

RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット (第2報)*

—作業計画マップによるほ場作業の自律化—

木瀬道夫*¹・野口 伸*¹・石井一暢*¹・寺尾日出男*¹

要 旨

ロボットトラクタが通年でほ場作業を行うには、作業に応じて経路、走行速度、PTO、3点ヒッチの操作などを設定・変更しなくてはならない。このような軌道生成と作業計画の2つの問題を解決するために、経路情報のみならずPTOのオン・オフ、変速段数などのロボットへのコマンド情報を含んだ、「作業計画マップ」を考案した。

開発したシステムはナビゲーションセンサにRTK-GPSと光ファイバージャイロスコープ (Fiber Optical Gyroscope ; FOG) を採用した。無人ロータリ耕うん作業を行った結果、1.5 m/s の作業速度で目標経路からの偏差が6 cm (r.m.s. 値) で作業することができた。

[キーワード] 作業計画マップ, ほ場作業ロボット, RTK-GPS, FOG

Field Mobile Robot navigated by RTK-GPS and FOG (Part 2)*

—Autonomous operation by applying navigation map—

Michio KISE*¹, Noboru NOGUCHI*¹, Kazunobu ISHII*¹, Hideo TERAO*¹

Abstract

An Autonomous tractor that is able to utilize for all type of operations on fields requires travel in a relatively wide speed range, and has to have a mission planner that controls PTO, transmission, and engine speed as well as path planner. In this paper, the Navigation map, which has not only desired path but also settings of PTO, transmission, engine speed, and other functions as commands to the tractor was invented in order to work out both problems of operation planning and path control.

The developed system adopted an RTK-GPS and a FOG as navigation sensors. It could autonomously perform rotary tillage with 6 cm error from scheduled path at 1.5 m/s by applying the navigation map.

[Keywords] Navigation map, autonomous tractor, RTK-GPS, FOG

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。既に農用移動ロボットの研

究開発は国内外を問わず盛んに行われてきた。幾つか例を挙げると、行本ら¹⁾による耕うんロボットの開発、井上ら²⁾によるGPSとジャイロのセンサフュージョン、長坂ら³⁾による自動走行田植機の開発などがある。行本らの耕うんロボットはナビゲーションセンサに自動追尾式トータルステーションと地磁気方位センサを用いて、矩形区画のほ場をロータリ耕うんするものであり、ほ場の区画データをロボットに与えることによって自ら経路計画を行い、往復耕と回り耕を行うシステムである。これらの作業を0.5 m/sの走行速度、目標経路に対して5

* 2000年4月 第59回農業機械学会年次大会(新潟大学)にて一部講演

*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

cm以下の誤差で走行できる自律走行システムである。井上らのシステムはDGPSと光ファイバージャイロの観測データにカルマンフィルタを適用して測位精度の向上を図り、目標経路に対して10cm以下の誤差でロータリ往復耕を実現している。長坂らはRTK-GPSとFOGを航法センサに用い、水田という直進性の維持が困難であるほ場において、目標直線経路からの偏差が10cm以下と高い直進性を有した自動走行田植機を開発した。この他にも、マシンビジョンによる作物列追従¹⁾や、草地における自動走行車両の開発²⁾などの試みがなされている。

しかしこれらのロボット・自律走行車両はいずれもある特定の作業を対象に開発されたものであり、このまま他の作業に転用することは困難である。例えばロータリ耕うんは区画を塗りつぶせばどのような経路を走行しようとも基本的に自由であるが、薬剤散布作業など作物列が存在する作業では作物列によって走行経路が制限される。目標経路の生成のみならず、走行速度、3点リンクヒッチやPTOの操作も作業に合わせて設定・変更する必要があり、耕うんロボットをそのまま薬剤散布作業に適用することはできない。逆にマシンビジョンを用いたナビゲーションシステムを作物列のない耕うんや播種などの作業に適用できないことは自明である。

