

ISSN 1341-0148

農業機械化研究所研究報告

第32号

Technical Report
of
Institute of Agricultural Machinery
(Nougyo Kikaika Kenkyusyo)
Saitama, Saitama, Japan
No.32 September 2001

農機研報

Tech. Rep.
Inst. of Agric.
Mach.
32:1-180
Sep. 2001

平成13年9月

生物系特定産業技術研究推進機構
農業機械化研究所
埼玉県さいたま市日進町1丁目

生物系特定産業技術研究推進機構
農業機械化研究所

Institute of Agricultural Machinery

(Bio-oriented Technology Research Advancement Institution)

編集委員会

Editorial Committee

津賀幸之介 (委員長)

Konosuke TSUGA (Chief)

森 芳明

Yoshiaki MORI

氣多 正

Tadashi KETA

鷹尾宏之進

Hironoshin TAKAO

市川友彦

Tomohiko ICHIKAWA

長木 司

Tsukasa NAGAKI

福森 功

Isao FUKUMORI

北村 誠

Makoto KITAMURA

総 目 次

1. 行本 修・松尾陽介・野口 伸・鈴木正肚
耕うん作業を行う自律移動ロボットに関する研究 1

2. 古山隆司・道宗直昭・福森 功・中川靖夫
周波数可変方式による乳量計測法の開発 97

Technical Report of the
Institute of Agricultural Machinery
(Nogyo Kikaika Kenkyusyo)
No.32 September 2001

Contents

1. Osamu YUKUMOTO · Yosuke MATSUO · Noboru NOGUCHI · Masato SUZUKI
Study on Autonomous Traveling Robot for Tilling Operations..... 1

2. Takashi FURUYAMA · Naoaki DOSHU · Isao FUKUMORI · Yasuo NAKAGAWA
Development of a Milk Volume Measurement Method Using
the Dctection of Resonance Frequency 97

農業機械化研究所研究報告 第32号

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・松尾陽介・野口 伸・鈴木正肚

目 次

行本 修・松尾陽介・野口 伸・鈴木正肚
 耕うん作業を行う自律移動ロボットに関する研究

量記号一覧	-----	i
緒 言	-----	1
1 自律移動ロボット研究の現状, 背景, 目的と構成要素	-----	1
1.1 農用車両の自動化の現状	-----	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	-----	2
1.4 自律走行の歴史と問題点	-----	3
1.4.1 既往の研究史	-----	3
1.4.2 既往研究の問題点	-----	4
1.5 要素技術	-----	7
1.5.1 要素技術の内容	-----	7
1) エネルギー供給機能及び運動機能		
2) 情報伝達・信号変換機能		
3) 判断・知能機能		
4) 感覚認識機能		
1.5.2 要素技術の留意点	-----	9
1.6 作業法と可能性	-----	9
1.6.1 自律的作業方法	-----	9
1.6.2 効果と可能性	-----	10
1.7 摘 要	-----	10
2 車両システム	-----	11
2.1 車両システム	-----	11
2.2 試作1号機 (ALVA-I)	-----	12
2.2.1 ハードウェア構成	-----	12
2.2.2 制御性能	-----	13
2.2.3 性能評価	-----	14
2.3 試作2号機 (ALVA-II)	-----	14
2.3.1 ハードウェア構成	-----	14
2.3.2 制御性能	-----	15
2.3.3 性能評価	-----	16
2.4 試作3号機 (ROBOTRA)	-----	16
2.4.1 ハードウェア構成	-----	16
2.4.2 制御性能	-----	18

2.4.3	性能評価	19
2.5	摘要	19
3	航法システム	19
3.1	航法システムの現状	20
3.1.1	システムの分類	20
1)	固定経路方式	
2)	半固定経路方式	
3)	内界情報方式	
4)	外界情報方式	
5)	外部標識方式	
3.1.2	システムの現状	22
1)	固定経路方式	
2)	半固定経路方式	
3)	内界情報方式	
4)	外界情報方式	
5)	外部標識方式	
6)	現 状	
3.1.3	考察とまとめ	24
3.2	地磁気方位センサシステム (TMS) の開発	25
3.2.1	地磁気とセンサの概要	26
1)	地磁気の性質	
2)	地磁気方位センサの構造と方位の検出	
3.2.2	傾斜補正法	27
3.2.3	磁気環境補正法	28
1)	車両自身の影響	
2)	構造物や他の車両の影響	
3)	その他の影響	
3.2.4	性能評価	30
1)	傾斜補正	
2)	磁気環境補正	
3)	構造物や他の車両の影響	
3.2.5	考察とまとめ	31
3.3	光波測距式位置計測システム (XNAV) の開発	32
3.3.1	計測原理	32
1)	位置計測原理	
2)	傾斜補正	
3.3.2	システムの開発	33
1)	機器の構成	
2)	計測ソフトの特徴	
3.3.3	性能評価	35
3.3.4	考察とXNAV-II への展開	36

1) XNAV- I への考察	
2) XNAV- II	
3.4 摘要	3 7
4 走行制御アルゴリズムの開発	3 8
4.1 はじめに	3 8
4.2 地磁気方位センサシステム (TMS)による無人作業	3 8
4.2.1 作業方法	3 8
4.2.2 制御システム	3 9
1) ASR- I	
2) ASR- II	
4.2.3 支援システム	4 0
1) ティーチングソフト (TEACHING- I, - II)	
2) TMS磁気環境補正值取得ソフト (MAG. CAL- I, - II)	
3) 舵角中央値較正ソフト (STA. CAL- I)	
4) 自己診断ソフト (MONITOR- I)	
4.2.4 作業の実行	4 1
1) ASR- I の制御例	
2) ASR- II による圃場試験	
4.2.5 評価と考察	4 4
4.3 光波測距式システム (XNAV)による無人作業	4 4
4.3.1 作業方法	4 4
1) 作業の戦略	
2) タスクの分割と構成	
4.3.2 制御システム	4 6
1) ティーチング走行モジュール	
2) 作業計画モジュール	
3) 走行制御	
4.3.3 支援システム	5 5
1) 自己診断	
2) 異常時対応機能	
3) その他	
4.3.4 作業の実行	5 8
1) 経路計画	
2) 直進制御	
3) 180° 旋回	
4) 90° 旋回	
5) 幅寄せ	
4.3.5 評価と考察	6 4
4.4 摘要	6 4

5	ロボットの評価	6 5
5.1	評価方法	6 5
5.1.1	作業性能試験	6 5
	1) 試験の条件	
	2) 試験方法	
	3) 評価	
5.1.2	取扱い性試験	6 9
	1) 試験の条件	
	2) 試験方法	
	3) 評価	
5.1.3	信頼性試験	6 9
	1) 試験の条件	
	2) 試験方法	
	3) 評価	
5.2	作業状況	7 0
5.2.1	試験条件等	7 0
5.2.2	作業性能	7 1
5.2.3	取扱い性	7 6
5.2.4	信頼性	7 6
5.2.5	その他	7 7
5.3	自律走行システムの展望	7 7
5.4	導入条件	7 7
5.5	摘要	7 7
6	総括	7 8
6.1	自律移動ロボット研究の現状, 背景, 目的と構成要素	7 8
6.2	車両システム試作	7 9
6.3	航法システム	7 9
6.4	走行制御アルゴリズムの開発	8 0
6.5	耕うんロボットの評価	8 1
	謝辞	8 2
	参考文献	8 3
	Summary	8 9

Osamu Yukumoto, Yosuke Matsuo, Noboru Noguchi, Masato Suzuki

Contents

Introduction	1
1. Review, background, purpose and the elements of the research on autonomous traveling robot	1
2. Manufacture of Vehicle System Prototypes	11
3. Navigation System	19
4. Development of Traveling Control Programs	38
5. Evaluation of the Tilling Robot	65
6. Conclusion	78
Acknowledgement	82
References	83
Summary in English	89

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_o : 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° 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
: P I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 [°] または [m s]
- l_a : 前進方向への標識位置前方変換距離 [m]
- l_k : QB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 [mG]
 M_v : 地磁気の鉛直分力 [mG]
 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
 : 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_r : 走行停止位置 [m]
 r_o : 後進旋回終端時の後進旋回半径 [m]
 r_i : 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, 標識等のロータリング角, 進行方向左上りを正とする [°]
 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_{ti} : 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_{ot} : 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} : 操舵時間 [$^{\circ}$ /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]
 $X-Y$: 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) : x_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) : x_B における後車軸中心位置 [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_l, y_l) : 後進旋回後の前進旋回中心 [m]
 (x_o, y_o, z_o) : $x-y$ 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_o, Y_o, Z_o) : 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_r : 車両中心軸と距離 l_r を示す線のなす角 [°]
 Δ_d : 作業ピッチ [m]
 $\Delta \gamma_i$: ASRにおける横方向偏差 [m]
 $\Delta \gamma(t)$: 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_T : 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 : x_A における車両の進行方位 (y 軸を基準) [°]
 θ_B : x_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 : x_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_{TC} : 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_d : 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_d の差 [°]
 ϕ_i' : 磁気環境補正後の地磁気の偏角 (方位角) [°]
 x_A : 外周周り作業の作業行程終点状態
 x_B : 外周周り作業の後進旋回終点状態
 x_i : ティーチングセグメント
 ϕ : 地磁気の俯角 [°]
 ϕ_i : 操舵制御量 [°] または [ms]
 ϕ_i : 離散系で表した舵角制御値 [°]
 $\phi(t)$: 時刻 t における舵角制御値 [°]

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*・松尾陽介**・野口 伸***・鈴木正肚****

2000-9-25 受理

- * 基礎技術研究部（現農業技術研究機構中央農業総合センター）
- ** 基礎技術研究部
- *** 北海道大学
- **** 基礎技術研究部（現新潟大学）

抄 録

本研究の目的は、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り、作業機操作の自動化を前提にして、1枚の圃場に対する作業経路計画のような企画・管理の一部を併せて自動化し、かつ車両操作の完全無人化を図り、飛躍的な労働コストの圧縮を目標としたものである。

本研究では、航法システムや作業ソフトウェアなどの要素技術研究を積み重ねたうえで、無人作業を実行するロボット車両、地磁気方位センサによる車両方位検出システムと外部標識方式による位置検出システムを併用した航法装置、及び枕地の処理を含めた圃場全面作業ソフトを試作した。さらに、車両系無人作業ロボットの試験・評価方法を策定し、試作したロボットシステムの圃場試験を行った結果、作業能率、及び作業精度は慣行作業並みであるが、直進時の平行度などはロボットシステムが慣行作業を上回る能力を示すことを実証した。

緒 言

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。一方「食料・農業・農村基本法」（新農政）においては、この傾向に歯止めをかけ、自給率を向上させることが示されている。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による労働力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 自律移動ロボット研究の現状、背景、目的と構成要素

1.1 農用車両の自動化の現状

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考え、作業経路を計画し、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、広く普及している。同時に、稲株の条を追尾する自動操向機能により、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、例は多くない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あたり労働時間)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な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、電子技術やいわゆるIT(情報・通信技術)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が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1-1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熟成されるまでの発展段階で予想される、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

表1-1 耕うんロボットの目標

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

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5 cm以下、検出周期1 s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に関する研究」と称することとした。

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1-2(1), (2)に示す。表中の航法に使用した記号は、3に示す航法システムの分類表(表3-1)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一部の構成要素についての

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を取り上げたつもりである。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1-2のNo.を併記するが、1972年のNo.1 金須らがおそらく国内で初めて圃場作業の完全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⁹⁾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。

純粋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、約20年後に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と思われる。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。

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、No.2 金藤らや、経路は事実上固定的であるがNo.5 古川らなどで圃場全体処理の戦略が示されている。その後、1988年のNo.9 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、航法技術及びピコントローラ、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1-3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. Tillet⁵²⁾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、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、
- 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、

表 1-2 (1) 農用車両ロボット化の試み (国内その 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	トラクター耕うん 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	A1	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中の航法方式の名称に付した記号

表1-2(2) 農用車両ロボット化の試み(国内その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㈱	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, ㈱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㈱	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, ㈱クボタ, 日本航空電子工業㈱	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 -㈱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 -㈱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中の航法方式の名称に付した記号

表 1-3 農用車両ロボット化の試み（海外）

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中の航法方式の名称に付した記号

- 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 要素技術^{60) 61)}

1.5.1 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, 内蔵)⁶²⁾と類似しており, 図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

エネルギー供給機能は, 車体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。

現在の農用車両は, 人が運転することを前提に設計さ

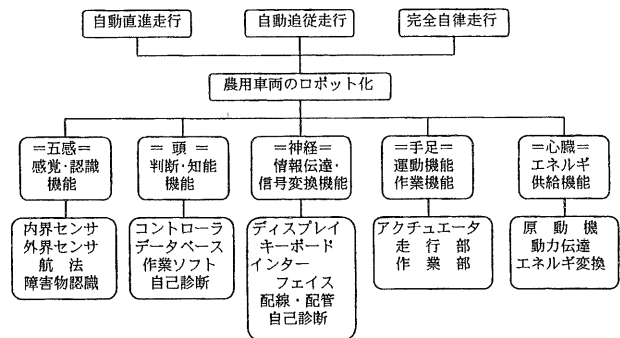


図 1-1 自律走行技術の要素技術

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歩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平行して必要となろう。

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

この機能は、図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、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。また、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。

3) 判断・知能機能

この機能は、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

ラムブル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制作されているため、

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各種センサ情報に応じて法則性をもって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、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並みに安定的に直進、幅寄せ、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、
などが課題である。

4) 感覚認識機能

この機能は、時々刻々の車両や作業機自身の状態を認識するための内界センサと、周囲の状況を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残量や車両の傾斜、舵角、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ランドマークからの相対距離といった、航法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。

1.5.2 要素技術の留意点

各要素は、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1-4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。

表1-4 各分野における車両系ロボットの使用条件⁶⁰⁾

	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	外	屋内	屋外・屋内	外
障害物等	多	やや多	やや少	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

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。

1.6 作業法と可能性

1.6.1 自律的作業方法

作業のロボット化、及び車両操作の無人化には、以下のケースが考えられる⁶⁰⁾。

1) 自律直進作業

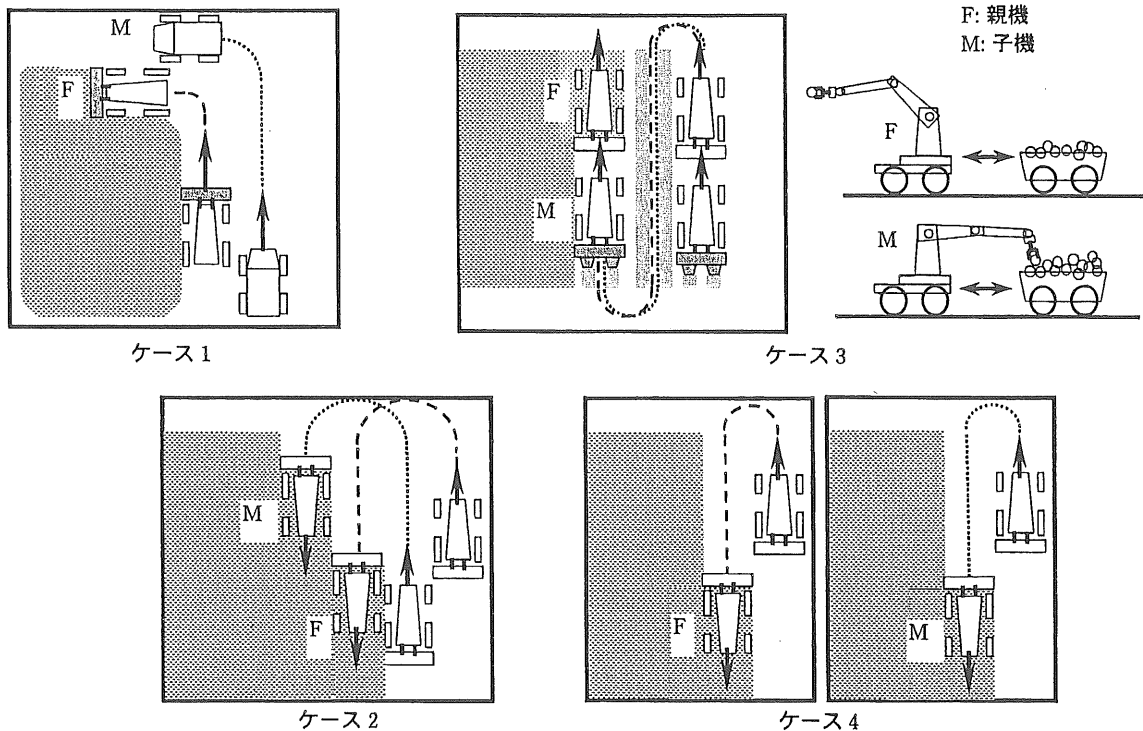
自律直進作業は、作業の直進走行部分のみを手放し運転できるように目標方位、もしくは目標直進経路に沿って車両を無人運転させるものである。

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移動して、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、フォーレージハーベスタとワゴンの組合せ作業では、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するが、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1-2に示すように、①親機と子機が一定の相対位置・方位関係を維持する場合（ケース1）、②子機が親機の運転を適当な時間遅れで再現するように操向する場合（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

図1-2 自律追従作業の例^{6,3)}

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）などが考えられる^{6,3)}。

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、1枚の圃場全面を作業すると同様に、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。

1.6.2 効果と可能性

自律全面作業を行うロボットには、

- 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、

などの効果が期待できる。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担し、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、派生的に圃場内の位置ごとの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（精密農業）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、一部派生的に「自律直進作業」を扱うこととする。

1.7 摘要

将来の日本農業は、経営規模の拡大を伴う生産コスト削減、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削減には、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経路計画等の戦略を立て、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る。今日までの車両系農業機械の自動化は、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作機能による直進の自動化など実用化されたものは限られている。「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、1名のオペレータを無人化することはできず、労働生産性の面は相変わらずである。

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」の安全無人化を図り、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、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。

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が、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。しかし、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

発を行ってはい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。

一方、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、資材補助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の遅れている作業の補助や作業機の調整停止することなく行え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り組作業において、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する。

2 車両システム

2.1 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に人に代って各部の状態をモニタでき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、適宜、航法システムや作業ソフトウェアの試験に供試した。

表 2-1 日の本JF-1の主な仕様

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

2.2 試作1号機 (ALVA-I)^{6) 0)}

2.2.1 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2-1に示す。

アクチュエータ等の機器構成は図2-1に、制御箇所は表2-2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としない。
- 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。

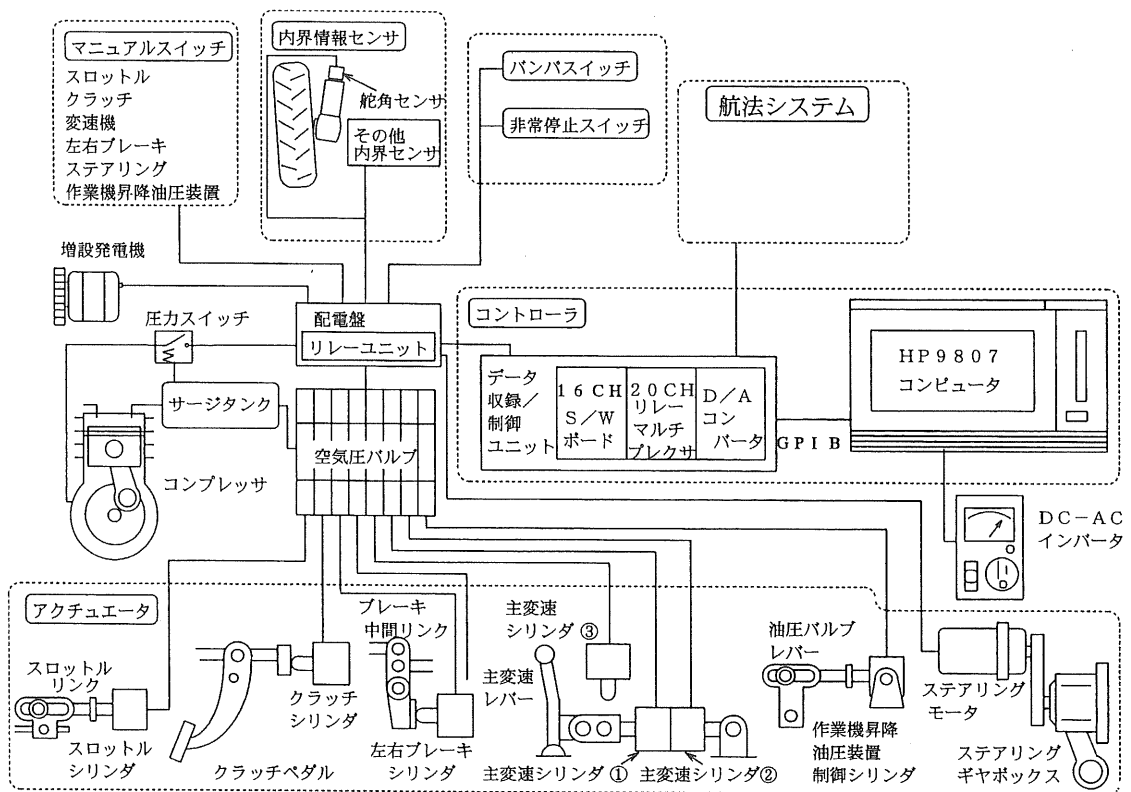


図 2-1 ALVA-I の機器構成

表 2-2 ALVA-I の制御対象と動力源一覧

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	AC 100 V, 200 VA \times 2
ブレーキ, 左・右	" ϕ 63	発電機	DC 12 V, 740 VA
主変速 (F3/R1)	" ϕ 40	(含, 増設部)	
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	"	DC \pm 12 V, 65 mA
作業機昇降装置	" ϕ 50	コンプレッサ	0.7 MP a, 5L/min モータ定格192 W

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ことによる。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。

内界情報は、ポテンショメータを用いた舵角情報、リミットスイッチを用いて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により、メインコントローラにヒューレットパッカード社製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データアキュイ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13 bitA/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ョメータは、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2-2に示す。

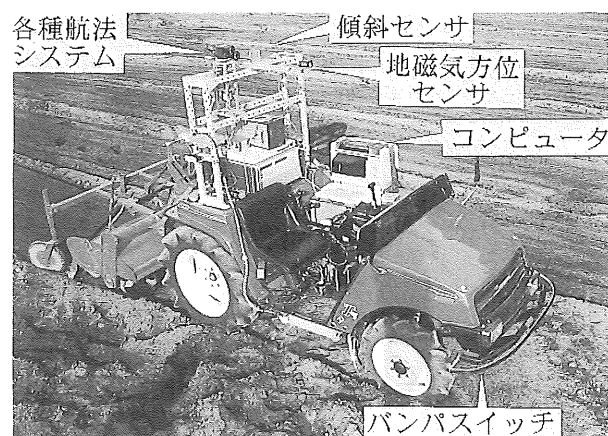


図 2-2 ALVA-I

2.2.2 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 $S_{tt} [^\circ]$ を得るには、現在の舵角値 $S_{ta} [^\circ]$ を検出し、

$$T_{st} = (S_{tt} - S_{ta}) / V_{st} \quad (2-1)$$

により操舵時間 $T_{st} [s]$ を求め、 S_{tt} と S_{ta} の大小関係

により、右もしくは左に T_{s_i} 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、パンパスイッチ(13Nの負荷で作動)は良好に作動した。

2.2.3 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と考えられた。

2) 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) 変速機はシンクロメッシュ機構を有するが、希にクラッチの踏み直しを要することがあった。

4) 左右の最大舵角が異なり、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不適切で、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接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。

2.3 試作2号機(ALVA-II) ³⁴⁾

ALVA-I における問題点のうち2.2.3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。

2.3.1 ハードウェア構成

原型となった車両には、クボタGL-25乗用トラクタを選定した。主な仕様は表2-3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、2.2.3 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。

表2-3 クボタGL-25の主な仕様

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/後輪輪距	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 電気式作業機昇降スイッチ(ポンパ)

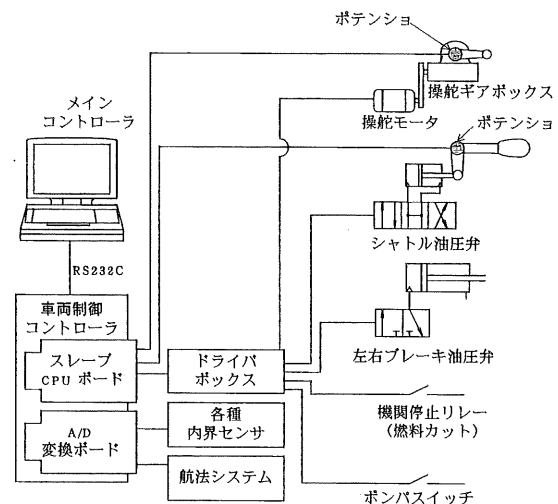


図2-3 ALVA-IIの機器構成

表2-4 ALVA-IIの制御対象と動力源一覧

制御対象	アクチュエータ	動力源	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	定電圧電源	DC 5 V, 2 A
	12 V-90 W	"	DC±12 V, 65 mA
スロットル	DCギヤドモータ	油圧動力源	本体油圧機構を流用
作業機昇降装置	電気スイッチ		13 MPa, 27.2L/min
機関停止	ソレノイド		



図 2-4 ALVA-II

機器の構成は図2-3、試作したALVA-IIの写真は図2-4に示す。制御箇所は表2-4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オ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オ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（ボンパ、商品名）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㈱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）、スイッチがONになると車

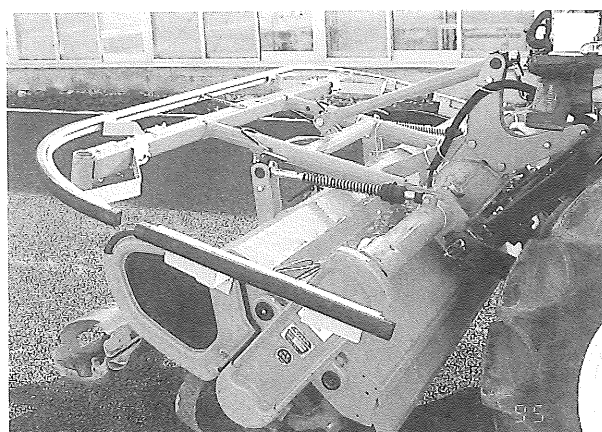


図 2-5 作業機周辺に装備したタッチスイッチ

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。

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「ボンパ」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。

2.3.2 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2-6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 $T_{s, \theta}$ [S] 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

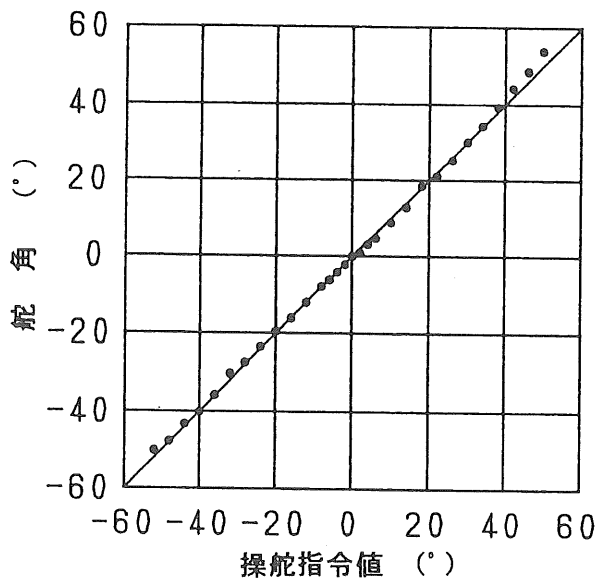
至る相対舵角を S_{tr} [°] とすれば、CPU間の通信時間等が影響し、 $S_{tr} \leq 9$ では S_{tr} の大きさに関わらず、

$$T_{st} = 0.6 \quad (2-2)$$

であり、 $S_{tr} > 9$ では概ね、

$$T_{st} = \{0.6 + (S_{tr} - 9) \times 0.03\} \quad (2-3)$$

という関係になる。



◆操舵時間(指令～操舵完了)

≤ 9° : 約 0.6 s

≥ 10° : 約 {0.6 + (n-9) × 0.03} s

図2-6 ALVA-IIの操舵指令値と実舵角

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するが、約80kPaの圧力で作動して、走行速度約0.5m/sのときに、接触時から約10cmで停止した。

2.3.3 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、数回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、作動油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。

2.4 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ロボット車両としてROBOTRAを製作した。

2.4.1 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2-5)。ALVA-IIにおける問題点のうち、2.3.3 2)は操舵モータを一新し、定格時の電力は低い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㈱クボタに、電源部は日本航空電子工業㈱に製作を依頼した。

機器の構成は図2-7に、試作したROBOTRAの写真を図2-8に、各種機器の搭載状況を図2-9に示す。制御箇所は表2-6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

表 2-5 クボタGL-321の主な仕様

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)

