



HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---------------------|---|
| Title | 耕うん作業を行う自律移動ロボットに関する研究 |
| Author(s) | 行本, 修 |
| Degree Grantor | 北海道大学 |
| Degree Name | 博士(農学) |
| Dissertation Number | 乙第5470号 |
| Issue Date | 1999-03-25 |
| DOI | https://doi.org/10.11501/3151631 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/51614 |
| Type | doctoral thesis |
| File Information | 000000336821.pdf |



耕うん作業を行う
自律移動ロボットに関する研究

行 本 修

① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩ ⑪ ⑫ ⑬ ⑭ ⑮ ⑯ ⑰ ⑱ ⑲ ⑳ ㉑ ㉒ ㉓ ㉔ ㉕ ㉖ ㉗ ㉘ ㉙ ㉚ ㉛ ㉜ ㉝ ㉞ ㉟ ㊱ ㊲ ㊳ ㊴ ㊵ ㊶ ㊷ ㊸ ㊹ ㊺

目 次

第1章 概説 (Nomenclature)

第1章 概説

1.1

1.2

1.3

1.4

1.4.1

1.4.2

1.5

第2章 概説システム

2.1

2.1.1

2.1.2

2.2

2.2.1

2.2.2

2.3

2.4

2.4.1

2.4.2

2.4.3

2.5

2.5.1

耕うん作業を行う

自律移動ロボットに関する研究

Studies on Autonomous Traveling Robot
to Perform Tilling Operations

1998年

生物系特定産業技術研究推進機構
基礎技術研究部

行本 修

耕うん作業を行う自律移動ロボットに関する研究

目次

量記号一覧 (Nomenclature)

| | |
|--------------------------|----|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 農用車両の自動化現状 | 1 |
| 1.2 耕うんロボットと自律走行システムの必要性 | 2 |
| 1.3 本研究の目的と範囲 | 3 |
| 1.4 自律走行の歴史と問題点 | 4 |
| 1.4.1 既往の研究史 | 4 |
| 1.4.2 既往研究の問題点 | 9 |
| 1.5 考察とまとめ | 10 |
| 第2章 車両システム試作 | 12 |
| 2.1 要素技術 | 12 |
| 2.1.1 要素技術の内容 | 12 |
| 2.1.2 要素技術の留意点 | 15 |
| 2.2 作業法と可能性 | 16 |
| 2.2.1 自律的作業方法 | 16 |
| 2.2.2 効果と可能性 | 18 |
| 2.3 車両システム | 19 |
| 2.4 試作1号機 (ALVA-I) | 20 |
| 2.4.1 ハードウェア構成 | 20 |
| 2.4.2 制御性能 | 23 |
| 2.4.3 性能評価 | 23 |
| 2.5 試作2号機 (ALVA-II) | 24 |
| 2.5.1 ハードウェア構成 | 24 |

| | | |
|-------|----------------------------|----|
| 2.5.2 | 制御性能 | 28 |
| 2.5.3 | 性能評価 | 29 |
| 2.6 | 試作3号機 (ROBOTRA) | 30 |
| 2.6.1 | ハードウェア構成 | 30 |
| 2.6.2 | 制御性能 | 34 |
| 2.6.3 | 性能評価 | 35 |
| 2.7 | まとめ | 36 |
| | | |
| 第3章 | 航法システム | 38 |
| 3.1 | 航法システムの現状 | 38 |
| 3.1.1 | システムの分類 | 38 |
| 3.1.2 | システムの現状 | 42 |
| 3.1.3 | 考察とまとめ | 46 |
| 3.2 | 地磁気方位センサシステム (TMS) の開発 | 50 |
| 3.2.1 | 地磁気とセンサの概要 | 50 |
| 3.2.2 | 傾斜補正法 | 53 |
| 3.2.3 | 磁気環境補正法 | 54 |
| 3.2.4 | 性能評価 | 58 |
| 3.2.5 | 考察とまとめ | 63 |
| 3.3 | 光波測距式位置計測システム (XNAV) の開発 | 64 |
| 3.3.1 | 計測原理 | 64 |
| 3.3.2 | システムの開発 | 68 |
| 3.3.3 | 性能評価 | 71 |
| 3.3.4 | 考察とまとめ | 73 |
| 3.4 | まとめ | 75 |
| | | |
| 第4章 | 走行制御アルゴリズムの開発 | 77 |
| 4.1 | はじめに | 77 |
| 4.2 | 地磁気方位センサシステム (TMS) による無人作業 | 78 |

| | | |
|---------|--------------------------|-----|
| 4.2.1 | 作業方法 | 79 |
| 4.2.2 | 制御システム | 80 |
| 4.2.3 | 支援システム | 84 |
| 4.2.4 | 作業の実行 | 85 |
| 4.2.5 | 評価と考察 | 92 |
| 4.3 | 光波測距式システム (XNAV) による無人作業 | 94 |
| 4.3.1 | 作業方法 | 94 |
| 4.3.1.1 | 作業の戦略 | 94 |
| 4.3.1.2 | タスクの分割と構成 | 95 |
| 4.3.2 | 制御システム | 97 |
| 4.3.2.1 | ティーチング走行モジュール | 97 |
| 4.3.2.2 | 作業計画モジュール | 99 |
| 4.3.2.3 | 走行制御 | 106 |
| 4.3.3 | 支援システム | 120 |
| 4.3.3.1 | 自己診断 | 121 |
| 4.3.3.2 | 異常時対応機能 | 123 |
| 4.3.3.3 | その他 | 126 |
| 4.3.4 | 作業の実行 | 127 |
| 4.3.4.1 | 経路計画 | 127 |
| 4.3.4.2 | 直進制御 | 129 |
| 4.3.4.3 | 180° 旋回 | 132 |
| 4.3.4.4 | 90° 旋回 | 133 |
| 4.3.4.5 | 幅寄せ | 136 |
| 4.3.5 | 評価と考察 | 139 |
| 4.4 | まとめ | 139 |
| 第5章 | 耕うんロボットの評価 | 143 |
| 5.1 | 評価方法 | 143 |
| 5.1.1 | 作業性能試験 | 144 |

| | | |
|---------|----------------------|-----|
| 5.1.2 | 取扱い試験 | 148 |
| 5.1.3 | 信頼性試験 | 149 |
| 5.2 | 作業状況 | 151 |
| 5.2.1 | 試験条件等 | 151 |
| 5.2.2 | 作業性能 | 153 |
| 5.2.3 | 取扱い性 | 159 |
| 5.2.4 | 信頼性 | 159 |
| 5.2.5 | その他 | 160 |
| 5.3 | 自律走行システムの展望 | 160 |
| 5.4 | 導入条件 | 161 |
| 5.5 | まとめ | 162 |
| 第6章 | 総括 | 165 |
| 6.1 | 序論 (第1章要旨) | 165 |
| 6.2 | 車両システム試作 (第2章要旨) | 166 |
| 6.3 | 航法システム (第3章要旨) | 167 |
| 6.4 | 走行制御プログラムの開発 (第4章要旨) | 169 |
| 6.5 | 耕うんロボットの評価 (第5章要旨) | 172 |
| 参考文献 | | 175 |
| Summary | | 187 |
| 謝辞 | | 197 |

量記号一覧 (Nomenclature)

- a : X 軸方向の磁気環境の補正值[V]
: 車両位置決めの調整値[m]
- A : 往復作業領域の x 軸方向の幅 (無人耕うん面積幅) [m]
- b : Y 軸方向の磁気環境の補正值[V]
- b_f : 前輪輪距[m]
- b_r : 後輪輪距[m]
- b_{wf} : 前輪幅[m]
- b_{wr} : 後輪幅[m]
- c : z 軸方向の磁気環境の補正值[V]
- d : 耕 深[cm]
- D : 総踏付距離[m]
- E_a : 無人作業能率[min/10a]
- E_{fa} : 無人圃場作業効率[%]
- E_{fo} : 圃場作業効率[%]
- E_m : 機械能率[min/10a]
- E_n : 正味機械能率[min/10a]
- E_o : 作業能率[min/10a]
- h : XNAV 反射標識の地上高[m]
: 内周 90 度旋回における旋回後の目標経路との偏差[m]
- i : 作業行程インデックス
: ティーチングセグメントインデックス
- j : 作業行程インデックス
- k : 周り作業の行程インデックス
: PI 制御における方位偏差の履歴遡りインデックス
- K : 操舵制御定数 [$^{\circ}$] または [ms]
- l_a : 前進方向への標識位置前方変換距離[m]
- l_k : QP の距離[m]
- l_{AB} : AB の距離[m]

- l_{AO} : AO の距離[m]
 l_{AP} : AP の距離[m]
 l_f : 後車軸中心から右前輪外側位置までの距離[m]
 l_{OB} : OB の距離[m]
 l_{OP} : OP 間の斜距離[m]
 l_{PB} : BP の距離[m]
 l_{rm} : 作業機中心から XNAV 標識までの距離[m]
 l_{rr} : 後輪中心から作業機中心までの距離[m]
 l_{wb} : 軸距[m]
 L : 内周 90° 旋回における後進距離[m]
 L_c : 線分 $O'C$ の長さ[m]
 L_a : 直進の平均振れ幅[cm]
 L_p : 直進の平行度[°]
 L_s : 直進性[cm]
 L_t : 直進の周期[m]
 M_h : 地磁気の水平分力[G]
 M_v : 地磁気の鉛直分力[G]
 N_{tr} : トラブル処理回数
 N_{trs} : トラブル停止回数
 n : 往復作業行程数
 n_u : 無人耕うん行程数
 P : 車両もしくはセンサ, 標識等のピッチング角, 進行方向前上がりを正とする[°]
 qp_i : 作業開始位置[m]
 qp_f : 作業終了位置[m]
 q_f : 走行停止位置[m]
 r_0 : 後進旋回終端時の後進旋回半径[m]
 r_1 : 後進旋回後の前進旋回半径[m]
 r_d : 目標走行経路[m]
 $r_d(j)$: 往復作業領域の j 行程目の x 軸方向の目標経路[m]

- $r(t)$: 時刻 t における横方向位置[m]
 r_{wf} : 前輪半径[m]
 r_{wr} : 後輪半径[m]
 R : 車両もしくはセンサ, 標識等のローリング角, 進行方向左上がりを正とする[°]
 R_a : 無人作業時間比[%]
 R_i : 非耕うん作業時間比[%]
 R_m : 有人作業時間比[%]
 R_o : 作業者拘束時間比[%]
 R_t : 教示作業時間比[%]
 R_{tr} : トラブル処理時間比 [h]
 S_a : 圃場総面積[a]
 S_{or} : 総はみ出し面積[m²]
 S_{ta} : 現在の舵角値 [°]
 S_{ta} : 無人耕うん面積[a]
 S_{tb} : 構造物面積[a]
 S_{tm} : 有人耕うん面積[a]
 S_{tp} : 実耕うん面積[a]
 S_{tr} : 相対舵角 [°]
 S_{tr} : 残耕面積[a]
 S_{tt} : 目標とする舵角 [°]
 S_{tt} : 耕うん可能面積[a]
 t_T : ASR における目標行程時間 [s]
 t_w : ASR-II における操舵制御時間 [ms]
 T_a : 総時間[min]
 T_{ao} : 無人作業時間 = 監視時間[min]
 T_c : 撤去時間[min]
 T_i : 初期設定時間[min]
 T_{itr} : 個別トラブル処理時間 [h]
 T_{mo} : 有人作業 時間[min]

- T_o : 機械作業時間 (拘束時間) [min]
 T_s : 設営時間 [min]
 T_{st} : 操舵時間 [s]
 T_t : 教示時間 [min]
 T_{tr} : トラブル処理時間 [h]
 v : 作業速度 [m/s]
 v_i : 時々刻々の速度 [m/s]
 v_o : 速度段に応じた機関定格回転時の標準速度 [m/s]
 V : 車両走行速度 [m/s]
 V_l : 左車輪の回転数 [rpm]
 V_r : 右車輪の回転数 [rpm]
 V_{st} : 操舵速度 [$^{\circ}$ /s]
 w : 作業幅 [m]
 W_a : 無人作業幅 [m]
 W_{ao} : 平均無人作業重複幅 [m]
 $x-y$: 圃場座標系
 x_i : ロボット位置 x 座標 [m]
 : 地上座標系 $x-y$ における P の x 座標 [m]
 $X-Y$: ROBOTRA の進行方向を Y 軸とし, 水平時の XNAV 光反射標識の点すなわち地上面における機体中心位置を (0,0) とする ROBOTRA 座標系
 y_i : ロボット位置 y 座標 [m]
 : 地上座標系 $x-y$ における P の y 座標 [m]
 y_b : 圃場区画境界位置 [m]
 (x, y) : 旋回中の後車軸中心位置 [m]
 (x_A, y_A) : 外周周り作業行程終点状態 χ_A における後車軸中心位置 [m]
 : 幅寄せにおける初期位置 [m]
 (x_B, y_B) : 後進旋回終端時の後車軸中心位置 [m]
 : 幅寄せにおける目標位置 [m]

- (x_f, y_f) : 前進旋回中の右前輪外側位置[m]
 (x_i, y_i, z_i) : $x-y$ 座標におけるターゲット点の座標 P の座標[m]
 (x'_i, y'_i) : 光反射標識位置をロール・ピッチ時に傾斜補正した $x-y$ 座標系の地上面における機体中心位置[m]
 (x_i, y_i, h_i) : 走行軌跡[m]
 (x_1, y_1) : 後進旋回後の前進旋回中心[m]
 (x_0, y_0, z_0) : $x-y$ 座標における基準局（原点）の座標[m]
 (x_s, y_s) : 内周周り作業行程終点状態における後車軸中心位置[m]
 (X_c, Y_c) : 車両の光反射標識を地上に投影した点の $X-Y$ 座標[m]
 (X_e, Y_e, Z_e) : 3次元地磁気方位センサの各軸検出コイルからの出力電圧 [V]
 (X_s, Y_s, Z_s) : 傾斜補正後の地磁気の X, Y, Z 成分[V]
- α, β, γ : 制御ゲイン
 α', β' : 制御ゲイン
 α_{AO} : OP と AP がなす角[°]
 α_{AP} : OP と OA がなす角[°]
 α_{OB} : OP と BP がなす角[°]
 α_{PO} : AP と OA がなす角[°]
 α_u : 車両固有の座標系 $u-v$ における車両の u 成分運動加速度[m/s²]
 α_v : 車両固有の座標系 $u-v$ における車両の v 成分運動加速度[m/s²]
 γ_f : 車両中心軸と距離 l_f を示す線のなす角[°]
 Δ_d : 作業ピッチ[m]
 Δr_i : ASR における横方向偏差[m]
 $\Delta r(t)$: 目標経路位置との横方向偏差[m]
 Δt : 時間ステップ[s]
 Δw : 作業跡の重複幅[m]
 Δx : 全幅寄せ量[m]
 Δy : 幅寄せにおける後進可能距離[m]
 $\Delta \phi(t)$: 目標方位との偏差[m]

- $\Delta \phi_i$: TMS 検出方位角と目標方位の偏差 [°]
- ζ : 幅寄せ難度
- ζ_r : 幅寄せ終了のしきい値
- θ : 前進旋回中の車両方位の変化量または前進旋回角 (y 軸を基準) [°]
- θ_A : χ_A における車両の進行方位 (y 軸を基準) [°]
- θ_B : χ_B における車両の進行方位 (y 軸を基準) [°]
- θ_H : 基準線 Oy と線分 OP がなす水平角 [°]
- θ_k : 基準線 Oy に対する車両の進行方位 [°]
- θ_o : χ_A からの後進旋回角 (y 軸を基準) [°]
- θ_{TB} : ASR における復行程の目標方位 [°]
- θ_{TG} : ASR における往行程の目標方位 [°]
- θ_v : 基準線 Oy と線分 OP がなす鉛直角 [°]
- ϕ : 地磁気の偏角 (方位角) [°]
- ϕ_c : X-Y 座標上の線分 O'C の傾き [°]
- ϕ_a : 目標走行方位 [°]
- ϕ_i : TMS 検出方位角 [°]
- : 傾斜補正を行った地磁気方位センサの方位角 [°]
- ϕ'_i : ROBOTRA 進行方位 ϕ_i と ϕ_a の差 [°]
- ϕ_i' : 磁気環境補正後の地磁気の偏角 (方位角) [°]
- χ_A : 各外周周り作業行程の終点状態
- χ_B : 後進旋回の終点状態
- χ_i : ティーチングセグメント
- ψ : 地磁気の俯角 [°]
- ψ_i : 操舵制御量 [°] または [ms]
- ψ_i : 離散系で表した舵角制御値 [°]
- $\psi(t)$: 時刻 t における舵角制御値 [°]

第1章 序 論

現在、世界の食料需給事情は人口の増大により慢性的な供給不足傾向にあり、将来的にも明るい見通しは少ない。一方日本国内については、米だけが供給過剰であって、近年は野菜類を含め国内自給率の低下傾向が著しい。この傾向に歯止めをかけ、多少なりとも自給率を向上させようとする動きがある。しかし経済と国際協調の観点からは、国内産農産物の大幅な価格低下と、さらなる農産物輸入の促進が求められている。今後の日本農業に対しては、経営規模拡大による生産コストの圧縮、農産物の高付加価値化などの方向性が示されているが、農地所有の非流動性や農業後継者不足など不安要因もある。

このような情勢を打開するための一手段として、本研究は農業機械の自動化、無人化によって労働生産性の画期的な向上を図ることを主なねらいとしたものである。

また、本研究は昭和62年度から開始した「自律走行システムの研究」を始まりとして、研究課題名は「圃場作業ロボット」から「耕うんロボット」へと変遷してきたが、一貫して同一の目的のもとで約10年間にわたり研究を進めてきたものである。

1.1 農用車両の自動化現状

農用車両、すなわち圃場で使用される車両系農業機械の運転は、車両そのものを然るべき位置に誘導する「車両操作」と、作業機を土壌や作物などの対象に対して適切な状態に調整する「作業機操作」にわけられる。さらに、圃場を前にしてどのように作業を進めていくべきかの戦略を決定し、かつこれを効果的に実践できるよう燃料の補給や作業機の交換、各部の整備・調整を行う、「企画・管理」も広い意味で運転に含まれよう。

作業機操作の自動化は、古くはトラクタの油圧システムを利用したドラフトコントロールやポジションコントロールなどがあり、昭

和50年代後半から電子制御技術を応用したロータリ耕うん作業機の耕深・水平制御機構などが商品化され、普及してきている。また作業中の調整箇所が多い自脱型コンバインも、昭和50年頃から刈高さ調整、こぎ深さ調整、機体水平維持、及び一定負荷運転となるような速度制御などの作業機操作の自動制御機能を備えたものが商品化され、同時に稲株の条を追尾する自動操向機能により、作業機操作に併せ車両操作の一部が自動化された。

これらの結果、乗用トラクタのロータリ耕うん作業では、作業機操作は殆ど行う必要がなく、走行経路を維持するための車両操作だけを行えば事足りる状況になっている。また、自脱コンバインによる収穫作業では、枕地の処理と回行時以外は殆ど手放し状態で作業が可能になった。

このように、現在農用車両の運転に関しては、作業手順の立案や経路設定など企画・管理は旧来どおりであるが、作業機操作は着実に自動化がなされ、自脱型コンバインに限定されてはいるものの車両運転の一部も自動化されている。

1.2 耕うんロボットと自律走行システムの必要性

これらの自動化は、主にオペレータの労働負担の改善に著しく貢献し、また、その効果としてゆとりをもって作業状態を観察できることから作業精度面においても若干の貢献があったと推測される。しかし、相変わらず1名のオペレータが車両に乗っている必要があるため、投下労働時間（10aあたり作業時間）の減少にはあまり貢献していないし、単位時間・一人あたりの処理量が増加したわけではないので作業能率の面でも特段の貢献はなかったと考えられる。

将来的には、投下労働時間の減少や作業能率の向上に寄与しうる形で車両系農業機械の自動化が図られるべきである。その第一歩は前述のような自動化過程で未着手である分野、すなわち走行のための「車両操作」の無人化を図るとともに、1枚の圃場に対する作業経路計画のような「企画・管理」の部分も自動化・無人化していく

ことである。ただし単なる遠隔操縦は、車両自身に人は乗らず無人で運転されるが、車両から離れた場所で常時1名のオペレータが操縦装置についていなければならず¹⁾、投下労働時間の減少にはつがらないので本研究の対象から除外する。

なお、無人化を図っていくための技術的な背景として、近年、電子技術・情報処理技術などの発展とその応用技術であるメカトロニクス技術やロボット技術の進展には著しいものがあり、センサやアクチュエータ、自動制御技術を農業機械分野に導入していくことも比較的容易になった点が挙げられる。

1.3 本研究の目的と範囲

本研究の目的は、航法システムにより得られた車両の位置・方位情報等をもとに、車両自身が自ら状況を判断して行動を決定して車両各部を制御する、すなわち自律的に作業を実行するための車両系農業機械の無人化機構及びシステムの開発である。

表1.3-1に、より具体的な目標を示す。圃場条件は、当初は比較的整備されたほぼ水平で区画整理された圃場を対象とし、傾斜地や不定形圃場については本研究の成果を待って対応することとする。区画の大きさは、これまで100m×30mの水田区画整理事業が多く行われてきた事情を踏まえ、この区画を包含してさらにゆとりを持った大きさ100m×50mを最低限の目標とする。オペレータは、終局的には圃場へのロボットの移動と初期設定以降は不要であるが、ロボットが商品として完璧な状態に熟成されるまでの普及段階で予想される、制御アルゴリズム上のバグや周辺住民による物珍しさに端を発したいたずらなど不測の事態に対応するため、無人作業中も付近にいることを条件としている。車両は、国内で最も出荷台数の多いクラスを当面の対象とする。作業機は、当面ロータリ耕うん機を前提に研究を進める。その理由は、水田の攪拌耕から畑作の碎土耕まで、単一作業では最も広く利用されている点、及び田植え、播種、施肥、防除作業などと共通な往復作業法であり、後々の応用範囲が

広い点を考慮したものである。航法システムは第3章3.1.3考察とまとめの項に理由を述べるが、位置計測誤差5cm以下、検出周期1s以下、方位計測誤差0.1°以下を当面の目標とした。制御装置は作業ソフトウェアの改良・変更作業が行いやすいことから開発段階ではパーソナルコンピュータを使用する。また、作業ソフトウェアはロータリ耕うん作業を前提に、作業方法は枕地処理を含む往復作業とし、速度は0.1~1.2m/sに対応するものとした。

これらの目標を考慮して論文名を「耕うん作業を行う自律移動ロボットの研究」とし、研究の過程で開発されたロボットシステムを「耕うんロボット」と称することとした。

表1.3-1 耕うんロボットの目標
Table 1.3-1 Target specifications of tilling robot

| | |
|----------|---|
| 圃場条件 | ほぼ水平で区画整理された矩形圃場 圃場区画 : > 100 × 50 m |
| オペレータ | 複数の耕うんロボットを監視しつつ、同時に資材補給などの別作業を行うことが可能 |
| 車両 | ベース車両形式 : 4WD, 20-25 kW級トラクタ 作業機 : ロータリ耕うん機 制御の対象 : 操舵機構, シャトルシステム, ブレーキ (左右), スロットル, 作業機昇降装置, 機関燃料カット機構 附属装備 : 作業機水平・耕深制御機能, 倍速ターン機能等 |
| 航法システム | 圃場内位置 : 計測誤差 < 5 cm 計測周期 < 1 s 車両方位 : 計測誤差 < 0.1 ° |
| 制御装置 | 試作機ではパーソナルコンピュータ |
| 作業ソフトウェア | 対象作業 : 耕うん, 代かき, 畝たて他 作業方法 : 枕地処理を含む往復作業, 作業経路は区画に合わせて自動生成 作業速度範囲 : 0.1-1.2m/s |
| 安全装置 | 非常停止機構, 異常時警報モニタ, 障害物検出機構, 遠隔操作車両非常停止機構 |

1.4 自律走行の歴史と問題点

1.4.1 既往の研究史

自律走行に関する国内の既往研究例を、本研究が軌道に乗り始めた1990年で区切り表1.4-1及び表1.4-2に示す。表中の航法に使用した記号は、第3章に示す航法システムの分類表(表3.1-1)に従ったものである。これらの表では、航法装置や制御方法など構成要素の部分部分についての研究例は除外し、最終的に何らかの形で実際

の圃場を走行したものののみを取り上げた。研究例は、1980年代中頃まではあまり多くないが1980年代末から急速に増加し、第52回（1993）から第56回（1997）までの農業機械学会年次大会講演要旨では、全講演課題643題中92題、約15%が自律走行関連のものであり、近年の関心の高さが伺える。

以下の引用では表1.4-1、表1.4-2中のNo.を併記するが、1972年のNo.1金須らがおそらく国内初の農用車両の本格的無人化を試みた研究と思われる。但し、No.1はガントリによるものであって車両の無人運転ではなく、圃場を装置化することによって無人作業を達成しようとしたものであり、その後より簡便な設備によって同様の目標を達成しようとしたケーブル無人農法の提案²⁾なども見られるが土地利用型農業では以降あまり進展は見られず、No.10坂上らなどハウス内の育苗などの場において応用されている。純粹に車両そのものを自動制御して無人運転を行わせる試みは、1976年に発表されたNo.2金藤ら、No.3笈田ら、No.4金須らが国内ではもっとも古いものと見られる。No.2では、既に実用化していた自脱型コンバインの条にならった自動操向機能を横刈り方向にも展開したものであり、No.3は、システムそのものは海外研究例をトレースしたものであるが、制御方法に改良を加えたものである。No.4はケーブル誘導によるもので、トラクタばかりでなく少量散布スピードスプレーの無人運転にも応用され、後日No.30として市販化された。

航法技術から既往研究をみると、半固定経路式スポットマーク方式はNo.13山下らなどで一部に併用されてはいるがあまり見られない。1990年頃までは、殆どのものが固定経路方式か、作物列などにならって走行する外界情報追尾式のものであり、No.8藤井らははじめてTVカメラによる画像処理技術を導入したものである。内界情報方式は、1988年に報告した筆者らの研究¹²⁾⁴⁹⁾に始まり、その後No.17本橋ら、No.20小西ら、No.22太田、石井、趙らなどと続いていく。外部標識方式は、センサ単独の研究であって車両の制御は行われていないが、やはり1989年に報告した筆者らの研究⁵⁰⁾に始

まり，その後No.22太田，石井，趙らなどを経て，1995年頃からGPSを利用したものが数多く見られるようになった。

表1.4-1 農用車両ロボット化の試み（国内その1）
Table 1.4-1 Studies on robotization of agricultural vehicles(domestic 1)

| No. | 年次 | 名称－研究機関等 | 航法 | 走行部－作業 | 備考 |
|-------------------|------|------------------------------------|------|------------------------|---------------------------|
| 1 ³⁾ | 1972 | 無人作業装置 －農業機械化研究所 | A1 | ガントリー 水田作業一般 | |
| 2 ⁴⁾ | 1976 | 自脱型コンバインの自動化 －井関農機(株) | D1 | 自脱型コンバイン | 横刈りも含め完全無人化 |
| 3 ⁵⁾ | 1976 | トラクタの自動走行 －京都大学 | D1 | トラクタ －プラウ耕 | 機械センサによるれき溝 追尾 |
| 4 ⁶⁾⁷⁾ | 1976 | ケーブル誘導 －農業機械化研究所 | A2 | トラクタ－耕うん SS－防除 | |
| 5 ⁸⁾ | 1978 | 急傾斜地ミカン園 自動走行作業車 －四国農業試験場 | D1 | 4輪スキッド ステア車両 －運搬 | のり面機械式ならい |
| 6 ⁹⁾ | 1978 | 急傾斜地ミカン園 排水路利用無人運搬車 －四国農業試験場 | D1 | 6輪運搬車－運搬 | 排水路を誘導に利用 |
| 7 ¹⁰⁾ | 1982 | クラブステアリング車による 自動耕うん－神戸大学 | D1 | クラブステア車両 －ロータリ耕うん | 光電センサによる既耕地 の識別 |
| 8 ¹¹⁾ | 1987 | 無人芝刈機 －(株)クボタ | D1 | 4WS4輪駆動車 －芝刈作業 | TVカメラ使用 光電センサも試行 |
| 9 ¹²⁾ | 1988 | 自律走行システムの開発 －生研機構 | C2 | 乗用トラクタ －耕うん作業 | 地磁気方位センサを用いた 往復作業 |
| 10 13)14) | 1988 | 施設内育苗ロボット －東北農業試験場 | A1 | 4輪台車 －ハウス内育苗作業 | レール敷設 |
| 11 ¹⁵⁾ | 1988 | 自律走行型桑園管理機 －蚕試・昆虫研究所 | D1 | 3輪車，4輪車 －桑園管理作業 | 超音波距離計 地磁気方位センサ併用 |
| 12 16)17) | 1988 | 自動走行管理機 －東北農業試験場 | D1 | 6輪試作車 －ソルガム管理作業 | 旋回時に地磁気方位セン サ併用 |
| 13 18)19) | 1989 | 畝栽培施設無人走行車 －愛媛大学 | B,D2 | 4輪バッテリーカー －ハウス内管理作業 | 各種航法方式を試行 |
| 14 ²⁰⁾ | 1989 | 田植機のレーザビーム誘導 －(株)クボタ | A1 | 乗用田植機 －田植え作業 | レーザビームで経路設定 |
| 15 ²¹⁾ | 1989 | ロボットスプレーカー －共立エコー物産(株) | A1 | 専用4輪バッテリーカー －ハウス内防除 | |
| 16 ²²⁾ | 1989 | 自動操向トラクタ －鳥取大学 | D2 | クローラトラクタ －？ | 画像処理により直進のみ 制御 |
| 17 ²³⁾ | 1990 | トラクタの自律走行 －北里大学 | C3 | トラクタ －傾斜草地管理作業 | 左右後輪回転数検出 |
| 18 ²⁴⁾ | 1990 | インテリジェント バッテリーカー －野菜・茶業試験場 | D2 | 3輪車 －ハウス内管理作業 | 人に追尾する機能も研究 |
| 19 25)26) | 1990 | 畑管理用自動走行トラクタ －北海道大学 | D1 | トラクタ －間引き作業 | 1次元CCDセンサ利用 赤外線高畦センサ併用 |
| 20 ²⁷⁾ | 1990 | 田植機の自動直進走行 －生研機構 | C2 | 田植機 －田植え作業 | 車両前・後端に装備した メカニカルセンサ使用 |

「年次」は文献公表の年次，「航法」は表3.1-1中の航法方式の名称に付した記号

表1.4-2 農用車両ロボット化の試み（国内その2）
Table 1.4-2 Studies on robotization of agricultural vehicles(domestic 2)

| No. | 年次 | 名称-研究機関等 | 航法 | 走行部-作業 | 備考 |
|---|------|--|------------|------------------------|--|
| 21 ²⁸⁾ | 1992 | 水田管理作業ロボット -三菱農機(株) | D1 | 専用4WS車両 -水田管理作業 | 特殊な旋回方法 |
| 22 ²⁹⁾ 30) ³¹⁾ | 1993 | 学習機能を有した自律走行 -北海道大学 | C2E1 | トラクタ | 2台のTVカメラによる三角測量, 地磁気方位センサ併用 |
| 23 ³²⁾ | 1993 | 乗用田植機の走行制御 -三重大学 | D1 | 乗用田植機 -田植え作業 | 光電センサによる苗列検出 |
| 24 ³³⁾ | 1994 | レーザガイド自動直進走行 -東北農業試験場 | D1 | 4WS芝刈機改造車両 -水田管理作業 | レーザビーム誘導 |
| 25 ³⁴⁾ | 1994 | 画像処理による自律走行 -生研機構, (株)農生研 | D1 | トラクター-耕うん | 地磁気方位センサ併用 |
| 26 ³⁵⁾ | 1994 | 乗用田植機の走行制御 -鳥取大学 | C2 | 田植機-田植え作業 | 自動直進制御システム |
| 27 ³⁶⁾ | 1995 | 芝刈ロボット -早稲田大学 | C2D1 | 電動4輪専用車 -芝刈作業機 | 地磁気方位センサ・境界検出光電センサ併用 |
| 28 ³⁷⁾ | 1995 | 畑地自動走行トラクタ -農研センター | C2E4 | トラクタ -耕耘, 防除作業 | OFG, 超音波ドプラ速度計使用, 後にGPS併用 |
| 29 ³⁸⁾ | 1995 | 作物列追尾型自律走行 -東京大学 | D1 | トラクタ -畑作物管理作業 | |
| 30 ³⁹⁾ | 1995 | ケーブル誘導方式SS -生研機構, -ヤンマー農機(株) | A1 | 市販SSベース4輪車 -果樹園防除作業 | ラジコン併用 |
| 31 ⁴⁰⁾ | 1995 | 果樹園パイプ誘導式防除機 -生研機構, 富士ロビン他 | A1 | 専用3輪車 -果樹園防除作業 | ラジコン併用 |
| 32 ⁴¹⁾ ⁴²⁾ | 1996 | 耕うんロボット -生研機構, (株)クボタ, 日本航空電子工業(株) | E2C2 | 乗用トラクタ -耕うん作業 | 自動追尾型測量装置, 地磁気方位センサ併用 その他E4, D2方式も並行して開発 |
| 33 ⁴³⁾ | 1996 | 飼料生産における自律走行 -草地試験場 | C2E4 | トラクタ -草地管理作業 | OFG, 超音波速度計使用 後にGPS併用 |
| 34 ⁴⁴⁾ | 1996 | 傾斜装置における自律走行 -草地試験場山地支場 | C2 | 4輪試験用車両 -傾斜草地管理作業 | 地磁気方位センサ使用 後に光電センサ併用 |
| 35 ⁴⁵⁾ | 1996 | 自律走行 -京都大学 | C2D1 E2 | トラクタ | 各種航法方式を試行 |
| 36 ⁴⁶⁾ | 1997 | 芝刈ロボット - (株)スバル研究所 | C2E4 | 専用4輪芝刈機 -芝刈作業 | 地磁気方位センサ ・GPS併用 |
| 37 ⁴⁷⁾ | 1997 | 自律走行水田作業車 -農研センター | C2E4 | 田植機-田植え作業 | OFG, RTKGPS併用 |
| 38 ⁴⁸⁾ | 1997 | 水田管理作業車の自動運転 - (株)農生研 | E4 | 水田管理作業車 -水田管理作業 | OFG併用 |

「年次」は文献公表の年次, 「航法」は表3.1-1中の航法方式の名称に付した記号

圃場内の作業法についてみると、固定経路方式のものではほぼ当初より旋回を含めた圃場全体を処理する戦略が見られる。自由経路方式のものでは、経路は事実上固定的であるがNo.5古川ら、No.6川崎らなどで圃場全体処理の戦略が示されている。その後、1989年の筆者らの研究¹²⁾⁵¹⁾から完全な自由経路における作業法の検討が始められた。

作目や圃場についてみると汎用性の高いトラクタ作業から研究が開始され、その後能率の向上よりも農薬の害からオペレータを保護するという作業安全面におけるニーズが高いNo.4八木らのSSやNo.5古川ら、No.6川崎らなどの防除作業が扱われ、No.15共立エコー物産でいち早く実用化されている。No.2金藤らは自脱型コンバインによるものであるが、自動操向機能は企業ベースで早々に実用化されたものの、収穫物の搬出という他の車両と連携した行動を要するためか、その後は殆ど研究例が見られない。田植機は、1989年のNo.14株クボタ、及び1988年頃から研究が開始されたNo.20生研機構などに始まるが、田植機は路面状況の変化及び重量物である苗載せ台の左右への揺動などから直進維持が容易ではなく、かつ作業中に苗補給が必要なことなどを考慮し、自動直進に的を絞った研究もNo.20生研機構、No.23山下らを初め多く見られる。ハウス内の管理作業車は、No.13山下らなどに始まり1990年前後に多くの研究例が見られた。芝刈関係は、No.8藤井らに始まり、年間稼働率の高さや資材補給もしくは収穫物の搬出などが問題にならないことから、当面無人化する格好の対象と見なされ、農業機械分野以外からの研究も多い。

以上、航法技術及びコントローラ、あるいはアクチュエータの発展に沿って、農用車両の無人化技術も進展してきたことが伺われる。

これまで国内における概況を述べたが、海外における研究例の一部を表1.4-3に示す。1960年にNo.1、Gilmourらが発表したものがおそらく農用車両の無人走行研究としては世界的にも最初のものであろう。海外における既往研究に関しては、N. D. Tillett⁵²⁾及び堀尾⁵³⁾

らによってとりまとめられているが、当初は、プラウ耕のれき溝に接触するバー（センサ）によって操舵アクチュエータの油圧バルブを直接駆動するといった機械的な操舵制御が試行され、ケーブル誘導などの固定経路方式を経て、近年はGPSに至る研究の流れは、国内の状況と概ね同様である。

現在までに実用化（市販化）されているものは、表中No.15共立エコー物産、No.30生研機構、No.31生研機構の防除関係車両及び先に記した自脱型コンバインにおける自動操向機能だけであり、海外においては市販化例を知らない。

1.4.2 既往研究の問題点

本論文の研究が開始された時点、及び少なくとも1990年以前における既往研究では、農作業における汎用性の高い、耕うんを初めトラクタ作業一般に適用できるものは極めて少ない。具体的には、

- 1) 作業に応じて自由に経路を設定できる航法システムが確立されていない、

表1.4-3 農用車両ロボット化の試み（海外）
Table 1.4-3 Studies on robotization of agricultural vehicles(foreign countries)

| No. | 年次 | 名称－研究機関等 | 航法 | 走行部－作業 | 備考 |
|------------------|------|---|-----------|--------------------------|---------------------------------|
| 1 ⁵⁴⁾ | 1960 | An Automatic Control System for Farm Tractors －NIAE, Gilmour | C2 +A2 | トラクタ －耕うん作業 | 初めC2,後にA2 |
| 2 ⁵⁵⁾ | 1962 | Automatic Tractor Steering －USDA, Liljendahl, Strait | D1 | トラクタ, －中耕作業 | 油圧式ならい |
| 3 ⁵⁶⁾ | 1970 | An Automatic Guidance System for Farm Tractors －Univ. of Saskatchewan, Grovum, Zeorb | D1 | トラクタ, －プラウ耕作業 | 機械式ならい |
| 4 ⁵⁷⁾ | 1987 | Self-Propelled Plowing Robot －CEMAGREF, Bonicelli | E3 | 専用車両 －プラウ耕作業 | ミリ波レーダ使用 |
| 5 ⁵⁸⁾ | 1994 | Autonomous Guidance Systems for off-Road Vehicles －Modulaire Co., Ltd., Monomen | E4 | クローラトラクタ － | RTKDGPS使用 |
| 6 ⁵⁹⁾ | 1996 | Autonomous Horticultural Robot －Silsoe Institute, Hague, Tillet | D1C3 | 専用4輪車両 －野菜作スポット 防除 | TVカメラによる作物 列検出+左右車輪回転 差併用 |

「年次」は文献公表の年次、「航法」は表3.1-1中の航法方式の名称に付した記号

- 2) 作業に応じて適切な作業経路を計画する経路計画法が確立されていない,
- 3) 枕地の処理までを含めた圃場一面の作業を全て処理する戦略がみられない,
- 4) 誰でも使えるレベルのシステムになっていない,
- 5) 圃場環境の変化などに柔軟に対応して安定的に作業を完了するための信頼性が考慮されていない,
- 6) 無人作業を前提とする安全性にまで配慮されているものはない,
- 7) 以上の結果, 固定経路方式の防除機とコンバインの自動操向機能以外は実用化していない,

といった問題があった。

そこで, 本論文では,

- 1) 上記1)に対応して自由な経路を設定できる航法システムを確立する,
 - 2) 上記2), 3)に対応して自動的にかつ柔軟に作業経路を自動生成し, 圃場全面を完全に無人で処理する作業ソフトを確立する,
 - 3) 上記4), 5), 6)に対応して一般の農家が使いやすい取扱い性を確保し, 不測の事態にも柔軟に対応して確実に所定の作業を終了することが可能で, 安全性にも配慮したハード及びソフトを確立する,
- ことを研究の狙いとし, そのまま実用化が可能なレベルのロボットを開発目標にした。

1.5 考察とまとめ

将来の日本農業は, 経営規模の拡大を伴う生産コスト低減, 農産物の高付加価値化による収益向上, といった方向に向かうものと考えられる。大規模経営における生産コストの低減には, 農業機械の自動化・無人化による労働生産性の向上が不可欠である。

一方, 車両系農業機械でオペレータが行う運転は, 車両そのもの

を誘導する「車両操作」、作業機の調整や資材補給などを行う「作業機操作」、及び圃場に見合った作業の戦略を立て、あるいは機械の保守・点検などを行う「企画・管理」の3つに分けることができよう。今日までの車両系農業機械の自動化・無人化は、主に「作業機操作」の歴史であって、「車両操作」については、自脱型コンバインの自動操向機能による直進の自動化など実用化されたものは極めて限られている。「企画・管理」では自動化の例は殆ど見られない。その結果、最新の車両系農業機械ではオペレータの労働負担は大幅に改善されたものの、相変わらず1名のオペレータを無人化することができず、労働生産性の面は旧態依然である。

本研究の目標は、「作業機操作」の無人化を前提にして、1枚の圃場に対する作業経路計画のような「企画・管理」の一部を自動化し、かつ「車両操作」の完全無人化を図り、飛躍的な労働生産性の向上を達成することにある。本研究の課題名は「自律耕うんロボットの知能化に関する研究」とし、昭和62年から行ってきた一連の研究をまとめたものである。

本研究に関係する既往研究を概観すると、国外では1962年、国内では1972年頃から無人走行の研究が開始されている。当初は機械的なセンサによって直接操舵機構を制御するものが見られ、その後のセンサ技術、制御技術の進展に沿って固定経路方式のもの、自由経路内界情報式のものなどが現れ、今日ではGPSを基幹航法センサとする研究が多く報告されるようになった。しかし、多くの研究例で依然、航法システムが不完全、経路計画法が未確立、作業の安定性・信頼性が不足、といった問題点が見られる。そこで本研究では圃場で行われる多くの作業に汎用的に適用可能な自由経路方式で、

- 1) 作業経路計画を自律的に生成、
 - 2) 圃場一面を無人で処理、
 - 3) 環境変化の激しい圃場条件下で何らかのトラブルに際しても柔軟に対応して、無人作業への高い信頼性と安定性を確保、
- することを研究のねらいとした。

2.1 要素技術⁶⁰⁾⁶¹⁾

2.1.1 要素技術の内容

農用車両をロボット化して無人作業を実現するためには、車両自身に人間に近い全ての機能要素が必要になる。農用車両のロボット化を支える要素技術は、一般的なメカトロニクスシステムの5大要素（五感、頭脳、骨格、手足、内臓）⁶²⁾と類似しており、図 2.1-1 のように考えることができる。各要素について以下に記す。

1) エネルギー供給機能及び運動機能

心臓に相当する部分、エネルギー供給機能は、車両が本来行う作業のための動力を供給し、かつセンサ、コントローラやアクチュエータなどに電気、油圧などの動力源を供給するものである。手足、運動機能は、作業を行うための機構と移動を行うためのメカニズムそのものであり、その多くは一般的な機械要素技術によって構成されている。

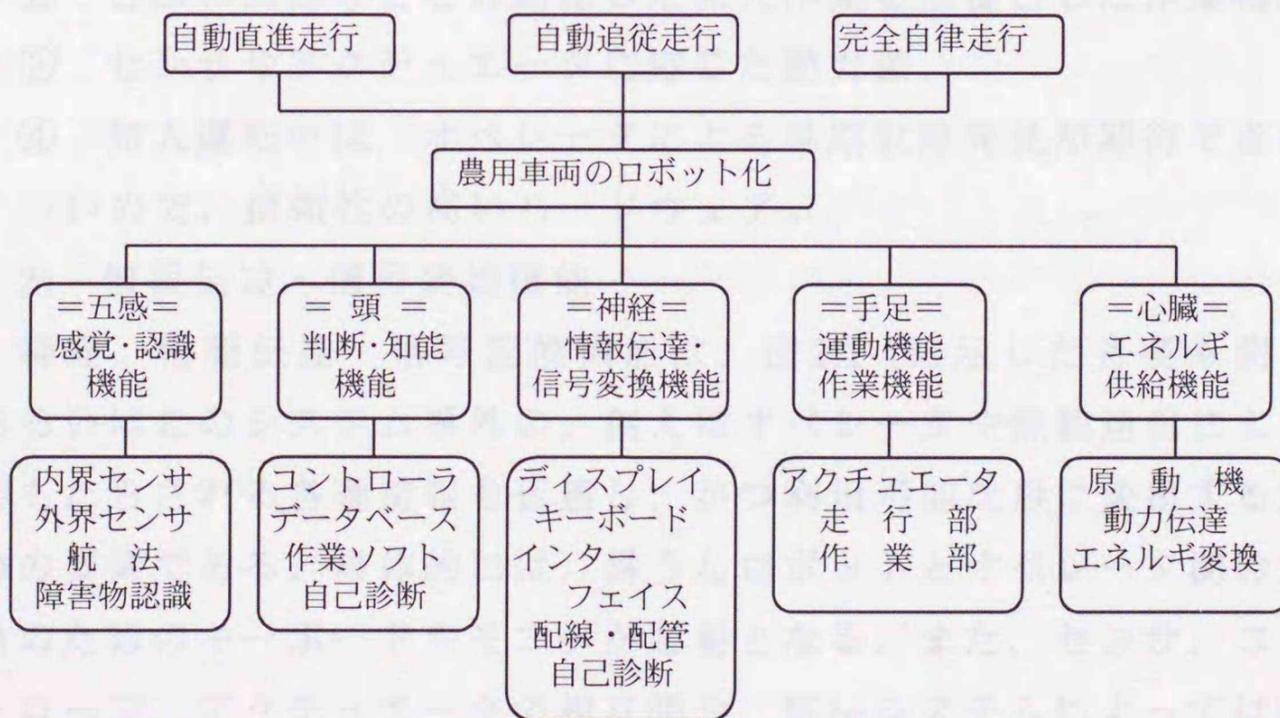


図 2.1-1 自律走行技術の要素技術
Fig. 2.1-1 Technical elements for autonomous traveling vehicle

現在の農用車両は、人が運転することを前提に設計されており、必ずしも自動制御に適したものではない。最低限、各操作部は電気信号によって制御（Drive by wire）できるように再設計する必要がある。さらに制御性を向上させるためには、機構面からも無人作業専用のロボット化された車両を開発することが今後の課題であり、将来的には急傾斜地や水田内などにおいて脚步行も検討されるであろう。

作業機は、各部の調整が自動的に行われることが条件になり、肥料や苗などの資材を用いる作業では、その補給方法についても検討する必要がある。また、動力、エネルギーの面では制御性のよいアクチュエータの選択が課題であり、そのための動力源等の設置も必要である。具体的には、既存の車両及び作業機技術に加え以下の点に技術開発を要する。

- ① 人に代ってステアリング、スロットル、トランスミッション、ブレーキなどを操作する制御性に優れたアクチュエータ及びその制御技術。ただし、圃場への往復や圃場区画の教示など、有人運転のために従来どおりの操縦装置も並行して必要となる。
- ② 各部の調節などを自動化した無人作業を前提とした作業機。
- ③ センサやアクチュエータに応じた動力源。
- ④ 無人運転中は、オペレータによる早期故障発見が期待できないので、信頼性の高いハードウェア。

2) 情報伝達・信号変換機能

神経、情報伝達・信号変換機能は、図2.1-1に示した各要素間、あるいはこのシステム系外の、例えばオペレータや無線通信によってもたらされる各種情報を伝達し、かつ利用可能な形に変換するための要素である。具体的には、耕うんロボットとオペレータ間の対話のためのキーボードやモニタが必要となる。また、センサ、コントローラ、アクチュエータの相互間や、航法システムによっては移動車両と基準局間に確実な通信機能が必要である。

3) 判断機能

頭、判断・知能機能は、システムがどのように行動すべきかを決定する本システムの中核であり、ハードウェア及びソフトウェアで構成される。

ハードウェアとしてはコンピュータ、あるいはプログラムコントローラなどとセンサ情報やアクチュエータ制御情報などの入出力装置が必要である。しかし一般的に用いられるこれらの機器は、主に屋内で固定的に使用されることを前提に製作されているため、

- ① 屋外でかつ車両上で使用するには熱、埃、振動などに対して脆弱、
- ② 太陽光の下ではディスプレイ視認が困難、
- ③ 車両やセンサに対し相互に悪影響を与えるようなノイズを完全には遮蔽困難、
- ④ 振動下におけるキーボードの押し違いや2度押し、埃による動作不良、

といった問題があり、汎用デバイスを用いて実用化しにくい点が課題である。

我々は日頃「何気なく」車両を運転しているが、車両の自動制御は、この「何気ない」行動を条件別にあるいはセンサからの情報に応じて法則性をもって具体的に整理して制御アルゴリズムを確立し、プログラムとして記述することが必要になる。このようにして記述された無人作業を実行するソフトウェアは、有人作業のノウハウを織込んだものとなる。僅かな判断・制御の誤りが事故につながる危険があるので、タスクの分割を図るといったバグの発生を抑制する手法と、各種の状況に対応できるよう十二分な実証試験とが必要である。また、このためには複雑な不整地車両の運動特性や、作目、作業に応じた行動計画を綿密に把握しておくことが重要である。具体的なソフトウェアでは、1枚の圃場を完全に無人で作業させることを前提に、

- ① 圃場区画や目標進行方位の簡易な教示方法、
- ② 圃場区画、作業条件に応じた経路計画の立案方法、

- ③ 路面と車輪のすべりを考慮したうえで有人運転なみに安定的に直進，巾寄せ，切返し等を行う完成度の高い操舵制御方法，
 - ④ 複数台の車両を同一圃場で運用する場合の衝突防止策，及び適切な協調作業方法，
- などが今後の課題である。

4) 感覚認識機能

五感，感覚・認識機能は，車両や作業機自身の時々刻々の状態を検出して認識するための内界センサと，周囲の時々刻々の状況を検出して認識するための外界センサから構成される。

内界センサには燃料の残量や車両の傾斜，舵角，車両の進行方位などのセンサが含まれ，外界センサには周囲の障害物の状況，作物や圃場の状態，車両の圃場内位置などのセンサが含まれる。これらのうち車両の進行方位や圃場内位置，もしくは作物列等の参照事物（ランドマーク）からの相対距離といった，航法（Navigation）に関する情報の認識は，車両をロボット化するうえで必要不可欠な情報であり，また，車両系ロボットに最も特徴的なものである。換言すれば車両系ロボットの成否は航法装置の如何による，といっても過言ではない。

2.1.2 要素技術の留意点

各要素は，耕うんロボットの場合，屋外で行われる農業に固有の使用条件の下で機能することが条件となる。表2.1-1⁶⁰⁾に他の分野と比較した使用条件を示す。農用車両は，使用範囲，走行方法，速度などの車両としての使われ方が異なるほか，オペレータ，年間稼働時間，経営主体の資本などの点で他の分野とは大きな差がある。このため開発当初より低コスト化と信頼性，取扱い性などについて，十分な配慮が必要である。

無人作業ではあっても圃場内では人が共存する事態が予想され，事故防止対策や緊急時に備えた非常停止システムの装備が欠かせない。また研究開発の途上では，評価のためにセンサ情報や制御情報

と同一時間軸で走行軌跡を記録することが必要になり，効率的かつ一般的な測定方法を確立することも課題である。

2.2 作業法と可能性

2.2.1 自律的作業方法

ロボット化され，車両操作を無人化した作業には，大きくわけて以下のケースが考えられる⁶⁰⁾。

1) 自律直進作業

自律直進作業は，作業の直進走行部分のみを手放し運転できるように目標方位，もしくは目標直進経路に沿って車両を無人運転させるものである。

例えば田植機では，往復作業の直進作業途中で走行を一旦停止させて苗補給を行い，その後再発進して作業を続行させることがよく行われている。自律直進作業が可能になれば，オペレータは，田植機の苗マットなどの資材補給や，作業機の調整，作業状態の観察などに専念することができる。その結果，いちいち車両を停止させることによる能率の低下や，不十分な作業跡の観察や不十分な作業部の調整による作業精度の劣化を未然に防止できる。また例えばポテ

表 2.1-1 各分野における車両系ロボットの使用条件
Table 2.1-1 Using conditions of robotized vehicle in various fields

| | 自動車 | 工場内 無人搬送車 | 建設分野 | 農用車両 |
|--------------|-------------|--------------|-------------------|--------------|
| 使用範囲 | ～数100km | ～数100m | ～数100m | ～数100m |
| 走行距離 | 〃 | ～数km | ～数100m | ～数km |
| 走行方法 | 道路に 沿って | 走行路に 沿って | 面の塗りつぶし 道路に沿って | 面の 塗りつぶし |
| 路面 傾斜 | 硬・平坦 坂道有 | 硬・平坦 水平 | やや軟・凹凸 ほぼ水平 | 軟・凹凸 傾斜地有 |
| ほこり等 | 多 | 少 | 多 | 多 |
| 速度 | 高速 | 低速 | 低速 | 低速 |
| 1回の使用時間 | 短～長 | 短 | 長 | 長 |
| 使用場所 障害物等 | 外 多 | 屋内 やや多 | 屋外・屋内 やや少 | 外 少 |
| オペレータ | 一般人 | セミプロ | プロ | 一般人 |
| 年間稼働時間 | 短～長 | 長 | 長 | 短 |
| ユーザの資本 | ? | 中～大 | 中～大 | 小 |

トハーベスタによる収穫作業では、畝に沿った自律直進により、その間車両のオペレータは作業部へ異動して、収穫物の選別に従事する作業補助者を兼任することができ、1名分の省力化が可能になる。さらに深耕ロータリによる耕うん作業など極めて作業速度の遅い作業でも、一時的にオペレータは休息することが可能になり、労働環境の改善も可能になるであろう。

2) 自律追従作業

自律追従作業は、オペレータによって有人運転される1台の車両（親機）を、1台もしくは複数台の車両（子機）がある位置関係を維持しつつ無人で追従するものである。

例えば、フォーレイジハーベスタとワゴン車両の組合せ作業では、2台の農用車両が2名のオペレータにより相対位置をほぼ一定に保ちながら運転されているが、自動追従作業では、オペレータ1人で複数台の車両操作が可能になる。この場合の位置関係は、図2.2-1に示すように、①親機と子機が一定の相対位置・方位関係を維持す

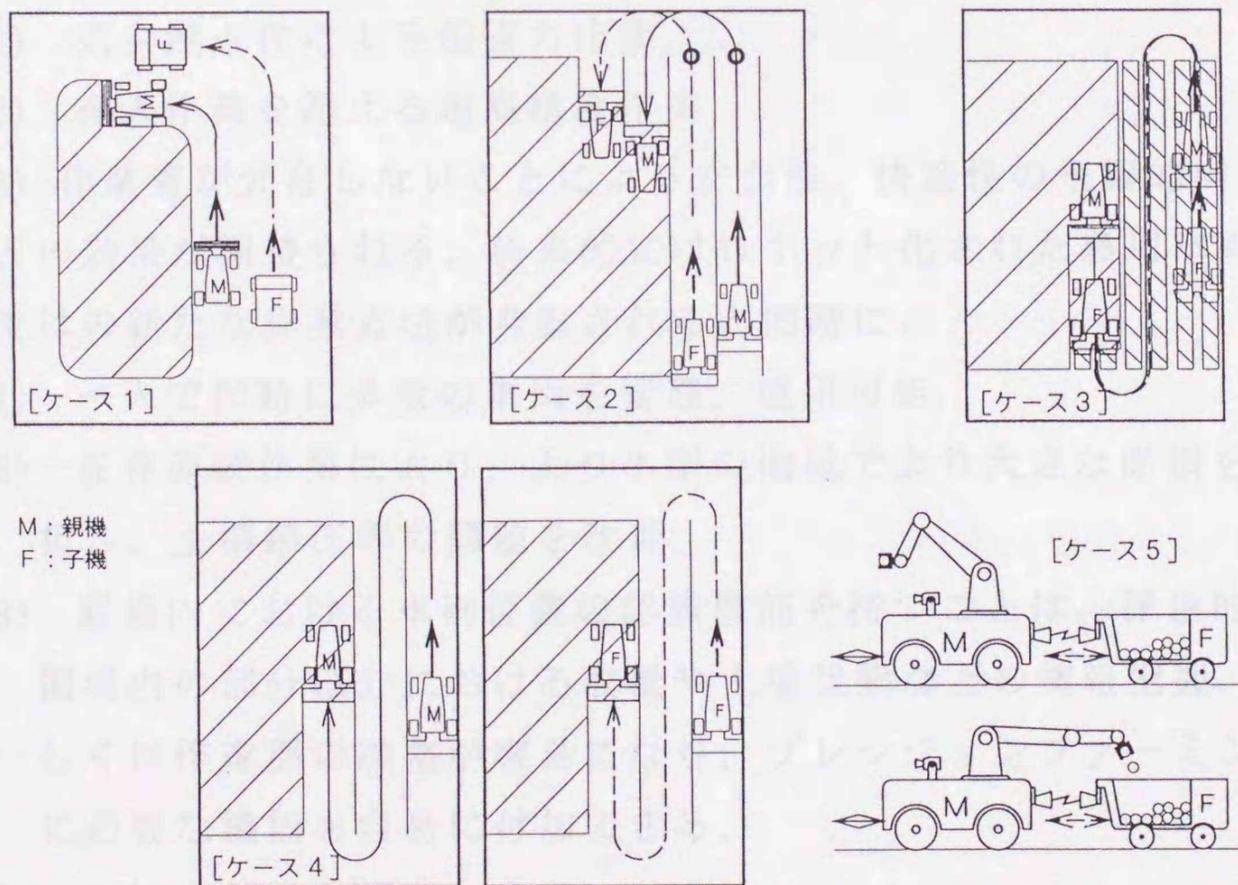


図 2.2-1 自律追従作業の例
Fig. 2.2-1 Examples of autonomous following work

る場合（ケース1）、②親機の運動を適当な時間遅れで再現するように子機が運転される場合（ケース2）、③子機が親機の後から親機の走行軌跡に習って走行する場合（ケース3）、④同一形状の複数の圃場で、親機がある圃場で何らかの作業を行うときに、子機は別の圃場で同時刻に親機の動作をそっくり真似た作業を実行する場合（ケース4）、⑤子機が親機に対して常時一定の距離を維持する場合（ケース5）、などが考えられる⁶³⁾。

3) 自律全面作業

耕うんや整地・防除など通常のトラクタ作業で1名のオペレータが1台の機械を運転して1枚の圃場全面を作業するのと同様に、1台の車両が独立して自律的に枕地の処理まで含めた全面作業を実行する場合が自律全面作業である。この場合、オペレータは全く不要であり、次項に示すような効果を期待できる。

2.2.2 効果と可能性

自律全面作業を行う農用車両のロボット化は、

- 1) 完全無人化による超省力作業、
- 2) 有人作業を超える超高精度作業、
- 3) 作業者が介在しないことによる安全性、快適性の飛躍的向上、

などの効果が期待される。将来的にはロボット化された農用車両ならではの新たな作業方法が考案されると同時に、

- 1) 一人で同時に多数の車両を管理、運用可能、
- 2) 昼夜連続作業により、より小型の機械でより大きな面積を負擔し、土壌踏圧等の問題を改善、
- 3) 圃場内における車両位置の認識機能を持つことは、派生的に圃場内の部分部分における収量や土壌状態などの情報把握、もしくは作業部の調整が容易になり、プレシジョンファーミングに必要な機能を容易に付加できる、

といった波及効果も期待できる。

本論文では省力効果が最も高く、応用範囲が広い「自律全面作業」

を目標とし、派生的に「自律直進作業」，「自律追従作業」を扱うこととする。

2.3 車両システム

農用車両のロボット化を図るためには、コントローラからの制御命令に従って操舵，発進・停止，変速などを実行する車両システムが必要である。また，この車両システムは，航法システムや作業ソフトなどの研究を行うプラットフォームとしても使用される。

車両システムには以下のような要件が必要となる。

- 1) コントローラからの電気信号によって各部が操作されるように必要なアクチュエータを備える。
- 2) 無人で運用されるので，故障やトラブルに対応できるよう人に代わって各部の状態をモニタできる高い信頼性・耐久性を有する内界センサを備える。
- 3) 2)の内界センサは検出できる内容に限界があるので，検出内容を組み合わせて可能な限り広範な車両状態を推定する方法を有する。
- 4) 圃場間の移動などに際して有人運転可能な装備を有する。
- 5) 各種センサやアクチュエータ，コントローラに適応した動力源を有する。
- 6) 安全確保のための非常停止機構などの装備を有する。

このような車両は，本来無人走行を前提に新規に開発されることが望ましいが，開発経費及び工数，既存作業機とのマッチング，信頼性・耐久性などの観点から市販の乗用トラクタを改造することとした。また，上記要件の2)，3)を考慮して内界センサ，制御箇所は複雑化しないように配慮した。車両システムは，2.4以下に示すように開発・改良を繰り返して完成度を高めていったが，その間各試作機は航法システムや作業ソフトウェアの試験に適宜供試した。

2.4 試作1号機 (ALVA-1) ⁶⁰⁾

2.4.1 ハードウェア構成

試作1号機の原型車両は、試作センサ、計測機器、コントローラなどの積載スペースが得やすい2人乗りの日の本JF-1トラクタであり、その主な仕様を表2.4-1に示す。

表2.4-1 日の本JF-1の主な仕様
Table 2.4-1 Generous specifications of base tractor Hinomoto JF-1

| 項 目 | 仕 様 |
|------------|----------------------------|
| 形 式 | 4輪駆動2人乗り乗用トラクタ |
| 機関出力/回転 | 13.2 kW/2500 rpm |
| 全長×全幅×全高 | 2445×1230×1635 mm |
| 軸 距 | 1545 mm |
| 前/後輪輪距 | 865/850 mm |
| 機体重量 | 865 kg |
| 主変速 | 前進 3 速, 後進 1 速 |
| 附属ロータリ耕うん機 | 形式: サイドドライブ 耕幅: 1320 mm |

アクチュエータ等の機器構成は図2.4-1に、制御箇所は表2.4-2に示すとおりであり、信頼性を確保するために各部の制御方法は極力簡素化を図り、以下のようにした。

- 1) 一般的農作業で、頻繁な操作を必要としない副変速機構、PTO変速機構、デフロックなどは制御の対象しない。
- 2) スロットル、作業機昇降は、空気圧シリンダによる設定値と最高値の2段制御とする。
- 3) クラッチ、主変速、ブレーキは、ON-OFF制御とする。
- 4) 操舵機構は、直流インダクションモータによるバンバン制御とし、内界情報として舵角情報は検出するものの、サーボ制御は行わない。

アクチュエータに操舵機構を除き空気圧シリンダを使用した理由は、原車両の油圧システム容量が不十分であり、かつその取り出しが困難であるためである。各アクチュエータは、各操作部の操作力を計測して、所要の作動力が得られるように選定した。