そこで本研究は、作業の種類ごとに目標経路や変速段数などの情報を持つ、「作業計画マップ」をGIS³⁾によって作成することによって、軌道生成と作業計画の2つの問題を解決することを試みた。目標経路を点列を用いて表現し、それぞれの点に変速段数や3点リンクヒッチ、PTO操作などを属性として付加することで、作業計画マップの変更によって様々な作業を行うことを可能にした。さらに目標経路が点列で構成されていることから、曲がった経路を表現することも可能である。これにより、矩形ほ場以外での作業や格納庫-ほ場間の移動など任意経路の走行も可能となる。また播種時の走行軌跡を次回以降の目標経路とすることによって、さらに精度の高い自律走行も実現できる。本研究では開発したシステムのアルゴリズムと無人耕うん作業の結果について報告する。

II 自律作業システム

1. システム構成

図1に本研究で構築した自律作業システムの概略を示した。自律作業システムはロボットトラクタ、航法センサであるRTK-GPSとFOG、傾斜補正用の姿勢角計測センサIMU、さらにこれらを統括する制御コンピュータによって構成される。

ロボットトラクタは市販車（株）クボタMD77）をベースに（株）クボタがロボット車両用に改造を加えたものである。制御項目として、操舵、前進・停止・後退の切り替え、変速、3点リンクヒッチの昇降、スロットル開

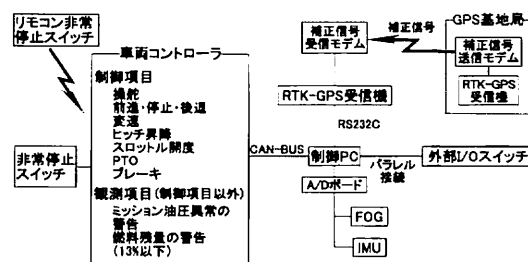


図1 自律作業システム概略図

Fig. 1 Schematic diagram of the robot system

度（最大、もしくは手動設定値の2段階）、PTOのオン・オフ、ブレーキのオン・オフがコンピュータでコントロール可能である。またこれらの制御項目はすべて観測でき、その他にミッション油圧異常の警告、燃料が13%以下になると残量警告を発することができる。さらに安全対策として車体外部にエンジン非常停止ボタンを配し、またリモコンでもエンジンを停止することができる。これらの機能はトラクタに搭載された車両コントローラが制御する。車両コントローラはCAN-BUS⁷⁾によって外部機器と通信されるため、制御コンピュータだけでなく、他のECUによっても制御することができる。

2. 航法センサ

RTK-GPSには（株）トリンプル製MS750を採用した。MS750の計測精度は2cm、サンプリング周波数は20Hzである。RTK-GPSで取得したデータは、緯度、経度、位置データの質（得られた解がFIX解（リアルタイムキネマティック測位による解）かどうかを表わす）、走行速度である。

GPSから得られた位置情報はWGS-84⁸⁾系の緯度・経度で表されるため、車両制御に利用するためにはこれらを距離系座標に変換する必要がある。本研究では緯度・経度座標をNIMA（National Imagery and Mapping Agency）によって定義されたUTM（Universal Transverse Mercator Grid⁹⁾に変換することでm単位によって表現された絶対座標を得た。UTMではメルカトル図法に基づいて平面に投影された世界地図を、緯度方向に8度、経度方向に6度のグリッドに分割し、それぞれのグリッド単位で座標変換を行う。

車両方位の計測にはFOG（JAE, JG-35FD）を採用した。JG35-FDは時間ドリフト0.5°/h、0.01°の分解能で車両の相対方位を計測することができる。

またGPSアンテナをキャビン上部に取りつけたことからGPSデータの傾斜補正を行う必要がある¹⁰⁾。このため姿勢角装置IMU（JAE, JCS-7401A）をキャビン内部に装着した。