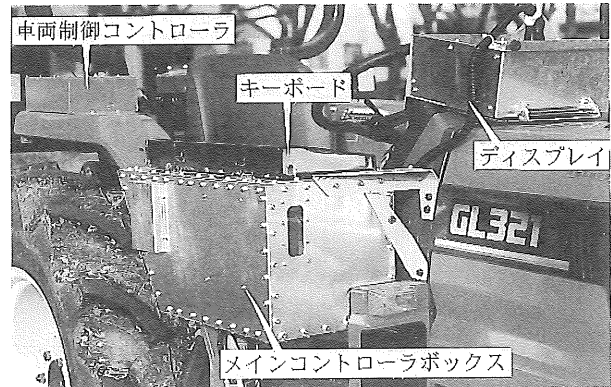


図 2-9 ROBOTRAの制御機器搭載状況

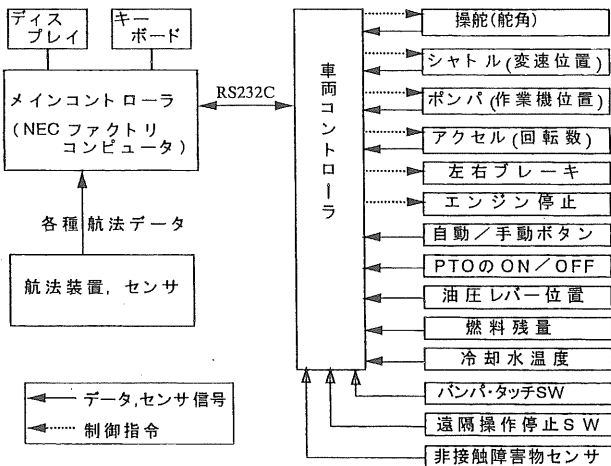


図 2-7 ROBOTRAの機器構成図

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。

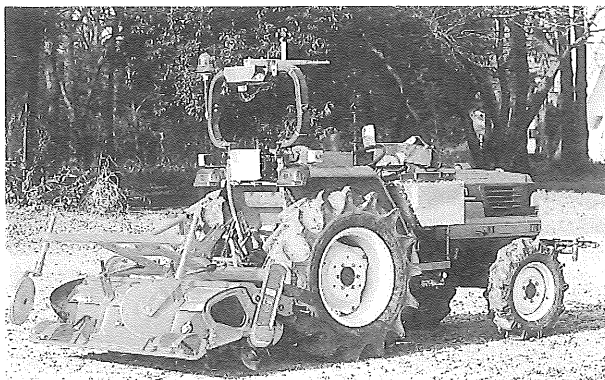


図 2-8 ROBOTRA

表 2-6 ROBOTRAの制御対象と動力源一覧

制御対象	アクチュエータ	動力源	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,	発電機 定電圧電源 制御機器バック アップ用バッテリー 油圧動力源	DC 12 V, 480 VA DC±12 V, 10A DC12V-5Ah×2 DC12V-1.3Ah×1 本体油圧機構を流用
スロットル 作業機昇降装置 機関停止	12 V-58 W DCギヤドモータ 電気スイッチ ソレノイド		6.5 Mpa, 28 l/min

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、何らかの情報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2-10のようである。

内界情報は、図2-7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2-7)。安全確保のために車両前方にバンパスイッチ及び障害物検出用の超音波センサを設置した。バンパスイッチは、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機構と

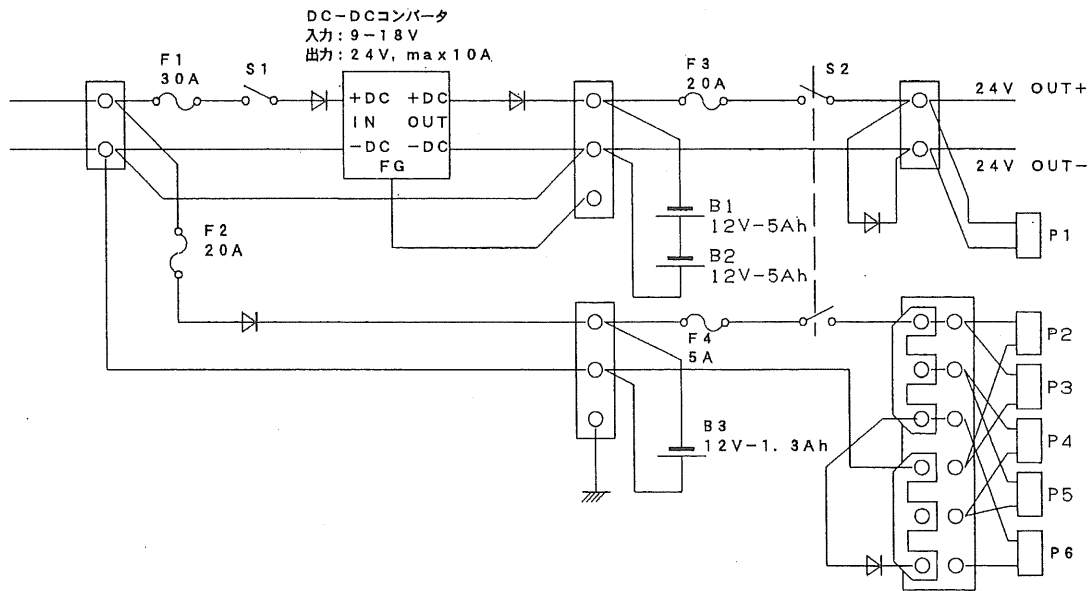


図 2-10 ROBOTRAの電源部配線図

表 2-7 メインコントローラに実装されたボード等

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

なっている。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を収納す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ノイズを生じないように、操舵モータのシールドを強化した。

2.4.2 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、操舵指令値と実際に得られた操舵制御値を計測した。その結果は図2-11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のに十分な性能が得られた。操舵に要する時間 T_{s_i} [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 $S_{i,r}$ とすれば、停止状態(据え切り)で、

$$T_s = 0.032 S_{i,r} \tag{2-4}$$

0.5m/sの速度で走行時には、

$$T_s = 0.023 S_{i,r} \tag{2-5}$$

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

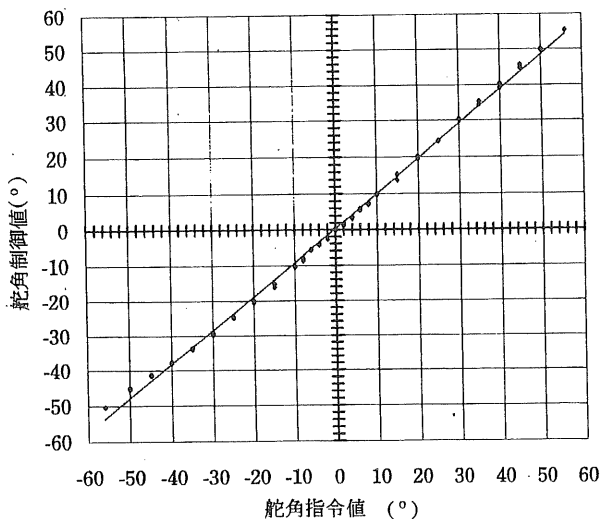


図 2-11 ROBOTRAの操舵性能

てONとなるが、約 35kPa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時から約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、電磁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で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しきい値の設定により、検出可能な障害物の大きさ、密度等は大きく異なる。しかし雑草は検出せず、人間は確実に検出するといった適切な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。

2.4.3 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号機及び3号機を供試して行った）にわたって各種試験に供試したが、次のような問題点がみられ一部については改良を行った。

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、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。

2.5 摘要

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-1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、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が、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た。

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、規格化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、非常停止機構は、全て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シャットダウンしたときの安全性についても対策を講じ、実証しておく必要がある。

3 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

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、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

航法方式の分類を表3-1に示す。各方式の計測原理は、以下のようである⁶⁾。

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 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⁶⁾、

③ 光反射テープやレーザービームなどの光学的ガイド⁷⁾、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⁴⁾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個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ったとき（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⁷⁾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ー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⁷⁾。

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、また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⁷⁾。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⁷⁾。

3) 内界情報方式

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）⁷⁾と

表 3-1 農業分野における航法方式の分類⁶⁾

経路	名称	検出対象	目標・センサ・施設等の例
固定	A1. 固定経路接触式	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、レーザービーム
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、レーザー灯台、GPS	

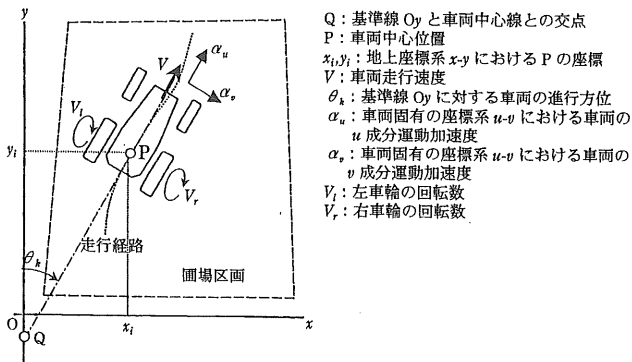


図 3-1 内界情報方式における各種パラメータ

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のである。本方式に用いられる各種パラメータを図3-1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を測定し、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。

4) 外界情報方式

外界情報方式はある種のガイドを用いる点で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

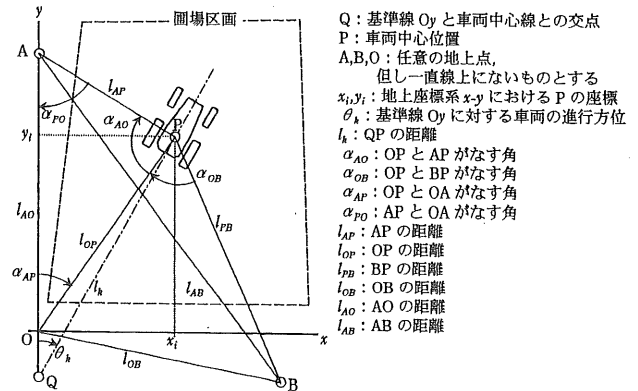


図 3-2 外部標準方式における各種パラメータ

るものであり、これに用いられる各種パラメータを図3-2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、トランス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ンサ及び同軸に備えられたエンコーダにより角 α_{AO}, α_{OB} を計測し、三角測量の原理により、 (x_i, y_i) を算出する⁶⁰⁾、

③ A0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て、多種多様なものが見られる。

近年注目されているGSP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進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1-2、表1-3に概略を示したが、各航法方式の現状は表3-2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⁶⁾⁹⁾、各々の特徴を表3-3にまとめて示す。

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自在な経路の変更が困難、

③ ケーブルや軌道などが、例えば耕うん作業では邪魔になる、

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

表3-2 農用車両のための航法装置の研究例

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
187)	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
288)	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
334)	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	㈱農生研 生研機構	安定的な境界線検出が課題
489)	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
590)	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
691)	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	平坦地で<10cm 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
730)	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
865)	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 ㈱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。

表 3-3 各航法システムの特徴

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	基地局からの相対位置により精度が変化	//	
E4. 外部標識 GPS 式	測定方式により精度は大きく異なる	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 による。

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が固定的であって、目的地に到達するためにどの経路を選択するかといった場合に有効である。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。

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 (OPG), リングレーザージャイロ (RLG), 振動ジャイロ, ガスレートジャイロなどが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り、未だ安価で高性能なものは少ない。このドリフトをいかに圧縮するか、いかにして作業実行途中に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^{8,9)}。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る。表3-1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、観測に用いる媒体によって、

① 光・電波・音波などの物理的性質である減衰・回折・反射・拡散といった現象、

② 太陽光(光)・電磁波(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る^{8,6)}。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今後の課題である。

GPSでは、単独測位では誤差100m以下(2000年5月より20m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る必要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、表1-4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3-4に示すロボットの要求仕様に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、農要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、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ったとすることがわかる。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。

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

表3-4 自律移動ロボットにおける航法装置の要求仕様

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	車両のローリング・ピッチング±5° 以下 代かき状態を含む不整地走行

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³²⁾。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3-5に示す。

表 3-5 各航法システムの適用性^{6,5)}

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. " トラバース式						
E3. " 双曲線航法式						

*:分類記号は表 3-1 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

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不可能である。また、固定経路式では走路が固定されるので土壌踏圧による弊害が懸念される。

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。

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、一般の圃場ではすべりによる誤差が懸念される。

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、車両のロール、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³³⁾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。

ロボットの航法装置に要求される性能は、概略表3-5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重複幅を10cm前後と想定し、残耕のないようその半分、5cm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ニ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、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、内界情報距離方位方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、自動車のナビゲーションシステム他これまでも多くの分野で利用されてきた³³⁾。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。今日、TMSに替わり、GPSが自動車ナビゲーションシステムの基幹航法システム³⁴⁾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³⁴⁾。

3.2.1 地磁気とセンサの概要

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3-3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10G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。

地磁気の時間的变化としては、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变化を見せる。

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、地磁気の偏角を検出するセンサである。図3-4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

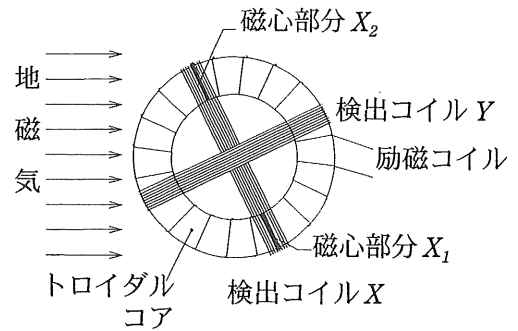


図3-4 地磁気方位センサの基本構造

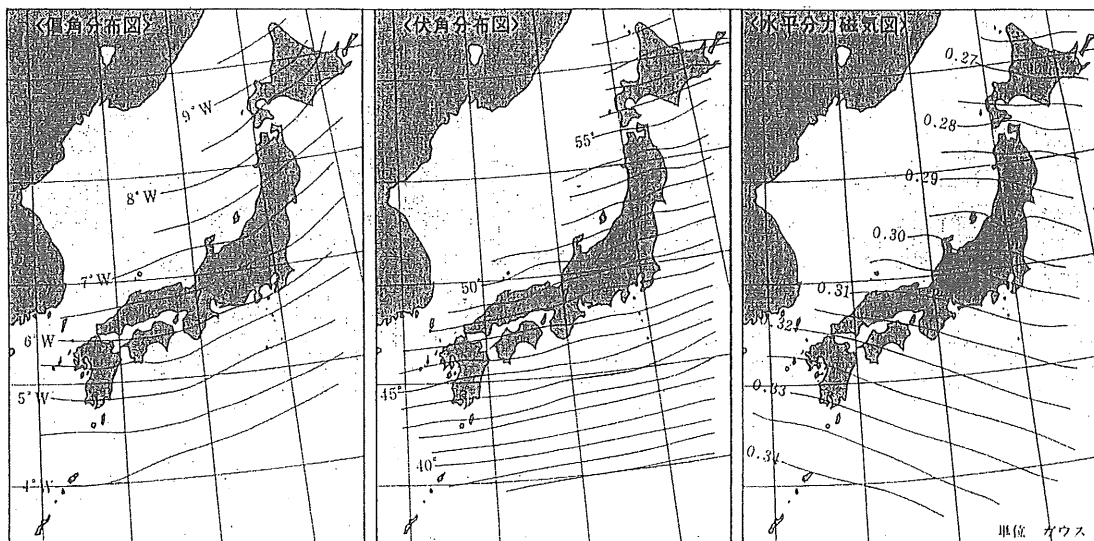


図3-3 日本の磁気図⁹⁶⁾

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法（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。

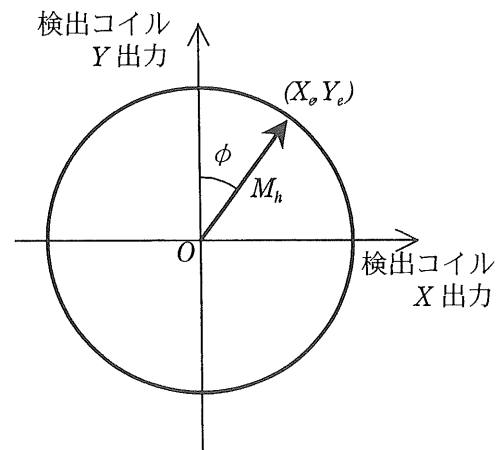


図 3-5 TMS単体を360° 回転させたときの出力図

表 3-6 供試地磁気方位センサ (Watson FGM-200A)の主な仕様

入力電圧	6-40 VDC
測定範囲	±1000mG
感度	250mG/V
直線性誤差	±0.5%以下
周波数応答	DC-20 Hz
寸法	45×64×38 mm
重量	113 g

本研究で使用したTMS(表3-6参照)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250mG/Vである。各検出コイルからの出力電圧を X_e, Y_e, Z_e とすると、センサを水平面で360°回転させたときの X_e, Y_e は、理論的には図3-5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、

$$M_h = 250 \times (X_e^2 + Y_e^2)^{1/2} \tag{3-1}$$

$$M_v = 250 \times Z_e \tag{3-2}$$

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

$$\psi = \tan^{-1} (M_v / M_h) \tag{3-4}$$

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 車両の傾斜の影響、
- ② 作業機を含めた車両自身の影響、
- 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（車両の方位角）で表される。

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の方法に対する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TMS出力は変化し、TMS出力から車両のヨー角を求める際に誤差を生じる。例えばロール角を5°、ピッチ角を3°として、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⁹⁾¹⁾。

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⁹⁾¹⁾。

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

(ヨ一角)を ϕ_i とすると、(3-5)~(3-7)式によって水平時の各軸地磁気分力を算出し、(3-3)式と同様に(3-8)式によって、方位角を求める。

$$X_s = X_e \cdot \cos R - Z_e \cdot \sin R \quad (3-5)$$

$$Y_s = -X_e \cdot \sin R \cdot \sin P + Y_e \cdot \cos P - Z_e \cdot \cos R \cdot \sin P \quad (3-6)$$

$$Z_s = X_e \cdot \sin R \cdot \cos P + Y_e \cdot \sin P + Z_e \cdot \cos R \cdot \cos P \quad (3-7)$$

$$\phi_i = \tan^{-1}(X_s/Y_s) \quad (3-8)$$

この一連の傾斜誤差補正を傾斜補正と呼ぶ。

3.2.3 磁気環境補正法

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。

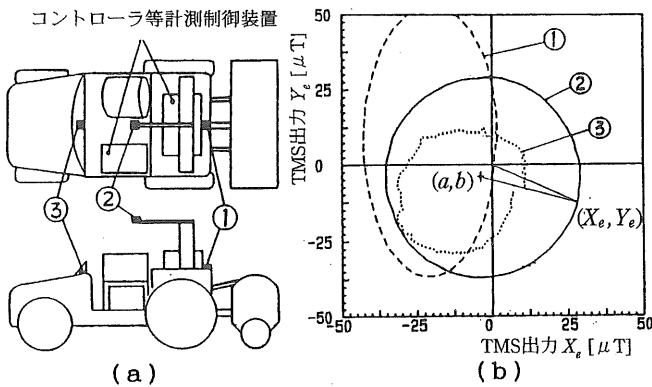


図3-6 TMS取り付け位置による出力の様子

図3-6は、TMSを試験用車両ALVA-Iの①、②、③の部位に取付け、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3-5)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、楕円状になっている。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った。③の部位では、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と考えられた。

ロータリ作業機を装備した車両システムALVA-Iの、図3-6の②の部位にTMSを取付けた場合、車両自身も持つ磁気が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(3-3)式により求めた結果生じる誤差であり、方位角を、

$$\phi_i' = \tan^{-1}((X_e - a)/(Y_e - b)) \quad (3-9)$$

により求めれば、誤差は補正される(図3-7)。

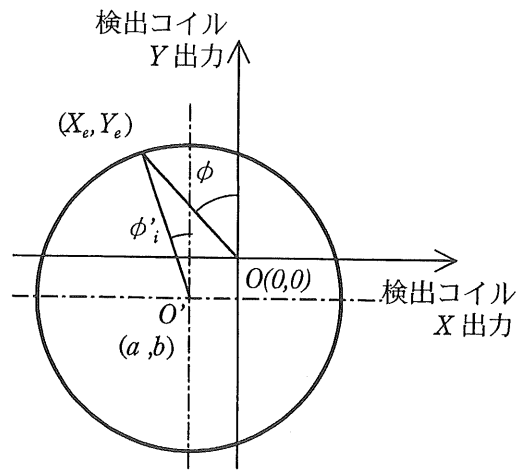


図3-7 TMSを360°旋回させたときの出力図

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出力の平均値として求める方法⁹⁷⁾、車両を360°旋回させた時の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行する場合、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、旋回中にTMS出力を等旋回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°旋回させたときの全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、(3-5)～(3-8)式ではTMS出力 Z_0 を用いるため、さらに精度向上を図るためには、 Z_0 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°、ピッチ角Pが+3°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3-8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_0 に関する磁気環境補正值は、車両を宙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_0 に対する磁気環境補正は现阶段では行わないこととした。

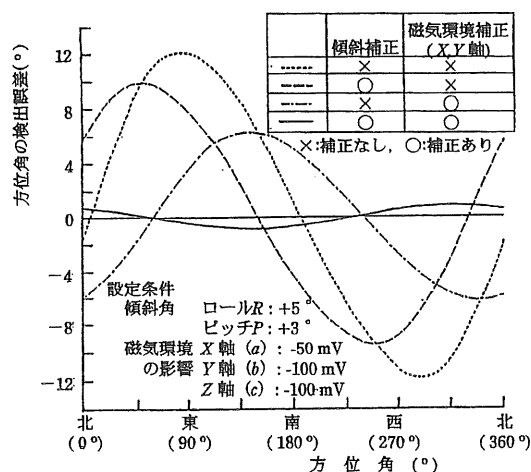


図3-8 Z軸の磁気環境補正のみを行わなかった際の算出方位の誤差

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、この補正值は不変では

なく、随時更新する必要がある。作業機を交換したり、踏切などの強磁場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、(3-5)～(3-7)式の X_0, Y_0 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。

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、地磁気の乱れがあることも予想される。

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

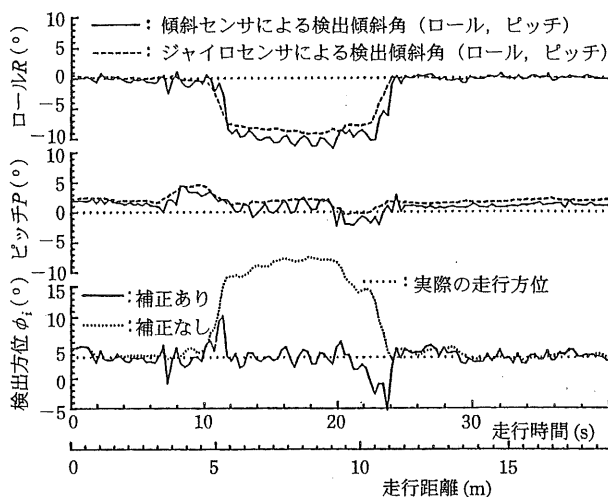


図3-9 傾斜補正の様子⁹⁸⁾

表3-7 供試傾斜センサ(Lucas Shaevitz Inc. Accustar)の主な仕様

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

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3-9は、表3-6に示すTMS、及び表3-7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ー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3-10に示す。図からわかるように、ロール角 R が+5°、ピッチ角 P が-5°の誤差を有すると

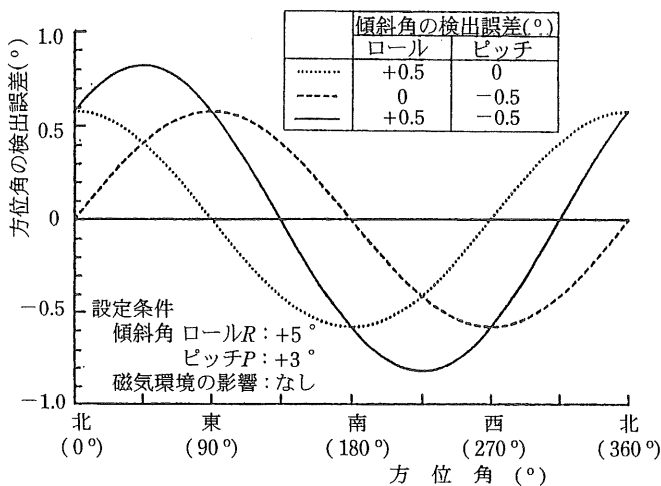


図3-10 傾斜角センサの誤差が方位検出結果に及ぼす誤差

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3-8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。

表3-8 供試傾斜センサ(Sensorex Model 41200)の主な仕様

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

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3-6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3-9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3-9 磁気環境補正の有無による算出車両方位(°)

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°旋回させ、磁気環境補正值の算出に使用するデータ(X_0, Y_0)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3-10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

表 3-10 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

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

できたものと考えられる。

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3-11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 3-11 作業機の位置による検出方位角の変化

TMS の取り付け位置 (図 3-6 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

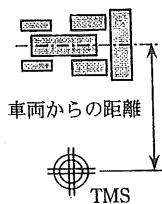
3) 構造物や他の車両の影響

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、62.5kW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3-12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 3-12 圃場内の他の車両が検出方位角に及ぼす影響

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むけて設置し、各々の点における検出方位角を調べたものが、表 3-13 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受けていることがわかる。

表 3-13 場所による検出方位角の誤差

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

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(4.2.4項参照)。

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あれば、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 3-5 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、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^{60), 91), 104), 107)}、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、かつて移動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ある。

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され、所期の性能を満たしていたため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。

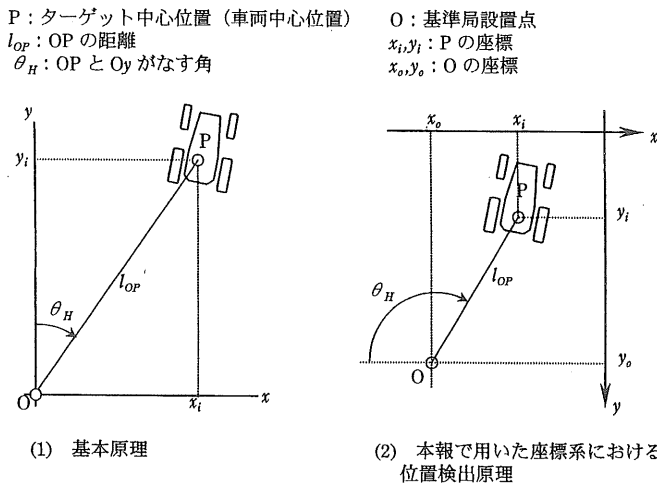


図3-11 XNAVによる位置検出の原理

3.3.1 計測原理¹¹⁰⁾

1) 位置計測原理

XNAVの計測原理は図3-11(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によって求めるものである。実際には図3-11(2)のように、測量などの分野で使用される座標系を用いたので、 $P(x_i, y_i, z_i)$ は下式によって算出される。

$$x_i = x_o - l_{OP} \cdot \cos \theta_H \tag{3-10}$$

$$y_i = y_o - l_{OP} \cdot \sin \theta_H \tag{3-11}$$

$$z_i = z_o - l_{OP} \cdot \cos \theta_V \tag{3-12}$$

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離(レーザー測距儀)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3-12のように、

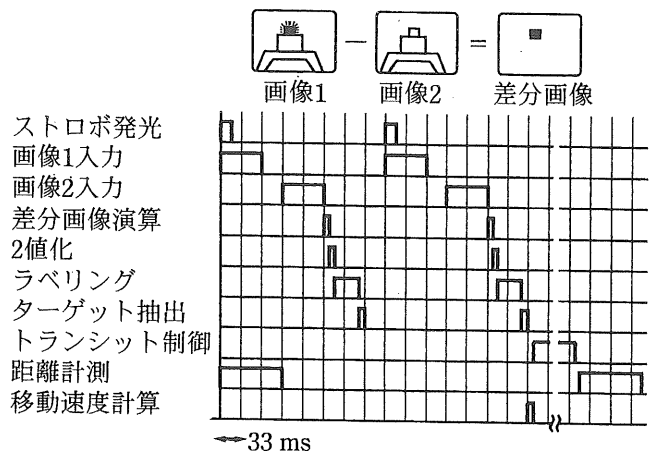


図3-12 XNAV-I計測タイムチャート

- 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¹¹⁾。

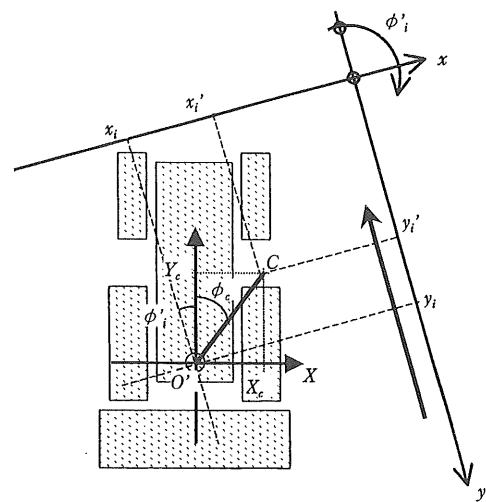


図 3-13 計測座標の傾斜補正時のディメンジョン

2) 傾斜補正

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、車両は状況によってロール・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 C の座標を (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、

$$X_c = h \cdot \sin R, Y_c = h \cdot \sin P \quad (3-13)$$

$$L_c = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2} \quad (3-14)$$

$$\phi_c = \tan^{-1}(X_c/Y_c) \quad (3-15)$$

$$x'_i = x_i - L_c \cdot \sin(\phi'_i + \phi_c) \quad (3-16)$$

$$y'_i = y_i - L_c \cdot \cos(\phi'_i + \phi_c) \quad (3-17)$$

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 は $O'C$ 間の距離で、 ϕ_c, ϕ'_i は図 3-13 に示す。