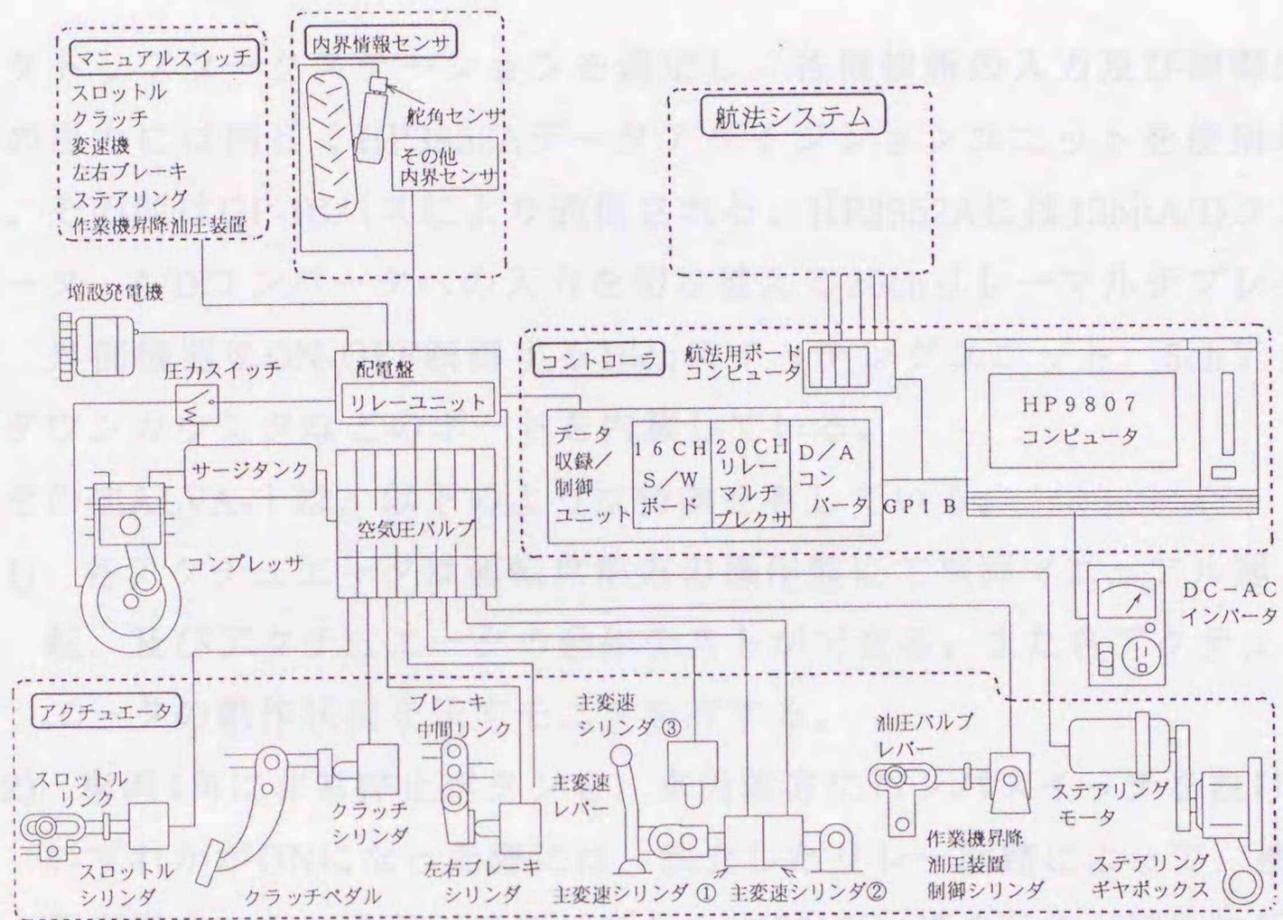


図 2.4-1 ALVA-I の機器構成

Fig. 2.4-1 Device configuration of ALVA-I

表2.4-2 ALVA-I の制御対象と動力源一覧

Table 2.4-2 Control objects and power sources of ALVA-I

| 制御対象 | | 動力源 | |
|-------------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| 制御項目 | アクチュエータ | 動力源項目 | 主な仕様 |
| クラッチ | 空気圧シリンダ, φ 63 | DC-ACインバータ 発電機 (含, 増設部) | AC 100 V, 200 VA×2 DC 12 V, 740 VA |
| ブレーキ, 左・右 | " φ 63 | | |
| 主変速 (F3/R1) | " φ 40 | | |
| 操舵機構 | DCギヤドモータ, 12 V -120 W | 定電圧電源 | DC 5 V, 2 A |
| スロットル | 空気圧シリンダ, φ 50 | コンプレッサ | DC±12 V, 65 mA 0.7 Mpa, 5 L/min |
| 作業機昇降装置 | " , φ 50 | | |

内界情報は、ポテンシオメータを用いた舵角情報、リミットスイッチを用いたその他アクチュエータの動作情報、電源電圧情報のみとした。

コントローラは、この試作を行った1987年時点のコンピュータ事情もあり、メインコントローラにヒューレットパッカー社製HP9807デ

スクトップワークステーションを選定し、各種情報の入力及び制御信号の出力には同じくHP3852Aデータアキュジションユニットを使用した。その間はGP-IBバスにより通信される。HP3852Aには13bitA/Dコンバータ、A/Dコンバータへの入力を切り替える20chリレーマルチプレクサ、外部機器をON-OFF制御する16chスイッチングユニット、5chアップダウンカウンタなどのボードを内蔵している。

その他ALVA-Iは、以下のような特徴を有している。

- 1) 各アクチュエータは運転席前方の操作盤にて車両マニュアル運転、及びアクチュエータの動作テストができる。また各アクチュエータの動作状況を示すモニタを有する。
- 2) 車両4角に非常停止ボタンを、車両前方にバンパスイッチを設け、いずれかがONになった際には、独立したリレー回路によって、機関燃料カット、クラッチ断、ブレーキONの一連の動作が瞬時に行われる。
- 3) 車両を自動制御モードにするAUTOスイッチには、電動コンプレッサ、DC-ACインバータなどの大電流機器がシーケンシャルに電源投入されるよう、タイマ回路を有する。
- 4) 航法センサ等を設置するためのフレームを有する。
- 5) 舵角検出用ポテンシオメータは、右側キングピン角度を直接計測するものである。

試作したALVA-Iの写真を図2.4-2に示す。

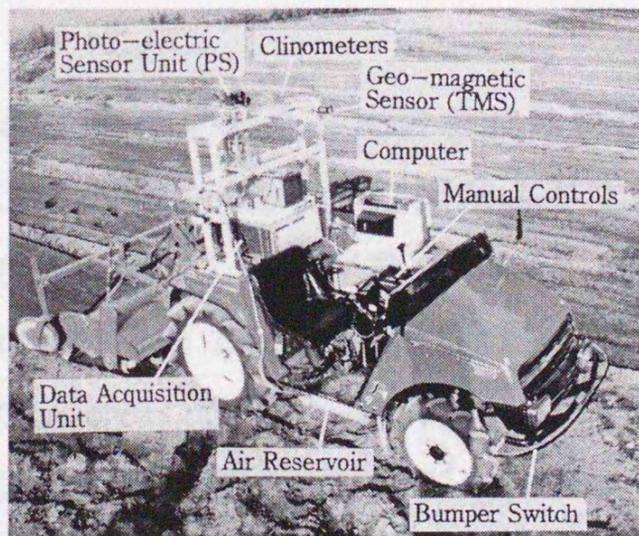


図2.4-2 ALVA-I
Fig. 2.4-2 ALVA-I

2.4.2 制御性能

操舵範囲及び操舵速度は，前車輪をターニングラジアスゲージに乗せて計測した。ALVA-Iの制御性能は，基本的に原型車両と変わらないが，付加したアクチュエータによる制御性能を調査した結果は以下のようであった。

- 1) 操舵範囲は，左前輪が $-46\sim+36^\circ$ ，右前輪が $-36\sim+50^\circ$ （左を-とした，もともと左右の最大舵角が異なる）であった。ロックからロックまでの操舵速度 V_{st} は $15.3[^\circ/s]$ であった。目標とする舵角 S_u を得るには，現在の舵角値 S_{ia} を検出し，

$$T_{st}=(S_u-S_{ia})/V_{st} \quad (2.4-1)$$

により操舵時間 T_{st} を求め， S_u と S_{ia} の大小関係により，右もしくは左に T_{st} 間だけ操舵モータスイッチをONにして行う。

- 2) スロットル，クラッチ，主変速，左右独立ブレーキ，作業機昇降装置は，ほぼマニュアル運転と同様に制御可能であった。
- 3) 非常停止ボタン，バンパスイッチ（13Nの負荷で作動）は良好に作動した。

2.4.3 性能評価

ALVA-Iは，通算170時間にわたって各種試験に供試した結果，各部は概ね良好に作動したが，以下のような問題点が認められた。

- 1) 操舵速度は路面状況によって変動するので，操舵時間をもって目標とする操舵角を得る方法は，再現性に乏しく精度が悪かった。また，使用したメインコントローラ，データアクイジションユニットのデータ伝送速度が遅く，メインコントローラ内で舵角情報をフィードバックさせたサーボ制御を行うことは事実上不可能であった。

- 2) またマニュアル操舵は、トグルスイッチによったが、丸ハンドルに慣れた者には運転しにくかった。
- 3) 変速機にはシンクロメッシュ機構が備わってはいるが、希にクラッチの踏み直しを要することがあった。
- 4) 左右の据えきり舵角が異なり、かつ旋回半径が大きく、片ブレーキを使用して単に180°旋回を行っても附属ロータリ耕うん機の作業ピッチに見合う旋回半径が得られなかった。
- 5) 作業機の耕深等、自動制御機能がなく作業精度が安定しなかった。
- 6) 増設した発電機の駆動方法が適切でなくたびたび駆動ベルト切れを起こした。
- 7) メインコントローラは直射日光下では視認性が悪く、また埃によってキーボードが接触不良を起こすといったトラブルがあった。

2.5 試作2号機 (ALVA-II) ³⁴⁾

ALVA-Iにおける問題点のうち2.4.3の1), 2), 3), 4), 5)は抜本的な対策が必要であり、新たに原型車両を代えて2号機の試作を行った。試作に際してはALVA-Iにおける基本方針を踏襲した。

2.5.1 ハードウェア構成

原型となった車両には乗用トラクタ、クボタGL-25を選定した。主な仕様は表 2.5-1 のようであり、倍速ターン機能、シャトル変速機能、作業機自動制御機能 (商品名、モンローマチック) などにより、2.4.3項に示した問題点の3), 4), 5)は解消される見通しであった。車両システムへの改造作業は(株)クボタに依頼した。

機器の構成は図2.5-1、試作したALVA-IIの写真は図2.5-2に示す。制御箇所は表 2.5-2 のようであり、1号機より大幅に簡素化することができた。各部の制御は、メインコントローラとは独立したスレーブCPUを有する車両制御コントローラを備えることにより、メインコントローラを介さずに操舵機構などのフィードバック制御を行うことが可能

表2.5-1 クボタGL-25の主な仕様

Table 2.5-1 Generous specifications of base tractor Kubota GL-25

| 項目 | 仕様 |
|------------|---|
| 形式 | 4輪駆動乗用トラクタ |
| 機関出力/回転 | 18.4 kW/2600 rpm |
| 全長×全幅×全高 | 3050×1350×1950 mm |
| 軸距 | 1645 mm |
| 前/後輪軸距 | 1080/1050 mm |
| 機体重量 | 1130 kg |
| 主変速 | 前進 8 速, 後進 8 速 油圧パワーシフト |
| 附属ロータリ耕うん機 | 形式: サイドドライブ 耕幅: 1600 mm |
| その他附属装備 | シャトル変速, 倍速ターン ロータリ作業機 自動耕深/水平制御機能 電気式作業昇降スイッチ (ポンパ) |

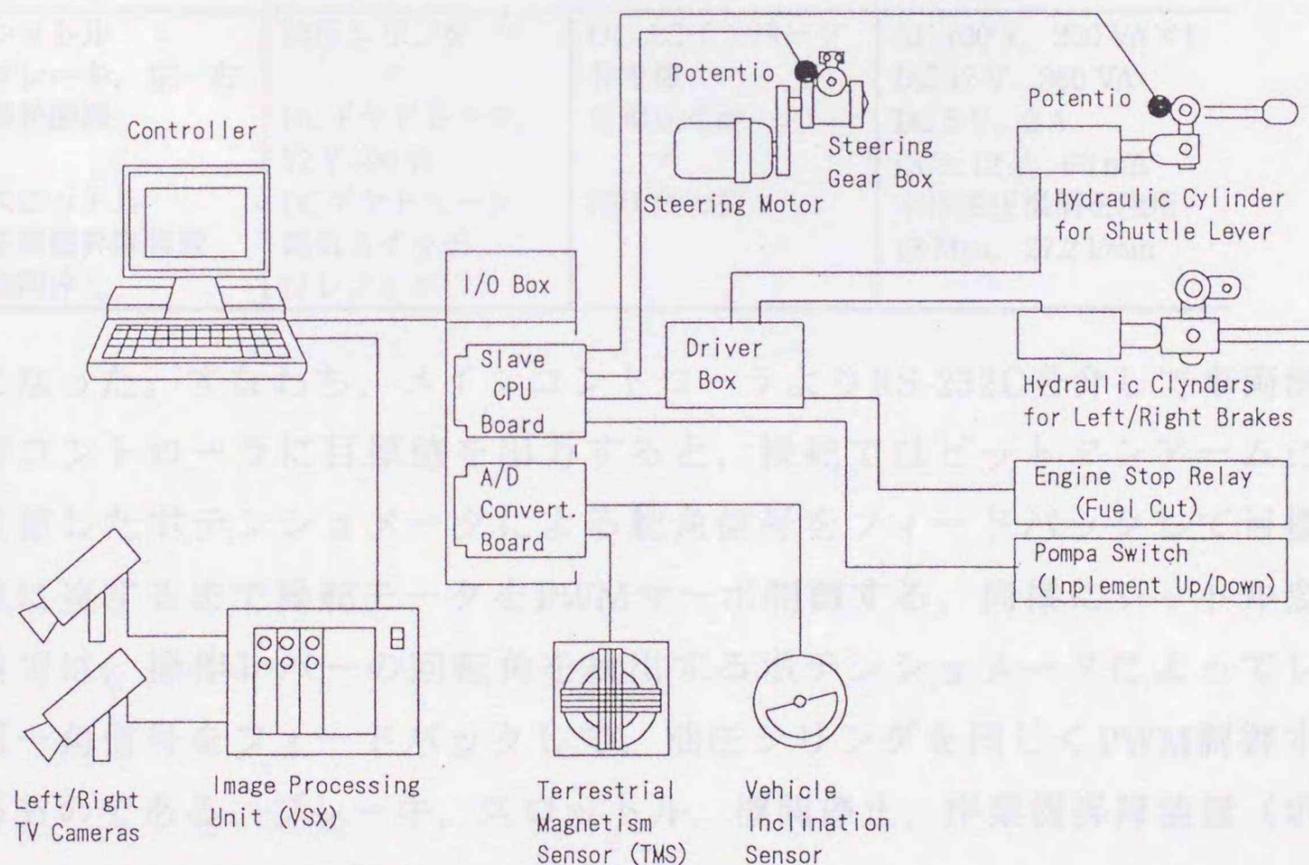


図 2.5-1 ALVA-II の機器構成

Fig. 2.5-1 Device configuration of ALVA- I

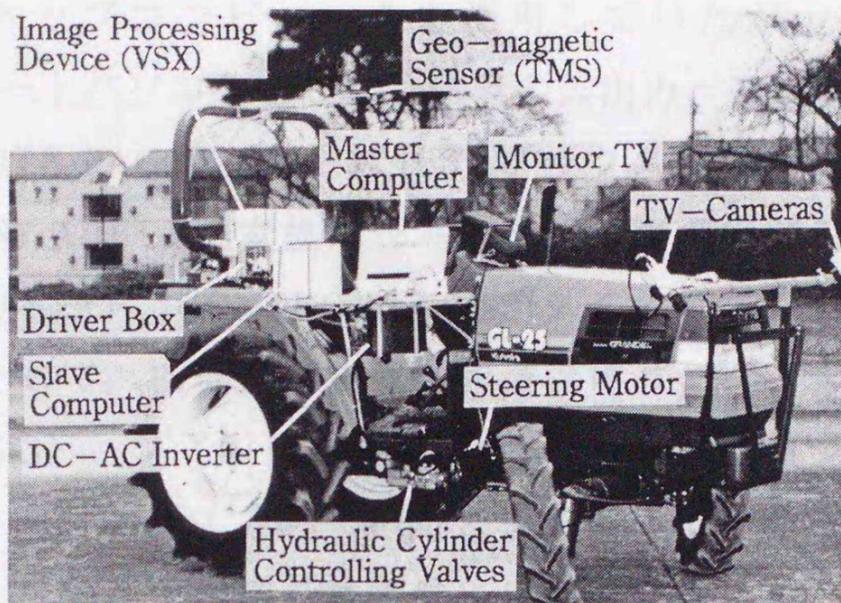


図 2.5-2 ALVA-II
Fig. 2.5-2 ALVA-II

表2.5-2 ALVA-II の制御対象と動力源一覧
Table 2.5-2 Control objects and power sources of ALVA-II

| 制御対象 | | 動力源 | |
|-----------|------------------------|------------|--------------------|
| 制御項目 | アクチュエータ | 動力源項目 | 主な仕様 |
| シャトル | 油圧シリンダ | DC-ACインバータ | AC 100 V, 200 VA×1 |
| ブレーキ, 左・右 | " | 発電機 | DC 12 V, 360 VA |
| 操舵機構 | DCギヤドモータ, 12 V-90 W | 定電圧電源 | DC 5 V, 2 A |
| スロットル | DCギヤドモータ | " | DC±12 V, 65 mA |
| 作業機昇降装置 | 電気スイッチ | 油圧動力源 | 本体油圧機構を流用 |
| 機関停止 | ソレノイド | | 13 Mpa, 27.2 l/min |

になった。すなわち、メインコントローラよりRS-232Cを介して車両制御コントローラに目標値を出力すると、操舵ではピットマンアームに直結したポテンショメータによる舵角信号をフィードバックして目標値に達するまで操舵モータをPWMサーボ制御する。同様にシャトル変速では、操作レバーの回転角を検出するポテンショメータによってレバー角信号をフィードバックして、油圧シリンダを同じくPWM制御するものである。ブレーキ、スロットル、機関停止、作業機昇降装置（ポンパ）はALVA-I同様ON-OFF制御である。

内界情報は、前記の操舵、シャトル位置に加え、作業機昇降装置の上・下位置のみである。メインコントローラは、当初、EPSON PC-286LF

STDラップトップコンピュータを使用していたが、後にNEC PC-9801NS-20ノートパソコンとした。信号の入出力、及び時間計測には、CONTEC NOTE-PAC(98)F-4A 拡張I/Oボックスに装着されたCONTEC ADA12-8/2(98) A/D・D/A変換ボード、前述の車両制御用の(株)農生研製スレーブCPUボード、CONTEC TIR-6(98)タイマボードなどを使用した。

安全対策として、前部及び後部の作業機周りにタッチスイッチを設置し（図 2.5-3）、スイッチがONになると車両制御コントローラと独立したリレー回路によりブレーキONと機関停止が同時に実行される。

自動運転と手動運転の切り替えは、自動・手動スイッチ、すなわち車両制御コントローラの電源をON/OFFすることにより行われるが、操舵機構は併せて手動で操舵モータクラッチの切り替えを行う必要がある。

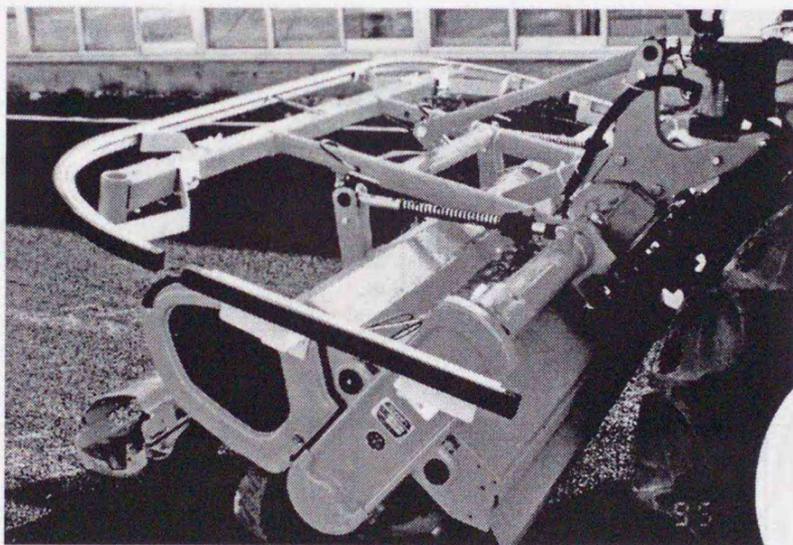


図 2.5-3 作業機周辺に装備したタッチスイッチ
Fig. 2.5-3 Touch switches equipped around the implement

その他各部に以下のような工夫を行った。

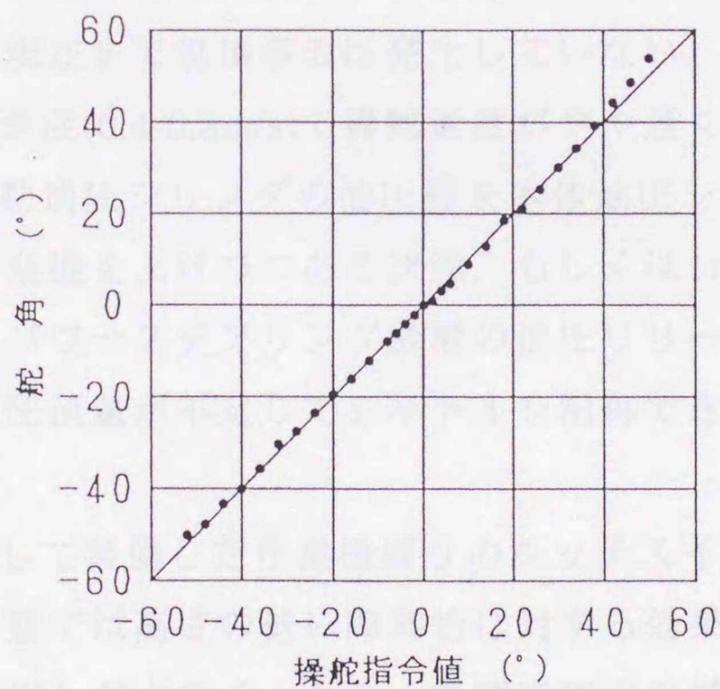
- 1) 操舵機構の左右終端位置を操舵モータの負荷電流で検出して操舵モータを停止させる。
- 2) 作業機昇降制御は、原車両のワンタッチ昇降スイッチ「ポンパ」を流用して、アクチュエータを設けず制御信号の出力のみで対応する。
- 3) シャトル・ブレーキのアクチュエータには、原車両本体に装備

されている油圧システムを用いた油圧シリンダを採用する。

- 4) シャトル制御は、動作を確実にするため、操舵機構同様のフィードバック制御とした。

2.5.2 制御性能

操舵範囲は、左右とも旋回内側前輪舵角約 65° であり、同 40° 付近から倍速ターンが機能する。車両をジャッキアップして精密な3次元寸法測定装置を用いて、指令舵角と実際の操舵角度を計測したところ、図 2.5-4 のようであり、圃場内で車両制御するに十分な性能が得られた。操舵時間 T_{st} は、コンクリート路面上で据え切りを行って測定した。操舵制御開始時の舵角から目標舵角に至る相対舵角を S_{tr} とすれば、CPU間の通信時間等が影響し、 $S_{tr} \leq 9^\circ$ では S_{tr} の大きさに関わらず $T_{st} = 0.6$



◆操舵時間 (指令～操舵完了)

$\leq 9^\circ$: 約 0.6 s

$\geq 10^\circ$: 約 $\{0.6 + (n-9) \times 0.03\}$ s

図 2.5-4 ALVA-II の操舵指令値と実舵角

Fig. 2.5-4 Relation between target value and controlled value of steering angle

[s]であり、 $S_{tr} > 10[^\circ]$ では概ね $T_{st} = \{0.6 + (S_{tr} - 9) \times 0.03\} [s]$ という関係になる。

スロットル、シャトル、左右独立ブレーキ、作業機昇降装置、機関停止はほぼマニュアル運転と同様な制御が可能であった。前部バンパスイッチ及び作業機周辺のタッチスイッチは、障害物等の接触面積が影響し約80kPaの圧力で作動し、走行速度約0.5m/sのときに、接触から約10cmで停止した。

2.5.3 性能評価

適宜不具合箇所を修正し、通算380時間にわたって各種試験に供試した結果、次のような問題点が認められた。

- 1) 操舵時の過負荷による操舵モータの焼損を防止するため、駆動スプロケットの固定にシアピンを使用しているが、希に破損して操舵不能になった。のちにシアピンを廃してスプロケットを溶接固定したが、現在まで焼損事故は発生していない。
- 2) 通常の作業速度(0.4-0.8m/s)で操舵速度がやや遅く感じられた。
- 3) シャトル駆動油圧シリンダの油圧源を本体油圧システムと共用したため、作業機を上げつつある状態、もしくはロック状態まで操舵を行ってパワーステアリング機構の油圧リリーフが作動する状態では、油圧流量が不足してシャトルを制御できないことがあった。
- 4) 安全対策として装備した作業機周りのタッチスイッチは、作業機を上げた状態では高さの低い障害物に対する効果が期待できない。また張り出しが大きく、かえって圃場周辺の構造物に接触する可能性が認められた。

2.6 試作3号機 (ROBOTRA) ⁶⁴⁾

ALVA-IIを基本としながら、その問題点を解消し、併せて農家における実証試験にも耐えるよう耐候性、耐久性などにも配慮した耕うんロボット専用の車両としてROBOTRAを製作した。

2.6.1 ハードウェア構成

原型とする車両は、国内で最も多く使用されている中型クラスとし、ALVA-IIの場合と同様に倍速ターン、シャトル変速、作業機自動制御機能などを装備している(表 2.6-1)。ALVA-IIにおける問題点のうち、2.5.3 2)は操舵モータを一新し、定格電力は低くなったものの最大負荷特性の優れたものとし、かつ減速機構をウォームギヤから伝達効率の高い遊星ギヤに変更した。同じく 3)はシャトルアクチュエータを電動シリンダに変更して対応した。車両及びアクチュエータ、車両制御コントローラは株クボタに、電源部は日本航空電子工業(株)に製作を依頼した。

表 2.6-1 クボタGL-321の主な仕様

Table 2.6-1 Generous specifications of base tractor Kubota GL-321

| 項目 | 仕様 |
|------------|--|
| 形式 | 4輪駆動乗用トラクタ |
| 機関出力/回転 | 23.5 kW/2800 rpm |
| 全長×全幅×全高 | 3180×1455×1985 mm |
| 軸距 | 1750 mm |
| 前/後輪輪距 | 1130/1110 mm |
| 機体重量 | 1280 kg |
| 主変速 | 前進 8 速, 後進 8 速, 油圧パワーシフト |
| 附属ロータリ耕うん機 | 形式: サイドドライブ 耕幅: 1700 mm |
| その他附属装備 | シャトル変速, 倍速ターン, ロータリ作業機自動耕深/水平制御機能, 電気式作業昇降スイッチ (ポンパ) |

機器の構成は図2.6-1に、試作したROBOTRAの写真を図2.6-2に、各種機器の搭載状況を図2.6-3に示す。制御箇所は表 2.6-2 に示すとおりであり、各アクチュエータは専用の車両制御コントローラを介して行

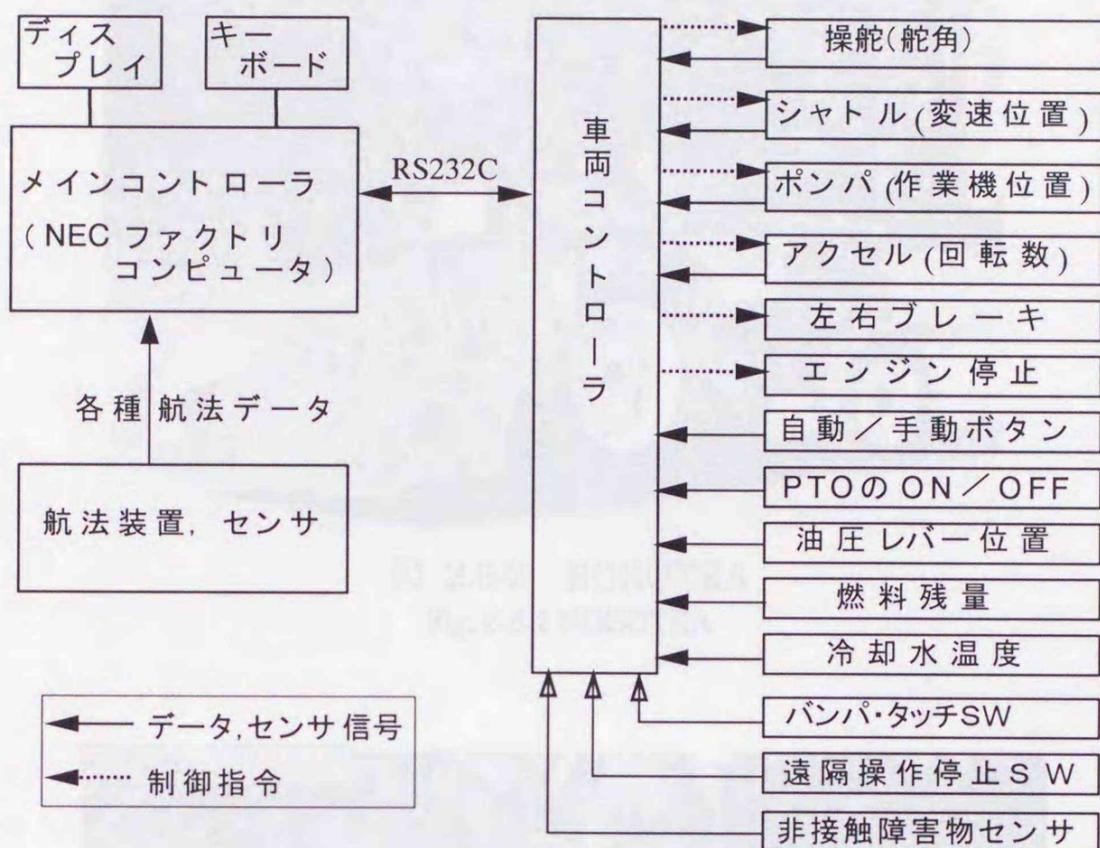


図 2.6-1 ROBOTRAの機器構成図

Fig. 2.6-1 Block diagram of the device configuration of ROBOTRA

表 2.6-2 ROBOTRAの制御対象と動力源一覧

Table 2.6-2 Control objects and power sources of ROBOTRA

| 制御対象 | | 動力源 | |
|---------------------------|--|--------------------------------------|---|
| 制御項目 | アクチュエータ | 動力源項目 | 主な仕様 |
| シャトル ブレーキ, 左・右 操舵機構 | DC電動シリンダ 油圧シリンダ DCギヤドモータ, 12 V-58 W | 発電機 定電圧電源 制御機器バック アップ用バッテリー | DC 12 V, 480 VA DC±12 V, 10A DC12V-5Ah×2 DC12V-1.3Ah×1 |
| スロットル 作業機昇降装置 機関停止 | DCギヤドモータ 電気スイッチ ソレノイド | 油圧動力源 | 本体油圧機構を流 用 6.5 Mpa, 28 l/min |

われる。舵角の制御は、ピットマンアームに直結したポテンショメータにより検出された舵角情報を、車両制御コントローラ内蔵サーボモータドライバにフィードバックさせて、指定した舵角が得られるようにアクチュエータをPWM信号により制御するものである。シャトルは、リミットスイッチにより位置を検出するON-OFF制御とした。ブレーキ他の制御は概ねALVA-IIの場合と同様な方法で制御される。

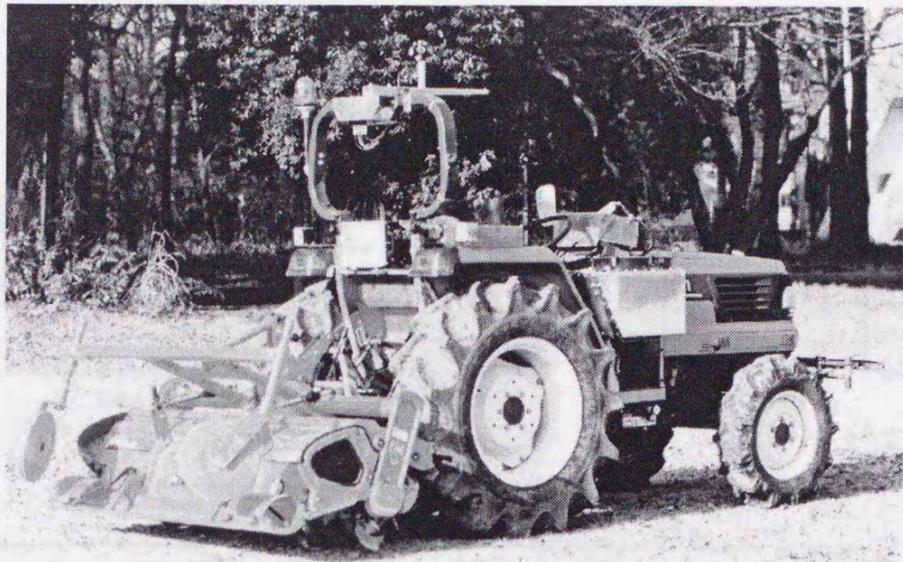


図 2.6-2 ROBOTRA
Fig. 2.6-2 ROBOTRA

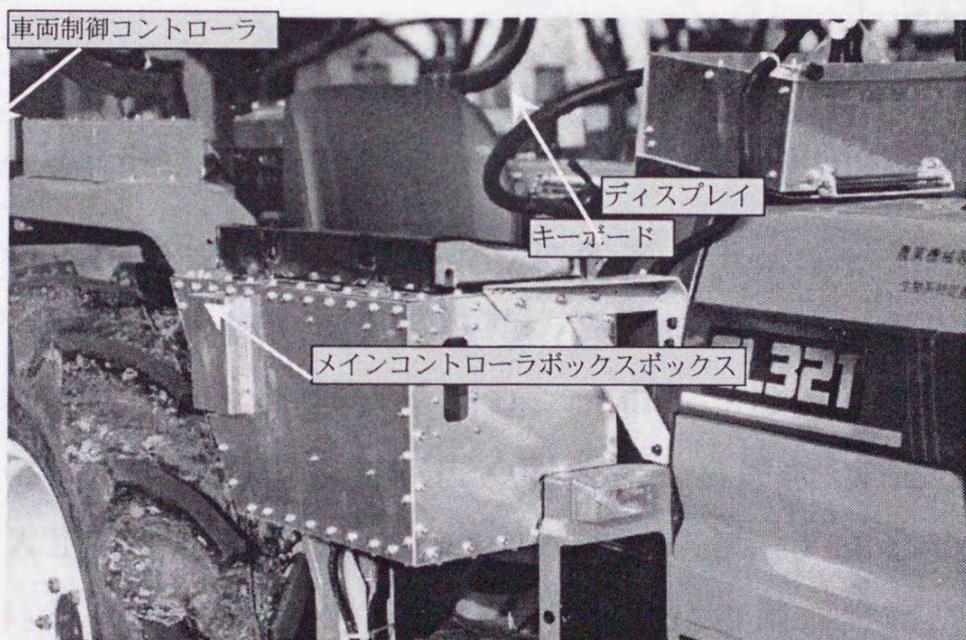


図 2.6-3 ROBOTRA の制御機器搭載状況
Fig. 2.6-3 Illustration of control devices on ROBOTRA

電源部は、メインコントローラ等の機器をDC電源化してDC-ACインバータを廃して簡略化を図るとともに、何らかの事情によってエンジンの再始動が必要な場合に、既に起動しているコントローラ等が電源電圧の降下によってシャットダウンしないように、かつ、短時間の大量電力消費などに対応できるように、バックアップ用のバッテリーを装備した。電源システムの概要は図 2.6-4のようである。

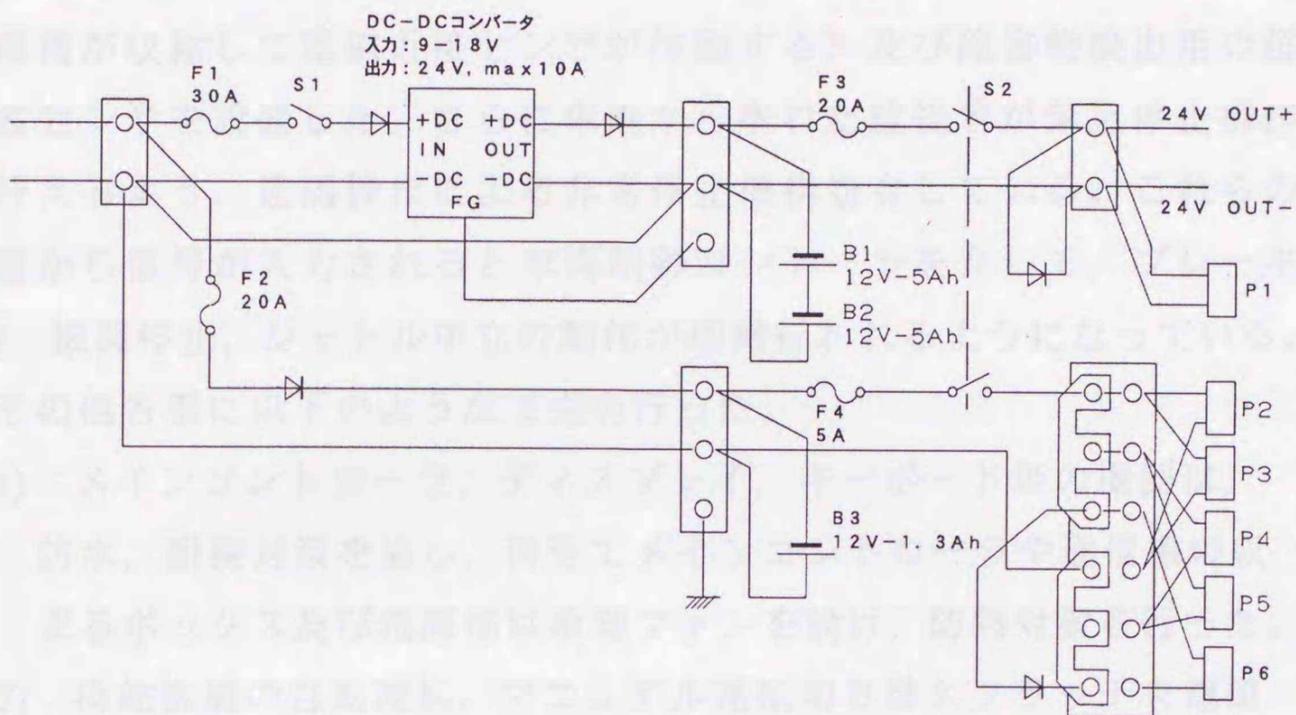


図 2.6-4 ROBOTRAの電源部配線図

Fig. 2.6-4 Block diagram of electric sources of ROBOTRA

内界情報は、図 2.6-1 に示すように各アクチュエータの制御状態以外にも、自己診断機能や無人運転時の異常検出機能に対応するため、多彩なものとなっている。メインコントローラは、一般のノートパソコンなどに比べ動作温度範囲が広く耐振性も良好な NEC FC9821Kaを採用し、入出力と機能向上のために各種ボード、アクセサリなどを装備している（表 2.6-3）。安全確保のために車両前方にバンパスイッチ（タッチセンサと電磁近接センサを併用し、何らかの事情によりタ

表 2.6-3 メインコントローラに実装されたボード等

Table 2.6-3 I/O boards installed in the main controller

| 機 能 | 型 式 等 |
|-----------|--------------------------|
| FDドライブ | NEC FC-9801-FD4 |
| HD " | " FC-9801-MD2 |
| 増設RASボード | " FC-9801-0,6K |
| " ROMファイル | " FC-9821KE-FR1 |
| " RAM " | " FC-9821KE-RF |
| A/D変換ボード | CONTEC ADA12-8/2(98)H |
| RS232Cボード | Interface 98RS232C(2)-HG |

タッチセンサのみで停止動作が行われないうちに、バンパのパンタグラフ機構が収縮して電磁近接センサが作動する) 及び障害物検出用の超音波センサを設置した。さらに車両から離れた監視者が緊急停止操作を行えるよう、遠隔操作による非常停止機構を有している。これらの装置から信号が入力されると車両制御コントローラを介して、ブレーキON、機関停止、シャトル中立の動作が即刻行われるようになっている。

その他各部に以下のような工夫を行った。

- 1) メインコントローラ、ディスプレイ、キーボード等の機器は、防水、耐振対策を施し、併せてメインコントローラや通信機の収まるボックス及び電源部は冷却ファンを設け、防熱対策を行った。
- 2) 操舵機構の自動運転、マニュアル運転切り替えクラッチを電磁クラッチにして、自動/手動ボタンに連動するようにした。
- 3) 地磁気方位センサ等に影響を及ぼさないよう、操舵モータのシールドを強化してノイズ対策を行った。

2.6.2 制御性能

操舵範囲は、左右ともピットマンアーム角度で約 55° 、旋回内側前輪舵角で 56° であり、前輪舵角約 30° 付近から倍速ターンが機能する。車両をジャッキアップして精密な3次元寸法測定装置を用いて、操舵指

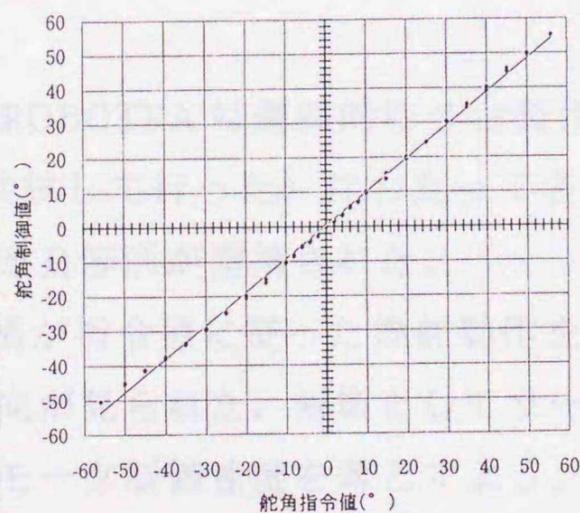


図 2.6-5 ROBOTRAの操舵性能

Fig. 2.6-5 Steering control performance of ROBOTRA

令値と実際に得られたの操舵制御値を計測した。その結果は図 2.6-5に示すように、指令値に対する制御値（舵角）の平均誤差は約 1° であり、圃場内で車両制御するに十分な性能が得られた。操舵に要する時間 T_s は、コンクリート路面上で測定し、操舵制御開始時の舵角から目標舵角に至る相対舵角を S_{lr} とすれば、停止状態（据え切り）で $T_s=0.032 S_{lr}$ [s]、 0.5m/s の速度で走行時には $T_s=0.023 S_{lr}$ [s]であった。

スロットル、シャトル、左右独立ブレーキ、作業機昇降装置、機関停止は、マニュアル運転と同様な制御が可能であった。

前部バンパのタッチスイッチは、接触面の面圧に応じてONとなるため、約 35 kPa 以下の圧力で作動し、同じく電磁近接スイッチは中央部において 200N で作動した。走行速度約 0.5m/s のときに、バンパスイッチ接触から約 10cm で停止し、常にタッチスイッチのみで停止動作が実行され、光電スイッチが作動する事態に至ることはなかった。障害物検出用超音波センサは、障害物を検出した際の作動状況はバンパスイッチの場合と同様であったが、障害物を認識する際の閾値（スレシヨルドレベル）の設定により、検出可能な障害物の大きさ、密度等は大きく異なる。しかし結局雑草は検出せず、人間は確実に検出するといった設定条件を得ることができなかった。遠隔操作非常停止機構は、 500m 程度離れたところからでも確実に作動し、作動状況はバンパスイッチの場合と同様であった。

2.6.3 性能評価

通算約 700 時間（ROBOTRA は最終的に 3 台製作され、本研究は 2 台目及び 3 台目を供試して行った）にわたって各種試験に供試し、次のような問題点、改良箇所が指摘された。

- 1) 当初、操舵機構が指令値に従った操舵動作を終了したのちもハンチングする傾向が見られた。対策としてサーボ制御の際の目標値付近におけるモータ制御速度を落とすよう、車両制御コントローラのアルゴリズムを変更して解決した。
- 2) 変速機の機構上避けられないことではあるが、極めて希にアク

チュエータが正常に作動しているにもかかわらず、シャトルギヤが入らないことがあった。この問題は、シャトルを入れたにもかかわらず前／後進しない場合は、シャトル中立とシャトル入りの動作を作業ソフト上で再試行するようにすることで解決した。

- 3) 安全装備としての超音波センサは、非接触で障害物を検出する機能を十分に果たしていない。
- 4) 車両のすべりやダッシングといった異常事態を検出するための内界センサが十分ではない。現在は、車両の位置変化を観測してこれらの現象を推定している。

2.7 まとめ

無人作業を実行する農用車両には、人間に近い全ての機能要素が必要である。これらの要素は、一般的なメカトロニクスシステムの5大要素と類似したものである。これら要素のうち運動機能やエネルギー供給機能などは、既存の車両系農業機械技術の積み重ねによって達成できると考えられる。一方、感覚機能のうちの航法センサや判断・認識機能のうちの作業ソフトは、農作業を前提に新たな技術開発を行ってはじめて達成できる要素であると考えられる。また農用車両には他の産業分野とは異なる使用条件があり、研究開発に際しては当初より低コスト化や信頼性・取扱い性に対する配慮が欠かせない。

ロボット化された農用車両の作業方法とその効果は、以下に示すとおりである。

- 1) 自律直進作業では、資材補給に要する農用車両の停止時間を減少させて能率向上を達成し、もしくはオペレータが自動化の進展が遅れている作業の補助を兼ねることによる省力効果を期待することができる。
- 2) 自律追従作業では、複数台の農用車両による組作業において、オペレータを減らすことが可能になり、省力効果を期待できる。
- 3) 自律全面作業では、1枚の圃場全面を完全に無人で処理することから、オペレータは一人で同時に多数のロボット化された農用

車両を運用可能で超省力効果を期待できる。

本論文では、自律全面作業を目標とし、派生的に自律直進作業や自律追従作業を扱うものとする。

車両システムは、

- 1) コントローラからの電気信号によって各部が操作できること、
- 2) 信頼性の高い内界センサを有すること、
- 3) 圃場間移動などを想定してマニュアル運転機構を有すること、
- 4) 非常停止機構などの安全装備を有すること、

を条件に比較的簡易な構成で1号機ALVA-Iから3号機ROBOTRAまでの試作開発を行った。これら車両システムは、各種試験に供試することができ、初期の条件を満たすことができた。特にROBOTRAは制御性能、耐候性、信頼性の点で十分に満足できる性能を発揮することができた。しかし最終機であるROBOTRAにおいても、今後さらに高度な無人作業を実行するためには、以下の点を改善する必要があると考えられる。

- 1) 各種作業機の状態検出や制御などを柔軟に行えるよう、車両内通信の標準化、ローカルプロセッサなどの装備を検討する必要がある⁶⁵⁾。
- 2) さらにきめ細かな車両制御を実行するためには、主変速機、デフロック機構、PTO変速機なども制御できるようにする必要がある。
- 3) 非接触対人センサを改良する必要がある。また非常停止機構などの安全装備は、全て車両制御コントローラを介して動作するが、現在まで車両制御コントローラの故障は皆無であった。しかし万一を想定して、車両制御コントローラがシャットダウンしたときの安全対策をも講じておく必要がある

第3章 航法システム

航法とは「移動体がある地点から他の地点への移動の進路を与える手段である」⁶⁶⁾と定義される。具体的には、移動体位置の座標、移動体の進行方位、時刻、速度などを必要とするものであり、ここではこれらの情報を得るための計測システムを航法システムと呼ぶ。すなわち航法システムは、車両の絶対的もしくは相対的位置、あるいは進行方位などを求めるものである。車両は、このデータに基づいて制御されるので、耕うんロボットにとって最も重要な要素技術である。

3.1 航法システムの現状

3.1.1 システムの分類

航法方式の分類⁶⁷⁾を表3.1-1に示す。各方式の計測原理は、以下のようなものである⁶⁸⁾。

表 3.1-1 農業分野における航法方式の分類
Table 3.1-1 Classification of navigation systems in the field of agriculture

| 経路 | 名称 | 検出対象 | 目標・センサ・施設等の例 |
|--------------|--------------|--------------------|---------------------------------|
| 固定 | A1.固定経路機械式 | 機械式ガイド | 畝, 溝, パイプ, レール |
| | A2. " 非接触式 | 非接触ガイド | 誘導ケーブル, レーザビーム |
| 半固定 | B スポットマーク式 | スポットマーク | 磁気標識(ネイル), 超音波標識 |
| 自由 | C1.内界情報慣性航法式 | 加速度 | ジャイロ+加速度計 |
| | C2. " 距離・方位式 | 距離(速度) +方位 | 車輪回転+地磁気センサ, ジャイロ |
| | C3. " 車輪回転差式 | 左右車輪回転 | 車輪回転, 左右クローラ回転 |
| | D1.外界情報追尾式 | 境界線等 | TVカメラ(作物列, 作業境界線) |
| | D2. " 相対距離式 | 壁面, 畝, 畦畔, 作物列等 | 超音波センサ(畝, 作業者), オフザワイヤ誘導ケーブル |
| | E1.外部標識三角測量式 | 複数の相対角度 | TVカメラ, 光電センサ+光反射標識 |
| | E2. " トラバース式 | 相対角度+距離 | トランシット+測距儀(車両追尾) |
| E3. " 双曲線航法式 | 複数の距離 | 電波灯台, レーザ灯台, GPS | |

1) 固定経路方式

固定経路方式は圃場内の走路に沿って連続的に、

- ① レール, 溝, パイプなどの機械的ガイド,

② 地中に埋設した電流を通じたケーブル，磁粉の列などの電気磁氣的ガイド⁶⁹⁾，

③ 光反射テープやレーザビームなどの光学的ガイド⁷⁰⁾，などを設置しておくものである。①の場合，車両の制御は，3輪車の前操向輪をガイドによって直接操向制御させるもの⁴⁰⁾や，ガイドに沿って動く誘導機構によって操舵機構を制御するもの⁹⁾などがある。②の場合は，磁界センサによって磁界を検出するが，ひとつのセンサで常に磁界が最大になるように車両を操舵制御する場合だけでなく，2つのセンサを用いて両者の検出値が等しくなるように操舵制御を行う場合⁷⁾，あるいは車両の進行方向に平行な磁界に感度をもつように磁界センサを備え，ケーブルの敷設方向と車両進行方向が平行でなくなるとき（進行方向がケーブル敷設方向に対して偏差をもったとき）センサから出力が得られるようにして操舵制御を行うもの⁷¹⁾などがある。③の場合は，コンクリート路面上に敷設した白色テープを複数の光反射センサで追尾する方式が広く工場内の無人搬送車（AGV）で普及している。また，畦畔上に置かれた投光器により発信されるレーザビームを田植機上の光センサで検出し，常時光センサの中央部にビームが来るように操舵制御を行う例などもある⁷⁰⁾。

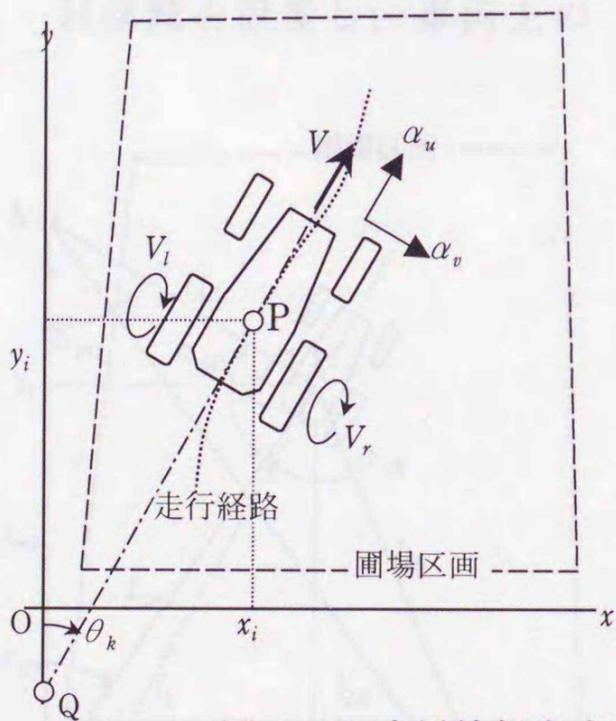
2) 半固定経路方式

この方式は，ガイドを連続的に設置せず，ある距離毎に，又は走路の交差点などに，磁気標識，超音波標識，光学標識，電波標識などのスポットマークを設置するものである。車両はこの離散的なスポットマークで自己位置を確認，修正して走行を行う⁷²⁾。さらに標識に固有の識別要素（ID）を付加し，事前にスポットマークのマップをロボットに与えておけば，状況によってスポットマーク地点で経路変更を行い，希望する地点へ誘導することも可能である⁷³⁾。

3) 内界情報方式

内界情報方式は固定経路方式に類似が，作業利や作業時などをガイドとして利用する点が固定経路方式とは異なり，ガイドと車両の

本方式は航空機の慣性航法 (inertial navigation system) と同様、デッドレコニング (推測航法) ⁷⁴⁾ と呼ばれるものであり、車両の走行距離とその間の走行方位から、車両の位置 $P(x_i, y_i)$ を時々刻々更新していくものである。本方式に用いられる各種パラメータを図 3.1-1 に示す。走行距離は、車輪回転数 V_l, V_r の平均もしくは速度 V などの積分値、加速度 α_u, α_v の 2 階積分値などから求められる。走行方位は、地磁気センサ、機械式ジャイロや光ファイバジャイロ (OFG) などのジャイロ ⁷⁵⁾、ジャイロコンパス、左右車輪の回転などにより測定され、地磁気の向き、あるいは基準軸に対する相対方位角 θ_k 、車両運動加速度 α_u, α_v のベクトル和、左右車輪 V_l, V_r の回転差などから求められる。なお、加速度の検出に際しては車両の運動による加速度と、ローリングやピッチング等車両の傾斜により生じる重力加速度とを、傾斜計やバーチカルジャイロにより分離する必要がある。



- Q: 基準線 Oy と車両中心線との交点
- P: 車両中心位置
- x_i, y_i : 地上座標系 $x-y$ における P の座標
- V: 車両走行速度
- θ_k : 基準線 Oy に対する車両の進行方位
- α_u : 車両固有の座標系 $u-v$ における車両の u 成分運動加速度
- α_v : 車両固有の座標系 $u-v$ における車両の v 成分運動加速度
- V_l : 左車輪の回転数
- V_r : 右車輪の回転数

図 3.1-1 内界情報方式における各種パラメータ
Fig. 3.1-1 Parameters on internal information system

4) 外界情報方式

外界情報方式は固定経路方式に近いが、作物列や作業跡などをガイドとして利用する点が固定経路方式とは異なり、ガイドと車両の

相対位置を検出してガイドに沿って走行するものである。ガイドとしては作物列⁷⁶⁾・株列・畦・畦畔・耕うん跡や草刈り跡などの作業境界線などがあり、これらの検出には接触センサ・超音波センサ、光電センサ・画像処理装置など⁷⁷⁾⁷⁸⁾が用いられる。

5) 外部標識方式

外部標識方式には、位置を検出する装置を車両側に設置する場合と、固定点に設置する場合がある。本方式は常に特定の固定点を基準として車両の絶対位置を検出するものであり、これに用いられる各種パラメータを図 3.1-2 に示す。車両の絶対位置 $P(x_i, y_i)$ は、距離 $l_k, l_{AP}, l_{OP}, l_{PB}$ 、角度 $\theta_k, \alpha_{AO}, \alpha_{OB}, \alpha_{AP}, \alpha_{PO}$ などを観測して、これらのデータを適宜組合わせ、幾何学的に算出する。

例えば、

- ① 固定点 Q において距離 l_k と角 θ_k を計測して、トラバース測量の原理により極座標的に (x_i, y_i) を算出⁷⁹⁾⁸⁰⁾,
- ② 距離 l_{AO}, l_{OB}, l_{AB} が既知である固定点 A, O, B に光反射標識を設置し、車両上の P 点に水平面上を回転する光電セ

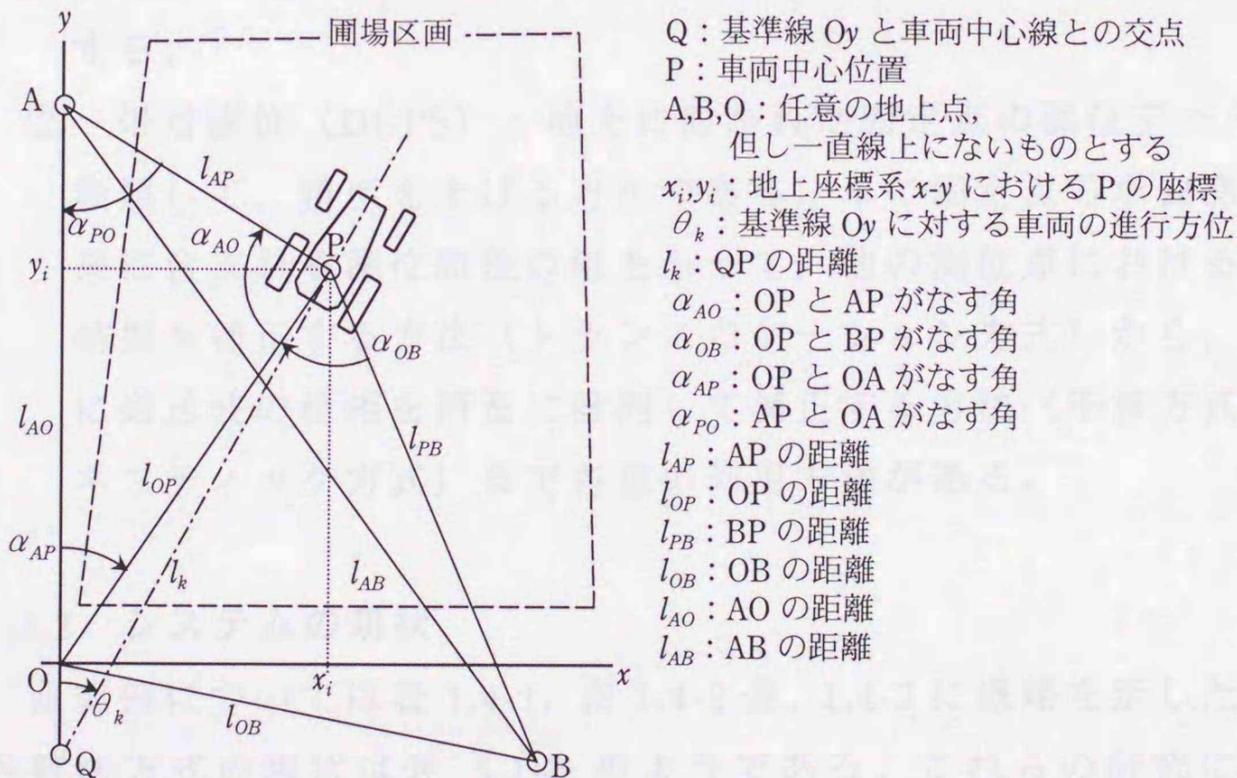


図 3.1-2 外部標識方式における各種パラメータ
Fig. 3.1-2 Parameters on external information system

ンサ及び同軸に備えられたエンコーダを備えて、により角 α_{AO} , α_{OB} を計測し、三角測量の原理により、 (x_i, y_i) を算出⁶⁰⁾,

③ AO間の距離 l_{AO} が既知であるA点、O点にテレビカメラを設置してP点を画像として取り込み、カメラの向きと画像上のP点位置から α_{AP} , α_{PO} を算出して (x_i, y_i) を算出⁸¹⁾,

④ 電波灯台などの座標が既知である固定点A、O、Bからの距離 l_{AP} , l_{OP} , l_{PB} を計測し、双曲線航法の原理により (x_i, y_i) を算出⁵⁷⁾⁸²⁾,

する方法などがある。本方式に用いる距離及び角度の測定には、光、電波、音波などを媒体にした、多種多様なものが見られる。

近年注目されているGPSは、衛星を基準点とし、電波を媒体と考えれば上記④に属するものである。GPSで使用する人工衛星は、地上2万kmの6つの円軌道上に最低各4個以上が配置されており、衛星からは原子時計を用いた電波発信時の正確な時刻などの情報が発信されている。位置計測の方法には、以下のものがある⁸³⁾。

① 単独測位：3個の衛星までの距離を測定して、地上の2次元位置、4個の衛星で3次元位置（緯度、経度、高度）を測定する。

② 相対測位（DGPS）：地上に置かれた固定点の測位データを参照して、精度を上げる方法である。単に固定点の単独測位結果に含まれる測位誤差の値をもって、他の測位点における測位結果を補正する方法（トランスロケーション方式）から、さらに搬送波の位相を精密に計測して補正する方法（干渉方式、キネマティック方式）まで各種の利用方法がある。

3.1.2 システムの現状

研究例については表1.4-1、表1.4-2表、1.4-3に概略を示したが、各航法方式の現状は表3.1-2のようである。これらの研究における実状及び一般的な状況は以下の通りであり⁶⁵⁾、各々の特徴を表3.1-3にまとめて示す。

表 3.1-2 農用車両のための航法装置の研究例

Table 3.1-2 Examples of research on navigation system for agricultural vehicles

| No. | 分類記号* | デバイスと方法 | データ | 計測誤差と条件 | データ更新周期 | 実施機関 | 備考 |
|------------------|-------|------------------------------------|--------------|--------------------------------------|---------|-----------------|--------------------|
| 1 ⁸⁷⁾ | C2 | 地磁気方位センサにより方位, タイマにより距離検出 | 方位変化 走行距離 | ≒0.3° (方位) | <1s | 生研機構 | 本論文 3.2 に詳述 |
| 2 ⁸⁸⁾ | C3 | 左右車輪回転数から方位変化, 距離検出 | 方位変化 累積位置 | <1%(距離) 路面状態により変動大 | <1s | 北里大学 | 長時間利用では累積誤差の補正必要 |
| 3 ³⁴⁾ | D1 | TVカメラにより耕うん境界線認識 | 相対位置 | <10cm, 圃場内 傾斜補正, 光学フィルタ | <0.1s | (株)農生研 生研機構 | 安定的な境界線検出が課題 |
| 4 ⁸⁹⁾ | D2 | CCD ラインセンサにより作物列の位置検出 | 相対位置 | <10cm 赤外線高 畦センサ併用 | <1s | 北海道 大学 | 作物列検出周期の短縮が課題 |
| 5 ⁹⁰⁾ | D2 | 超音波センサにより作物列との距離検出 | 相対距離 | <10cm 桑園内 | <1s | 蚕糸・ 昆虫研 | 距離情報の安定的検出が課題 |
| 6 ⁹¹⁾ | E1 | 車両上で回転する光電センサユニットにより圃場 4 角の光反射標識検出 | 圃場内 絶対位置 | <10cm 平坦地 40m 区画, 走行 速度<0.5m/s | ≒1s | 生研機構 | 適用区画の拡大と車両傾斜対策が課題 |
| 7 ³⁰⁾ | E1 | 複数の基準点~車両上標識の角度検出 | 圃場内 絶対位置 | <20cm, 100m 区画, 走行速度<1m/s | 1s | 北海道 大学 | 車両上標識の安定的認識, 追尾が課題 |
| 8 ⁶⁵⁾ | E2 | 自動追尾型測量機器により車両上の光反射ターゲットを検出 | 圃場内 絶対位置 | <2cm, >350m 区画 走行速度>2m/s | 0.5s | 生研機構 (株)トプコン | 本論文 3.3 に詳述 |

*: 分類記号は表 3.1-1 の名称に付したものである。

1) 固定経路方式

固定経路方式は自律走行の最も確実な方法であり, 工業分野では無人搬送車として広く実用化されている。固定経路方式は, 累積誤差の心配や標識を見失うといった心配が少なく, 位置決め精度も高いが,

- ① 軌道やケーブルなどが車両の走行距離と同じだけ必要で設備費がかかる,
- ② 作業の種類に応じた経路の変更が困難,
- ③ 圃場内に耕うん作業などの邪魔になるケーブルなどを設置しなければならない,
- ④ 走路が固定化し土壌踏圧の問題が懸念される,

などの短所もある。

2) 半固定経路方式

半固定経路方式は、マークを離散的に設置することによって、連続的な経路を設置せねばならない固定経路方式の短所を補ったものである。しかし、マーク間の距離が長くなるほど、その間を誘導するために用意した別の航法システムの精度が問題になる。半固定経路方式は、街中のように道路網そのものは固定的であっても、目的地に到達するためにどの経路を選択するかというような場合に特に有効である。しかし、圃場全面を塗りつぶすように作業することが多い農用車両では、一部の無人防除機で、ある行程の終端を認識するのに用いられているが⁸⁴⁾、適用場面はあまり多くない。

表 3.1-3 各航法システムの特徴
Table 3.1-3 Characteristics of each navigation system

| 名称* | 精度・計測周期の特徴 | コスト・取扱い性の特徴 | その他の特徴 |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|
| A1.固定経路機械式 | 精度は安定 | 経路設置コスト必要 経路の維持管理必要 | 信頼性高い 経路に自由度無し |
| A2. " 非接触式 | | | |
| B.スポットマーク式 | マークの存在密度が高いほど高精度 | マーク設置コスト必要 | 固定経路に比べ、 経路自由度あり、 マーク間の航法手段が別に必要 |
| C1.内界情報 慣性航法式 | センサにより精度は大きく異なる、 ドリフト避けられない | 車外設備一切不要、 センサによりコストは大きく異なる | 長時間利用では位置補正手段必要 |
| C2. " 距離・方位式 | | | |
| C3. " 車輪回転差式 | | | |
| D1.外界情報追尾式 | | 画像センサ利用の場合 は光源に注意必要 | 外界情報に連続性がない場合、別の航法手段必要 |
| D2. " 相対距離式 | | | |
| E1.外部標識 三角測量式 | 角度検出精度が位置精度に大きく影響 | 基準局必要 | 基準局－移動局間で何らかの信号のやりとりが必要 |
| E2. " トラバース式 | | " 車両追尾機構必要 | |
| E3. " 双曲線航法式 | | " | |
| E4. 外部標識 GPS 式 | | 測定方式によりコストは大きく異なり、基準局を要する場合もある | |