III 作業計画マップとロボット制御アルゴリズム

1. 作業計画マップの構成

図2に作業計画マップの概念図を示した。作業計画

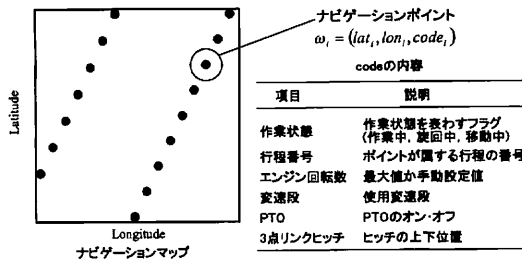


図2 作業計画マップ概念図

Fig. 2 Concept of Navigation map

マップは3次元ユークリッド空間 E^3 の部分集合 Ω として定義される。

$$\Omega = \{\omega_i | \omega_i \in E^3, 0 < i < N\} \quad (1)$$

ただし $\omega_i = (lat_i, lon_i, code_i)$ は緯度, 経度, コードを要素とする点であり, また N はその個数である。

コードは64ビット整数で表わされる。コードには図中の表に示される6種類のデータがビット単位で記号化されている。作業状態, 行程番号といった作業内容に関する情報は旋回位置の検出と作業計画マップの抽出に用いられている。またスロットル開度, 変速段, PTO, 3点ヒッチはロボットへの動作命令を表わし, 作業に応じてこれらを設定・変更することで多様な作業に対応できる。

2. 作業計画マップの生成

作業計画マップの生成法は2つの方法がある。一つはGISソフトウェアを用いる手法である。これはほ場に作業幅に応じて平行な経路をコンピュータ上で生成することによって行う。本手法は耕うん, 施肥, 播種・移植などの目標経路があらかじめ存在しない作業時に使う。

もう一つは実際の走行軌跡を目標経路とする方法である。播種以降の作業は播種時の軌跡を記録して作業計画マップとすることで, さらに精度の高い目標経路を得ることができる。また播種を有人で行い, その後の作業にロボットを使用する場合にも有効である。

図3に耕うん作業用に生成した作業計画マップを示した。一番右が第一経路であり, 全部で4行程のロータリ耕うん作業である。本図からも明らかなように, 作業計画マップには旋回のための目標経路が存在しない。それぞれの行程の始点から7m, 終点から7mの部分に含まれるナビゲーションポイントのコードの作業状態データには旋回を表わすフラグが記号化されており, この旋回フラグを復号したときロボットは旋回ルーチンに移行する。本作業計画マップは自作したGISソフトウェアによって生成した。これは第1行程の始点と終点を与えることによって, その経路に等間隔で平行な経路を生成することができる。