3.3.2 システムの開発

1) 機器の構成

本装置各部の仕様を表 3-14 に、構成を図 3-14 に示す。各部は以下のようなものである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 500P/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。

表 3-14 XNAV-I 各部の仕様

〔基準局〕 トランシット	θ_H, θ_V 軸とも 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 θ_H 軸 $\pm 240^\circ$, θ_V 軸 $\pm 20^\circ$
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

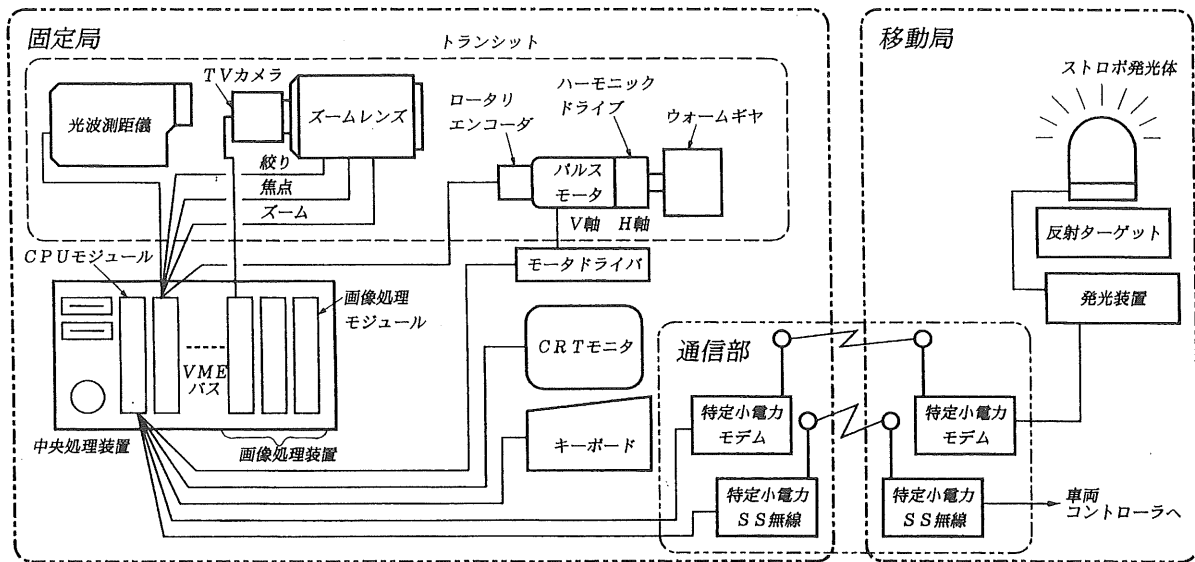


図 3-14 XNAV-I の機器構成

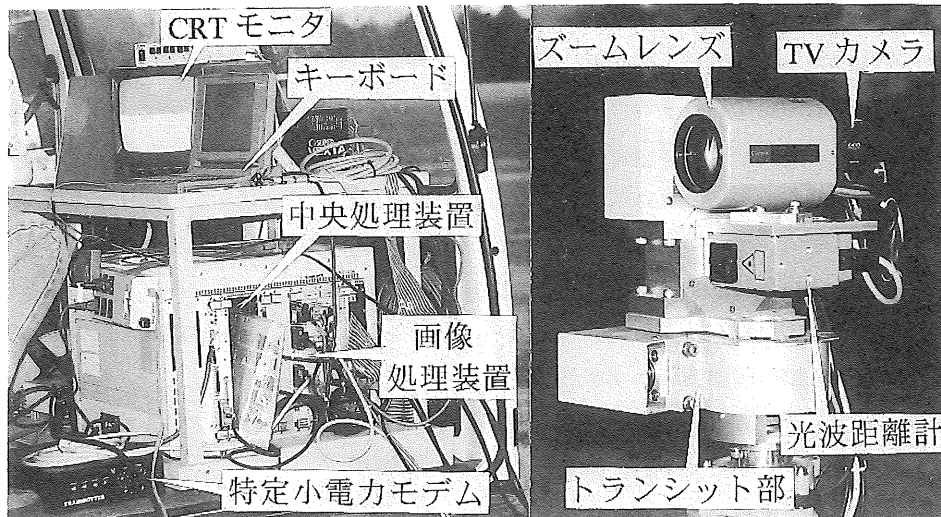


図 3-15 XNAV-I システム基準局

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）とレーザ測距儀が光軸を合わせて搭載されている（図3-15）。またTV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。

③ 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。

④ 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。

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なるようにする。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1.5m/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、1/500s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値化のしきい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3-16)の、XNAV-I の位置計測結果は図3-17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、3.3.1 2)に示した車両のロール・ピッチによる傾斜補正は、この時点では行っていない。



図3-16 XNAV-I 試験風景

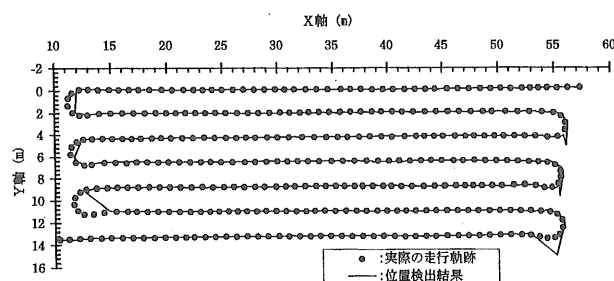


図3-17 XNAV-I の位置検出の様子

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、0.39s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XNAV-IIへの展開

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0.5s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、及び移動局を含めた耐候性、取扱い性を向上させる。

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3-18)から

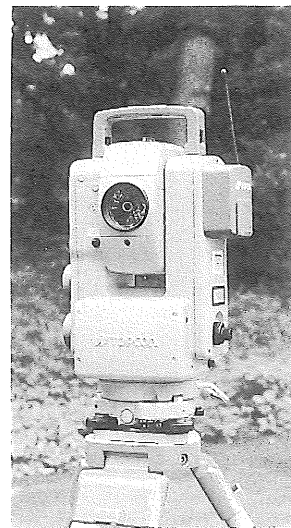


図3-18 AP-L1基準局

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。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3-15に示す。なおAP-L1の測定精度は、表3-15のように極めて高く、この精度を確認する具体的な方法が見つからず、かつ国土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。

表 3-15 AP-L1の主な仕様

自動追尾部	追尾角速度： 視準精度：±2'（角速度 10°/s のとき） 使用レーザー：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

3.4 摘要

ロボットの基準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。既存の航法システムをそのまま農用車両に適用して、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った。

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 5 cm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の実行や、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値を求める方法が適

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、ロボットに適用可能と判断した。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であるが、行程の始端・終端位置、行程間ピッチなどを精度よく制御するためには、絶対的な位置情報を取得可能な航法システムが必要であった。

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ものである。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部の水平角・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。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 2 mの点にあるため、計測されたターゲット点の座標は車両の傾斜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0.52 sで、ターゲット点の傾斜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が、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された。AP-L1は、コスト的に問題があるものの、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 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、及び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、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。また、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。そこで信頼性、確実性、安全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⁶⁾⁰⁾

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、自律旋回を行えば、作業機の昇降制御を付加するだけで枕地を除く1枚の圃場を無人で処理できるはずである。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ことを想定した。

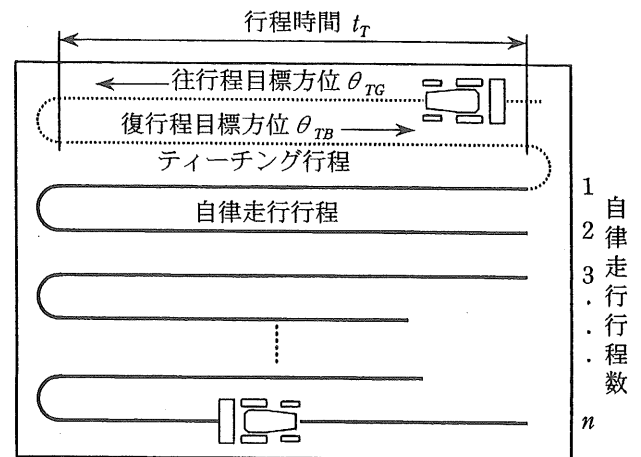


図4-1 TMSによる無人作業方法

そこで、図4-1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に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。
- 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)の条件からは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に、実験的に決定する。実際の流れは、図4

-1のように、始めの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_{TC} 、 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異なり、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_{TC} 、 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_{TC} 、 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 ϕ_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 ϕ_i は、

$$\phi_i = \alpha \Delta\phi_i / v + K \quad (4-1)$$

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。

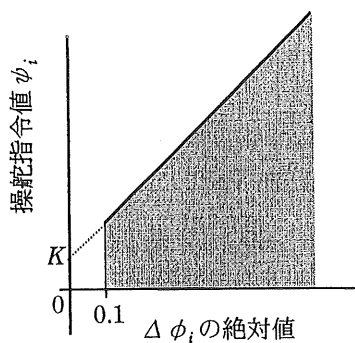


図4-2 ASR-Iにおける操舵比例制御

その後、実験を繰り返した結果、逐次の(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、

$$\phi_i = \alpha (\Delta\phi_i + \beta (\Delta\phi_{i-1} + \Delta\phi_{i-2} + \dots + \Delta\phi_k)) / v + K \quad (4-2)$$

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_{TC} 、 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。なお、②~④は“TEACHING”、“MAG. CAL”を実行した際に値が自動更新される。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イジションユニット間の通信速度などを考慮して約0.8sに設定した。

2) ASR-II¹¹⁸⁾

ASR-IIにおける直進制御法は、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、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4-3に示す方法で操舵制御を行うことを考案

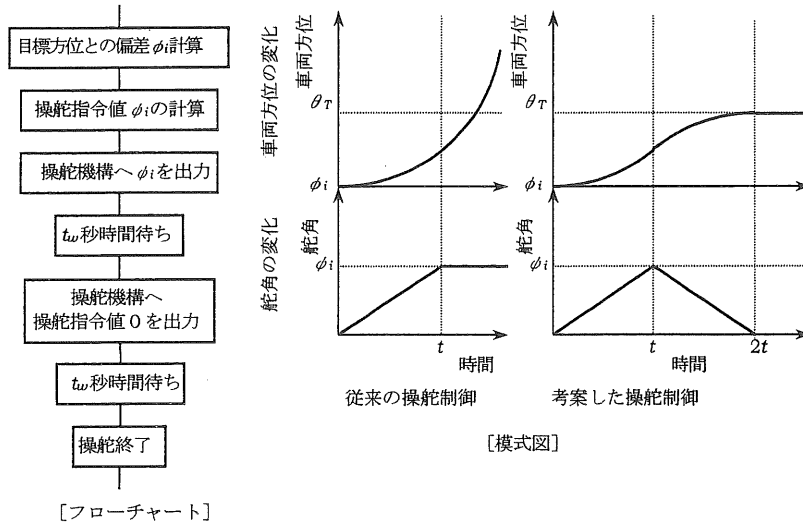


図4-3 ASR-IIの直進時操舵制御

した。この方法では、1回の操舵で目標方位への修正を終了させ、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4-4に示す。方位の検出及び操舵制御の周期は、作業速度が比較的低く、操舵速度も遅いことを前提に約1.2s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。

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の磁気環境補正値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为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の単位で取得する。

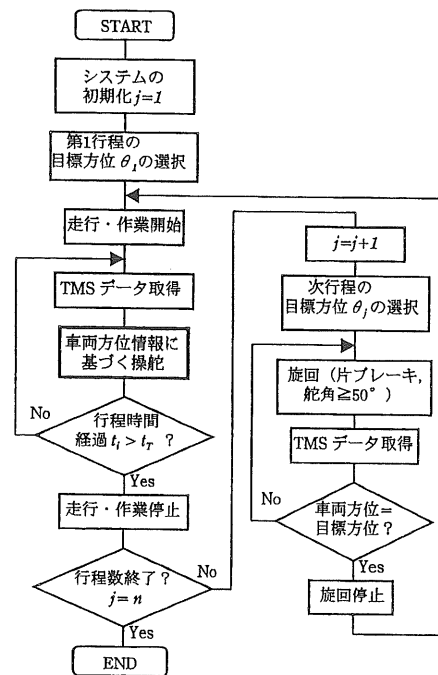


図4-4 ASR-IIのフローチャート

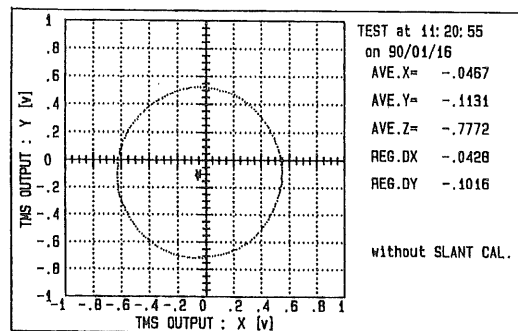


図4-5 MAG.CAL-Iの表示例

2) TMS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4-5に示す。

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4-6に示す。

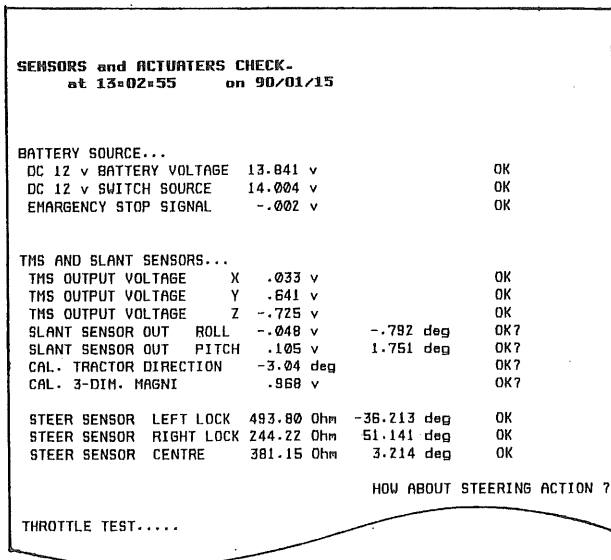


図 4-6 MONITOR-I の表示例

4.2.4 作業の実行

1) ASR-I の制御例

PI制御法によるASR-I を実行し、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4-7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0.42m/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ィーチ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。

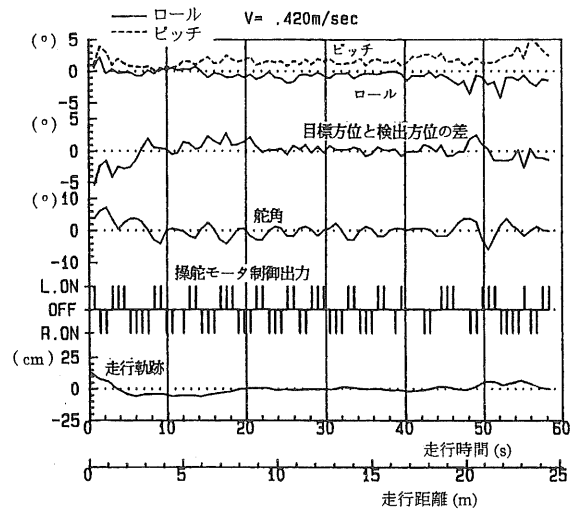


図 4-7 ASR-I による直進制御例

図からわかるように、舵角及びその結果として現れる目標方位角と検出方位角の偏差 $\Delta \phi$ 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、2.2.2に示したとおり、操舵モータ運転時間 \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、この関係は成り立たないことを示唆している。

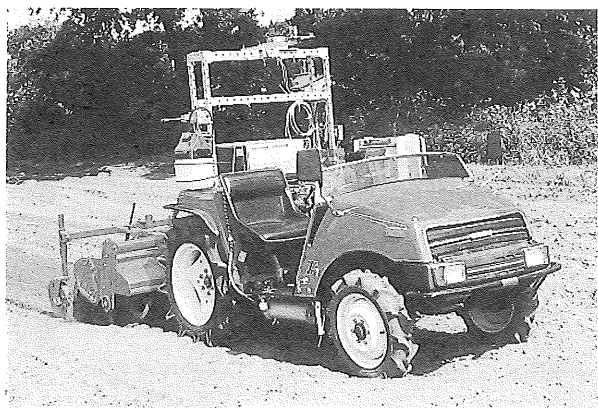


図4-8 ASR-Iによる作業風景

2) ASR-IIによる圃場試験^{8,7)}

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50×18m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0.5m/s, 約0.1m/sの低速及び約0.85m/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4-1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

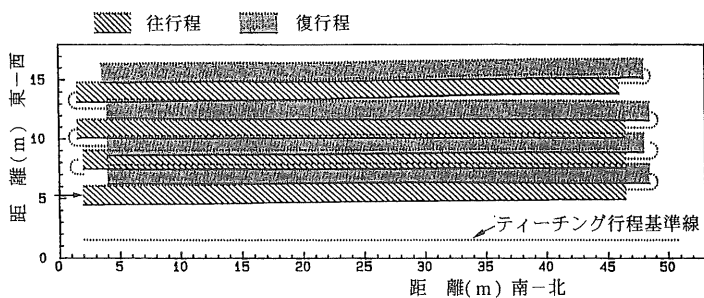


図4-9 ASR-IIによる試験結果No.1(0.5m/s, P制御法)

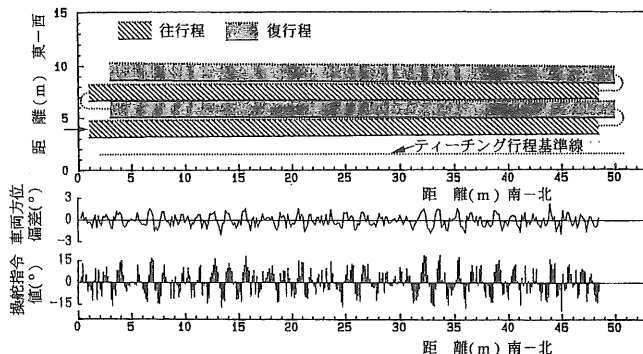


図4-11 ASR-IIによる試験結果No.3(0.1m/s, PI制御法)

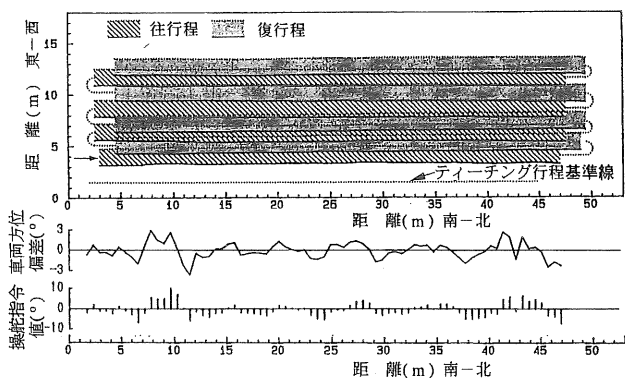


図4-10 ASR-IIによる試験結果No.2(0.5m/s, PI制御法)

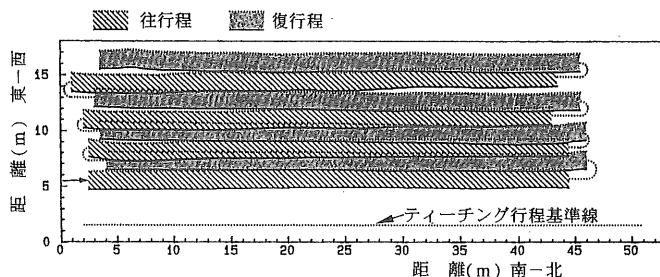


図4-12 ASR-IIによる試験結果No.4(0.85m/s, PI制御法)

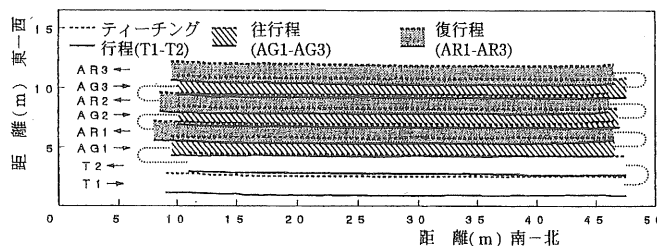


図4-13 ASR-IIによる試験結果No.5(0.5m/s, 前方注視法)

表 4-1 TMSによる自律耕うん作業の結果

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 - 0.71m
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

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地的な評価指標である点が異なる。各条件による試験において, 表4-1のNo.1~No.4は, 1日ごとに同一の圃場で行ったものであり, No.5は同一圃場ではほぼ1年後に行ったものである。走行軌跡は, 無人走行終了後に前項ASR-Iの場合と同様な方法で計測した。図4-9~図4-13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4-14に作業風景を示す。以下表4-1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1.2s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随所に見られ, 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はほぼ平行な作業が実行されている。

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



図 4-14 ASR-IIによる作業風景

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, 軌跡の平行度がえられていない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横すべりによる制御性の悪化と考えられ, 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システムが目標方位との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にし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、ダッキ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、すべりもしくは軽いダッキング等が原因となっているものと推定される。

旋回半径のバラツキは、No.3で特に少なく、No.4で特に大きいですが、ARS-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らぬものの、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ASRの直進制御法では、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° 前後と考えられた。

ASRによる自律作業精度は、各種補正法などの適用によるTMSの高度利用によって得られたものである。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ても、自律走行精度が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ろうが、

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、
といった手法によりある程度の性能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自動直進制御、といった場面での実用化が期待できる。

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

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、始めの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

生成する。図4-15のように、作業経路は、圃場出入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、実際の作業手順を終了時点から遡って、圃場出入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⁾。

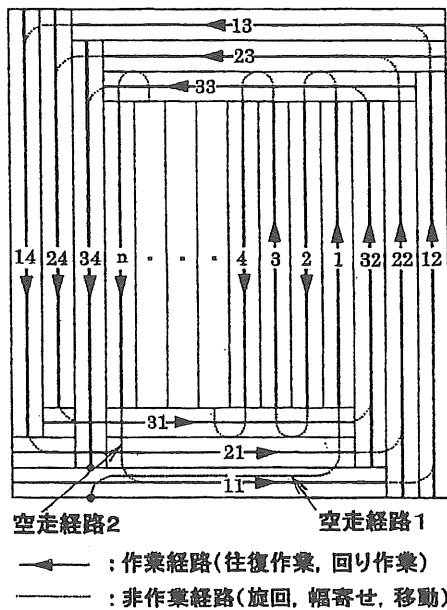


図 4-15 作業の戦略

2) タスクの分割と構成

図4-16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

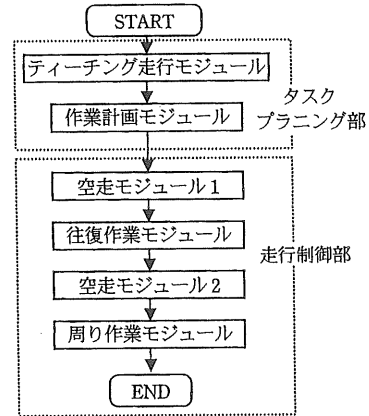


図 4-16 作業ソフトの全体構成

て、枕地部分を3周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4-17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。

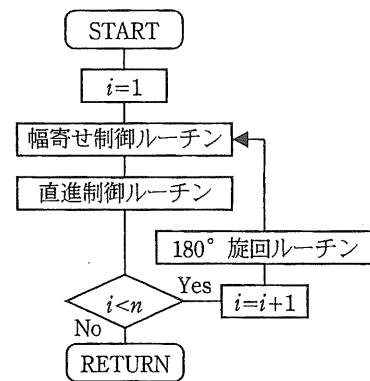


図 4-17 往復作業モジュールのフローチャート

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4-18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必要な条件が異なるため，外周・内周それぞれ独立した90° 旋回アルゴリズムを採用した。

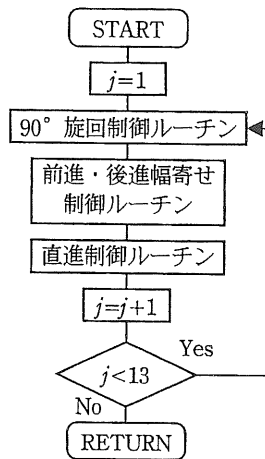


図 4-18 周り作業モジュールのフローチャート

4.3.2 制御システム

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では，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4-19のように設定している。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） $x_i = (x_i, y_i, \phi_i)$ ($0 \leq i \leq 7$) 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。図4-20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（計測周期約500ms）を確認のため逐次観測して，各セグメント $x_0 \sim x_7$ 付近ではオペレ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，ロボットに関連するディメンションは図4-21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

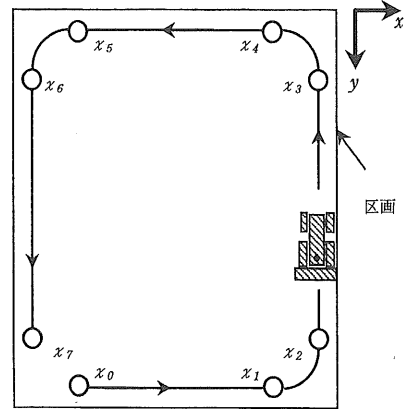


図 4-19 ティーチング時の取得位置・方位

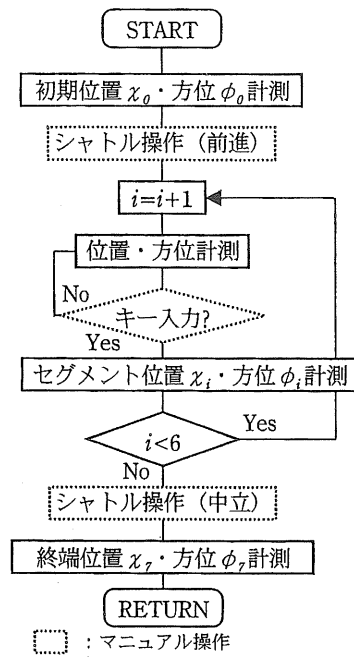


図 4-20 ティーチング走行モジュールの計測・制御フローチャート

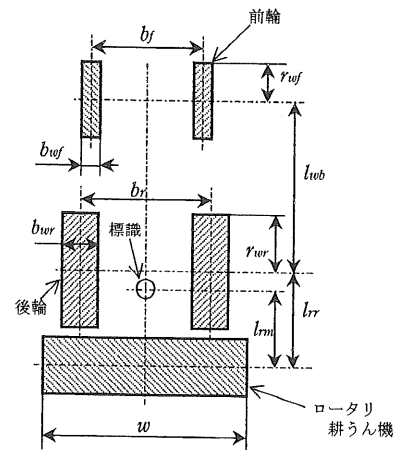
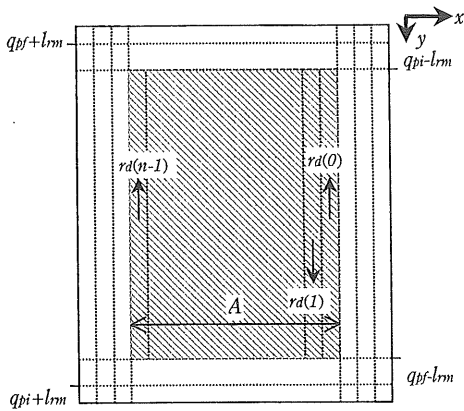


図 4-21 ROBOTRAのディメンション

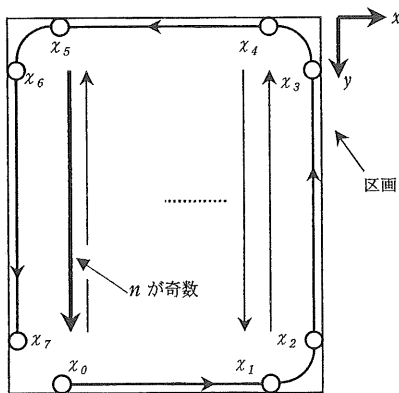
とを想定しており、区画の座標はティーチング走行時に作業機の右側面が区画上を走行することを前提に算出できる。

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¹²⁾。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、かつ、重複して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



b) 移動走行の経路生成法

図4-22 往復作業・移動走行の経路生成法

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) 式によって記述される。

$$A = (x_2 + x_3) / 2 - (x_6 + x_7) / 2 - 5w + 6\Delta w \quad (4-3)$$

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

$$n = A / (w - \Delta w) + 1 \quad (4-4)$$

ただし、 n は少数部分を切り捨てた整数とする。

$$\Delta d = A / n \quad (4-5)$$

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、 Δd を用いて (4-6) 式で表される。

$$r_d(j) = (x_2 + x_3) / 2 - 3w + 3\Delta w - j\Delta d \quad (0 \leq j < n) \quad (4-6)$$