*：名称に付した分類記号は表 3.1-1 による。

3) 内界情報方式

車両外に一切の設備を要しない点、及び走行経路に制約がない点が最大の特長であるが、距離あるいは時間が長くなるほど累積誤差が増大する欠点がある。走行距離の計測は、圃場内で車輪の回転数を基にする場合、車輪のすべりにより誤差を生じやすく、速度や加速度による場合も、現状では低速域での精度やジャイロのドリフト（drift、累積誤差）などにより、長時間にわたって精度を維持することは難しい。また車両方位の計測はジャイロを用いる場合、従来の機械式ジャイロばかりでなく、光ファイバジャイロ（OFG）、リングレーザジャイロ（RLG）、振動ジャイロ、ガスレートジャイロなど近年急速に進歩してはいるが、ドリフトの大小とコストはトレードオフの関係にあって、未だ安価で高性能なものは少ない。このドリフトをいか圧縮するか、いかにして作業実行途中でキャンセル（リセット）するかが最大の課題である。従って本方式では、短時間に限定して使用したり、ドリフト誤差をキャンセルするための別の航法システムを用意するといった工夫が必要であろう。

4) 外界情報方式

外界情報方式は、固定的なガイドを設けず、作物列や作業境界線、畦などを利用する点が固定経路方式と異なる長所である。自脱型コンバインの接触センサを用いた条に沿う自動操向機能は、この方式の典型的な実用化例である⁸⁵⁾。しかし、

① 作物列などを利用する場合は、条と直交する方向や行程の途中で条が消滅したり、増えたりする場合の対応方法、

② 作物列や既作業領域と未作業領域の境界線を画像処理により検出するような場合、光源、圃場表面の状態などが大きく変化する場合の安定的な検出方法や、境界線がとぎれる枕地における対応方法、

などが今後の課題であり、別の航法装置を用意する必要性も考えられる。表 3.1-1 に示す D2 は垣根仕立の樹木列との距離を超音波センサなどで検出するような場合である。また、外界情報方式の特殊

な例として、対象が他の車両や作業者であった場合は、自動追従作業が可能になる。

5) 外部標識方式

外部標識方式は、絶対的な基準点を有するために累積誤差の心配がない点が長所であるが、基準局と移動局（車両）間の信号のやりとりに用いる媒体の特性として、

- ① 光・電波・音波などの媒体の物理的性質である減衰・回折・反射・拡散、
- ② 屋外では上記媒体への太陽光（光）・電磁ノイズ（電波）・騒音（音波）などのノイズ、

により誤差を生じたり、測定不能に陥るといった問題があり⁸⁶⁾、これらを解決すること及び角度や距離の計測精度を向上させ、計測周期を短くすることが課題である。

GPSでは現在のところ、単独測位では誤差100m以下、トランスロケーション方式で誤差数m、移動体を想定したリアルタイムキネマティック（RTK）方式で誤差数cm以下の測位精度が実現されている。なお、GPSは軍事目的で開発されたものなので、有事の際には意図的に精度を劣化させたり、利用を制限するなど不安な点もあるが、地上設備が比較的簡単であり、広い範囲で同時に利用できるという利点がある。

6) 現 状

以上のとおり、各航法方式には一長一短があり、複数の方式を組み合わせて必要な能力を得ているケースも多く見られる。

3.1.3 考察とまとめ

農業分野と他の分野における航法システムに対する条件の相違は、第2章表2.1-1に示したとおりである。農業分野の特徴は、面を塗りつぶすような走行を行うため、使用範囲がさほど大きくない割に走行距離、連続使用時間が長いこと、また路面やその他使用環境がかなり厳しいことなどである。また、オペレータが航法に関して専

門教育を受けた者ではない点や，年間稼働時間の短さに起因してコスト的な条件が厳しい点なども特徴である。

ここで 100m×50m の矩形圃場，作業幅 2m，作業速度 0.5m/s を想定すると，圃場区画の対角距離は約 112m であり，この 1 枚の圃場を処理する時間は，約 1.5 時間，総走行距離は約 2.5km になる。一方，表 3.1-4 に示す耕うんロボットの要求仕様を示した位置検出の許容誤差 <5cm，及び車両方位検出の許容誤差 <0.1° は，慣行の田植機作業における隣接条間のばらつきなどから推定しても，農用車両一般にとって妥当な目標値であると考えられる。すなわち，自由経路方式を前提に，例えば内界情報方式を想定して，許容誤差 5cm を分子に，総走行距離 2.5km を分母にとるとその比は 1/50,000 となる。これを誤差の比率と考えると，航空機における慣性航法が好条件下でも 1/1,000 程度の誤差を有する点からも，現状の内界情報方式のみによって圃場 1 枚を処理することが容易ではないことが推定される。同様に外部標識方式を想定して対角距離 112m を分母にとった場合でもその比は 1/2,240 となり，かなり高い要求精度であることがわかる。また方位検出誤差が常に 0.1° であったとすると，誤差が 0 であった場合に比べ，100m の距離を直進した際にその走行軌跡は横方向に 17cm ずれることになる。

表 3.1-4 耕うんロボットの航法装置の要求仕様
Table 3.1-4 Required specifications of navigation system for tilling robot

| | |
|----------|--------------------------------|
| 圃場区画 | 矩形な 100×50m 以上の区画 |
| 走行速度 | 1m/s 以下 |
| 位置検出精度 | 圃場のどの点でも ±5cm 以下 |
| 進行方位検出精度 | " ±0.1° |
| 航法情報更新周期 | 1s 以下 |
| 使用環境 | 車両のロール・ピッチ ±5° 以下代かき状態を含む不整地走行 |

3.1.2 項ならびに以上の点を考慮すると，現在のところ「農業」にそのまま流用できるような航法方式は殆ど考えられないが，圃場条件や作目，作業ステージによる一般的条件等は以下のとおりである⁹²⁾。これらをまとめて各種航法方式の農業場面における一般的

な適用性を表 3.1-5 示す。

- 1) 水田や畑では，圃場全面の土壌（走路面）を直接耕うんするので固定経路機械式は適用が困難である。また，固定経路型のものでは走路が固定されるので土壌踏圧による浸透性の悪化等が懸念される。
- 2) 半固定経路方式は，マーク間の航法には何らかの他の方法を併用せざるを得ないため，作業によってはコスト的に問題があるろう。
- 3) 区画の大きい圃場，あるいは連続作業時間の長い作業では，内界情報方式のものは累積誤差による航法精度の低下が問題となる。車輪の回転から移動距離を推測することは，柔らかい圃場ではすべりにより誤差が懸念される。
- 4) 車両上から外界情報，既知点，進行方位などを観測する際，あるいは外部から車両上の標識等を観測する際には，車両の口

表 3.1-5 各航法システムの適用性⁶⁵⁾
Table 3.1-5 Characteristics of each navigation system⁶⁵⁾

| 航法方式* | 使用上の制約 | 農業場面への適用性* | | | | | |
|--------------|---------------------|------------|----|-----|-----|----|-----|
| | | 水田 | 畑地 | ハウス | 果樹園 | 草地 | 施設内 |
| A1.固定経路機械式 | 走路が限定される | × | × | ○ | ○ | × | ○ |
| A2. " 非接触式 | | △ | △ | ◎ | ◎ | × | ◎ |
| B.スポットマーク式 | 内界情報等の併用必要 | △ | △ | ○ | △ | △ | ○ |
| C1.内界情報慣性航法式 | 長距離、長時間の場合には累積誤差が問題 | □ | | | | | |
| C2. " 距離・方位式 | | △ | △ | △ | △ | △ | △ |
| C3. " 車輪回転差式 | | | | | | | |
| D1.外界情報追尾式 | 追尾すべき作物列等が不可欠 | ○ | ○ | ◎ | ○ | ○ | ○ |
| D2. " 相対距離式 | | | | | | | |
| E1.外部標識三角測量式 | 光学式では樹木等の遮蔽物がないこと | | | | | | |
| E2. " トガ-ス式 | | ◎ | ◎ | △ | △ | ◎ | △ |
| E3. " 双曲線航法式 | | | | | | | |

*:分類記号は表 3.1-1 の名称に付したものである。

*2:一般的な区画の面積，形状等を前提に作成

◎:ほぼ全作業に適用可能

○:作業等を限定すれば適用可能

△:作業，区画の大きさを制限すれば適用可能

×:ほぼ全作業に適用不可能

ール，ピッチにより誤差を生じるので補正する必要がある。

- 5) 圃場内には地図に相当するものは殆どないのでマップマッチング手法⁹³⁾は適用できない。
- 6) 外界情報方式は，代かきなど作業境界が不明瞭な場合や，畝，作物列等が明瞭でない場合には適用できない。
- 7) 外部標識方式のものは媒体によっては障害物により計測不能になる。例えば光を媒体とした場合，果樹園では樹木により光が遮蔽されるし，ガラス室では反射光により計測に異常をきたす可能性があり，GPSは電波状況の悪いところには不向きである。

耕うんロボットの航法装置に要求される性能は，概略表 3.1-5 に示すとおりであり，基本的に圃場内の位置情報と車両の進行方位情報を併用せざるを得ないと考えられる。位置検出精度は作業機の重複幅を 10cm 前後と想定し，残耕を残さないようその半分を許容誤差とした。方位検出精度は，想定している圃場の長辺，約 100m の間の数 10m が何らかの事情で，方位情報のみによる無人運転になった際にも作業機の重複幅を維持できるように，かつ現状の方位センサの可能性を考慮して想定した。位置情報の取得周期は，1s 以下としたが，この間時々刻々の位置変化は必要に応じてデッドレコーディングなどの方法によって補完することを想定している。従って，耕うんロボットの航法システムには，位置情報検出方式として外部標識方式が適切と考えられ，旋回時の車両方位検出や，あるいは位置情報検出システムの異常時などに一時的に無人作業を継続させるために，内界情報距離方位式を併用することが適当と判断し，次節以下の研究を行うこととなった。

3.2 地磁気方位センサシステム (TMS) の開発

本項は、安価でしかも誤差の累積がない地磁気方位センサ (Terrestrial Magnetism Sensor, 以下 TMS) を用いて走行方位を検出することをねらいとし、その利用方法について研究を行ったものである。

TMS により走行方位を検出する方法は、これまでも多くの分野で適用され、自動車のナビゲーションシステムにも利用されてきた⁹³⁾。しかしながら、自動車は、他の車両やビル、橋梁など地磁気を乱す構造物が多く存在する市街地を走行し、時には大電流の流れる鉄道架線を横断するなど、TMS にとっては厳しい環境下にあるため、検出方位は数°以上の誤差を含んでいた。その後、TMS に替わり、GPS が自動車用ナビゲーションシステムの基幹航法システム⁸³⁾となり、地図情報を参照して累積誤差をキャンセルするマップマッチング手法により精度向上を図っている⁹⁴⁾。

3.2.1 地磁気とセンサの概要

3.2.1.1 地磁気の性質⁹⁵⁾

地球内部の核 (流体) は、地殻に対し相対的な回転運動や対流運動をしている。このような運動により良導体である核内ではダイナモ発電が行われ、その電流の作る磁場が地表で地磁気として観測されるという。

地磁気は、方向と大きさを持った 3 次元のベクトル量であり、通常、水平面内で真北からの角度 (偏角)、水平面となす角度 (俯角)、及び水平面内の大きさ (水平分力) の 3 つの要素で表される。図 3.2-1⁹⁶⁾は、日本の磁気図であり、日本国内でも沖縄と北海道で偏角が 5° 程度違う。局所的に見ると、鉄鉱床のある所や火山地方では地磁気が異常な分布を示し、例えば、伊豆大島三原山の頂上付近では数 km の範囲で偏角が約 10° 異なるという。地磁気の水平分力は、東京付近で約 300mG であり、おもちゃの磁石でも数 10 G の磁場をつくることを考えるとかなり微弱なものである。

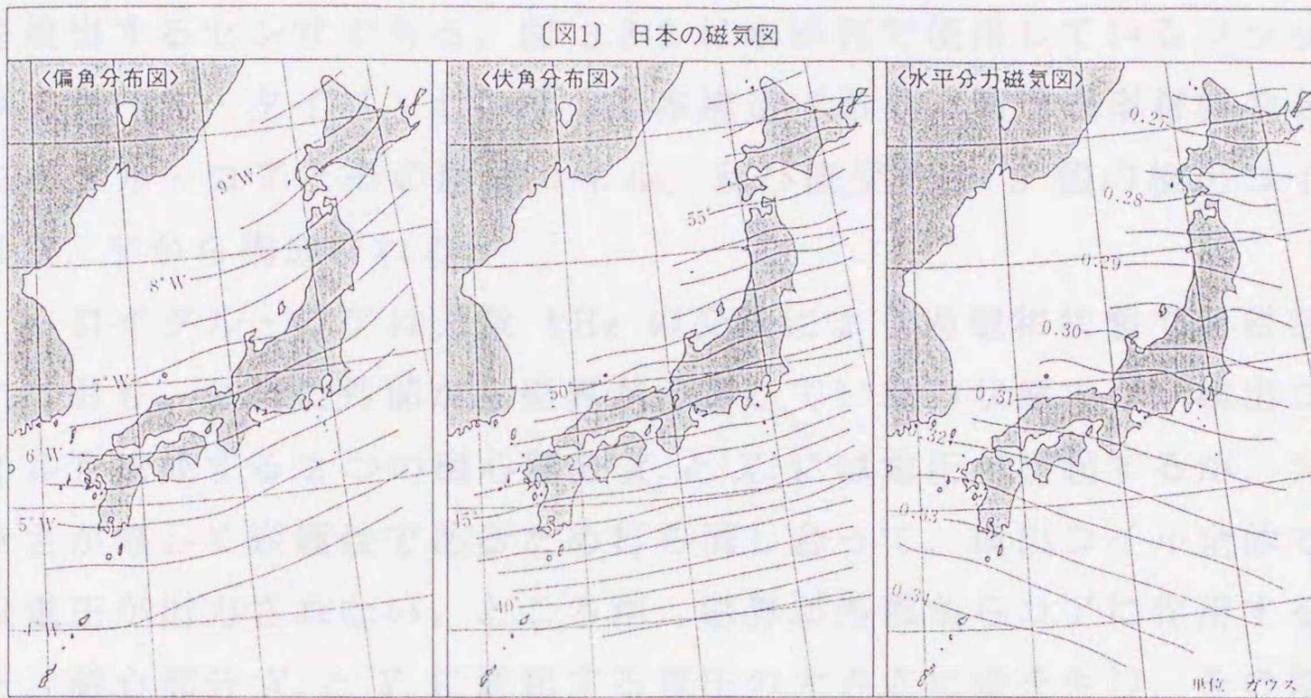


図 3.2-1 日本の磁気図
Fig. 3.2-1 Maps of terrestrial magnetism in Japan

地磁気の時間的変化としては、ゆっくりとした経年変化や、規則正しい日変化があり、日本付近では偏角 10 分 (0.17°) 程度の日変化がある。この他、時には偏角が 1° も変化するような磁気嵐現象もある。このように、自然環境の下で種々の変化を見せる地磁気は、その大きさが微弱であるため、人工的な構造物等によってもかなり大きな局所的変化を見せる。

3.2.1.2 地磁気方位センサの構造と方位の検出⁹⁷⁾

TMS は地磁気を計測する電子式コンパスであり、地磁気の偏角

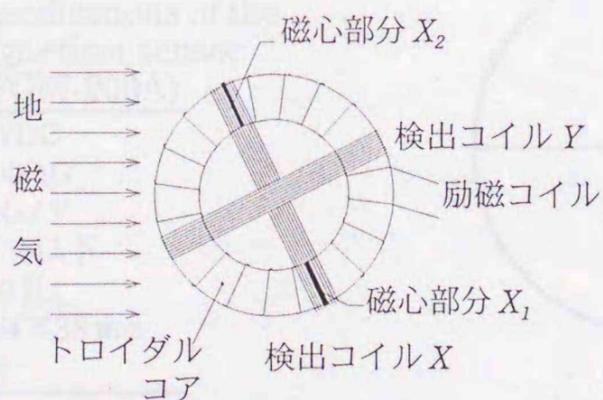


図 3.2-2 地磁気方位センサの基本構造
Fig. 3.2-2 Basic mechanism of a terrestrial magnetism sensor

を検出するセンサである。図 3.2-2 は本研究で使用しているフラックスゲート・タイプ・センサの基本構造であり，高透磁率材料のトロイダル・コアとその励磁コイル，及び直交する 2 個の検出コイル X ， Y から構成される。

トロイダル・コアは，数 kHz の交流により過飽和状態で励磁されており，コアに外部から磁界が作用していない状態では，検出コイルを構成する 2 つの磁心部分 X_1 と X_2 には電圧が誘起するが，大きさが等しく逆極性であるため打ち消し合って，検出コイル全体では電圧が出力されない。ところが，磁界が外部からコアに作用すると，磁心部分 X_1 と X_2 に誘起する電圧の大きさに差を生じ，その差の電圧が検出コイルから出力される。この出力はフィルタ回路及び位相検波により直流電圧に変換されるが，直流電圧の大きさは，外部から作用する磁界の大きさに比例する。外部から作用する磁界が地磁気のみであれば，その大きさは，検出コイルの磁心断面に対する地磁気の方角（角度）の \cos （余弦）に比例するため，地磁気の向きは直交する 2 個の検出コイルの出力電圧から求められる。

本研究で使用した TMS（表 3.2.-1 参照）は，3次元タイプのもので，互いに直交する 3 個の検出コイル X ， Y ， Z から構成される。各検出コイルの感度は 250 mG/V である。各検出コイルからの出

表 3.2-1 供試地磁気方位センサ
(Watson FGM-200A) の主な仕様
Table 3.2-1 Specifications of the
terrestrial magnetism sensor
(Watson FGM-200A)

| | |
|-------|-------------------------------------|
| 入力電圧 | 6-40 VDC |
| 測定範囲 | $\pm 1000 \text{ mG}$ |
| 感度 | 250 mG/V |
| 直線性誤差 | $\pm 0.5\%$ 以下 |
| 周波数応答 | DC-20 Hz |
| 寸法 | $45 \times 64 \times 38 \text{ mm}$ |
| 重量 | 113 g |

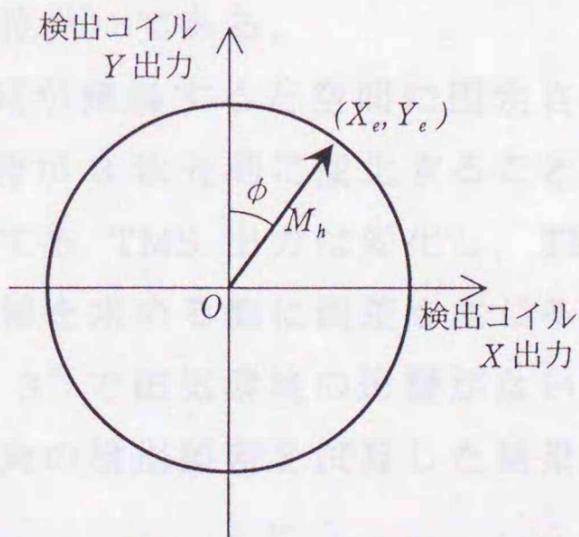


図 3.2-3 TMS 単体を 360° 回転させた
ときの出力図

Fig. 3.2-3 TMS output
when turned around 360°

力電圧を X_e , Y_e , Z_e とすると, センサを水平面内で 360° 回転させたときの X_e , Y_e は, 理論的には図 3.2-3 のように変化し, 地磁気の水平分力 M_h , 鉛直分力 M_v , 偏角 ϕ (方位角), 俯角 ψ は,

$$M_h = 250 \times (X_e^2 + Y_e^2)^{1/2} \quad (3.2-1)$$

$$M_v = 250 \times Z_e \quad (3.2-2)$$

$$\phi = \tan^{-1} (X_e / Y_e) \quad (3.2-3)$$

$$\psi = \tan^{-1} (M_v / M_h) \quad (3.2-4)$$

により求められる。

TMS を農用車両に搭載して方位検出を行う場合,

- 1) 作業機を含めた車両自身の影響,
- 2) 車両の傾斜の影響,
- 3) 構造物や他の車両の影響,
- 4) その他の影響,

などにより誤差を生じることが考えられる。

3.2.2 傾斜補正法

3次元空間における車両の姿勢は, 車両の傾斜であるロール角, ピッチ角と, 車両の向きであるヨー角で表され, 航法システムが検出したいものは, ヨー角 (車両の方位角) である。

TMS を車両に固定した場合, 車両が傾斜すると空間に固定された地磁気に対する TMS の姿勢が 3次元的に変化することとなる。この結果, 車両の傾斜によっても TMS 出力は変化し, TMS 出力から車両の方位角 (ヨー角) 情報を求める際に誤差を生じる。例えばロール角が 5° , ピッチ角が 3° で磁気環境の影響がないことを前提に, 車両の傾斜による方位角の検出誤差を試算した結果, その誤差は最大 6° 程度となる⁹⁸⁾。

この誤差を補正する方法として, 車両が傾斜しても TMS は水平を保つような機構 (ジンバル機構など) を適用する方法が考えられ

る。しかし、農用車両のロール・ピッチはランダム振動であって周波数に変動が大きいこと、及び TMS と車両の位置関係が変動して磁気環境補正の精度は低下することから、この方法は必ずしも適当な方法とは言えない。

そこで本論文では、車両のロール・ピッチを傾斜センサにより実際に検出し、TMS 出力に 3 次元座標変換を施すことによって、幾何学的に車両が水平な時の方位角情報を推定することとした⁹⁹⁾。

具体的には、傾斜センサにより検出したロール角を R 、ピッチ角を P 、3 次元の TMS 出力を、 X_e 、 Y_e 、 Z_e 、方位角を ϕ_i とすると、(3.2-5)～(3.2-7)式によって水平時の各軸地磁気分力を算出し、(3.2-3)式と同様に(3.2-8)式によって、方位角を求める。

$$X_s = X_e \cos R - Z_e \sin R \quad (3.2-5)$$

$$Y_s = -X_e \sin R \sin P + Y_e \cos P - Z_e \cos R \sin P \quad (3.2-6)$$

$$Z_s = X_e \sin R \cos P + Y_e \sin P + Z_e \cos R \cos P \quad (3.2-7)$$

$$\phi_i = \tan^{-1} (X_s / Y_s) \quad (3.2-8)$$

この一連の傾斜誤差補正を傾斜補正と呼ぶこととする。

3.2.3 磁気環境補正法

3.2.3.1 車両自身の影響¹⁰⁰⁾¹⁰¹⁾

地磁気方位センサを搭載する車両や作業機は、鉄などの磁性材料により構成されているため、それ自身が磁気を帯びたり磁場を乱す要因となる。

図 3.2-4 は、TMS を試験用車両 ALVA-I の①、②、③の部位に取り付け、車両を 360° 旋回させたときの出力 X_e 、 Y_e を計測した結果である。TMS を単体で回転させたときの出力（図 3.2-3）に対し、①の部位では、車両の形状による影響（透磁率の影響）も加わり出力は、だ円状になっている。②の取り付け部位では、車両自身が持つ磁気の影響で、全体的に中心がオフセットした円状となる。③の

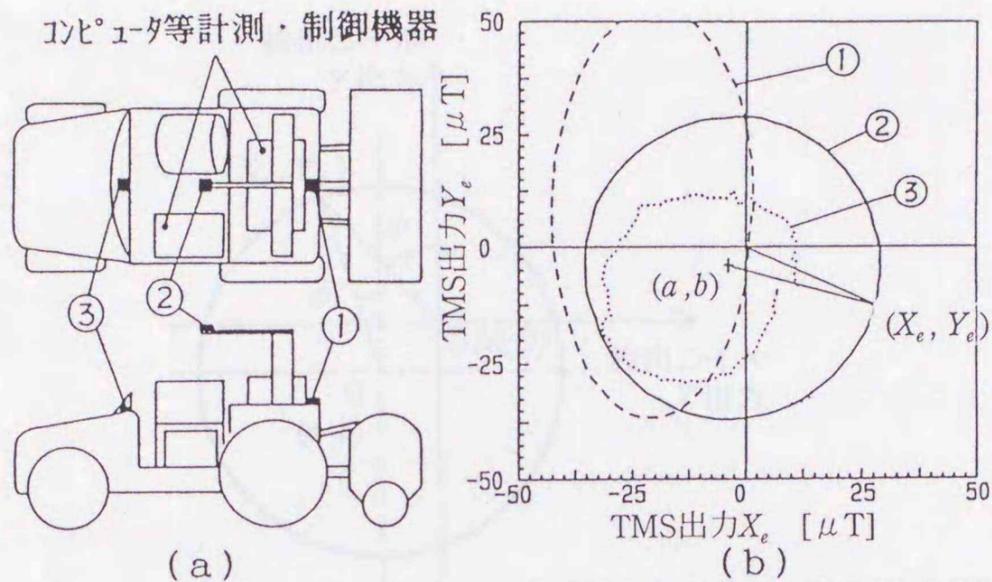


図 3.2-4 TMS 取り付け位置による出力の様子
Fig. 3.2-4 Characteristics of the TMS output with the fixed positions

部位では、エンジンやその補機に起因する磁気ノイズの影響が出力に現れている。作業機の上げ下げが TMS 出力に及ぼす影響は、同様に取付け位置を変えて調べたが、②の部位が最も影響が小さかった。これらの結果から、TMS 出力に及ぼす車両自身の影響は大きいものの、②のように、できるだけエンジンや作業機、さらには電気機器や電線などから離れた位置に TMS を取付けることによって、影響を最小限にすることができることが判明した。

ロータリ作業機を装備した車両システム ALVA-I の、図 3.2-4 の②の部位に TMS を取付けた場合、車両自身もつ磁気が TMS 出力に及ぼす影響の大きさは、経時変化はあるものの地磁気のほぼ 10% 以下であった。例えば 10% の影響があると仮定すると、方位角の検出誤差は 10° 程度に及ぶと試算された。

この影響による方位検出誤差は、車両が持つ磁気の影響による TMS 出力のオフセット分 (a, b) を考慮せずに、方位角を(3.2-3)式により求めた結果生じる誤差であり、方位角を、

$$\phi_i' = \tan^{-1}((X_e - a) / (Y_e - b)) \quad (3.2-9)$$

により求めれば、誤差は補正される(図 3.2-5)。

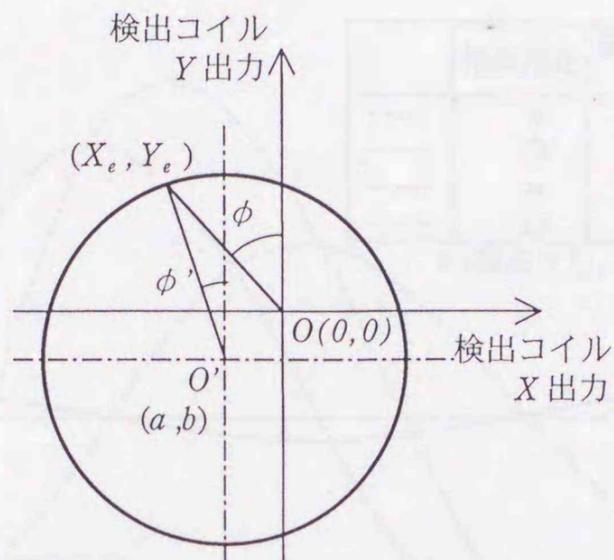


図 3.2-5 TMS を 360° 回転させたときの出力図
 Fig. 3.2-5 TMS output when turned around 360°

TMS 出力のオフセット分 (a, b) を求める方法としては、車両を 180° 異なる 2 方向に向けたときの TMS 出力値の平均値として求める方法⁹⁷⁾、車両を 360° 回転させた時の TMS 出力から、最大値と最小値の平均値として求める方法¹⁰²⁾、TMS 出力値のゼロ切片から求める方法¹⁰³⁾、などがある。農用車両でこれらの方法を実施する場合、車両を正確に 180° 異なる 2 方向に向けることが難しいこと、回転中に TMS 出力を等回転角度毎に細かくサンプリングすることが難しいことなどから、本研究では、 360° 回転させたときの全 TMS 出力を円で近似して、その中心の値としてオフセット分 (a, b) を求めることとした⁹⁸⁾。

なお、傾斜補正 (3.2-5) ~ (3.2-8) 式では TMS 出力 Z_e を用いるため、より精度の向上を図るためには、出力 Z_e に対しても磁気環境補正を行う必要があると考えられた¹⁰⁰⁾。ここで X 軸、Y 軸の磁気環境補正值 a, b が各々 -50mV 、 -100mV で、Z 軸の磁気環境補正值 c が -100mV であり、ロール角 R が $+5^\circ$ 、ピッチ角 P が $+3^\circ$ の条件で、方位角による検出誤差の大きさを試算した例を図 3.2-6 に示す。すなわち X 軸及び Y 軸に対して磁気環境補正を行い、かつ傾斜補正を行った場合、Z 軸に関して磁気環境補正を行わなくても方位検出誤差はさほど大きくはない (最大 1° 程度) ことがわかった。また、TMS 出力 Z_e に関する磁気環境補正值は、車両を宙

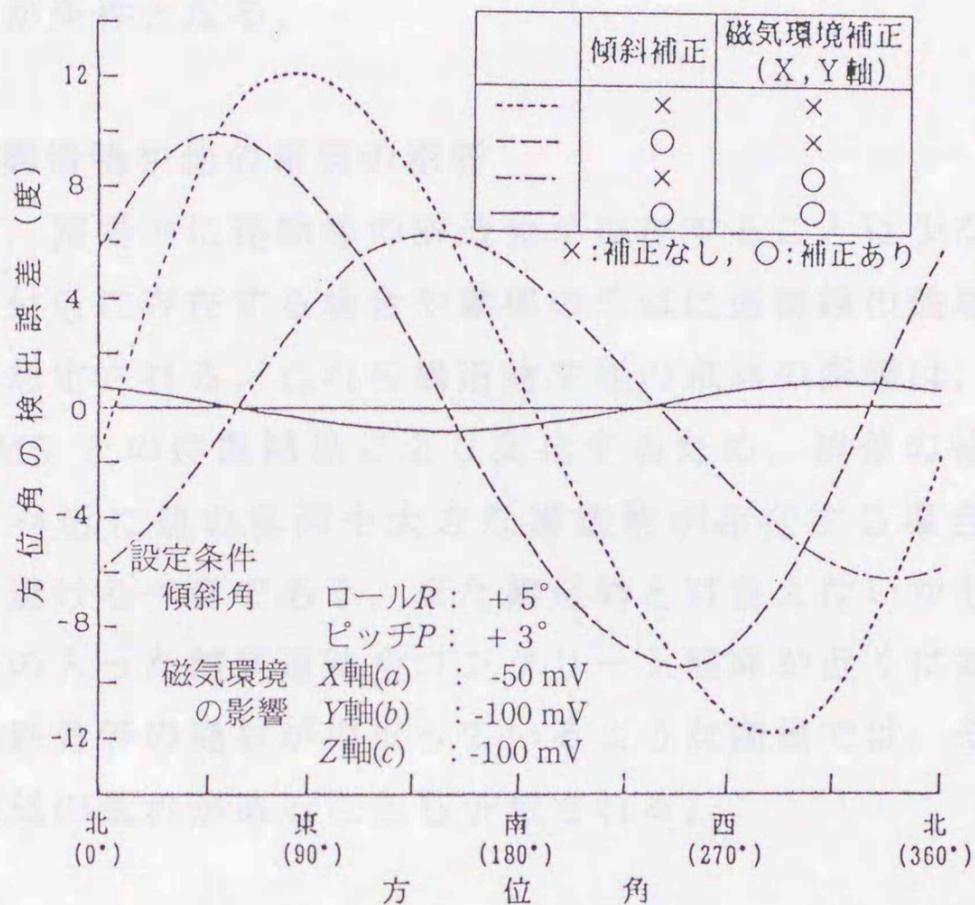


図 3.2-6 Z軸の磁気環境補正のみを行わなかった際の算出方位の誤差
 Fig. 3.2-6 Errors of the computed direction in case surrounding magnetism calibration of the Z axis is not applied

返りさせて計測する必要があるために、容易に求められないことから、TMS出力 Z_e に対する磁気環境補正は現段階では行わないこととした。

以上、車両の磁気が TMS 出力に及ぼす影響の大きさ、すなわちオフセット分を求め、方位検出時に TMS 出力から差し引く補正法を磁気環境補正と呼び、影響の大きさ (a , b) を補正值と呼ぶこととするが、この補正值は一定不変のものではなく、随時更新する必要がある。作業機を交換したり、踏切などの強磁気環境下の走行や車両に衝撃が加わることによって、車両の磁気状態が変化するため、上記の 360° 旋回及び TMS 出力の円近似によるオフセット分の算出を随時行い、補正值を更新することが望ましい。

なお、磁気環境補正と傾斜補正の関係は、磁気環境補正を行った TMS 出力に傾斜補正を施すというものであり、(3.2-5)~(3.2-7)式の X_e , Y_e は、予め前述の磁気環境の補正值 (a , b) を差し引いて

おくことが条件となる。

3.2.3.2 構造物や他の車両の影響

一般に、圃場内に建物等の構造物が存在することは少ないが、他の車両が付近に存在する場合や圃場のそばに送電線の鉄塔などがある場合が想定される。これら構造物や他の車両の影響は、その大きさが、TMS との位置関係により変化するため、誤差の補正は困難である。付近に他の車両や大きな構造物が存在する場合は、TMS の利用を避けるべきである。また構造物とは言えないかもしれないが、鉄筋の入った舗装道路やコンクリート畦畔が近くにある場合、あるいは鉄骨等の廃材が埋まっているような圃場では、それらの付近で地磁気の乱れがあることも予想される。

3.2.3.3 その他の影響

100m×50m 程度の大きさで、構造物や車両が付近に存在しない圃場では、同一圃場内での地磁気の乱れはごく小さく、ほとんど無視できると予想される。それでも、磁気嵐や日変化等の自然条件の変化や、TMS 自身の器差などにより、方位検出において誤差が生じる。しかしながら、これらの誤差は、TMS により地磁気を計測して方位を求める場合には避けられないものであり、TMS を利用する際の前提として考えざるを得ない。

3.2.4 性能評価

1) 傾斜補正

図 3.2-7⁹⁸⁾ は、試験用車両 ALVA-I に表 3.2-1 に示す TMS、及び表 3.2-2 の傾斜センサ、及びロール角・ピッチ角を正確に計測するためのジャイロセンサ (OFG) を車両システム ALVA-I に装備して、約 0.4m/s の速度で一定の方位に走行させ、高さ 15cm の段差を片輪で乗り越えた場合の検出方位角 ϕ_i の変化を示したものである。ジャイロセンサの計測結果から傾斜センサのオーバーシュア

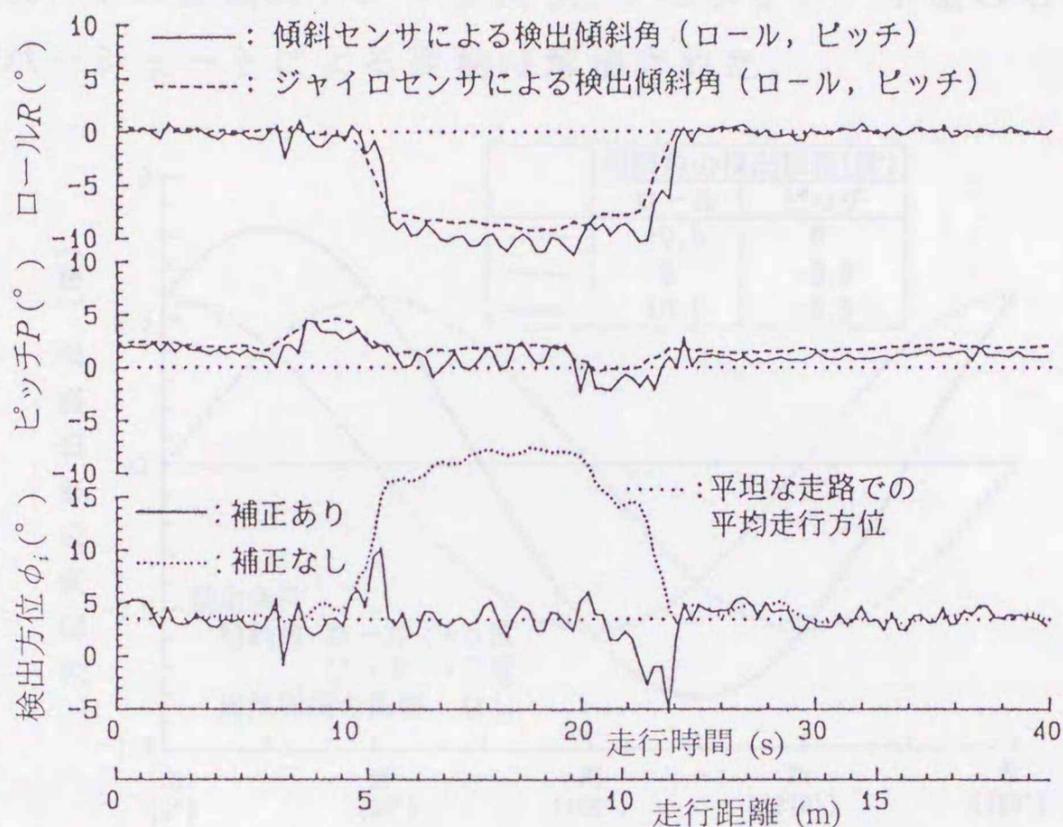


図 3.2-7 傾斜補正の様子
Fig. 3.2-7 Effects of inclination calibration

表 3.2-2 供試傾斜センサ(Lucas Shaevitz Inc. Accustar) の主な仕様

Table 3.2-2 Specifications of the inclination sensor (Lucas Shaevitz Inc. Accustar)

| | |
|-------|-------------------|
| 入力電圧 | ±8-20 VDC |
| 測定範囲 | ±45 ° |
| 感 度 | 0.01° |
| 直線性誤差 | ±0.1 %以下 (0-±10°) |
| 応答周波数 | 0.5 Hz 以下 |
| 寸 法 | 66×58×28 mm |
| 重 量 | 86 g |

トによる細かな変動すなわち誤差が見られる。しかし傾斜センサの出力を基に傾斜補正を行った結果、車両のロール・ピッチに関わらず概ね一定の正しい方位を検出していることがわかる。ここで、傾斜センサの誤差が算出方位角に及ぼす誤差の大きさを試算した結果を、図 3.2-8 に示す。図からわかるように、ロール角 R が $+5^\circ$ 、ピッチ角 P が -5° の誤差を有するとき、南西及び北東の向きで約 0.8° の方位検出誤差を生じることがわかる。

なお、その後傾斜センサを表 3.2-3 に示すサーボ型のものに改め、オーバーシュートによる変動は解消された。

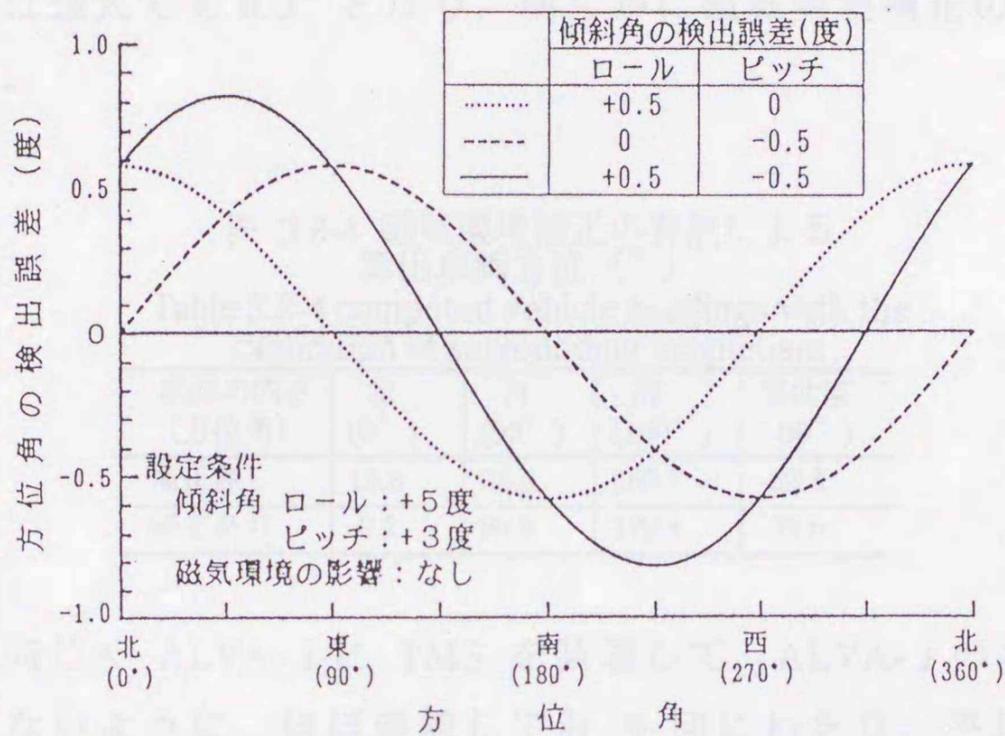


図 3.2-8 傾斜角センサの誤差が方位検出結果に及ぼす誤差
 Fig. 3.2-8 Errors of the computed direction caused by the errors of inclination data

表 3.2-3 供試傾斜センサ (Sensorex Model 41200) の主な仕様
 Table 3.2-3 Specifications of the inclination sensor (Sensorex Model 41200)

| | |
|-------|--------------|
| 入力電圧 | 9-18 VDC |
| 測定範囲 | ±30 ° |
| 分解能 | 0.1 秒以下 |
| 直線性誤差 | ±0.05 %FS 以下 |
| 応答周波数 | 14 Hz 以下 |
| 寸法 | ×× mm |
| 重量 | g |

2) 磁気環境補正

極めて平坦な圃場において、TMS 単体で計測した北 (0°)、西 (+90°)、南 (±180°)、東北東 (-60°) の向きに ALVA-I を正確に据え付け、装備された表 3.2-1 に示す TMS によって地磁気を計測した。事前に計測しておいた円近似法による補正值 (a, b) = (-39.25, -114.38)[mV] を使用して、磁気環境補正を行ったときと、

行わなかったときの算出車両方位角 ϕ_i を表 3.2-4 に示す。磁気環境補正を行わない場合、最大 13.8° の誤差が見られたが、補正によって誤差は最大でも 0.9° となり、明らかに磁気環境補正の効果が見られた。

表 3.2-4 磁気環境補正の有無による
算出車両方位 ($^\circ$)

Table 3.2-4 computed vehicle headings with the
calibration of surrounding magnetism

| 車両の向き (方位角) | 北 (0°) | 西 (90°) | 南 (180°) | 東北東 (-60°) |
|----------------|--------------------|---------------------|----------------------|------------------------|
| 補正無し | 13.8 | 98.5 | 169.7 | -62.3 |
| 補正あり | -0.2 | 90.9 | 179.8 | -59.5 |

次に同じく ALVA-I に TMS を装着して、ALVA-I の着磁状況が変化しないように、ほぼ連続して計 8 回にわたり、平坦な圃場内で ALVA-I を 360° 回転させ、磁気環境補正值の算出に使用するデータ (x_e, y_e) を取得した。このデータを基に、3.2.3 に示した単純に総平均をとって補正值 (a, b) を算出した場合、同じく最大値と最小値により算出した場合、同じく円近似により算出した場合の補正值を表 3.2-5 に示す。円近似による方法の方が標準偏差は低目になる傾向であり、より安定的に補正值を取得できると考えられる。

表 3.2-5 磁気環境補正值算出方法の違い
による補正データの変動

Table 3.2-5 Difference of the computed vehicle
headings with the computing methods of
calibration value of surrounding magnetism

| | X 軸方向 [mG] | Y 軸方向 [mG] |
|-----------|---------------|---------------|
| 単純総平均 | -20.9 (1.00) | -61.6 (2.08) |
| 最大と最小の中央値 | -19.8 (0.28) | -58.1 (0.38) |
| 円近似 | -19.6 (0.33) | -57.2 (0.19) |

360° 回転時の TMS 出力から算出、
8 回の試行結果の平均値、() 内は標準偏差

同じく ALVA-I に TMS を装備して、ALVA-I に装着したロータリ耕うん作業機を上げたときと下げたときの検出方位の差を調べた

結果を表 3.2-6 に示す。表から明らかのように、TMS の装着位置によっては作業機の位置の変化が検出方位に大きく影響することがわかる。

表 3.2-6 作業機の位置による
検出方位角の変化
Table 3.2-6 Difference of the detected
vehicle heading with the positions
of implement

| TMS の取り付け位置 (図 3.2-4 参照) | 作業機上昇時と下降時の検出方位角の差 (°) |
|--------------------------|------------------------|
| ① | 5.94 |
| ② | 0.11 |
| ③ | 6.15 |

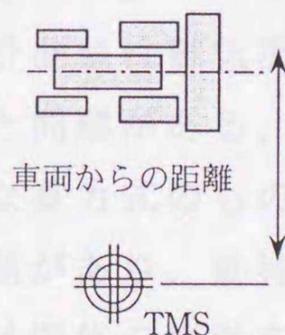
3) 構造物や他の車両の影響

TMS 単体を平坦な圃場に設置し、周囲にトラクタなどの車両がない場合と、62.5 kW のトラクタがある距離に存在するときの検出方位角の相違を表 3.2-7 に示す。表からわかるとおり、数 m 以下の近距離に他の車両が存在する場合はその影響を無視できない。

表 3.2-7 圃場内の他の車両が
検出方位角に及ぼす影響
Table 3.2-7 Influences to the detected
vehicle heading with other vehicles
in the field

| 車両からの距離 [m] | TMS による検出方位角の平均誤差 (°) * |
|-------------|-------------------------|
| 車両無し | 0 (基準) |
| 10 | 0.03 |
| 5 | 0.25 |
| 3 | 0.87 |
| 1 | 4.89 |

*北、東方位に対する検出値の誤差の平均

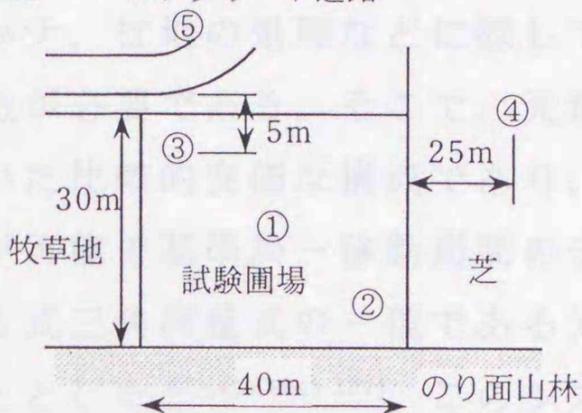


また、コンクリート道路や芝地、試験圃場、これに続くのり面となっている山林などが存在するところで、同じく TMS 単体をいろいろな位置に同一の方位に向けて設置し、各々の点における検出方位角を調べたものが、表 3.2-8 である。圃場内でも 0.3° 程度の偏差が生じ、コンクリート路面では明らかに鉄筋など磁性体の影響を

表 3.2-8 場所による検出方位角の誤差
 Table 3.2-8 Difference of the detected direction
 depend on the area

| TMS による検出方位角 の平均誤差 (°) * | |
|-----------------------------|--------|
| ① | 0 (基準) |
| ② | 0.32 |
| ③ | 0.21 |
| ④ | 0.10 |
| ⑤ | 1.50 |

*東西南北4方位に対する
 検出値の誤差の平均値



受けている。

3.2.5 考察とまとめ

TMS は、安価でジャイロのようなドリフト誤差を含まず、かなり精度よく車両方位を検出できることがわかった。最終的には、計測値をコンピュータに取り込み、傾斜補正、磁気環境補正を行った後の計測精度は、往復行程の目標方位をマニュアル運転によるティーチングによって取得することを前提に、TMS 情報によって車両を往復自律直進走行させた場合の走行軌跡から推定して、 0.3° 以下の再現性誤差を示す精度を確保することができた (第4章 4.2.4)。

しかし、微弱な磁気を計測するため、計測値は磁気環境補正不能な周囲の構造物に影響を受ける、といった問題がある。また、傾斜補正を行うための傾斜角センサは、単純な重力式のものでは、ローリング、ピッチングに対する応答性に問題があり、動特性の優れたサーボ型のものでは、装着方法によっては機体の振動を拾うといった問題もあった。

これらのことから TMS は、絶対的な方位検出精度は表 3.1-5 に示した目標である 0.1° の検出精度には及ばなかったが、ティーチングを前提とする再現性を重視した方法で使用すれば、耕うんロボットに十分利用可能と判断された。

3.3 光波測距式位置計測システム (XNAV) の開発

前節で車両方位検出法には一定の見通しを得たが、行程の始端・終端位置、行程間の作業ピッチ、枕地の処理などに際しては圃場区画に対する相対的な位置情報が必要である。そこで、光電センサとロータリエンコーダを用いた比較的安価な構成であり、かつ移動局(車両)上で全ての処理が可能で基準局-移動局間のデータ通信を必要としない、外部標識方式三角測量式の一つである光電式位置計測システムを開発することとした^{60),91),104)-107)}。このシステムは、数年間にわたって研究を続けたが、最終的な試作システムにおいても100m×50mの圃場区画に供試できるよう改良できる見通しが得られなかった。

そこで、かつて耕うんロボットの移動経路計測用に開発研究を行った非接触作業軌跡記録装置¹⁰⁸⁾¹⁰⁹⁾により得られた経験をもとに新たな方式XNAVの開発を行った。XNAVは、外部標識方式トラバース式の一つで、距離を計測する光波測距儀と基準線からの角度を計測するトランシット、これらの光軸を常時車両上の標識に追尾させる追尾機構などにより構成されている。

なお、後述するように本システムを開発中に、計測原理をほぼ同じくする製品が測量機器メーカーより市販化され、所期の性能を満たしていたので開発を中断した経緯から、各々区別する必要がある場合は、独自開発のものをXNAV-I、市販品をXNAV-IIと呼称する。XNAV-Iは、サンヨー電機(株)、日本エレクトロセンサリーデバイス(株)に設計・製作を依頼した。

3.3.1 計測原理¹¹⁰⁾

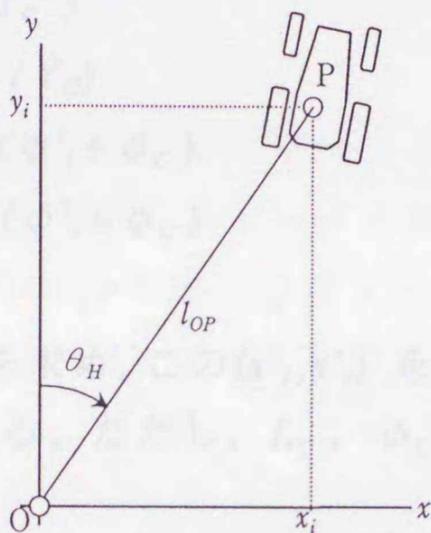
XNAVの計測原理は図3.3-1のように、車両(移動局)上に設けられたターゲットPを基準局のトランシット部中心 $O(x_0, y_0, z_0)$ から観測し、OP間の斜距離 l_{OP} と、基準線と線分OPがなす水平角 θ_H 、鉛直角 θ_V を求め、 l_{OP} 、 θ_H 、 θ_V よりターゲット点の座標 $P(x_i, y_i, z_i)$ をトラバース測量の原理、

$$x_i = l_{OP} \sin \theta_H \quad (3.3-1)$$

$$y_i = l_{OP} \cos \theta_H \quad (3.3-2)$$

$$z_i = l_{OP} \cos \theta_V \quad (3.3-3)$$

によって求めるものである。



- P : ターゲット中心位置
(車両中心位置)
- O : 基準局設置点,
- l_{OP} : OPの距離
- x_i, y_i : 座標系 $x-y$ におけるPの座標
- θ_H : OPとOyがなす角

図 3.3-1 XNAVによる位置検出の原理
Fig. 3.3-1 Theory for detecting the vehicle position by XNAV

なおターゲット点は、車両の周囲全方向から視認されなければならないので車両の最も高い点に設置されるが、車両の制御に必要な位置情報は、地上面における機体中心位置である。機体が常時水平であればターゲット点を機体中心上に設け、その座標 x_i, y_i をそのまま地上面における機体中心位置として扱ってよいが、車両は路面の状況によって機体がロール・ピッチするのでターゲット点と地上面における機体中心位置は一致しない。そこで、車両の進行方向（機体中心線の向き）を Y 軸とし、水平時のターゲットの点を地上に投影した点、すなわち地上面における機体中心位置 O' を $(0,0)$ とす

る車両座標系 $X-Y$ を設定する。 $X-Y$ におけるターゲット位置の地上投影点座標を (X_c, Y_c) とし，地上面における機体中心位置を (x'_i, y'_i) とし，ロール角を R ，ピッチ角を P ，ターゲットの地上高さを h としたとき，

$$X_c = h \sin R, \quad Y_c = h \sin P \quad (3.3-4)$$

$$L_c = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2} \quad (3.3-5)$$

$$\phi_c = \tan^{-1}(X_c / Y_c) \quad (3.3-6)$$

$$x'_i = x_i - L_c \cos(\phi'_i + \phi_c) \quad (3.3-7)$$

$$y'_i = y_i - L_c \cos(\phi'_i + \phi_c) \quad (3.3-8)$$

によって (x'_i, y'_i) を求め，この (x'_i, y'_i) を制御ソフト上では (x_i, y_i) として扱うものとする。ただし， L_c ， ϕ_c ， ϕ'_i は図 3.3-2 に示す。

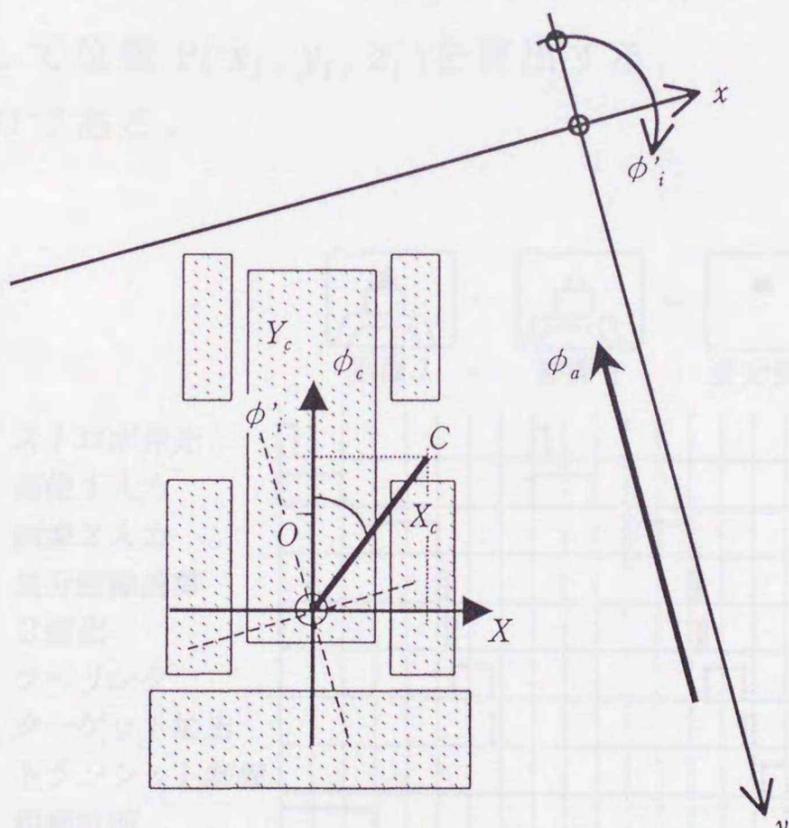


図 3.3-2 計測座標の傾斜補正時のディメンジョン
Fig. 3.3-2 Dimensions in data calibration by vehicle inclinations

実際の計測では，斜距離 l_{OP} は，近年急速に低価格化が進んだ光波測距儀（レーザ測距儀）により計測し，水平角 θ_H と鉛直角 θ_V は，

トランシット部駆動用モータに取りつけたロータリエンコーダで計測する。基準局のトランシット上には、光波測距儀と光軸を合わせてTVカメラを装備している。線分OPは、このTVカメラにより、車両に搭載されたストロボ発光体を備えたターゲットを常時追尾・視認することにより得られるが、その方法は図3.3-3のように¹¹⁾、

- 1) ターゲット上のストロボが発光状態の画像1と、非発光状態の画像2をTV画像1フレーム分、すなわち約67ms間隔でサンプリングし、
 - 2) 画像1と2の差分画像を求め2値化し、
 - 3) 差分画像のうちからストロボの画像を抽出し、
 - 4) 1)~3)の動作を再度繰返してターゲットの移動速度を計算し、
 - 5) ストロボ画像がTV画面の中央に来るようにトランシット部を動かし、
 - 6) トランシットの水平角 θ_H 、鉛直角 θ_V とともに距離 l_{OP} を計測して位置 $P(x_i, y_i, z_i)$ を算出する、
- というものである。

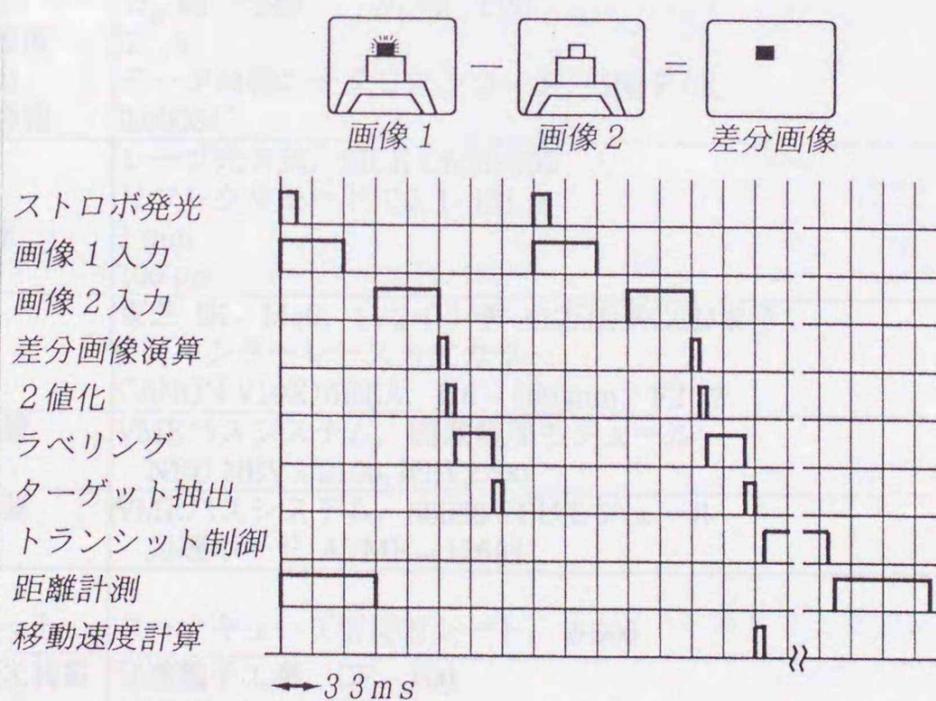


図3.3-3 XNAV-I計測のタイムチャート
Fig. 3.3-3 Time chart for measuring the position by XNAV-I

3.3.2 システムの開発

3.3.2.1 機器の構成

本装置各部の仕様を表 3.3-1 に、構成を図 3.3-4 に示す。各部は以下のものである¹¹²⁾。

- 1) 基準局のトランシットは、 θ_H 軸、 θ_V 軸ともパルスモータによりハーモニックドライブ減速機構 (1/50)、ゼロバックラッシュを可能にする複リードウォーム減速機構 (1/60) を介して駆動される。このためモータに取りつけられたロータリエンコーダは 500 P/R であるが、トランシットの角度分解能は 0.00024° を達成している。
- 2) トランシット上には、電動 10 倍ズームレンズを装備したカラー TV カメラ (処理速度を重視してモノクロ処理) とレーザー測距儀が光軸を合わせて搭載されている (図 3.3-5)。また TV

表 3.3-1 XNAV-I 各部の仕様
Table 3.3-1 Specifications of XNAV-I

| | |
|----------|---|
| [基準局] | |
| トランシット | θ_H , θ_V 軸ともに5相パルスモータ駆動 ハーモニック(1/50)+ウォーム(1/60)減速 |
| 可動範囲 | θ_H 軸 $\pm 240^\circ$, θ_V 軸 $\pm 20^\circ$ |
| 最大回転速度 | $6^\circ / s$ |
| 回転角検出 | モータ同軸ロータリエンコーダ 500 P/R |
| 機械的分解能 | 0.00024° |
| 光波測距儀 | レーザー光方式, SICK DME2000 |
| 測定範囲 | リフレクタモードで0.1-131 m |
| 測定分解能 | 1 mm |
| 測定周期 | 100 ms |
| TVカメラ | 東芝 IK-M40, 1/2インチ 41万画素CCD素子 2:1インターレース方式カラー |
| レンズ | CANON V10X16REA, f16-160 mm, F2.2 |
| 画像処理装置 | VMEバスシステム, 画像処理モジュール NED NEV-2100, NEV2200 |
| 中央処理装置 | VMEバスシステム, 68030 CPUモジュール 処理ボード AVME-126他 |
| [移動局] | |
| 反射ターゲット | コーナキューブ型反射シート, $\phi 300$ |
| ストロボ発光装置 | 日進電子工業 CF-100 |
| 最大光量 | 4.2 J/flash |
| 最大発光周波数 | 80 Hz |
| [通信部] | |
| 発光信号通信部 | 国際テレコメット GINA, 特定小電力 RS232C |
| データ伝送部 | クラリオン JX-1100A, 特定小電力 SS通信 RS232C |

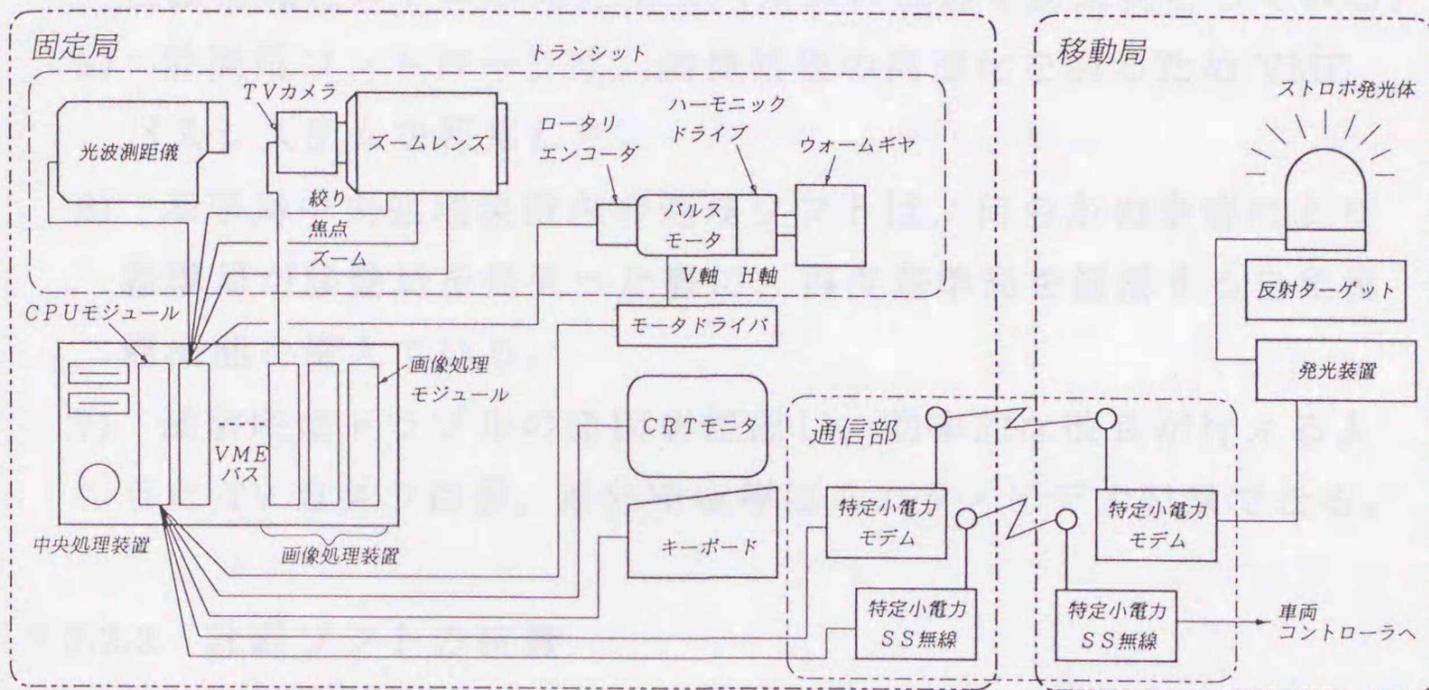


図3.3-4 XNAV-Iの機器構成
Fig. 3.3-4 Block diagram of the device configuration of XNAV-I