3. 自律作業アルゴリズム

図4に本システムによる自律作業のフローチャートを示した。作業計画マップや作業内容の初期設定を行った

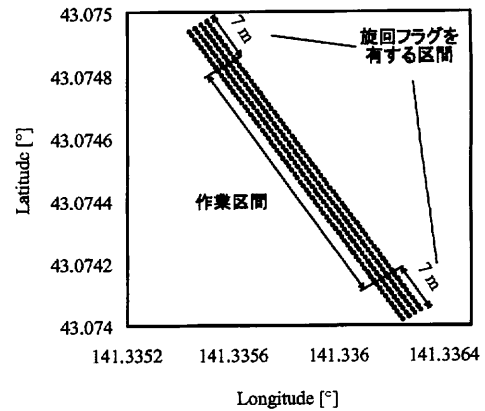


図3 耕うん作業の作業計画マップ

Fig. 3 A Navigation map for autonomous rotary tillage

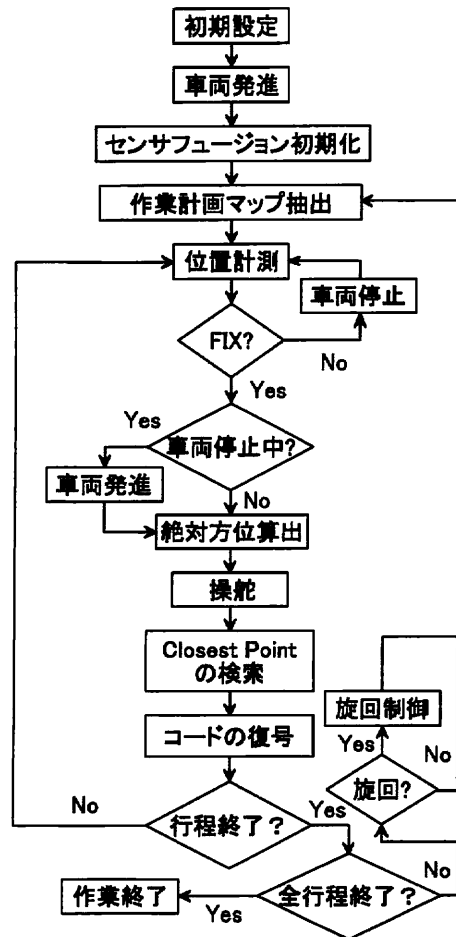


図4 マップベースガイダンスのフローチャート

Fig. 4 Flow chart of map base guidance

後, 外部I/Oスイッチの合図によりロボットは発進する。ロボット発進後すぐにセンサフュージョンのための初期化を行う。これは本研究がRTK-GPSとFOGのセンサフュージョンによって絶対方位を算出しているためである。この手法については第1報で既述した。次にこれから作業する行程の作業計画マップを, 全行程作業計

画マップから抽出する。その後制御ルーチンに移行する。RTK-GPS と FOG によって車両位置と相対方位を計測する。このとき RTK-GPS から高精度測位を表わす FIX 解が得られなければ、ロボットは FIX 解が得られるまで作業を停止する。FIX 解が得られれば車両の絶対方位を算出し、後述の方法により目標操舵角を決定、操舵を行う。次に作業計画マップ Ω の中から現在位置に最も近いナビゲーションポイント (Closest Point) を検索する。そのナビゲーションポイントのコードを復号し、復号されたデータに基づいて変速段数、3 点リンクの操作などロボットの動作を決定する。さらに現行程の終端位置に到達したかどうかを作業状態フラグによってチェックする。現行程の終了ならば、総行程数と比較して全行程を完了したかどうかを調べる。次行程のある場合は旋回動作に、全行程を完了した場合はロボットは停止、作業を終了する。

4. ステアリングコントローラ

車両の操舵制御において、操舵角を目標経路に対する車両の横方向偏差と方位偏差の関数として表わすことが一般的である¹¹⁾。以下に本研究における横方向偏差と方位偏差の定義とその算出アルゴリズムについて記述する。

1) 横方向偏差

先に定義したナビゲーションポイント ω_i から、コード (code_{*i*}) を省いた $\omega_i^* = (lat_i, lon_i)$ を再定義し、2 次元ユークリッド空間 E^2 の部分集合である作業計画マップ Ω^* を以下のように定義する。

$$\Omega^* = \{\omega_i^* \mid \omega_i^* \in E^2, 0 < i < N\} \quad (2)$$

図 5 にステアリングコントローラのアルゴリズムを示した。本図は RTK-GPS による UTM 座標系であり、Y 軸方向が北を指している。 ϕ は Y 軸に対するロボットの絶対方位、 ϕ_d は目標方位、そして d 、 $\Delta\phi$ がそれぞれ本研究で定義する横方向偏差と方位偏差である。

現在のロボットの位置ベクトルを $\eta \in E^2$ とすると、 η から Ω^* の中の最も近い点 ω_{c1}^* と次に近い点 ω_{c2}^* は以下のように求められる。

$$\omega_{c1}^* = \{\omega_i^* \mid \min_{i=1}^N (\|\omega_i^* - \eta\|), \omega_i^* \in \Omega^*\} \quad (3)$$

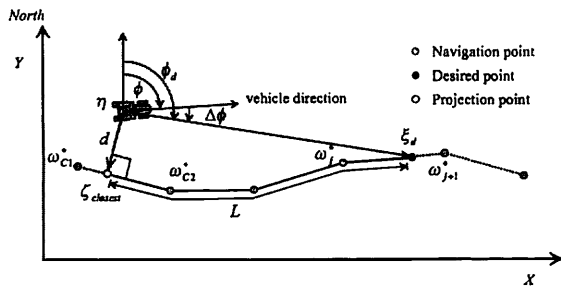


図 5 ステアリングコントローラのアルゴリズム
Fig. 5 Algorithm of the steering controller

$$\omega_{c2}^* = \{\omega_i^* \mid \min_{i=1}^N (\|\omega_i^* - \eta\|), \omega_i^* \in \Omega^*, \omega_i^* \neq \omega_{c1}^*\} \quad (4)$$