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4-15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_r (y の値)、走行停止位置 qr (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>

$$qp_i = (y_0 + y_1) / 2 - 2w + 2\Delta w - l_{rm} \quad (4-7)$$

$$qp_r = (y_4 + y_5) / 2 + 2w - 2\Delta w - l_{rm} \quad (4-8)$$

$$qr = qp_r \quad (4-9)$$

<復路>

$$qp_i = (y_4 + y_5) / 2 + 2w - 2\Delta w + l_{rm} \quad (4-10)$$

$$qp_r = (y_0 + y_1) / 2 - 2w + 2\Delta w + l_{rm} \quad (4-11)$$

$$qr = qp_r \quad (4-12)$$

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、(4-13)、(4-14) 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。

$$\phi_d = (\phi_2 + \phi_3) / 2 \quad (\text{往路}) \quad (4-13)$$

$$\phi_d = (\phi_6 + \phi_7) / 2 \quad (\text{復路}) \quad (4-14)$$

① 往復作業領域

往復作業領域の作業計画は図4-22に示したように、往

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。(4-15)式(y の値)の経路、(4-16)式の方位への移動走行後に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 >

$$r_d = (y_2 + y_3) / 2 \tag{4-15}$$

$$\phi_d = (\phi_0 + \phi_1) / 2 \tag{4-16}$$

一方、走行の終端条件 q_r は、(4-17)式を採用した。

< x 軸方向 >

$$q_r = (x_0 + x_1) / 2 - 3w + 3\Delta w - \Delta d \tag{4-17}$$

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4-22 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。

a. 行程数 n が奇数の場合

(4-18)式(x の値)の経路、(4-19)式の方位へ移動走行して車両を誘導する。

< x 軸方向 >

$$r_d = (x_6 + x_7) / 2 + w - \Delta w \tag{4-18}$$

$$\phi_d = (\phi_6 + \phi_7) / 2 \tag{4-19}$$

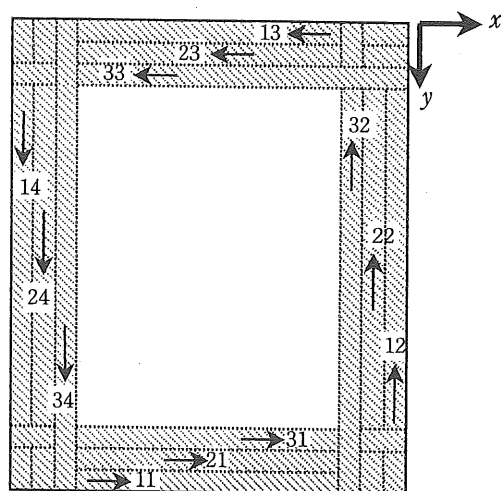
一方、走行の終端条件 q_r は、(4-20)式を採用した。

< y 軸方向 >

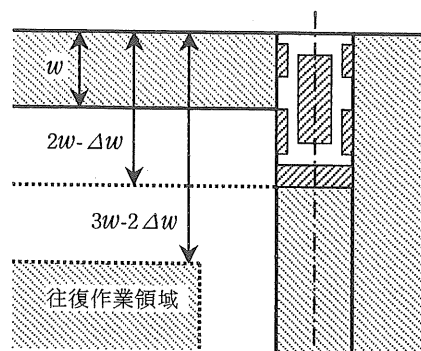
$$q_r = (y_0 + y_1) / 2 - 1.5w + \Delta w + l_{r,m} \tag{4-20}$$

b. 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。



a) 周り作業の経路生成法



b) 周り作業の行程終端位置

図4-23 周り作業の経路生成法

③ 周り作業(枕時処理)

周り作業領域の座標軸方向の走行経路 r_d は図4-23 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周分生成する。

< 第1, 5, 9(11, 21, 31)行程 >

$$r_d = (y_0 + y_1) / 2 + k(w - \Delta w) \tag{4-21}$$

$$\phi_d = (\phi_0 + \phi_1) / 2 \tag{4-22}$$

< 第2, 6, 10(12, 22, 32)行程 >

$$r_d = (x_2 + x_3) / 2 - k(w - \Delta w) \tag{4-23}$$

$$\phi_d = (\phi_2 + \phi_3) / 2 \tag{4-24}$$

<第3, 7, 11(13, 23, 33)行程>

$$r_d = (y_4 + y_5) / 2 + k(w - \Delta w) \quad (4-25)$$

$$\phi_d = (\phi_4 + \phi_5) / 2 \quad (4-26)$$

<第4, 8, 12(14, 24, 34)行程>

$$r_d = (x_6 + x_7) / 2 + k(w - \Delta w) \quad (4-27)$$

$$\phi_d = (\phi_6 + \phi_7) / 2 \quad (4-28)$$

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4-23に示したように往復作業領域境界線となり、以下の(4-29)~(4-36)式を採用した。

<第1, 5, 9(11, 21, 31)行程>

$$q_i = qp_i = (y_6 + y_7) / 2 + w/2 - l_{rm} + a \quad (4-29)$$

$$q_r = qp_r = (y_2 + y_3) / 2 - w/2 - (l_{wb} + l_{rr} - l_{rm}) + a \quad (4-30)$$

<第2, 6, 10(12, 22, 32)行程>

$$q_i = qp_i = (x_0 + x_1) / 2 + w/2 - l_{rm} + a \quad (4-31)$$

$$q_r = qp_r = (x_4 + x_5) / 2 + 2w - 2\Delta w - l_{rm} \quad (4-32)$$

<第3, 7, 11(13, 23, 33)行程>

$$q_i = qp_i = (y_2 + y_3) / 2 - w/2 + l_{rm} + a \quad (4-33)$$

$$q_r = qp_r = (y_6 + y_7) / 2 - w/2 + (l_{wb} + l_{rr} - l_{rm}) + a \quad (4-34)$$

<第4, 8, 12(14, 24, 34)行程>

$$q_i = qp_i = (x_4 + x_5) / 2 - w/2 + l_{rm} \quad (4-35)$$

$$q_r = qp_r = (x_0 + x_1) / 2 - 1.5w + \Delta w + l_{rm} \quad (4-36)$$

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定数である。

3) 走行制御

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。

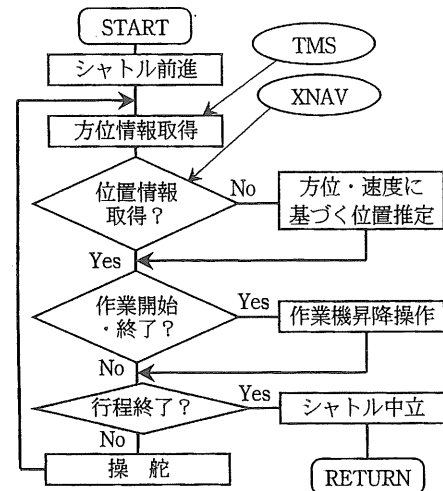


図4-24 直進制御ルーチン

往復作業は直進制御と 180° 旋回の組合せであり、図4-24に示す直進制御ルーチンは、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4-18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

ここで、

a. 90° 旋回ルーチンは予め若干の後進や切返しを行う、

b. 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。

c. 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0.1s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^{1,2)}

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³⁾・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^{1,2,3)}。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ひとつの制御系で対応できる非線形な制御系を構成した。図4-24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0.5sに設定した。

いま、図4-25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(4-37)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^{1,2,4)}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

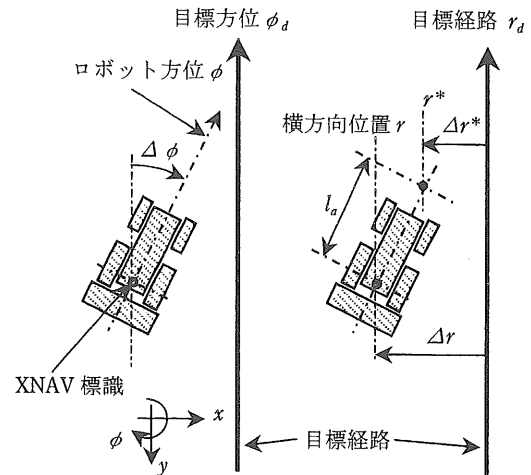


図4-25 操舵制御のジオメトリー

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。

$$\psi(t) = -\alpha \int_0^t \Delta r(t) dt - \beta \times \tanh(\Delta r^*(t) / \gamma) \quad (4-37)$$

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。(4-37)式を離散形で表すと、

$$\psi_i = -\sum_{i=0}^t \Delta r_i \Delta t - \beta \times \tanh(\Delta r_i^* / \gamma) \quad (4-37)$$

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4-25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、(4-39)~(4-41)式として表される。

$$\Delta r(t) = r(t) - r_d \quad (4-38)$$

$$\Delta r^*(t) = r^*(t) - r_d \quad (4-39)$$

$$\Delta \phi(t) = \phi(t) - \phi_d \quad (4-40)$$

r_d 、 ϕ_d は、4.3.2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。(4-40)式中の $r^*(t)$ は図4-25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。

$$r^*(t) = -l_a \cdot \sin(\Delta \phi(t)) + r(t) \quad (4-42)$$

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(4-43)式によって計算される。

$$\begin{aligned} \phi(t) = & -a' v \cdot \sin(\Delta \phi(t)) \\ & - \beta' \Delta r(t) \end{aligned} \quad (4-43)$$

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、(4-44)式のヨー角の変化から、横方向偏差 $\Delta r(t)$ を推定した。

$$\Delta r(t) = \int_0^t v \cdot \sin(\Delta \phi(t)) dt \quad (4-44)$$

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(4-44)式のように表される。

$$\Delta r_k = -v \sum_{i=0}^k \sin(\Delta \phi_i) \Delta t \quad (4-45)$$

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、(4-46)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。

$$\phi_t = 2/3 \sum_{i=-4}^0 \{(i+5) \Delta \phi_i \Delta t\} \quad (4-46)$$

ステップ i は時刻 t から100ms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(4-12)式の条件によって終了したのち、図4-17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トルとして速度を落とし、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(4-7)、(4-10)式による次行程の始端位置 qP_i 、(4-6)式に示した目標経路 $r_d(j)$ 、及び(4-13)、(4-14)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に付加することとした¹²⁵⁾。この間の流れを図4-26に示す。

③ 90° 旋回¹²⁶⁾

a. 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、前軸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4-27に示したように、各外周枕地処理行程の終点状態 $x_A = (x_A, y_A, \theta_A)$ から、一定の操舵制御値のもとで、旋回角 θ_o (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

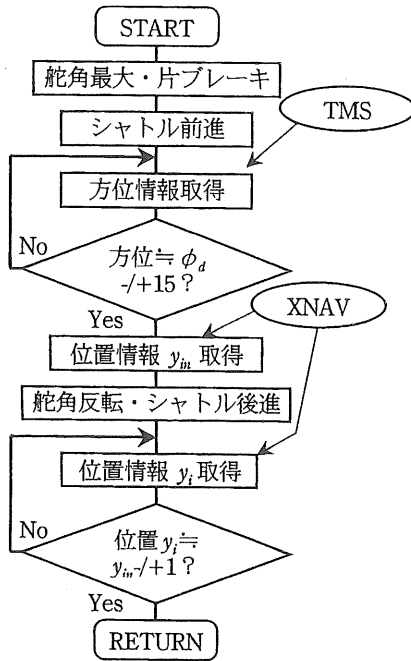


図4-26 180° 旋回制御ルーチン

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_o 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4-27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、(4-47)、(4-48)式で表される。

$$x_B = x_A - r_o(1 - \cos \theta_A) + r_o(1 - \cos \theta_o) \quad (4-47)$$

$$y_B = y_A - r_o \cdot \sin \theta_A + r_o \cdot \sin \theta_o \quad (4-48)$$

なお、 r_o 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_I, y_I) は前進旋回半径 r_I を用いて、(4-49)、(4-50)式で表される。

$$x_I = x_B - r_I \cdot \cos \theta_o \quad (4-49)$$

$$y_I = y_B + r_I \cdot \sin \theta_o \quad (4-50)$$

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_r, y_r) は、前進旋回中の車両方位の変化量 θ (前進旋回角) を用いて、(4-51)~(4-52)式によって計算できる。

$$x_r = x - l_r \cdot \sin(\theta - \gamma_r) \quad (4-51)$$

$$y_r = y + l_r \cdot \cos(\theta - \gamma_r) \quad (4-52)$$

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。

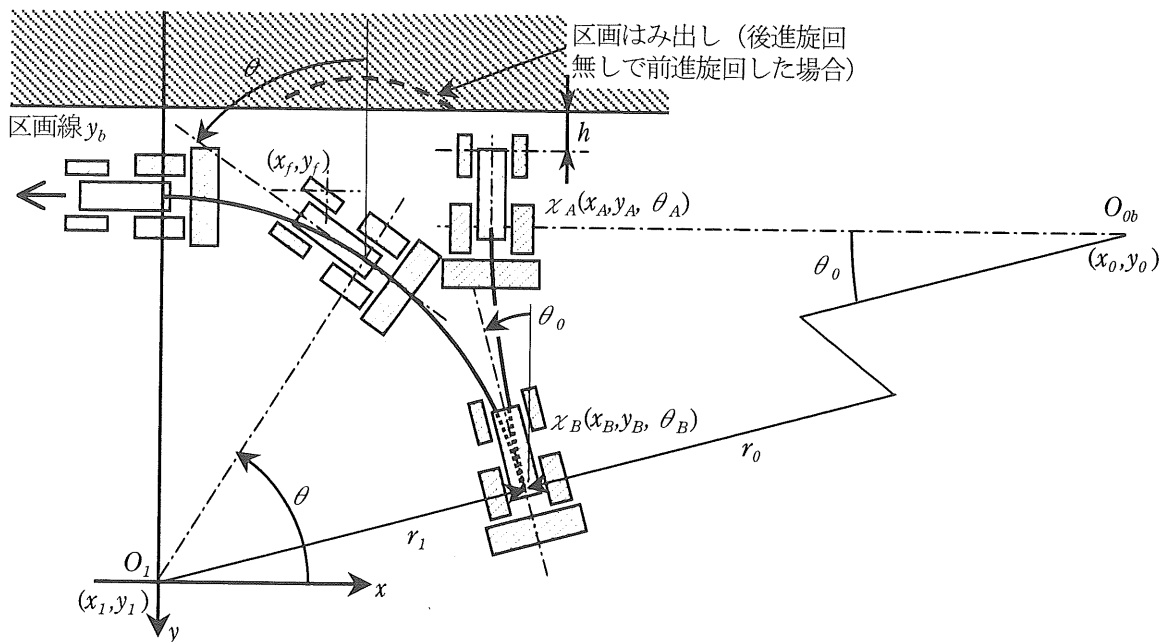


図4-27 外周90° 旋回における制御方法

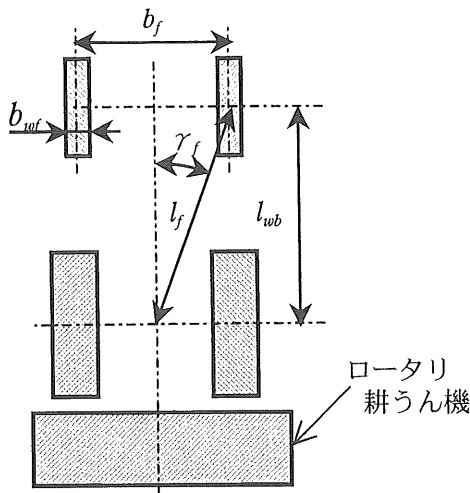


図 4-28 ROBOTRAのディメンジョン

$$x = x_i + r_i \cdot \cos \theta \quad (4-53)$$

$$y = y_i - r_i \cdot \sin \theta \quad (4-54)$$

なお、 l_f は図4-28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。

$$l_f = (((b_{wr} + b_r)/2)^2 + l_{wb}^2)^{1/2} \quad (4-55)$$

$$\gamma_f = \tan^{-1}(((b_{wr} + b_r)/2) / l_{wb}) \quad (4-56)$$

この(4-47)～(4-54)式によって、 (x_r, y_r) を求め、 y_r と区画線 y_b が $y_r > y_b$ となる区画はみ出しのない後進旋回角 θ_o の最小値を求める。本研究では(4-47)～(4-54)式に 1° 刻みに $\theta_a \leq \theta_o \leq 45^\circ$ 、 $\theta_o \leq \theta \leq 90^\circ$ となる θ_o 、 θ を代入して $y_r > y_b$ の条件を満たす θ_o 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。

$$\min. P(\theta_o) \quad (4-57)$$

$$P(\theta_o) = \zeta \varepsilon_b + \theta_o \quad (4-58)$$

ここに、

$$\varepsilon_b = y_b - y_r \quad (\text{if } y_r < y_b) \quad (4-59)$$

$$\zeta = \infty \quad (4-60)$$

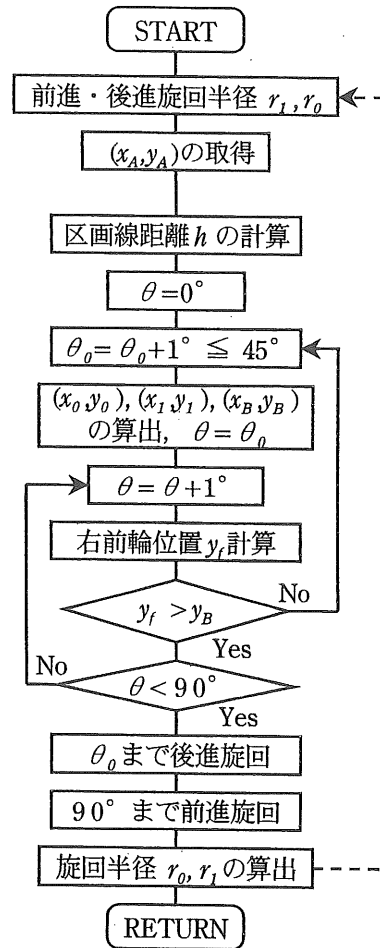


図 4-29 外周90° 旋回ルーチンの制御フローチャート

制御アルゴリズムのフローチャートを図4-29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_f 、後進旋回半径 r_o 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_f 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_o 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とした。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_o 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、路面状態の時間変動^{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ため、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。

b. 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となる既耕地への踏込みをできるだけ少なく、かつ、踏込み部分に再度踏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4-30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4-31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(4-61)式によって自動調節される。

$$L_i = L_{i-1} + h_i - (y_{A_i} - y_{A_{i-1}}) \tag{4-61}$$

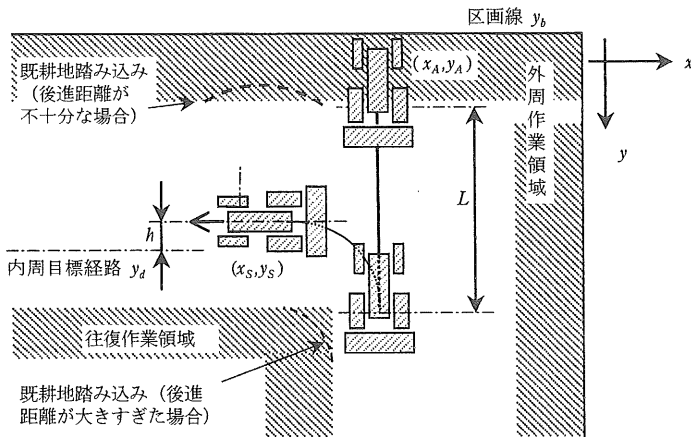


図4-30 内側90° 旋回概念図

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_i から逆演算して算出された値を使用する。

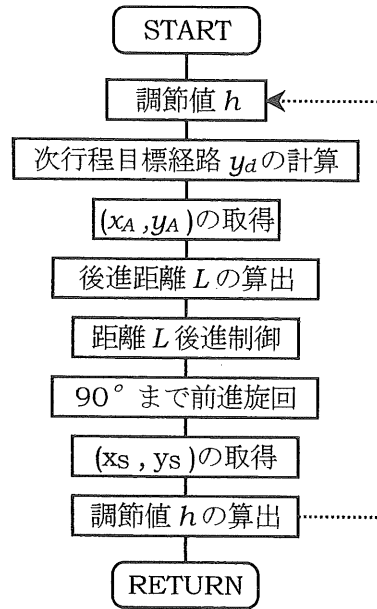


図4-31 内周90° 旋回ルーチンの制御フローチャート

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、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4-32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4-33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 ξ を以下の式

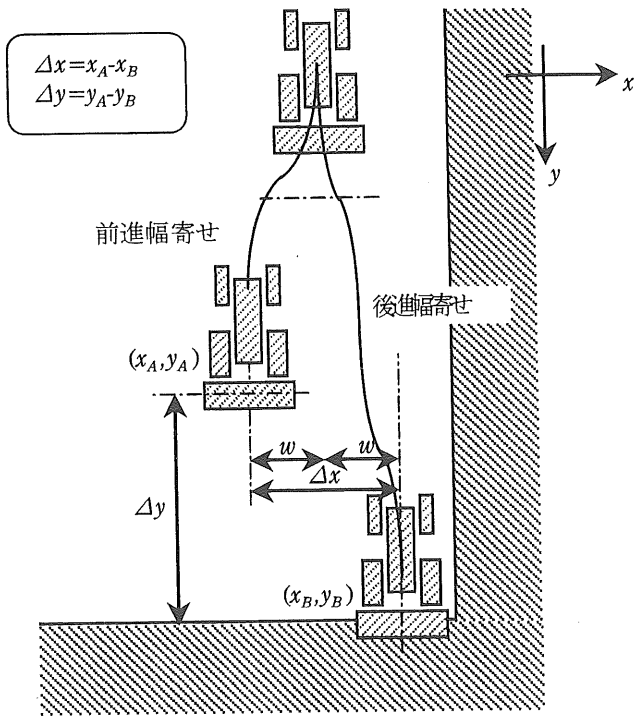


図 4-32 幅寄せ制御の概略図

によって算出し、しきい値 ζ と比較することで、前進幅寄せの必要性の有無を調べる。

$$\zeta = \tan^{-1}(\Delta x / \Delta y) \quad (4-62)$$

前進幅寄せの終了は、目標方位 ϕ_a 、位置 r_d に対する偏差 $(\Delta \phi, \Delta r)$ が、しきい値 $(\Delta \phi_a, \Delta r_a)$ 以下になったときである。これらのしきい値は引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ままでのない。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

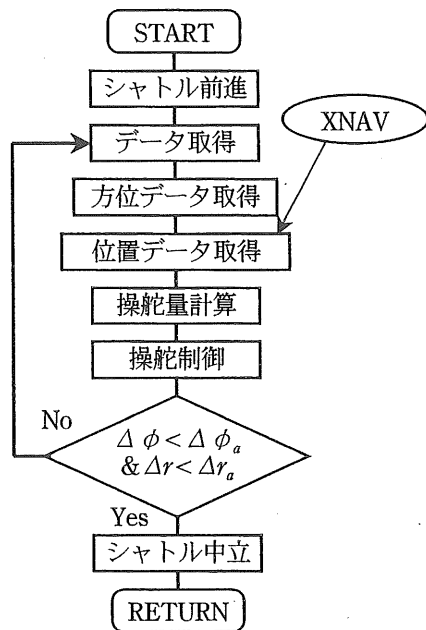


図 4-33 幅寄せルーチンの制御フローチャート

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、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。

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4-2に示す。

表4-2 自己診断の項目と内容

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?

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2s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ができないので、レバー位置を検出するポテンション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ニュートラル状態を異常とし、オペレータの初期設定を確認する。

⑧ 操舵機構は、 $-15^\circ \sim +15^\circ$ の間の操舵を行い、舵角検出ポテンショ（サーボ制御用センサ）の値が $(-15^\circ \pm 2^\circ) \sim (+15^\circ \pm 2^\circ)$ 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直し、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。

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を取り込み、各部の制御が行わ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に示す。表4-3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に示したが、その詳細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基準局情報が短時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 s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 s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 s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 $(x_0, y_0) \sim (x_T, y_T)$ 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 ダッキングなどによる走行異常

$v_i > 1.4 v_0$ 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ダッキングと認識される。

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

表4-3 異常時対応機能の項目と内容

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 停警表	2s以上データ受信無し 位置データ区画外 30s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)		
4	すべり等による走行異常	停警表	$v_i < 0.15 v_0$
5	ダッキング等による走行異常	停警表	2回連続 $v_i > 1.4 v_0$
6	速度低下	停警表	2回連続 $v_i < 0.5 v_0$
7	過負荷による速度低下	停警表	機関回転2,000rpm以下
8	車両制御不可	停警表	車両制御コントローラから返信無し
9	操舵モータ過負荷	停警表	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

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もので、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。

②項以外の異常状態の解消、復帰は、オペレータが車両に乗って各部をチェックし、各部の調整を行い、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。

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ペレーションを用意した。

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(4-5)式を

$$\Delta_d = (w - \Delta w) \quad (4-63)$$

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、モジュール毎に実行できるようにし、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4-4に示す。

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0.50m/sで無人ロータリ耕うん作業を実行した。そのときの作業軌跡は図4-34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周の走行経路が計画通りに生成されている。また、周り

表4-4 試験時のROBOTRA各部のディメンジョン

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}	1,000 mm
(後車軸中心後方)	
作業幅: w	1,700 mm

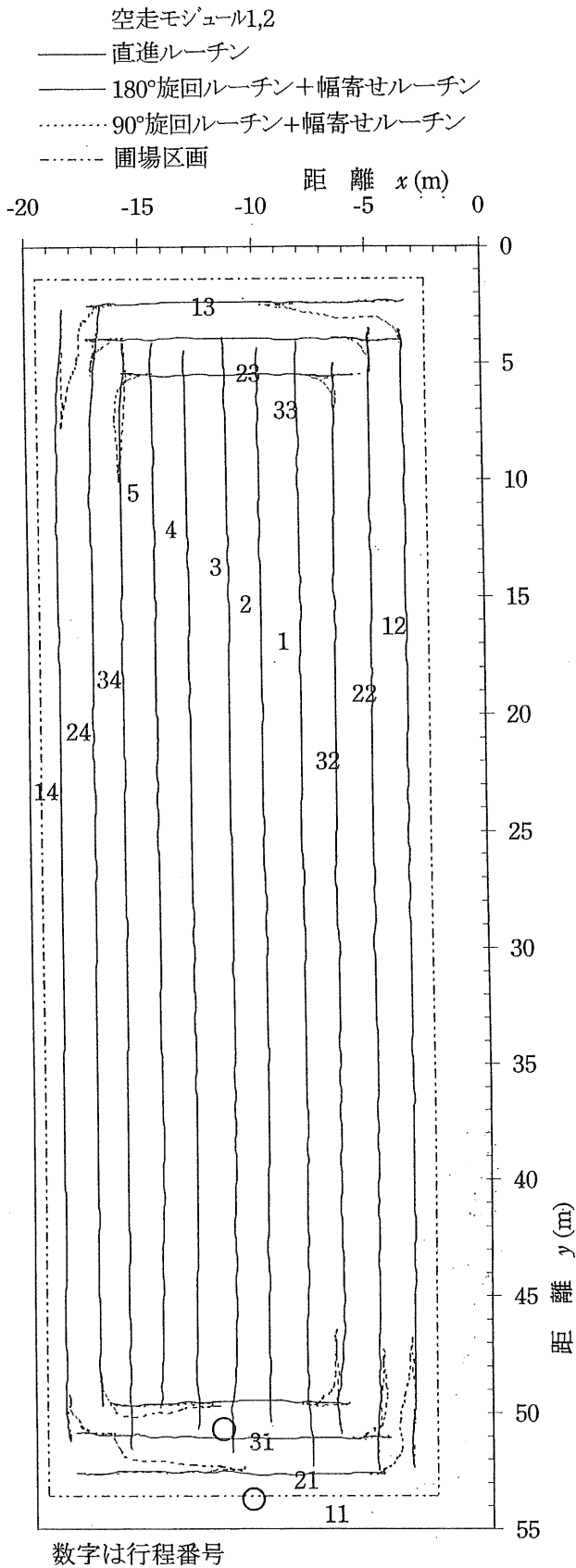


図 4-34 無人作業試験の作業軌跡図

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。

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試験方法及び条件は同様である。

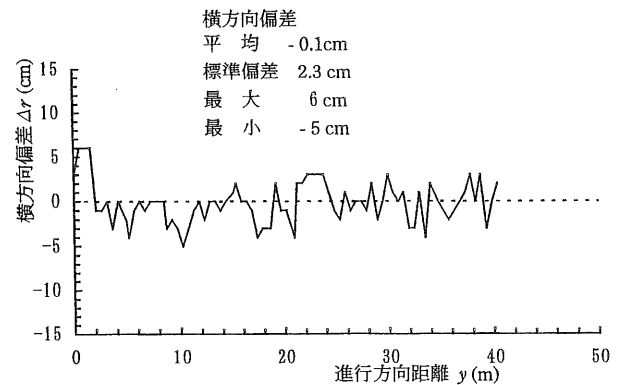


図 4-35 往復作業第 1 行程における XNAV 反射標識の目標経路に対する横方向偏差

② 結果と考察

図4-35は、図4-34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、概ね ± 5 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 6 cm を記録している。