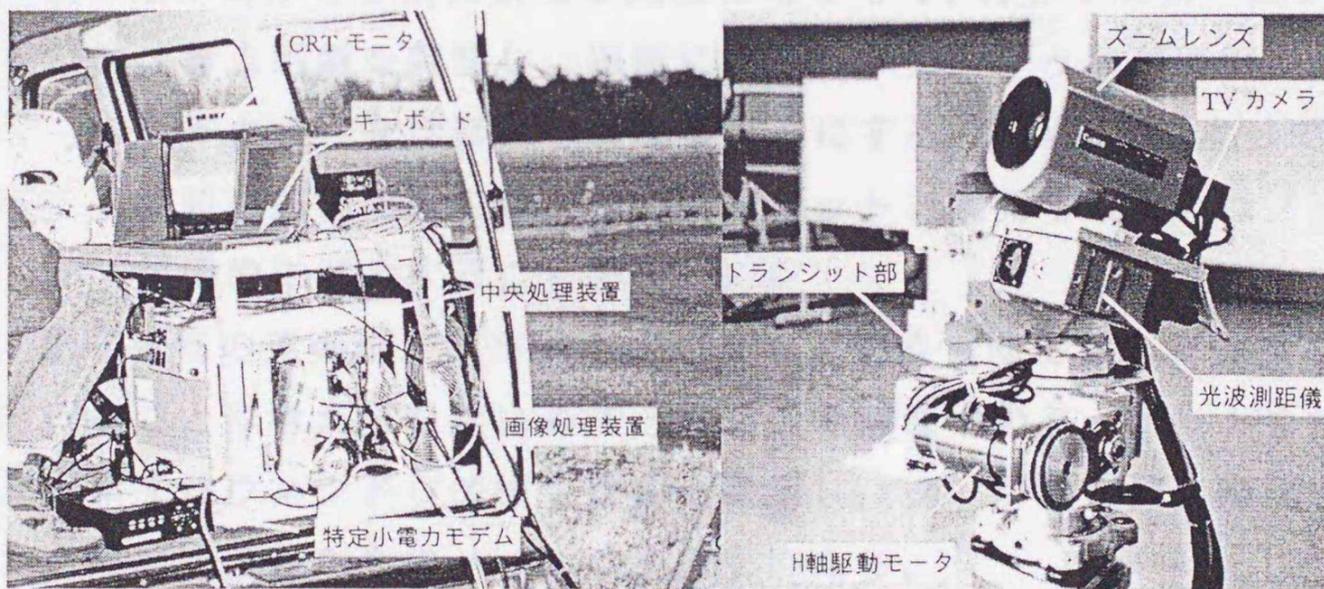


図3.3-5 XNAV-Iシステム基準局
Fig. 3.3-5 Reference station of XNAV-I

カメラとレーザ測距儀の光軸を合わせるための調整機構を設けてある。

- ターゲットとなるストロボ発光体は基準局からの信号によって発光し、画像の取込みタイミングと同期するようになっている。また、レーザ測距儀のための再起反射型光反射標識がストロボ発光体と同軸に設けられている。
- 通信は、極力通信時間を短縮するため、基準局から車両への

- 位置情報とストロボ発光指令パルスの伝送を別系統としている。
- 5) 計測用コントローラは、画像処理の高速化を図るため VME バスシステムを採用した。
 - 6) 基準局中央処理装置内の処理ソフトは、何らかの事情により基準局が移動局を見失った際に、再度基準局を探索する自動復帰機能を備えている。
 - 7) 試験時にトラブルの原因を把握し、効率的な改良が行えるように TV カメラ画像、差分画像等はモニタ・ビデオ記録できる。

3.3.2.2 計測ソフトの特徴

XNAV-I の開発と予備試験を並行的に行いながら以下の計測処理方針をたて、順次 XNAV-I に組み込んだ。

- 1) 基準局から移動局までの距離に応じて TV カメラのズームレンズ焦点距離を調整し、距離に関わらずターゲットが画面中に占める大きさをほぼ一定にするようにする。このことによって、不必要に広い範囲を撮像してターゲットと誤認するようなノイズが画像に混入することを防ぐ。
- 2) 車両の運動は、水平面が主であり、鉛直方向に激しく運動することは考えられないので、取り込み画像中のターゲットを探索するウィンドウ領域を横長に設定し、ターゲット探索時間を短縮するとともにノイズの混入を抑える。
- 3) ターゲットの認識は、差分画像中のノイズ分を含むいくつかのスポットから選択されることになる。このときにターゲット以外のものを選択しないようターゲット画像の縦／横比の範囲を設定しておき、この範囲から外れるスポットを排除し、かつ車両の運動速度は低速でほぼ一定しているものとして、ターゲットの移動速度が 1.5 m/s 以上になるスポットも排除する。
- 4) 3)をより確実に実行するために、ターゲットのストロボ発光体に防水対策を兼ねて乳白色円筒形のカバーをかぶせ、常に矩形のターゲット画像が得られるようにする。

- 5) TV 画像取り込みに際しては、1 / 500 秒の電子シャッターを併用してノイズの混入を抑える。
- 6) 万が一ターゲットを見失った際の自動探索機能では、TV カメラレンズのズームを最広角にして、見失う直前の位置情報を参照してこれに近いターゲットを選択するものとする。

3.3.3 性能評価

圃場試験の結果、ストロボ画像を際立たせるためにレンズの絞りを絞り気味に、画像処理における 2 値化の閾値を高め設定することが有効であった¹¹³⁾。

各種試験は、XNAV-I 移動局を車両システム ALVA-II に搭載し、基準局を圃場の角に設置して行った。ほぼ水平な 45m×15m の圃場内で約 15 分間にわたり、0.4m/s の作業速度で耕うん作業を行った際（図 3.3-6）の、XNAV-I の位置計測結果は図 3.3-7 に示すとおりであり、このときのデータ取得周期は平均 0.52s であった。実際の走行軌跡の記録は、ロータリ耕うん作業部の中央に機体中心線に合わせて取りつけたコールタ（マーカ）によって、耕うん跡に走行軌跡を残し、これを試験後に測量することによって記録した。なお、車両のロール・ピッチによるターゲット点座標の補正（ターゲット点座標の地上面への変換）は、この時点では行っていない。



図3.3-6 XNAV-I 試験風景
Fig. 3.3-6 Field tests of XNAV-I

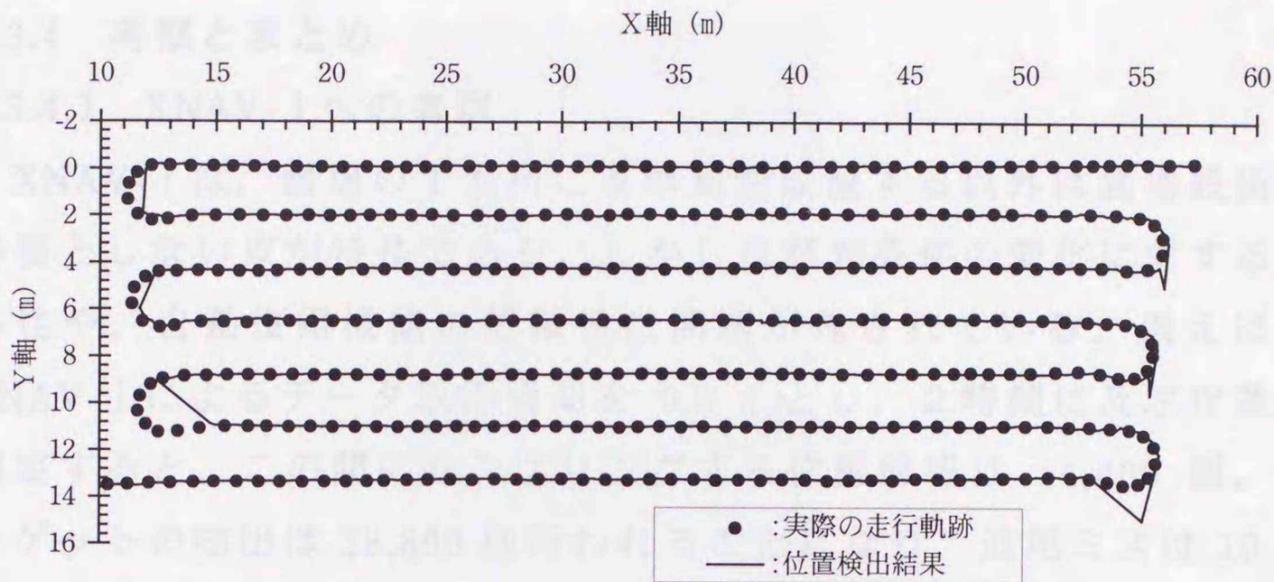


図3.3-7 XNAV-I の位置検出の様子
Fig. 3.3-7 Results of the detection of vehicle position by XNAV-I

直進部分における位置検出誤差は、ALVA-IIの進行方向に直交する軌跡のズレから推定した。その結果、位置検出誤差は、絶対値の平均で 4.6cm、標準偏差 5.5cm であり、車両のロール・ピッチによるターゲット点の位置補正を行っていないことを考慮すれば、十分な精度が得られた。しかし、急旋回時にターゲットを追尾しきれないことがあり、うち 2 回はマニュアルによる再視準が必要であったが、その他は自動追尾復帰機能により計測を続行できた。その後ソフトの改良によりデータ取得周期は、0.39 秒まで向上したが¹¹⁴⁾、片ブレーキを併用した急旋回時にターゲットを追尾しきれない現象はあまり改善されなかった。その他各種条件で試験を行ったが、

- 1) ターゲット画像の背景にあるトウモロコシの葉に反射した太陽光線、
- 2) ガラス室の前を車両が通過した際に、ガラス室のガラスに映ったストロボの虚像、
- 3) 風の強い日の樹木の木漏れ日、
- 4) 通過中車両のメッキしたラジエータグリルに反射した太陽光、などをターゲットと誤認して追尾が途切れたことがあった。

3.3.4 考察とまとめ

3.3.4.1 XNAV-Iへの考察

XNAV-Iは、圃場の1カ所に基準局を設置する以外は圃場設備を必要としない点が特長である。しかし自然光条件の変化に対する適応性や、自動復帰機能の信頼性に問題が残されている。例えば、XNAV-Iによるデータ取得周期を0.5 sとし、2時間に及ぶ作業を想定すると、この間にサンプリングする位置情報は14,400個、ターゲットの抽出は28,800回行われることになり、追尾ミスは10万に一つ許されない確実性が必要である。具体的には以下のような改良が必要と判断された。

- 1) 片ブレーキを併用した急旋回時にターゲットを追尾しきれない現象は、差分画像を2回サンプリングしてターゲットの移動速度を求め、移動予定地点にトランシットを向けるように制御するアルゴリズムに問題があると考えられる。従って、より確実なターゲットの抽出方法を検討するか、もしくは移動局側から操舵角、シャトル位置、ブレーキの状態などの情報を得て移動速度の修正を行う。
- 2) 画像処理をカラー化し、ストロボカバーに特徴的な着色を行って、ターゲットの抽出に色情報を併用することによって抽出確度、追尾の確実性を向上させる。
- 3) レーザ測距儀とTVカメラの光軸調整機能をより精密にする。
- 4) 基準局の設置性、取扱い性、及び移動局を含めた耐候性、取扱い性を向上させる。

3.3.4.2 XNAV-II

前項に示したXNAV-Iの改良作業中に、(株)トプコンより移動体の自動追尾機能を有したトータルステーションAP-L1が市販化された。AP-L1は、ひとつのレーザビームを用いて追尾、測距を行う自動追尾型測量装置で、ターゲットを見失った際の自動探索、再追尾機能も備えている⁶⁵⁾。AP-L1はXNAV-I同様、基準局(図3.3-8)

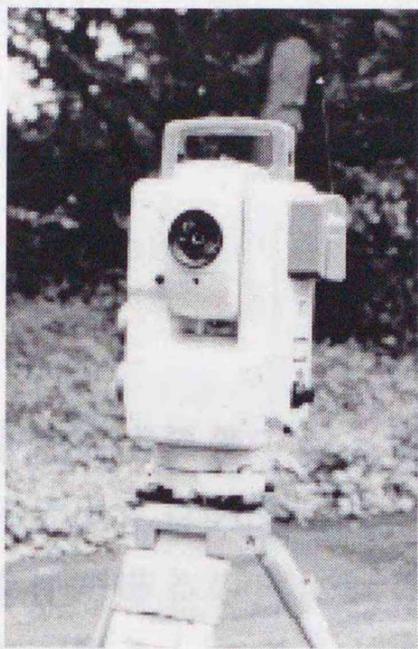


図3.3-8 AP-L1基準局
Fig. 3.3-8 Reference station of AP-L1

から光反射ターゲットを追尾しながら，斜距離 l_{OP} と水平角 θ_H ，鉛直角 θ_V の計測を行い，ターゲット点の3次元座標位置を算出するものである。早速 AP-L1 を圃場試験に供した結果，データ取得周期は約 0.5s であり，精度は十分に目標を満たしており，かつ極めて安定的に移動体を追尾する機能を有していた。見通しのよいところでは，自動追尾，位置計測，データ通信（特定小電力無線モデム使用）が 500m 程離れて行えることを確認した。この時点で XNAV-I の改良を中断し，以後の試験には AP-L1 を中心とするシステムである XNAV-II を使用した。AP-L1 の主な仕様を表 3.3-2 に示す。なお AP-L1 の測定精度は，表 3.3-2 のように極めて高く，この精度

表 3.3-2 AP-L1の主な仕様
Table 3.3-2 Specifications of AP-L1

| | |
|-------|--|
| 自動追尾部 | 追尾角速度： 視準精度：±2'（角速度10°/sのとき） 使用レーザ：LEDクラス1 |
| 測距部 | 測距範囲：7-700 m 測距精度：±(10 mm+2ppm) 測距間隔：約0.5s |
| 測角部 | 測角精度：3' |
| 機能その他 | 標識自動探索機能（探索範囲設定可） 追尾速度・測距精度可変 データ通信：RS232C，無線モデムあり |

を確認する具体的な方法が見つからず、かつ国土地理院測量機器性能基準・2級 B トータルステーションとして認定されていることから、詳細な精度試験は省略し、カタログ値を信頼して差し支えないと判断した。

3.4 まとめ

耕うんロボットの基幹構成要素である航法装置には各種の方式があり、既存の航法システムには方式によって一長一短がある。農用車両には固有の使用条件があるので、既存の航法システムをそのまま農用車両に適用して、耕うんロボットを構成することは、農用車両の使用条件やコストを考慮すれば適切ではない。従って新たに農用車両のための航法システムを構築する必要がある。

耕うんロボットは、多くの日本の農家が使用可能で慣行作業を下回らない作業性能を確保するために、使用範囲 100m×50m 以上、位置検出誤差 5cm 以下、方位検出誤差 0.1° 以下などの目標仕様を有している。これらの使用条件、要求精度を考慮すると耕うんロボットの航法システムには、以下の方法が適切であると考えられた。

- 1) 安価でドリフト誤差のない地磁気方位センサによる車両方位の検出。
- 2) 累積誤差の心配がない外部標識方式による位置の検出。
- 3) 1),2)いずれの場合でも車両のロール・ピッチに対する誤差補正や、安定的な作業を実行するためのセンサの複合化。

方位を検出するセンサとしてフラックスゲート型の地磁気方位センサ (TMS) を採用した。TMS は、ロールやピッチに曝され、かつ磁性体である農用車両上で使用される。このため高精度な傾斜補正や磁気環境補正の手法を開発することが不可欠であった。傾斜補正では、Z 軸方向の補正が必ずしも必要ではない点を実証し、磁気環境補正では計測値を円近似して補正值を求める方法が適当である点を実証した。これらの補正手段を講じた結果、目標仕様である 0.1° には及ばなかったが、往復自律走行を行った際の再現性精度

は、 0.3° 程度を確保することができ、耕うんロボットに適用可能と判断された。しかし、TMS 本体の取り付け位置、磁気環境補正不可能な周辺の構造物の影響、ロール・ピッチを計測するための傾斜センサの選定と利用方法などには、細心の注意を払う必要が認められた。

TMS のみを航法センサとして、ある程度の自律走行を実現することは可能と考えらる。しかし、精度よく行程の始端・終端位置、行程間ピッチなどを制御するためには内界情報によらず絶対的な位置情報を取得可能な航法システムを開発することが必要と認められた。

そこで、光波測距儀を基幹とする外部標識方式トラバース式の XNAV システムを開発した。試作した XNAV-I は、基準局のトランシット上に置かれた TV カメラによって、車両（移動局）上のストロボライトと光反射標識で構成されるターゲットを常時追尾する。すなわちターゲットが常時 TV カメラ画像の中央に来るようにトランシットの水平角・鉛直角を自動制御し、同時に光軸を一致させた光波測距儀によってターゲットまでの斜距離を計測するものである。ターゲットの位置は、この斜距離と水平角・鉛直角より算出される。なお、ターゲット点は地上約 2m の点にあり、計測されたターゲット点の座標は車両のロール・ピッチの値によって補正する必要があり、その方法についても併せて考察した。XNAV-I の性能は以下に示すものであった。

- 1) データ更新周期 0.52s で、ターゲット点のロール・ピッチ補正無しで絶対値平均位置検出誤差 4.6cm を確保できた。
- 2) 15 分間の連続計測中、車両が急旋回を行ったときに 6 回ターゲットを見失った。
- 3) 2)のうち 4 回は、ターゲット自動探索機能により自動的に再追尾が行われたが、残り 2 回はマニュアルによって再追尾する必要があった。

これらのことから主にターゲット追尾の確実性をさらに向上させる

ための改良を開始した。この改良中に、基本計測原理が類似した自動追尾型測量システム AP-L1 が測量機器メーカーから市販化された。早速 AP-L1 を試験したところ、コスト的には問題があるものの、耕うんロボットの要求性能に十分見合う性能と信頼性を有していることが判明した。そこで、XNAV-I の改良を中止し、AP-L1 を基幹とする農用車両用位置計測システム XNAV-II を構築した。XNAV-II は約 500m 離れた点から誤差数 cm 以下で約 0.5s の周期で位置計測が行えることを確認した。

④ 作業ソフト

無人作業を行うロボットは、周囲を認識して、環境の変化に対応できるばかりでなく、人間の生活空間を認識して存在している。従って、農用ロボットによる作業は、重大な事故に直面する可能性がある。また、周囲に自他車を通行させるために、環境の変化にも柔軟に対応して、作業の所定の軌道や速度を確保する必要がある。そこで安全性、信頼性、作業効率を高めるために、単に車両を制御する作業ソフトだけでなく、GPS や「三エー」での自己診断を行うようなセンサー類のキャリブレーションや、環境の変化に応じて各組の設定を変更するソフトウェアが重要な意味を持つようになる。

⑤ 地理情報システム (GIS) による無人作業

GIS システムによる無人作業は、デッドレコニングの場合と同様に車載外に一切の設備を必要としない。安価な航法センサーで高精度な航法で無人作業が可能なといった長所が期待される。反面、地味的な位置情報をもたない場合は、すべりによる軌道ずれなどに起因する作業精度の低下が懸念される。しかし汎用性を考慮した際にコスト面のメリットは大きい。また、自動位置制御などへの応用も

第4章 走行制御アルゴリズムの開発

4.1 はじめに

1) 作業対象と前提

本研究の対象作業は、1.3項に示したとおりロータリ耕うん作業である。耕うん対象のほ場は矩形、かつ、ほぼ水平であって、ほ場までの移動は従来どおり人の操縦によって行い、作業ソフトウェアは『ほ場区画を教示した後は、ロボットが区画をはみだすこと、若しくは残耕を作ることなくほ場全面を耕うんできる』技術レベルを目指すこととした。

2) 支援ソフト

無人作業を行う圃場は、開放空間であって、環境の変化に富んでいるばかりでなく、人々の生活空間と連続して存在している。従って車両制御のミスによる暴走は、重大な事故に直結する可能性がある。また適期に農作業を終わらせるためには、環境の変化にも柔軟に対応して、作業の高い信頼性と確実性を確保する必要がある。そこで安全性、信頼性、確実性を向上させるために、単に車両を制御する作業ソフト以外に、センサやアクチュエータの自己診断を行ったり、センサ類のキャリブレーションを行ったり、環境の変化に応じて各部の設定を変更するといった支援ソフトが重要な意味を持つてくる。

4.2 地磁気方位センサシステム (TMS) による無人作業

TMS システムによる無人作業は、デッドレコニングの場合と同様に車両外に一切の設備を必要としない、安価な航法センサで比較的単純な制御で無人作業が行えるといった長所が期待される。反面絶対的な位置情報をもたないので、すべりによる累積誤差などに起因する作業精度の低下が懸念される。しかし実用化を考慮した際にコスト面のメリットは大きく、また、自動直進制御などへの応用も

視野に入れてその可能性を追求することとした。

4.2.1 作業方法⁶⁰⁾

耕うん作業は，農用車両が直進走行する作業行程を往復で繰り返すことによって行われることが多い。矩形圃場の場合，①往復直進時の走行方位，②直進走行の距離，③旋回半径，④行程数，をパラメータに自律走行，自律旋回を行わせれば，作業機の昇降制御を付加するだけで1枚の圃場を無人で処理してくれることとなる。TMSシステムによる無人作業では，事実上絶対的位置情報は得られないので，枕地の処理は無理と判断して，当面研究の対象から除外した。なお，枕地の処理は，無人作業終了後にマニュアル運転によって行うものと想定した。

そこで，図 4.2-1 に示すように往復の直進走行では，事前にティーチングされた目標方位 θ_{TG} もしくは θ_{TB} を常に維持するよう操舵機構を制御する。回行は，車両の方位が次行程の目標方位となるまで旋回することによって行い，行程数は，作業ピッチ（作業機の作業幅から行程間の作業重複幅を除いたもの）と圃場の幅に基づきオペレータがマニュアルで初期設定する。走行距離は，

- 1) 車両が4輪駆動であってすべりの状態が比較的安定している，

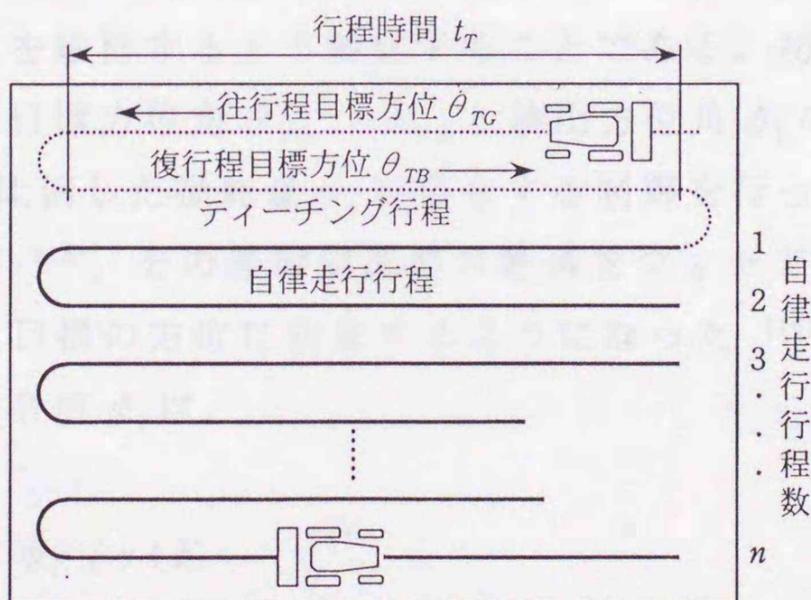


図 4.2-1 TMS による無人作業方法
Fig. 4.2-1 Autonomous operation method
by TMS navigation system

2) 1枚の圃場内では、路面状況はほぼ均一である、
 3) 直進作業中は速度段、機関回転共に一定である、
 と仮定し、走行時間＝移動距離として扱う。旋回半径は、同様に上記1)～2)の条件からほぼ舵角に比例して一定であり、舵角は作業ピッチに見合った適切な旋回半径が得られるよう、実験的に設定することとして扱う。実際の流れは、図4.2-1のとおりであり、最初の1往復をマニュアル運転によるティーチング行程とし、往行程及び復行程の目標方位 θ_{TG} 、 θ_{TB} と目標行程時間 t_T を取得する。ティーチング行程終了後、オペレータが往復の行程数 n を決定して、この n を入力すると無人作業が開始される。

TMSシステムによる無人作業ソフト及び支援ソフトは、以下ASR-I、ASR-IIのようにローマ数字を付して呼称するが、Iは車両システムALVA-Iを対象にHP Basic言語で記述され、IIは車両システムALVA-IIを対象にC言語で記述されている点が主な相違点であり、基本的な流れは同一である。

4.2.2 制御システム

1) ASR-I

直進走行における舵角制御の基本は、ティーチング行程と平行に直進走行すべく、車両の走行方位が予めティーチングされた目標方位 θ_{TG} 、 θ_{TB} を維持するよう操舵することである。初期の直進制御法では、単に目標方位角 θ_{TG} 、 θ_{TB} と検出方位角 ϕ_i の偏差 $\Delta\phi_i (= \theta_T - \phi_i)$ に比例した操舵量 ψ_i を指令する制御を行ったため、軌跡は発散したが¹¹⁵⁾、その後制御直前の舵角をフィードバックさせることにより、目標の方位に収束するようになった¹¹⁶⁾。この時点における操舵指令値 ψ_i は、

$$\psi_i = \alpha \Delta\phi_i / v + K \quad (4.2-1)$$

によって与えられ、 $\Delta\phi_i$ が $\pm 0.1^\circ$ 以下のときは不感帯として操舵

を行わず，図 4.2-2 のような関係から操舵量 \propto 操舵モータの作動時間として制御を行っている。なお α はゲイン， v は作業速度， K は定数であり，この制御法を「P制御」と称する。

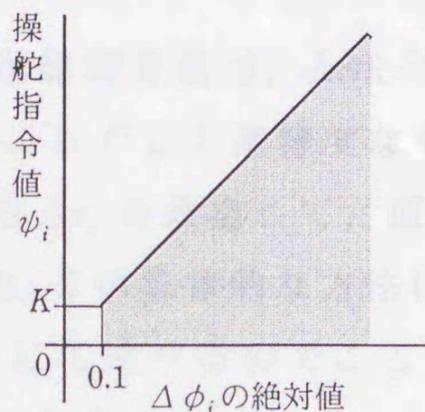


図 4.2-2 ASR-I における操舵比例制御
Fig. 4.2-2 Proportional control of steering angle in operation software ASR-I

その後，実験を繰り返した結果，逐時の（現在の）偏差 $\Delta\phi_i$ のみを用いると，操舵機構のガタなどにより1回の操舵で目標とする所期の走行方位修正はできないことが推定された。そこで，偏差の履歴 $\Delta\phi_{i-1}$ ， $\Delta\phi_{i-2}$ ， \dots を含む項，すなわち積分項を設け，

$$\psi_i = \alpha(\Delta\phi_i + \beta(\Delta\phi_{i-1} + \Delta\phi_{i-2} + \dots + \Delta\phi_k)) / v + K \quad (4.2-2)$$

により，目標方位との偏差を決定することとし，結果的にPI制御が行われるようにした¹¹⁷⁾。この制御法を「PI制御」と称する。

これら作業ソフトの実行に際して初期設定する項目は，

- ① 自律走行行程数，
- ② 後述の"TEACHING"により得られた往復の目標方位 θ_{TG} ， θ_{TB} ，行程時間 t_T ，
- ③ "MAG.CAL"により得られた磁気環境補正值 (a, b) ，
- ④ 走行速度段，
- ⑤ 回行時舵角，

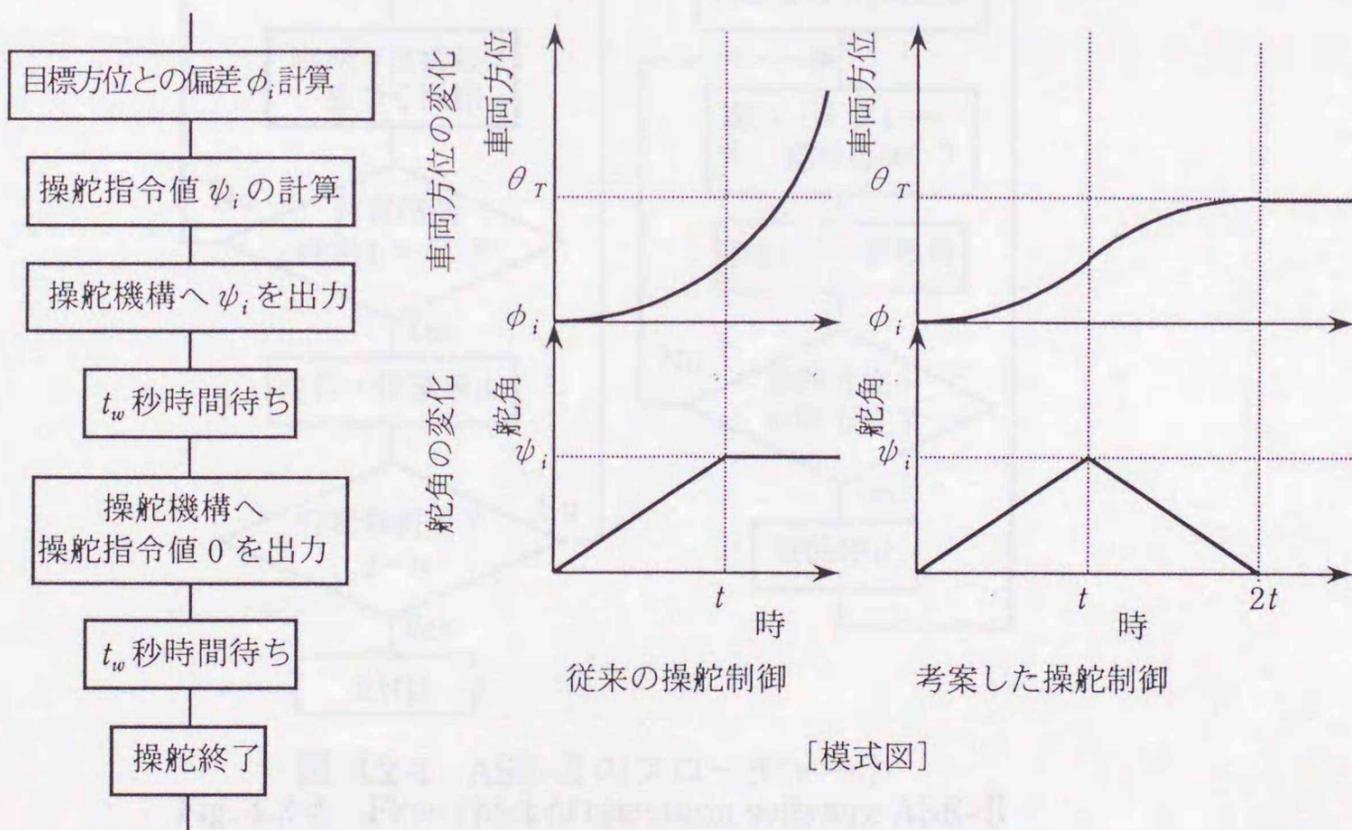
などである。直進部分では，マニュアルで設定した速度段のもと，フルスロットル，作業機下げの状態で作業が行われ，回行部分では，

作業機を上げ, パートスロットルで片ブレーキを使用して旋回する。方位の検出及び操舵制御の周期は, コントローラとデータアキュジションユニット間の通信速度などを考慮して約 0.8 秒に設定した。

2) ASR-II¹¹⁸⁾

ASR-IIにおける直進制御方法は, ASR-Iにおいて試行した P 制御, PI 制御をチューニングして高精度なものとした他に, TMS 情報から前方横方向偏差 Δr_i を推定して, 直進制御を行う方法についても検討した¹¹⁹⁾。なお, この具体的な方法については, 第 4 章 4.3.2.3 走行制御 1)直進制御にて述べるのでここでは省略するが, この制御法を「前方注視法」とする。

ASR-IIでは, 使用する試験用車両 ALVA-IIの操舵アクチュエータにサーボモータを使用しているので指令値どおりの舵角が得られる。そこで直進時の操舵制御後に舵角をそのままとせず, 必ずニュートラルに戻すよう, すなわち図 4.2-3 に示す方法で操舵制御を行うことを考案した。この方法では, 1回の操舵で目標方位への修正



[フローチャート]

図 4.2-3 ASR-II の直進時操舵制御

Fig. 4.2-3 Steering control methods for straight operation by operation software ASR-II

を終了させ、その後は直進を維持することを狙いとして、終了時に舵角がゼロとなるようにしている¹¹⁸⁾。

ASR-IIの流れ図を図4.2-4に示す。方位の検出及び操舵制御の周期は、作業速度が比較的遅く、操舵速度も遅いことを前提に約1.2秒に設定した。枕地における旋回時には倍速ターン機能と片ブレーキを併用することとした。

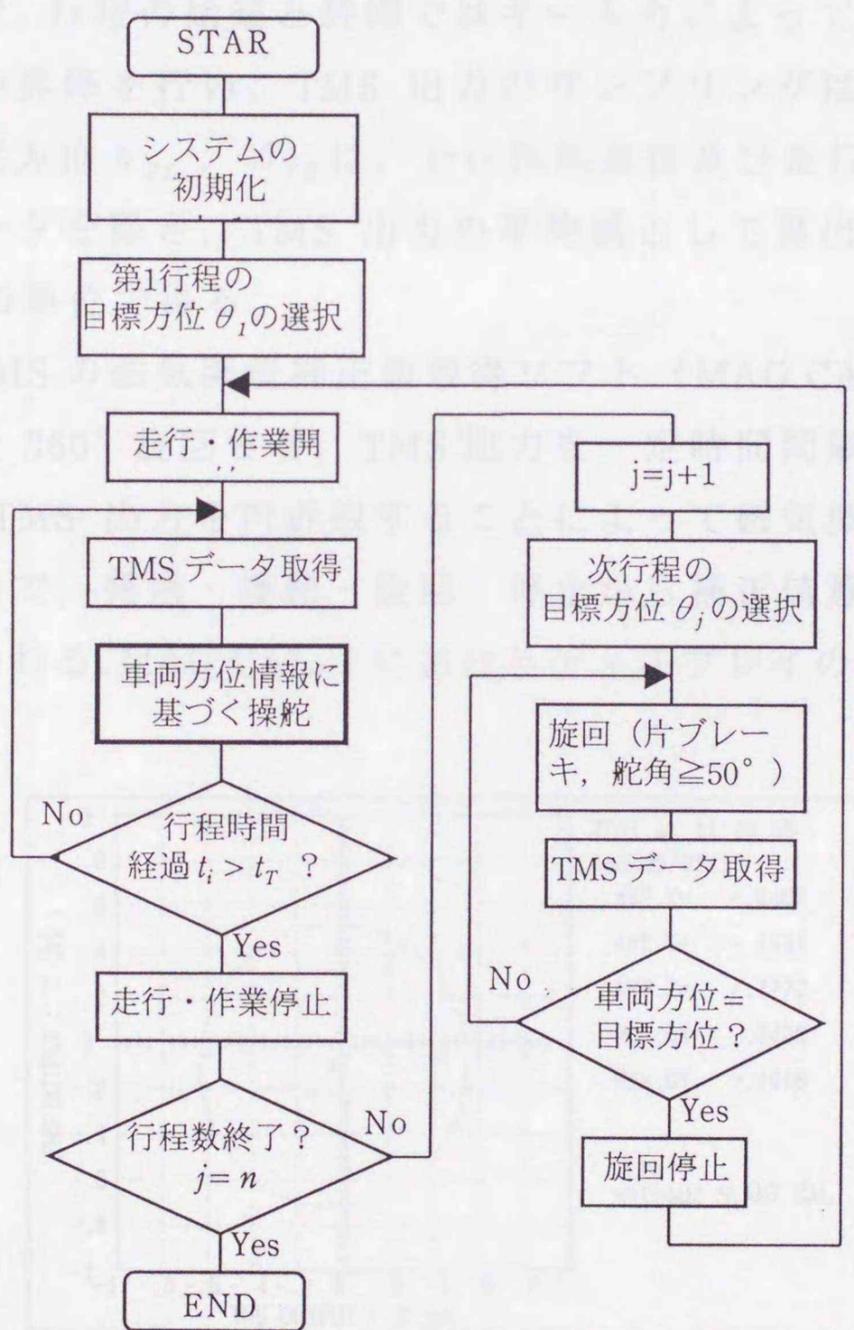


図 4.2-4 ASR-II のフローチャート
Fig. 4.2-4 Flow chart of operation software ASR-II

4.2.3 支援システム

支援ソフトには、ティーチングを行う際に使用するティーチングソフト、TMSの磁気環境補正值を取得するための磁気環境補正ソフト、操舵機構の中立点を較正するための舵角補正ソフト、各部の故障を自己診断するソフトなどがある¹²⁰⁾。

1) ティーチングソフト (TEACHING-I, -II)

ティーチングのためのソフトである。操舵のみがマニュアルモードで、行程の始端と終端ではキー入力によって発進・停止及び、作業機の昇降を行い、TMS出力のサンプリングは自動的に行われる。目標方位 θ_{TG} 、 θ_{TB} は、走行開始直後及び走行終了直前の数秒間のデータを除き、TMS出力の平均値として算出する。行程時間は1msの単位で得る。

2) TMSの磁気環境補正值取得ソフト (MAG.CAL-I, -II)

車両を360°旋回させ、TMS出力を一定時間間隔でサンプリングし、全TMS出力を円近似することによって磁気環境の補正值を求めるもので、発進・操舵・旋回・停止から補正值算出まで全て自動的に行われる。MAG.CAL-Iにおけるディスプレイの表示例を図4.2-5に示す。

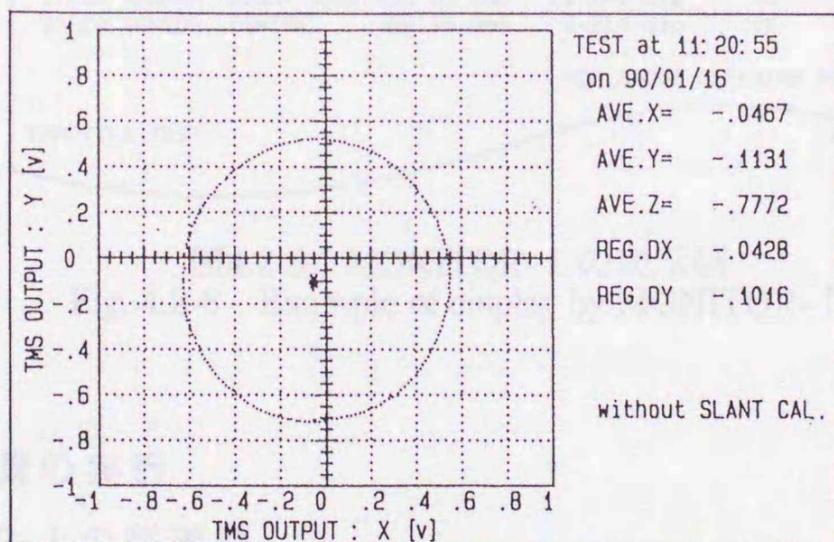


図4.2-5 MAG.CAL-Iの表示例
Fig. 4.2-5 Example of display by MAG.CAL-I

3) 舵角中央値較正ソフト (STA.CAL-I)

マニュアル走行で任意に設定した直線に沿った直進走行を行い、

この間の舵角計測値を平均処理し、メインプログラム中の舵角中央値を更新するものである。

4) 自己診断ソフト (MONITOR-I)

自律走行を実行する前にセンサ、電源、アクチュエータ、制御機器等に異常がないかをチェックするものでセンサ出力、電源電圧等が正常な値の範囲内にあるかを順次調べ、次いで各アクチュエータを作動させ、作動状態を確認するものである。ディスプレイの表示例を図 4.2-6 に示す。

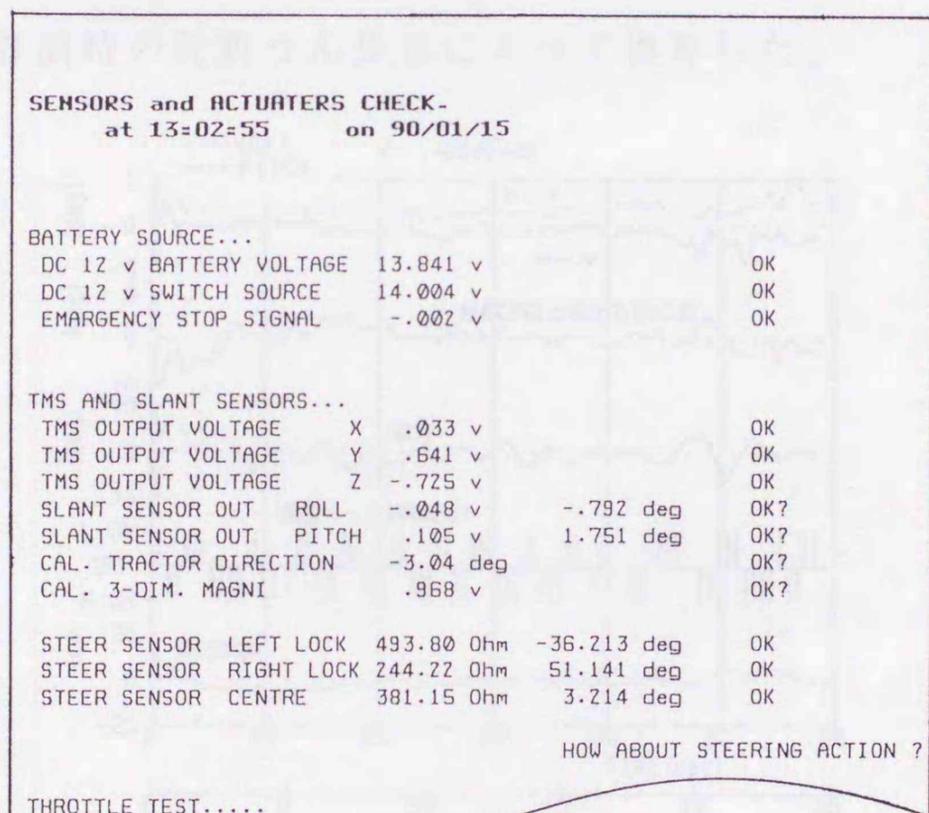


図4.2-6 MONITOR-I の表示例
Fig. 4.2-6 Example of display by MONITOR-I

4.2.4 作業の実行

1) ASR-I の制御例

PI 制御法を選択した ASR-I による、往復作業試験時のある直進行程における機体ロール・ピッチ角、目標方位と検出方位の偏差、舵角、操舵モータの制御出力、走行軌跡を図 4.2-7 に示す。このと

きの区画はほぼ平坦な 35m×15m の区画であり，車両システム ALVA-I を供試し，走行速度は 0.42 m/s に設定した。走行軌跡は，無人走行終了後に圃場区画全体にテーピング走行時の走行軌跡を基準として巻き尺をメッシュ状に張って計測した。その他のパラメータは，ALVA-I のメインコントローラに時刻情報とともに記録した値を読み出してプロットした。このときの作業軌跡と，その他のパラメータの横軸は，作業機昇降命令を出力した時点で即刻作業機が応答して，圃場に作業軌跡を形成するものと仮定して整合させた。また横軸の時間軸と距離軸は，作業機上げから下げに至る時間記録と作業軌跡計測時の既耕うん長さによって換算した。

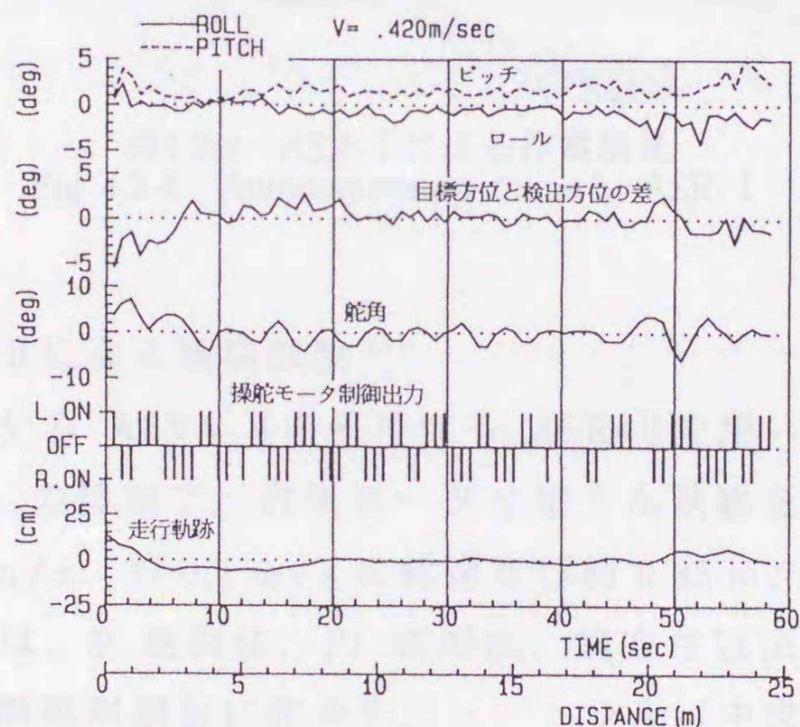


図4.2-7 ASR-I による直進制御例
Fig. 4.2-7 Example of straight control results by ASR-I

図からわかるように，舵角及びその結果として表れる目標方位角と検出方位角の偏差 $\Delta\phi_i$ は，発散はしないものの，ハンチングする傾向が見られる。このことは操舵モータに対する制御信号からわかるように，1回の制御で偏差を解消することができず，さらに舵角を大きくしていった時点でオーバーシュート気味となって逆方向の偏差が表れるという現象を繰り返すことによると考えられた。ALVA-I の舵角制御方法は，第2章 2.4.2 に示したとおり，操舵モ

一夕運転時間 \propto 制御舵角，という前提にたっているが，路面の状況が変動する圃場内ではこの関係は全く成り立たないことを示唆している。

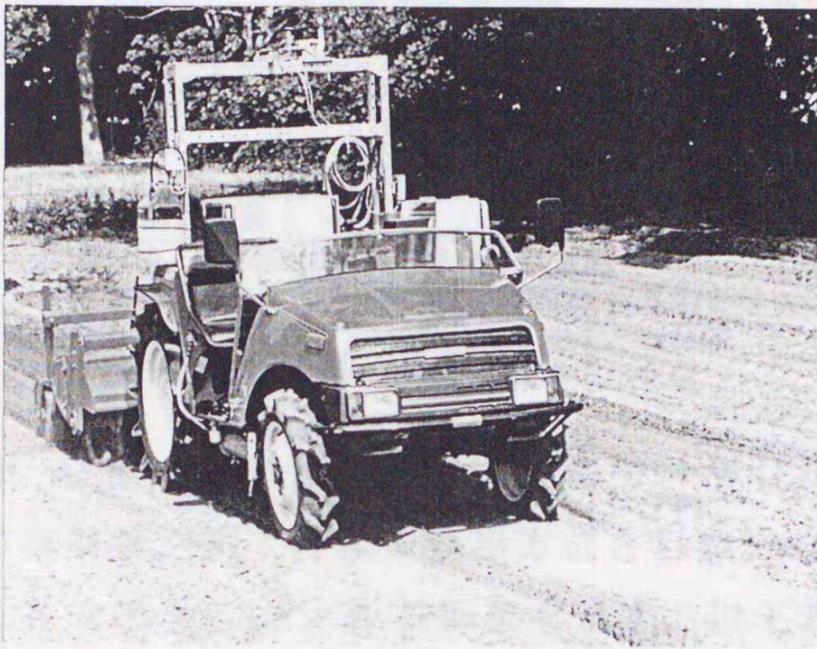


図4.2-8 ASR-Iによる作業風景
Fig. 4.2-8 Autonomous operation by ASR-I

2) ASR-IIによる圃場試験⁸⁷⁾

車両システム ALVA-IIを使用する ASR-IIを用いて，比較的平坦な $50 \times 18\text{m}$ の畑地で，自律ロータリ耕うん試験を行った。走行速度は約 0.5 m/s ，約 0.1 m/s の低速及び約 0.85 m/s の高速とした。直進制御法は，P 制御法，PI 制御法，前方注視法を適用し，舵角制御法は，制御周期毎に舵角をニュートラル（中央値）に戻す方法を用いた。表 4.2-1 に各試験の条件と結果を示すが，表中の「直進時の車両方位の平均偏差」は，TMS が検出した車両方位と事前のティーチングにより得られた目標方位との偏差を平均したものである。圃場で実測した「ティーチング軌跡と作業軌跡のズレ角」は，「直進時の車両方位の平均偏差」が制御方法単独の評価指標であるのに対して，後者が TMS システムの誤差を含んだ実際的な評価指標である点が異なる。各条件による試験は，表 4.2-1 の No.1~No.4 までは，1 日ごとに同一の圃場で行ったものであり，No.5 は同一圃場でほぼ 1 年後に行ったものである。走行軌跡は，無人走行終

表 4.2-1 TMS による自律耕うん作業の結果
Fig. 4.2-1 Results of autonomous tilling by TMS system

| No. | 作業速度 /行程数 | 直進 制御方法 *1 | 直進時 車両方位の 平均偏差*2 | 操舵 指令値の 平均*3 | ティーチング 軌跡と作業 軌跡のズレ角*4 | 旋回半径の 大きさ (最大-最小) |
|-----|--------------|------------------|------------------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1 | 0.50 m/s/8 | P 制御 | 0.23° | 1.96° | 0.42° | 0.60-0.71 m |
| 2 | 0.50 /8 | PI 制御 | 0.03 | 2.08 | 0.28 | 0.58-0.74 |
| 3 | 0.10 /4 | " | 0.01 | 7.28 | 0.30 | 0.77-0.80 |
| 4 | 0.85 /8 | " | 0.13 | 1.82 | 0.62 | 0.50-0.84 |
| 5 | 0.50 /6 | 前方注視 | - | - | 0.25 | - |

*1: 本文中の P 制御法, PI 制御法, 前方注視法に対応

*2: 各行程ごとの単純平均について, 行程数分の絶対値平均をとった値

*3: 各行程の絶対値平均について, 行程数分の平均をとった値

*4: 各行程の値について, 行程数分の絶対値平均をとった値

了後に前項 ASR-I の場合と同様な方法で計測した。図 4.2-9～図 4.2-13 に作業軌跡, 第 1 行程の検出方位と目標方位との偏差, 操舵指令値などを, 図 4.2-14 に作業風景を示す。以下表 4.2-1 に付した No.によって各条件の結果について述べる。

いずれの走行速度においても, 方位の検出及び操舵の周期は 1.2 秒前後であった。

No.1 の条件では, 各行程とも直進性の高い走行はしているが, その方向はティーチング行程と比べ行程毎にかなりずれている。No.2 は, 比較的良好な作業が行われているが, 行程間の作業のオーバーラップが大きい。No.3 は, 逆にオーバーラップが少なすぎて残耕が随所に見られるが, 軌跡は直進性が高い。No.4 は, 各行程とも

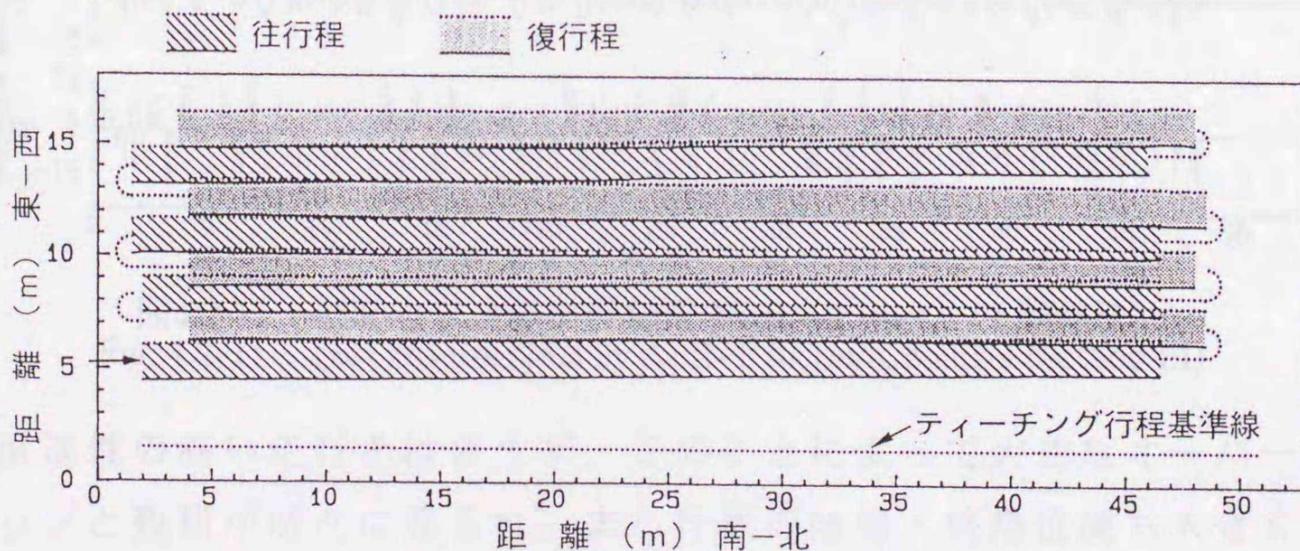


図4.2-9 ASR-II による試験結果 No.1 (0.5m/s, P 制御法)
Fig. 4.2-9 Test results No.1 by ASR-II (0.5m/s, control method P)

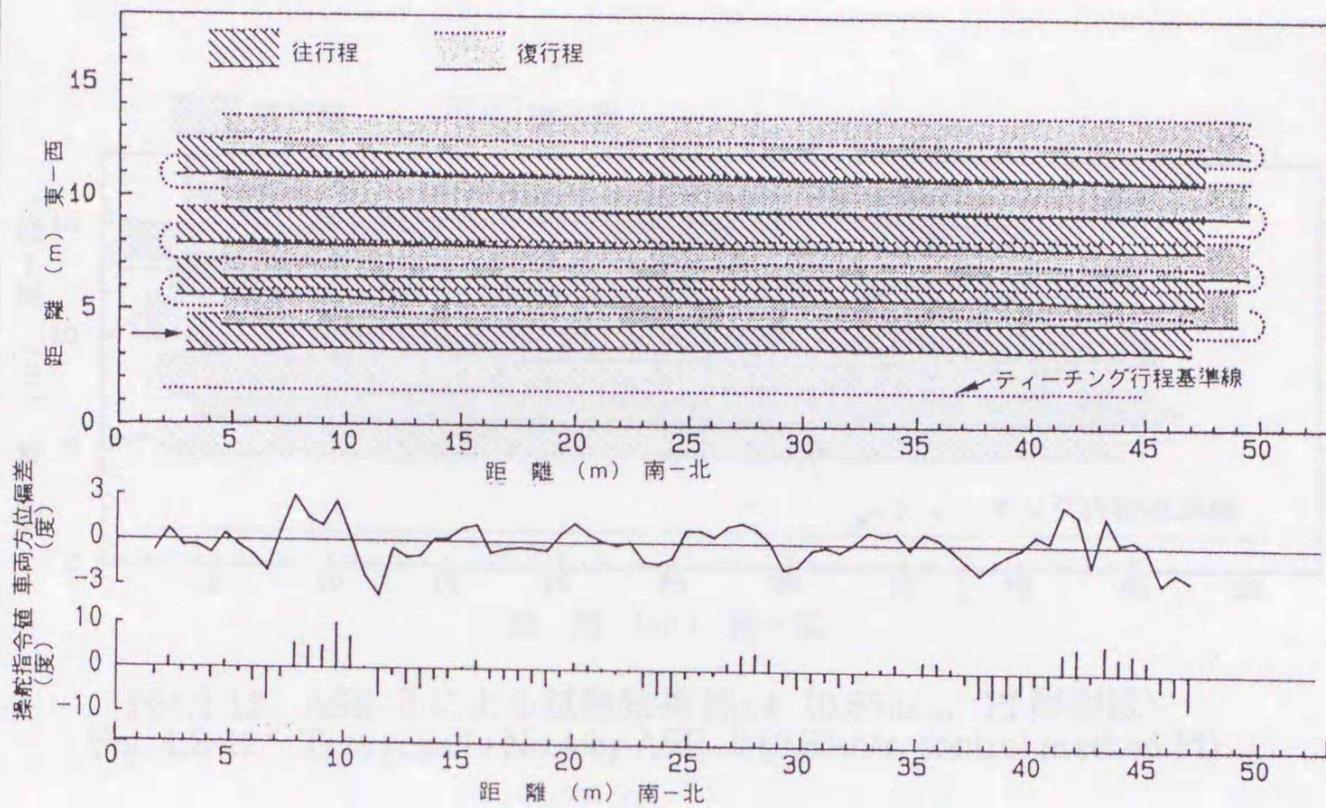


図4.2-10 ASR-IIによる試験結果 No.2 (0.5m/s, PI 制御法)
 Fig. 4.2-10 Test results No.2 by ASR-II (0.5m/s, control method PI)

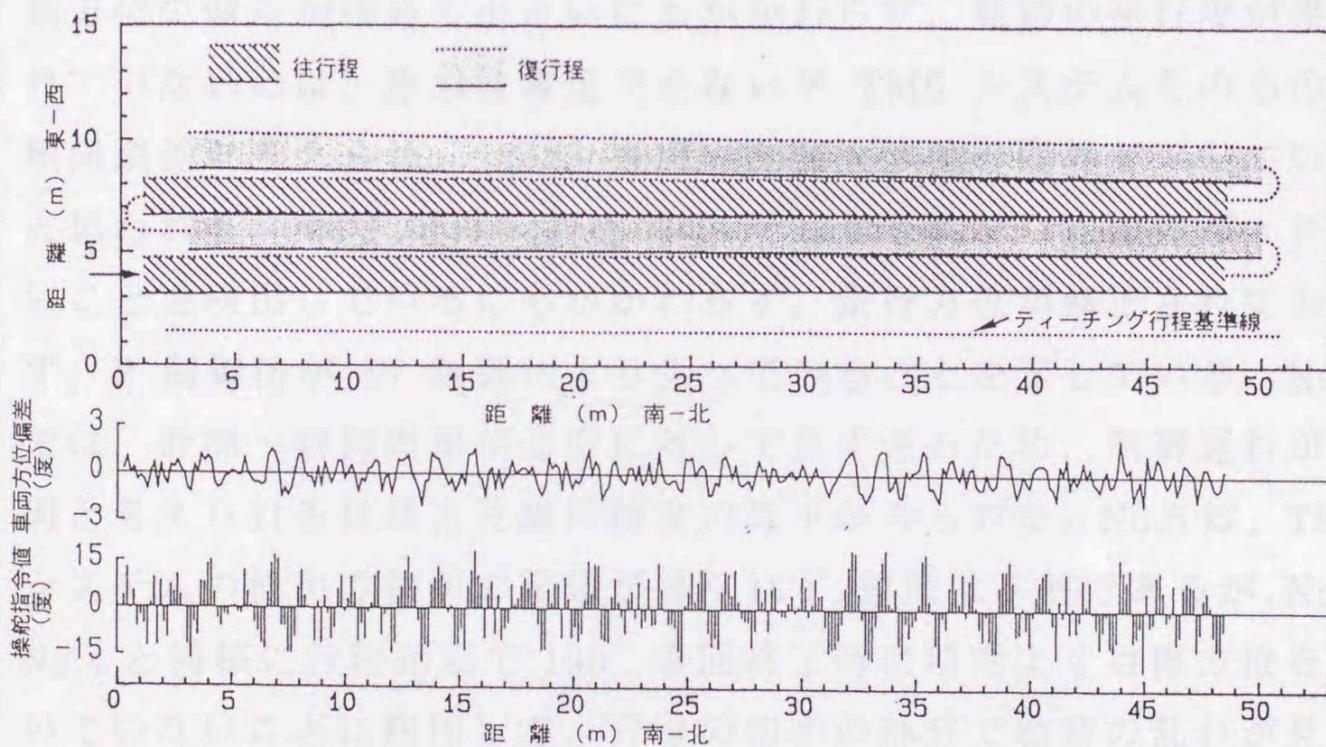


図4.2-11 ASR-IIによる試験結果 No.3 (0.1m/s, PI 制御法)
 Fig. 4.2-11 Test results No.3 by ASR-II (0.1m/s, control method PI)

直進性の高い走行とは言えず、このことによって大きなオーバーラップと残耕が所々に見られ、また行程の始端・終端位置も大きくばらついている。No.5 は、比較的オーバーラップが大きいものの、全体としてはティーチング方位にほぼ平行な作業が実行されている。

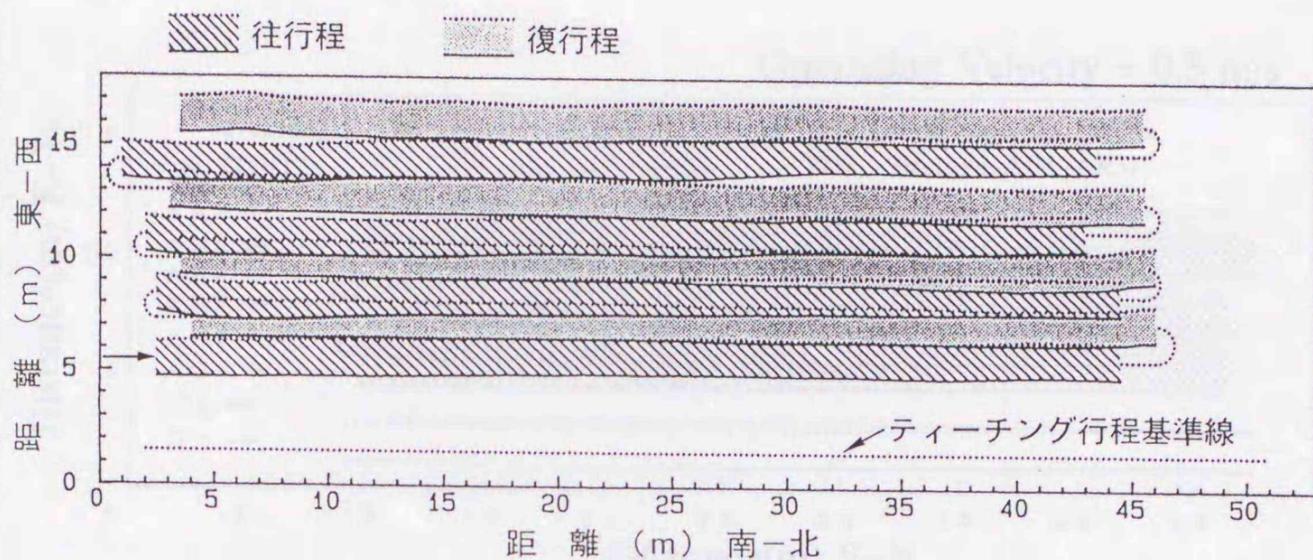


図4.2-12 ASR-IIによる試験結果No.4 (0.85m/s, PI制御法)
 Fig. 4.2-12 Test results No.4 by ASR-II (0.85m/s, control method PI)

直進時の車両方位の目標方位に対する偏差を見ると、No.2, No.3はかなり小さい。No.3でコントローラ上で得られたTMS方位と目標方位の偏差が極めて小さいにもかかわらず、軌跡の平行度が得られていないのは、原因は特定できないがTMSシステムそのものの検出誤差と考えられ、TMSを用いた無人作業の限界を示していると思われる。No.1では、TMSシステムがそれなりに偏差が大きいことを検出しているにもかかわらず、走行方位が修正されておらず、P制御法がPI制御法より劣っていることを示している。No.4では、計測・制御周期が速度に対して長すぎるため、制御遅れが原因と考えられる目標方位維持精度の低下がみられた。No.5は、TMSシステムの検出方位角の記録が得られず、詳細は不明であるが、No.2, No.4と同様に行程始端で180°旋回終了時に精度よく目標方位を向いていないことに起因して、行程の初めの部分で軌跡の乱れが見られる。

操舵指令値は、No.3で特に大きいですが、低速度条件では舵角を大きくとって方位の修正を速やかに行うよう設けた制御舵角算出の式(4.2-2)の速度項が機能したためであり、問題はない。しかしNo.4では、制御遅れ以外にもこの速度項が十分機能せず、速度の割に大

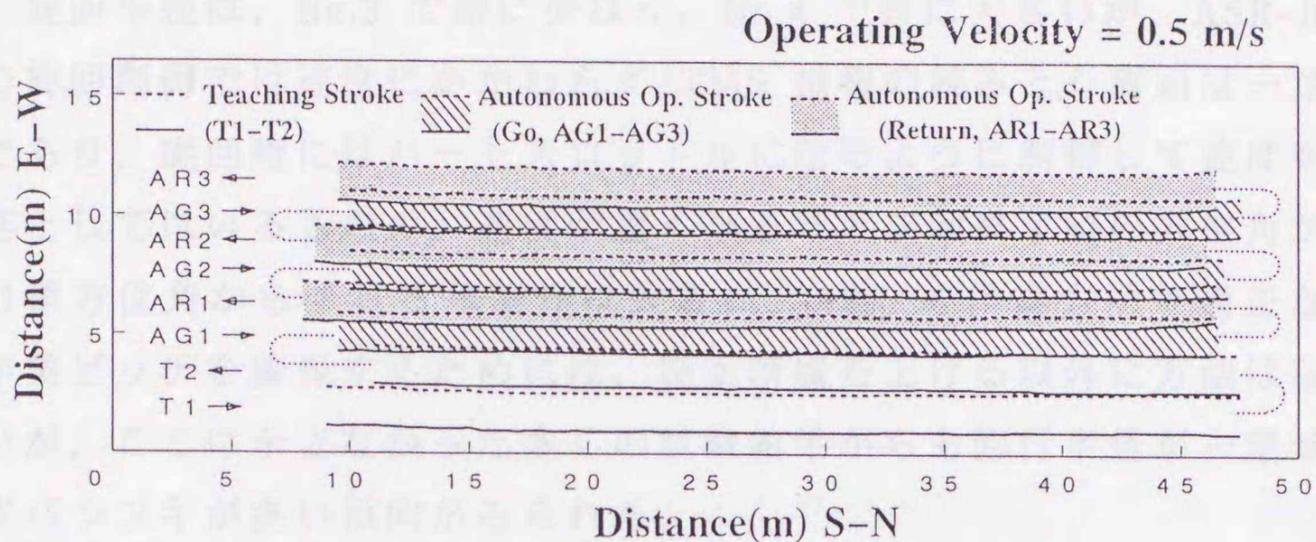


図4.2-13 ASR-IIによる試験結果No.5 (0.5m/s, 前方注視法)
 Fig. 4.2-13 Test results No.5 by ASR-II
 (0.5m/s, control method "Watch forward")