ただし $\|\cdot\|$ はベクトルのノルムを表わす。

すると閉空間 $[\omega_{c1}^*, \omega_{c2}^*]$ は以下の式で表わされる。

$$[\omega_{c1}^*, \omega_{c2}^*] = \{\zeta \mid \zeta = \lambda\omega_{c1}^* + (1-\lambda)\omega_{c2}^*, 0 \leq \lambda \leq 1, \zeta \in E^2\} \quad (5)$$

ここで ζ は ω_{c1}^* と ω_{c2}^* 間の内分点を表わす。以上から横方向偏差 d は以下の式で求められる。

$$d = \min_{[\omega_{c1}^*, \omega_{c2}^*]} \{\|\zeta - \eta\|\} \quad (6)$$

2) 方位偏差

方位偏差 $\Delta\phi$ は目標方位と車両の絶対方位の差で定義され

$$\Delta\phi = \phi - \phi_d \quad (7)$$

で与えられる。よって $\Delta\phi$ を得るためにはまずロボットの目標方位 ϕ_d を求めなくてはならない。今作業計画マップの方向が $\omega_{c1}^* \rightarrow \omega_{c2}^*$ であると仮定する。式 (6) を満たす ζ を $\zeta_{closest}$ とし、さらに制御パラメータとなる前方注視距離 L をある既知量として導入して、以下の 2 式を満たすナビゲーションポイント ω_j^* を Ω^* から検索する。

$$L_1 = \|\omega_{c2}^* - \zeta_{closest}\| + \sum_{i=C2+1}^j \|\omega_i^* - \omega_{i-1}^*\| \leq L \quad (8)$$

$$L_2 = \|\omega_{c2}^* - \zeta_{closest}\| + \sum_{i=C2+1}^{j+1} \|\omega_i^* - \omega_{i-1}^*\| \geq L \quad (9)$$

すると 2 点 ω_j^* と ω_{j+1}^* を結ぶ線分上の位置ベクトル ξ の動く範囲は、以下の式で表わされる E^2 の部分空間 Ξ となる。

$$\Xi = \{\xi \mid \xi \in E^2, \xi = \lambda\omega_j^* + (1-\lambda)\omega_{j+1}^*, 0 \leq \lambda \leq 1\} \quad (10)$$

ここで $\Delta L = L - L_1$ とおくと、以下の式を満たすベクトル $\xi_d \in \Xi$ が、前方注視距離 L を考慮した目標点である。

$$\|\xi_d - \omega_j^*\| = \Delta L \quad (11)$$

したがって、目標方位 ϕ_d は、

$$\cos\phi_d = \frac{(\xi_d - \eta) \cdot d_y}{\|\xi_d - \eta\|} \quad (12)$$

$$\phi_d = \cos^{-1} \left\{ \frac{(\xi_d - \eta) \cdot d_y}{\|\xi_d - \eta\|} \right\} \quad (13)$$

ただし d_y は Y 軸方向の単位ベクトルである。

以上から方位偏差 $\Delta\phi$ は式 (7) によって求めることができる。

3) 操舵角

操舵角 δ は横方向偏差 d と方位偏差 $\Delta\phi$ を用いて以下の式によって決定される。

$$\delta = a_1 d + a_2 \Delta\phi \quad (14)$$

ここで、 a_1 、 a_2 は制御ゲインである。 L 、 a_1 、 a_2 を走行速度別に適したルックアップテーブルを用意することで、様々な作業速度に対応できるようにした。今回は 1.5 m/s (作業中) と 0.2 m/s (旋回後の幅寄せ) の 2 つの走行速度に対して、それぞれ、 L 、 a_1 、 a_2 の組を用意した。これらの値は走行試験によって試行錯誤的に決定した。

本手法は従来手法とは異なり、逐次目標点を更新す

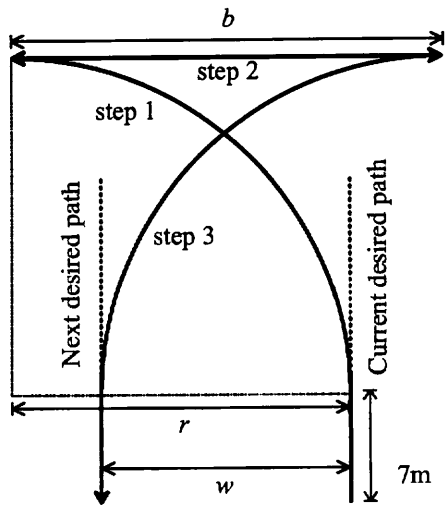


図6 旋回アルゴリズム
Fig. 6 Turning algorithm

ることによって目標方位を修正しながら走行するため、目標経路が直線でも操舵角を計算することができる。

5. 旋回アルゴリズム

図6に旋回アルゴリズムを示した。本手法は繰り返し動作を有した前進と後退を併用した方式であり、本図は左旋回の場合を示している。旋回アルゴリズムは以下の3つのステップで構成される。