誤差の原因として、以下 a. ~ c. が考えられる。

a. 操舵制御則に位置偏差と方位偏差を使用した (4-37) 式を用いているため、方位と位置の座標系マッチングの誤差が考えられ、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。

b. 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。

c. 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°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、作業速度0.5m/sにおける制御周期0.5sでは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。

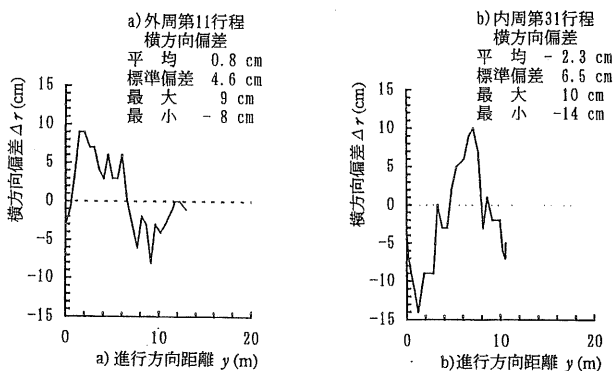


図4-36 周り作業第11及び31行程におけるXNAV反射標識の目標経路に対する横方向偏差

枕地処理のための周り作業の直進精度を図4-36に示した。a)は周り作業行程の第11行程目（図4-34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°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が及ぼすことから、その高精度化は不可欠である。

第31行程目（図4-34に○印で明示）の内周耕うん時の直進精度を図4-36 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180°旋回の旋回中心付近にあたり、走行路面が片ブレーキ使用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^{1,2)}。

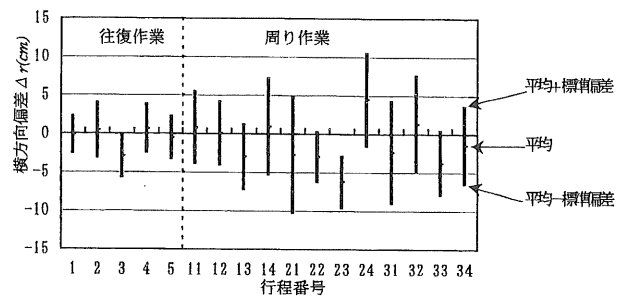


図4-37 全17行程における横方向偏差の平均と標準偏差

図4-37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±3cm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±8cm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、(4-37)式中の制御ゲイン α 、 β 、 γ の最適化が必要である。

3) 180°旋回

① 試験方法

前記 1) 経路計画の試験と同時に試験を行ったので試験方法及び条件は同様である。

② 結果と考察

180° 旋回時の走行軌跡は図4-34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 qPi 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) 90° 旋回

① 外周90° 旋回制御

a. 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ディメンション、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、前車軸から区画線までの距離が30cmになるように各

パラメータを設定して、外周90° 旋回走行試験を行った。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。

b. 結果と考察

図4-38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。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断される。一方、学習機能無しの場合は、ROBOTRAのディメンションから算出された理論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、理論値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。

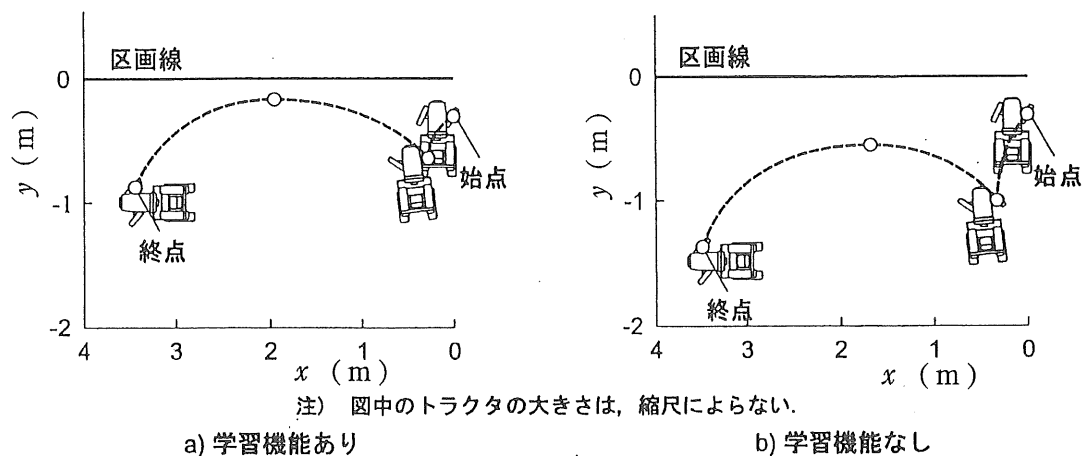


図4-38 外周90° 旋回制御時の右前輪軌跡

表4-5 外周90° 旋回制御時における学習機能の効果

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

表4-5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、作業中に一度、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ろう。

細部に改良を加えた後の外周90° 旋回の様子は、図4-34に示したとおりである。

② 内周90° 旋回制御

a. 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の比較を行った。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。

表4-6 内周90° 旋回制御時における学習機能の効果

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

b. 結果と考察

表4-6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、目標経路には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程度精度がよく、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概ね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4-34に示したとおりである。

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

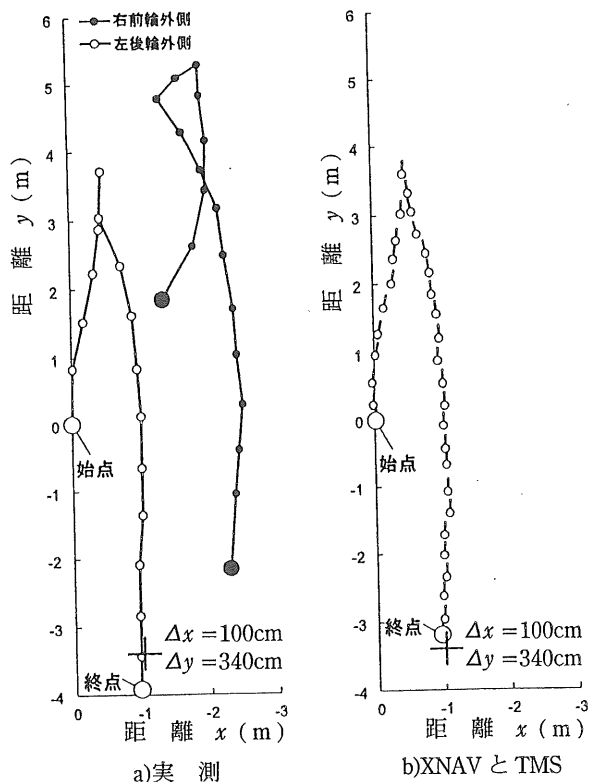


図4-39 幅寄せ量 $\Delta x = 100\text{cm}$ 、後進可能距離 $\Delta y = 340\text{cm}$ 時の幅寄せ軌跡

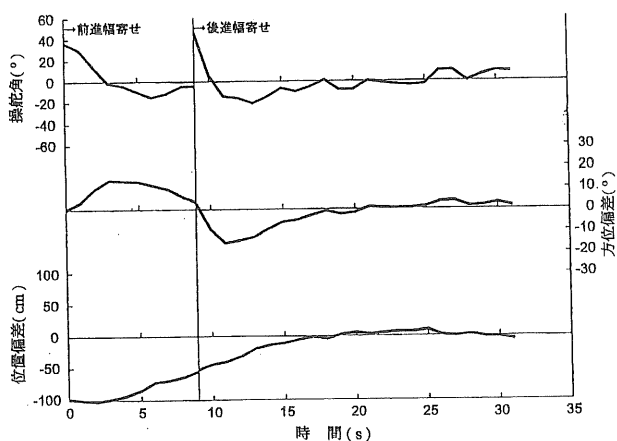


図4-40 幅寄せ制御の制御過程

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 $\Delta x = 100\text{cm}$ 、後進可能距離 $\Delta y = 340\text{cm}$ 時の幅寄せ制御結果を図

4-39に、そのときの制御過程を図4-40に示した。図4-39 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4-39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。

表4-7 前進・後進幅寄せ制御の終端位置の評価

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 ($^\circ$)		-1.2	-0.5	2.4	6.9	-2.0	0.3

表4-7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図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、現在の位置決め精度は概ね満足いくものとなっている。

修正を加えた後の幅寄せ制御の様子は、図4-34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 摘要

TMSのみを航法センサとする作業ソフトASRを開発し、往復作業を実行することができた。しかし、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たが、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ASRの直進制御法では、約0.5m/sの走行速度で、走行方位の制御精度は0.3°程度であった。この精度は、各種補正法などの適用によるTMSの高度利用によって達成されたものであるが、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ても、自律走行精度が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向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。

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。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モジュールによって取得する。作業の開始にあたっては、経路計画モジュールによってティーチングで得られた目標方位情報と境界線の位置情報をもとに、目標作業経路の自動生成を行う。

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して実行される。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つけないように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、その他のルーチンでは作業は行わず、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ことが特徴である。

- 1) XNAVによる位置情報取得の周期0.5s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。

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動作させてその機能確認を行い、初期設定パラメータ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、内界センサの情報をもとに、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変化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。

5 ロボットの評価

4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、実用化を前提にした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¹⁾³⁾

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。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に、その補足説明図を図5-1~5-2に示す。

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で、全て耕うんする。畦畔際や圃場周辺の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。

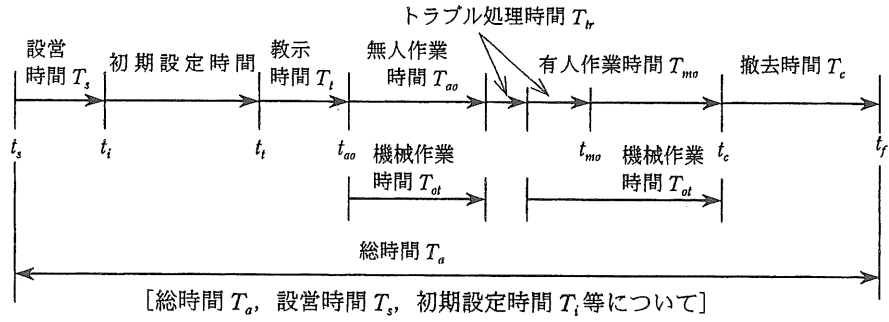
④ 無人耕うん中はオペレータが随時監視するものとする。

⑤ 供試圃場区画は、ほぼ水平で作業に適した区画と

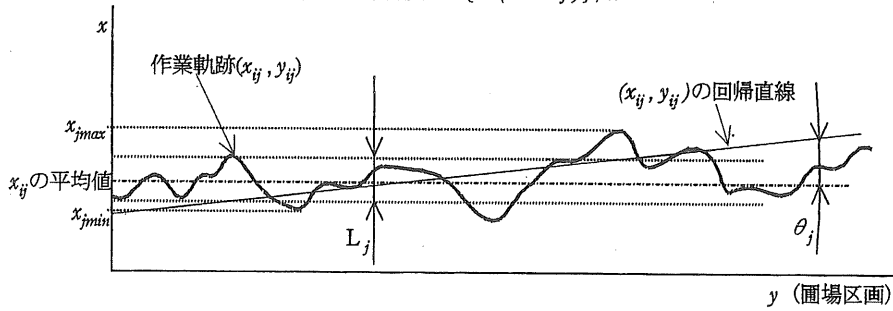
表 5-1 作業性能試験の用語

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_q [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_u [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_m [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 $= S_p - S_u$
12 実耕うん面積	S_p [a]	実際に耕うんを行った面積の総和 (図 5.1-2) $= S_u + S_m$
13 残耕面積	S_g [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 $t_f - t_s = T_s + T_i (+T_r) + T_{ao} + T_{mo} + T_{tr} + T_c$
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 $= t - t_s$
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 $= t - t_i$
19 教示時間	T_r [min]	同一圃場であっても毎回ティーチングを要する場合は, 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 $= t_{ao} - t_r$
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 $= 10 * T_a / S_p$
26 無人作業能率	E_u [min / 10a]	無人耕うん時の作業能率 $= 10 * T_{ao} / S_u$

27 作業効率	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 $= 10 * (T_s + T_t + T_{mo} + T_c + T_{tr}) / S_{tt} = 10 * (T_a - T_{ao}) / S_{tt}$
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 $= 10 * T_{ct} / S_{tt}$
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 $= (100 * S_{tt} / w / v / 60) / T_{ct}$
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 作業者拘束時間比	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 $= 100 * T_{mo} / T_{ct}$
34 非耕うん作業時間比	R_f [%]	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 $x_{jave} = \sum x_{ij} / m$ $L_j = \sqrt{(\sum (x_{ij} - x_{jave})^2 / (m-1))}$ $L_s = \sum L_j / n$
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 $x_{jmax} = \max (x_{ij} - x_{jave})$ $x_{jmin} = \min (x_{ij} - x_{jave})$ $L_a = (\sum (x_{jmax} - x_{jmin})) / n$
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



行程 $j: 1 \sim n$ 直進性 $L_s = (\sum L_j) / n$
 直進の振幅 $L_a = \{ \sum (x_{jmax} - x_{jmin}) \} / n$
 直進の平行度 $\theta = \{ \sum (abs \theta_j) \} / n$



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

図 5-1 作業性能試験に関する用語の補足説明図

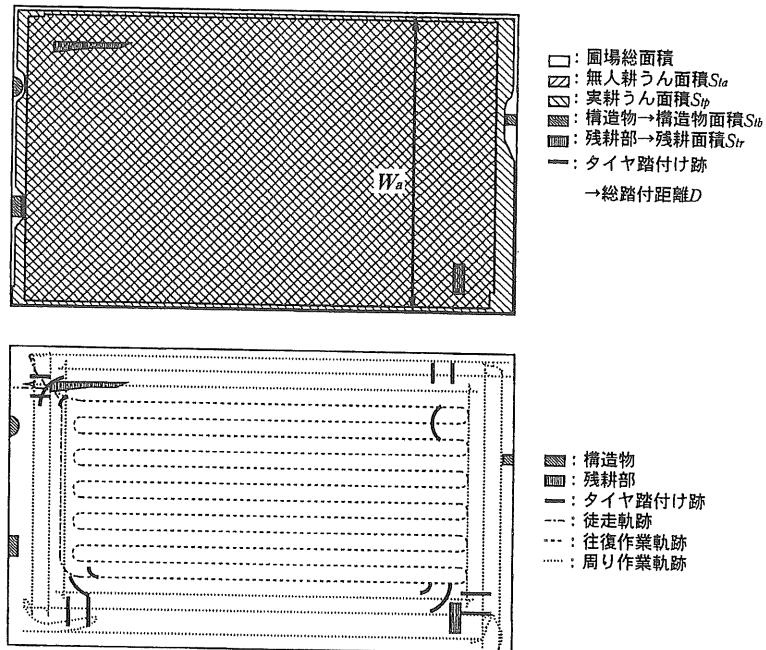


図 5-2 作業性能試験における各種面積, 軌跡図等の例

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_{fz} 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。圃場区域、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。

2) 試験方法

試験は、原則として以下による。

① 試験前に作業速度、作業部等の設定のための調整運転を実施する。

② 試験開始前に圃場条件、圃場の凹凸、圃場区画、圃場総面積、構造物面積等表5-1に示す必要事項を計測する。

③ 機器の設営開始から時間計測を開始し、総時間、設営時間等表5-1に示す必要事項を計測する。

④ 試験中に適宜、試験終了後の計測に必要な残耕面積、無人耕うん面積、総踏み付け距離、総はみ出し面積等の目印を設置する。

⑤ 作業方法、作業軌跡、耕深、耕幅等を計測する。

⑥ 有人作業を併用する場合は、その前に無人耕うん面積を計測する。

⑦ 作業、撤去を終了した後に残耕面積、無人耕うん面積、総踏み付け距離、総はみ出し面積、残稈埋没性、均平性能等表5-1に示す必要事項を計測する。

3) 評価

評価項目は、表5-1に従って、以下によって行う。

① 試験条件等

表5-1に示す条件となる計測値、作業方法、作業軌跡図、及び以下の②～④の算出の基礎となるデータを示す。

② 省力効果

作業能率、作業拘束時間比、無人作業時間比、有人作業時間比、非耕うん作業時間比、教示作業時間比などによって評価する。

③ 作業能率

機械能率、無人作業能率、作業能率、正味機械能率、圃場作業効率、無人圃場作業効率などによって評価する。

④ 作業精度

直進性、直進の平均振幅、直進の周期、直進の平行度、耕深、耕幅、総踏み付け距離、総はみ出し面積などによって評価する。

5.1.2 取扱い性試験

取扱い性試験及びその評価で使用する用語は、一括して表5-2に示す。

1) 試験の条件

取扱い性試験は、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ずる。

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5-2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5.1.1 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。

3) 評価

評価項目は、表5-2の用語等を使用して、以下によって行う。

① 設備状況を評価する。

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。

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5-3に示す。

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)作業性能試験に準ずる。

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抽出する。

3) 評価

評価項目は、表5-3の用語等を使用して、以下で行う。

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。

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。

表 5-2 取扱い性試験の用語

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

表 5-3 信頼性試験の用語

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} [%]	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} [%]	総時間にしめるトラブル処理に要した時間 $= T_{tr}/T_a$



a) 試験No. 2 山形県鶴岡市農家圃場における試験風景



b) 試験No. 3 生研機構附属農場における試験風景

図 5-3 評価試験風景

1) 試験No. 1：北海道大学農学部寺尾研究室に委託して、同大学附属農場で、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12月）。

試験の様子を図5-3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て代かき作業に近い条件であった。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。反面、No. 1, 2 は防水性の評価に、No. 3 は防塵性の評価に、それぞれ好ましい条件であった。

試験条件、結果を一括して表5-4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5-4～8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。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性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、作業機の耕深・水平自動制御機構、及び旋回時片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。

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10 aあたり約35分となっているほかは、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

表 5-4 試験結果の概要

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
作業者能率[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幾へのからみ除去によるもの。

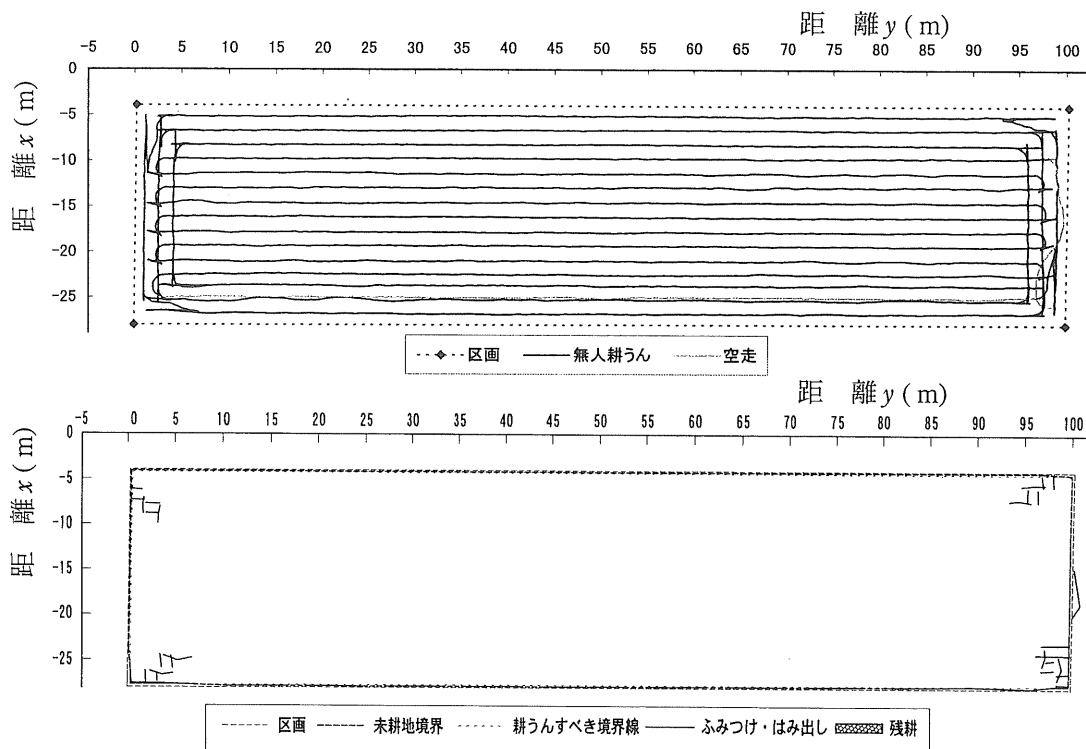


図 5-4 試験No.1におけるXNAVシステムの走行軌跡と作業精度

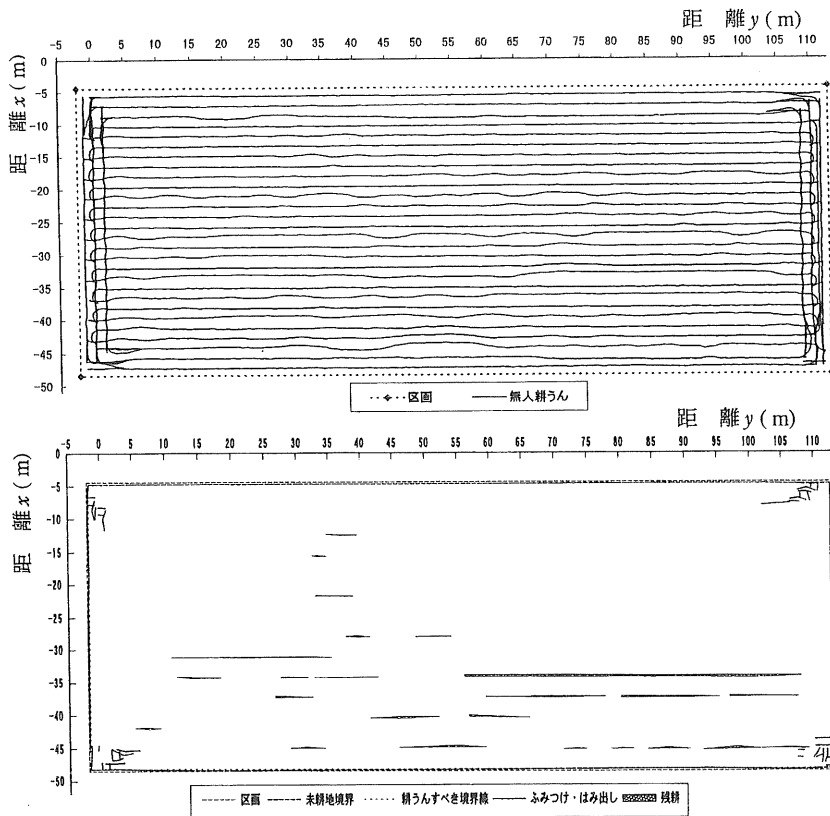


図 5-5 試験条件No. 2 におけるXNAVシステムの走行軌跡と作業精度

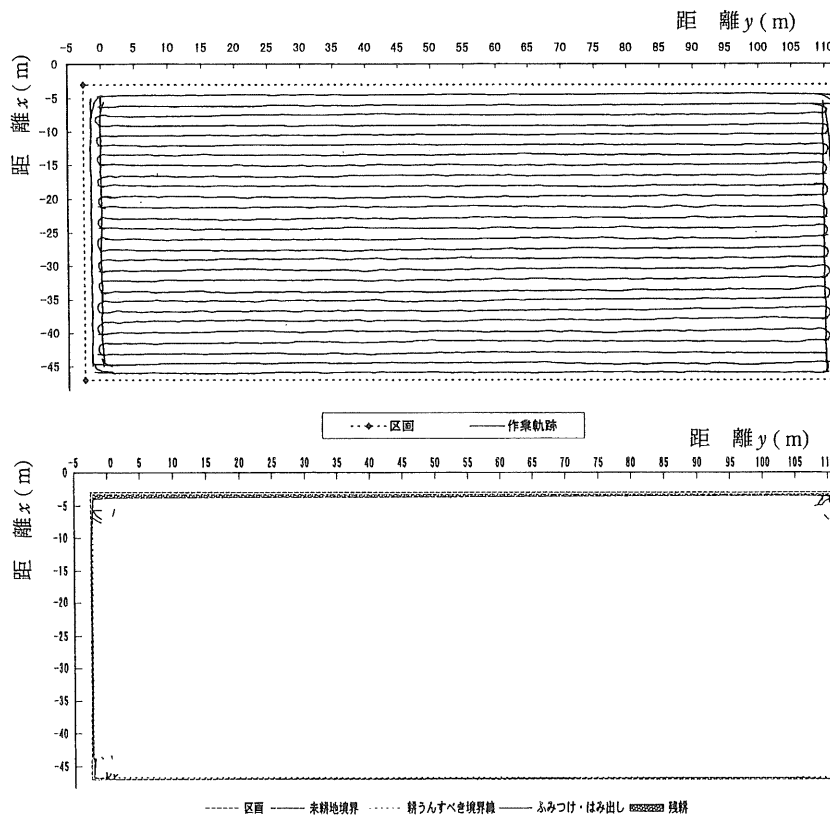


図 5-6 試験条件No. 2 における慣行試験の走行軌跡と作業精度

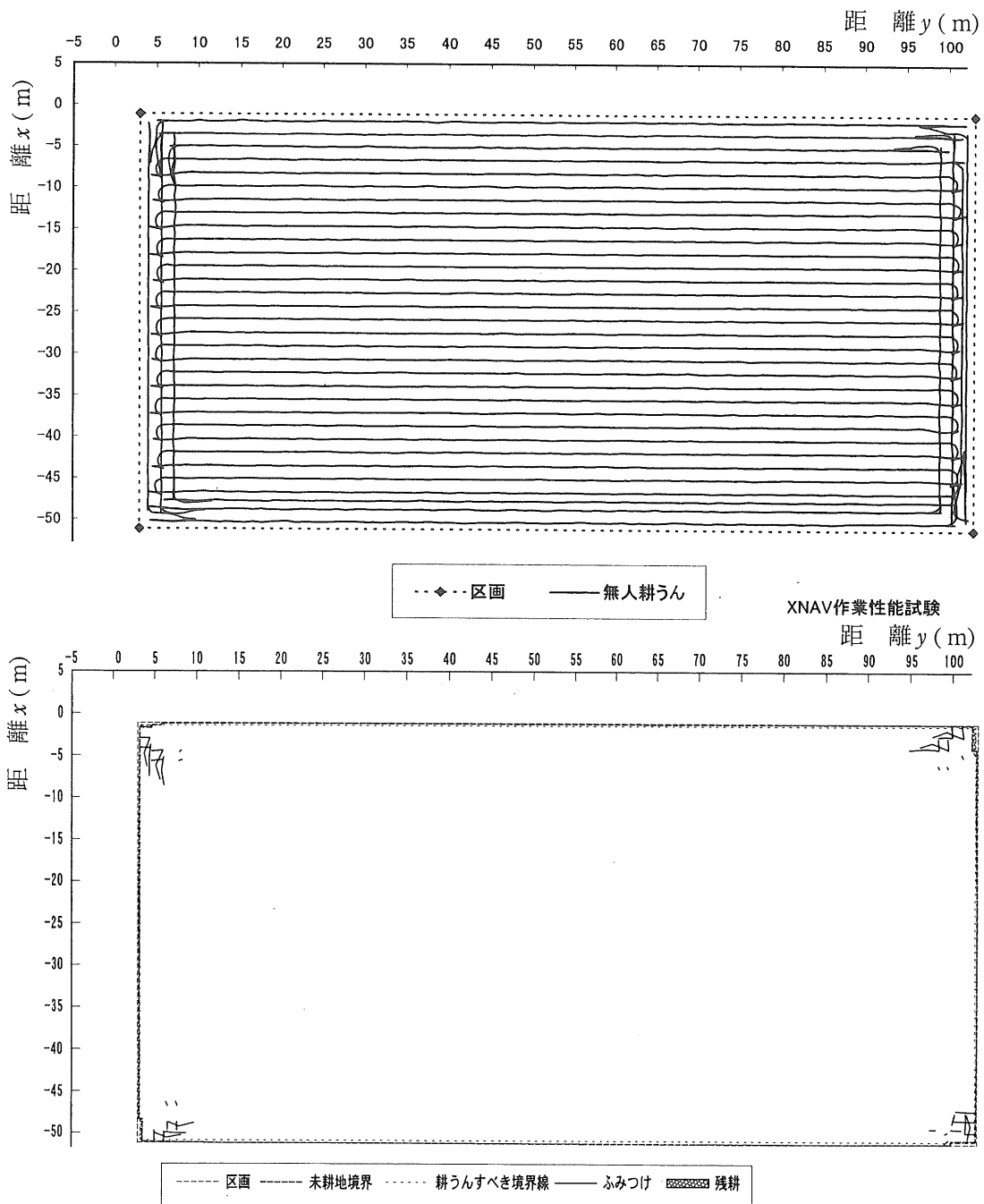


図5-7 試験条件No.3におけるXNAVシステムの走行軌跡と作業精度

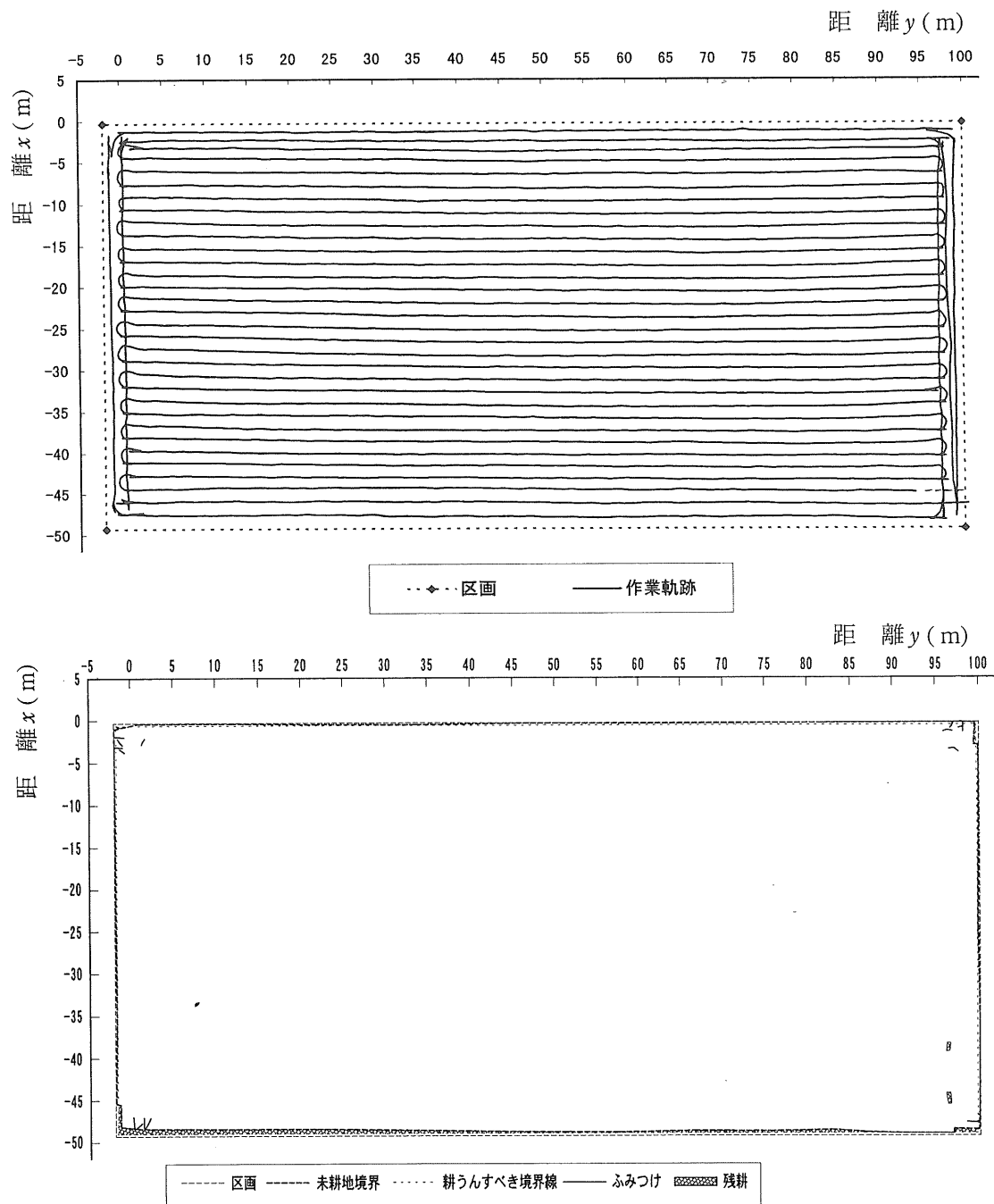


図 5 - 8 試験条件No. 3 における慣行試験の走行軌跡と作業精度

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。

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、圃場状態から特にスリップが著しく、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、ややダッキング気味であり、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ー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這い上がれず、幅10cm前後の長い残耕をつくっている。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、一般の慣行作業では、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、残耕はそのままに、碎土作業の際に処理することとして、作業精度を低下させるかの判断が必要な、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やや少ない傾向がみられたが、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さらなる改善の余地がある。