きな制御舵角となって、蛇行の原因になった可能性がある。

軌跡との大きなズレ角は、実作業では残耕もしくは無用に大きなオーバーラップを意味するが、No.1及びNo.4で特に悪く、No.5が比較的良好な値を示しており、前方注視法の有効性を示唆している。

ここに示した試験においては、特にダッシングが懸念されるような土壌条件はなかったが、No.4及びNo.5では、行程の始・終端位置が大きくずれており、軽いすべりもしくはダッシング等が原因と

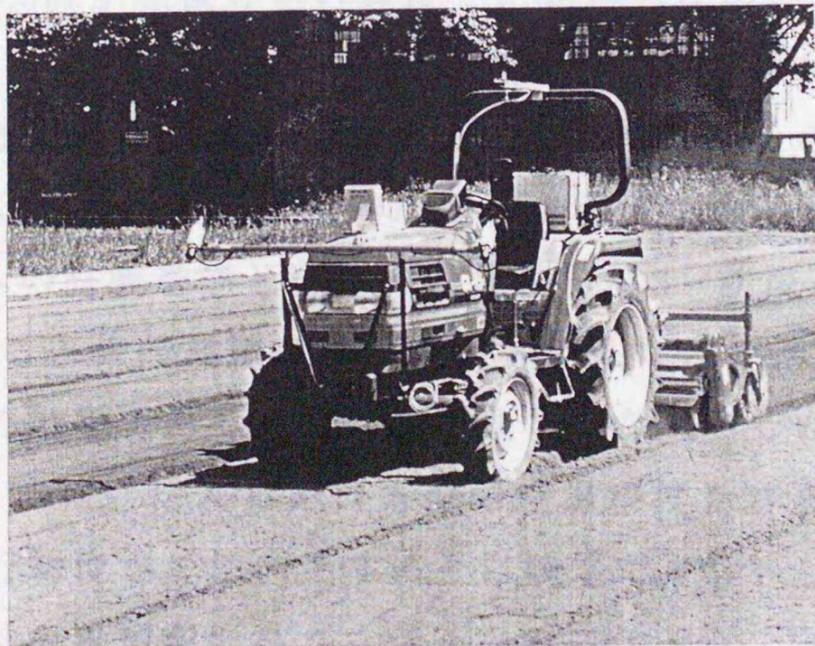


図4.2-14 ASR-IIによる作業風景
 Fig. 4.2-14 Autonomous operation by ASR-II

なっているものと推定される。

旋回半径は、No.3 で特に少なく、No.4 で特に大きい。ASR-II の旋回制御では速度にかかわらず TMS 情報の読みとり周期は一定であり、旋回時にはパートスロットルになるように制御して速度を落としてはいるものの、速度が速くなるほど旋回終了時の方位角が目標方位角からずれる可能性は大きい。ASR の作業方法で適正な作業ピッチを確保するためには、旋回精度を上げる以外に方法はないが、ここに示さなかった多くの試験結果からも回行半径が一定せずバラツキが多い傾向がみられた。

4.2.5 評価と考察

以上、一応の往復作業を実行することができたが、路面の状況によって旋回半径が大きく変化するため、作業ピッチが不安定であり、残耕もしくはかなり大きな作業オーバーラップがみられた。旋回位置は比較的そろっているが、状況によってはダッシングなどによって旋回位置、すなわち行程の始・終端位置がずれることがあり、そのズレは、航法の原理上その後最終行程まで回復されることはない。与えられた目標方位を維持しながら自律走行を行う本項の直進制御方法では、0.5m/s 程度の走行速度で、走行方位の制御精度は 0.3° 程度であり、この精度は 100m 走行して約 50cm 横にずれることを意味している。走行方位の制御精度すなわち軌跡とのズレ角は、実質的に TMS システムの実用的な精度＝再現性を示していると想定され、これらの試験を通じてその再現性は 0.3° 前後と考えられる。

ASR による自律作業精度が、各種補正法などの適用による TMS の高度利用の結果であることは言うまでもない。しかし、以下の事情によって、TMS による走行方位の検出精度をさらに向上させれば、自律走行精度が更に向上するとは断定できない。

- 1) ASR は内界情報に基づくデッドレコニングであって路面条件による車両の横すべりなどには対応が難しい。
- 2) 車両の制御性（特に操舵時間）に限度がある。

回行半径の適正化，安定化についても ASR で用いた手法には限界があるが，

- 1) 旋回時には走行速度を下げる，
- 2) ティーチング時に圃場状態に応じた旋回制御パラメータ（操舵角など）を設定する，

などによりある程度の旋回性能の向上は可能であろう。

TMS による自律走行は，航法センサシステムが安価でシンプルな点が最大の長所であり，他の航法装置を用いたシステムにおける補完システム，有人運転の際の部分的自動直進制御，といった場面での実用化が期待できる。

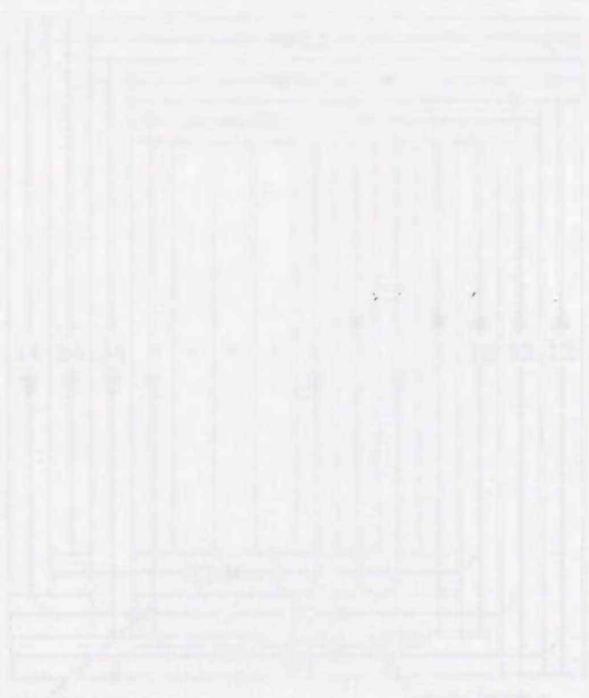


図 4.3-1 自律走行システムの構成

4.3 光波測距式システム (XNAV) による無人作業

4.3.1 作業方法

4.3.1.1 作業の戦略

本作業ソフトは、航法装置によりほ場内位置と車両進行方位が逐次得られることを前提にしている。

XNAVを用いた自律作業では、位置データの検出周期がやや長い点、旋回や幅寄せの際に正確な車両方位情報を必要とする点などから、航法システムにTMSを併用している。作業は、一般的な慣行作業に準じて、矩形圃場を前提に圃場中央付近を往復作業し、枕地部分を含めた圃場周辺を周り作業する方法により、圃場全面の耕うん作業を行うこととした。

車両システムALVA-IIまたはROBOTRAを供試して耕うん作業を行うことを想定すると、往復作業における枕地の長さは5m近くを要することから、周り作業は3周行うこととした。一つの圃場に対して最初の1回、最外周の周り作業経路をマニュアル運転により1周ティーチング走行し、圃場区画のデータを取り込み、作業経路を

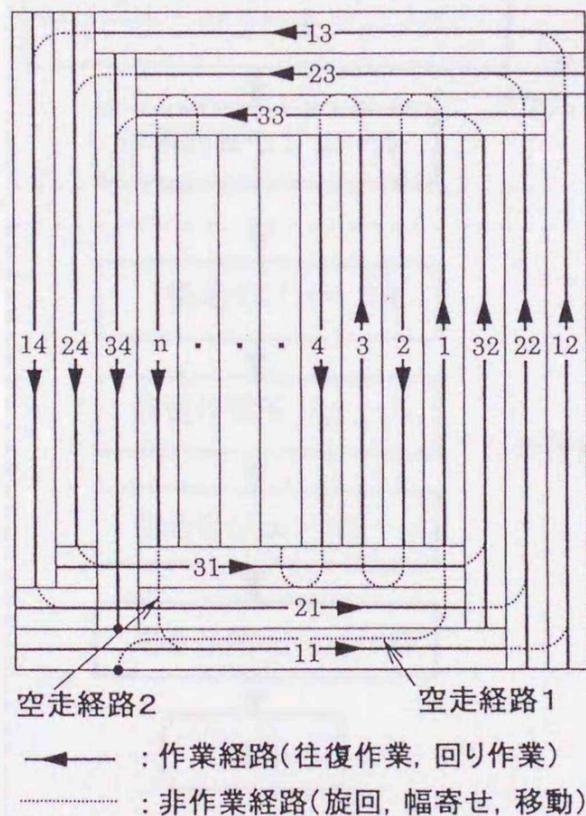


図 4.3-1 作業の戦略
Fig. 4.3-1 Strategy of autonomous operation

生成する。図4.3-1のように、作業経路は、圃場出入り口のある圃場角部から往復作業の開始位置までの空走経路1，枕地における180°旋回を含む往復作業経路1~n，往復作業の終点から周り作業開始位置までの空走経路2，及び圃場角部での90°旋回を含む周り作業経路11~，21~，31~から構成する。経路計画では、実際の作業手順を逆に遡って、圃場出入り口付近で作業が終了し、作業重複幅が10cmになるように先ず3周の周り作業経路を設定し、その領域を圃場全体から差し引いた領域を、適当な重複幅で往復作業を行うべく行程数と経路を設定するようにした¹²¹⁾。

4.3.1.2 タスクの分割と構成

図4.3-2に作業ソフトウェアの全体構成を示した。作業ソフトウェアはロボットへの作業区画ティーチングから作業計画を立案するタスクプランニング部、そして決定されたタスクを忠実に遂行する走

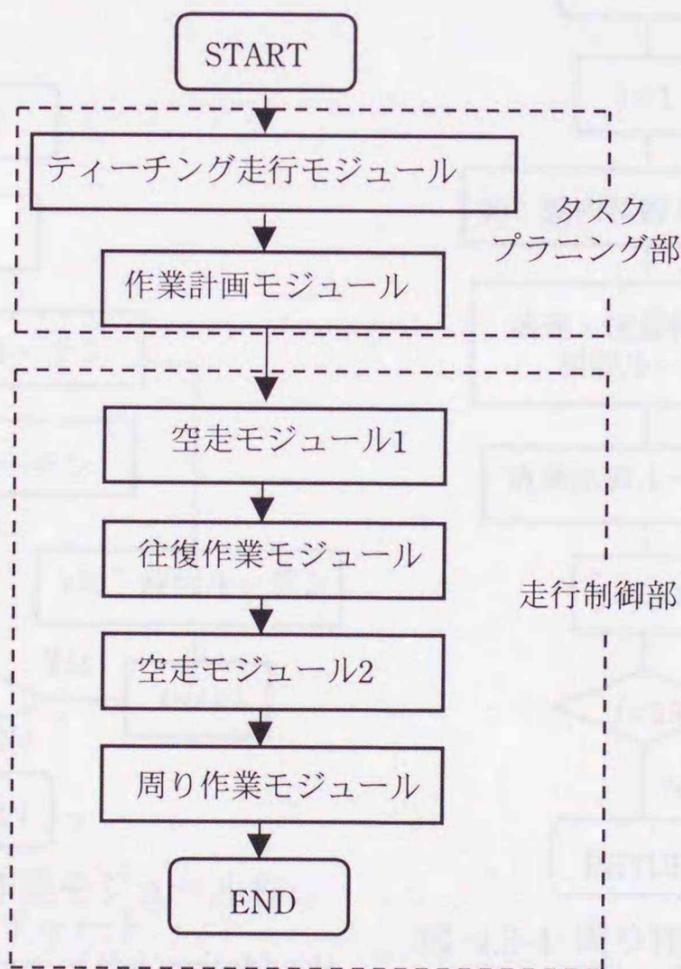


図 4.3-2 作業ソフトの全体構成
Fig. 4.3-2 General flow of the operation software

行制御部に分割される。タスクプランニング部はロボットに耕うん範囲を教示するティーチング走行モジュール，教示された領域の走行経路を生成する作業計画モジュールから構成した。また，走行制御部は，圃場入口から往復作業の開始位置まで移動する空走モジュール1，周り作業の領域以外を往復作業する往復作業モジュール，往復作業の終了位置から周り作業の初期位置まで移動する空走モジュール2，そして，枕地部分を3周りの周り作業によって処理する周り作業モジュールに分割した¹²²⁾。

往復作業モジュールのフローチャートを図4.3-3に示した。本モジュールは事前に生成した目標経路・行程数 n を往復耕うん作業するものであり，目標経路への誘導部である幅寄せ制御ルーチン，作業を伴う直進制御ルーチン，規定の行程長の作業終了後に次行程の目標方位まで旋回する 180° 旋回制御ルーチンから構成されている。

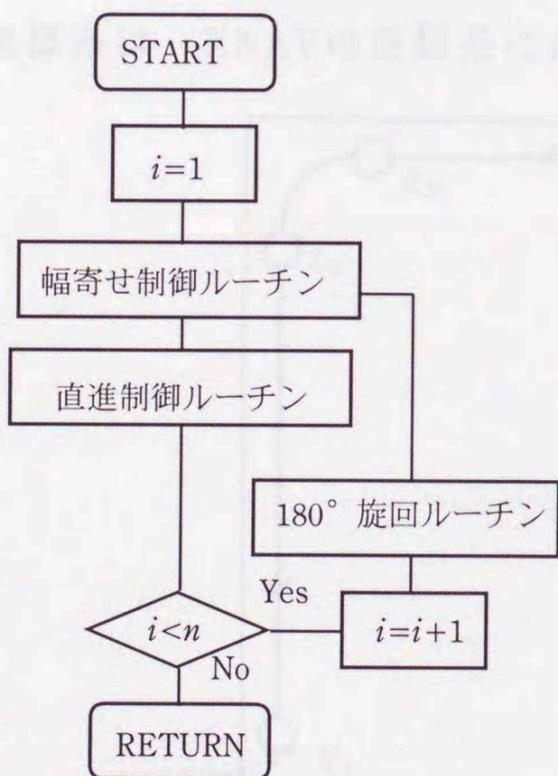


図 4.3-3 往復作業モジュールのフローチャート
Fig. 4.3-3 Flowchart of the switchback operation module

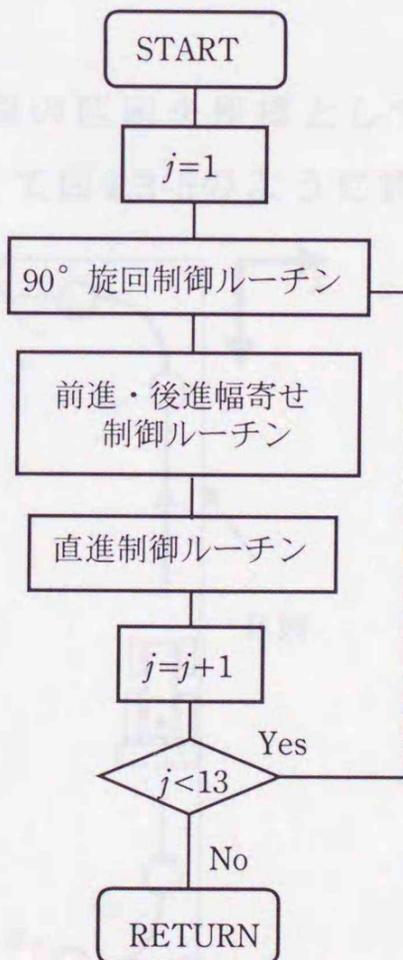


図 4.3-4 周り作業モジュールのフローチャート
Fig. 4.3-4 Flowchart of the roundabout operation module

なお、図中の i は行程番号インデックスである。移動走行モジュールは、作業開始時に圃場出入り口付近から往復作業開始位置までロボットを誘導し、かつ往復作業終了後に、周り作業の開始位置までロボットを誘導する。周り作業モジュールは、有人作業による枕地処理における慣行作業法の一例を踏襲して、まずティーチング走行経路である外周を最初に処理し、その後残りの内周を順に耕うんする方式を採用した。周り作業モジュールは、図4.3-4に示したような 90° 旋回制御ルーチン、畦畔際まで作業するための前進・後進幅寄せ制御ルーチン、作業を伴う直進制御ルーチンから構成されている。ただし、外周処理と内周処理では区画外へのはみだし、既耕地への踏み込みなどの観点から走行に対する要求が異なるため、それぞれ独立した 90° 旋回アルゴリズムを採用した。

4.3.2 制御システム

4.3.2.1 ティーチング走行モジュール

ティーチング走行モジュールは、ほ場の区画を座標として取得する。座標系は、XNAVの座標系にあわせて図4.3-5のように設定して

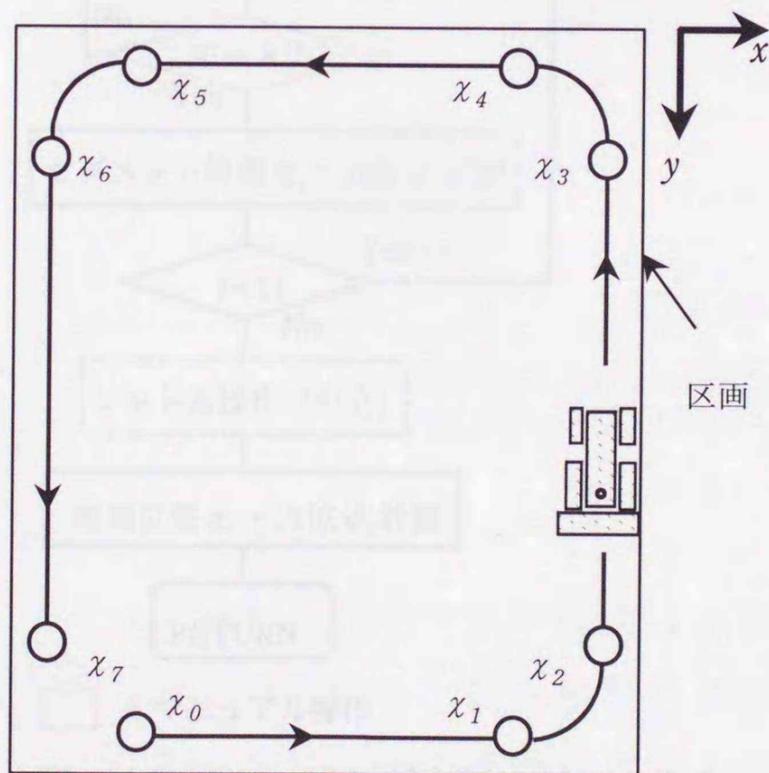


図4.3-5 ティーチング時の取得位置・方位
 Fig. 4.3-5 Getting informations on position and heading angle in "Teaching"

いる。初期位置からオペレータが、圃場区画に沿って耕うん範囲を走行することによって、各点におけるロボットの状態（セグメント位置・方位） $x_i = (x_i, y_i, \phi_i)$ ($0 \leq i < 7$)を計測して、耕うん領域を移動ロボットに認識させる。これらの情報は、走行経路の生成とともに、走行制御の目標方位 ϕ_d 及び目標経路 r_d の算出に使用される。なお、現状では $x_0 \sim x_7$ の各点の位置取得は、オペレータがロボットに指示することが必要である。図4.3-6はティーチング走行モジュールの計測・制御フローチャートである。走行操作はオペレータがマニュアルで行い、ロボットは方位（計測周期約100ms）と位置

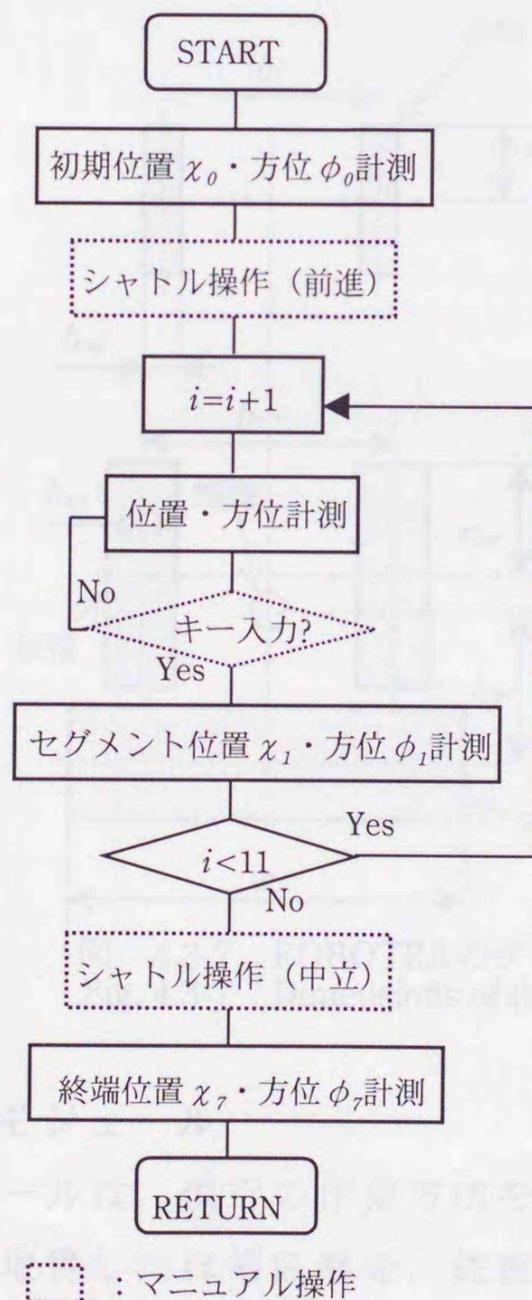


図 4.3-6 ティーチング走行モジュールの計測・制御フローチャート

Fig. 4.3-6 Flowchart of the measuring and controlling in "Teaching" module

(計測周期約500ms)を確認のため逐次観測して、各セグメント $x_0 \sim x_7$ 付近ではオペータの指示によって、これらデータを走行しながら取得する。全8セグメントの状態を取得した後で位置・方位データを格納し、ティーチング走行を終了する。なお、ロボットの寸法に関連するディメンジョンは図4.3-7に示した通り定義した。ロボット位置は同図上の『標識』点上に位置認識用の標識(基準点)を装備して計測することを想定しており、区画の座標はティーチング走行時に作業機の右側面が区画上を走行することを前提に算出できる。

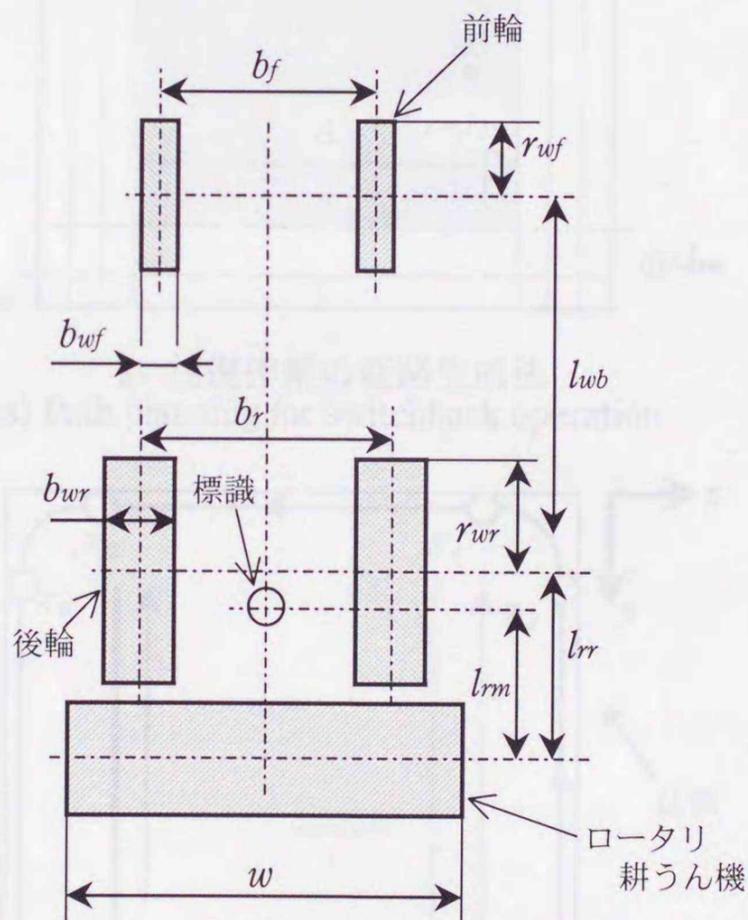
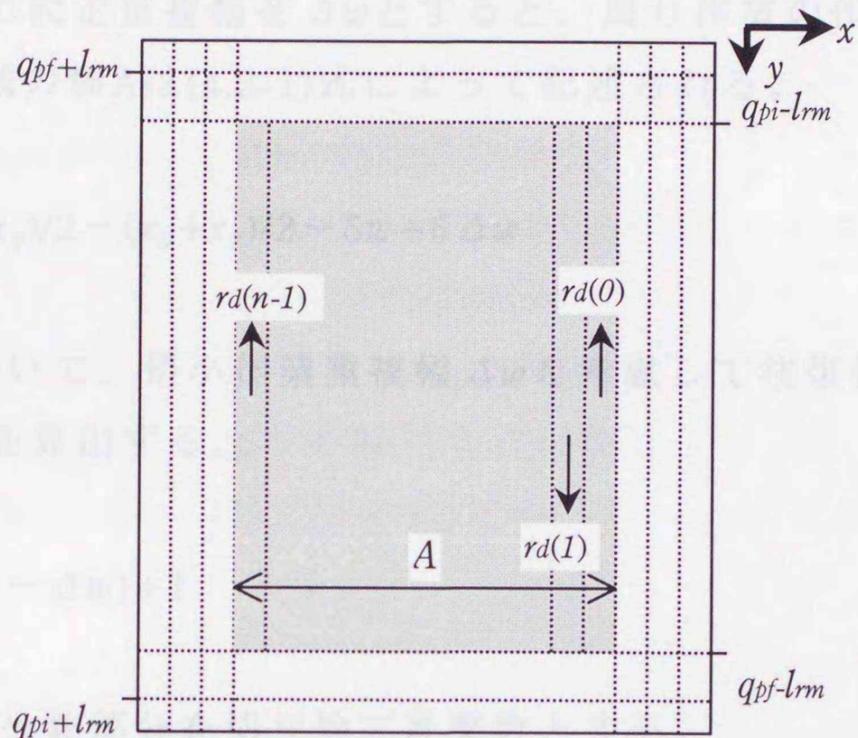


図 4.3-7 ROBOTRAのディメンジョン
Fig. 4.3-7 Dimensions of the ROBOTRA

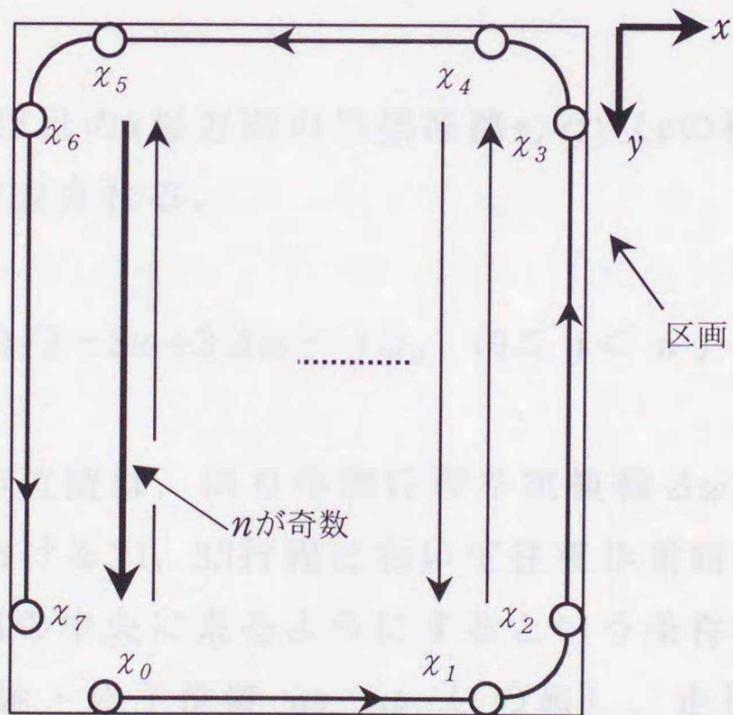
4.3.2.2 作業計画モジュール

作業計画モジュールは、慣行の作業方法を踏襲する目的から、ティーチング走行で取得したほ場区画を、往復作業と3周の周り作業によって処理をすることを前提に、走行経路を自動生成する機能を有する¹²¹⁾。この作業計画モジュールは作業開始・終了位置を決定

する作業機昇降操作も位置データとして有しており，ロボット・作業機のディメンジョンから未耕地を残さず，再耕うんしない最適な作業機制御計画も同時生成する。



a) 往復作業の経路生成法
a) Path planning for switchback operation



b) 移動走行の経路生成法
b) Path creation of transference

図 4.3-8 往復作業・移動走行の経路生成法
Fig. 4.3-8 Path planning for switchback operation and transference

1) 往復作業領域

往復作業領域の作業計画は図4.3-8に示したように、往復経路の走行経路・作業機昇降位置・停止位置からなる作業計画を生成する。周り作業時の設定重複幅を Δw とすると、周り作業の作業領域を除いた往復領域の幅 A は(4.3-1)式によって記述される。

$$A = (x_2 + x_3) / 2 - (x_6 + x_7) / 2 - 5w + 6 \Delta w \quad (4.3-1)$$

変数 A について、最小作業重複幅 Δw を考慮して往復行程数 n と作業ピッチ Δ_d を算出する。

$$n = A / (w - \Delta w) + 1 \quad (4.3-2)$$

ただし、 n は少数部分を切り捨てた整数とする。

$$\Delta_d = A / n \quad (4.3-3)$$

したがって、 j 行程目の x 軸方向の目標経路 $r_d(j)$ (x の値)は、 Δ_d を用いて(4.3-4)式で表される。

$$r_d(j) = (x_2 + x_3) / 2 - 3w + 3 \Delta w - j \Delta_d \quad (0 \leq j < n) \quad (4.3-4)$$

作業機昇降操作位置は、周り作業行程を重複幅 Δw で行うこと、及び図 4.3-1 における31, 33行程において往復作業時の作業開始・終了位置が作業幅の中央に来るようにするという条件から算出し、 y 軸方向の作業開始・終了位置 qp_i, qp_f (y の値)、走行停止位置 q_f (y の値)は往路・復路それぞれについて以下の条件を設定した。

<往路>

$$qp_i = (y_0 + y_1) / 2 - 2w + 2 \Delta w - l_{r,m} \quad (4.3-5)$$

$$qp_f = (y_4 + y_5) / 2 + 2w - 2\Delta w - l_{rm} \quad (4.3-6)$$

$$q_f = qp_f \quad (4.3-7)$$

<復路>

$$qp_i = (y_4 + y_5) / 2 + 2w - 2\Delta w + l_{rm} \quad (4.3-8)$$

$$qp_f = (y_0 + y_1) / 2 - 2w + 2\Delta w + l_{rm} \quad (4.3-9)$$

$$q_f = qp_f \quad (4.3-10)$$

<x軸方向>

一方，走行制御する上で必要となる目標方位 ϕ_d は，往路・復路それぞれについて，(4.3-11)，(4.3-12)式のティーチング走行時に取得された方位データを使用する。

$$\phi_d = (\phi_2 + \phi_3) / 2 \quad (\text{往路}) \quad (4.3-11)$$

$$\phi_d = (\phi_6 + \phi_7) / 2 \quad (\text{復路}) \quad (4.3-12)$$

2) 空走 1, 2

空走 1 領域の作業計画は，圃場出入り口付近に設置したロボットを往復作業の始端位置に誘導するためのものである。(4.3-13)式 (y の値) の経路，(4.3-14)式の方角への移動走行後に 90° 旋回して，往復作業 1 行程目の始端に誘導する。

<y軸方向>

$$r_d = (x_0 + x_1) / 2 \quad (4.3-13)$$

$$\phi_d = (\phi_0 + \phi_1) / 2 \quad (4.3-14)$$

一方，走行の終端条件 q_f は，(4.3-15)式を採用した。

<x軸方向>

$$q_f = (y_2 + y_3) / 2 - 3w + 3\Delta w - \Delta_d \quad (4.3-15)$$

空走 2 領域の作業計画は、往復作業の終端位置からティーチング走行経路 ($x_0 \sim x_1$) の周り作業 1 行程目の始端位置にロボットを誘導するためのものである。図 4.3-8 b) に示したように往復行程時の行程数 n が偶数, 奇数を判別して, 以下の経路を生成する。

① 行程数 n が奇数の場合

(4.3-16) 式 (x の値) の経路, (4.3-17) 式の方角へ移動走行して車両を誘導する。

< x 軸方向 >

$$r_d = (x_6 + x_7) / 2 + w - \Delta w \quad (4.3-16)$$

$$\phi_d = (\phi_6 + \phi_7) / 2 \quad (4.3-17)$$

一方, 走行の終端条件 q_f は, (4.3-18) 式を採用した。

< y 軸方向 >

$$q_f = (y_0 + y_1) / 2 - 1.5w + \Delta w + l_{rm} \quad (4.3-18)$$

② 行程数 n が偶数の場合

行程数 n が偶数の場合は, ロボットは往復作業終了後, 既に周り作業の始端付近に位置しているので空走 2 は不要である。

3) 周り作業 (枕地処理)

周り作業領域の座標軸方向の走行経路 r_d は図 4.3-9 a) に示したようにティーチング走行時の経路から作業幅 w , 作業重複幅 Δw を考慮して決定しており, 矩形 4 行程の走行経路を 3 周り生成する。

< 第 1, 5, 9 (11, 21, 31) 行程 >

$$r_d = (x_0 + x_1) / 2 - k (w - \Delta w) \quad (4.3-19)$$

$$\phi_d = (\phi_0 + \phi_1) / 2 \quad (4.3-20)$$

<第2,6,10 (12, 22, 32) 行程>

$$r_d = (y_2 + y_3) / 2 - k (w - \Delta w) \quad (4.3-21)$$

$$\phi_d = (\phi_2 + \phi_3) / 2 \quad (4.3-22)$$

<第3,7,11 (13, 23, 33) 行程>

$$r_d = (x_4 + x_5) / 2 + k (w - \Delta w) \quad (4.3-23)$$

$$\phi_d = (\phi_4 + \phi_5) / 2 \quad (4.3-24)$$

<第4,8,12 (14, 24, 34) 行程>

$$r_d = (y_6 + y_7) / 2 + k (w - \Delta w) \quad (4.3-25)$$

$$\phi_d = (\phi_6 + \phi_7) / 2 \quad (4.3-26)$$

なお、第1周目（最外周）では $k=0$ 、第2周目では $k=1$ 、第3周目（最内周）では $k=2$ とする。

行程の始端・終端は作業区画に残耕を作らないために、 90° 旋回後にロータリ中心軸が区画に到達するまで後進幅寄せを行い、この地点から走行及び作業を開始する。また、作業及び走行の終点は図 4.3-9 に示したように往復作業領域境界線となり、以下の(4.3-27)～(4.3-34)式を採用した。

<第1,5,9 (11, 21, 31) 行程>

$$q_i = qp_i = (y_6 + y_7) / 2 + w / 2 - l_{rm} + a \quad (4.3-27)$$

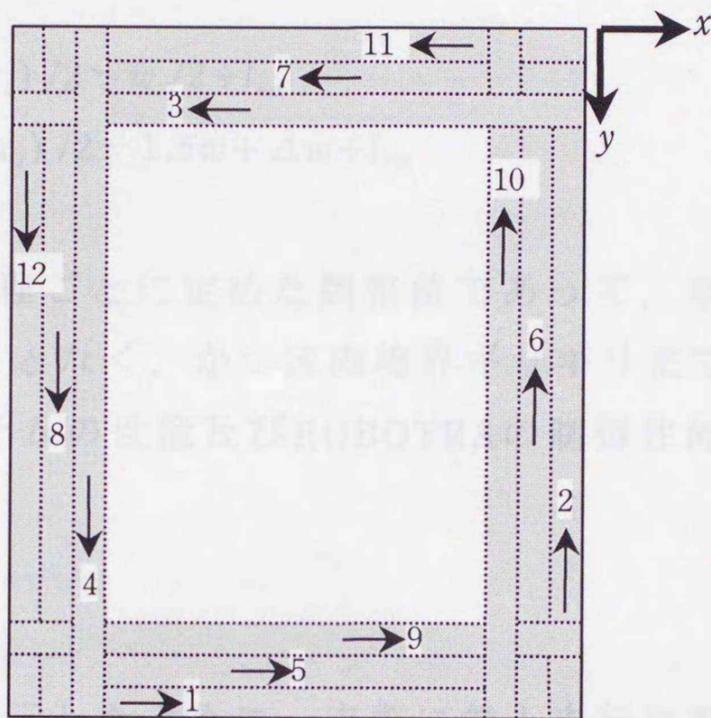
$$q_f = qp_f = (y_2 + y_3) / 2 - w / 2 - (l_{wb} + l_{rr} - l_{rm}) + a \quad (4.3-28)$$

<第2,6,10 (12, 22, 32) 行程>

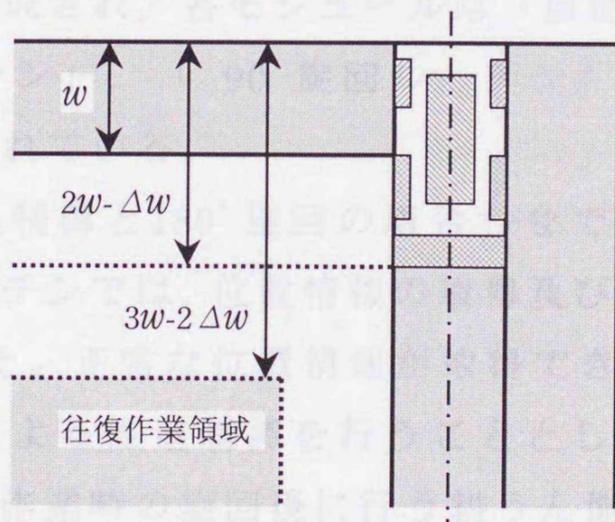
$$q_i = qp_i = (x_0 + x_1) / 2 + w / 2 - l_{rm} + a \quad (4.3-29)$$

$$q_f = qp_f = (x_4 + x_5) / 2 + 2w - 2\Delta w - l_{rm} \quad (4.3-30)$$

< 第3,7,11 (13, 23, 33) 行程 >



a) 周り作業の経路生成法
a) Path planning for roundabout operation



b) 周り作業の行程終端位置
b) Final position of the each stroke of roundabout operation

図 4.3-9 周り作業の経路生成法
Fig. 4.3-9 Path planning for roundabout operation

$$q_i = qp_i = (y_2 + y_3) / 2 - w / 2 + l_{rm} + a \quad (4.3-31)$$

$$q_f = qp_f = (y_6 + y_7) / 2 - w / 2 + (l_{wb} + l_{rr} - l_{rm}) + a \quad (4.3-32)$$

<第4,8,12 (14, 24, 34) 行程>

$$q_i = qp_i = (x_4 + x_5) / 2 - w / 2 + l_{rm} \quad (4.3-33)$$

$$q_f = qp_f = (x_0 + x_1) / 2 - 1.5w + \Delta w + l_{rm} \quad (4.3-34)$$

但し、 a は各行程ごとに定めた調整値であって、車両の一部が区画外へはみ出すことなく、かつ区画境界ギリギリまで作業を行えるよう、航法システムの性能及びROBOTRAの制御性能に配慮して求めた値である。

4.3.2.3 走行制御

第4章4.3.1.2に示したように、実際に無人走行制御を行う走行制御部は、往復作業モジュール、移動走行モジュール、周り作業モジュールによって構成され、各モジュールは「直進制御ルーチン」、
「180° 旋回ルーチン」、
「90° 旋回ルーチン」、
「幅寄せルーチン」等から構成されている。

往復作業は直進制御と180° 旋回の組み合わせであり、図4.3-10に示す直進制御ルーチンでは、位置情報の取得及び操舵系の制御は0.5s周期を基本とした。正常な位置情報が取得できない場合は一定時間TMS方位情報による直進制御を行うこととした。また、圃場試験を通じて、往復作業時の旋回後に行う耕うん開始位置を合わせるための幅寄せを容易にするために、180° 旋回後一旦後進する、などの対策を行っている。

図4.3-4に示した周り作業モジュールでは、圃場区画外へのはみ出しや残耕が無く、かつ、既作業領域の踏みつけを最小限にする高精度な位置制御が求められる。そこで、

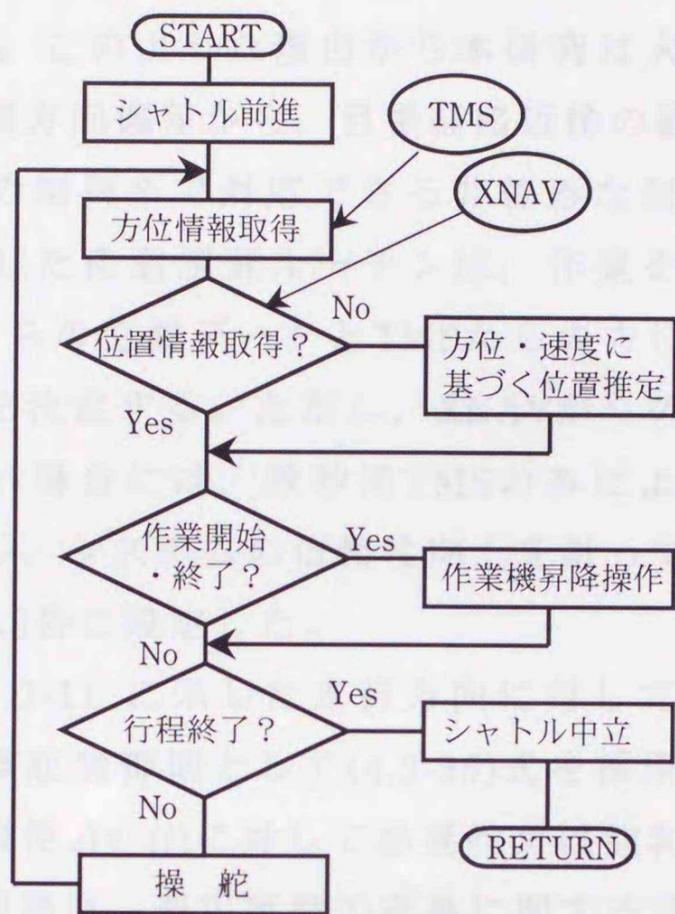


図 4.3-10 直進制御ルーチン
Fig. 4.3-10 Flowchart of straight control routine

- ① 90° 旋回ルーチンでは予め若干の後進や切返しを行う,
 - ② 旋回後は前進幅寄せと後進幅寄せを組合わせて目標経路への誘導を行う,
 - ③ 旋回半径の学習機能を持たせる,
- などの工夫を織り込んだ。

また、行程終端等では方位情報と速度情報に基づく 0.1秒周期のデッドレコニングを併用して位置決め精度の向上を図った。

1) 直進制御¹²²⁾

ロボットを直進制御する方法は、PID制御器のような線形のものからファジィ³¹⁾・ニューラルネットワークなど非線形なものまで数多く提案されている。乗用車と比較して低速・大舵角で使用される農用車両に線形な制御器を使用する場合には、一般に横方向偏差の大小でゲインを変更することが制御成績を維持する上で必要となる。

これは、農用車両の運動を線形で取り扱うことが困難であることを意味する¹²³⁾。このような理由から本研究は大舵角が要求される比較的大きな横方向偏差から、目標経路近傍の横方向偏差の小さい領域まで1つの制御系で対応できる非線形な制御系を構成した。図4.3-10に示した直進制御ルーチンは、作業を伴う走行制御を意味し、XNAVからの位置データとTMSからの方位データを使用して、操舵制御値を決定する。ただし、XNAVからの位置データが正常に受信できない場合には、数秒間TMSのみによって走行制御を行うように工夫し、システムの信頼性向上を計っている。なお、計測・制御周期は0.5秒に設定した。

いま、図4.3-11に示した走行方向に対して、位置・方位データを使用した操舵制御則として(4.3-35)式を採用した。農用車両の場合、横方向偏差 $\Delta r(t)$ に対して必要舵角は飽和する特性を有する。この技術的根拠は、農用車両の運動に関する逆モデルをニューラルネットワークによって同定し、制御器を設計した野口らの研究¹²⁴⁾にみられる。すなわち、農用車両の場合、舵角量に対して車輪のコーナリングパワーが非線形に変化し、それに起因して発生する非線

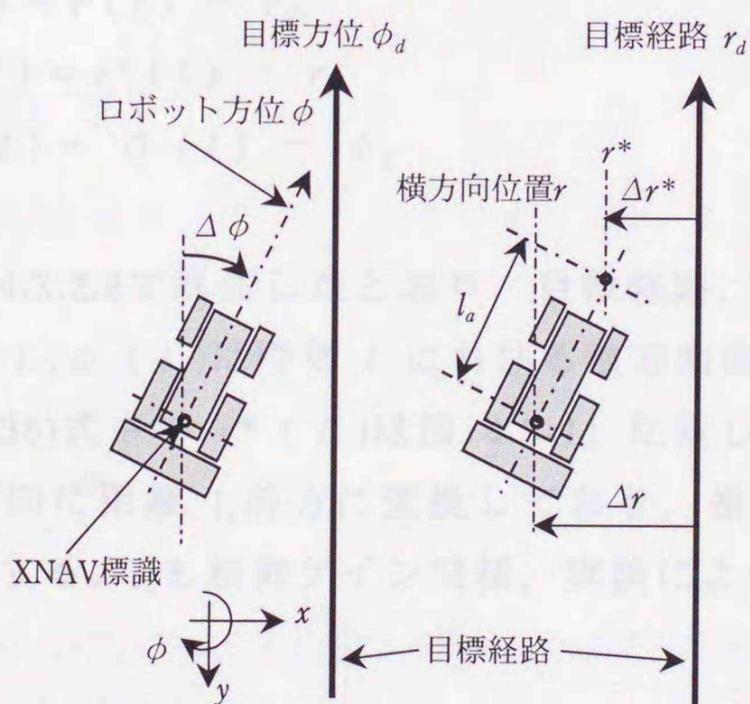


図 4.3-11 操舵制御のジオメトリー
Fig. 4.3-11 Guidance geometry in steering control

形な横すべり特性を考慮して制御器を設計することが必要であるとしている。そこで、本研究では操舵制御系に飽和関数を導入して対応することにした。

$$\psi(t) = -\alpha \int_0^t \Delta r(t) dt - \beta \tanh(\Delta r^*(t)/\gamma) \quad (4.3-35)$$

ここに、 $\tanh(\)$ は双曲線関数、 $\psi(t)$ は時刻 t における舵角制御値、 α 、 β 、 γ は制御ゲインであり、これらの値は実験によって決定した。積分下限の時刻0は直進制御ルーチンに入った時刻である。(4.3-35)式を離散形で表すと、

$$\psi_t = -\sum_{i=0}^t \Delta r_i \Delta t - \beta \tanh(\Delta r_i^*/\gamma) \quad (4.3-36)$$

Δt は時間ステップであり、1ステップは前述した制御周期の0.5sにあたる。図4.3-11に示したように $\Delta r(t)$ 、 $\Delta \phi(t)$ は目標との偏差を表しており、(4.3-37)~(4.3-39)式として表される。

$$\Delta r(t) = r(t) - r_d \quad (4.3-37)$$

$$\Delta r^*(t) = r^*(t) - r_d \quad (4.3-38)$$

$$\Delta \phi(t) = \phi(t) - \phi_d \quad (4.3-39)$$

r_d 、 ϕ_d は、4.3.2.2で既述したとおり、目標経路、目標方位である。また、 $r(t)$ 、 $\phi(t)$ は時刻 t における横方向位置と方位を表している。(4.3-38)式中の $r^*(t)$ は図4.3-11に示したように、標識位置を前進方向に距離 l_a 前方に変換しており、操舵制御の進み補償として機能する。 l_a も制御ゲイン同様、実験によって決定した。

$$r^*(t) = l_a \sin(\Delta \phi(t)) + r(t) \quad (4.3-40)$$

また、位置データが正常に取得できなかった場合は、TMSから

の方位情報のみで制御するために、作業速度 v を導入して、ロボットの横すべりを無視することにより、操作量は(4.3-41)式によって計算される。

$$\psi(t) = -\alpha \cdot v \sin(\Delta\phi(t)) - \beta \cdot \Delta r(t) \quad (4.3-41)$$

TMSの方位情報で走行制御する場合、ロボットの横方向偏差 Δr は、方位データのみから推定することが要求される。そこで、ロボットの横すべりを可能な限り発生させないために、直進時の舵角制御値に $-9^\circ \sim +9^\circ$ の制約を付与して、(4.3-42)式のヨー角の変化から、横方向偏差 $\Delta r(t)$ を推定した。

$$\Delta r(t) = \int_0^t v \sin(\Delta\phi(t)) dt \quad (4.3-42)$$

なお、積分の下限時刻0は、位置データの取得ができなくなった時点である。離散形で表すと時刻kにおける横方向偏差は(4.3-42)式のように表される。

$$\Delta r_k = -v \sum_{i=0}^k \sin(\Delta\phi_i) \Delta t \quad (4.3-43)$$

また、TMSからの方位データ $\phi(t)$ にはランダムノイズが混入するため、過去400ms間の方位データから、(4.3-44)式の平滑化フィルタを構成して、算出された値を制御入力として使用した。

$$\phi_t = 2/3 \sum_{i=-4}^0 \{(i+5)\Delta\phi_i \Delta t\} \quad (4.3-44)$$

ステップ i は時刻 t から100 ms刻みで過去に遡るインデックスである。

一方、作業計画モジュールで作成された作業機昇降操作、走行停止などの作業スケジュールについては、0.5s毎の位置計測による位

置決め精度では不十分であることから、デッドレコニングを併用した。直前の2位置から走行速度を計算して、位置データが更新されるまでの間は、算出された走行速度から100ms周期でロボット位置を推定し、その位置を作業スケジュールとの参照データとして使用した。ただし、本法の場合、0.5s周期に位置データが更新されるため、通常のデッドレコニングで問題になる位置誤差の累積は無視できることが特徴である。

2) 180° 旋回

往復作業において直進走行を(4.3-10)式の条件によって終了したのち、図4.3-3に示したフローに従って180° 旋回にはいる。180° 旋回制御は、正確な旋回角を得るためにスロットルをパートスロッ

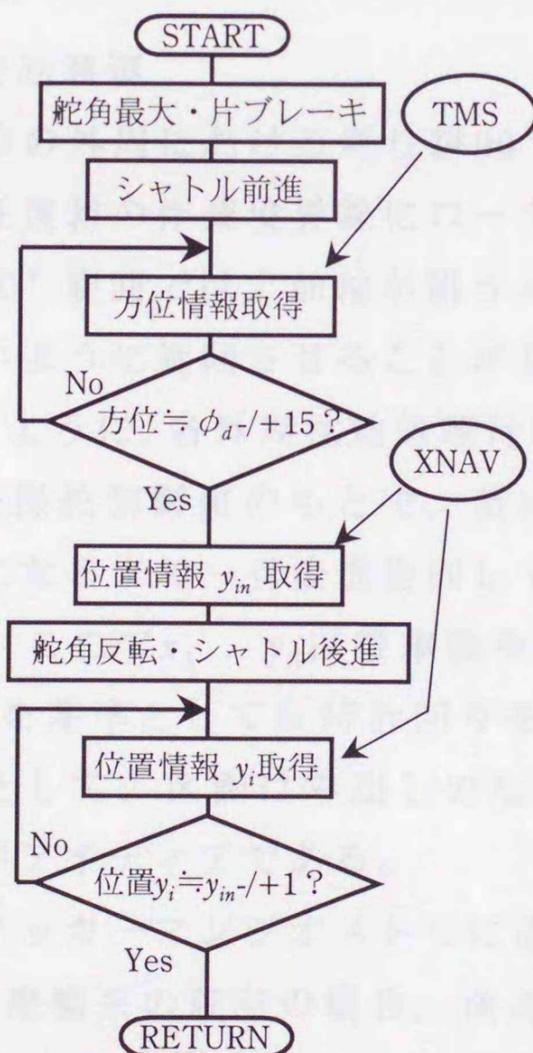


図 4.3-12 180° 旋回制御ルーチン
Fig. 4.3-12 Flowchart of 180° turning control routine

トルとして速度を落とし、最大舵角をとって片ブレーキを使用して行うこととした。180° 旋回制御はTMS情報に基づいて行われる。

180° 旋回後に、幅寄せを行って(4.3-6), (4.3-8)式による次行程の始端位置 qp_i , (4.3-4)式に示した目標経路 $r_d(j)$, 及び(4.3-11),(4.3-12)式による次行程の目標方位 ϕ_d へ、ロボットを誘導することとなる。この幅寄せは、直進制御ルーチンによって行われるが、幅寄せに必要な前進距離を確保し、かつ幅寄せ量をより小さくするために、実験の結果、旋回を次行程の目標方位 ϕ_d となる前、すなわち旋回角度を165° 程度で終了し、逆方向に操舵して1m程度後進する切返し動作を180° 旋回ルーチンの最後の付加することとした¹²⁵⁾。この間の流れを図4.3-12 に示す。

3) 90° 旋回¹²⁶⁾

① 外周90° 旋回制御

枕地処理のための外周における周り耕90° 旋回（外周90° 旋回と呼ぶ）の始点は往復耕の作業境界線にロータリ軸中心が到達した地点である。外周90° 旋回では、前輪が耕うん作業を実行すべき区画からはみ出さないように旋回させることが狙いである。このため、図4.3-13に示したように、各外周枕地処理行程の終点状態 $\chi_A = (x_A, y_A, \theta_A)$ から、一定の操舵制御値のもとで、旋回角 θ_0 (y 軸を基準とする後進旋回角) になるまで一旦後進旋回して、前進90° 旋回させる方式を採用した。ここで x_A , y_A は後車軸中心位置とし、 θ_A は車両の進行方位で y 軸を基準として反時計回りを正とする。すなわち、制御パラメータとして、区画はみ出しのない最小の後進旋回角 θ_0 を算出することがアイデアである。

まず、旋回がアッカーマンジオメトリに従うことを仮定すると、図4.3-13に示した座標系の旋回の場合、後進旋回終端時の後車軸中心位置 (x_B, y_B) は、(4.3-45), (4.3-46)式で表される。

$$x_B = x_A - r_0(1 - \cos \theta_A) + r_0(1 - \cos \theta_0) \quad (4.3-45)$$

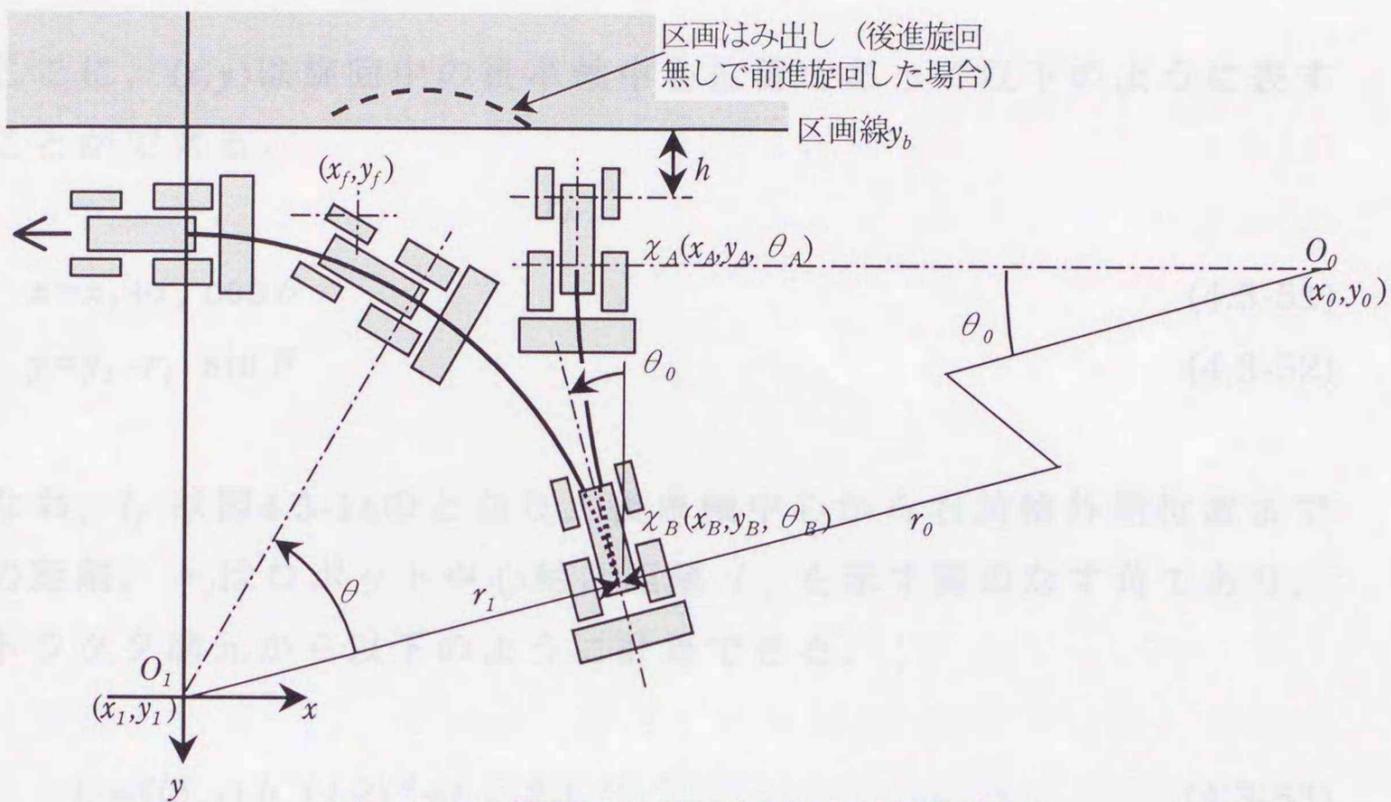


図 4.3-13 外周90° 旋回における制御方法
 Fig. 4.3-13 Control algorithm for 90° turn of the outermost roundabout operation

$$y_B = y_A - r_0 \sin \theta_A + r_0 \sin \theta_0 \quad (4.3-46)$$

なお、 r_0 は後進旋回半径である。これに続いて前進旋回を行う場合の前進旋回中心 (x_1, y_1) は前進旋回半径 r_1 を用いて、(4.3-47)、(4.3-48)式で表される。

$$x_1 = x_B - r_1 \cos \theta_0 \quad (4.3-47)$$

$$y_1 = y_B + r_1 \sin \theta_0 \quad (4.3-48)$$

次に、周り耕を反時計回りの走行とした場合、前進旋回中に区画はみ出しの大きい右前輪外側位置 (x_f, y_f) は、 y 軸を基準とする前進旋回中の車両方位の変化量 θ （前進旋回角）を用いて、(4.3-49)～(4.3-50)式によって計算できる。

$$x_f = x - l_f \sin(\theta - \gamma_f) \quad (4.3-49)$$

$$y_f = y - l_f \cos(\theta - \gamma_f) \quad (4.3-50)$$

ここに、 (x,y) は旋回中の後車軸中心位置であって以下のように表すことができる。

$$x = x_1 + r_1 \cos \theta \quad (4.3-51)$$

$$y = y_1 - r_1 \sin \theta \quad (4.3-52)$$

なお、 l_f は図4.3-14のとおり、後車軸中心から右前輪外側位置までの距離、 γ_f はロボット中心軸と距離 l_f を示す線のなす角であり、トラクタ諸元から以下のように計算できる。

$$l_f = ((b_{wf} + b_f) / 2)^2 + l_{wb}^2)^{1/2} \quad (4.3-53)$$

$$\gamma_f = \tan^{-1} (((b_{wf} + b_f) / 2) / l_{wb}) \quad (4.3-54)$$

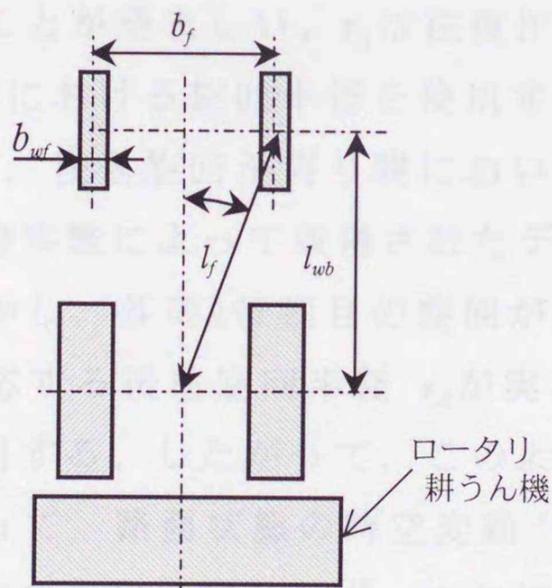


図 4.3-14 ROBOTRAのディメンジョン
Fig. 4.3-14 Dimensions of the ROBOTRA

この(4.3-45)～(5.3-52)式によって、 (x_f, y_f) を求め、 y_f と区画線 y_b が $y_f > y_b$ となる区画はみ出しのない後進旋回角 θ_0 の最小値を求める。本研究では(4.3-45)～(4.3-52)式に 1° 刻みに $\theta_A \leq \theta_0 \leq 45^\circ$ 、 $\theta_0 \leq \theta \leq 90^\circ$ となる θ_0 、 θ を代入して $y_f > y_b$ の条件を満たす θ_0 の最小値を求めることとした。これも要するに、以下の最適化計算と等価にな

る。

$$\min. P(\theta_0) \quad (4.3-55)$$

$$P(\theta_0) = \zeta \varepsilon_b + \theta_0 \quad (4.3-56)$$

ここに、

$$\varepsilon_b = y_b - y_f \quad (\text{if } y_f < y_b) \quad (4.3-57)$$

$$\zeta = \infty \quad (4.3-58)$$

制御アルゴリズムのフローチャートを図4.3-15に示した。枕地処理行程の終点において前車軸から区画線までの距離 h を算出する。前進旋回半径 r_1 、後進旋回半径 r_0 はそれぞれ操舵制御値を一定とすれば、時間的・空間的な変動パラメータであることから、時変パラメータであることが望ましい。 r_1 は往復作業走行中に取得可能であり、 180° 旋回における旋回半径を使用する。一方、後進旋回半径 r_0 の初期値は、後進旋回が周り耕において始めて行う運動であることから、基礎実験によって取得されたデフォルト値を使用することにした。しかし、外周1行程目の旋回が終了した時点で、ある操舵制御値に対応する後進旋回半径 r_0 が実測できるので、この値を次旋回時に使用する。したがって、このように旋回半径を逐次取得することによって、路面状態の時空変動^{52),127),128)}を補償することができ、路面状態の変化に関わらず、つねに一定の制御成績を維持することができる。

なお、耕うん作業部の幅は後輪外側より10cm程度左右に張り出しているので、後進旋回時に後車輪がロボット側方の区画からはみ出すことはない。

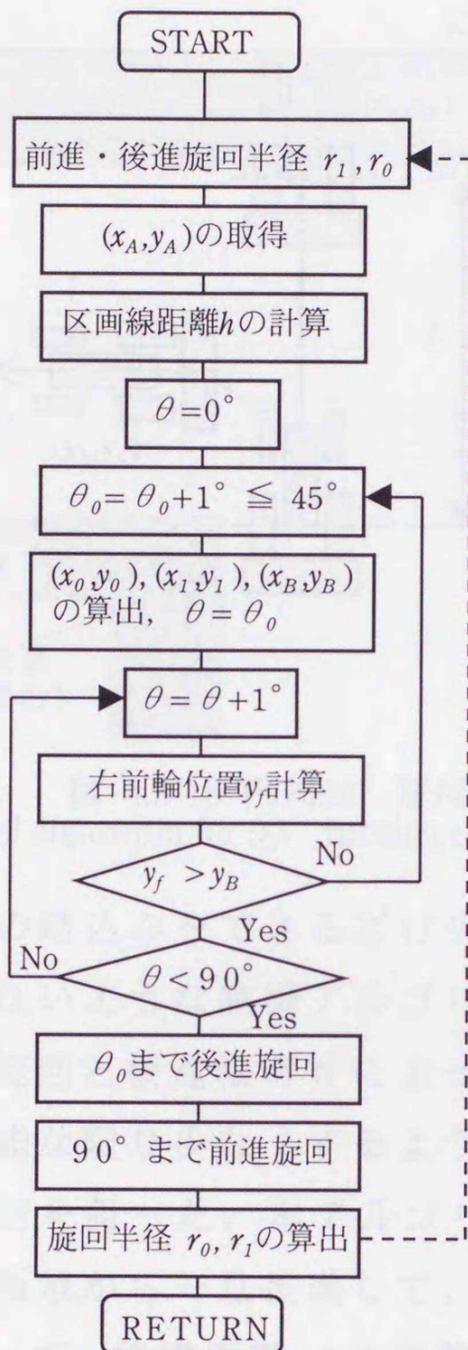


図 4.3-15 外周90° 旋回ルーチンの制御フローチャート

Fig. 4.3-15 Flowchart of 90° turning control routine of the outermost roundabout operation