1) 旋回速度まで減速し、7m直進したあと最大舵角で車両方位が90度変化するまで左旋回する。

2) 以下の式で計算される距離後進する。

$$b = 2r - w \quad (15)$$

ここで r はステップ1)で観測される実際の旋回半径、 w は行程幅である。

3) 最大舵角で車両方位が90度変化するまで左旋回する。

以上の3ステップで旋回行程は完了し、1)と3)の旋回半径が等しければ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。本方式では実際の旋回半径を再計算し、後退距離を路面変化に応じて修正している。これにより、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できる。さらに作業終了から7m直進する間に目標経路に対してフィードバック制御により幅寄せを行う。

IV 自律作業試験

北海道大学農学部附属農場において、図3で示した作業計画マップを適用した無人ロータリ耕うん作業を行った。その作業軌跡を図7に示した。このとき設定走行速度は、作業中が1.5m/s、旋回中が0.2m/sとし、これらの速度変更は作業計画マップに基づく変速と機関回転数の制御によって実現される。本図からの確かな位置で旋回を行ったことが分かる。また、変速や作業機の昇降、

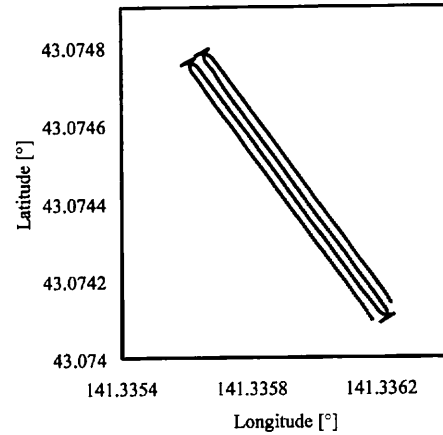


図7 耕うん作業走行軌跡
Fig. 7 A guidance trajectory of autonomous rotary tillage

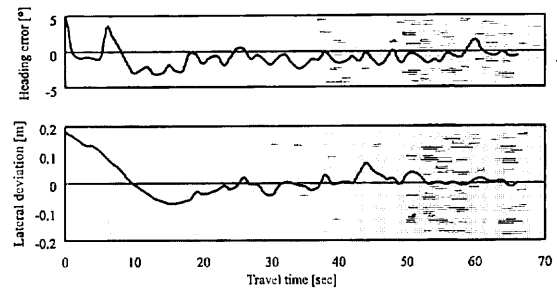


図8 自律耕うん作業時の横方向偏差と方位偏差
Fig. 8 A lateral deviation and a heading error in autonomous rotary tillage

PTOのオン・オフが作業計画通りに動作し、作業計画マップの有効性が確認できた。

図8は第3行程における旋回終了直後からの横方向偏差と方位偏差の推移である。横軸が走行時間、縦軸が偏差であり、着色部分は作業中であることを表わす。旋回終了直後の偏差は18cmと大きい。この偏差は作業を開始する7m地点までに完全には収束せず、作業開始地点で8cmの偏差が存在した。しかしその後は偏差が収束し、安定して走行できた。また車両方位偏差は旋回終了後10.0°と大きかったが、作業中のr.m.s.値は1.0°となった。以上のことから作業中の直進性は維持できたことがわかった。

表1に各行程の走行精度を示した。一番左の値が目標経路に対する車両の横方向偏差のr.m.s.値、2列目がその最大値、3列目が目標経路に対する車両の方位偏差のr.m.s.値を表わしている。これらは旋回後7mを除いた作業中の値を用いて算出した。横方向偏差に関してどの行程もr.m.s.で8cm以下の偏差で走行した。これは従来の有人耕うん作業と比較しても遜色ない精度である。方位偏差に関してr.m.s.で2.0°以下で走行することができ、高い直進性を得た。しかし横方向偏差の最大値は