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の試験条件はむしろ特異なケ

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、作業は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、良好な直進性と直進の平均振れ幅を示している。直進の平行度は、無人作業の方が優れたものとなっている。また、図4-24に示す直進制御の流れ、及び式(4-42)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さずである。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1.1m/sの高速作業試験、約0.1m/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、車面上のディスプレイ及び基準局のディスプレイの見づらさが指摘された。

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異常を報知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無いと判断される。

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た際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、なお未確認である。
- 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に異常をきた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、未確認である。
- 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、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
- などが挙げられる。これらのうち、ソフト開発では、ユーザーである農家と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、万に一つのハード上の、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、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

ロボットは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、農業や経営面の効率化ばかりでなく、プレジジョンファーム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ロボットを監視する、
 - 2) 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、機械コストの低減は勿論、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 摘要

4までに記したロボットを農業の現場に供試してその実用性を評価した。

評価に際しては、車両系無人作業の効果を適正に評価しうる試験方法・評価基準を策定した。この試験方法・評価基準は、農用車両の無人作業一般にも適用しうるよう配慮した。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・作業拘束時間比などの評価項目を設けた。同じく, 作業精度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, 総踏み付け距離, 総はみ出し面積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, 耕うん作業には不適な圃場条件であったが, No.3 は逆に極度に乾燥した条件であった。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, 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, 荒耕しを想定して, 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, 総踏み付け距離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, 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ロボットの長所をいかに発揮した。

3) 取扱い性試験では, 初期設定時のディスプレイの見づら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結果, 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。以上ロボットは所期の目標が満たされたものと判断された。

今後の課題として, ディスプレイの見難さなど, 細部の改良に加え, 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の安全性について確認試験を行い, 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の実証試験を続ける。

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, ロボットが農家に導入され, 農作業全体の超省力化が達成されることが考えられる。

6 総括

6.1 自律移動ロボット研究の現状, 背景, 目的と構成要素

将来の日本農業は, 経営規模の拡大を伴う生産コスト削減, 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削減には, 機械コストの削減とともに, 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ためにおこなう「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」、そして圃場に見合った作業経路計画等の戦略を立て、かつ機械の点検などを行う「企画・管理」の3つに分けることができる。今日までの車両系農業機械の自動化は、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荷は大幅に改善されたものの、相変わらず1名のオペレータが必要であり、労働生産性は相変わらずである。

本研究の目標は、「作業機操作」の無人化を前提に、1枚の圃場に対する作業経路計画や各部の点検のような「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、大幅な労働生産性の向上を達成することにある。

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、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。

無人作業を実行する農用車両には、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、人間に近い機能要素が必要である。これらのうち、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。しかし、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。

6.2 車両システム試作

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、改良を重ねた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、所期の条件を満たし、各種試験に供試することができた。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が、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た。

- 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、規格化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、非常停止機構は、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性についても対策を講じ、実証しておく必要がある。

6.3 航法システム

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。既存の航法システムをそのまま農用車両に適用することは、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った。

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、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の実行や、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、ロボットに適用することが可能となった。

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であるが、行程の始端・終端位置、行程間ピッチなどを精度よく制御するためには、絶対的な位置情報を取得可能な航法システムが必要であった。

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ものである。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部の水平角・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。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の点にあるため、計測されたターゲット点の座標は車両の傾斜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、データ更新周期0.52sで、ターゲット点の傾斜補正無しで絶対値平均位置検出誤差4.6mを確保することができた。しかし、車両が急旋回を行った

ときにターゲットを見失うことがあり、大半は、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、ときに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が、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された。AP-L1は、コスト的にやや問題があるものの、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

TMSのみを航法センサとする作業ソフトASRを開発し、往復作業を実行することができた。しかし、路面の状況によって旋回半径が変化するため、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たが、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かった。与えられた目標方位を維持しながら自律走行を行うASRの直進制御法では、約0.5m/sの走行速度で、走行方位の制御精度は 0.3° 程度であった。この精度は、各種補正法などの適用によるTMSの高度利用によって達成されたものであるが、

- 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、
- といった事情によって、走行方位の検出精度をさらに向上させても、自律走行精度が向上するとは断定できない。

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。

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。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モジュールによって取得する。作業の開始にあたっては、経路計画モジュールによってティーチングで得られた目標方位情報と境界線の位置情報をもとに、目標作業経路の自動生成を行う。

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して実行される。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は作業機制御が実行されるが、その他のルーチンでは作業は行わず、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ことが特徴である。

- 1) XNAVによる位置情報取得の周期0.5 s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) 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補正を行っている。

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動作させてその機能確認を行い、かつ、初期設定パラメータ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、内界センサの情報をもとに、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・ダッシング・過負荷などのトラブルは位置情報から算出された速度変化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、初期の目標を達成した。

6.5 耕うんロボットの評価

開発したロボットを農業の現場に供試して、その実用性を評価した。

評価に際しては、車両系無人作業の効果を適正に評価しうる試験方法・評価基準を策定した。この試験方法・評価基準は、農用車両の無人作業一般にも適用しうるよう配慮した。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、作業者能率・作業者拘束時間比などの評価項目を設けた。同じく作業精度を評価するために直進性・直進の平均振幅・直進の平行度、総踏付距離、総はみ出し面積などの評価項目を設けた。

策定した試験方法に従って、北海道大学附属農場の畑地、山形県内の農家水田、及び、生研機構附属農場の水田において試験を実施した。山形、及び生研機構における試験では、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、ロボットの作業性能に対する比較対象とした。

試験結果は以下のようであった。

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) 作業精度では、残耕は慣行作業とほぼ同等であったが、総踏み付け距離は慣行作業より多く、劣っていた。直進性・直進の振幅・直進平行度は、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ロボットの長所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、雨降りの条件下、あるいは埃のひどい条件でも機器の動作に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結果、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。以上ロボットは所期の目標が満たされたものと判断された。

今後の課題として、ディスプレイの見づらさなど、細部の改良に加え、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の安全性について確認試験を行い、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の実証試験を続ける。

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、ロボットが農家に導入され、農作業全体の超省力化が達成されると考えられる。

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た。本研究を通じて完成した耕うんロボットは、現時点で市販化に至っていないが、将来、何らかの形で普及していくものと自負している。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すで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る。そこで、当時諸先輩方との議論の末に、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

の想像を遥かに超える進歩を遂げてきた。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、夢にも考えられなかった。

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ある。

本研究を企画し、実施するにあっては、生研機構 芦沢利彰元研究検査担当理事、同 菅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から暖かい励ましと貴重なお助言を頂いたこと、ここに深く感謝する次第である。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 森芳明研究交流推進本部長、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、一時期共に研究を進めた元同僚の瀧川具弘君に改めて感謝の意を表す。

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、懇切なお指導と有益なお助言を賜ったことに深甚の謝意を表す。また、本論文をご校閲いただき、有益なお助言とご指導を賜りました同研究科 高井宗宏教授、ならびに、北海道大学工学研究科 嘉数侑昇教授に心より謝意を表す次第である。

さらに㈱クボタの伊藤勝美氏、入江康夫氏、藤井保夫氏、山中之史氏ほかの皆様、日本航空電子工業㈱の一杉則昭氏、肥後 正氏ほかの皆様には、研究の過程で共同研究者としてご協力をいただき、山形県農業試験場の芳賀泰典主任専門研究員には圃場試験にご協力を頂いた。ここに、記して関係各位に謝意を表すものである。

参考文献

- 1) 生研機構：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：急傾斜地みかん園用自動走行作業者の開発と利用法，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) 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，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) 本橋固司，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) 韋 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，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) 生研機構：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，89-90，1995
- 40) 生研機構：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，127-128，1995
- 41) 生研機構：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) 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，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) 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) 生研機構：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, 5-6, 1989
- 51) 行本 修：農用車両の自律走行[1], 農業および園芸, 65(1), 143-148, 1990
- 52) N. D. Tillet : Automatic Guidance Sensors for Agricultural Field Machines : Review, J. agric. Engngres., (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, SEA, 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年度研究報告会試料, 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) 生研機構：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, 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 FARM 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, SEA TECHNICAL PAPER SERIES No. 911752, 1-13, 1991
- 77) 端 俊一他: 一次元イメージセンサ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—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—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, 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, 蚕糸・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, 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, 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
- 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, 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, 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, 7-8, 1992
- 108) 生研機構：自律走行システムの研究－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, 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, 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, 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, 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, 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, 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, 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, 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, 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, 生研機構, 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, 60(5), 53-61, 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, ASEA, 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，生研機構，4-5, 1998
- 130) 生研機構：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，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

Studies on Autonomous Traveling Robot for Tilling Operations

Osamu Yukumoto, Yosuke Matsuo, Noboru Noguchi, Masato Suzuki

1. Review, background, purpose and the elements of the research on autonomous traveling robot

Japanese farmers will soon be able to reduce their agricultural production cost by expanding management size and increase their profitability by upgrading its agricultural products. Automatization and unmanned operation of agricultural machines are necessary to reduce production cost 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 raw tracking on head-feeding combine harvesters. There are few automatization examples in 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 cost remains at their previous levels.

The purpose of this study is to substantially reduce labor cost by automatizing a portion of 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 aimed at achieving the following objects through 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.

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.

2. Manufacture of Vehicle System Prototypes

The work methods and the 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

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 the error of a few cm or less and at the cycle of 0.5 s from the distance of 500 m.

4. Development of Traveling Control Programs

We developed an operating software, called ASR, which uses the TMS. A certain level on 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 the running heading control accuracy of 0.3° at the running speed of 0.5 m/s; this accuracy allows for the lateral deviation of 50 cm after running the distance of 100 m. Although the accuracy of autonomous work achieved by the ASR is the 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 of 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 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

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 operation was also performed in No. 2 and 3 by a skilled operator under the same conditions as those for unmanned operation. 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.

農業機械化研究所研究報告 第32号

周波数可変方式による乳量計測法の開発

古山隆司・道宗直昭・福森 功・中川靖夫

目 次

古山隆司・道宗直昭・福森 功・中川靖夫

周波数可変方式による乳量計測法の開発

緒 言	97
1 研究の背景と目的	97
1.1 研究の背景	97
1.2 市販の乳量計	98
1.3 研究の目的	99
2 周波数可変方式による乳量計測方法	99
2.1 既往の研究成果	99
2.2 計測の原理	100
2.3 回路の構成と流れ	101
3 乳量計試作のための基礎試験	101
3.1 乳量計の感度向上	101
3.2 選択度	102
3.3 コイルの条件	102
3.3.1 試験方法	102
3.3.2 試験の結果と考察	103
3.4 摘 要	103
4 乳量計の試作	103
4.1 試作の基本方針	103
4.2 乳量計の試作	104
4.3 試作装置の概要	104
4.4 摘 要	105
5 模擬搾乳試験	105
5.1 模擬搾乳試験装置	105
5.2 PLM-P2の性能	106
5.2.1 試験方法	106
5.2.2 結果と考察	106
5.3 試料温度変化に対する作動状況	106
5.3.1 試験方法	106
5.3.2 結果と考察	106
5.4 模擬搾乳試験	107
5.4.1 方 法	107

5.4.2	結果と考察	107
5.5	摘要	108
6	実搾乳試験	108
6.1	実搾乳試験装置	108
6.2	検量線の作成	109
6.2.1	方法	109
6.2.2	乳量測定値の補正	109
6.2.3	結果と考察	110
6.3	実搾乳試験	110
6.3.1	試験方法	110
6.3.2	結果と考察	111
6.4	ベース周波数の調整によるシミュレーション	113
6.4.1	方法	113
6.4.2	結果と考察	113
6.5	PLM-P2による乳量計測の問題点	114
6.6	摘要	115
7	総括	115
	謝辞	116
	参考文献	116
	Summary	117

Development of a milk volume measurement method
using the detection of resonance frequency

Contents

Introduction	97
1 Background and aim of research	97
2 Milk volume measurement method using the detection of resonance frequency	99
3 Basic research for trial production of milk meter	101
4 Trial production of milk meter	103
5 Practice milking test	105
6 Practical milking test	108
Conclusion	115
Acknowledgement	116
References	116
Summary in English	117

周波数可変方式による乳量計測法の開発

古山隆司*・道宗直昭**・福森 功**・中川靖夫***

2000-8-9 受理

- * 畜産工学研究部(現評価試験部)
- ** 畜産工学研究部
- *** 埼玉大学工学部(現埼玉大学名誉教授)

抄 録

これまで市販されているパイプラインミルク用の乳量計は、寸法が大きく、着脱・洗浄に時間と労力を要する、または個体間移動時の取扱いが煩雑になる等の問題があった。そこで、日常の搾乳作業の手順を変えることなく、簡易に乳量を把握することのできる新しい方式の乳量計測法の開発研究を行った。

非磁性体のパイプの周りに導線を巻いてコイルを作り、パイプ内に生乳を流したとき、コイルに発生する分布容量(静電容量)は、パイプ内の生乳量に比例して変化する。この分布容量の変化を検出して乳量に変換する方式の乳量計を試作し、模擬・実搾乳試験を行った結果、実際の乳量と乳量計の指示値との間の誤差率の平均値は5.0%、標準偏差9.05であった。実用化には至らなかったものの、本方式による乳量計測が可能であると認められた。

緒 言

近年、我が国の畜産を取り巻く環境は輸入自由化や円高による国際競争の激化など厳しい情勢下にある。このような状況の中で、生産コストを下げ、かつ高品質な生産物を市場に提供していくには規模拡大や個体別管理が必要となる。しかしながら、規模拡大に比し、個体別管理は進んでいない。この原因としては、個体毎の飼料摂取量、体重、搾乳量の把握ができていないことが挙げられる。これらのデータを把握できれば、個体毎の飼料の必要摂取量、乾乳時期などを判断し、低コスト化や高品質化に貢献できる。

筆者らは飼養管理技術のうち、非接触測定が可能な新しい乳量計測法の開発研究を行った。この計測方式とは、ミルクパイプの外周にコイルを巻き、コイル内を生乳が流れた時の分布容量(コイルの導線間に発生する静電容量)の変化を検出し、周波数に変換して乳量を把握するものである。

1 研究の背景と目的

1.1 研究の背景

我が国の酪農において、飼養戸数は昭和35年の41万戸から平成8年には4万2千戸へと急激に減少するなど、減少の一途をたどっている(図1)¹⁾。この要因としては、乳価の低迷、後継者不足、労働過重、ふん尿処理問題、畜産物の輸入自由化による輸入増などが挙げられる。しかし、一方では1戸当たりの平均飼養頭数は増加している(図1)¹⁾。この厳しい状況下において、多くの酪農家では、飼養頭数を増やすことにより生産性を向上させ、牛乳生産のコストを削減し、より多くの利益を得る努力をしていることが読みとれる。

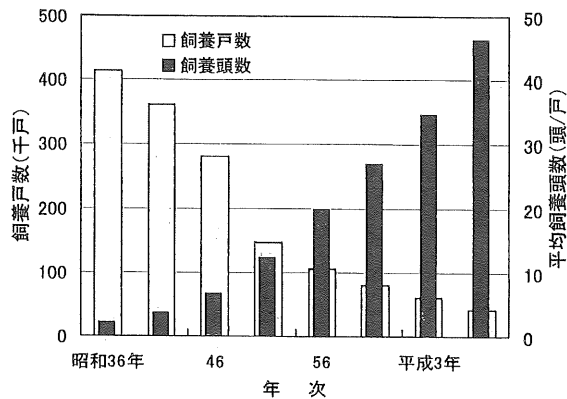


図1 酪農の飼養戸数と飼養頭数の推移

酪農経営を存続していくためには、作業従事者の労働過重や労働時間の短縮、製品の品質・低コスト生産が重要となる。労働過重や労働時間短縮については、作業を機械化することにより解決可能と判断される。規模拡大による低コスト化はある程度進んでいるが、さらに低コスト化を進めるためには、個体毎の乳量を把握し、生産性の高い個体を選抜するなどの改良を進める必要がある。

1.2 市販の乳量計

これまでに市販されている乳量計は容積式、比較容積式、重量式の3つに大別することができ(図2)²⁾、最近では電気伝導度と泌乳パターンから乳量を推定するタイプのものも販売されている。

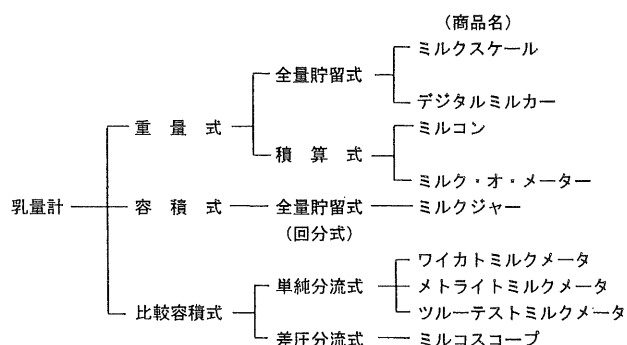


図2 市販の乳量計の種類

容積式ではミルキングパーラで用いられているレコーダージャーが挙げられる。この方式は容器外壁に目盛りを印したガラス容器(レコーダージャー)に搾乳後の生乳全量を溜め、生乳表面の位置を読み取って計量する回分式のものでほとんどである。この方式ではレコーダージャーの取付けを水平に保つように設置しないと誤差を生じる。また、レコーダージャー内に生乳が入るとき泡が同時に溜り、泡と生乳を見分けて目盛りを読み取らなければならないため、作業者にとって煩雑な面がある。しかし、構造が簡単であることから、レコーダージャーの取付けを水平に保ち、目盛りの検定をしておくことによって、誤差率が±5%に入るものも少なくない。

比較容積式では、乳量計頭部で流入する生乳の一部を計測管に貯留、その他の生乳はミルクパイプに送られ、搾乳終了後に計測管の目盛りを読み取り計量する。分流する量は、全体の1.5~4.0%前後である。この方式では本体がプラスチックでできており、軽量(1~2kg)かつ可搬型であるため、パイプラインミルクでの乳量計測用としてよく使用されている。一部の機種を除いて、誤差率は±5%以内であるが、構造が複雑であり、設置・使用方法が悪いと誤差が大きくなり、また、使用後は分解して洗浄・消毒する必要があるなど、取扱いが煩雑である。

重量式の乳量計は、全量貯留式と積算式に分けられる。全量貯留式は、容積式のレコーダージャーの下部にロードセルを取り付けたもので、これに生乳全量を溜め、ロードセルで測定する。計量精度は高く(誤差率±3%以下)、乳牛の後代検定用として用いられている。

積算式は、生乳を小さな一定容量の容器(ロッキングセンサ)内に溜め、満杯になると排出し、再び生乳を溜める操作を繰り返し、満杯容量と繰り返し回数により乳量を求める方式である。この方式も比較的精度は高く、寸法が若干大きいものの、持ち運ぶことも可能なため、ミルキングパーラだけでなく、パイプラインミルクにも使用されている。

最近市販された電気伝導度と泌乳パターンから乳量を推定して求めるタイプは、電気伝導度を測定し、生乳の流れ方により電気伝導度が変化するパターンと様々な牛の泌乳パターンを組み合わせ、個体別の乳量を推定するものである。この乳量計は、最初の搾乳時に全搾乳量

を測定して校正を行う。精度は誤差率が±3%程度となるが、牛が乾乳近くになり乳量が減ってくると誤差が大きくなる傾向にあり、適宜校正を行う必要がある。

1.3 研究の目的

前述した市販パイプラインミルカ用乳量計は、「寸法が大きい」、「着脱・洗浄の手間がかかる」、「個体間移動時の取扱いが煩雑である」、「定期的な校正が必要である」などの問題がある。そのため、日常的には乳量計による個体別の乳量チェックは行われず、月に一度程度チェックする例が多い。しかし、規模拡大に伴い、経営の合理化を図るためには、個体別の乳量を的確に把握し、給飼と結びつけることにより生産性の向上を図ることが重要であり、簡易に乳量を測定できる乳量計の開発が求められている。そこで、本研究では、日常の搾乳作業の手順を変えることなく、簡易に乳量を測ることのできる新しい方式として、非接触式で運搬・着脱などの取扱いが容易な乳量計測法を開発することを目的としている。

2 周波数可変方式による乳量計測方法

本研究は、昭和60年度～平成2年度に「乳量計測法の研究」として基礎的な検討を実施した。この間、バケツミルカに試作した乳量測定装置を装着して模擬・実搾乳試験を行い、その可能性を検討してきた。乳量計測の可能性は見出されたものの、環境温度による影響や装置としての安定性等の問題が残された。そこで、残された問題も含め、パイプラインミルカに対応するため、平成3年度～6年度に「周波数可変型乳量計の開発」として新たに研究を行った。この研究では、既往の研究成果及びパイプラインミルカにおける使用条件をもとに、回路の構成の見直しや乳量計の構造を決定し、試作機による模擬搾乳及び実搾乳試験を行い、動作確認、計量精度などについて検討した。以下では主に「周波数可変型乳量計の開発」において行った研究内容について報告する。

2.1 既往の研究成果

昭和60年度～平成2年度に行った「乳量計測法の研究」における試験の結果を以下に記す。

① ガラス製の試験管の外周にエナメル線を巻いてコイル

を製作し（試験管の外径30mmφ、内径27mmφ、コイル巻数30回、基準発振器の発振周波数5MHz）、試験管内に生乳を入れて発振させた結果、同調周波数のズレは数10kHzの範囲にあった³⁾。

② 非磁性体であるアクリルパイプ（外径26mmφ）の外周にコイルを巻き（巻数30回）、検出發振回路（発振周波数5MHz）へ組み込んだ。検出發振回路、基準発振回路、混合器、検波器、低域通過フィルタ、そしてコンパレータで構成した乳量計試験装置（以下、BMM-P1という。）を試作し、バケツミルカに設置した。BMM-P1に水を流し、平均流量に対する積算カウント値のばらつき〔(測定値-平均値)×100/平均値〕を調べた結果、ばらつきの幅は-14.0～19.0%の範囲にあり、標準偏差は±10.7%であった⁴⁾。

③ 本方式では流速が一定であることが前提であるため、ミルクパイプ内を流れる水の速度を調べた。バケツミルカへ接続するミルクチューブにアクリルパイプ（外径26mmφ、内径17mmφ、全長300mm）を接続し、真空圧、パルセータ、水の流量を変えてパイプ内を流れる水をビデオ撮影し、コマ送りによる映像解析を行った。流速は真空圧、パルセータ、水の流量などの条件による影響は少なく、各条件での平均値は2.1～2.5m/sの範囲にあり、およそ一定であった⁵⁾。

④ BMM-P1に水、スキムミルク、バルククーラから採取した生乳、搾乳後の生乳を供試して、それぞれ10秒間毎の積算カウント値と流量との関係を調べ、検量線を作成した結果、各供試材料の検量線は異なった⁶⁾。

⑤ BMM-P1による模擬搾乳試験では、環境温度の影響から発振周波数が安定しない傾向にあった⁹⁾。

⑥ 計測部のミルクパイプをテフロン管にすることにより、パイプ内への残乳が少なく、ベース周波数（基準値）の変動が少なくなった。本方式の乳量計を使用して搾乳する場合、搾乳前後にミルクパイプ内に生乳が残っているとベース周波数変動して誤差の原因となるため、コイルを巻くパイプの材質としては撥水性に優れたテフロンを用いることとした⁷⁾。

⑦ 検出發振回路は、環境温度の影響を受けやすく、回路のコンデンサを温度補償用により、ベース周波数変動を少なくすることができた⁸⁾。他の回路については、環境温度が変化してもあまり影響を受けな

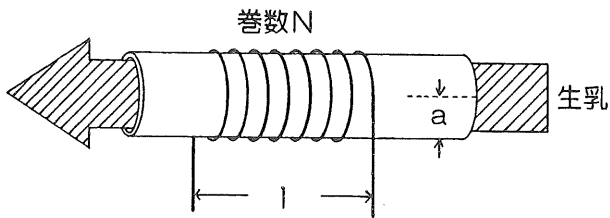
かった。

⑧ BMM-P1への供給電源電圧の変動による影響を調べた結果、気温14℃の場合、8.93V～9.25Vでの出力は16.74～21.3kHzで8.93V以下、及び9.25V以上では出力がなかったことから、供給電源電圧の安定化が必要であると考えられた⁸⁾。

⑨ 実搾乳試験は搾乳直後の生乳による検量線を用いて行った。その結果、ティートカップを3～4本装着した場合、計測値と秤量値がおおむね一致した⁷⁾。

2.2 計測の原理

本方式の乳量計測法は、導線を巻いたパイプ内に生乳を通過させ、通過時にコイルのインダクタンスL及び導線間の分布容量⁹⁾(静電容量)Cの変化を検出することにより乳量を計測する方式である。



比透磁率 μ_s 水 : 0.9999912
 空気 : 1.00000365

透磁率 $\mu = \mu_s \cdot \mu_0$
 (ただし、 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$)
 インダクタンス $L = 2\mu\pi a^3 (N/l)^2$

図3 コイルのインダクタンス

パイプ外周に導線を巻き、コイルを作ったとき(図3)コイルのインダクタンスLは次式で表される¹⁰⁾。

$$L = 2\mu\pi a^3 (N/l)^2 \quad (1)$$

μ : 透磁率 a : コイルの半径 N : コイル巻数
 l : コイル長

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_s \quad (2)$$

μ_0 : $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ (真空の透磁率)