② 内周90° 旋回制御

枕地処理のための内周（最外周以外の2周）における周り耕90°旋回（内周90°旋回と呼ぶ）では、外周時のような区画はみ出しの問題はないものの、既耕部分への車輪踏込みが問題となる。供試ロボットと作業機のディメンジョンと最小旋回半径から判断して、区画内に極力残耕を作らないように運転した場合、既耕地への車輪踏込みが生じることは避けられない。そこで、土壌を踏固めること

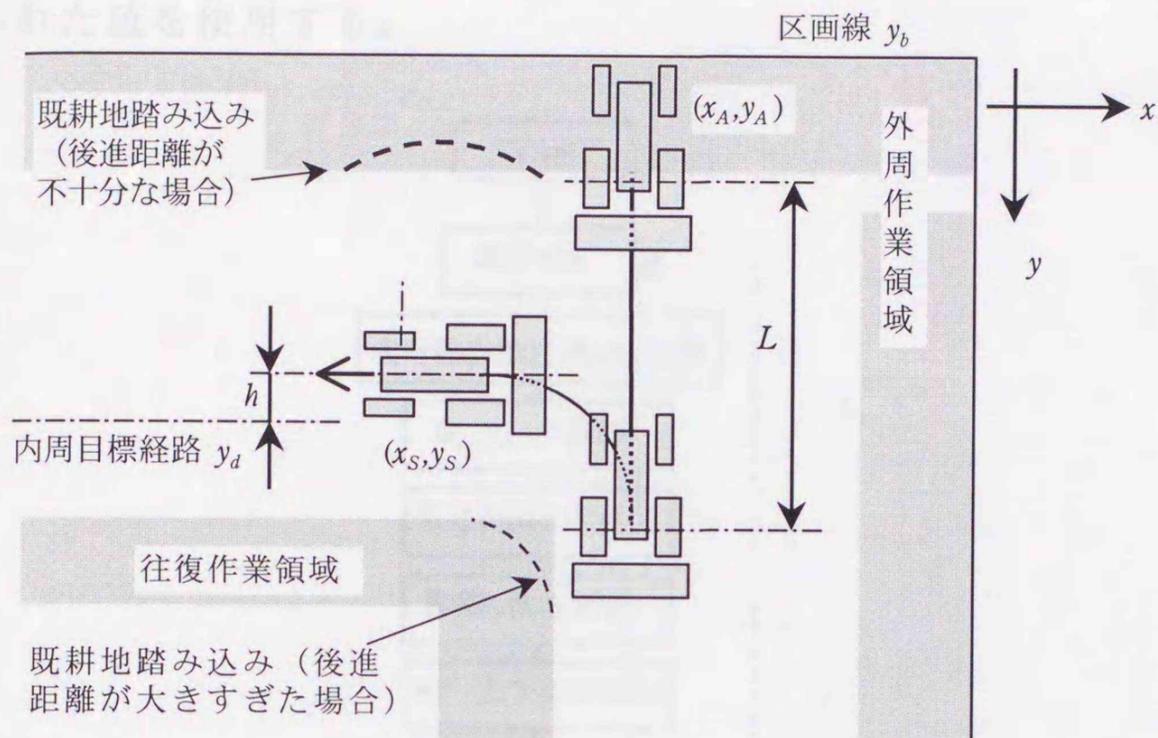


図 4.3-16 内周90° 旋回の概念図

Fig. 4.3-16 Control algorithm for 90° turning of the inside roundabout operation

となる既耕地への踏み込みをできるだけ少なく、かつ踏み込み部分に再度踏み込むことがないように制御アルゴリズムを考案した。既耕地への踏み込みは90° 旋回と後進幅寄せによって生じることから、旋回後の幅寄せ量を可能な限り少なくするように、次行程の目標経路に直接誘導する90° 旋回を狙った。本アルゴリズムは図4.3-16に示したように、外周作業領域から一旦後進して、その後90° 旋回を行う方式である。したがって、後進距離 L を調整して、次行程の目標経路 y_d に誘導することが制御方法になる。すなわち、路面状態の時空変動による旋回半径の変化を後進距離の調整によって補償することになる。図4.3-17は内周90° 旋回のフローチャートである。逐次行われる内周90° 旋回後の目標経路との偏差 h を用いて、後進距離 L は(4.3-59)式によって自動調節される。

$$L_i = L_{i-1} + h_i - (y_{Ai} - y_{Ai-1}) \quad (4.3-59)$$

ここに、 i は旋回番号を表している。なお、 L の初期値は、前処理行程である外周走行時で得られた旋回半径 r_1 から逆演算して算出さ

れた値を使用する。

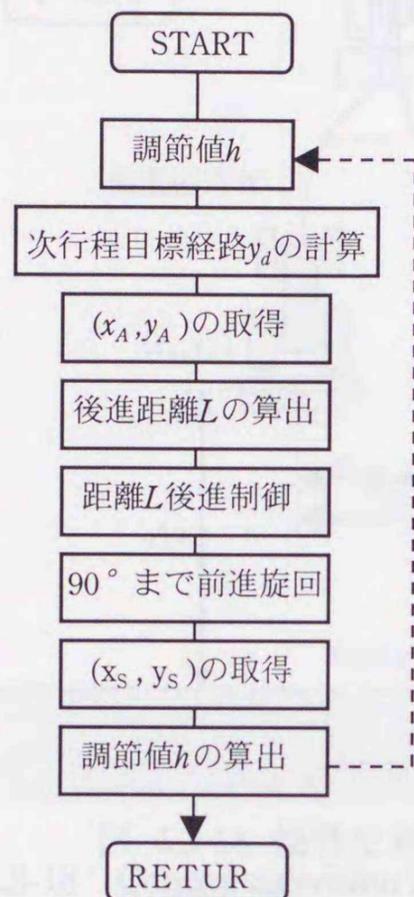


図 4.3-17 内周90° 旋回ルーチンの制御フローチャート

Fig. 4.3-17 Flowchart of 90° turning control routine on an inside roundabout operation

4) 幅寄せ

幅寄せ制御¹²⁶⁾の位置決め精度は、次行程の作業走行の精度に影響を及ぼすことから、幅寄せ制御は、耕うんロボットの作業性能を向上させる上で重要な要素である。制御法の概略を図4.3-18に示した。本アルゴリズムはロボットの冗長な動作を防止するために、現在位置 (x_A, y_A) と目標位置 (x_B, y_B) から幅寄せの難度を評価して、必要に応じて前進幅寄せを行わせる。前進幅寄せを行う場合の幅寄せ量は全幅寄せ量 Δx の半分とし、位置・方位の収束状態から幅寄せ終了を判定する。

前進・後進幅寄せに関する操舵制御則には、直進制御と同様な横方向偏差による非線形制御器を採用している。ただし、後進制御は

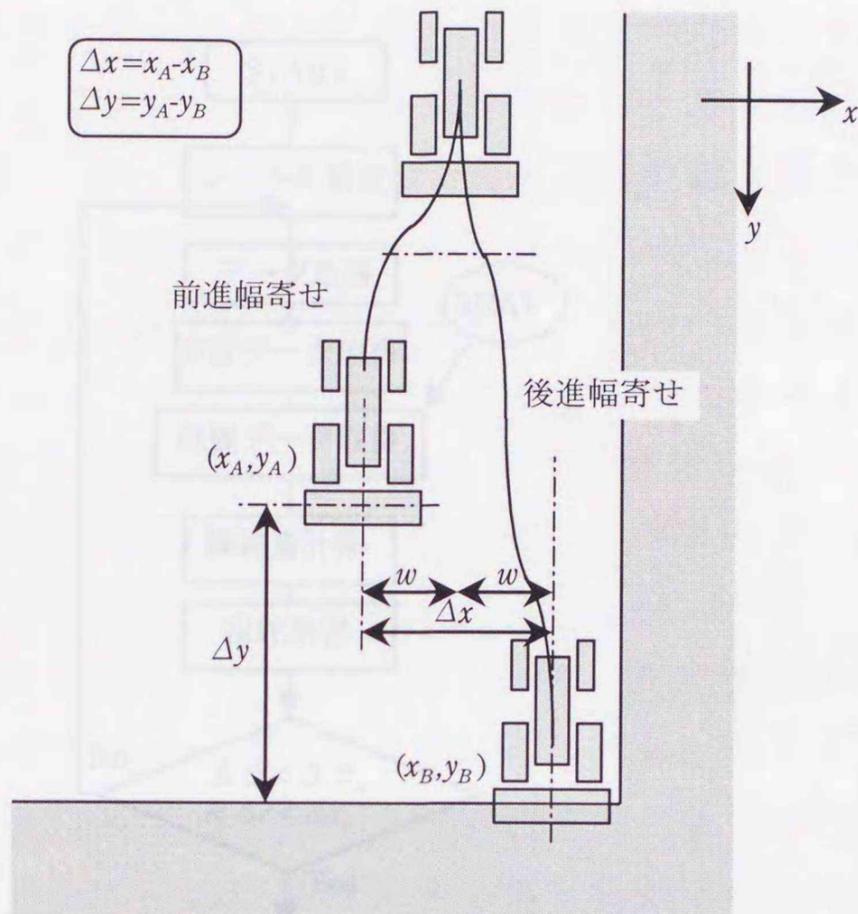


図 4.3-18 幅寄せ制御の概略図
Fig. 4.3-18 Control algorithm for a sideway movement

前進時の標識からの前方距離を後方距離に変更して対応した。制御フローチャートは図4.3-19に示したが、幅寄せ量 Δx と後進可能距離 Δy は作業経路計画と現在位置から算出する。幅寄せ難度 ζ を以下の式によって算出し、しきい値 ζ_r と比較することで、前進幅寄せの必要性の有無を調べる。

$$\zeta = \tan^{-1}(\Delta x / \Delta y) \quad (4.3-60)$$

前進幅寄せの終了は、目標方位 ϕ_d 、位置 r_d に対する偏差 ($\Delta \phi$, Δr) が、しきい値 ($\Delta \phi_d, \Delta r_d$) 以下になったときである。これらのしきい値は引き続き行う後進幅寄せへの円滑な移行や冗長な動作の防止を基準に、試験を繰り返し行い取得した。なお、計測・制御周期は直進制御同様0.5sに設定している。一方、後進幅寄せは区画線にロータリ軸が到達したときに幅寄せが終了するように y_B を計算・設定しており、この終端の位置決め精度の低下は区画はみ出し、あ

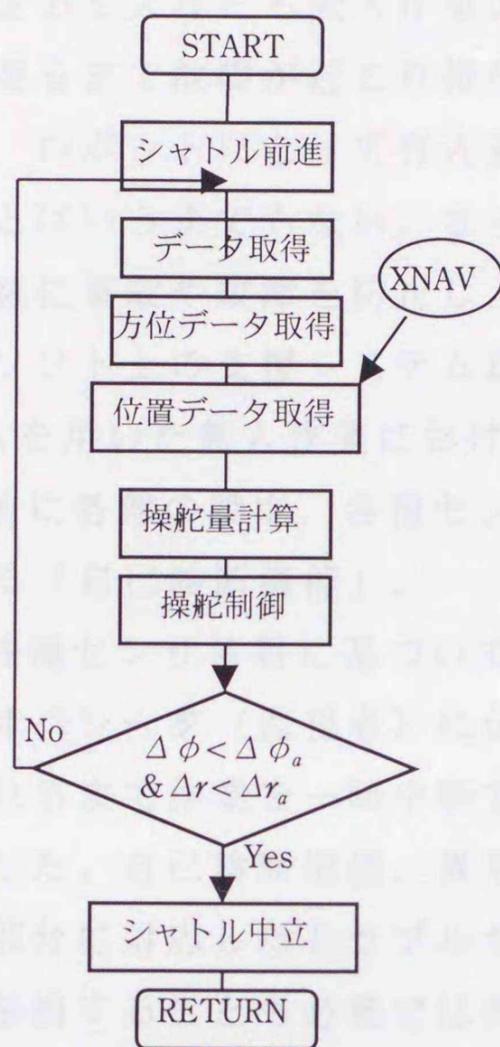


図 4.3-19 幅寄せルーチンの制御
フローチャート

Fig. 4.3-19 Flowchart of
sideway movement control routine

るいは残耕の存在を意味する。そこで、位置決めを高精度に行うため、直進制御同様、直前の2位置から走行速度を算出することによるデッドレコニングを併用した。

4.3.3 支援システム¹²⁹⁾

ロボットが無人で作業を行う場合、センサ、制御システム、アクチュエータ、及び機械としてのロボット自体（車両及び作業機）のトラブルや故障は、オペレータが存在していないので早期発見が難しい。無人作業ではこれらトラブル等に起因したロボットの暴走による事故が懸念されるばかりでなく、早期発見が困難なことから、例えばネジの緩みといった些細なトラブルが故障を連鎖的に誘発して、修復が困難な重大な故障を引き起こす可能性がある。またオペ

レータの初期設定のミスなども無人作業の円滑な実行を妨げる要因である。細部に至るまで故障が起こり得ないような信頼性の高い設計と品質管理は、ロボットにとって有人運転機械の場合以上に重要な要件となることはいうまでもない。さらに積極的にトラブルを見つけだして、未然に事故や故障を防止し、かつ円滑な無人作業の実行を図るようなソフト上の支援システムが必要と考えられる。

XNAVシステムを用いた無人作業における支援システムには、

- 1) 作業開始前に各部の設定、各種センサとアクチュエータの動作を確認する「自己診断機能」、
- 2) 作業中に各種センサ情報に基づいて、作業状態やセンサ、車両の異常をオペレータ（監視者）に伝達し、もしくは異常な状態が解消されるまで作業を一時中断する「異常時対応機能」、

を備えることとした。自己診断機能、異常時対応機能を充実させるためには、部分部分に対応したトラブルや異常状態を検出する各種センサを各部に装備することも必要ではある。しかし、センサの種類と数を増やし過ぎてシステムを肥大化させ、そのためにさらにトラブルの発生箇所が増えるという悪循環を防ぐため、XNAV作業ソフトでは、極力既存のセンサを活用してトラブル等を検出することをねらった。

4.3.3.1 自己診断

自己診断機能は作業ソフトに組み込まれており、無人作業を実行しようとするとき初期設定に次いで実行される。このとき車両は、

- 1) 所定の作業開始位置に、
- 2) 概ね往復作業の第1行程の向きに、
- 3) 概ね水平に停止状態で置かれており、
- 4) 無人作業に必要な各部の設定が終了していること、

が条件である。点検項目とチェックの内容等を表4.3-1に示す。

正常／異常の判断は以下によっている。

- 1) 制御モードの設定は車両制御コントローラとの通信が可能で

表 4.3-1 自己診断の項目と内容
 Table 4.3-1 Examples of items and checks in self-diagnosis

| No | 項 目 | チェック内容 |
|----|---------|-----------------------------|
| 1 | 制御モード設定 | ON? |
| 2 | 位置情報 | 取得可? 現在位置区画内? データ変動小? |
| 3 | 方位情報 | 現在方位は正常? |
| 4 | 傾斜情報 | ほぼ水平状態? |
| 5 | 燃料残量 | 1/2以上? |
| 6 | 油圧レバー | 下位置? |
| 7 | PTO | 駆動状態? |
| 8 | 操舵機構 | 自動制御可? |

あればONと判断され、オペレータの初期設定を確認する。

- 2) 位置情報はXNAVデータのとり込みによってチェックされ、とり込み開始から2秒間データが送信されてこなければ「取得不可」と判断される。現在位置は、既に読み込んだティーチングデータより算出された圃場区画のデータに基づき、区画外の座標データが得られた場合は異常と判断される。データ変動は、連続して4個のデータを入力し、停止中であるはずの車両の位置が5cm 以上変動した場合に異常と判断される。これらにより、XNAVシステムが正常に機能していることを確認する。
- 3) 方位情報は、TMSよりデータを取得してその値が往復作業第1行程の基準方位 ϕ_d に対して $\pm 30^\circ$ 以上の偏差を有するときに異常と判断し、TMSの機能を確認する。
- 4) 傾斜はTMSデータの傾斜補正に用いる傾斜センサのデータを取得して、ロール角・ピッチ角ともに $\pm 8^\circ$ 以上の値を示したときに異常と判断して、傾斜センサの機能を確認する。
- 5) 燃料残量は燃料ゲージの出力値から1/2以下の状態では作業中に燃料切れの危険があると考えて異常と判断することとし、オペレータに燃料補給を促す。
- 6) 油圧レバーが上がっている状態では電気信号による作業機昇降制御（商品名、ポンパ）ができないので、レバー位置を検出するポテンシオメータの値を読み込んで上位置を異常と判断し

て、オペレータの初期設定を確認する。

- 7) PTO変速はレバー位置を検出するマイクロスイッチによって切状態を異常とし、オペレータの初期設定を確認する。
- 8) 操舵機構は、 $-15 \sim +15^\circ$ の間の操舵を行い、舵角検出ポテンシヨ（サーボ制御用センサ）の値が $-15^\circ \pm 2^\circ$, $+15^\circ \pm 2^\circ$ の範囲を示さないときに異常と判断する。このチェックによって操舵アクチュエータ、車両制御コントローラの機能確認を行う。

異常と判断された場合は、その内容と対応方法をディスプレイに表示するとともにアラーム音を発する。オペレータはこの指示に従って設定のやりなおし、各部の点検等を行って、再度自己診断を実行させるようにしている。また全て正常と判断された場合は、そのまま無人走行に移行する。

4.3.3.2 異常時対応機能

異常時対応機能は作業ソフトに組み込まれており、無人作業中にデータの取り込み、各部の制御が実行されるつど実行される。異常状態のチェック項目と内容、対応を表 4.3-2に示す。表 4.3-2 に示すNo.2 からNo.6までは、全てその時点におけるXNAVからの位置情報 (x_i, y_i) に基づいて判別される項目である。また、いくつかの異常、トラブルは結果として速度の異常として検出されるという観点から、ひとつ前に取得した位置情報 (x_{i-1}, y_{i-1}) を用いて移動速度 v_i を算出して、初期設定時に入力した作業速度段に応じた機関定格回転時の標準速度 v_0 と比較して異常を推定する方法を導入している。正常／異常の判断は、概要を表 4.3-2 に示したがその詳細、及び対応などは以下の通りである。

1) 制御モード設定

他の異常時対応機能によってモニタされた状態を、正規の状態に復帰させるために各種のマニュアル操作を行った際に、オペレータが自動モードへの復帰動作を忘れた際に機能するものである。内容

表 4.3-2 異常時対応機能の項目と内容
Table 4.3-2 Examples of items and contents in abnormality alarming

| No. | 項 目 | 異常対応* | 異常である条件** |
|-----|-------------------------------|-------|--------------------------------|
| 1 | 制御モード設定 (異常時対応後にチェック) | 表 | OFFで異常 |
| 2 | 位置情報異常1 | 停警自 | 2s以上データ受信無し |
| 3 | 位置情報異常2 (位置区画外, 自動復帰不可の場合) | 停警表 | 位置データ区画外 30s以上データ受信無し |
| 4 | すべり等による走行異常 | 停警表 | $v_i > 2.1 v_0$ |
| 5 | ダッシング等による走行異常 | 停警表 | $v_i < 0.15 v_0$ |
| 6 | 速度低下 | 停警表 | 2回連続 $v_i > 1.4 v_0$ |
| 7 | 過負荷による速度低下 | 停警表 | 2回連続 $v_i < 0.5 v_0$ |
| 8 | 車両制御不可 | 停警表 | 機関回転2,000rpm以下 |
| 9 | 操舵モータ過負荷 | 停警表 | 車両制御コントローラから返信無し 操舵モータ制御電流大 |

*表：異常内容と対応をディスプレイに表示

*停：走行（状況により作業も）停止

*警：パトライトの点滅及びホーンにより警報

*自：自動復帰まで待機

** v_i ：XNAVによる位置データ (x_i, y_i) とひとつ前のデータ (x_{i-1}, y_{i-1}) から算出された走行速度

** v_0 ：そのときの作業速度段における機関定格回転時の標準速度

は自己診断機能の制御モード設定の項と同様である。

2) 位置情報異常 1

XNAVのレーザビームが何らかの事情により遮蔽されたり、XNAV基準局情報が短期間遮断されるような軽微な異常に対応するものである。2秒以上新たな位置情報が得られないときにロボットを一旦停止させ、その後30秒間位置情報の取得を待ち、再度位置情報が受信された場合は自動的に無人作業に復帰する。30秒間を経過しても再受信されない場合は位置情報異常 2 に移行する。

3) 位置情報異常 2

前記2)の場合、得られた位置情報がティーチングデータ $(x_0, y_0) \sim (x_7, y_7)$ により算出される圃場区画領域の外へ出ている場合、及び走行速度が異常に速い（位置の変化が想定される走行速度に対して異常に大きい）場合、すなわち $v_i > 2.1 v_0$ となったときに異常時と認識されるものである。

4) すべりによる走行異常

$v_i < 0.15 v_0$ となったときにすべりと認識される。

5) ダッシングなどによる走行異常

$v_i > 1.4v_0$ となる状態が、連続した2回の位置情報検出時に発生した場合にダッシングと認識される。

6) 速度低下

$v_i < 0.5 v_0$ となる状態が連続した2回の位置情報検出時に発生した場合に異常と認識される。

7) 過負荷による速度低下

作業実行中はフルスロットル（定格機関回転2,600～2,800rpm）で運転されるように制御アルゴリズムが作られていることを前提に、オルタネータ（発電機）の回転パルス信号から算出される機関回転が2,000rpm以下になったときに過負荷と認識される。

8) 車両制御不可

車両制御コントローラがダウンした場合を想定したのもで、メインコントローラからの制御命令に対して応答が無かった場合を異常としている。

9) 操舵モータ過負荷

路面状況などにより操舵力が増しても操舵モータを焼損させないことを意図したもので、操舵モータへの制御電流が規定値を超えた場合を異常としている。

10) 異常状態の解消、復帰

異常状態の解消、復帰は、オペレータが車両に乗って各部をチェックし、あるいは各部の調整を行い、もしくは正しい位置へ車両を移動させたのちに、キーボードを通じてコントローラに無人作業への復帰を要求することによって行われる。コントローラはこの要求に対して、異常状態が解消されているか否かを再確認し、依然異常な状態が続く場合はその旨をホーンによって警報するとともに内容を再度ディスプレイに表示する。異常がなければ「数秒後に無人走行・作業を再開する。キー入力終了後に車両から離れよ。」というメッセージを表示して、数秒後に車両位置 (x_i, y_i) 及び進行方位 ϕ_i を検出して無人作業を再開すべき状況や状態を判断・認識し、その状況に適合するように車両各部の設定を変更して、無人作業を継続

する。なお、車両がすべり状態や区画外であったりした場合は車両を移動させることが必要であり、オペレータは自動制御モード下における任意の手動運転が可能であり、正常な作業を期待できる位置まで移動させたのちに復帰動作にはいるようになっている。

4.3.3.3 その他

圃場条件、もしくは圃場の状況に柔軟に対応するために以下のように作業方法を変更するオプションを用意した。

- 1) 往復作業のときの作業重複幅を各行程均等に設定せず、4.3.2.2項の(4.3-3)式を

$$\Delta_d = (w - \Delta w) \quad (4.3-61)$$

に固定し、 n 行程目の作業幅を、 $(A - (n-1)(w - \Delta w))$ とする。

- 2) 周り作業の最外周はマニュアル運転により行う。
- 3) 往復作業、もしくは周り作業のみを実行する。

また、作業ソフトの開発にあたっては、ルーチン毎、モジュール毎の実行が行えるようにし、開発効率の向上を図った。

4.3.4 作業の実行

これまでに経路計画，制御システム，支援システム等の方法を記述してきたが，これらは全て，アルゴリズム設計・プログラム記述と圃場における動作確認を交互に繰り返し，ゲインなど細部の調整を行った。以下には，ほぼ最終的な段階における作業実行状態を記すものとする。試験には，XNAVシステムを搭載したROBOTRAを供試し，基準局と車両＝移動局間のデータ伝送にはスペクトラム拡散方式の通信モデム（株クラリオン製）を使用した。また，試験を行った際のROBOTRA各部のディメンジョンは表 4.3-3 に示す。

表 4.3-3 試験時のROBOTRA
各部のディメンジョン
Table 4.3-3 Dimensions of ROBOTRA
at the field test

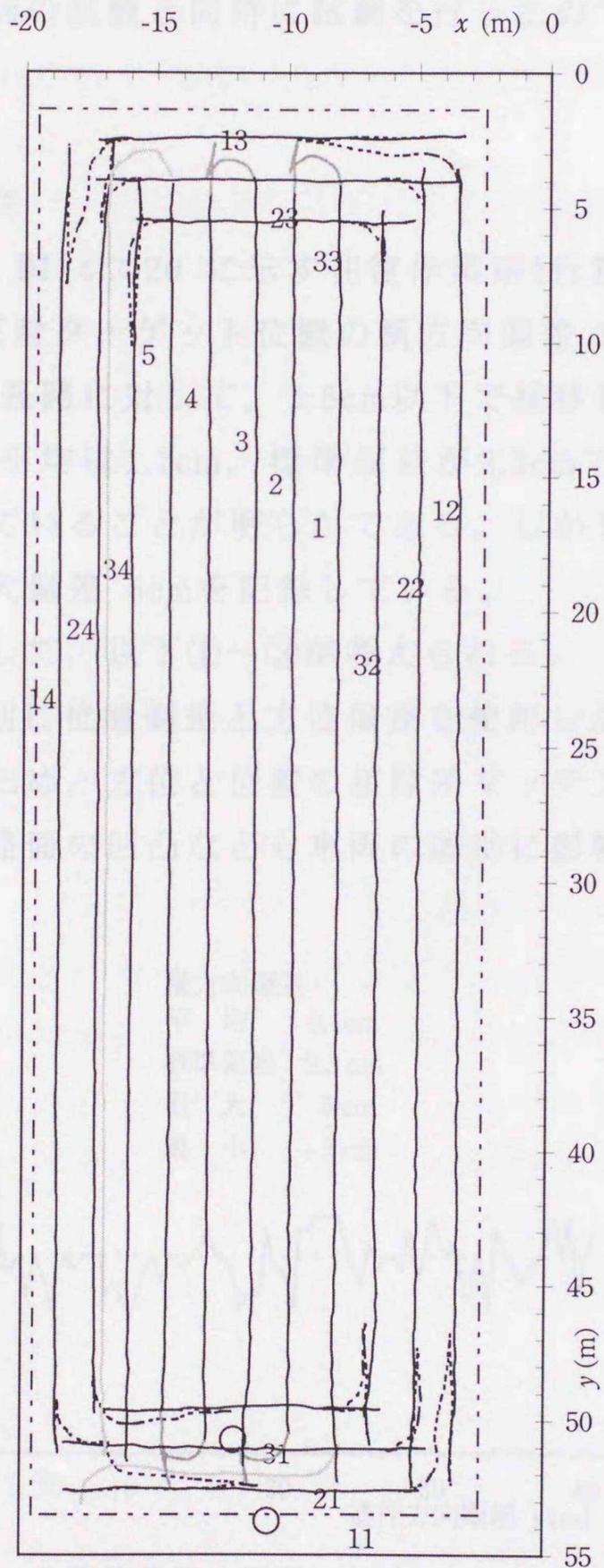
| | |
|-------------------------------|----------|
| 車両本体 | |
| ホイールベース: l_{wb} | 1,750 mm |
| 前輪トレッド: b_f | 1,200 mm |
| 後輪トレッド: b_r | 1,100 mm |
| 標識位置: $l_{rr} - l_{rm}$ | 0 mm |
| ロータリ耕耘機 | |
| 作業機位置 : l_{rr} (後車軸中心後方) | 1,000 mm |
| 作業幅 : w | 1,700 mm |

4.3.4.1 経路計画

走行実験は， x 方向距離 17m， y 方向距離 52mの生研機構内矩形ほ場区画にて行い，ティーチング走行後に作業速度約0.50 m/sで無人ロータリ耕うん作業を実行させた。そのときの作業軌跡は図 4.3-20 のとおりである。本図を含めて，ことわりがない限り全ての走行軌跡は，作業時にXNAVによって観測された位置情報の記録を試験後にプロットしたものである。

空走1，往復作業行程とともに，空走2，周り作業3周の走行経路が概ね計画通りに生成されている。また，周り作業の外周では区画周辺まで適正に走行経路を生成しており，考案した作業計画法は所要の機能を有していると判断された。

- 空走モジュール1,2
- 直進ルーチン
- 180°旋回ルーチン+幅寄せルーチン
- 90°旋回ルーチン+幅寄せルーチン
- - - - 圃場区画



数字は行程番号

図 4.3-20 無人作業試験の作業軌跡図
Fig. 4.3-20 The trace of autonomous operation test

4.3.4.2 直進制御

1) 試験方法

4.3.4.1経路計画の試験と同時に試験を行ったので条件は同様である。

2) 結果と考察

図 4.3-21 は、図 4.3-20 に示す往復作業第1行程の直進作業時におけるXNAV光反射ターゲット位置の横方向偏差 Δr を示したものである。 Δr は目標経路に対して、 $\pm 5\text{cm}$ 以下で推移しており、横方向偏差の絶対値の平均は 1.7cm 、標準偏差が 2.3cm であって、制御系が適切に機能していることが明らかである。しかし、直進行程の開始点付近では最大偏差 6cm を記録している。

誤差の原因として、以下①～③が考えられる。

- ① 操舵制御則に位置偏差と方位偏差を使用した(4.3-35)式を使用しているため、方位と位置の座標系マッチングの精度が考えられ、かつ路面の凹凸なども車両の運動に影響しているものと

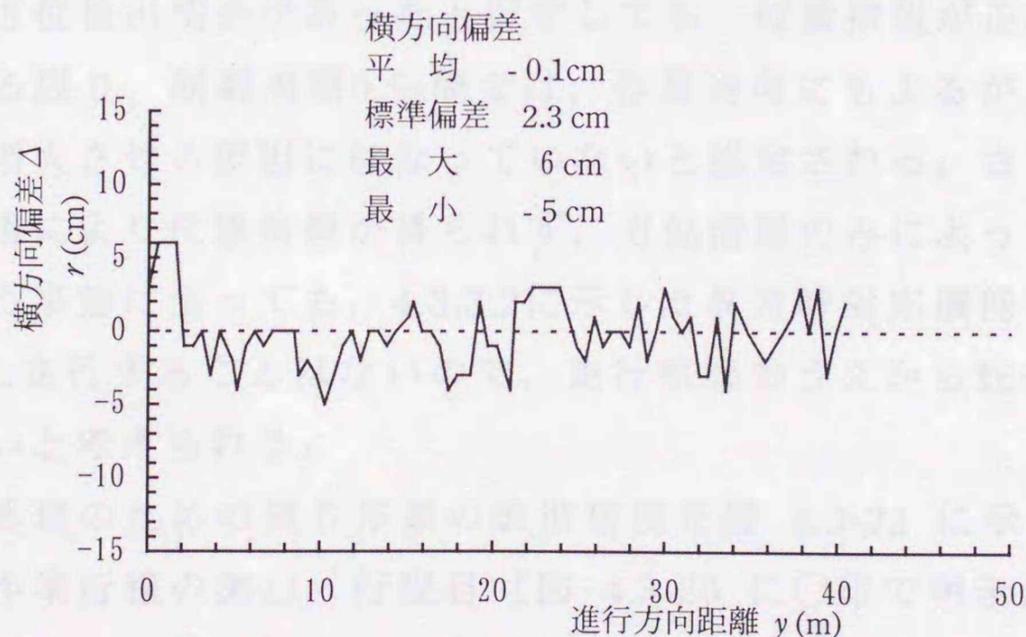


図 4.3-21 往復作業第 1行程におけるXNAV反射標識の目標経路に対する横方向偏差

Fig. 4.3-21 Lateral deviations of the light reflecting pole on the vehicle to the target path of the 1st. stroke in switchback operation

推定される。座標系マッチング精度を上げることは、ティーチング走行の精度を向上させることと等価であり、このことはオペレータの運転技量に依存する。したがって、さらにロボットを高精度に走行させるためには、TMSとXNAVの座標マッチングが逐次可能になるXNAVとTMSのセンサフュージョンを導入する必要がある。

② この軌跡データはXNAVの基準局からの観測値をそのまま記録したものであり、車両がロール・ピッチした際の車両上のXNAV光反射標識位置（地上約2.1m）と地上面における後車軸中心位置とのズレを補正していないために、ローリング、ピッチングに伴って計測値に誤差を生じた可能性がある。特に行程の始端、終端部では180° 旋回によって路面の凹凸が激しくなっているため、その可能性は高い。

③ 直進行程の開始点における誤差には、その直前に行われた目標経路への位置合せ（幅寄せルーチン）の精度が不十分であったことに起因する誤差分が含まれていると考えられる。

この他に、TMSシステムそのものの方位検出誤差も横方向偏差の要因となりうる。しかし、方位データは記録していないので、仮に数度の方位検出誤差があったと仮定しても、位置情報が正確に得られている限り、制御周期0.5s間では、作業速度にもよるが、横方向偏差を増大させる要因にはなっていないと推定される。さらに何らかの事情により位置情報が得られず、方位情報のみによって直進制御を行う事態に至っても、4.3.3.2に示した異常時対応機能により、数m以上走行することはないので、走行軌跡のうえから蛇行は観測されないと考えられる。

枕地処理のための周り作業の直進精度を図 4.3-22 に示した。a) は周り作業行程の第11 行程目（図 4.3-20 に○印で明示）にあたる外周走行時の結果であるが、横方向偏差の変動が大きい。この変動は、主に前記②に起因するものと推察され、目視による耕うん作業跡の観察でもこの変動はより穏やかなものであった。また、行程

の始端において変動はより激しいものとなっているが、この初期の制御性能は90度旋回後の前進・後進幅寄せルーチンの制御精度によっても影響される。すなわち、前進・後進幅寄せ精度の向上が次行程の作業走行の直進精度に直接影響を及ぼすことから、その高精度化は不可欠である。

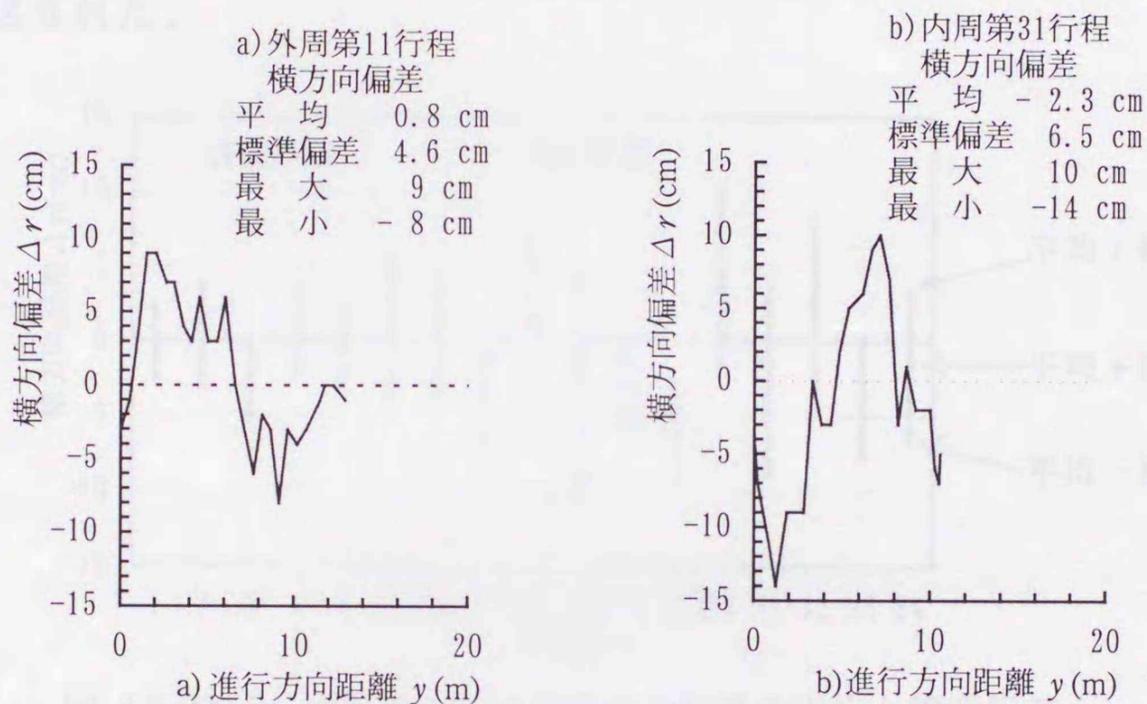


図 4.3-22 周り作業第 11及び31行程におけるXNAV反射標識の目標経路に対する横方向偏差
Fig. 4.3-22 Lateral deviations of the light reflecting pole on the vehicle to the target path of the 11th and 13th stroke in roundabout operation

第 31行程目（図__に○印で明示）の内周耕うん時の直進精度を図4.3-22 b)に示した。外周同様、走行中の横方向偏差は他の行程と比べて大きい。この行程は往復行程の旋回中心付近にあたり、走行路面が片ブレーキによるすべりによって乱され、轍のもっとも激しく残っているところである。このような凹凸を有する路面走行のために、ロボットのロール・ピッチ角が増大し、前記②に示した理由によって、横方向偏差が激しく変動したものと推察される。さらに、方位情報に基づく直進制御に関してもロール・ピッチ角が大きく変動する状況では、TMSに傾斜角補正を行ってはいないものの傾斜角センサの動特性も絡んで変動を増大させていることが推定される

122)。

図 4.3-23 に全17行程の横方向偏差の平均・標準偏差を示した。往復作業では、平均のばらつきが $\pm 3\text{cm}$ 以下で再現されており、周り作業領域でも平均のばらつきが $\pm 8\text{cm}$ 以下で再現されている。この直進精度をさらに向上させるには、(4.3-35)式中の制御ゲイン α 、 β 、 r の最適化が必要である。また、内周処理時の直進精度の低下も再認された。

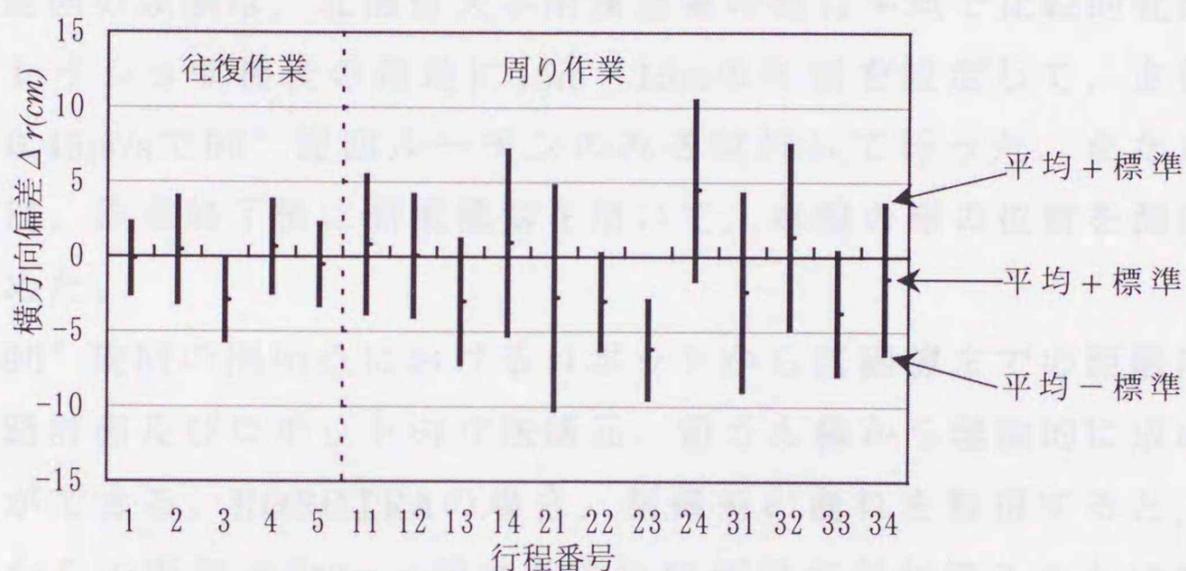


図 4.3-23 全 17行程における横方向偏差の平均と標準偏差
Fig. 4.3-23 Average and standard deviations of lateral direction of the all 17 strokes

4.3.4.3 180° 旋回

1) 試験方法

4.3.4.1経路計画の試験と同時に試験を行ったので条件は同様である。

2) 結果と考察

180° 旋回時の走行軌跡は図4.3-20 に示した通りである。180° 旋回は、終了時に x の位置が次行程の目標経路 $r_d(j)$ に一致していること、すなわち180° 旋回終了後に行われる幅寄せの際の目標幅寄せ量 Δx が0であることが理想である。試験時に計4回行われた180° 旋回における Δx の値は、最大35cm、最小16cm、平均24cmで

あり，路面状況による旋回半径の変動などを考慮すれば満足できる結果である。また，直進行程始端 qp_i までの距離，すなわち前進幅寄せを行う距離は 2m 前後残されており，ほぼ十分であった。

4.3.4.4 90° 旋回

1) 外周90° 旋回制御

① 試験方法

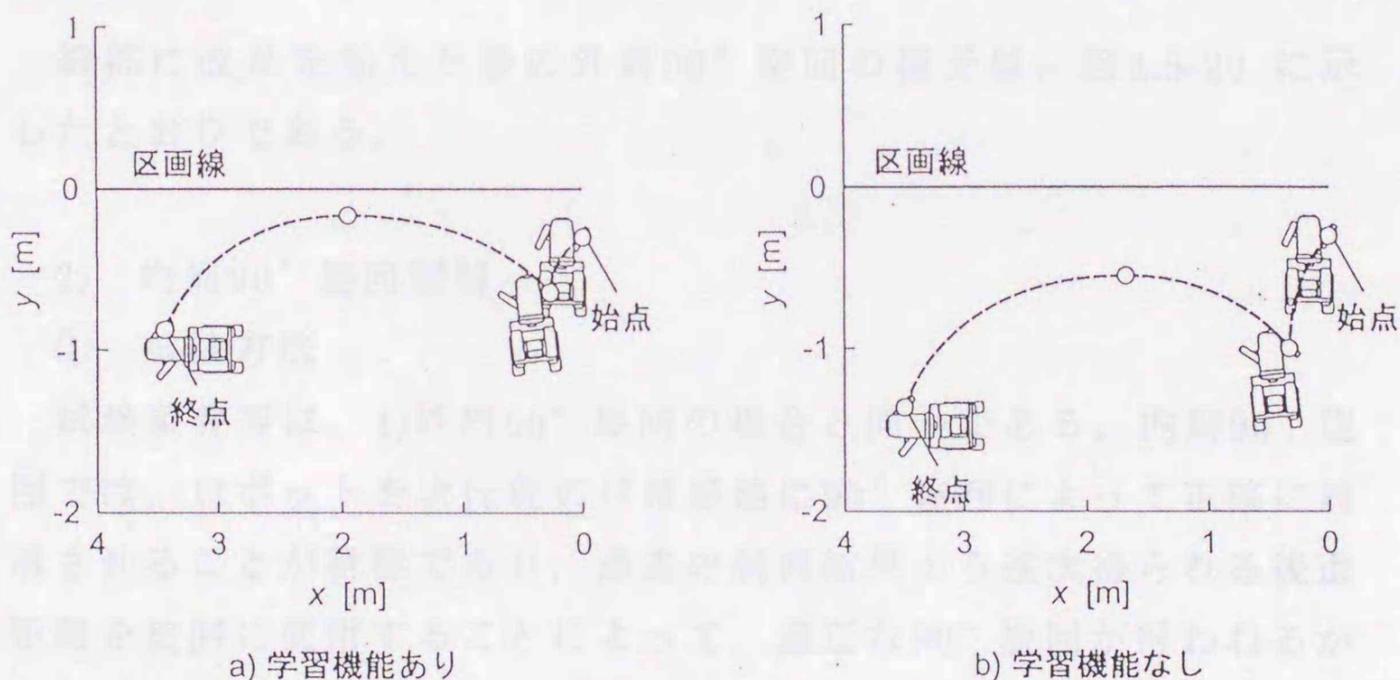
90° 旋回の試験は，北海道大学附属農場の概ね平坦で比較的乾燥したバレイショ収穫後の畑地に 15m×15m の区画を設定して，走行速度約 0.45m/s で 90° 旋回ルーチンのみを実行して行った。また走行軌跡は，作業終了後に測量機器を用いて，車輪の轍の位置を測量して求めた。

外周90° 旋回の開始点におけるロボットから区画線までの距離は作業経路計画及びロボットの寸法諸元，耕うん幅から理論的に求めることができる。ROBOTRA の場合，制御系の遅れを無視すると，前車軸からの距離で約 30cm 程度前方に区画線が存在することになる。そこで，試験では前車軸から区画線までの距離が 30cm になるように設定して，外周90° 旋回の走行試験を行った。本試験の狙いは，学習機能により前進旋回半径，後進旋回半径が適正に取得でき，取得後は区画はみ出しのない後進旋回角を算出して，適正な旋回が行われるかを調べることにあり，旋回半径を学習させなかった場合との制御成績の比較を行った。試験に使用した初期舵角制御値は，後進旋回時が 30°，前進旋回時は 50° である。

② 結果と考察

図4.3-24は周り作業外周 2 行程目を想定した 90° 旋回制御時の右前輪軌跡を示したものであり，学習機能を付与した場合と付与しなかった場合について調べた。図中，4 点の○印は始点，後進停止位置， y 方向の最大通過位置，そして終点位置である。本アルゴリズムにおいて，両者とも区画はみ出しのない 90° 旋回が行われた。しかし，区画線までの余裕は旋回半径の学習機能を用いた場合が約

20cmに対して、学習機能無しの場合は50cmに達した。学習機能有りは前述したように、前行程で取得された後進と前進の旋回半径を取得し、その値を使用して右前輪が区画をはみ出さない最小の後進旋回角を算出するものである。したがって、20cm程度の余裕で90°旋回できたことから、本制御アルゴリズムは所要の目的を達成していると判定される。一方、学習機能無しの場合は、ROBOTRAのディメンジョンから算出された固定的な旋回半径を使用して、後進旋回角を計算しているが、この軌跡結果は、使用した旋回半径が実際の旋回半径と異なっていたことを意味しており、路面状態によって変化する旋回半径を、固定的に与えることが適当でないことを証明している。



注) 図中のトラクタの大きさは、縮尺によらない。

図 4.3-24 外周90° 旋回制御時の右前輪軌跡
 Fig. 4.3-24 Traces of the right-hand front wheel at 90° turning of outermost roundabout operation

表4.3-4は外周全4行程の90°旋回時の右前輪の区画はみ出し量を調べたものである。全行程を通して学習機能を付与した場合は、区画線からの余裕が20cm程度で推移しているのに対して、学習機能無しの場合は55cm程度であった。この結果は、供試ほ場区画ではたまたま土壌条件がほぼ均一であったことから、旋回半径に差異

が生じなかったことを意味している。したがって、対象となるほ場の路面特性が空間的に均一であれば、作業中に1度、旋回半径を取得すれば全旋回を通して旋回精度を維持できる。しかしながら、ほ場区画内で路面条件の違いが無視できない場合には、空間的パラメータを導入して、旋回半径を逐次取得できるアルゴリズムが有効になる。

表 4.3-4 外周90° 旋回制御時における学習機能の効果
Table 4.3-4 Effects of the self-learning function
at 90° turning of the outermost roundabout operation

| 区 画 はみ出し量(m) | 行程番号 | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 学習機能あり | -0.28 | -0.17 | -0.19 | -0.25 |
| 学習機能なし | -0.66 | -0.55 | -0.58 | -0.49 |

細部に改良を加えた後の外周90° 旋回の様子は、図4.3-20 に示したとおりである。

2) 内周90° 旋回制御

① 試験方法

試験条件等は、1)外周90° 旋回の場合と同一である。内周90° 旋回では、ロボットを次行程の目標経路に90° 旋回によって正確に誘導させることが目標であり、過去の制御結果から逐次得られる後進距離を旋回に使用することによって、適正な90° 旋回が行われるかどうかを評価した。本試験でも外周90° 旋回と同様、固定的な後進距離を与えた走行と比較を行った。なお、前進旋回時の初期舵角制御値は外周制御と同じ50° である。

② 結果と考察

表4.3-5に内周90° 旋回制御時の走行結果を示した。周り作業内周2行程目の旋回を想定して、学習機能を付与した場合と付与しなかった場合について調べた。本制御アルゴリズムは90° 旋回によって、次行程の目標経路にロボットを誘導することが目的であるので、全4行程について旋回終了後の目標経路との偏差を比較した。第1

表 4.3-5 内周90° 旋回制御時における学習機能の効果
 Table 4.3-5 Effects of the self-learning function
 at 90° turning of the inside roundabout operation

| 次行程目標経路 との差(m) | 行程番号 | | | |
|-------------------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 学習機能あり | 0.20 | 0.02 | 0.01 | 0.13 |
| 学習機能なし | 0.18 | 0.18 | 0.01 | 0.22 |

行程の初期後進距離は、学習機能有り、無し両者に対して、予備試験で取得した同一の値を設定している。そのため、目標経路との偏差は両者とも20cm程度を示した。しかし、第2行程は学習機能有りは第1行程で得られた制御結果を使用して、後進距離を算出しているため、目標経路にほぼ正確に誘導できた。一方、学習機能無しは全ての後進距離に初期値を使用しているために、第1行程と同程度の偏差を示した。また、路面条件が他の行程と異なっていたため、4行程目は学習機能有り、無し両者に対して偏差は増加しているが、学習機能有りの方が10cm程度精度が良く、次行程の目標経路に誘導できている。ここで、第3行程目の学習機能無しの偏差が激減している理由は、学習機能有り、無しで試験を行った圃場の路面状態が異なり、初期値として設定した後進距離が偶然最適値であったからと考えられる。以上の結果から、考案した内周90° 旋回制御のアルゴリズムは適正であると推定された。

細部に改良を加えた後の内周90° 旋回の様子は、図 4.3-20 に示したとおりである。

4.3.4.5 幅寄せ

1) 試験方法

基本的な試験条件などは、4.3.4.4, 1)外周90° 旋回の場合と同一である。幅寄せ制御の試験では、内周と外周における90° 旋回後の幅寄せを開始するロボットの位置を想定して試験条件を設定した。幅寄せ量は供試耕うん機の耕うん幅170cmと同程度の最大150cm, 及び100cm, 50cmに設定した。また、後進可能距離はROBOTRAの

場合で理論上内周時が約340cm, 外周時が約180cmになることから, この値を採用した。すなわち, 走行試験は幅寄せ量 Δx を50, 100, 150cmの3水準, 後進可能距離 Δy を180, 340cmの2水準とし, 計6水準について行った。

走行軌跡は走行中の右前輪と左後輪の通過地点を次々マーキングし, 試験後に測量装置を用いてマーキング位置を測定して求めた。

2) 結果と考察

内周90° 旋回後の幅寄せを想定した幅寄せ量 $\Delta x=100\text{cm}$, 後進可

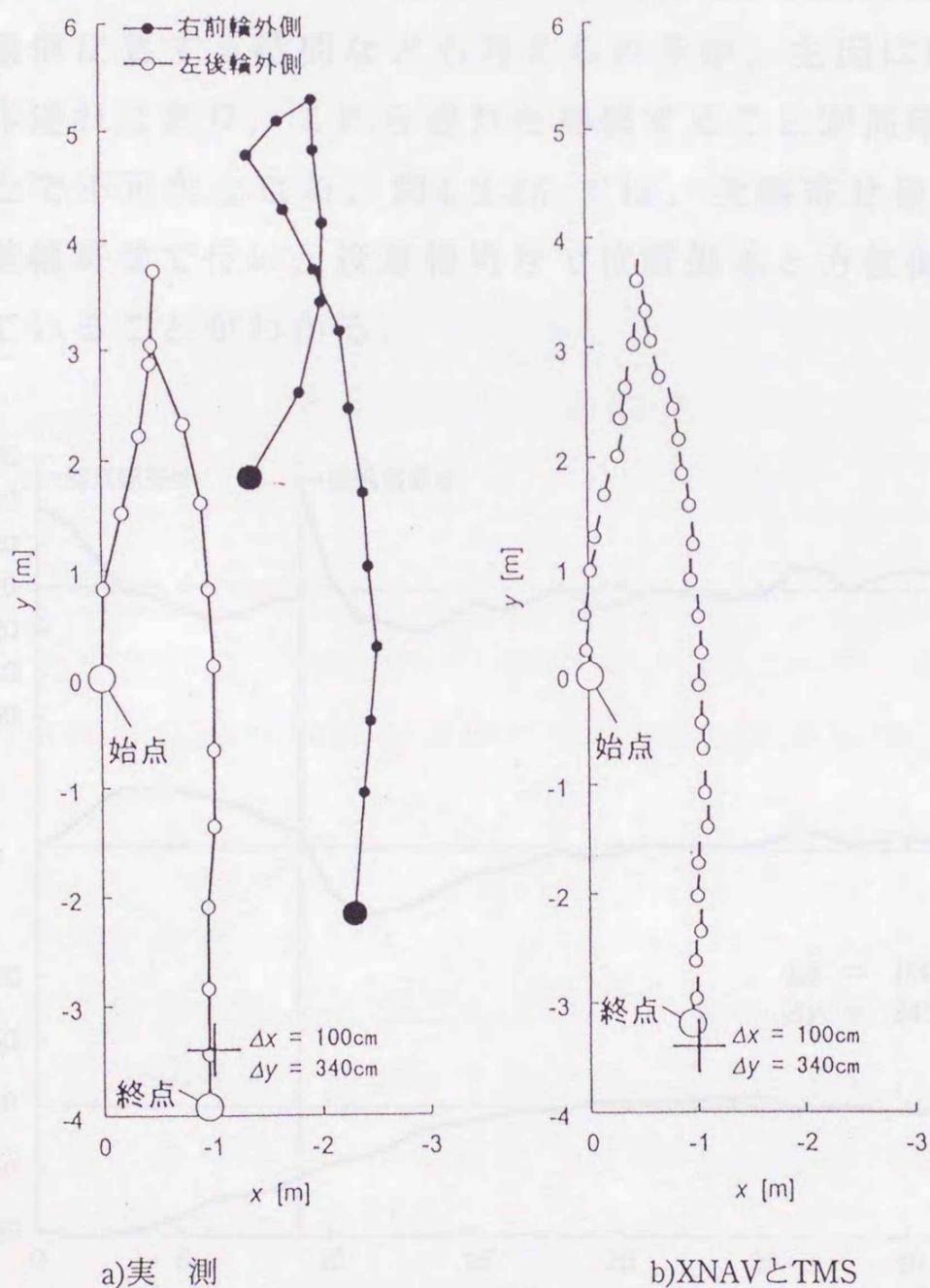


図 4.3-25 幅寄せ量 $\Delta x=100\text{cm}$, 後進可能距離 $\Delta y=340\text{cm}$ 時の幅寄せ軌跡
 Fig. 4.3-25 Traces of the lateral movement in case of sideways movement distance $\Delta x=100\text{cm}$ and movable backward distance $\Delta y=340\text{cm}$

能距離 $\Delta y=340\text{cm}$ 時の幅寄せ制御結果を図4.3-25に，そのときの制御過程を図4.3-26に示した。図4.3-26-a)は走行中の右前輪外側と左後輪外側の走行軌跡であり，b)はXNAVとTMSからロボットが取得した位置と方位を使用して，軌跡を表示したものである。a)は左後輪の初期位置を原点に変換して表示し，図中の十字が左後輪の幅寄せ目標位置である。目標位置に対して， x 方向誤差は4cm，方位誤差は 0.5° を示しており，横方向の幅寄せは高精度に行われた。しかしながら， y 方向の誤差が52cmにも及び，後進距離が設定距離よりも大きくなった。この制御遅れの原因は，XNAVの処理時間，データ通信に要する時間なども考えられるが，主因はROBOTRAの制御動作遅れにあり，これら遅れを補償することが高精度に位置決めする上で不可欠となる。図4.3-26では，全幅寄せ量の半分の50cmを前進幅寄せで行い，後進幅寄せで位置偏差と方位偏差が適正に収束していることがわかる。

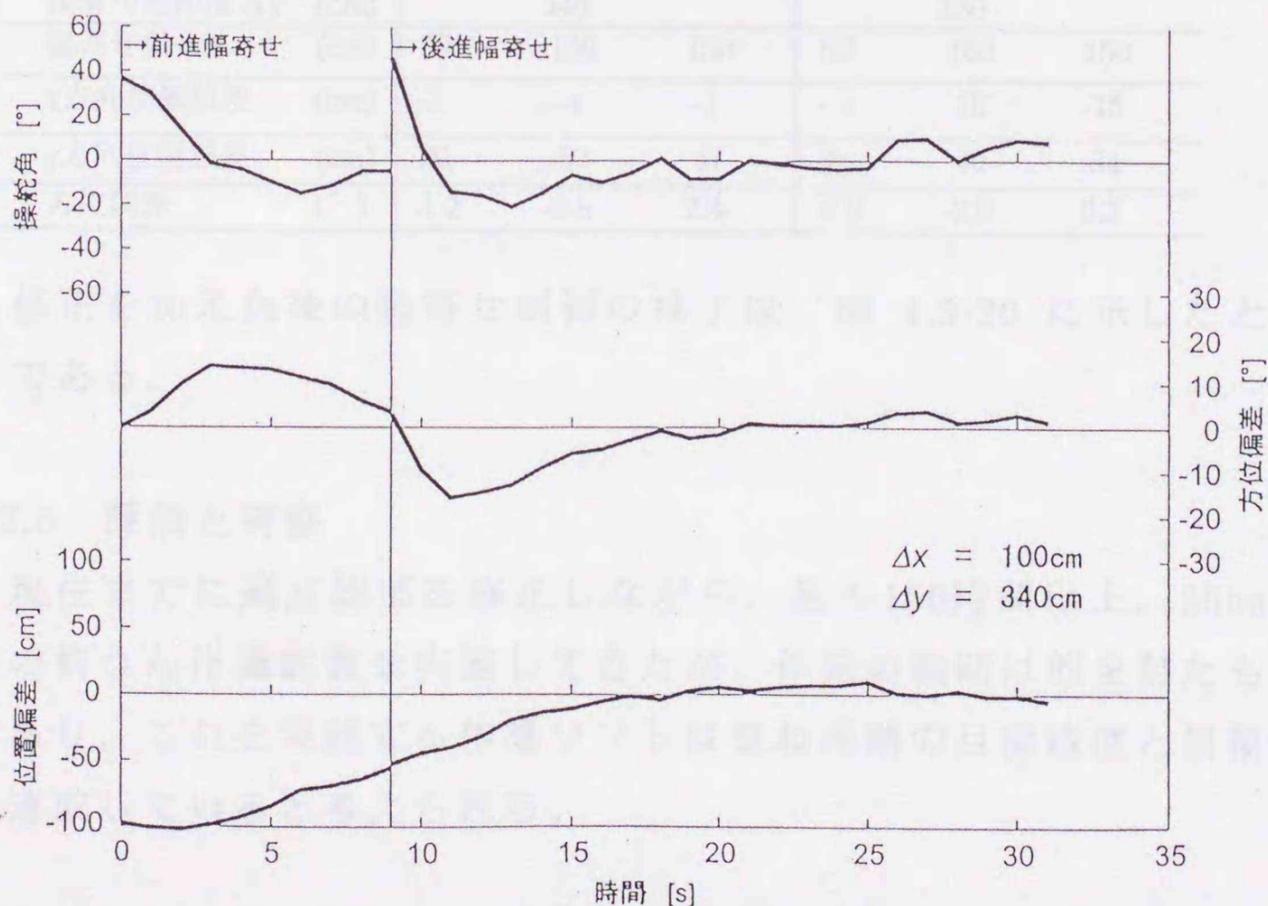


図 4.3-26 幅寄せ制御の制御過程
Fig. 4.3-26 Control process of the sideway movement

表4.3-6 は全実験について終端における位置決め精度をまとめたものである。幅寄せ量 $\Delta x=50\text{cm}$ ，後進可能距離 $\Delta y=340\text{cm}$ の条件では後進のみで幅寄せを行い，他の条件では前進幅寄せを併用して位置決めを行った。全ての条件において， y 方向の位置偏差が平均40cm程度と大きく，制御の時間遅れを補償する方策が必要であることが再認できる。さらに，後進可能距離が短く幅寄せ量が増加する，すなわち幅寄せの難度が増大したときの位置決め精度の低下も見られる。したがって，今後幅寄せ精度を向上させるためには，制御遅れを少なくするとともに，ほ場試験を数多く行うことで制御パラメータの最適化を計ることが必要と判断された。その後作業ソフト全体の実験を繰り返すなかで適宜制御パラメータを実証的に修正し，現在は位置決め精度は概ね満足いくものとなっている。

表 4.3-6 前進・後進幅寄せ制御の終端位置の評価
Table 4.3-6 Evaluation of the final points of forward and backward sideway movement control

| 後進可能距離 Δy (cm) | 340 | | | 180 | | |
|------------------------|------|------|-----|-----|------|-----|
| 幅寄せ量 Δx (cm) | 50 | 100 | 150 | 50 | 100 | 150 |
| x方向位置誤差 (cm) | 3 | -4 | -1 | -4 | 18 | -15 |
| y方向位置誤差 (cm) | 26 | 52 | 37 | 45 | 40 | 34 |
| 方位誤差 (°) | -1.2 | -0.5 | 2.4 | 6.9 | -2.0 | 0.3 |

修正を加えた後の幅寄せ制御の様子は，図 4.3-20 に示したとおりである。

4.3.5 評価と考察

現在までに適宜細部を修正しながら，延べ150時間以上，25ha以上の耕うん作業試験を実施してきたが，作業の戦略は的を射たものであり，これを実践する作業ソフトは概ね所期の目標精度と信頼性を達成していると考えられる。

4.4 まとめ

TMSを用いた作業ソフトASRを開発した。ASRによって一応の往

復作業を実行することができたが、路面の状況によって旋回半径が大きく変化するため、作業ピッチが不安定であり、残耕もしくはかなり大きな作業オーバーラップがみられた。旋回位置は概ねそろっているが、すべりやダッシングなどによって旋回位置、すなわち行程の始・終端位置がずれることもあり、そのズレは、航法の原理上その後最終行程まで回復されることはない。与えられた目標方位を維持しながら自律走行を行う本研究の直進制御方法では、0.5m/s程度の走行速度で、走行方位の制御精度は 0.3° 程度であり、この精度は100m走行して約50cm横にずれることを意味している。ASRによる自律作業精度が、各種補正法などの適用によるTMSの高度利用の結果であることは言うまでもないが、以下の事情によってTMSによる走行方位の検出精度をさらに向上させれば、自律走行精度が更に向上するとは断定できない。

- 1) ASRは内界情報に基づくデッドレコニングであって路面条件による車両の横すべりなどには対応が難しい。
- 2) 車両の制御性（特に操舵時間）に限度がある。

TMSによる自律走行は、航法センサシステムが安価でシンプルな点が最大の長所であり、他の航法装置を用いたシステムにおける補完システム、有人運転の際の部分的自動直進制御、といった場面での実用化を期待できる。

XNAVシステムを用いた作業ソフトは、圃場内位置とともに併用したTMSによって車両進行方位が逐次得られることを前提にしている。作業は、ほぼ水平な矩形圃場を前提に一般的な慣行作業の例に準じて、圃場の中央部を往復作業し、枕地部分を含めた圃場周辺を周り作業する方法によって、圃場全面の完全な無人耕うん作業を行うものである。作業ソフトは、タスクプランニング部と走行制御部により構成される。

区画の大きさ・形状は、ある圃場に対して初めの1回、圃場の出入口付近から圃場の区画境界線に沿って1周マニュアル走行を行うティーチングによって取得する。作業の開始にあたっては、ティ

ーチングによって得られた目標方位情報と境界線の位置情報をもとに、目標作業経路の生成、すなわち経路計画を行う。タスクプランニング部は、ティーチングモジュールと経路計画モジュールによって構成される。

車両を制御する走行制御部では、目標作業経路は空走モジュール、往復作業モジュール、周り作業モジュールなどに分割される。さらに各々のモジュールは、

- 1) 目標作業経路を維持するように直進制御を行う直進制御ルーチン、
- 2) 往復作業行程の終端で行う 180° 旋回ルーチン、
- 3) 作業行程の開始端で車両横方向の位置合せを行うための幅寄せルーチン、
- 4) 周り作業の最外周で圃場区画からはみ出さないように 90° 旋回を行う外周 90° 旋回ルーチン、
- 5) 周り作業の最外周以外で既耕うん領域を極力踏み付けないように 90° 旋回を行う内周 90° 旋回ルーチン、

