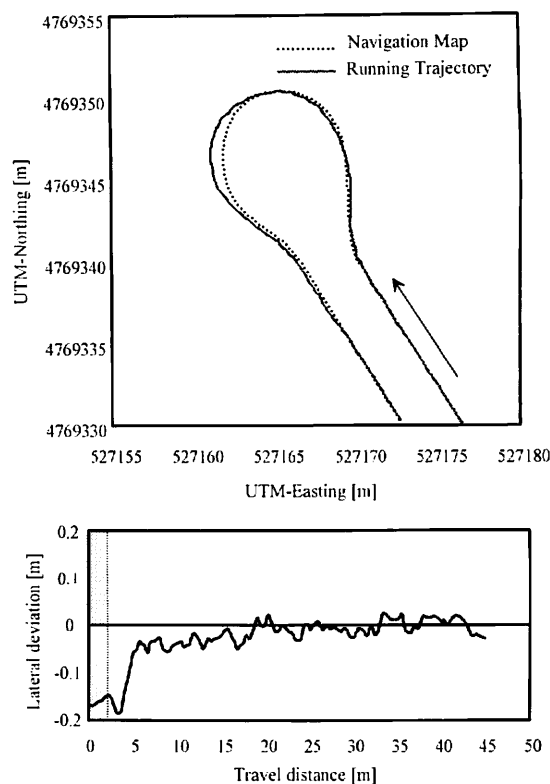


図9 走行速度0.55 m/sのときの前進旋回の走行結果  
Fig.9 Guidance result of forward turning at 0.55 m/s of travel speeds

が予想される。本研究で用いた $L$ の長さは3.5mであるが、これ以上 $L$ を短く設定すると算出される操舵角が発散してしまい、経路を追従できなくなることが走行実験で明らかとなった。このような問題を解決するためには、曲線追従に適したステアリングコントローラを新たに設計する必要があるであろう。

下図は横方向偏差の推移である。着色部分は旋回領域を表わし、この部分は2mの調整区間である。作業開始地点以降僅かに偏差が増加して17cmを記録したものの、この後は安定して走行することができた。他の3走行に関しても似たような傾向を示し、これは本手法が走行速度に関らず安定して旋回できることを証明する。表

表 2 前進旋回の枕地距離と最大横方向偏差

Table 2 Distances of head land and maximum lateral deviations of Forward turnings

Travel speed [m/s]	Distance of head land [m]	Lateral deviation at beginning of row [cm]
0.35	11.87	14
0.55	12.12	17
0.83	13.63	20
1.30	15.85	16

表 3 切り返し旋回の枕地距離と最大横方向偏差

Table 3 Distances of head land and maximum lateral deviations of Switch-Back turnings

Travel speed [m/s]	Distance of head land [m]	Lateral deviation at beginning of row [cm]
0.35	6.81	15
0.55	6.88	17
0.83	6.94	28
1.30	6.94	27
0.55*	5.54	74

\*Conventional method

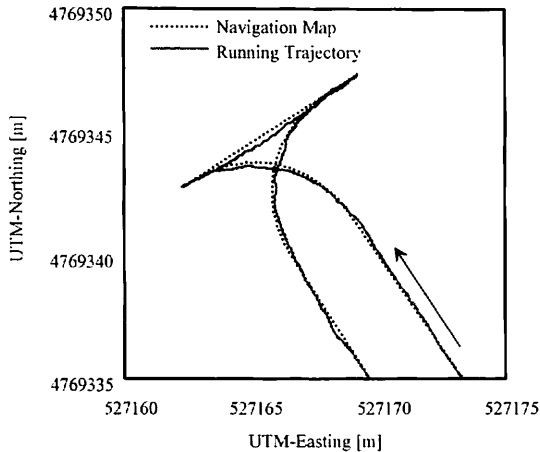


図 10 走行速度 0.55 m/s のときの切り返し旋回の走行軌跡と作業計画マップ

Fig. 10 Running trajectory and Navigation map of Switch-Back turning at 0.55 m/s of travel speeds

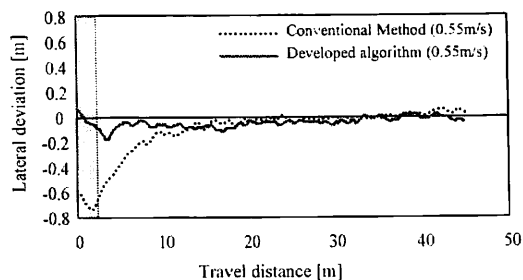


図 11 切り返し旋回における従来法と本手法との比較

Fig. 11 Comparison between conventional switch-back turning and developed algorithm

2) 枕地に要した距離と作業開始地点以降の最大偏差を走行速度別にまとめた。最大偏差は走行速度が大きくなってもほとんど差は見られない。枕地の距離も 1.3 m/s では 15.85 m と比較的大きくなるものの、0.35 m/s では 11.87 m に抑えることができた。

### 3) 切り返し旋回

切り返し旋回も同じく 4 種類の走行速度で実験を行った。また比較対象として、1 章で述べた従来法による切り返し旋回 (0.55 m/s) も行った。図 10 に本報の手法に