μ_s : 比透磁率

(1)式より、Lは透磁率 μ により変化することが分かる。 μ は(2)式で表され、比透磁率 μ_s により変化したが、 μ_s は物質により異なるため、コイルの芯の材質やコイル内の物質により μ が異なる。また、 μ はコイル内の物質の量によっても変化する。例えば、コイル内に牛乳と空気が混在している場合、牛乳には牛乳固有の比透磁率があり、また、空気にも空気固有の比透磁率があるため、牛乳と空気の混在割合で透磁率が変化する。主な物質の比透磁率 μ_s を表1に示す。

表1 主な物質の透磁率 μ_s

物 質	μ_s
真 空	1
酸 素	1.0013
空 気	1.0003
水	0.9999912
純鉄	200～300
フェライト	10～10000

また、コンデンサの場合の静電容量C(キャパシタンス)は次式で表される。

$$C = \epsilon \cdot S / d \quad (3)$$

ϵ : 誘電率

S : 電極の対向面積 d : 電極間隔

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_s \quad (4)$$

ϵ_0 : $1 / \mu_0 C_0^2 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$

(真空の誘電率、 C_0 は真空中の光速)

ϵ_s : 誘電体の比誘電率

Cは誘電率 ϵ により変化し、 ϵ は(4)式で表される。すなわち、 ϵ は比誘電率 ϵ_s により変化する。 ϵ_s は物質固有の値があり、電極間の物質が変われば ϵ 、Cが変化する。主な物質の比誘電率 ϵ_s を表2に示す。

表2 主な物質の比誘電率 ϵ_s

物 質	ϵ_s
真 空	1
空 気	1.0006
紙	2~5
油	3
水	80
ポリエチレン	2~3

コイルの分布容量は、コンデンサの静電容量と同様にコイル内（巻線間）の物質により変化する。また、コイル内に複数の物質が混在する場合、例えば、牛乳と空気が混在する場合には牛乳と空気の比誘電率が異なることから、混在割合によって分布容量が変化する。

コイルの中に空気と混在した状態の生乳を一定流速で流したとき、生乳の量によりコイル内の生乳・空気混合液の透磁率及び誘電率は変化する。この透磁率・誘電率を検出することができれば生乳の流量を推定することが可能になるが、透磁率・誘電率を簡易に検出することは困難で、実用的ではない。そこで、透磁率及び誘電率はインダクタンス及び分布容量と比例関係にあることから、L及びCを検出することにより、泡を含んで流れる生乳の流量を測定することが可能であると推定した。ただし、コイルを構成するミルクパイプに磁性体を用いると、ミルクパイプ内の物質の透磁率よりもミルクパイプ自体の透磁率の方が大きく、内容物の透磁率を検出する事が困難になるため、非磁性体のミルクパイプを用いることとした。

コイルとコンデンサでLC発振器の共振回路を構成して発振させ、コイル内に生乳を流すと、生乳の量に比例してコイルのインダクタンスL及び分布容量Cが変化し、さらに共振回路の発振周波数も変化する。発振周波数を一定時間積算し、積算した発振周波数と時間内に流れた生乳の量との相関から、パイプ内を流れる生乳の量を推定する。ただし、LC発振器の共振回路における発振周波数の変化は微小であり、そのまま検出するのは難しいため、微小な変化を検出する方法としてヘテロダイン法¹¹⁾を用いた。なお、ヘテロダイン法とは、検出発振器から出力される信号と基準発振器から出力される信号を

混合してうなり周波数を発生させ、うなり周波数を検波器で検波した低周波信号として取り出す方法である。

2.3 回路の構成と流れ

回路のブロック図を図4に示す。非磁性体のパイプで製作したコイルとコンデンサを組み合わせるLC発振器を構成する。LC発振器を組み込んだ検出用発振回路の出力信号 f_1 （検出発振周波数）と5MHzの水晶発振子を組み込んだ基準発振回路の出力信号 f_2 （基準発振周波数）を混合する。混合された信号は $|f_1 - f_2|$ の成分に変調されたもの（うなり）となる。 $|f_1 - f_2|$ の成分を検波器で検波し、正弦波に変換する。正弦波に変換された信号は高周波を含んでいるため、低域通過フィルタにより高周波成分を取り除き、低周波成分の波形に変換する。コンパレータでTTLレベルの矩形波に整形し、周波数カウンタにより一定時間カウントする。得られたカウント値をコンピュータにより予め求めた検量線に代入して換算乳量値を求める。

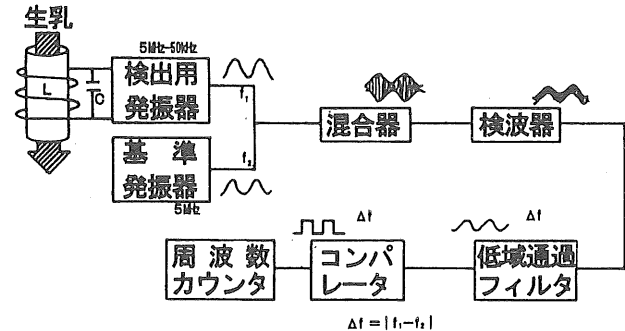


図4 乳量計回路のブロック図

3 乳量計試作のための基礎試験

3.1 乳量計の感度向上

コイルのインダクタンスLは、コイルの巻数やコイルピッチ、コイルの径などの条件により変化する。コイルの条件を変えることにより乳量計の感度も変化する。ことから、乳量計の感度を向上させ、安定した発振が得られるコイルの条件を求めることとした。なお、感度は、コイルの芯となるパイプ内に試料が空の場合と満たされて

いる場合の発振周波数の差と定義した。

乳量計の感度を上げる方法として発振周波数を高くすることや、コイルのLを大きくすることが挙げられる。発振周波数については既往の研究により5MHzが適当と認められた³⁾。試作する乳量計は、既設のパイプライン及びディストリビュータを利用するため、乳量計のミルクパイプ径はディストリビュータのミルクパイプ径により制限される。本試験では制限を受けない項目について条件を変更して、Lや次項に示す選択度Q、感度等について調査した。^{12) 13) 15)}

3.2 選択度

様々な周波数の信号が混在している信号の中から、希望信号を選び出す能力を表す指標としては、選択度¹⁵⁾(5)式で表すことができる。

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (5)$$

Q：選択度

f_0 ：共振点の周波数

Δf ：共振点での電流値の $1/\sqrt{2}$ になる点の周波数幅

Qは値が大きいほど検出能力が高くなることを意味している。共振回路に電流（又は電圧）をかけて発振させた時、ある周波数 f_0 で電流（又は電圧）値が最大になる点（共振点）がある。Qは共振周波数 f_0 と共振点の電流値の $1/\sqrt{2}$ になる点の周波数幅 Δf の比として求められる。

また、回路定数とQの関係は(6)式で表すことができる。

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{2\pi f_0 L}{R} \quad (6)$$

X_L ：コイルのリアクタンス（ Ω ）

R：抵抗（ Ω ）

ω_0 ：共振点での角速度

L：コイルのインダクタンス

(6)式よりQはLとRの比であり、Qを大きくするためにはLを大きくするか、抵抗値Rを小さくする必要がある。ただし、感度を上げるためにLを大きくするとQも大きくなるが、コイル内の物質により使用可能な周波数

の範囲があり、感度やQを上げすぎると発振が安定しなくなるのが分かった¹⁷⁾。

3.3 コイルの条件

3.3.1 試験方法

内径15mm ϕ 、外径26.5mm ϕ のテフロンパイプを芯とするコイルを製作し、検出発振回路と組み合わせた（図5）。検出側コイルの条件を変えて、インダクタンスLやQを測定した。変更した条件は、導線の線径、コイルピッチ、巻数とした（図6）。

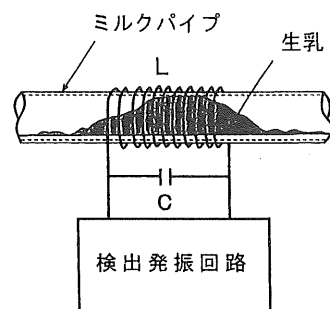


図5 コイルと検出発振回路

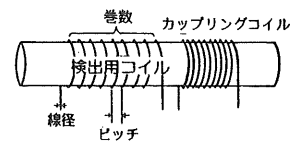


図6 コイルの最適条件調査項目

また、各条件のコイルをBMM-P1に組み込み、装置全体としての感度を調査した。

コイル条件及び測定器を表3、4に示す。

表3 試験条件

コイル芯	材質	テフロン
	内径 (mm)	15
	外径 (mm)	26.5
コイル条件	線径 (mm)	0.7、1.0
	ピッチ (mm)	0.8、1.2、1.5
	巻数 (回)	11、13、17、19、22、25、27、30、32

表4 測定器

電源	メーカー	自作
	入力(V)	AC100
	出力(V)	DC12
Qメータ	メーカー	YHP
	型式	4340A
	Q測定範囲	5~600 (確度±7~15%)
周波数カウンタ	メーカー	IWATSU
	型式	SG-7201
	測定範囲(Hz)	0.001~200,000,000

3.3.2 試験の結果と考察

1) 線径 導線の線径0.7mmφと1.0mmφで発振させた場合、感度の変化は小さかった。通常、導線の線径が太いほど導線の抵抗が小さくなるため、Qが大きくなるといわれている。そのため、コイルサイズや加工等の面から、線径は1.0mmφ前後を使用すると考えた場合、試験の範囲の線径では感度への影響は小さいと判断した。

2) コイルピッチ コイルのLが同程度の場合、コイルピッチが広がるほど感度が良くなった(図7)。コイルピッチ1.5mmで安定した発振が得られ、また、感度も良好であった。コイルピッチを1.5mm以上にすると、より感度が向上する可能性はあるが、コイルのサイズを考慮すると、1.5mmが妥当と考えられた。

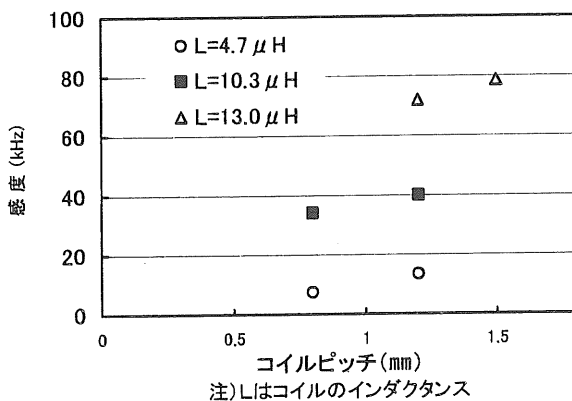


図7 コイルピッチと感度の関係

3) 巻数 巻数は同線径、同ピッチの場合、巻数が多いほど感度が良くなった(図8)。巻数30回、線径1.0mmφ、コイルピッチ1.5mmの時のQは105であり、発振が安定していたが、感度最高値を示した巻数32回、線径0.7mmφ、コイルピッチ1.2mmの時のQは98となり、発振が安定しなかった。したがって、安定した発振を得るためには、Qを少なくとも100以上にする必要があると考えられた。

本試験では、巻数30回で安定した発振が得られ、感度も良好であったが、コイルを製作する場合、発振状況を確認しながらコイルの巻数を決める必要があることを認めた。

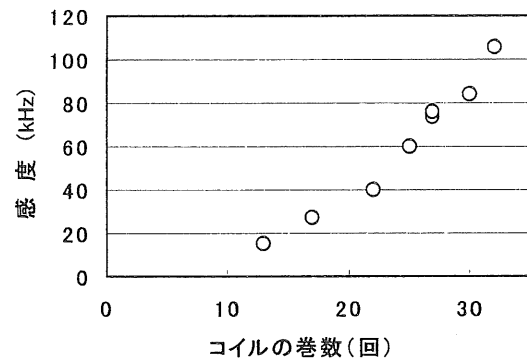


図8 コイル巻数と感度の関係

3.4 摘要

パイラインミルク用の乳量計を試作するに当たり、基礎試験として、検出コイルの条件について検討した。乳量計の感度を向上させるため、コイルの径や長さなど制限のある項目は除き、線径、コイルピッチ、巻数について試験を行った。試験条件の範囲では線径は感度に影響を及ぼさず、コイルピッチは広く、巻数は多いほど感度が向上することが判明した。しかしながら、安定した発振をさせるためにはQを100以上にするようにコイルピッチ、巻数を決定する必要があることを認めた。

4 乳量計の試作

4.1 試作の基本方針

パイラインミルク用の乳量計を試作するに当たり、

次の条件を基本方針とした¹³⁾¹⁵⁾¹⁸⁾。

- ① 運搬・取付けなどの取扱いが容易
- ② 通常の搾乳作業において、常時乳量計測が可能
- ③ 個体別乳量などのデータをパソコン等で処理・記録することが可能

また、構造・部品の注意点は以下の通りである。

① 計測部のミルクパイプの材質

パイプ内壁面への生乳の付着を防ぎ、ベース周波数の変動を抑えるため、計測部のミルクパイプはテフロン管とする。

② 検出発振回路の温度補償

検出発振回路のコンデンサには、環境温度変化の影響を少なくするため、温度補償用を用いる。

③ コイルの条件

乳量計の感度を向上させ、安定した発振を得るためにはコイルピッチを広くし、巻数は発振が安定する範囲内で多くするが、コイルサイズは大きくなりすぎないように考慮する。

④ シールドケースの構造等

本乳量計の回路は、高周波のアナログ回路のため、周囲の金属や人体など外部からの影響やコイルと回路との間に浮遊容量が発生するなど相互の影響が考えられる。そのため、コイルのケースは二重構造とし、コイル用ケースと回路用ケースは別にする。また、コイルと回路の接続は、プリント基盤を用いて配線を固定する。

4.2 乳量計の試作

乳量計の試作は、前記基本方針に従って行い、コイル条件の決定及び取扱いの面から、装置のコンパクト化に努めた。

コイルの条件は、当初、線径0.7mmφ、コイルピッチ1.5mm、巻数30回として装置に組み込み感度を調べたところ、BMM-P1ほどの値が得られなかった。対策として巻数を44回に増した結果、感度は150kHzと大幅に向上し、発振も安定した。

乳量計のコンパクト化については、基板のサイズを小さくすることを検討した。基板サイズはBMM-P1で使用していた70×100mmから60×65mmに変更したが、この変更により回路が発振しなくなった。原因としては、基板サイズを小さくしたことによって配線間隔が狭まり、配

線間に浮遊容量が生じ、回路のバランスが崩れたためと考えられた。本方式は高周波のアナログ回路であり、配線間隔の影響を受けやすいという面があるため、BMM-P1と同様なサイズに戻した。

4.3 試作装置の概要

試作した乳量計（以下、PLM-P2という。）を図9、主要諸元を表5に示す¹⁴⁾¹⁵⁾。

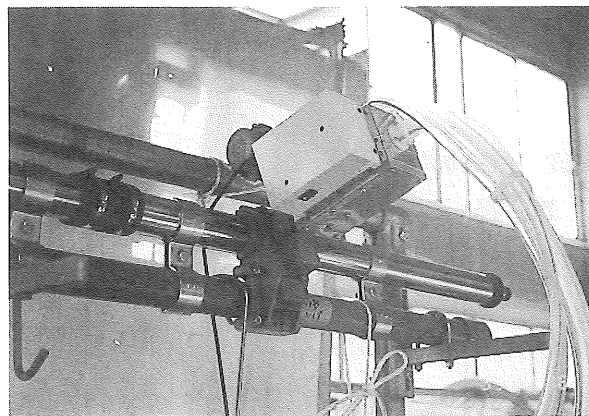


図9 乳量計 PLM-P2

表5 PLM-P2の主要諸元

基板サイズ (mm)		115×89
コイル	パイプ内径 (mm)	15
	パイプ外径 (mm)	20
	コイルピッチ (mm)	1.5
	コイル巻数 (回)	44
	コイル線径 (mm)	0.7
	コイル全長 (mm)	89
ケース	検出部 (縦×横×奥行) (mm)	92×80×156
	回路部 (縦×横×奥行) (mm)	96×59×130

PLM-P2は、パイプラインに接続するディストリビュータに取り付けることにより一体化し、PLM-P2の着脱・洗浄及び持ち運びは、通常の搾乳ユニットと同様になった。洗浄は、通常の搾乳ユニットと同様に、ティートカップ、ミルクチューブに洗浄液を流すことにより装置のミルクパイプ内も洗浄することができる。回路部と検出部は相互の影響をなくすため、別ケースになっている。検出コイルは、ディストリビュータのミルクパイプに接続・固定し、検出コイルの反対側端に搾乳ユニットのミルクチューブを接続する。回路は、基本パターンをBMM-P1と同様にし、コンデンサ容量等は発振状態を確認しながら調整した。

電源 (DC9V) は外部から供給する仕様になっているため、別途、安定化電源を用いている。また、PLM-P2は、生乳流量の検出から矩形波出力までの回路であり、周波数カウンタ部及びデータ処理部は別途市販の周波数カウンタ及びパーソナルコンピュータを用いた^{14) 15)}。

4.4 摘要

基礎試験の結果をもとに検出コイルの諸元を線径0.7 mmφ、コイルピッチ1.5mm、巻数44回と定め、パイプラインミルク用の乳量計PLM-P2を試作した。PLM-P2は、ディストリビュータと一体となり、運搬・洗浄等の操作が容易となった。ただし、電源及び周波数カウンタ部、データ処理部は含んでおらず、市販の製品を用いた。

5 模擬搾乳試験

PLM-P2の作動状況を調べるには、実際の搾乳と同じ条件で試験を行う必要がある。

パイプラインミルクによる実際の搾乳では、搾乳及び生乳を搬送するためのパイプラインが畜舎内に設置されている。パイプラインには真空ラインとミルクラインの2本があり、真空ポンプの真空圧により両ライン内は負圧になっている。パイプラインの途中には、牛床の位置に合わせて、ミルクタップが設置されている。ミルクタップにティートカップユニットを接続し、4本のティートカップを乳頭に装着して搾乳を行う。真空ラインの負圧によりバルセータを作動させ、乳頭を2本ずつ交互に搾乳する。搾乳された生乳は、ミルクラインを通してバルククーラへ送られ、貯留・保冷する。

簡易にPLM-P2の性能を把握するため、実搾乳を模擬することのできる試験装置を実験室内に製作・設置して、模擬搾乳試験を実施した^{14) 15)}。

5.1 模擬搾乳試験装置

模擬搾乳試験装置 (図10, 11) は、真空ポンプ、パイプライン (ミルクパイプ、真空パイプ)、ミルクタップ、模擬乳頭、試料流量調整バルブ、実乳量測定用電子秤などで構成されている。ミルクタップが取り付けられているパイプラインは、一般の搾乳施設と同様に1.8mの高さとした。ミルクタップにPLM-P2をセットし、ミルクチューブ、ティートカップユニットと接続する。

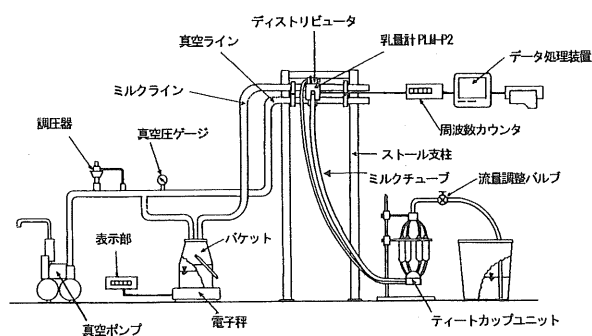


図10 模擬搾乳試験装置の概要図

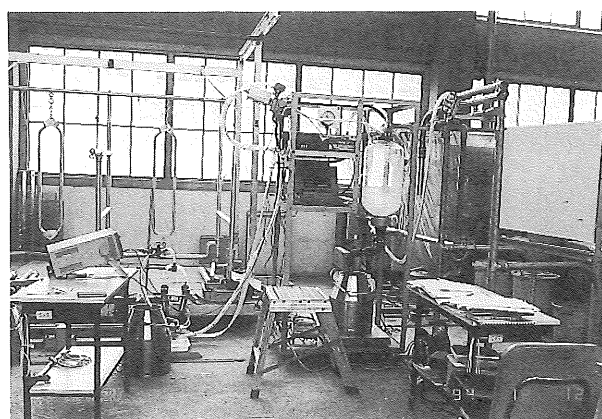


図11 模擬搾乳試験装置

パイプラインは、真空ポンプ及び調圧器により、真空圧が46.7kPa (35cmHg) に調整され、試料 (水、模擬乳、生乳など) を試料バケツから吸引する。試料は、流量調整バルブで流量調整されて模擬乳頭から流れ出す。ティートカップ、ミルクチューブ、PLM-P2を通過した試料はミルクパイプを流れて試料受用のバケツに貯留される。実際の乳量はバケツ下の電子秤により、単位時間ごとに測定して求める。PLM-P2からの出力 (10秒間毎の積算カウンタ値) とバケツに貯留する生乳量は、リアルタイムでパソコンに取り込まれる。

なお、模擬搾乳試験に用いた測定器の主要諸元を表6に示す。

表6 模擬搾乳試験用測定器の主要諸元

ミルクライン	ステンレスパイプφ50.9×φ48.8	
真空ライン	VP-40	
搾乳真空圧	35 cmHg	
真空調整器	サーボ式真空調整器 VRS-150-A	
真空発生装置	型式	DK-12F
	電源 (V)	三相 200
	モーター (kW)	0.75
	真空ポンプ	型式名 KWA-750 A
		方式 給油式偏心可動翼ロータリ型
		回転速度 (rpm) 1,100
		排気量 (35 cmHg時) (NL/min) 310
周波数カウンタ	メーカー	岩崎通信機
	型式	SC-7201
	測定範囲 (Hz)	0.001~200,000,000
	加算計数容量	999,999,999
	入力電圧 (V_{PP})	0.06~3
電子秤	外部出力	GP-1-B
	メーカー	OHAUS
	型式	UO-PL60
	測定方式	ロードセル方式
	最大秤量値 (kg)	28
安定化電源	読取限度 (kg)	0.01
	メーカー	METRONIX
	型式	DMD18-1.5
	出力電圧 (V)	0~±18
PC	電流 (A)	1.5
	メーカー	HEWLETT PACKARD
	型式	HP9121

5.2 PLM-P2の性能

試作したPLM-P2の性能を把握するため、試料を流した場合の流量と積算カウント値の関係を調査し、バケツ型乳量計BMM-P1の結果と比較した。

5.2.1 試験方法

試料に常温(17℃程度)の水を用い、模擬搾乳試験装置にPLM-P2を装着した状態で試料を流し、流量調整バルブ開度により流量を0~7.9kg/minの範囲で、流量に対する10秒間毎の積算カウント値を求めた。設定真空圧は46.7kPa(35cmHg)とし、1流量設定値に対して10回程度の反復試験を行い、その平均値を流量に対する積算カウント値とした。流量は、試料受用バケツに流れ込む試料の質量を10秒間毎にバケツ下の電子秤により測定して求めた。

5.2.2 結果と考察

PLM-P2はBMM-P1に比べ、流量に対する積算カウント値が大きかった(図12)。感度についても、PLM-P2ではBMM-P1の約2.5倍で、感度の向上が確認できた。

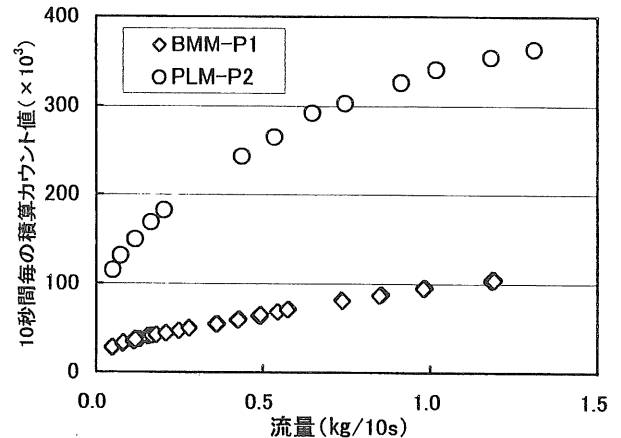


図12 PLM-P2の性能

5.3 試料温度変化に対する作動状況

BMM-P1では、環境温度や試料温度の影響を受け、出力が安定しないという問題点があったので、PLM-P2では検出発振回路の一部のコンデンサを温度補償用にして温度対策を施した。PLM-P2の温度対策の効果を把握するため、試料温度を変化させた場合の流量と積算カウント値の関係を調査した。

5.3.1 試験方法

試料として水を用い、模擬搾乳試験装置にPLM-P2を装着して試料を流し、流量と10秒間毎の積算カウント値を測定した。試料の温度は14, 30, 39℃、流量は流量調整バルブにより0~8kg/minとし、バケツに流れ込む量をバケツ下の電子秤で測定した。

5.3.2 結果と考察

試料温度が14℃では、30℃、39℃に比べて同一流量に対する積算カウント値が低くなったが、30℃と39℃ではほぼ同様な傾向にあった(図13)。試料温度14℃と30℃及び39℃では結果が異なり、温度の影響を完全に排除することはできなかったが、実搾乳時の生乳温度は35℃前

後である¹⁹⁾ことから、試料温度の影響は少ないと考えられた。

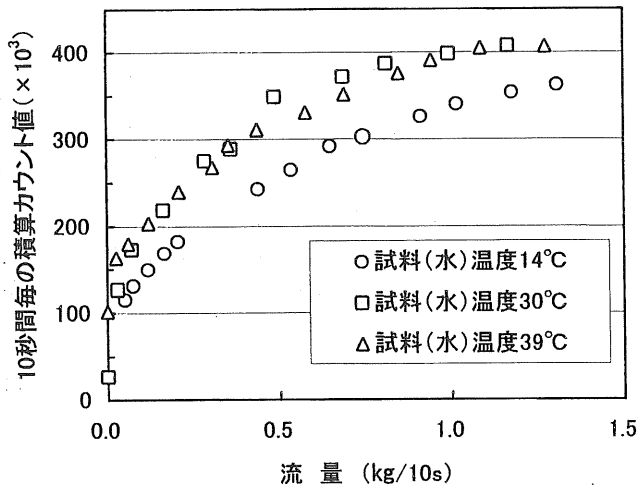


図13 試料温度による影響

5.4 模擬搾乳試験

PLM-P2の性能や試料温度の影響を調べた結果、生乳において、乳量を測定できる見通しが得られたことから、生乳を用いて模擬搾乳試験を行うこととした。

5.4.1 方法

供試試料としてホルスタイン種搾乳牛から搾乳した生乳を用いた。供試試料はバルククーラ内で冷却されたものではなく、バケットミルクを使用し、冷却しないものを用いた。PLM-P2をセットした模擬搾乳試験装置に生乳を流した。生乳は、流量調整バルブにより流量を0～1.2kg/10sの間で14段階に変化させ、各流量条件での10秒間毎の積算カウント値を測定した。試料受用バケツに流れ込む生乳をバケツ下にセットした電子秤により10秒間ごとに測定し、設定流量とした。試料の生乳は、バケツミルクにより搾乳して、バルククーラに貯留しないものとし、生乳温度を36～39℃に調整して供試した。

5.4.2 結果と考察

生乳を用いた模擬搾乳試験を行い、設定流量と10秒間毎の積算カウント値を水での模擬搾乳試験結果と共にプロットした(図14)。

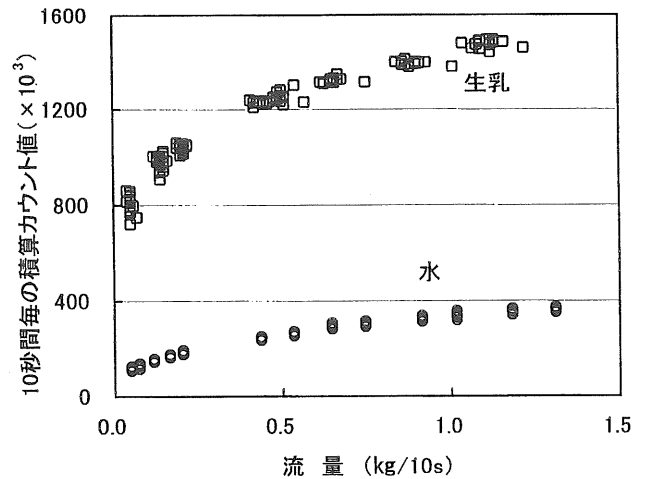


図14 設定流量に対する積算カウント値

生乳は、水に比較して、設定流量に対する積算カウント値が高かった。逆に、積算カウント値に対する流量変化が小さいことから、小さな流量変化を把握できると考えられた。また、生乳の模擬搾乳試験結果を用いて最小二乗法により指数関数の曲線で近似し(図15)、模擬搾乳での検量線とした。流量に対する積算カウント値のばらつきは小さく、回帰の寄与率 R^2 は0.9707であった。