表1 自律耕うん作業走行結果
Table 1 Results of autonomous rotary tillage

Path #	r.m.s. of lateral deviation [cm]	Maximum lateral deviation [cm]	r.m.s. of heading error [$^{\circ}$]
1	8	12	1.2
2	7	14	1.0
3	2	8	1.0
4	7	15	1.9
Total	6	15	1.3

すべて作業開始地点で記録されたものであり、図8で明らかとなった旋回とその後の幅寄せの精度の問題を裏づける結果がここでも得られた。

本試験はロータリ耕うん作業の速度としては速い1.5 m/sに設定した。これは本システムが耕うん以外の農作業にも応用できる可能性を示すものである。

V 摘 要

本研究は畑作・水田作・粗飼料生産作業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システムの開発を最終目的とした。

1) 航法センサとしてRTK-GPSとFOGを用いた。また供試ロボットトラクタはほとんどの機能をコンピュータで制御することができる。

2) 「作業計画マップ」と呼ぶ目標経路や変速段数などの情報を持つ作業マップをGISによって作成した。このシステムによって異なる作業に対しても対応できると考えられる。

3) 作業計画マップは緯度、経度、コードを要素とするナビゲーションポイントの集合で構成される。コードには各ナビゲーションポイントにおけるエンジン回転数、変速段、PTO、ヒッチ操作といったロボットへの動作命令や、行程番号などの作業内容に関する情報が記号化されている。

4) 構築したシステムの検証実験を行った。ロータリ耕うん作業を行った結果、1.5 m/sの作業速度で目標経

路からの偏差がr.m.s.値6 cmと高い直進性を得た。しかし旋回終了後の偏差が大きく、作業開始までにこの偏差を収束させることができなかった。この問題を解決するには、オンラインで幅寄せ経路を生成するといった新たな旋回法、幅寄せ法を考案する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Yukumoto, O., Matsuo, Y.: Navigation technology for tilling robots, Proceeding of mobile Int. symposium on agricultural Bus-system LBS and PA, 59-94, 1997
- 2) 井上慶一, 大塚寛治, 杉本光穂, 村上則幸, 黎文: 自律走行のためのGPSとジャイロのカルマンフィルタによるセンサフュージョン技術(第1報), 農機誌61(4), 103-114, 1999
- 3) 長坂善禎, 谷脇 憲, 大谷隆二, 重田一人, 佐々木泰弘: 自動走行田植機の開発(第1報), 農機誌61(6), 179-186, 1999
- 4) Pinto, F., Reid, J.: Heading angle and offset determination using principal component analysis, 1998 American Society of Agricultural Engineers Meeting, Paper No. 983113, 1998
- 5) 木瀬道夫, 野口 伸, 石井 暢, 寺尾日出男: DGPSを利用した農用移動ロボットのナビゲーション, 農機誌62(6), 145-153, 2000
- 6) 碓井照子: GISの現状と農学の課題, システム農学会誌16(2), 89-96, 2000
- 7) Freimann, R.: Autonavagation and Implement Controlled Process Automation on ISO-CAN Basis, Proceedings of Electronic Farm Communication with LBS, 65-87, 2000
- 8) National Imagery and Mapping Agency (NIMA): Department of Defense World Geodetic System 1984, NIMA Technical Report TR8350.2 Third Edition, 2000
- 9) Defense Mapping Agency (DMA): The universal grids: Universal Transverse Mercator (UTM) and Universal Polar Stereographic (UPS), DMA Technical Manual DMATM8358.2, 1989
- 10) 水島 晃, 野口 伸, 石井 暢, 寺尾日出男: 自律走行車両のGPS位置計測に関わる傾斜補正, 農機誌62(4), 146-153, 2000
- 11) 行本 修, 松尾陽介, 野口 伸, 鈴木正壯: 耕うんロボットシステムの開発, 農業機械学会誌, 60(4), 29-36, 1998 (原稿受理: 2001年6月1日・質問期限: 2001年11月30日)