よる 0.55 m/s の旋回軌跡と生成された作業計画マップを示した。後退動作中に最大 30 cm 偏差が生じたものの、旋回全体での偏差の r.m.s. 値は 20 cm となり、精度よく経路を追従している。図 11 に従来法で旋回を行ったときの走行精度の比較を示した。本図も図 9 と同じく作業開始地点より 2 m 手前からの横方向偏差の推移を表わしている。本報の手法による旋回では作業開始地点以降偏差が 20 cm 以下に抑えられているのに対し、従来法では 70 cm 以上の偏差を有し、2 m の調整区間で偏差を 20 cm 以下に収束させることができなかった。表 3 に各走行の枕地の距離と作業開始地点以降の最大偏差を示した。本報で考案した手法において、0.35 m/s、0.55 m/s に関してはほぼ同程度の精度が得られたが、0.83 m/s、1.30 m/s に関しては偏差が約 10 cm 大きくなった。枕地の距離は 4 走行とも同じような結果が得られ、走行速度が増加しても枕地距離を必要としないことがわかった。一方従来法は枕地の距離が本報の手法より約 1.3 m 短いものの、偏差は 74 cm と大きい。調整区間の距離をあと 1.3 m 大きくしたとしても約 60 cm の偏差を有することが図 11 から明らかであり、従来法と比べて本手法の有効性が証明された。

## IV 摘 要

ロボットトラクタのための枕地旋回の経路を生成する手法を、前進のみ（前進旋回）と前進と後退（切り返し旋回）を用いて旋回する場合の 2 通りについて提案した。

1) 経路生成には 3 次スプライン関数を用いた。トラクタの車両特性に関する拘束条件、「最小旋回半径拘束」と「最大操舵速度拘束」を提案し、生成された経路がこれらの条件を満たさないときには経路を再計算する。

2) 生成された経路に対してシミュレーションを行った結果、拘束条件なし、または最小旋回半径拘束のみを適用して生成した経路よりも、最小旋回半径拘束と最大操舵速度拘束の 2 つの拘束条件を適用した経路のほうが精度よく経路を追従できた。

3) ほ場で実機実験を行った結果、前進旋回では 4 つの走行速度に対して作業開始以降の偏差を 20 cm 以下に抑えることができた。切り返し旋回は従来法との走行



精度の比較を行い、その有効性を確認した。

### 参 考 文 献

- 1) 木瀬道夫, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾日出男: RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット (第1報), 農機誌, 63(5), 74-79, 2001
- 2) 木瀬道夫, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾日出男: RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット (第2報), 農機誌, 63(5), 80-85, 2001
- 3) 鳥巢 諒, 田中健一, 井前 譲, 石川 隆: 最適制御理論による枕地最短旋回時間問題 (第1報), 農機誌, 59(4), 3-10, 1997
- 4) 鳥巢 諒, 田中健一, 井前 譲: 最適制御理論による枕地最短旋回時間問題 (第2報), 農機誌, 60(3), 45-53, 1998
- 5) 武田純一, 鳥巢 諒, 田中健一, 井前 譲: 人の操舵特性を考慮した枕地の最短旋回時間問題 (第1報), 農機誌, 61(2), 147-155, 1999
- 6) 鳥巢 諒, 武田純一, 田中健一, 井前 譲: 人の操舵特性を考慮した枕地の最短旋回時間問題 (第2報), 農機誌, 61(4), 85-93, 1999
- 7) 小森谷清, 谷江和雄: スプライン曲線による車輪移動ロボットの軌道制御, 日本ロボット学会誌, (8)2, 133-143, 1990
- 8) 松野文俊, 浅野俊雄, 坂和愛幸: 環境に拘束されたフレキシブル・マニピュレータのモデリングと位置と力の動的なハイブリッド制御, 日本ロボット学会誌, (11)3, 419-428, 1993
- 9) 尾崎弘明, 丘 華, 林 長軍: B スプラインを用いるマニピュレータの軌道最適化におけるコンプレックス法の適用, 日本ロボット学会誌, (14)4, 560-566, 1996
- 10) 桜井 明, 菅野啓祐, 吉村和美, 高山文雄: C によるスプライン関数, 東京電機大学出版局, 1-19, 1993
- 11) 小池慎一: C による科学技術計算, CQ 出版社, 207-244, 1994
- 12) 阿部正人: 自動車の運動と制御, 山海堂, 49-66, 1992
- 13) E. ハイラー, G. ワナー, 蟹江幸博: 解析教程, シュプリンガー・フェアラーク東京株式会社 140-149, 1997 (原稿受理: 2001年8月16日・質問期限 2002年5月31日)

### コ メ ン ト

#### [読者のコメント]

この手法を用いることにより、走行時の土壌条件が変化しても設定経路に追従することが可能であると思われるが、どのような土壌条件の際にもっとも有効でしょうか。また、車速が増加しても旋回半径がそれほど変わらないのは何故でしょうか。

#### [コメントに対する著者の見解]

本報では各操舵角における車両の旋回半径のデータが一つの土壌条件(小麦刈り跡地)に対してしか用意されていませんが、このほかに牧草地や湿った土壌などの複数の土壌条件に対する旋回パラメータ(蛇角と旋回半径の関係)をデータベース化することで様々なほ場条件に

対応することができると考えています。よってトラクタが走行するのも困難なぬかるんだ土壌でない限り、特に土壌条件に対する得手・不得手はないものと思われます。また車速に対する旋回半径の変化量が少ないことについてですが、本文中式(2)から速度に対する車両の旋回半径の変化量は旋回パラメータ  $c$  に影響されます。 $c > 0$  でオーバーステア,  $c < 0$  でアンダーステア,  $c = 0$  でニュートラルステアとなりますが、供試車両の特性がニュートラルステアに近かったのではないかと思います。さらに本報で考慮した速度範囲 0.35 m/s から 1.35 m/s では走行速度が小さすぎたことも一因であると考えられます。