によって構成される。直進制御ルーチンで作業を実行する際にはさらに作業機制御が実行されるが、その他のルーチンは作業は行わず単に車両の移動制御のみを行う。ソフトの構築にあたっては以下の点を考慮した点が特徴である。

- 1) XNAVによる位置情報取得の周期0.5秒の間をさらに分割してデッドレコニングにより位置の推定を行ってさらに精密な制御を実行している。
- 2) 農用車両の場合、車両の操舵角と車両の運動は路面状況の変動によって一定ではないので、初めに行われる旋回動作時点に制御量と運動軌跡の関係を学習し、以後はこの学習結果に基づいて適正な制御量を得るようにしている。

耕うんロボットが無人で作業を行う場合、センサ、制御システム、アクチュエータ、車両自体や作業機など各部に発生する故障やトラブルは、オペレータが搭乗していないため早期発見が困難である。

無人作業ではこれらの故障やトラブルに起因した暴走事故が懸念されるばかりでなく、早期発見が困難なことから些細な故障が、連鎖的に他の故障を誘発して重大な故障に発展する可能性もある。こういったトラブルや故障を早期に発見するために、作業ソフト本体に、自己診断、異常時対応の2種の支援システムを組み込んでいる。各々の機能は以下のとおりである。

1) 自己診断機能は、各センサ及びアクチュエータを作動させてその機能確認を行い、かつ無人作業のための初期設定の適否を内界センサによって確認するものである。自己診断は作業ソフトの初期設定を終えた時点で自動的に実行される。不具合箇所が発見された場合は、アラーム音とディスプレイでその内容をオペレータに知らせる。この場合、オペレータが点検・再設定を行った後に再度自己診断を行う。

2) 異常時対応機能は、無人作業実行中に得られた航法データ、内界センサの検出値をもとに、異常・トラブルを発見するものであり、作業中は常時機能している。航法システムの異常は、位置情報の取得状態、位置の変動から判別され、すべり・ダッキング・過負荷などのトラブルは位置情報から算出された速度によって判別される。異常が発生した場合は、アラーム音・パトライト・ディスプレイによってオペレータに報知し、状況によって作業を続行しながら正常状態への復帰を待ち、あるいは自動停止してオペレータの対応を待つ。オペレータの対応が必要な場合は、対応後に再び作業を続行する。

これらXNAVを用いた作業ソフトは、圃場で度重なる試験と改良を繰り返した結果、ほぼ慣行の有人作業と同等の作業を実行することができるようになり、所期の目標を達成した。

第5章 耕うんロボットの評価

4章までに記したシステムを、実際に耕作を行っている圃場に供試して、実用化しうる能力を有しているかについて評価を行うとともに、改良点、今後の方向などについても併せて総合的に考察する。

5.1 評価方法¹³⁰⁾

原動機としてのトラクタ、作業機としてのロータリ耕うん機の試験方法には、一般的な手法、評価用語などが存在するが、無人で作業を行った場合の効果や精度を評価するには不十分である。耕うんロボットなどの無人作業機械では、従来人が行っていた判断やその能力に相当する部分、すなわち無人作業に固有の能力について評価する必要がある。また当面は、慣行作業との比較の上で評価することも必要である。例えば「能率」は、従来機械が単位時間あたりに処理しうる面積と、作業者が単位時間あたりに処理しうる面積、という両様の意味合いをもっていたが、無人作業の場合はこれを分けて評価しなければ省力効果を表現できない。作業精度についても従来は、行程間の残耕や直進性などはオペレータの技量によるものとして評価の対象外とされる傾向にあったが、これらは車両制御の能力そのものなのでむしろ重点的に試験・評価を実施しなければならない。そこで新たに圃場作業車両の無人作業評価方法を策定した。

以下に示す評価方法は、単に本研究のためだけではなく、無人作業一般に広く適用可能なものとなるように心がけた。方法の策定にあたっては、生研機構評価試験部及び評価試験を委託した北海道大学農学部寺尾研究室、山形県農業試験場機械土木部に助言を頂いた。試験方法は、作業能率・精度などを評価する作業性能試験、機器の設置性や初期設定の難易、安全性、異常時におけるオペレータの対応の難易などを評価する取扱い性試験、機器のトラブルや圃場条件の変動などに対して安定的に作業を続行する能力及び耐環境性などを評価する信頼性試験によって構成されている。

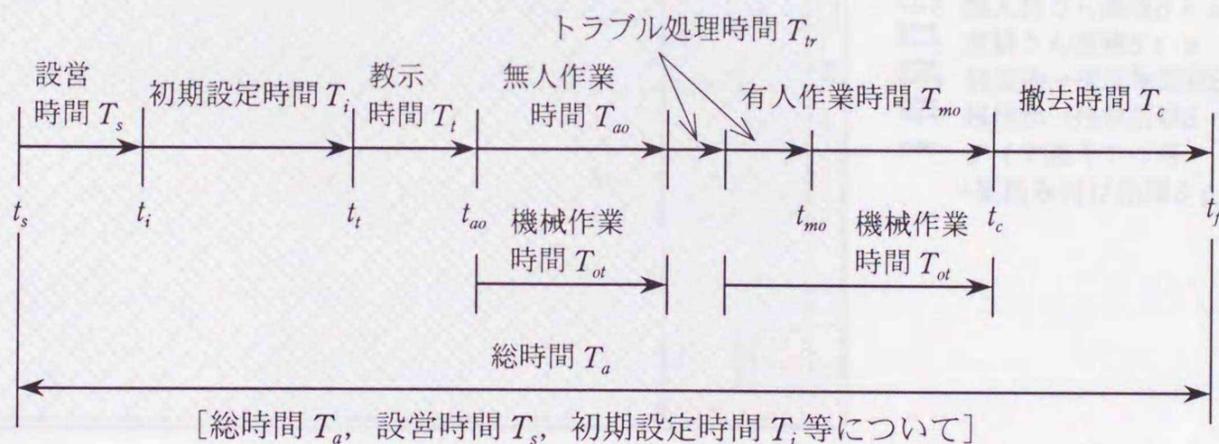
5.1.1 作業性能試験

作業性能試験及びその評価で使用する用語は一括して表 5.1-1 に、その補足説明図を図 5.1-1~2 に示す。

5.1.1.1 試験の条件

試験は、原則として以下の条件によるものとした。

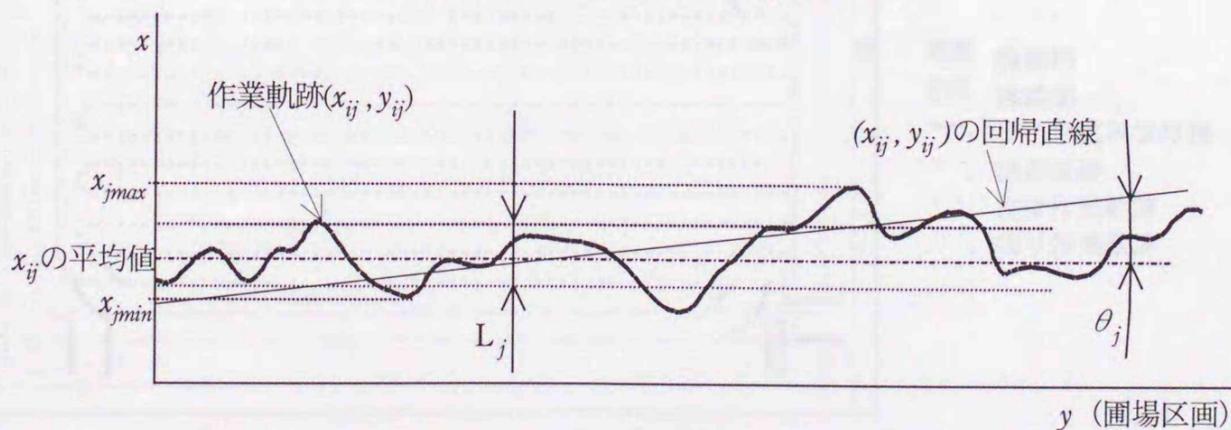
- 1) 一筆の区画全面を無人作業，もしくは必要に応じて一部の有人作業の組合わせで全て耕うんする。畦畔際や構造物に接する部分の未耕うん幅は 30cm 以下を目標とし，これ以上の部分は残耕として扱う。
- 2) 試験圃場は初めて無人耕うんするのでは無いことを前提とす



行程 $j: 1 \sim n$ 直進性 $L_s = (\sum L_j) / n$

直進の振れ幅 $L_a = \{ \sum (x_{jmax} - x_{jmin}) \} / n$

直進の平行度 $\theta = \{ \sum (\text{abs } \theta_j) \} / n$



[直進性 L_s , 直進の平均振れ幅 L_a , 直進の平行度 L_p について]

図 5.1-1 作業性能試験に関する用語の補足説明図
Fig. 5.1-1 Illustrations for terminologies using in performance tests

る。すなわち毎回ティーチングを要するシステム以外は事前にティーチングを行ってあるものとする。

- 3) 作業性能を試験する際のオペレータは1名とし、トラブルに際してもこの1名が対応する。
- 4) 無人耕うん中はオペレータが適宜監視するものとする。
- 5) 供試圃場区画はほぼ水平で作業に適した区画とし、なるべく構造物面積が0となるように、すなわち圃場総面積 S_a = 耕うん可能面積 S_u となるように設定する。
- 6) 作業の軌跡は、精密な測量機器を用いて時間軸とともに数秒以下の計測周期で記録する。圃場区画、耕うん面積、残耕面積等も同様に、精密な測量機器によって記録する。

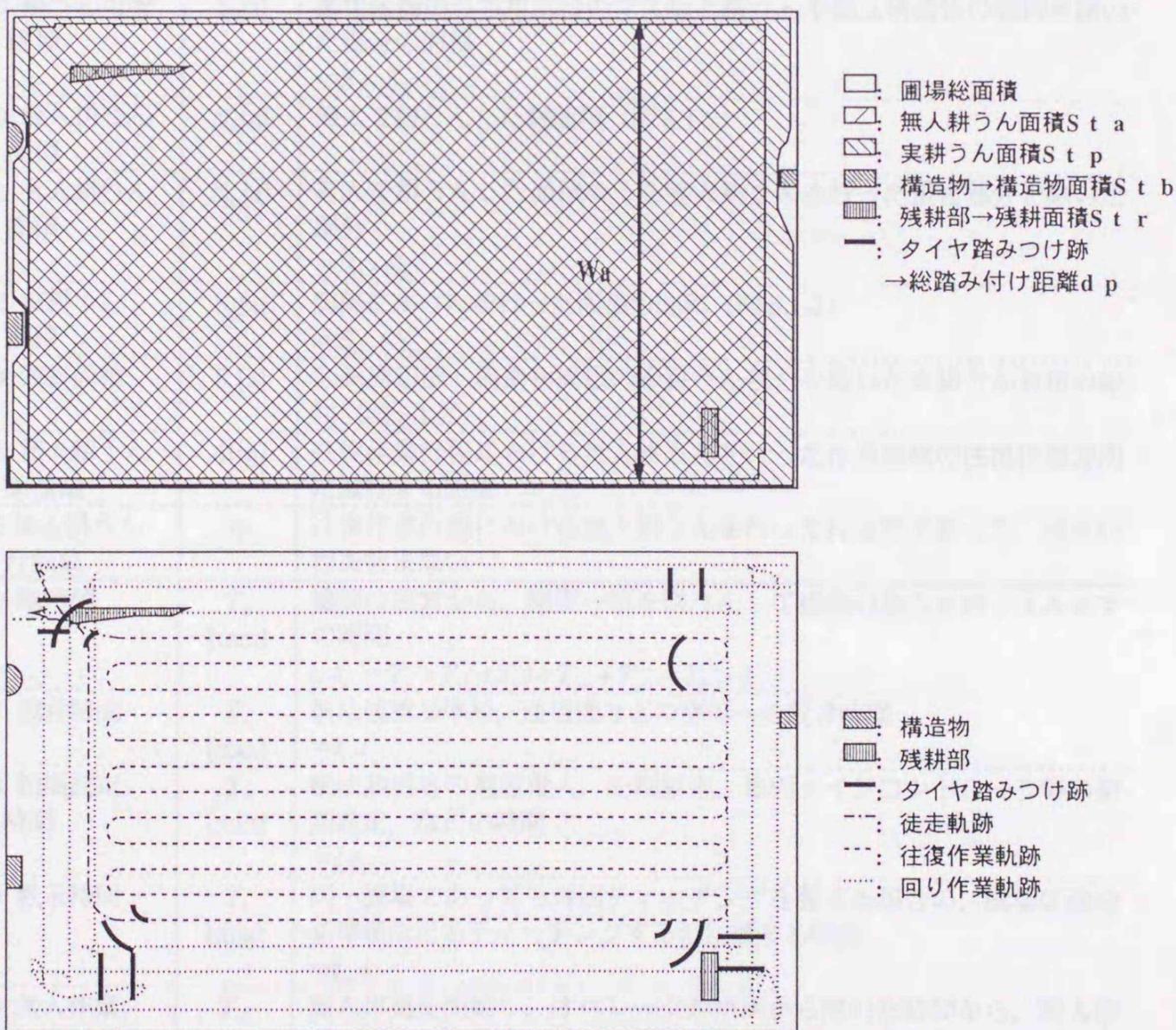


図 5.1-2 作業性能試験に各種面積，軌跡図等の例
 Fig. 5.1-2 Figures of the defined area and the diagrams of the trace using in performance tests

表 5.1-1 作業性能試験の用語

Table 5.1-1 Terminologies using in performance tests

| No. 用語 | 記号 | 定義・算出式等 |
|--------------------|-------------------|--|
| 1 圃場条件 | | 圃場区画図, 耕うんする部分の土質, 土壌硬度, 乾湿状況, 草生状況, 残さ状況, 圃場の凹凸などの圃場の条件 |
| 2 圃場の斜度・凹凸 | | 圃場がほぼ水平と認められないときに計測する圃場の斜度, もしくは凹凸の様子 |
| 3 機械条件 | | 速度段, パーツロットル機関回転数, PTO 速度段, 倍速機能の有無・種類, 耕うん部自動制御機能の有無・種類, 片ブレーキの使用状況などの機械の条件 |
| 4 作業速度 | v [m/s] | 耕うん作業中の平均速度 |
| 5 作業幅 | w [m] | 作業機が実行しうる最大の作業幅 (≒仕様書に示す作業幅) |
| 6 圃場区画図 | | 圃場区画, 構造物, 畦畔の状況などがわかる図 |
| 7 圃場総面積 | S_a [a] | 圃場一筆の総面積 |
| 8 構造物面積 | S_b [a] | 圃場区画内の用水口など耕うん不能な面積の総和 (図 5.1-2) |
| 9 耕うん可能面積 | S_u [a] | 圃場区画のうち用水口のマスなど耕うん不能な構造物の面積を除いた部分の面積 $=S_a - S_b$ |
| 10 無人耕うん面積 | S_{ua} [a] | 無人で耕うんした総面積 (図 5.1-2) |
| 11 有人耕うん面積 | S_{bm} [a] | 有人で耕うんした面積のうち無人耕うんを行った重複部分を除いた部分 $=S_{tp} - S_{ka}$ |
| 12 実耕うん面積 | S_{tp} [a] | 実際に耕うんを行った面積の総和 (図 5.1-2) $=S_{ua} + S_{bm}$ |
| 13 残耕面積 | S_{tr} [a] | 区画周辺部, 構造物周辺の未耕うん部分を除いた未耕うん面積の総和 (図 5.1-2) |
| 14 無人耕うん面積幅 | A [m] | 往復作業行程における無人耕うんを行った作業領域の往復作業方向に直行する距離 |
| 15 無人耕うん行程数 | n | 往復作業行程における無人耕うんを行った行程数であって, 徒走行程を含まない |
| 16 総時間 | T_a [min] | 機器の設営から, 圃場一筆を耕うんして機器の撤去を終了するまでの時間 $t_f - t_s = T_s + T_i (+T_j) + T_{ao} + T_{mo} + T_{tr} + T_c$ |
| 17 設営時間 | T_s [min] | 航法装置基準局, 通信機などの圃場への設営時間 $=t_i - t_s$ |
| 18 初期設定時間 | T_i [min] | 航法装置等の電源投入, 初期設定, 車両メインコントローラ等の初期設定, などの時間 $=t_f - t_i$ |
| 19 教示時間 | T_t [min] | 同一圃場であっても毎回ティーチングを要する場合の, 圃場区画や基準値などをティーチングするのに要する時間 $=t_{ao} - t_i$ |
| 20 無人作業時間 =監視時間 | T_{ao} [min] | 無人作業を開始し, オペレータが車両から離れた時間から, 無人作業を終了してオペレータが車両に乗るまでの, 非常時対応のための監視に携る時間で, トラブル処理時間を除いた時間 $=(t_{mo} - t_{ao}) - T_{tr}$ |

| | | |
|---------------------|------------------------|--|
| 21 有人作業時間 | T_{mo} [min] | 畦畔際の処理などマニュアル運転によって作業を行う時間及びトラブル処理時間 $=t_c - t_{mo}$ |
| 22 機械作業時間 (拘束時間) | T_{ot} [min] | トラブル処理時間を除いた機械が耕うん作業のために運転されていた時間 $=(t_c - t_{ao}) - T_{tr} = T_{ao} + T_{mo}$ |
| 23 トラブル処理時間 | T_{tr} [min] | 無人作業中にオペレータの処置を要する何らかのトラブルにより作業を中断した総時間 |
| 24 撤去時間 | T_c [min] | 航法装置基準局通信機などの圃場からの片づけ時間 $=t_f - t_c$ |
| 25 機械能率 | E_m [min/10a] | 総時間を実耕うん面積で除したもの $=10 * T_a / S_{tp}$ |
| 26 無人作業能率 | E_a [min/10a] | 無人耕うん時の作業能率 $=10 * T_{ao} / S_{ta}$ |
| 27 作業能率 | E_o [min/10a] | 単位面積を耕うんするのに必要な、作業者が100%拘束される時間 $=10 * (T_s + T_i + T_t + T_{mo} + T_c + T_{tr}) / S_{tt} = 10 * (T_a - T_{ao}) / S_{tt}$ |
| 28 正味機械能率 | E_n [min/10a] | 機械が作業を行っていた時間(機械作業時間)を耕うん可能面積で除したもの $=10 * T_{ot} / S_{tt}$ |
| 29 圃場作業効率 | E_{fo} [%] | 機械作業時間に対する理論作業時間の比 $=(100 * S_{tt} / w / v / 60) / T_{ot}$ |
| 30 無人圃場作業効率 | E_{fa} [%] | 無人作業時間に対する理論作業時間の比 $=(100 * S_{ta} / w / v / 60) / T_{ao}$ |
| 31 作業能率拘束時間比 | R_o [%] | 作業者が監視以外の、何らかの作業に専念しなければならない時間の総時間に対する比 $=100 * (T_a - T_{ao}) / T_a$ |
| 32 無人作業時間比 | R_a [%] | 総時間に対する無人作業時間の比 $=100 * T_{ao} / T_a$ |
| 33 有人作業時間比 | R_m [%] | 機械時間に対する有人作業時間の比 $=100 * T_{mo} / T_{ot}$ |
| 34 非耕うん作業時間比 | R_i [%] | 総時間に対する非機械作業時間の比 $=100 * (T_a - T_{ao} - T_{mo}) / T_a$ |
| 35 教示作業時間比 | R_t [%] | 毎回ティーチングを要するシステムにおける総時間に対する教示時間の比 $=100 * T_t / T_a$ |
| 36 平均無人作業幅 | W_a [m] | 無人耕うん面積幅を無人耕うん作業行程数で除したもの $=w / n$ |
| 37 平均無人作業重複幅 | W_{ao} [m] | 平均無人作業幅から算出した無人耕うん作業時の作業重複幅 $=W - W_a$ |
| 38 作業方法 | | 作業の手順、往復耕の回数、回り耕の周回数、徒走位置などを含む具体的な作業の記録 |
| 39 軌跡 | x_i, y_i, h_i [m] | 作業を行った経路を車両の中央付近の点について、目標とする往復作業方向に平行な方向を y 軸、直交する方向を x 軸、鉛直方向を h 軸とする座標系において、時事刻々適当な計測周期で計測する。 |
| 40 作業軌跡図 | | 図 5.1-2 のような実際に作業を行った経路を示す図で、残耕部、タイヤの踏み付け状況、区画はみ出し状況、徒走軌跡、往復作業軌跡、回り作業軌跡、有人作業軌跡、教示軌跡などを示すものとする。 |

| | | |
|-------------|-------------------------------|--|
| 41 直進性 | L_s [cm] | 往復作業方向の各無人耕うん行程 ($j=1\sim n$) 毎について、作業方向に直交する向きの軌跡 ($i=1\sim m$) の平均値に対する偏差の標準偏差 L_j の、同無人耕うん行程の平均値 $x_{jave} = \sum x_{ij} / m \quad L_j = \sqrt{(\sum (x_{ij} - x_{jave})^2) / (m-1)} \quad L_s = \sum L_j / n$ |
| 42 直進の平均振れ幅 | L_a [cm] | 往復作業行程の各無人耕うん行程毎について、作業方向に直交する向きの軌跡の平均値に対する偏差の最大値と最小値の差の、同無人耕うん行程の平均値 $x_{imax} = \max(x_{ij} - x_{jave}) \quad x_{imin} = \min(x_{ij} - x_{jave}) \quad L_a = \{\sum (x_{imax} - x_{imin})\} / n$ |
| 43 直進の周期 | L_t [m] | 往復作業方向の各無人耕うん行程毎について、作業方向に直交する向きの軌跡の変動に周期性がみられる場合に、作業方向に直交する向きの軌跡の平均値に対する偏差の周期性を FFT 等により分析した際の距離的周期 |
| 44 直進の平行度 | L_p [°] | 各無人耕うん行程の作業方向に直行する向きの軌跡の 1 次回帰直線について、y 軸となす角度を求め、その絶対値の全無人耕うん行程の平均値 |
| 45 耕 深 | d [cm] | 任意の無人耕うん行程の耕深を 10 点以上調査し、その平均値 |
| 46 総踏付距離 | D [m] | 既耕うん領域内に残ったタイヤ踏付跡の総延長距離 (図 5.1-2) |
| 47 総はみ出し面積 | S_{or} [m ²] | 耕うん可能面積の領域外に踏込んだタイヤ跡、もしくは耕うん作業の痕跡の総面積 |
| 48 残稈埋没性 | | ワラなどの前作の残さをすき込む状況に関する事項であって目視によって評価 |
| 49 均平性能 | | 耕うん作業終了時における「圃場の凹凸」による要素を除去した圃場の平面性であって往復耕開始・終了部分、枕地処理各行程開始・終了部分などについて重点的に測定を行い、平均平面に対する最高位、最小位などによって示す |

5.1.2 取扱い性試験

取扱い性能試験及びその評価で使用する用語は、一括して表 5.1-2 に示す。

5.1.2.1 試験の条件

取扱い試験は、作業性能試験とは別の圃場にて行う。その他は 5.1.1.1 の作業性能試験の条件に準じる。

5.1.2.2 試験方法

試験方法は、原則として以下による。

- 1) 試験を受ける者は、試験前に表 5.1-2 用語に示す事項を詳細に記述した取扱説明書を試験実施者に提出する。

- 2) 設備工事を要する場合は、設備状況等の調査のために試験実施者が立会いその状況を観察する。
- 3) 調整運転を含めて I 作業性能試験時に本試験に必要なデータを記録する。
- 4) トラブルに対する操作性を評価する。
- 5) 別途取扱い性試験のための圃場において評価に必要な事項を重点的に調査する。

5.1.2.3 評価

評価項目は、表 5.1-2 の用語等を使用して以下によって行う。

- 1) 設備状況の評価する。
- 2) 設営性、初期設定作業性、監視性、操作性、安全性、保守・管理性等を主に定性的に評価する。

表 5.1-2 取扱い性試験の用語

Table 5.1-2 Terminologies using in handling tests

| No. | 用語 | 記号 | 定義・算出式等 |
|-----|---------|----|--|
| 1 | 設備状況 | | 車両外設備の占有面積、使用電力、設備工事の条件及びコスト、農作業への影響、取扱い性に関する事項 |
| 2 | 設営性 | | 航法装置等の基準局の内恒久的に設置された部分以外の、毎作業毎に設営する機器の据付け、撤去に関する事項 |
| 3 | 初期設定作業性 | | ティーチング、基準局等の設営に際しての作業性、取扱い性に関する事項 |
| 4 | 監視性 | | オペレータが無人作業実行時にどれほどの監視動作を必要とするか、あるいはオペレータの意志によって無人作業を中断もしくは修正しようとする作業に関する事項 |
| 5 | 適応性 | | 無人作業対応可能な速度範囲、圃場条件などの適応性に関する事項 |
| 6 | 操作性 | | 無人作業開始までの、もしくは無人作業終了時の機器の操作に関する事項 |
| 7 | 安全性 | | 不測の事態に対する耕うんロボットの挙動、並びにオペレータのとるべき行動に関する事項 |
| 8 | 保守・管理性 | | 耕うんロボットの機能を維持するために必要な保守、管理に関する事項 |

5.1.3 信頼性試験

信頼性試験及びその評価で使用する用語は、一括して表 5.1-3 に示す。

5.1.3.1 試験の条件

信頼性試験は、作業性能試験と同一の矩形圃場で同時に実施する。その他は 5.1.1.1 作業性能試験に準じる。

5.1.3.2 試験方法

試験方法は、原則として以下による。

- 1) 5.1.1.1 作業性能試験時にトラブル等の状況を調査する。
- 2) 耐環境性等を計測するために、必要に応じて模擬的に悪環境を設定して問題点を摘出する。

5.1.3.3 評価

評価項目は、表 5.1-3 の用語等を使用して以下によって行う。

- 1) 耐環境性について評価する。
- 2) トラブルの原因について調査し、その対応法を評価する。
- 3) トラブルの未然防止方法、復帰方法等を調査する。
- 4) トラブル停止回数、個別トラブル処理時間、トラブル処理時間、トラブル処理時間比によって評価する。

表 5.1-3 信頼性試験の用語

Table 5.1-3 Terminologies using in reliability tests

| No. 用語 | 記号 | 定義・算出式等 |
|--------------|------------------|--|
| 1 耐環境性 | | 風雨, 埃, 温・湿度などの環境変動に対する適応性に関する事項 |
| 2 トラブル | | 無人作業実行中に発生するあらゆる作業阻害現象 |
| 3 トラブル停止回数 | N_{trs} | 1 区画の圃場試験においてトラブルによって無人作業を停止する, あるいは停止せざるを得ない事態の発生回数 |
| 4 トラブル処理回数 | N_{tr} | 1 区画の圃場試験においてオペレータの処置を要する何らかのトラブルによって無人作業を停止する, あるいは停止せざるを得ない事態の発生回数 |
| 5 個別トラブル処理時間 | T_{itr} [h] | オペレータの処置を要する何らかのトラブルによる無人作業の停止から, 無人作業に復帰するまでの時間 |
| 6 トラブル処理時間 | T_{tr} [h] | 個別とトラブル処理時間の総計=無人作業中にオペレータの措置を要する何らかのトラブルにより作業を中断した総時間 $= \sum T_{itr}$ |
| 7 トラブル処理時間比 | R_{tr} [h] | 総時間にしめるトラブル処理に要した時間 $= T_{tr} / T_a$ |

5.2 作業状況

5.2.1 試験条件等

前項の評価方法に従って以下において試験を実施した。

- 1) 試験 No.1: 北海道大学農学部寺尾研究室に委託して同大学附属農場にてバレイショ収穫後の畑地条件における試験 (97年10月)¹³¹⁾。
- 2) 試験 No.2: 山形県農業試験場機械土木部に委託して、山形県鶴岡市の農家圃場で慣行作業と比較しながらの水田条件における試験 (97年11月)¹³²⁾。
- 3) 試験 No.3: 筆者らにより、生研機構附属農場にて慣行作業と比較しながらの水田条件における試験 (97年12月)。

試験の様子を図 5.2-1 に示す。

慣行作業のオペレータは、山形県農業試験場の専任オペレータであり、耕うん作業の技量は一般農家のオペレータに比べて高度である。No.1, 2 では、悪天候に災いされて路面は軟弱であり、特に No.2 ではコンバインのクローラ跡は冠水状態であった。No.3 は、一転してかなり乾燥した状態で、重粘土質の圃場は極めて硬かった。しかし No.1, 2 は防水性の評価に、No.3 は防塵性の評価にはそれぞれ好都合であった。

試験条件、結果を一括して表 5.2-1 に、それぞれの作業軌跡図及び残耕・踏み付け跡等の図を図 5.2-2~6 に示す。作業中の軌跡、及び圃場区画、耕うん面積、残耕面積等の計測には、自動追尾型測量装置トプコン AP-L1 を使用した。

試験条件として供試圃場区画は、No.1 では取扱試験区を除いて試験時点において使用可能な最大面積を供試し、No.2 及び No.3 では無人作業と慣行作業が同一の条件となるように設定した。慣行作業と走行速度段は、予備試験時の耕うん負荷の様子から No.1 は L-8 速、その他は H-1 速を選択した。PTO 軸速度段は、秋耕しを想定して碎土率より反転性に重点をおいた 1 速を選択し、全ての試験で倍速ターン、及び作業機の耕深・水平自動制御機構、旋回時片



a) 試験 No.2 山形県鶴岡市農家圃場における試験風景
 a) Photograph of the evaluation test No.2
 in a farmer's field in Tsuruoka Yamagata



b) 試験 No.3 生研機構附属農場における試験風景
 b) The photograph of the evaluation test No.3
 in the experimental farm of IAM-BRAIN

図 5.2-1 評価試験風景
 Fig. 5.2-1 Photographs of the evaluation tests

ブレーキを使用している。試験実行中に計測した耕深は、予備試験で 12cm に設定したにもかかわらず、No.1 及び No.3 では浅めの結果となった。

また供試した ROBOTRA に装備された TMS の検出性能に影響を及ぼすと考えられる磁気環境は、No.1, No.2, 及び No.3 の XNAV 試験区では、磁気環境を乱すと考えられる構造物は圃場周辺に存在せず、極めて良好であったと推定される。

表 5.2-1 試験結果の概要

Table 5.2-1 Results of the evaluation tests

| 試験実施場所 | No.1 北 大 附属農場 | No.2 山形県鶴岡市 農家圃場 (水田) | No.3 生研機構 付属農場 (水田) | | |
|-----------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------|------------|------------|
| 試験日 (97 年) | 10/9 | 11/2 | 11/4 | 12/11 | 12/11 |
| 方式 | XNAV | XNAV | 慣行 | XNAV | 慣行 |
| 区画サイズ (m*m) | 100.0×24.0 | 115.0×44.0 | 115.0×44.0 | 100.0×50.0 | 100.0×50.0 |
| 圃場の磁気環境 | 問題なし | 問題なし | 問題なし | 問題なし | 鉄塔有*1 |
| 耕うん可能面積[a] | 24.01 | 50.60 | 50.60 | 50.00 | 49.99 |
| 作業速度段 | L-8 | H-1 | H-1 | H-1 | H-1 |
| PTO 速度段 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 倍速ターン機能 | 使用 | 使用 | 使用 | 使用 | 使用 |
| 実作業速度[m/s] | 0.460 | 0.467 | 0.449 | 0.502 | 0.502 |
| 耕 深[cm] | 10.5 | 12.5 | 12.0 | 10.5 | 10.2 |
| 正味機械能率[min/10a] | 35.4 | 27.2 | 27.2 | 25.7 | 24.6 |
| 作業能率[min/10a] | 5.13 | 2.5 | 27.2 | 2.7 | 25.3 |
| 圃場作業効率[%] | 72.0 | 71.9 | 71.9 | 76.1 | 77.8 |
| 作業者拘束時間比[%] | 14.8 | 8.2 | 100.0 | 9.5 | 100.0 |
| 非耕うん作業時間比[%] | 14.8 | 8.2 | 0 | 9.5 | 2.7 |
| 残耕面積[a] | 0.01 | 0.4 | 0.4 | 0.0 | 0.4 |
| 総踏付距離[m] | 43.5 | 61.8 | 17.3 | 67.4 | 13.1 |
| 直進性[cm] | 4.5 | 9.3 | 9.1 | 2.7 | 19.1 |
| 直進の平均振れ幅[cm] | 23.1 | 41.3 | 41.4 | 12.6 | 68.5 |
| 直進の平行度[°] | 0.05 | 0.08 | 0.16 | 0.01 | 0.44 |
| トラブル処理時間[min] | - | - | - | - | 3.4 *2 |

*1: 圃場南端角に送電線の鉄塔有り

*2: ダッシングと区画設定ひもの作業機へのからみ除去によるもの。

5.2.2 作業性能

性能についてみると、正味機械能率は速度段が低く、供試面積

が小さい No.1 が 10a あたり約 35 分となっている他は、25 分前後であり、25kW 級のトラクタとして標準的なものと考えられる。No.3 に比べ、長辺方向が長い No.2 の方が正味機械能率が劣っているのは、実作業速度の違いによるものと考えられる。一方作業能率は、XNAV システムの作業開始前の設営と作業終了後の撤収、及び無人作業の初期設定に、圃場区画の大きさに関わらず 12 分前後を要するため、表のような値となった。No.2 の方が No.3 より若干高いのは、実作業速度の違いに起因する総作業時間の長さが原因している。定義から明らかなように、作業能率は供試区画が大きく、機械能率が悪いほど相対的に短くなることからこのような結果になった。このことは、作業能率拘束時間比にも当てはまり、同様の傾向がみられる。これらから 50a 程度の区画では、XNAV システムによる無人作業には、2 時間強を要し、区画の大きさに拘わらず作業の前後にオペレータは 12 分程度拘束されることが確認された。

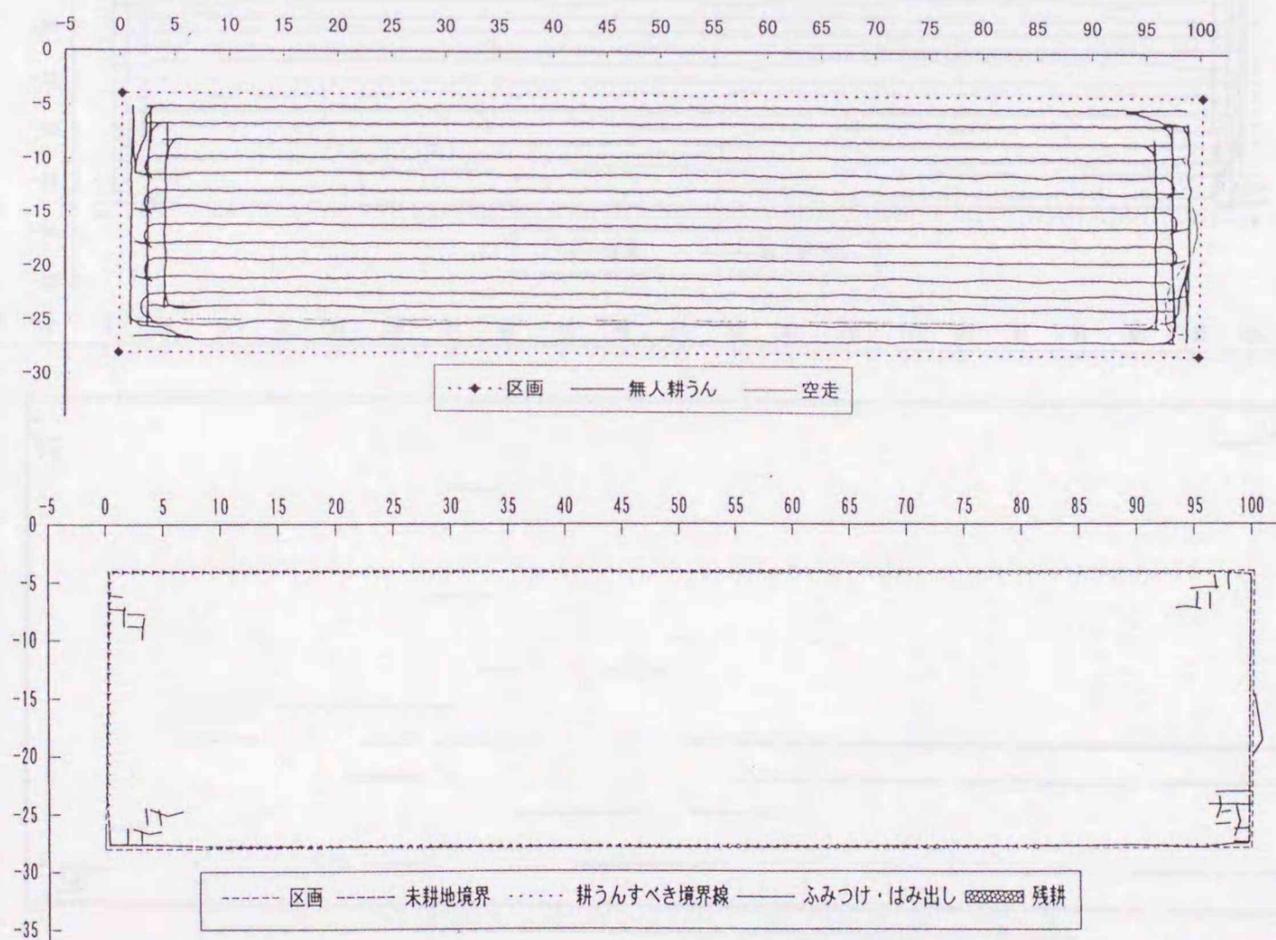


図 5.2-2 試験 No.1 における XNAV システムの走行軌跡と作業精度
 Fig. 5.2-2 Running traces and work accuracy on the evaluation test No.1 by the XNAV system

圃場作業効率は、設定速度段が L-8 と一段低く、かつ供試区画サイズが半分以下の No.1 で、No.2 より高い値を示しているが、No.2 においては圃場状態から特に進行低下率が著しく、実作業速度が低下していることが原因と考えられる。一方 No.3 では表面が硬くややダッシング気味であり、高い数値を示している。

作業精度についてみると図からもわかるとおり、No.2 における残耕は、XNAV システムの場合、作業機のチェックチェンの調整が左右均等でなかったことに起因して、往復作業行程において前行程のれき溝に前輪が落ち込み、通常の直進維持のための操舵制御ではなかなかはい上がれず、幅 10cm 前後の長い残耕をつくっている。

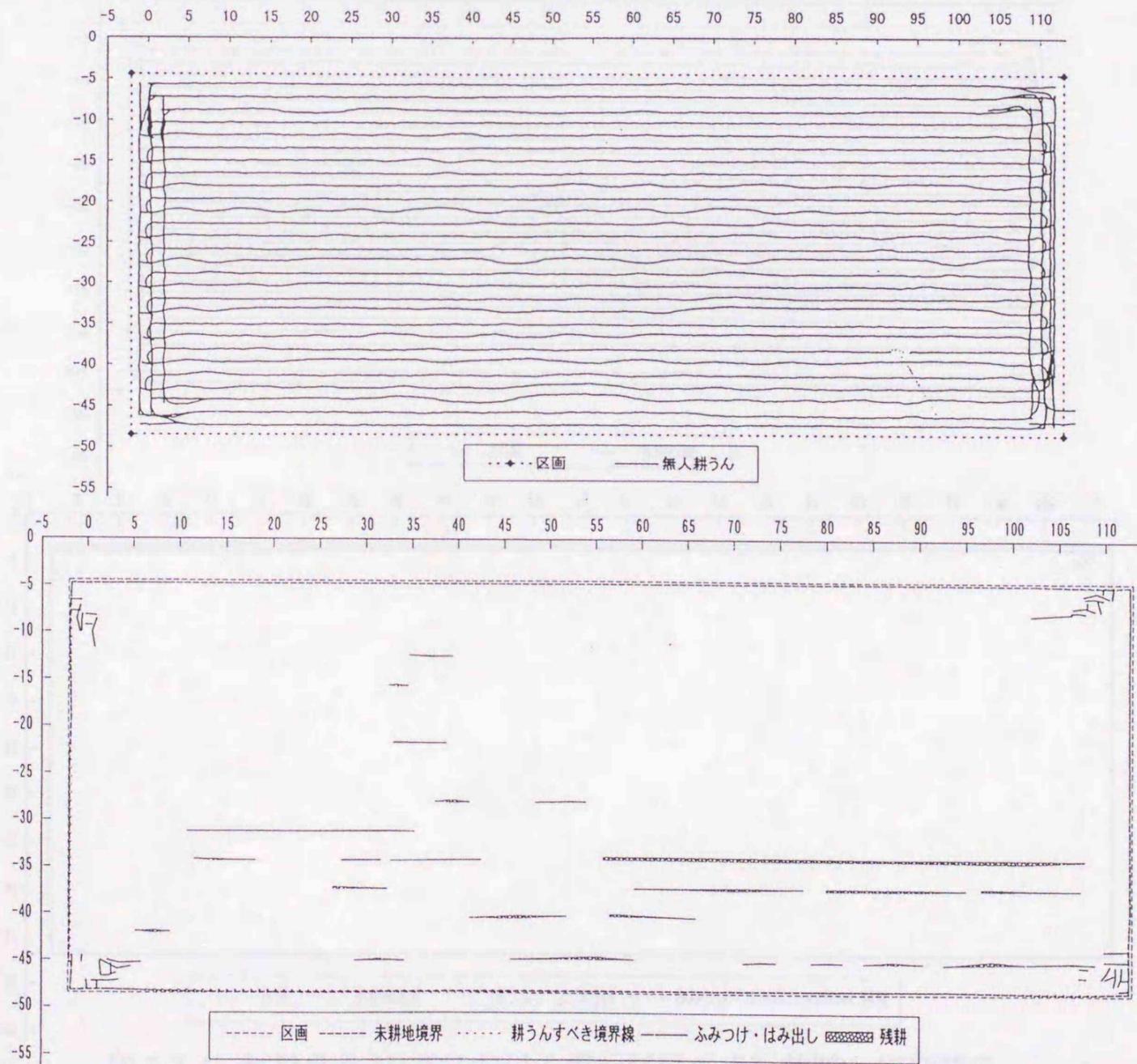


図 5.2-3 試験条件 No.2 における XNAV システムの走行軌跡と作業精度
 Fig. 5.2-3 Running traces and work accuracy
 on the evaluation test No.2 by the XNAV system

同じく No.2 における慣行作業の残耕は，最外周の長辺方向でぬかるみと冠水のためにオペレータが圃場区画境界線を認識しづらかったことに起因している。慣行作業では No.3 においても最外周で残耕をつくっているが，この場合は往復作業開始時に，最後に枕地処理のために残しておくべき行程幅の目測が不適切だったためである。このようなことは，耕うん技能を競う競技会など予め目印を設けるような場合を除くと，一般の作業では，残耕を残さないためにさらに 1 往復行程の作業を行って作業能率を低下させるか，残耕はそのままとして碎土作業の際に処理することとして作業精度を低下さ

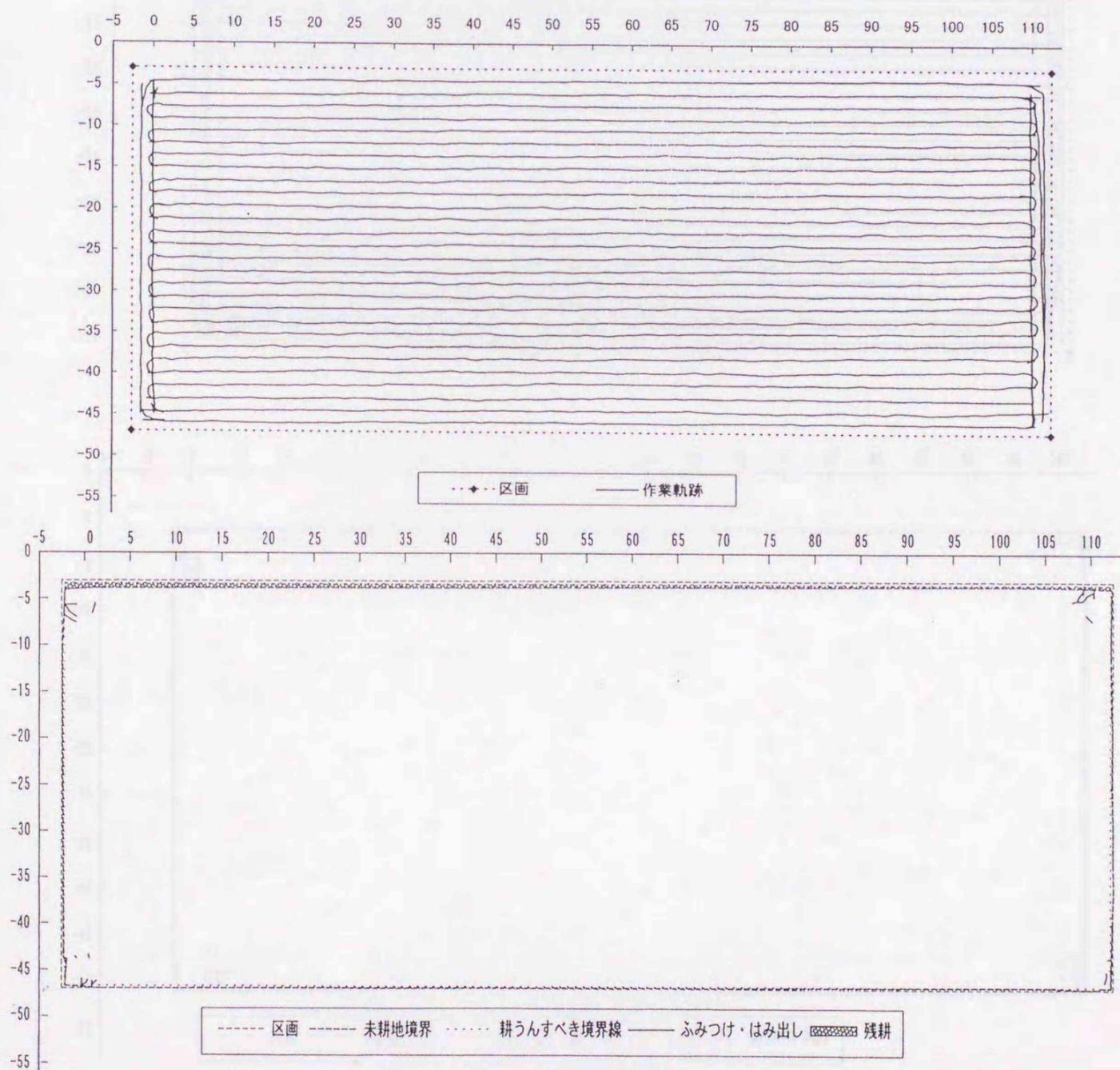


図 5.2-4 試験条件 No.2 における慣行試験の走行軌跡と作業精度
 Fig. 5.2-4 Running traces and work accuracy
 in the evaluation test No.2 by the conventional manual operation

せるかの判断が必要となるような、しばしばみられる状況である。
むしろ絶対的な圃場内位置を認識して行う無人作業の方が有利な状
況である。結果的に残耕は慣行作業に比べて同等かむしろ少ない傾

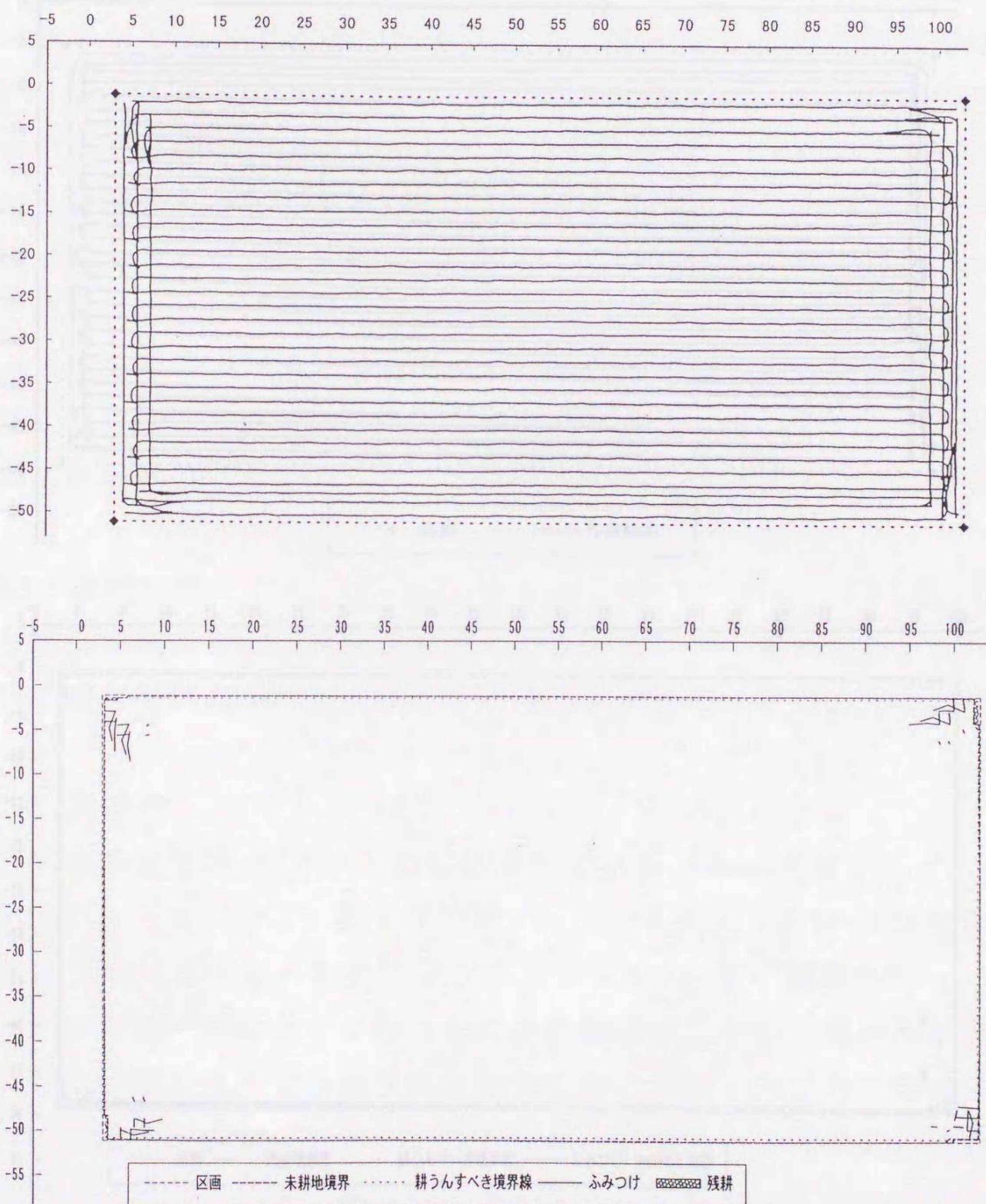


図 5.2-5 試験条件 No.3 における XNAV システムの走行軌跡と作業精度
Fig. 5.2-5 Running traces and work accuracy
in the evaluation test No.3 by the XNAV system

向がみられたが，既耕地への総踏み付け距離は XNAV システムの方が劣っており，枕地処理における車両制御方法に改善の余地があることを物語っている。

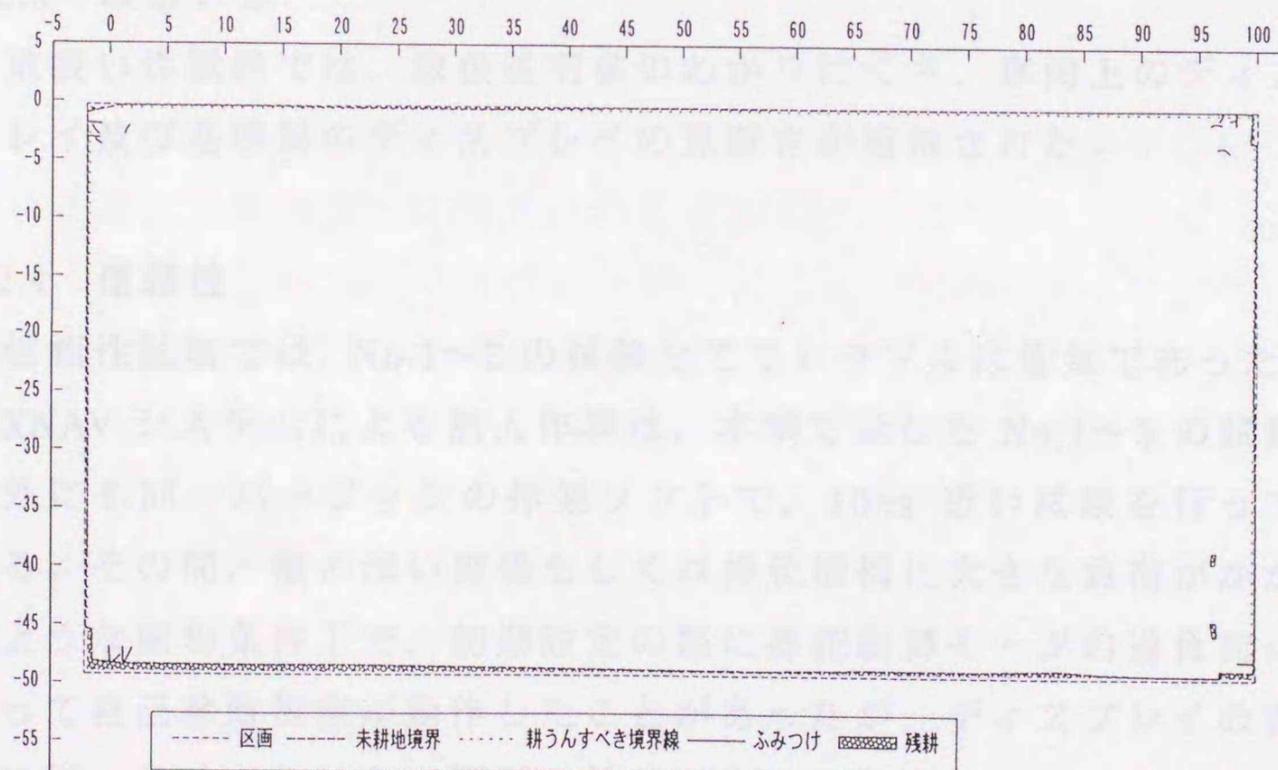
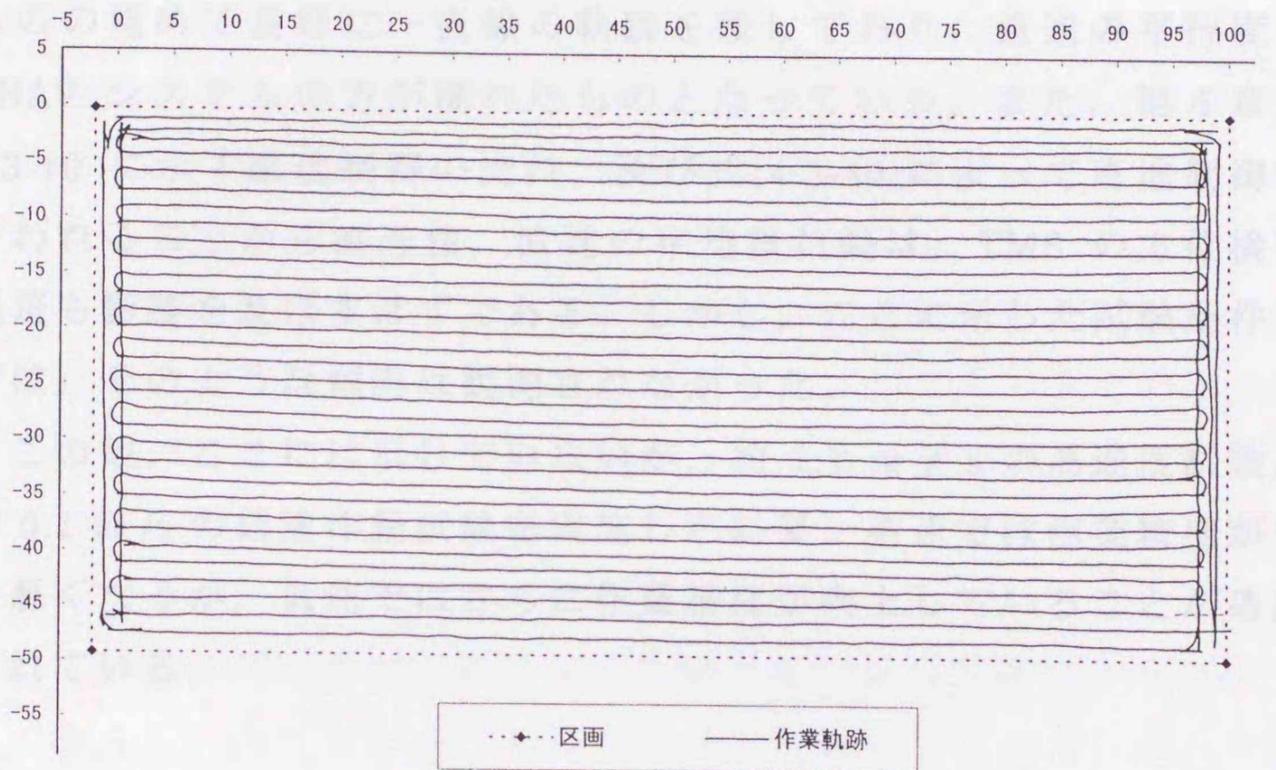


図 5.2-6 試験条件 No.3 における慣行試験の走行軌跡と作業精度

Fig. 5.2-6 Running traces and work accuracy in the evaluation test No.3 by the conventional manual operation

直進性，直進の平均振れ幅は，No.2 において先に述べたれき溝に前輪を落とした経緯から，慣行作業と同等のものとなっているが，No.2 の試験はむしろ特異なケースであり，その他では慣行作業より好結果を得ている。慣行作業は，長い直進行程で大きく弓なりに弧を描くように軌跡を残す傾向があるのに比べ，細かな振幅はあるものの極めて良好に一直線の軌跡を残しており，直進の平行度は XNAV システムの方が優れたものとなっている。また，第 4 章図 4.3-10 に示す直進制御の流れ，及び式(4.3-40)によって直進制御が行われることから直進性，直進の平均振れ幅は，TMS の方位検出誤差も影響を及ぼすはずである。しかし，ここに示した試験条件下では，そのような傾向は観測されなかった。

この他，ここには示していないが，約 1.1 m / s の高速度試験，約 0.1 m / s の低速作業試験を実施した結果，高速では作業精度がやや悪くなるが，低速ではさらに作業精度が向上していることが確認されている。

5.2.3 取扱い性

取扱い性試験では，取扱説明書のわかりにくさ，車両上のディスプレイ及び基準局のディスプレイの見難さが指摘された。

5.2.4 信頼性

信頼性試験では，No.1~3 の試験全てでトラブルは皆無であった。

XNAV システムによる無人作業は，本項で示した No.1~3 の試験以外にも同一バージョンの作業ソフトで，10ha 近い試験を行っている。その間，轍の深い圃場もしくは操舵機構に大きな負荷がかかるような圃場条件下で，初期設定の際に操舵制御モータの過負荷によって自己診断機能が動作したことがあったが，ディスプレイの表示に従ったオペレータの簡単な処理によって作業は支障なく開始されている。また，XNAV システムのビームを見学者がふさぐ，といった人為的なトラブルにより，異常時対応機能が働いたことがあっ

たが、その後自動復帰して作業は支障なく続行できた。これらを含め、現在までのところ満足のいく信頼性が得られている。さらに、同じく現在までに故障は発生しておらず、各部の耐候性にも問題はないと判断される。

5.2.5 その他

各種試験を通じて、以下のような未解決、未確認の問題点がある。

- 1) 直射日光が当たるような条件下では、初期設定時にディスプレイが見づらい。
- 2) 異常時対応機能は、人為的に異常事態を発生させての機能確認を行っているが、ダッシングやバンパスイッチで検出できない障害物など突発的な異常事態を現在の機能で十分カバーできているか、あるいは的確な対応が行われるか、なお未確認な点がある。
- 3) 異常時対応機能、非常停止機構ともに車両制御コントローラを介して動作するが、車両制御コントローラが異常を来した際の挙動については、設計上は停止するはずであるが、実際に確認されていない。
- 4) より簡潔な計測と評価基準によつて的確に無人作業を評価できるように試験方法の改良が必要である。

5.3 自律走行システムの展望

無人作業を実行する車両を開発し、TMS、XNAVと航法装置の研究を進め、これらに適合する作業ソフトウェアを並行して開発し、その間極力実作業に適用することを心がけつつ、農用車両のロボット化を進めてきた。現在、耕うんロボットは何とか人が行う作業に近い、部分的には人の能力を超えた耕うん作業を実行できるようになってきた。しかし、今後の課題として、

- 1) シンプルでローコストな航法システムの開発といった、ハード面の改良、

- 2) 矩形かつほぼ平坦な圃場ばかりでなく、変形圃場や傾斜地への適応、
- 3) 耕うん作業以外の作業への展開、
- 4) 仕様の異なる作業機への柔軟な対応、

などの改良が挙げられる。これらのソフト開発では、ユーザである農家はその圃場に合わせてソフトを自在に改良できるような、扱いやすく開放性のあるソフトとすることも有効と考えられる¹³³⁾。

一方、トラクタ作業のように解放空間を車両が無人で走り回って作業を行うことは、万に一つハード上の、あるいはソフトウェア上の異常やトラブルがあっても、重大な事故に直結する可能性がある。さらに適期作業を確実にこなしていくためにも、耕うんロボットには極めて高い信頼性と、万が一に備えたフェイルセーフシステムを備える必要がある。これら農用車両のロボット化技術を農業現場に導入するまでには、まだまだ圃場試験を繰り返して信頼性を高めていかなければならない。

5.4 導入条件

耕うんロボットは第5章5.1.2に示した試験・評価を待つまでもなく、1枚の圃場が大きいほどその省力効果が高まる。現在、国内でも大規模化の動きが進展しつつあるが、農作業や経営面の効率化ばかりでなく環境保全や持続的農業といった視点をも含めて考えるとき、自ずと適正な区画サイズが浸透していくものと考えられる。こういった動向に配慮しながら、無人作業にとっての適正な圃場サイズや負担面積、経営規模などについても、今後検討していく必要がある。一方、圃場を無人で作業する車両が一般的な風景となり、それを取扱う人々の無人機械への習熟やサービス体制、いざというときの補償体制などが確立されるまでには未だ長い年月を必要としよう。当面はオペレータが近くにいることを前提に、

- 1) 一人のオペレータが、同時に作業を行う数台の耕うんロボットを監視する、

- 2) 耕うんロボットの作業状況を、オペレータが横目で監視しながら、別の作業を行う、
 - 3) 車両にはオペレータが搭乗し、直進部分を自動運転するような、技術の部分的応用、
- といった利用方法についても研究する必要がある。同時に利用コストの面から、耕うん作業以外のトラクタ作業一般を無人化できるよう、作業ソフトの展開を図り、利用効果を高めてより費用対効果の高いものに発展させることも導入に必要な条件である。

5.5 まとめ

第4章までに記した耕うんロボットを実際に耕作を行っている圃場に供試してその実用性を評価した。

評価に際しては、無人で作業を実行する農用車両を適正に評価しうる試験方法・評価基準が確立されていなかったため、新たに試験方法を策定するとともに、農用車両の無人作業一般にも適用しうる評価基準を設けた。試験方法は、

- 1) 作業能率、省力効果、作業精度を評価する作業性能試験、
- 2) 初期設定や各部操作の難易、機器の設置性などを評価する取扱い性試験、
- 3) 耐環境性や耐久性、作業ソフトのバグもしくは圃場条件の変化などによって発生するトラブルの状況を評価するための信頼性試験、

により構成されている。作業性能試験では、省力効果を評価するために、作業能率・作業者拘束時間比などの評価項目を設けた。また、同じく車両の直進制御性能を評価するために直進性・直進の平均振れ幅・直進の平行度などの評価項目を設けた。

策定した試験方法に従って、No.1 北海道大学附属農場の畑地（供試面積 24a）、No.2 山形県内の農家水田（供試面積 50a）、No.3 生研機構附属農場の水田（供試面積 50a）、において試験を実施した。No.1 及び No.2 は、天候不良に見舞われ耕うん作業には不的確な圃場条

件であったが、No.3 は乾燥した条件で試験を実施できた。No.2 及び No.3 では、技量優秀なオペレータによってほぼ同一条件で慣行作業を行い、耕うんロボットの作業性能に対する比較対象とした。ロータリ耕うんの耕深は 12cm を目標とし、秋耕しを想定して PTO 軸速度段は最低速を、作業速度は各々機関過負荷とならないような最高の速度段を選択した。

試験の結果は以下のものである。

- 1) 作業能率は慣行作業に比べほぼ同等であったが、基準局の設置や初期設定に供試面積と関わりなく 10 分強を要するため、総作業時間はこの時間だけ長くなった。しかし、作業者はこの 10 分強しか拘束されないため、50a 区画の場合は 10a 当たり数分しか拘束されず、極めて省力的な耕うん作業を実行することができた。
- 2) 作業精度面では、残耕は慣行作業とほぼ同等であったが、既耕地への踏み込みは慣行作業より多く、劣っていた。直進性・直進の振れ幅・直進平行度は、耕うんロボットの方が慣行作業より優れており、絶対的な位置情報によって誘導される耕うんロボットの特性をいかんなく発揮した。
- 3) 取扱い性試験では、初期設定時のディスプレイの見難さや取扱説明書の不備が指摘された。
- 4) 信頼性試験では、トラブルは全く発生せず、No.1・No.2 における雨降りの中でも機器の動作に問題はなかった。No.3 における埃の中でも問題は生じなかった。

ここに記した評価試験以外にも、各種実演や試験のために同一システムで約 10ha の無人耕うん作業を実行した。この間、XNAV システムのビームを見学者がふさぐといった人為的なトラブルが発生したことがあったが、異常時対応機能によって耕うんロボットは自動停止し、その後再び XNAV からの位置情報が得られると自動的に作業を続行した。また、作業速度を 0.1~1.1m/s まで変えて試験を行ったが、高速時に作業精度がやや悪くなるが順調な作業が可能

であった。以上要するに耕うんロボットは所期の目標が満たされたものと判断された。

耕うんロボット自身の今後の課題として、ディスプレイの見難さなどを改良するとともに、以下のような対応が必要と考えられる。

- 1) これまでの試験で発生していない異常事態に対しても的確な対応が行われるよう、今後ともさらに条件を変えて試験を行う。
- 2) 現在の異常時対応機能、非常停止機構などは全て車両制御コントローラを介して機能するが、車両制御コントローラそのものが故障した際にも安全が確保できるよう確認試験を行い、必要な対策を施す。
- 3) 農家の経営規模、作業体系などを考慮した上で複数台の耕うんロボットの同時運用や初期設定を終えたオペレータが行う別作業の種類・方法など、効率的な利用方法を確立するため、実証試験を続ける。

さらに、将来的には、

- 1) 無人作業ならではの作業方法の開発、
 - 2) 傾斜地や変形圃場における無人作業を可能にするためのソフト開発、
 - 3) 耕うん作業以外の作業でも無人作業が実行できるよう適用作業の種類を広げるといったソフト開発、
- などが行われれば、耕うんロボットが農家に導入され、農作業全体の超省力化がさらに進展すると考えられる。

第6章 総括

6.1 序論（第1章要旨）

将来の日本農業は、経営規模の拡大による生産コスト低減、農産物の高付加価値化による収益性向上、といった方向に向かうものと考えられる。大規模経営における生産コストの低減には、農業機械の自動化・無人化による労働生産性の画期的な向上が不可欠である。

一方、車両系農業機械でオペレータが行う運転は、車両そのものを誘導する「車両操作」、作業機の調整や資材補給などを行う「作業機操作」、及び圃場に見合った作業の戦略を立案し、あるいは機械の保守・点検などを行う「企画・管理」の3つに分けることができよう。今日までの車両系農業機械の自動化・無人化は、主に「作業機操作」の歴史であって、「車両操作」については、自脱型コンバインの自動操向機能による条にならった走行の自動化など実用化例は限られたものである。「企画・管理」では自動化の例は殆ど見られない。その結果、最新の車両系農業機械ではオペレータの労働負担は大幅に改善されたものの、相変わらず1名のオペレータを無人化することができず、労働生産性の向上といった面は旧態依然である。

本研究の目標は、「作業機操作」の無人化を前提にして、1枚の圃場に対する作業経路計画のような「企画・管理」の一部を自動化し、かつ「車両操作」の完全無人化を図り、飛躍的な労働生産性の向上を達成することにある。本研究の課題名は「耕うん作業を行う自律移動ロボットに関する研究」とし、本研究の過程で開発されたロボットシステムを「耕うんロボット」と称するが、内容としては昭和62年から行ってきた一連の研究をまとめたものである。

本研究に関係する既往研究を概観すると、国外では1962年、国内では1972年頃から無人走行の研究が開始されている。当初は機械的なセンサによって直接操舵機構を動かすものが見られ、その後のセンサ技術、制御技術の進展に沿って固定経路方式のもの、自由経路内界情報式のものなどが報告され、今日ではGPSを基幹航法

センサとする研究が多く報告されるようになった。しかし、多くの研究例で依然、航法システムが不完全、経路計画法が未確立、作業の安定性・信頼性が不足、といった問題点が見られる。そこで本研究では圃場で行われる多くの作業に汎用的に適用可能な自由経路方式で、

- 1) 作業経路計画を自律的に生成、
 - 2) 圃場全面を無人で処理、
 - 3) 環境変化の激しい圃場条件下でも柔軟に対応して、無人作業への高い信頼性と安定性を確保、
- することを研究のねらいとした。

6.2 車両システム試作（第2章要旨）

無人作業を実行する農用車両には、人間に近い全ての機能要素が必要である。これらの要素は、一般的なメカトロニクスシステムの5大要素と類似したものである。これら要素のうち運動機能やエネルギー供給機能などは、既存の車両系農業機械技術の積み重ねによって達成できると考えられる。一方、感覚機能のうちの航法センサや判断・認識機能のうちの作業ソフトは、農作業を前提に新たな技術開発を行って始めて達成できる要素であると考えられる。農用車両には他の産業分野とは異なる使用条件があり、研究開発に際しては当初より低コスト化や信頼性・取扱い性に対する配慮が欠かせない。

ロボット化された農用車両の作業方法とその効果は、以下に示すとおりである。

- 1) 自律直進作業では、資材補給に要する農用車両の停止時間を減少させて能率を向上させ、もしくはオペレータが作業の補助者を兼ねることによる省力効果を期待することができる。
- 2) 自律追従作業では、複数台の農用車両による組作業において、オペレータを減らすことが可能になり、省力効果を期待できる。
- 3) 自律全面作業では、1枚の圃場全面を完全に無人で処理することから、オペレータは一人で同時に多数のロボット化された農用

車両を運用可能で超省力効果を期待できる。

本論文では、自律全面作業を目標とし、派生的に自律直進作業や自律追従作業を扱うものとする。

車両システムは、

- 1) コントローラからの電気信号によって各部が操作できること、
- 2) 必要最低限の信頼性の高い内界センサを備えること、
- 3) 圃場間移動などを想定してマニュアル運転機構を有すること、
- 4) 非常停止機構などの安全装備を有すること、

を条件に比較的簡易な構成で1号機ALVA-Iから3号機ROBOTRAまでの試作開発を行った。これら車両システムは、重大なトラブルが発生することもなく各種試験に供試することができ、所期の条件を満たすことができた。特にROBOTRAは制御性能、耐候性、信頼性の点で十分に満足できる性能を発揮することができた。

6.3 航法システム（第3章要旨）

耕うんロボットの基幹構成要素である航法装置には各種の方式があり、既存の航法システムには方式によって一長一短がある。農用車両に固有の使用条件やコストを考慮すれば、既存の航法システムをそのまま適用して、耕うんロボットを構成することは適切ではない。従って新たに農用車両のための航法システムを構築する必要がある。耕うんロボットは、多くの日本農家に適用可能で慣行作業を下回らない作業性能を確保するために、使用範囲 100m×50m 以上、位置検出誤差 5cm 以下、方位検出誤差 0.1° 以下などの目標仕様を掲げている。これらの使用条件、要求精度を考慮すると耕うんロボットの航法システムには、以下の方法が適切であると考えられた。

- 1) 安価でドリフト誤差の少ない地磁気方位センサによる車両方位の検出。
- 2) 累積誤差の心配がない外部標識方式による位置の検出。
- 3) 1),2)いずれの場合でも車両のロールやピッチに対する誤差補正や、安定的な作業を実行するためのセンサの複合化。

方位を検出するセンサとしてフラックスゲート型の地磁気方位センサ（TMS）を検討した。TMS は、ロールやピッチに曝され、かつ磁性体である農用車両上で使用される。このため高精度な傾斜補正や磁気環境補正の手法を開発することが不可欠であった。傾斜補正では、Z 軸方向の補正が必ずしも必要ではない点を実証し、磁気環境補正では計測値を円近似して補正值を求める方法が適当である点を実証した。これらの補正手段を講じた結果、目標仕様である 0.1° には及ばなかったが、往復自律走行を行った際の再現性精度は、 0.3° 程度を確保することができ、耕うんロボットに適用可能と判断された。しかし、TMS 本体の取り付け位置、磁気環境補正不可能な周辺の構造物の影響、ロール・ピッチを計測するための傾斜センサの選定と利用方法などには、細心の注意を払う必要が認められた。

TMS のみを航法センサとして、ある程度の自律走行を実現することは可能と考えらる。しかし、精度よく行程の始端・終端位置、行程間ピッチなどを制御するためには、内界情報によらず絶対的な位置情報を取得可能な航法システムを開発することが必要と認められた。

そこで、光波測距儀を基幹とする外部標識方式トラバース式の XNAV システムを開発した。試作した XNAV-I は、基準局のトランシット上に置かれた TV カメラによって、車両（移動局）上のストロボライトと光反射標識で構成されるターゲットを常時追尾する。すなわちターゲットが常時 TV カメラ画像の中央に来るようにトランシットの水平角・鉛直角を自動制御し、同時に光軸を一致させた光波測距儀によってターゲットまでの斜距離を計測するものである。ターゲットの位置は、この斜距離と水平角・鉛直角より算出される。XNAV-I の性能は以下に示すものであった。

- 1) データ更新周期 0.52s で、ターゲット点のロール・ピッチ補正無しで絶対値平均位置検出誤差 4.6cm を確保できた。
- 2) 15 分間の連続計測中、車両が急旋回を行ったときに 6 回タ

ターゲットを見失った。

- 3) 2)のうち4回は、ターゲット自動探索機能により自動的に再追尾が行われたが、残り2回はマニュアルによって再追尾する必要があった。

このことから主にターゲット追尾の確実性をさらに向上させるための改良を開始した。この改良中に、基本計測原理を同じくする自動追尾型測量システム AP-L1 が測量機器メーカー、(株)トプコンから市販化された。早速 AP-L1 を試験したところ、コスト的には問題があるものの、耕うんロボットの要求性能に十分見合う性能と信頼性を有していることが判明した。そこで、XNAV-I の改良を中止し、AP-L1 を基幹とする農用車両用位置計測システム XNAV-II を構築した。XNAV-II は約 500m 離れた点から誤差数 cm 以下で約 0.5s の周期で位置計測が行えることを確認した。

6.4 走行制御アルゴリズムの開発 (第4章要旨)

TMS を用いた作業ソフト ASR を開発した。ASR によって一応の往復作業を実行することができたが、路面の状況によって旋回半径が大きく変化するため、作業ピッチが不安定であり、残耕もしくはかなり大きな作業オーバーラップがみられた。旋回位置は比較的そろっているが、すべりやダッシングなどによって旋回位置、すなわち行程の始・終端位置がずれることがあり、そのズレは、航法の原理上その後最終行程まで回復されることはない。与えられた目標方位を維持しながら自律走行を行う本研究の直進制御方法では、0.5m/s 程度の走行速度で、走行方位の制御精度は 0.3° 程度であり、この精度は 100m 走行して約 50cm 横にずれることを意味している。ASR による自律作業精度が、各種補正法などの適用による TMS の高度利用の結果であることは言うまでもないが、以下の事情によって TMS による走行方位の検出精度をさらに向上させれば、自律走行精度が更に向上するとは断定できない。

- 1) ASR は内界情報に基づくデッドレコニングであって路面条

件による車両の横すべりなどには対応が難しい。

2) 車両の制御性（特に操舵時間）に限度がある。

TMS による自律走行は、航法センサシステムが安価でシンプルな点が最大の長所であり、他の航法装置を用いたシステムにおける補完システム、有人運転の際の部分的自律直進制御、といった場面での実用化を期待できる。

XNAV システムを用いた作業ソフトは、併用した TMS によって車両進行方位が逐次得られることを前提にしている。作業は、ほぼ水平な矩形圃場を前提に一般的にみられる慣行作業に準じて、圃場の中央部を往復作業し、枕地部分を含めた圃場周辺を周り作業する方法によって、圃場全面の完全な無人耕うん作業を行うものである。作業ソフトは、タスクプランニング部と走行制御部により構成される。

区画の大きさ・形状は、ある圃場に対して初めの1回、圃場の出入り口付近から圃場の区画境界線に沿って1周マニュアル走行を行うティーチングによって取得する。作業の開始にあたっては、ティーチングによって得られた目標方位情報と境界線の位置情報をもとに、目標作業経路の生成、すなわち経路計画を行う。タスクプランニング部は、ティーチングモジュールと経路計画モジュールによって構成される。

車両を制御する走行制御部では目標作業経路は、空走モジュール、往復作業モジュール、周り作業モジュールなどに分割される。さらに各々のモジュールは、

- 1) 目標作業経路を維持するように直進制御を行う直進制御ルーチン、
- 2) 往復作業行程の終端で行う 180° 旋回ルーチン、
- 3) 作業行程の開始端で車両横方向の位置合せを行うための幅寄せルーチン、
- 4) 周り作業の最外周で圃場区画からはみ出さないように 90° 旋回を行う外周 90° 旋回ルーチン、
- 5) 周り作業の最外周以外で既耕うん領域を極力踏み付けないよ

うに 90° 旋回を行う内周 90° 旋回ルーチン、
によって構成される。ソフトの構築にあたっては以下の点を考慮した。

- 1) XNAV による位置情報取得の周期 0.5 秒の間を 0.1 秒単位にさらに分割して、デッドレコニングにより位置の推定を行ってさらに精密な制御を実行する。
- 2) 車両の操舵角と車両の運動は路面状況の変動によって一定ではないので、初めに行われる旋回動作時点に制御量と運動軌跡の関係を学習し、以後はこの学習結果に基づいて適正な制御量を得る。

無人作業を行う場合、センサ、制御システム、アクチュエータ、車両自体や作業機など各部に発生する故障やトラブルは、オペレータが搭乗していないため早期発見が困難である。無人作業ではこれらの故障やトラブルに起因した暴走事故が懸念されるばかりでなく、早期発見が困難なことから、些細な故障が連鎖的に他の故障を誘発して重大な故障に発展する可能性もある。こういったトラブルや故障を早期に発見するために、作業ソフト本体に、自己診断、異常時対応の 2 種の支援システムを組み込んでいる。各々の機能は以下のとおりである。

- 1) 自己診断機能は、各センサ及びアクチュエータを作動させてその機能確認を行い、かつ無人作業のための初期設定の適否を内界センサによって確認するものである。自己診断は作業ソフトの初期設定を終えた時点で自動的に実行される。不具合箇所が発見された場合は、アラーム音とディスプレイでその内容をオペレータに知らせる。
- 2) 異常時対応機能は、無人作業実行中に得られた航法データ、内界センサの検出値をもとに、異常・トラブルを発見するものであり、作業中は常時機能している。航法システムの異常は、位置情報の取得状態、位置の変動から判別され、すべり・ダッキング・過負荷などのトラブルは位置情報から算出された速度

によって判別される。異常が発生した場合は、アラーム音・パ
トライト・ディスプレイによってオペレータに報知し、状況に
よって作業を続行しながら正常状態への復帰を待ち、あるいは
自動停止してオペレータの対応を待つ。オペレータの対応が必
要な場合は、対応後に再び作業を続行する。

これら XNAV を用いた作業ソフトは、圃場で度重なる試験と改
良を繰り返した結果、ほぼ慣行の有人作業と同等の作業を実行す
ることができるようになり、概ね所期の目標を達成した。

6.5 耕うんロボットの評価（第5章要旨）

第4章までに記した耕うんロボットを実際に耕作を行っている圃
場に供試してその実用性を評価した。

評価に際しては、無人で作業を実行する農用車両を適正に評価し
うる試験方法・評価基準が見あたらなかったため、新たに試験方法
を策定するとともに、農用車両の無人作業一般にも適用しうる評価
基準を設けた。試験方法は、

- 1) 作業能率、省力効果、作業精度を評価する作業性能試験、
- 2) 初期設定や各部操作の難易、機器の設置性などを評価する取
扱い性試験、
- 3) 耐環境性や耐久性、作業ソフトのバグもしくは圃場条件の変
化などによって発生するトラブルの状況を評価するための信頼
性試験、

により構成されている。作業性能試験では、省力効果を評価するた
めに、作業能率・作業者拘束時間比などの評価項目を設けた。ま
た、同じく車両の直進制御性能を評価するために直進性・直進の平
均振れ幅・直進の平行度などの評価項目を設けた。

策定した試験方法に従って、No.1 北海道大学附属農場の畑地（供
試面積 24a）、No.2 山形県内の農家水田（供試面積 50a）、No.3 生研
機構附属農場の水田（供試面積 50a）、において試験を実施した。No.2
及び No.3 では、技量優秀なオペレータによってほぼ同一条件で慣

行作業を行い、耕うんロボットの作業性能の比較対象とした。ロータリ耕うんの耕深は 12cm を目標とし、秋耕しを想定して PTO 軸速度段は最低速を、作業速度は各々機関過負荷とならないような最高の速度段を選択した。

試験の結果は以下のようである。

- 1) 作業能率は慣行作業に比べほぼ同等であったが、基準局の設置や初期設定、片づけに供試面積と関わりなく 10 分強を要するため、総作業時間はこの時間だけ長くなった。しかし、作業者はこの 10 分強しか拘束されないので、50a 区画の場合は 10a 当たり数分しか拘束されず、極めて省力的な耕うん作業を実行することができた。
- 2) 作業精度面では、残耕は慣行作業とほぼ同等であったが、既耕地への踏み込みは慣行作業より多く、劣っていた。直進性・直進の振れ幅・直進平行度は殆どの条件で耕うんロボットの方が慣行作業より優れていた。
- 3) 取扱い性試験では、初期設定時のディスプレイの見難さや取扱説明書の不備が指摘された。
- 4) 信頼性試験では、トラブルは全く発生せず、No.1・No.2 における降雨と軟弱な路面状況下でも機器の動作や車両の制御に問題はなかった。

ここに記した評価試験以外にも、各種実演や試験のために同一システムで約 10ha の無人耕うん作業を実行した。この間、XNAV システムのビームを見学者がふさぐといった人為的なトラブルが発生したことがあったが、異常時対応機能によって耕うんロボットは自動停止し、その後再び XNAV からの位置情報が得られると自動的に作業を続行した。これ以外に作業中のトラブルは発生していない。また、作業速度を 0.1~1.1m/s まで変えて試験を行ったが、高速時に作業精度がやや悪くなる他は順調な作業が可能であった。以上要するに耕うんロボットは所期の目標が満たされたものと判断された。

耕うんロボット自身の今後の課題として、ディスプレイの見難さ

などを改良するとともに、以下のような対応が必要と考えられる。

- 1) これまでの試験で発生していない異常事態に対しても的確な対応が行われるよう、今後ともさらに条件を変えて試験を行う。
- 2) 現在の異常時対応機能、非常停止機構などは全て車両制御コントローラを介して機能するが、車両制御コントローラそのものが故障した際にも安全が確保できるよう確認試験を行い、必要な対策を施す。
- 3) 農家の経営規模、作業体系などを考慮した上で複数台の耕うんロボットの同時運用や初期設定を終えたオペレータが行う別作業の種類・方法など、効率的な利用方法を確立するため、実証試験を続ける。

さらに、将来的には、

- 1) 無人作業ならではの作業方法の開発、
- 2) 傾斜地や変形圃場における無人作業を可能にするためのソフト開発、
- 3) 耕うん作業以外の作業でも無人作業が実行できるよう適用作業の種類を広げるといったソフト開発、

などが行われれば、耕うんロボットは多数農家に導入され、農作業全体の省力化がさらに進展すると考えられる。

参考文献

- 1) 位置制御技術の開発－位置制御システムの改良と耕うん作業試験，平成7年度事業報告，生研機構，8-9，1996
- 2) 佐野文彦，福井保夫：ケーブル式移動走行システムの開発－土地利用型農業の自動化の研究，高度農業技術研究セミナー－農業のロボット時代を迎えて－講演要旨，高度農業技術研究会（東京農業大学），7-10，1993
- 3) 金須正幸，八木 茂他：圃場作業の無人化，昭和46年度研究成績－研究第1部(4)，農業機械化研究所，1-44，1972
- 4) 金藤祐治他：コンバインの自動化研究（第2報），農業機械学会第35回年次大会講演要旨，67，1976
- 5) 笈田 昭，田野信博：トラクタの自動走行，農業機械学会誌，第38巻第3号，438-440，1976
- 6) 無人作業に関する研究－自動操縦に関する研究，昭和50年度事業報告，農業機械化研究所，13-14，1976
- 7) 八木 茂，武長 孝他：ケーブル誘導方式における農業車両の自動操縦に関する研究，ビークルオートメーションシンポジウム講演論文集，47-48，1978
- 8) 古川嗣彦，川崎 健他：急傾斜地ミカン園用自動走行作業車の開発と利用法，四国農試報，No.37，105-138，1978
- 9) 川崎 健，糸川信弘他：急傾斜地ミカン園における排水路利用による無人運搬法に関する研究，四国農試報，No.37，143-176，1978
- 10) 堀尾尚志他：クラブ・ステアリング車による自動耕うんの研究（第1報），農業機械学会誌，第43巻第4号，523-531，1982
- 11) 藤井保生他：視覚線による芝刈機の自動誘導，SICE関西支部シンポジウム「ロボット－アクチュエータ，センサ，コントロール」講演要旨，89-92，1987
- 12) 自律走行システムの開発－直進走行の自動化研究－磁気方位セ

- ンサによる直進走行の自動化，昭和62年度事業報告，生研機構農業機械化研究所，61-62，1988
- 13) 坂上 修：施設内育苗ロボットの開発（第4報）－ロボット本体の改良とよこ移動装置，第48回農業機械学会年次大会講演要旨102-103，1989
- 14) 東北における輪換畑野菜作の機械化技術の開発－育苗ロボットの開発とその利用，昭和62年度総合農業試験研究成績・計画概要集，農業研究センター，30-31，1988
- 15) 小林 亨他：マイクロコンピュータによる桑園管理機の走行制御－自動走行実験機の試作，蚕糸試験場彙報，第133号，83-92，1988
- 16) 大下泰夫他：簡易施設栽培用自動走行管理機の開発（第1報）－光電センサによる走行制御と超音波センサによる草高検出－，第51回農業機械学会年次大会講演要旨，251-252，1992
- 17) スイートソルガム栽培の機械化作業技術の確立－畦間無人走行管理機，昭和62年度総合農業試験研究成績・計画概要集，農業研究センター，82-83，1988
- 18) 山下 淳他：農業車両のための高信頼性を有する自動操縦システム，第51回農業機械学会年次大会講演要旨，271-272，1992
- 19) 山下 淳：施設園芸用無人作業車，計測と制御，Vol.28.No.2，38-39，1989
- 20) レーザビーム軌道によるならい誘導技術，研究報告書，(株)農作物生育管理システム研究所，27-33，1997
- 21) 全自動無人防除システム，農機新聞，平成元年1月31日号，12，1989
- 22) 三竿善明：自動操向トラクタの開発（第1報）－コンピュータアイによるトラクタの自動操向，農業機械学会誌，第51巻第1号，21-28，1989
- 23) 本橋圀司，嶋田 浩他：トラクタの自律型，位置・地形認識装置について，農業機械学会東北支部報，第37号，13-16，1990

- 24) 大塚寛治他：施設内作業のロボット化に関する研究—インテリジェントバッテリーカーによる新作業方式，第49回農業機械学会年次大会講演要旨，269-270，1990
- 25) 端 俊一他：CCD作物列センサの無人走行車両への応用，第49回農業機械学会年次大会講演要旨，267-268，1990
- 26) 章 学軍，高井宗宏他：低速無人作業機の自動操向制御に関する研究（第1報），農業機械学会誌，第52巻第5号，19-26，1990
- 27) 乗用田植機の直進性向上に関する研究—電動ステアリングによる直進制御，平成元年度事業報告，生研機構 農業機械化研究所，71-72，1990
- 28) 藤本精吾他：水田作業管理ロボット，Acty21 Academic Agricultural Festival—美しい農業を目指して，農業機械学会，28-29，1992
- 29) 太田克行，寺尾日出男他：視覚センサによる農用車両の位置計測法の開発（第1報）—計測システムの試作，農業機械学会誌，第55巻第6号，59-67，1993
- 30) 石井一暢，寺尾日出男他：視覚センサによる農用車両の位置計測法の開発（第2報）—計測精度の検討と目標認識法の考案，農業機械学会誌，第56巻第2号，75-82，1994
- 31) 趙 炎水，寺尾日出男他：地磁気方位センサと位置計測システムを併用した自律走行システム，農業機械学会北海道支部報，第36号，1-6，1996
- 32) 山下光司他：乗用田植機のための走行制御システムの開発，農業機械学会関西支部報，第74号，47-48，1993
- 33) 木村勝一他：レーザガイドによる圃場内自動直進走行の試み，農業機械学会東北支部報，No.41，61-64，1994
- 34) 松尾陽介，行本 修他：ビジョンセンサと地磁気方位センサを用いた自律走行の研究，平成2～5(6)年度受託研究報告書，生研機構 農業機械化研究所，42P，1995
- 35) 野波和好他：乗用田植機の走行制御に関する研究（第2報），

- 農業機械学会誌，第 56 巻第 3 号，77-84，1994
- 36) 永田勝也他：自走式芝刈ロボットの設計と試作，日本機械学会
中国四国支部地方講演会講演論文集，Vol.1995，No.Yamaguchi，
239-240，1995
- 37) 井上慶一他：畑地自動走行トラクタによる光ファイバジャイロ
を利用した走行制御について，農業機械学会第 31 回関東支部年
次大会講演要旨，8-9，1995
- 38) 鳥居 徹：自律走行のための作物列の画像処理に関する研究（第
2 報），農業機械学会誌，第 57 巻第 6 号，53-59，1995
- 39) 果樹無人防除機の利用試験，平成 6 年度事業報告，生研機構 農
業機械化研究所，89-90，1995
- 40) 果樹園用パイプ誘導式防除用自動散布機の開発，平成 6 年度事
業報告，生研機構 農業機械化研究所，127-128，1995
- 41) 耕うんロボットの開発－試験用車両の改良と作業ソフトの開
発，平成 7 年度事業報告，生研機構，4-5,1996
- 42) 耕うんロボットの開発－航法装置の開発，平成 7 年度事業報
告，生研機構，2-3,1996
- 43) 岡戸敦史：飼料生産圃場における自律走行研究－光ファイバジ
ャイロと超音波速度計を使用した走行制御，農業機械学会アクテ
ィ 21－SAV 自律走行研究会講演要旨，34-35，1996
- 44) 玉城勝彦：傾斜草地における自律走行研究－施肥作業を前提と
したクローラ車両の自律走行，農業機械学会アクティ 21－SAV 自
律走行研究会講演要旨，36-37，1996
- 45) 並河 清：農業ロボットの自律走行車両の開発，平成 5，6，
7 年度科学研究費補助金（試験研究(B)(2)）研究成果報告書，25P，
1996
- 46) 鳥居 毅：芝刈ロボットとその航法装置，スバル技報，第 24
号，170-174，1997
- 47) 長坂善禎，大谷隆二他：ハイブリッドセンシングによる水田作
業車の自律走行の研究（第 1 報），農業機械学会第 56 回年次大会

講演要旨, 321-322, 1997

- 48) GPS 相対測位計による測位と誘導, 研究報告書, (株)農作物生育管理システム研究所, 42-47, 1997
- 49) 自律走行システムの開発－直進走行の自動化研究－磁気方位センサ TMS－II による自律直進走行, 昭和 63 年度事業報告, 生研機構, 9-10, 1989
- 50) 自律走行システムの開発－車両位置検出法の研究－自己位置検出用光電センサユニット PS－II の開発, 昭和 63 年度事業報告, 生研機構 農業機械化研究所, 5-6, 1989
- 51) 行本 修: 農用車両の自律走行[1], 農及園, 65(1), 143-148, 1990
- 52) N. D. Tillet : Automatic Guidance Sensors for Agricultural Field Machines: Review, J. agric. Engng res., (1991)50, 167-187, 1991
- 53) 堀尾尚志: 無人操向車両, 農業機械のロボット化に関する調査研究－調査報告書－, 農業機械学会, 57 - 66, 1987
- 54) W. D. Gilmour : An Automatic Control System for Farm Tractors, Journal of Agricultural Engineering Research, Vol.5, No.4, 418-432, 1960
- 55) L. A. Liljendahl, J. Strait : Automatic Tractor Steering, Agricultural Engineering, June 1962, 332-349, 1962
- 56) M. A. Grovum, G. C. Zoerb : An Automatic guidance System for Farm Tractors, Transactions of the ASAE, Vol. 13, 565-576, 1970
- 57) B. Bonicelli, M. O. Monod : A SELF-PROPELLED PLOWING ROBOT, ASAE PAPER No.87-1064, 11P, 1987
- 58) Jussi Monomen, Turo J. Nieminen, Jarmo Puputti : Teleoperation and Autonomous Guidance Systems for off-Road Vehicles, SAE Technical Paper Series, No. 941804, SAE, 8P, 1994
- 59) T. Hague, N.D. Tillet : NAVIGATION AND CONTROL OF AN AUTONOMOUS HORTICULTURAL ROBOT, Mechatronics, Vol.6, No.2, 165-180, 1996
- 60) 行本 修他: 自律走行システムの開発 (第 1 報), 平成 2 年度

- 研究報告会資料，生研機構，1-27，1991
- 61) 松尾陽介：圃場内走行自動化技術の現状と課題，農業技術，49(3)，
27 - 31，1994
- 62) 日本機械学会編：2.2.2メカトロニクスシステムの5大要素，メカ
トロニクス入門，技報堂出版，18，1985
- 63) 自動追従技術に関する研究－試験用車両と車両制御方法の開
発，平成8年度事業報告，生研機構 農業機械化研究所，18-19，
1997
- 64) 行本 修：耕うんロボットの航法装置－農用車両のロボット化と
航法装置・耕うんロボットの概況－，INTERNATIONAL SYMPOSIUM
ON MOBILE AGRICULTURAL BUS-SYSTEM LBS AND PA FOR THE
LARGE-SCALE FAAM MECHANIZATION Proceedings，農業機械学
会北海道支部，79-94，1997
- 65) Hermann Auernhammer：Electronische Traktor-Gerätekommunikation
LBS，INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MOBILE AGRICULTURAL
BUS-SYSTEM LBS AND PA FOR THE LARGE-SCALE FARM-
MECHANIZATION Proceedings，農業機械学会北海道支部，1-38，
1997
- 66) 航空電子システム編集委員会編：第3章航法システム，航空
電子システム，日刊工業新聞社，105，1983
- 67) 津村俊弘：移動体の知能化，計測と制御，vol.30，No.1，1-8，
1991
- 68) 行本 修：自律走行，生物生産機械ハンドブック，コロナ社，
375-382，1996
- 69) Karl Rushing 他：Developing the Driverless Tractor，
AGRICULTURAL ENGINEERING，MAY/1971，260～262，1971
- 70) 吉田実夫：生研報告 No.8 農作業の自動化研究の現状と展望，
生研機構，21～25，59～66，1989
- 71) M.G.Telle,U.D.Perdok：Field experiments with a leader cable
tractor guidance. ASAE Paper No.79-1069，1979

- 72) 小森谷 清他：移動ロボットの自律誘導の一方法，日本ロボット学会誌，Vol. 2, No. 3, 46-55, 1984
- 73) 盲導犬ロボット，先端技術5ロボット，筑波先端技術研究会編，(株)ラボネート，94-98, 1984
- 74) 油田信一：自律移動のロボットにおける知能化技術(2)ナビゲーションとガイダンス，日本ロボット学会誌，Vol.5, No.5, 71-74, 1987
- 75) 早川義彰他：ジャイロの種類と構造，計測と制御，Vol. 26, No. 2, 55-61, 1987
- 76) John F. Reid 他：An Algorithm for Computer Vision Sensing of a Row Crop Guidance Directrix, SAE TECHNICAL PAPER SERIES No.911752, 1-13, 1991
- 77) 端 俊一他：一次元イメージセンサによを使用した作物列センサ(第1報)，農業機械学会誌，54巻第1号，1992
- 78) 行本 修他：自律走行システムー無人作業トラクタ，ロボティクス・メカトロニクス講演会'93講演論文集，日本機械学会，1010-1015, 1993
- 79) 瀧川具弘他：軌跡記録装置による作業記録法の開発，農作業研究，第28巻別号1，92~93, 1993
- 80) Greg P. Gordon 他：LASER POSITIONING SYSTEM FOR OFF-ROAD VEHICLES,, ASAE Paper No.88-1063, 1-20, 1988
- 81) 久保田 守他：画像処理と知識システムによる移動体の認識方法，第55回農業機械学会年次大会講演要旨，273-274, 1996
- 82) 東口 實：移動体の位置計測技術，計測と制御，Vol.30, No.1, 9-14, 1991
- 83) 水町守志監修：GPS 導入ガイド，衛星測位システム協議会編，日刊工業新聞社，192P, 1993
- 84) (株)共立：共立ロボットスプレーカ取扱説明書，20P, 1990
- 85) クボタ鉄鋼株式会社：ワークショップマニュアルークボタコンバイン・ニュースカイロード G1 シリーズ・自動化装置編，315P,

1985

- 86) 行本 修, 瀧川具弘他: トラクターの位置検出技術, センサ技術, Vol.9, No.8, 68-71, 1989
- 87) 松尾陽介他: 自律走行システムの開発 (第2報), 平成5年度研究報告会資料, 生研機構 農業機械化研究所, 21-34, 1994
- 88) 本橋国圀他: Tractor Navigation System の開発に関する研究, 第50回農業機械学会年次大会講演要旨, 13-14, 1991
- 89) 高井宗広: 無人作業機の走行制御法について第1報基礎試験から実用機への移行, 第49回農業機械学会年次大会講演要旨, 265-266, 1990
- 90) 小林 亨: 桑園管理機の自動走行システムの開発に関する研究, 蚕試・昆虫農業研究所研究報告第6号, 112P, 1992
- 91) 行本 修他: 自律走行システムの研究 (第9報) - 自己位置検出用光電センサユニット・PS-Ⅲの開発, 第51回農業機械学会年次大会講演要旨, 257-258, 1988
- 92) 行本 修: Navigation Technologies in Agriculture-Review, 国際ハイテクフォーラム大阪 '95 Program & Text, 国際ハイテク・フォーラム大阪開催委員会, 89-93, 1995
- 93) 小林祥延, 三藤邦彦: ナビゲーションシステムと車載情報メディア, 自動車技術, Vol.43, No.2, 24-31, 1989
- 94) 後藤 博: 自動車用ナビゲーションシステム, 農業機械学会誌, 第53巻第5号, 99-104, 1991
- 95) 世界大百科事典-14, 平凡社, 712-717, 1969
- 96) 万有百科大事典-18, 小学館, 417-419, 1975
- 97) 浅沼修平: 電子コンパスの製作, トランジスタ技術, 1990年6月号, CQ出版社, 577-584, 1990
- 98) 生研機構: 自律走行システムの開発 - 直進走行の自動化研究 - 地磁気方位センサの方位角検出精度の向上, 平成元年度事業報告, 生研機構 農業機械化研究所, 3-4, 1990
- 99) 松尾陽介他: 自律走行システムの研究 (第6報), 第48回農業

機械学会年次大会講演要旨, 12-13, 1989

- 100) 生研機構：自律走行システムの開発－地磁気方位センサによる走行方位の検出と自律走行－磁気方位センサの方位角検出精度の向上, 平成2年度事業報告, 生研機構 農業機械化研究所, 3-4, 1991
- 101) 生研機構：自律走行システムの開発－直進走行の自動化研究－磁気方位センサの方位角検出精度の向上, 昭和63年度事業報告, 生研機構 農業機械化研究所, 7-8, 1989.
- 102) 伊藤勝美, 山口哲雄：芝刈機の自立誘導, 第1回アドバンティ・シンポジウム講演論文集, ビークルオートメーション技術研究会, 5-8, 1988.2.
- 103) 河村史郎他：自動車用ナビゲーション装置の開発, 自動車技術, vol.39, No.5, 525-531, 1985.
- 104) 生研機構：自律走行システムの研究－車両位置検出法の研究－自己位置検出用光電センサユニット PS-I の開発, 昭和63年度事業報告, 生研機構 農業機械化研究所, 5-6, 1989
- 105) 生研機構：自律走行システムの研究－光電センサによる車両自己位置の検出と自律走行－光電センサユニット PS-II の開発, 平成2年度事業報告, 生研機構 農業機械化研究所, 9-10, 1991
- 106) 平田 晃他：自律走行システムの研究（第5報）－自己位置検出用光電センサユニット・PS-I の開発,, 第48回農業機械学会年次大会講演要旨, 11-12, 1989
- 107) 生研機構：自律走行システムの研究－自律走行用航法装置の開発－航法のための情報処理システム, 平成3年度事業報告, 生研機構 農業機械化研究所, 7-8, 1992
- 108) 生研機構：自律走行システムの開発－非接触走行軌跡記録装置の開発, 平成元年度事業報告, 生研機構 農業機械化研究所, 13-14, 1990
- 109) 瀧川具弘他：非接触軌跡記録装置の開発（第1報）, 第49回農業機械学会年次大会講演要旨, 275-276, 1990

- 110) 生研機構：耕うんロボットの開発－航法装置の開発，平成6年度事業報告，生研機構 農業機械化研究所，11-12，1995
- 111) 行本 修他：耕うんロボットの開発（第1報）－構想と航法装置 XNAV，第54回農業機械学会年次大会講演要旨，225-226，1995
- 112) 行本 修他：耕うんロボットの開発（第2報）－航法装置 XNAV，第55回農業機械学会年次大会講演要旨，463-466，1996
- 113) 生研機構：耕うんロボットの開発－航法装置の開発，平成7年度事業報告，生研機構 農業機械化研究所，3-4，1996
- 114) 生研機構：耕うんロボットの開発－航法装置の開発，平成8年度事業報告，生研機構 農業機械化研究所，2-3，1997
- 115) 生研機構：自律走行システムの開発－直進走行の自動化研究－磁気方位センサによる直進走行の自動化，昭和62年度事業報告，生研機構 農業機械化研究所，61-62，1988
- 116) 生研機構：自律走行システムの開発－直進走行の自動化研究－地磁気方位センサを用いた自律走行の高精度化，平成元年度事業報告，生研機構 農業機械化研究所，5-6，1990
- 117) 生研機構：圃場作業ロボット－制御・運用システムの開発－TMSによる車両制御方法の改良，平成5年度事業報告，生研機構 農業機械化研究所，5-6，1994
- 118) 生研機構：圃場作業ロボット－制御・運用システムの開発－航法用センサの改良とALVA-IIによる自律走行，平成4年度事業報告，生研機構 農業機械化研究所，9-10，1993
- 119) 生研機構：圃場作業ロボット－制御・運用システムの開発－TMS，VSXによる車両制御方法の改良，平成6年度事業報告，生研機構 農業機械化研究所，5-6，1995
- 120) 生研機構：自律走行システムの開発－自律走行用車両制御ソフトの開発，平成3年度事業報告，生研機構 農業機械化研究所，11-12，1992
- 121) 行本 修，松尾陽介，野口 伸，鈴木正肚：耕うんロボット

- システムの開発（第1報）－位置認識システムと地磁気方位センサを併用した無人作業の構想と作業計画生成法－，農機学会誌 60(3), 37-44, 1998
- 122) 行本 修，松尾陽介，野口 伸，鈴木正肚：耕うんロボットシステムの開発（第2報）－位置認識システムと地磁気方位センサを併用した無人作業における直進制御法－，農機学会誌，60(4), 29-36, 1998
- 123) 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，30(1), 64-71, 1994
- 124) 野口 伸，石井一暢，寺尾日出男：ニューラルネットワークとGAの融合による車両運動制御（第2報），日本機械学会第3回FANシンポジウム講演論文集，467-470, 1993
- 125) 生研機構：耕うんロボットの開発－作業ソフトの開発，平成8年度事業報告，生物系特定産業技術研究推進機構 農業機械化研究所，4-5, 1997
- 126) 行本 修，松尾陽介，野口 伸，鈴木正肚：耕うんロボットシステムの開発（第3報）－位置認識システムと地磁気方位センサを併用した無人作業における90°旋回・幅寄せ制御の高精度化－，農機学会誌，投稿中，1998
- 127) Noguchi, N., K. Ishii, H. Terao : Development of an Agricultural Mobile Robot using a Geomagnetic Direction Sensor and Image Sensors, Journal of Agricultural Engineering Research, in press
- 128) Erbach, D.A., C.H. Choi, K. Noh: Automated Guidance for Agricultural Tractors, Automated Agriculture for the 21st Century, ASAE, 182-191, 1991
- 129) 生研機構：耕うんロボットの開発－作業ソフトウェアの改良，平成9年度事業報告，生物系特定産業技術研究推進機構 農業機械化研究所，4-5, 1998
- 130) 耕うんロボットの開発－性能試験方法と試験結果，平成9年

度事業報告，生研機構 農業機械化研究所，6-7，1998

131) 寺尾日出男：耕うんロボットの委託試験報告書，北海道大学，15P，1997

132) 山形県農業試験場：新規開発農業機械の性能評価(3)耕うんロボットの性能調査，農業機械開発改良試験研究打ち合せ会議資料 No.2 水田作・畑作関係平成9年度成績概要，生研機構 農業機械化研究所，10-13，1998

133) 行本 修：農業用車両のロボット化の課題と展望，農業機械学会誌，第58巻第1号，133-139，1996

Summary

1. Introduction (Abstract of Section 1)

Japanese farmers will soon be able to reduce its agriculture production costs by expanding management size and increase its profitability by upgrading its agricultural products to those with a higher value added. Automatization and unmanned operation of agricultural machines are necessary to reduce production costs by saving labor in large-scale operations.

Agricultural vehicle operation can be divided into three categories: "vehicle operation" (maneuvering the vehicle itself); "implement operation" (adjusting the implement and replenishing materials); and "planning and management" (establishing a work strategy that is suitable for a particular field or performing maintenance and inspection of the machines). Implement operation is currently used for the automatization and unmanned operation of newer agricultural machines, while the only remarkable achievement in vehicle operation is the equipment of automatic steering control with row tracking on head-feeding combine harvesters. There are few automatization examples of planning and management. As a result, while the operator's workload is significantly reduced in the newer agricultural machines, unmanned operation has not yet been achieved, and labor costs remain at their previous levels.

The purpose of this study is to substantially reduce labor costs by automatizing a portion of the planning and management area, such as planning the operating path for a particular field, and implementing unmanned vehicle operation. This paper summarizes a series of studies that has been conducted since 1987 under the title of "Studies to Develop Intelligence in Autonomous Tilling Robots."

Previous related studies reveal that developments in unmanned travel began overseas in 1962 and in Japan around 1972. While methods to operate the steering mechanism directly by mechanical sensors were used in early studies, the fixed route navigation system, free route navigation system by internal information were subsequently reported, along with the development of sensor technology and control technology. Many studies using GPS as the navigation sensor are recently reported. However, many reports still indicate problems, such as an incomplete navigation system, a poorly established path planning method, and insufficient work stability and/or reliability. Therefore, this study is aimed at achieving the following with a

free route navigation system, which is applicable to many types of field operations:

- 1) autonomous generation of work path plans;
- 2) unmanned processing of an entire field; and
- 3) assurance of high reliability and stability of unmanned operation through flexible adaptation to fields that are exposed to severe changes in environmental conditions.

6.2 Manufacture of Vehicle System Prototypes (abstract of Section 2)

Agricultural vehicles for unmanned operation require functional elements that are nearly on a level with those of the human body. These elements are similar to the five main elements of common mechatronics systems. Among these elements, the motion mechanics function and energy supply function can be attained through the accumulation of existing agricultural vehicle technology. However, the navigation sensor for the sensing function and the operating software for the decision making functions can be achieved only after new engineering developments are achieved in agricultural work machines. Operating conditions for agricultural vehicles differ from those in other industries; low cost and enhanced reliability and handling ability are necessary from the start of research and development.

The work methods for and effects of robotized agricultural vehicles are as follows:

- 1) In autonomous straight operation, improved efficiency results from the reduced halt time required by the agricultural vehicle to replenish materials; labor-saving effects can be expected if the operator can concurrently play the role of the assistant.
- 2) In autonomous vehicle following, the number of operators can be reduced with multiple agricultural vehicles doing combined work and thus reduce the labor.
- 3) In full autonomous operation, the whole field area can be processed by fully unmanned operation, so a single operator can operate multiple robotized agricultural vehicles simultaneously and thus demonstrate extreme labor saving effects.

This paper sets full autonomous operation as the target and designates autonomous straight operation and autonomous vehicle following as secondary goals.

Prototypes of the vehicle system from the No. 1 machine, ALVA-I, to the No. 3 machine, ROBOTRA, were developed with relatively simple configurations to enable the following vehicle properties:

- 1) each part can be operated by means of electrical signals from the controller;
- 2) it is equipped with the minimum required highly reliable internal information sensors;
- 3) the manual operating function enables movement from one field to another; and
- 4) there are safety devices, such as the emergency stopping mechanism.

These vehicle systems were successfully subjected to various types of tests without any serious problems and met the expected requirements. The ROBOTRA, in particular, displayed fully satisfactory controllability, endurance, and reliability.

3. Navigation System (abstract of Section 3)

There are various formulas for the navigation system, a basic element of the tilling robot; existing navigation systems have advantages and disadvantages depending on the method they use. Considering the characteristic operating conditions and costs of agricultural vehicles, no existing navigation system should be adopted for a tilling robot. Therefore, it is necessary to configure a new navigation system that is suitable for agricultural vehicles. The tilling robot has certain target specifications, including an operating area of $100\text{ m} \times 50\text{ m}$ or more, a positioning error of 5 cm or less, and an azimuth detection error of 0.1° or less, which make it applicable to most farms in Japan and assure a work performance exceeding that of conventional methods. Given these operating conditions and accuracy requirements, the following features are suitable for a navigation system for use on tilling robots:

- 1) detection of the vehicle heading using a terrestrial magnetism sensor, which is low in cost but produces few drifting errors;
- 2) positioning by means of a beacon system, which is free of accumulated errors; and
- 3) use of composite sensors to compensate for rolling and pitching errors of the vehicle and ensure safety performance.

We examined the use of a flux-gate type terrestrial magnetism sensor (TMS) for the azimuth detecting sensor. The TMS uses very weak magnetism on an agricultural vehicle exposed to rolling and pitching, as well as being a magnetic substance, which required the development of high-precision inclination calibration techniques and magnetism calibrations. We discovered that compensation along the Z axis was not necessarily required in inclination calibrations and that obtaining the calibrated value by approximating a circle of the measured

values was adequate for calibrating the magnetism environment. After devising these calibration methods, a repeatability accuracy of 0.3° during autonomous returning operation was successfully assured. Although this was below the target specification of 0.1° , this sensor was judged applicable to tilling robots. We noted the importance of the mounting position of the TMS body, the influences of surrounding structures for which magnetism environments cannot compensate, and the method for selection and use of the inclination sensor to measure rolling and pitching.

Autonomous traveling can be implemented to some extent using the TMS alone as the navigation sensor. To accurately control the start and end positions of a path and the pitch between paths, it was necessary to develop a navigation system that could obtain absolute position information without relying on internal information.

We therefore developed the XNAV system with a beacon and traverse surveying that uses a laser range sensor as the main component. The prototype of XNAV-I constantly tracks the target, consisting of a strobe light and a light-reflecting target that is mounted on the vehicle (mobile station), using a TV camera mounted on the transit of the reference station. While the horizontal and elevation angles of the transit are automatically controlled so that the target is always in the center of the TV screen, the laser range sensor, with its optical axis aligned with that of the TV camera, measures the diagonal distance to the target. The position of the target is calculated from this diagonal distance using the horizontal and elevation angles. The performance of the XNAV-I is described below.

- 1) An average position detection error of 4.6 cm in absolute value was assured at a data update cycle of 0.52 s and with no compensation for rolling and pitching at the target point.
- 2) During continuous measurement for 15 min, the sight of the target was lost six times due to a steep turn by the vehicle.
- 3) While re-tracking was made automatically by the automatic target searching function in four out of the six times in 2), re-tracing by manual operation was required for the other two instances.

We began modifying the system, primarily to further improve the target tracking reliability. During that modification, an auto-tracking surveying system, AP-L1, with the same basic measurement principle as our system, was put on the market by a measuring instrument

manufacturer. Tests performed on the AP-L1 revealed that, apart from some cost problems, the performance and reliability of this system fully meet the requirements of the tilling robot. We suspended our modification of the XNAV-I and configured a position measuring system for the agricultural vehicle, XNAV-II, using the AP-L1 as the main component. We confirmed that the XNAV-II enables position measurement at an error of a few cm or less and at a cycle of 0.5 s from a distance of 500 m.

4. Development of Traveling Control Programs (abstract of Section 4)

We developed operating software, called ASR, which uses the TMS. A certain level of returning operation was enabled by the ASR, but the pitch performance was unstable due to large fluctuations in the turning radius arising from the ground conditions, which resulted in considerably large untilled areas or overlapping work areas. Although the turning positions were relatively well aligned on a certain line, sometimes the turning positions, i.e. the start and end positions of a path, deviated from such a line due to slippage or dash of the vehicle and, due to the navigation principle, such deviations would not be corrected until the last path is finished. The straight operating control described in this section, whereby the vehicle travels autonomously by maintaining the given target heading direction, has an running heading control accuracy of 0.3° at a running speed of 0.5 m/s; this accuracy allows for a lateral deviation of 50 cm after running a distance of 100 m. Although the accuracy of autonomous work achieved by the ASR is a result of optimal use of the TMS by adopting various compensating methods, further improvements in the accuracy of the azimuth detection by the TMS may not lead to further improvement of the autonomous traveling accuracy for the following circumstances.

- 1) The ASR is a dead-reckoning system based on internal information and can not accommodate lateral slippage of the vehicle due to ground conditions.
- 2) Limited controllability of the vehicle (particularly the steering control speed) restricts improvements to the accuracy.

The largest value of autonomous traveling using the TMS is that its navigation sensor system is low in cost and simple and can be implemented to complement systems that use other types of navigation equipment, or as partially automatized straight operating control in manned operations.

Operating software using the XNAV system is based on the assumption that the vehicle heading is obtained successively from the TMS, which is used concurrently. The objective is to perform fully unmanned tilling of an entire field (assuming a nearly horizontal rectangular field) in a conventional manner using a returning operation method in the central portion of the field and a roundabout operation on the peripheral area, including the headland portion. The operating software consists of a task planning section and a traveling control section.

The size and shape of the lot are taught during the first manual run around the field, starting and ending at the entrance of the lot boundary. The target operating path is generated before work commences, based on the target heading information and the taught boundary position information, i.e., path planning is performed. The task planning section consists of the teaching module and the path planning module.

In the traveling control section that controls the vehicle, the target operating path is divided into the transference module, returning operation module, roundabout operation module, etc. Each module is composed of the following:

- 1) a straight operating control routine to perform straight operating control to maintain the target operating path;
- 2) a 180° turning routine to perform a turn at the end of each returning operation path;
- 3) a sideways movement routine to perform lateral positioning of the vehicle at the starting end of each operating path;
- 4) an outer peripheral 90° turning routine to perform 90° turns on the outermost path of roundabout operation so that the vehicle does not exit the field lot; and
- 5) an inner peripheral 90° turning routine to perform 90° turns on inner paths other than the outermost path of roundabout operation so that the total length of wheel tracks on the tilled area is minimized.

The following were taken into consideration when the software was configured:

- 1) Additional precise control is implemented through the position estimation by dead reckoning by further dividing the position information acquisition cycle of 0.5 s on the XNAV.
- 2) The relationship between the controlled variable and the trace of movement is learned during the first turning operation, since the relationship between the steering angle and the movement

of the vehicle is not constant due to changes in ground conditions. A properly controlled variable is obtained thereafter based on the result of the learning.

Early detection of any failure or problem in the sensor, control system, actuator, the vehicle itself, or the implements is difficult during unmanned operation, and it is possible that a minor failure will induce other failures and ultimately result in a serious problem. The operating software incorporates a self-diagnosis and abnormality alarm system for early detection of such failures and problems. The functions of each system are as follows:

1) The self-diagnosis system checks various functions by activating respective sensors and actuators and further checks the propriety of the initial setting for unmanned operation using internal sensors. Self diagnosis is executed automatically upon the completion of the initial setting of the operating software. If a fault is detected, the content of the fault is conveyed to the operator by an alarm sound and display.

2) The abnormality alarm system detects any failure or problem based on the navigation data obtained during the execution of unmanned operation, as well as the values detected by internal sensors and constant functions during work. Any abnormality in the navigation system will be detected from the acquired position information and positional fluctuation, where any problems, such as slippage, dash, or engine overload will be detected based on the speed calculated from the position information. If any abnormality is detected, the system will notify the operator by an alarm sound, alarm light, and display, and, depending on the situation, will either wait for a return to the normal state while continuing work or automatically stop to wait for measures to be taken by the operator. If measures are required by the operator, work will be restarted after such measures have been taken.

Repetitive tests and modifications in the field have enabled this operating software system using the XNAV to execute work of almost the same quality as conventional manned operation, and thus the expected goal has been sufficiently met.

5. Evaluation of the Tilling Robot (abstract of Section 5)

The tilling robot described above was subjected to tests in cultivated fields to evaluate its practicability.

At the time of evaluation there were no available test methods or evaluation criteria to

enable proper assessment of tilling robots under unmanned operation. While we established new test methods, we also determined evaluation criteria applicable to common unmanned operation of agricultural vehicles. The test methods consist of the following:

- 1) work performance tests to evaluate work efficiency, labor saving effects, and work accuracy;
- 2) handling tests to evaluate initial settings, ease of operating each part, and ease of installing each device; and
- 3) reliability tests to evaluate environmental resistance and durability as well as any problems that may arise due to bugs in operating software and/or changes in field conditions. Work performance tests included evaluation items for operator efficiency and the operator binding time ratio to evaluate the labor saving effects. They also included evaluation items for straight operating performance, average deviation in a straight operation, and parallelism of a straight operation to evaluate the straight operating control performances of the vehicle.

According to the test methods thus established, tests were conducted in (No. 1) a plowed field at the Hokkaido University experimental farm (test area: 24 a), (No. 2) a paddy field at a farm in Yamagata Prefecture (test area: 50 a), and (No. 3) a paddy field at the IAM-BRAIN experimental farm (test area: 50 a). Conventional work was also performed in No. 2 and 3 by a skilled operator under the same conditions as those for unmanned operation as the control to evaluate the work performance of the tilling robot. The target tilling depth for rotary tilling was set at 12 cm, the PTO speed was set at the minimum speed on the assumption of fall tillage, and the maximum work speed was selected within a range that prevents engine overload.

The test results are as follows:

- 1) Although the work efficiency was almost equal to that of conventional work, it took more than ten minutes to install the reference station and execute the initial settings, regardless of the size of the test area, so the total work time was extended. However, the operator was required only during this initial period, and he was required only during a few minutes per 10 a in a lot of 50 a, so substantial labor saving was achieved in tilling work.
- 2) In regard to work accuracy, although the remaining untilled area was almost equal to that of conventional work, the total length of wheel tracks on the tilled area was larger than, and thus inferior to, that of conventional work. The tilling robot was superior to conventional work under almost every condition of straight operating performance, average deviation in straight operation,

and parallelism of straight operation.

3) A poor view of the display during the initial setting and some errors in the instruction manual were noted in the operating tests.

4) No problems occurred in the reliability tests and there were no problems in the operation of devices or control of the vehicle, even after/under a rainfall or under soft ground conditions in No. 1 and No. 2.

Apart from the evaluation tests described above, unmanned tilling work was performed over an area of 10 ha using the same system as used in these tests for various demonstrations and tests. During these operations, a minor problem arose when an observer obstructed the beam of the XNAV and the tilling robot was stopped automatically by the abnormality alarm function and then restarted work automatically when position information was obtained again from the XNAV. This was the only problem that occurred. The work speed varied from 0.1 to 1.1 m/s while the tests were being performed; smooth work was possible although the work accuracy decreased slightly at higher speeds. In summary, the expected target was achieved by this tilling robot.

In addition to improving the poor display view and making other adjustments, the following measures will be taken in the future for the tilling robot itself:

1) Tests will be performed under more contrasting conditions so that the robot can take precise measures against any abnormalities that were not encountered during our performance tests.

2) Although all of the current abnormality alarm functions and emergency stopping mechanism functions are effected by the vehicle controller, verification tests will be performed and necessary measures taken to assure safety even if the vehicle controller fails.

3) Considering the management size of farms and working integration, demonstration tests will be performed to establish efficient ways to utilize tilling robots, such as simultaneous operation of multiple robots and the types and methods for other work to be performed by the operator after the initial setting is completed.

In addition, substantially increased labor saving will be possible for farmers if the following are implemented:

1) development of work methods unique to unmanned operation;

2) development of software that enables unmanned operation on declined lands and irregularly

formed fields; and

3) development of software that enables expansion of the applicable range of unmanned operation to work other than tilling.

本論文では、自律移動ロボットに関して二一五、歴史、利用の概
概、技術技術、ロボット車両、航法システム、制御システム、評価
方法などがかなり広い範囲から論じました。研究の過程で完成した耕
うろロボットは現時点で市販化には至っていませんが、将来何ら
の形で普及していくものと想定しています。著者が本研究に着手
した昭和六十一年代はじめの頃は、本邦を中心に農業の機械化は既に
達成されたと思われていた。果たかも農業機械技術者の役割は終わった
かのような議論も耳にした記憶があります。そこで当時筆者の上司
であった鈴木正社氏をはじめとする諸先輩方との議論の末に、日本
農業の将来を見据えたうえで、経済力的な産業体系の確立を目指し
た本研究の課題が生まれました。

当時比べ、コンピュータ技術をはじめセンサ、アクチュエータ
など本研究の具体的な構成要素は、筆者の想像を遙かに超える進歩
を遂げてきました。例えば、GPS技術によって数cmの精度で移動
体の位置検出が可能になることは、夢にも考えられませんでした。

本研究は、課題の設定から今日に至るまで諸先輩、同僚、後輩、
共同研究者のご支援は勿論のこと、関連技術の進歩とその先端技術
を著者が利用できる形で提供して下さった方々のご助力により進
展してきたものです。

本論文をまとめるにあたり、北海道大学大学院農学研究所、寺尾
日出男教授には、適切なご指導と有益なご助言を賜りましたことに、
固く感謝の意を表します。また同研究所、高沖廣空教授、同研究
科、野口一伸助教授、ならびに北海道大学工学部、高敷雅彦
教授には適切なご意見とご指導を賜り深く感謝の意を表します。

また本研究を企画し、実施するにあたっては、生研機構、伊藤利
彰元研究検査担当理事、同、管原敏夫副研究検査担当理事、同、木
田恭博研究検査担当理事、同、三浦恭志部元基礎技術研究部長、同

謝 辞

本論文では、自律移動ロボットに関してニーズ、歴史、利用の戦略、要素技術、ロボット車両、航法システム、制御システム、評価方法などかなり広い範囲から論じました。研究の過程で完成した耕うんロボットは現時点で市販化には至っていませんが、将来何らかの形で普及していくものと自負しています。著者らが本研究に着手した昭和60年代はじめの頃は、水田を中心に農業の機械化は既に達成されたと見なされ、あたかも農業機械技術者の役割は終わったかのような極論も耳にした記憶があります。そこで当時筆者の上司であった鈴木正肚氏をはじめとする諸先輩方との議論の末に、日本農業の将来を見据えたうえで、超省力的な作業体系の確立を目指した本研究の課題が生まれました。

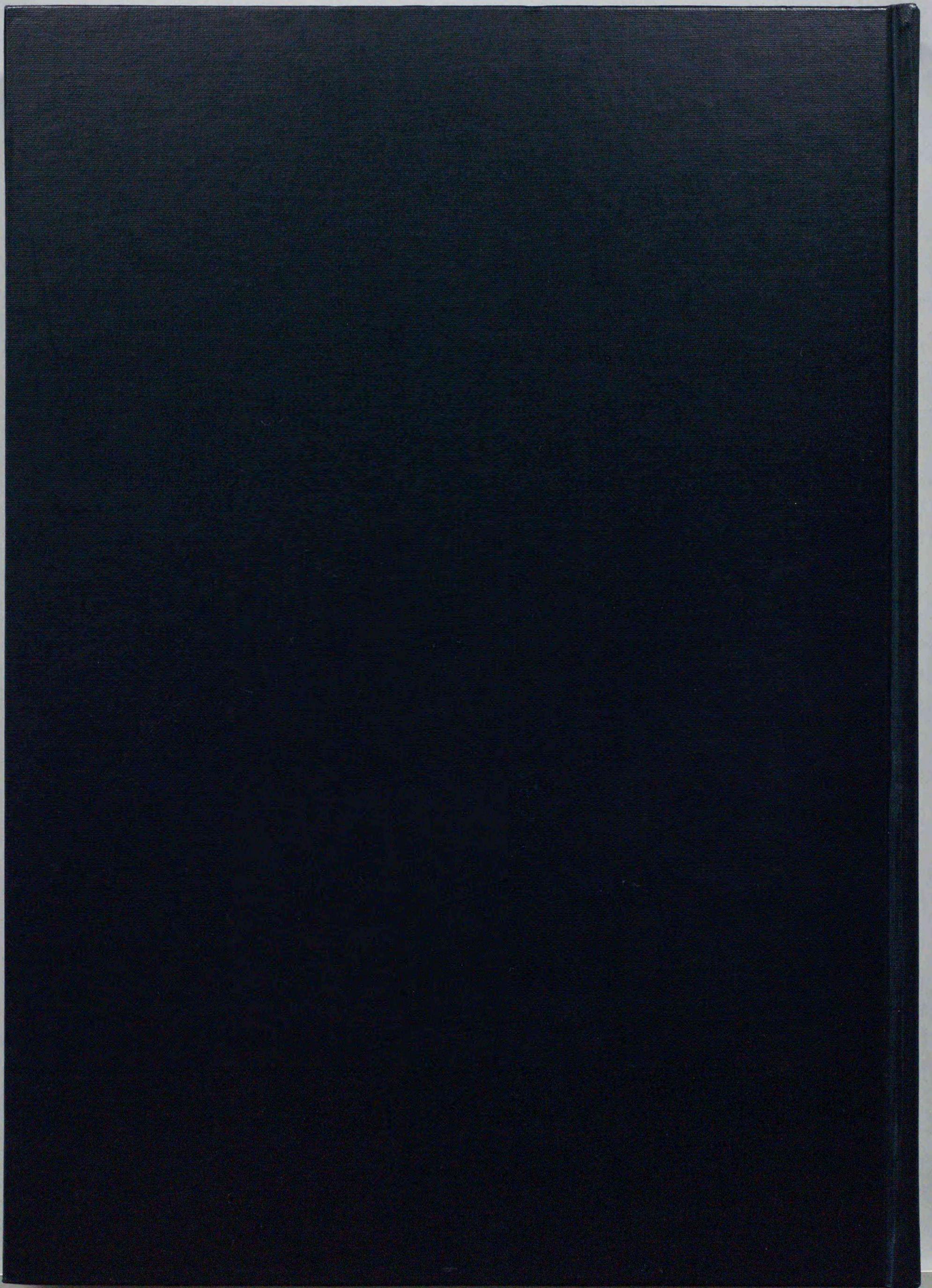
当時に比べ、コンピュータ機器をはじめセンサ、アクチュエータなど本研究の具体的な構成要素は、筆者の想像を遙かに超える進歩を遂げてきました。例えば、GPS技術によって数cmの精度で移動体の位置検出が可能になるうとは、夢にも考えられませんでした。

本研究は、課題の設定から今日に至るまで諸先輩、同僚、後輩、共同研究者のご支援は勿論のこと、周辺技術の進歩とその先端技術を筆者らが利用できる形で提供して下さった方々のご助力により進展してきたものです。

本論文をまとめるにあたり、北海道大学大学院農学研究科 寺尾日出男教授には、懇切なご指導と有益なご助言を賜りましたことに、謹んで感謝の意を表します。また同研究科 高井宗宏教授、同研究科 野口 伸助教授、ならびに北海道大学工学研究科 嘉数侑昇教授には適切なご意見とご指導を賜り深く感謝の意を表します。

また本研究を企画し、実施するにあたっては、生研機構 芦沢利彰元研究検査担当理事、同 管原敏夫前研究検査担当理事、同 木田滋樹研究検査担当理事、同 三浦恭志郎元基礎技術研究部長、同

諏澤健三元基礎技術研究部長，同 鈴木正肚元基礎技術研究部長から励ましと貴重な助言を頂きましたこと，ここに深く感謝いたします。本研究の途上で内部共同研究に快くご協力を頂いた生研機構 森芳明評価試験部長，論文のとりまとめにご支援を頂いた同 鷹尾宏之進基礎技術研究部長，共に研究を進めた元同僚の瀧川具弘君，そして本研究の多くに直接関与した同僚である松尾陽介君に改めて感謝の意を表します。さらに(株)クボタ，日本航空電子工業(株)の皆様ならびに北海道大学大学院農学研究科 野口 伸助教授には，研究の過程で共同研究者としてご協力をいただきました。ここに記して関係各位に謝意を表します。



inches
cm
1 2 3 4 5 6 7 8
1 2 3 4 5 6 7 8
1 2 3 4 5 6 7 8

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 **M** 8 9 10 11 12 13 14 15 **B** 17 18 19