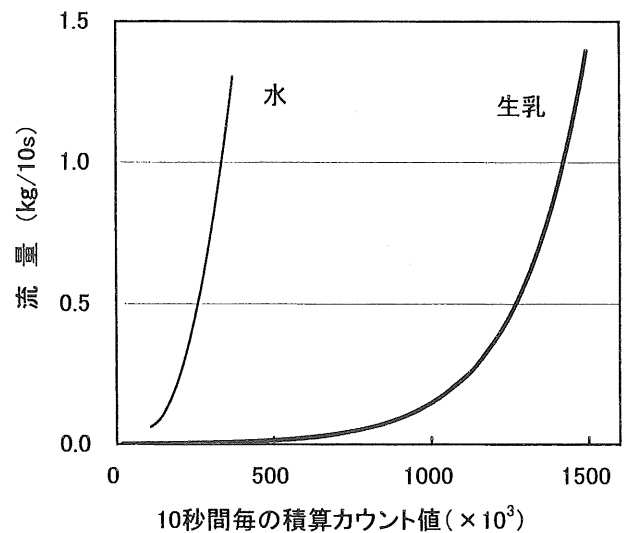


図15 模擬搾乳試験における検量線

5.5 摘要

試作したPLM-P2は、バケツ型乳量計と比較し、感度及び測定精度が向上し、試料温度30~39℃の範囲において温度の影響が少ないことが確認された。また、模擬搾乳試験の結果から、積算カウント値に対する流量を対数関数で近似した検量線は、回帰の寄与率が0.9707と高い値を示した。

6 実搾乳試験

PLM-P2を用い、実作業での性能調査及び問題点抽出のため、酪農家において実搾乳試験を行った⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

6.1 実搾乳試験装置

実搾乳試験装置は、乳量計・搾乳ユニット取付高さ、取付角度などの条件を通常の搾乳と同様とした。しかし、搾乳後の生乳はパイプラインには流さず、別途貯留して単位時間当たり搾乳量を測定できるようにした。また、試験装置は、パイプライン設置の牛舎内において、繋留されている乳牛を移動させることなく搾乳試験を実施するため、移動可能なものとした(図16, 17)。

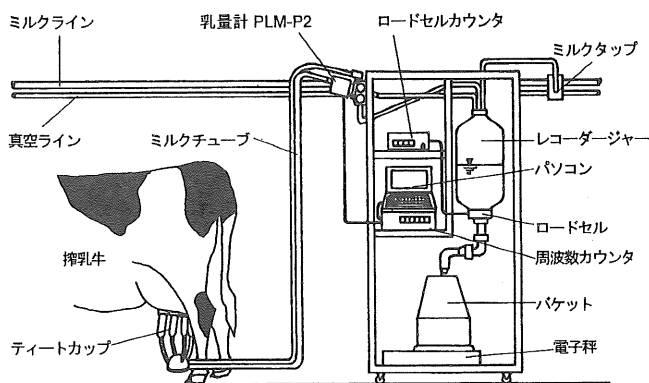


図16 実搾乳試験装置の概要図

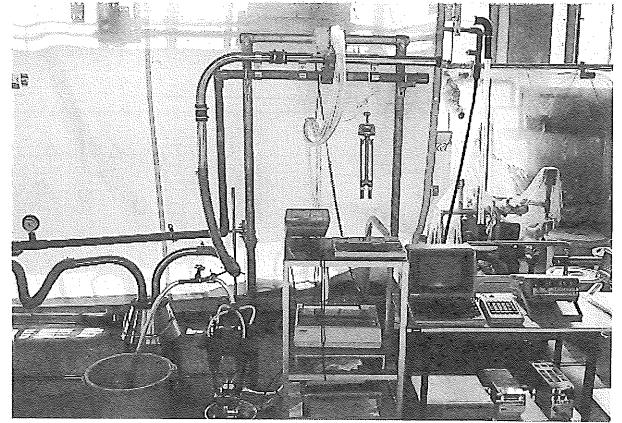


図17 実搾乳試験装置

試験装置は、装置台、ロードセルを組み込んだレコーダージャー、乳量計・搾乳ユニットをセットするミルクタップ、ロードセル指示計、周波数カウンタ、パソコン、試験終了後の生乳を受けるバケツ及び最終乳量を測定する電子秤などで構成されている。牛舎既設のパイプラインの真空圧を利用して、ミルクチューブで接続されているレコーダージャー内を負圧にし、搾乳に利用する。また、レコーダージャーは、ミルクチューブによりPLM-P2をセットするミルクタップと接続されている。ティートカップを乳頭に装着して搾乳を行い、搾乳された生乳はPLM-P2を通り測定された後、レコーダージャーに一旦貯留される。試験中に貯留される生乳は、レコーダージャーの下部に設置されたロードセルにより乳量増加量が測定され、10秒間毎のデータがリアルタイムでパソコンに取り込まれる。1頭の試験が終了する毎にレコーダージャー内の生乳をバケツに排出し、バケツ下の電子秤により実搾乳量を確認する。

なお、実搾乳試験装置の主要諸元を表7に示す。

表7 実搾乳試験用測定器の主要諸元

ロードセル	メーカー	共和電業
	型式	LM-20KA
	定格過重(kg)	20
	数量	3
ロードセル計	メーカー	ユニバルス
	型式	F850
	最大秤量値	99999
	最小目盛	1, 2, 5, 10, 20, 50, 100
周波数カウンタ	外部出力	RS-232C
	メーカー	岩崎通信機
	型式	SC-7201
	測定範囲(Hz)	0.001~200,000,000
	加算係数容量	999,999,999
	入力電圧(V _{p-p})	0.06~3
電子秤	外部出力	GP-IB
	メーカー	OHAUS
	型式	I-10/PL-150
	測定方式	ロードセル方式
安定化電源	最大秤量値(kg)	70
	読取限度(kg)	0.02
	メーカー	METRONIX
	型式	DMD18-1.5
PC	出力電圧(V)	0~±18
	電流(A)	1.5
	メーカー	NEC
PC	型式	PC-9821Ne

6.2 検量線の作成

模擬搾乳試験で作成した検量線は、回帰の寄与率が0.9707と高い値を示したことから、これを用いることも一方法ではあった。しかし、搾乳後バルククーラ等に一時貯留し、加温処理した生乳と搾乳中の生乳では、検量線が異なる結果⁶⁾が得られていたため、実搾乳での検量線を求める試験を行った。

6.2.1 方法

酪農家において、4頭のホルスタイン種搾乳牛を供試し、実搾乳試験装置及びPLM-P2を用いて検量線を求めるための試験を行った。供試牛は、乳房炎等の疾病がなく、4乳頭全部から搾乳できるものを選定するようにした。

試験は、PLM-P2をセットした実搾乳試験装置を牛舎設置のパイプラインに接続し、搾乳ユニットを装着して行

った。10秒間毎のPLM-P2出力である積算カウント値の測定、10秒間毎の実乳量、終了時の全乳量を測定した。積算カウント値及び実乳量等のデータはパソコンによりデータ処理を行った。

検量線は10秒間毎の積算カウント値をX、10秒間毎の乳量をYとして、最小二乗法により求めた。

6.2.2 乳量測定値の補正

搾乳した生乳量をレコーダージャー下部のロードセルで測定し、さらに搾乳終了後レコーダージャー内の生乳全量をレコーダージャー下のバケットに排出して電子秤で全乳量を測定したが、両測定値は異なるものであった。その原因として、ロードセルでの測定値に誤差があることが考えられたため、以下のような補正をすることとした。このとき、レコーダージャーでの10秒間毎の乳量測定値は、一定割合で誤差を含んでいると仮定した。

電子秤の値を積算実乳量Mとして、レコーダージャーでの積算乳量 m_m との割合から、補正係数aを(7)式により求めた。また、レコーダージャーで得られた10秒間毎の乳量 m_x に補正係数aを乗じ、10秒間毎の補正乳量 m_h を(8)式により求め、10秒間毎の実乳量とした。

$$a = \frac{m_m}{M} \quad (7)$$

a : 補正係数

m_m : レコーダージャーで測定した積算乳量 (kg)

M : 積算実乳量 (kg)

$$m_h = m_x \times a \quad (8)$$

m_h : 10秒間毎の補正乳量 (kg)

m_x : レコーダージャーで測定した10秒間の乳量 (kg)

(7)、(8)式より得られた10秒間毎の実乳量 m_h を積算することにより、積算実乳量 M_m を求めた。

$$M_m = \sum_{i=1}^k (m_x \times a) = \sum_{i=1}^k m_h = M \quad (9)$$

k : 搾乳時間(s)/10(s)

PLM-P2を通過した生乳は、レコーダージャー上部入口から流れ込み、落下時の衝撃により10秒毎の実乳量測定

値が若干変動し、これがレコーダジャーの測定値の誤差となると考えた。

6.2.3 結果と考察

4頭のホルスタイン種にPLM-P2を供試して得られた積算カウント値と、乳量データから、最小二乗法を用いて検量線(図18)を求めた。

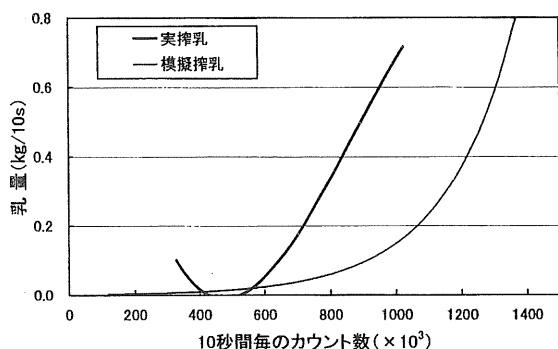


図18 実搾乳と模擬搾乳との検量線の比較

$$Y = -3.93 \times 10^{-9} \cdot X^3 + 1.01 \times 10^{-5} \cdot X^2 - 6.98 \times 10^{-3} \cdot X + 1.43 \quad (10)$$

Y: 換算乳量 (kg)

X: 積算カウント値/10³

検量線は、(10)に式に示す3次式となったが、Xが527付近において換算乳量がほぼ0になった。この値を下回る積算カウント値を(10)式に代入した場合、積算カウント値が減少するに従い換算乳量が増加することになるため、Xが527以下の場合には換算乳量Yをすべて0とした。

作成した検量線は、模擬搾乳試験で得られた検量線とは異なるものとなった。原因としては、試料の加熱処理、同一試料の繰返し試験による粘性の変化、乳成分の違いなどが考えられる。しかし、試料の性状、乳成分がそれぞれどの程度、測定に影響を及ぼしているか、という点については解明に至らなかった。また、模擬搾乳試験装置、実搾乳試験装置ともに、PLM-P2が生乳を検出する位置と実乳量を測定する位置が異なる。模擬搾乳試験の場合には、試料を設定流量で流し、流れが安定したところでデータを取得していることから、測定位置による影響

は少ないと考えられる。一方、実搾乳試験では、10秒間のカウント中においても流量が変動し、また、検出と実乳量測定の間には若干のタイムラグがあることから、流量と積算カウント値との関係に若干、影響を与えている可能性がある。

6.3 実搾乳試験

PLM-P2の性能を調査するため、実搾乳での検量線を用いて実搾乳試験を行った(図19)。

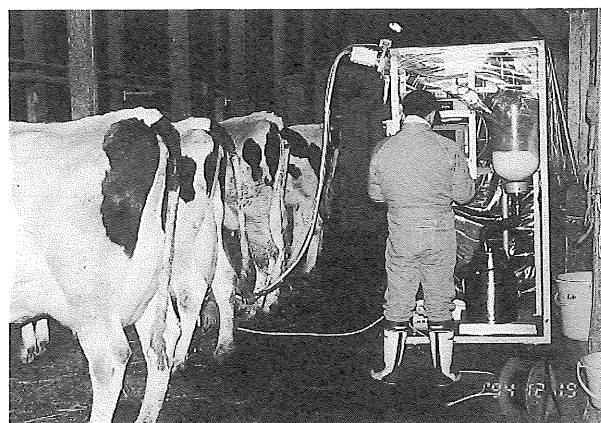


図19 実搾乳試験の風景

6.3.1 試験方法

実搾乳試験は、遠藤牧場において平成6年12月13日夕方3頭(試験No.1~3)、14日夕方4頭(試験No.4~7)、15日朝3頭(試験No.8~10)、また須賀牧場において平成6年12月19日夕方4頭(試験No.11~14)、合計14頭のホルスタイン種搾乳牛を供試して実施した。試験時の気温は13℃(平成6年12月13日夕方、14日夕方)、0℃(平成6年12月15日朝)、8℃(平成6年12月19日夕方)であった。

ティートカップを全乳頭に装着して試験を実施するため、供試牛は乳房炎などの疾病の無いものを選定した。

既設のパイプラインに、PLM-P2をセットした実搾乳試験装置を接続し、ティートカップを供試牛の乳頭に装着して試験を実施した。10秒間毎に積算カウント値及びレコーダジャーに貯留された生乳の積算質量を測定し、パソコンにデータを格納した。測定と同時平行で、パソ

コンに格納した積算カウント値を検量線(10)式に代入し換算乳量を求めた。試験終了後、生乳をレコーダージャー下のバケツに排出し、電子秤により正確な積算乳量を測定するとともに、換算乳量と実乳量(秤量値)とを比較し、また、10秒間毎の乳量については検量線を求めた試験と同様な方法で乳量の補正を行った。

6.3.2 結果と考察

1) 積算カウント値と実乳量の関係

実搾乳試験で得られた10秒間毎の積算カウント値(X軸)と乳量(Y軸)の関係の例を図に示した(図20, 21)。

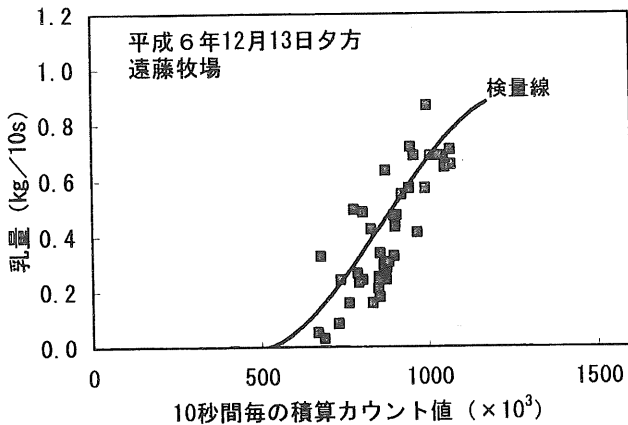


図20 積算カウント値と実乳量の関係(試験No.01)

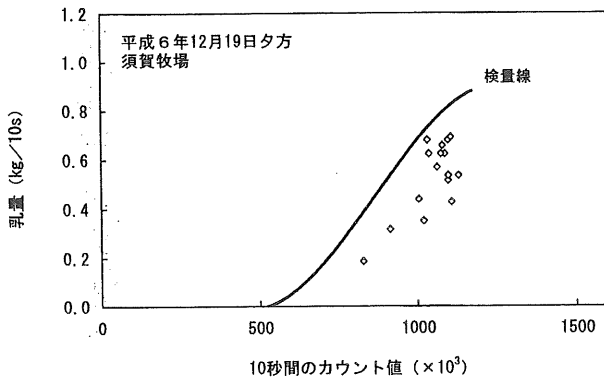


図21 積算カウント値と実乳量の関係(試験No.14)

プロットした点は、若干ばらつきがあるものの、検量線の周辺に集中しているものが多かった(図20)。しかし、試験によっては検量線からX軸とほぼ平行にずれている例も見られた(図21)。

ばらつきの原因としては、PLM-P2の流量変動に対する追従性が考えられた。搾乳中、乳量は時間と共に増減し、その増減速度にPLM-P2の検出速度が追いつかず、10秒間毎の積算カウント値がばらついたと考えられる。また、実搾乳試験装置における検出と実乳量測定との間のタイムラグがあることから、これも若干影響していると考えられた。

プロットした点が検量線から平行にずれている原因として、ベース周波数のシフトが考えられた。ベース周波数は、PLM-P2に何も流さない状態時の1秒間のカウント値であり、これが変動すると積算カウント値に対する乳量も変動する。結果として、検量線から外れ、換算乳量と実乳量との間にずれが生じることとなるため、測定精度を向上させるためにはベース周波数を一定の値に保つ方策が必要であると考えられた。

2) 換算乳量の誤差

試験No.1~14について、10秒間毎の積算カウント値を検量線に代入して求めた終了時の積算換算乳量と、積算実乳量を比較し、誤差率を求めた。誤差及び誤差率は次のように定義した。

$$\text{誤差 (kg)} = \text{積算換算乳量} - \text{積算実乳量} \quad (1)$$

$$\text{誤差率 (\%)} = \frac{(\text{積算換算乳量} - \text{積算実乳量})}{\text{積算実乳量}} \times 100 \quad (2)$$

(1)式により求めた誤差の平均値は、0.55kg、誤差率の平均値5.0%、標準偏差9.4となり、市販の乳量計と比較すると若干高い値であった(表8)。

測定途中での換算乳量と実乳量を比較するため、10秒毎の実乳量及び換算乳量をそれぞれ積算して搾乳曲線を作成した。作成した搾乳曲線は大きく分けて4種類の傾向があった。

表8 実搾乳試験の結果

試験No.	牧場	実乳量(kg)	換算乳量(kg)	誤差(kg)	誤差率(%)	備考
1	E牧場	16.38	18.86	2.48	15.1	
2	E牧場	10.08	10.69	0.61	6.1	
3	E牧場	10.60	11.06	0.46	4.3	
4	E牧場	14.08	12.45	-1.63	-11.6	
5	E牧場	8.76	9.03	0.27	3.1	
6	E牧場	8.54	8.76	0.22	2.6	
7	E牧場	10.90	12.15	1.25	11.5	
8	E牧場	4.24	4.57	0.33	7.8	
9	E牧場	11.14	10.71	-0.43	-3.9	
10	E牧場	12.40	13.97	1.57	12.7	
11	S牧場	10.00	8.80	-1.20	-12	
12	S牧場	12.94	14.03	1.09	8.4	
13	S牧場	12.40	12.92	0.52	4.2	
14	S牧場	10.38	12.60	2.22	21.4	
平均値と標準偏差				0.55±1.11	5.0±9.05	

注：表中のE牧場は遠藤牧場、S牧場は須賀牧場を指す。

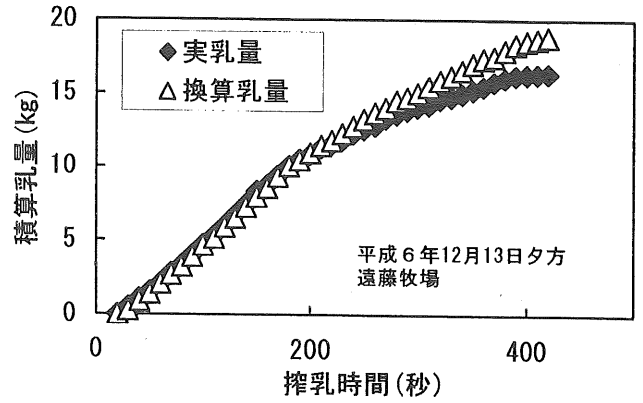


図23 実乳量と換算乳量(試験No.1)

- ①搾乳開始から終了まで実乳量と換算乳量がほぼ一致しているもの(図22)
- ②途中まで一致しているが、終了時の積算乳量がずれているもの(図23)
- ③途中までずれているが、終了時には積算乳量が一致しているもの(図24)
- ④開始から終了まで積算乳量がずれているもの(図25)

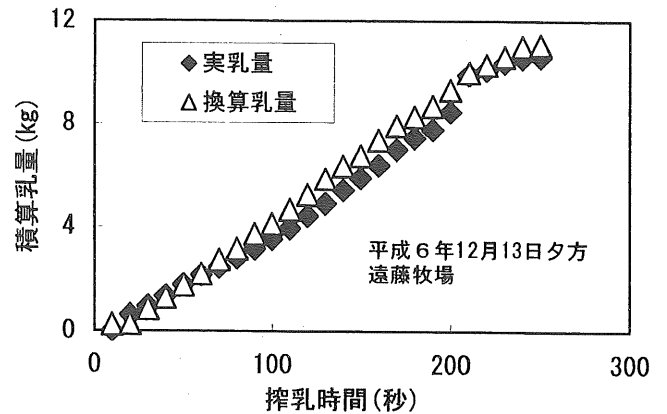


図24 実乳量と換算乳量(試験No.3)

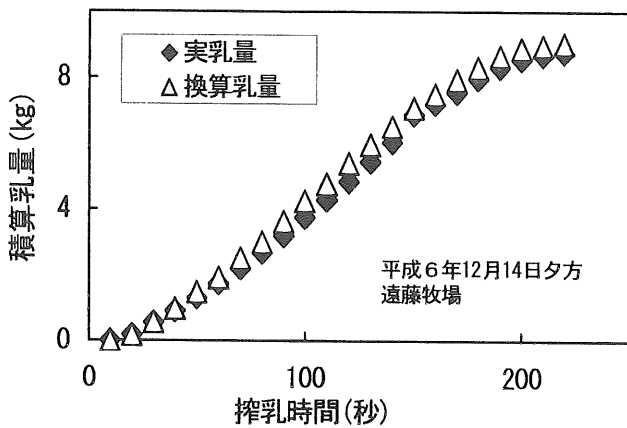


図22 実乳量と換算乳量(試験No.5)

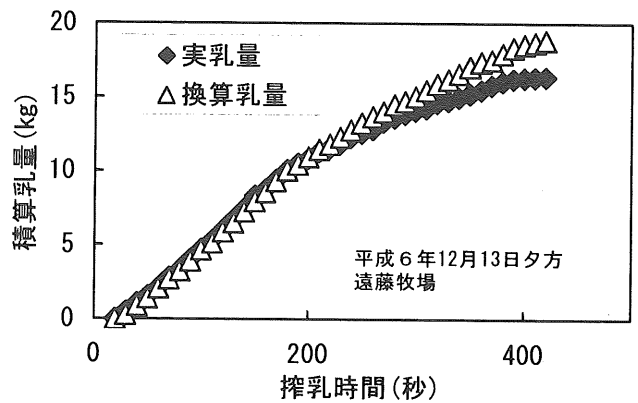


図25 実乳量と換算乳量(試験No.14)

ここで、①の場合は、ベース周波数のシフトがなく、10秒間毎の積算カウント値がほぼ検量線に一致したため、搾乳開始から終了まで換算乳量が実乳量にほぼ一致したと考えられた。

③の場合、ベース周波数のシフトが少なく、10秒間毎の積算カウント値の一部が検量線から増加・減少の両方向に同程度にずれていたため、測定途中で実乳量と換算乳量が一致しないところがあると考えられた。

②、④の場合、10秒間毎の積算カウント値の一部が検量線からずれていたために誤差が積み重なったことにより、②では試験途中から、④では最初から実乳量と一致しなかったと考えられた。特に④では、ベース周波数のシフトが考えられた。ベース周波数が変動すると、変動したベース周波数に積算カウント値が上乘せされるため、10秒間毎の換算乳量が実乳量よりも大きい値または小さい値となる。したがって、積算乳量も実乳量と換算乳量の差が大きくなることから、乳量測定精度の向上を図るためには、ベース周波数を一定の値に保つ策が必要である。

6.4 ベース周波数の調整によるシミュレーション

試験の結果、搾乳終了時の誤差率の平均値が5.0%、標準偏差9.4となり、若干大きな値であり、実用化するには改良を要するが、乳量計測は可能であると考えられた。しかし、実搾乳試験における10秒間毎の積算カウント値と実乳量の関係をプロットし、検量線と比較した結

果、ベース周波数がずれていると考えられるものがあった。ここでは、ベース周波数が測定毎に変動していると仮定し、ベース周波数を調整する代わりにシフト値を設定してシミュレーションする。これにより、ベース周波数を調整した場合に誤差率等がどのようになるのかを調査する。

6.4.1 方法

各試験の積算カウント値にシフト値を設定した。設定する方法は、試験終了時の積算実乳量に一致するようにシフト値を増減させ、積算換算乳量が積算実乳量に一致する値をシフト値とした。試験毎のシフト値を設定し、10秒間毎の積算カウント値にシフト値を加減算した値を検量線に代入して換算乳量を求めた。したがって、搾乳終了時の乳量は必ず実乳量と一致する。そこで、ここでは10秒間毎の換算乳量と実乳量を比較することにより、ベース周波数を調整した場合に誤差率がどの程度になるのかシミュレーションした。

6.4.2 結果と考察

試験で得られた積算カウント値、及びシフト値を加減算した積算カウント値を検量線に代入した結果について表示した(表9)。各試験のシフト値は、-32,300~85,800で幅があり、ベース周波数が変動していた可能性があると考えられた。ただし、検量線の計算では試験で得られた積算カウント値を 10^3 で除しているため、換算乳量の値の変動としては大きいものではない。

表9 シミュレーション結果

試験No.	搾乳終了時 誤差率(%)	積算カウント値未補正		シフト値	積算カウント値補正	
		10秒間の誤差の平 均値(kg)	10秒間の誤差率 の平均値(%)		10秒間の誤差の平 均値(kg)	10秒間の誤差率 の平均値(%)
1	15.1	0.095±0.123	42.6±77.0	38000	0.000±0.122	17.9±53.3
2	6.1	0.020±0.081	29.7±53.7	13000	0.000±0.081	18.6±47.7
3	4.3	0.018±0.229	16.6±42.3	5800	0.000±0.228	13.7±41.5
4	-11.6	-0.045±0.180	-0.7±38.1	30300	0.003±0.181	15.1±47.3
5	3.1	0.014±0.085	3.2±16.8	8000	0.000±0.084	-0.7±17.5
6	2.6	0.007±0.183	15.8±52.7	4700	0.000±0.184	12.1±52.5
7	11.5	0.054±0.183	29.1±50.4	32100	0.000±0.186	14.9±41.4
8	7.8	0.015±0.046	7.4±95.8	3000	0.000±0.033	8.7±21.4
9	-3.9	-0.016±0.142	-0.3±27.6	12100	0.000±0.132	5.1±29.2
10	12.7	0.051±0.129	20.5±53.6	-32300	0.000±0.128	1.7±51.0
11	-12.0	-0.044±0.065	-10.6±15.0	26400	0.000±0.064	1.9±14.6
12	8.4	0.101±0.246	13.4±25.8	36100	0.000±0.124	4.4±23.3
13	4.2	0.026±0.184	30.6±104.0	11900	0.002±0.186	4.7±30.7
14	21.4	0.124±0.124	35.4±45.2	85800	0.000±0.257	9.9±36.0
平均値	5.0	0.018±0.159	16.0±53.9		0.000±0.154	9.7±41.5

積算カウント値を補正しない場合の10秒間毎の誤差率は-10.6~42.6%、誤差率の平均値16.6%であり、終了時の誤差率よりも概して大きくなった。搾乳終了時の誤差率と10秒間毎の誤差率の平均値が異なっていることは、搾乳曲線が実乳量と換算乳量でずれていることを表している。搾乳終了時の誤差率と10秒間毎の誤差率の平均値が近い場合には、搾乳曲線が実乳量と換算乳量でほぼ一致している。

これに対し、積算カウント値を補正した場合、10秒間毎の誤差率は-0.7~18.6%、誤差率の平均値9.1%となった。全体として誤差率の平均値が小さくなっていることから、搾乳曲線について、実乳量と換算乳量が近似することが期待できる。積算カウント値を修正した場合には、試験終了時の乳量をもとにシフト値を設定しているため、誤差率が小さくなるのは当然であるが、シミュレーション結果から試験前に予めベース周波数を調整することにより測定精度が向上すると考えられた。

6.5 PLM-P2による乳量計測の問題点

PLM-P2による乳量計測の問題点として、以下の点が挙げられる。

- 1) 電源の安定性⁸⁾
- 2) ティートカップ着脱前後の空気流入^{17) 18)}
- 3) ベース周波数の変動
- 4) 流量変動に対する追従性
- 5) 検量線の精度

1) 電源の安定性

今回の試験では、畜舎に配線されているコンセントから電源(AC100V)を取り、安定化電源を使ってDC9VをPLM-P2に供給した。須賀牧場での試験時、何らかの原因で電源電圧(AC100V)が低下したため、電源供給用安定化電源からの電源供給に異常が生じ、PLM-P2が発振しない事例があった。BMM-P1を用いた試験において、供給電圧が0.1V変化するとベース周波数が1.5kHz程度変動し、供給電源電圧がある範囲から外れると出力しないという結果を得ており、電源電圧が変動防止対策を講じる必要性を認めた。

2) ティートカップ着脱前後の空気流入

ティートカップ装着前に真空状態にして乳頭を吸い込み、搾乳を開始するため、当然空気を吸入する。また、

搾乳終了時には、真空状態のままティートカップを外すために空気を吸入する。今回の試験においても、ティートカップ着脱前後において、空気の吸入により生乳の流速が変化したことが原因となり、積算カウント値が搾乳中の値に比べて極端に大きな値になったと考えられた。

ティートカップ着脱前後には、生乳の流入が少ないことから、ある範囲から外れる積算カウント値はソフト的に除去することで、空気流入の影響を少なくすることができる。また、実際の問題として、全分房が同時に搾乳終了とはならず、農家によっては終了した乳頭からティートカップを外すところもある。本方式の乳量計測法では、搾乳終了時に一斉にティートカップを外す必要がある。

3) ベース周波数の変動

全体的な傾向として、搾乳前のベース周波数が測定ごとに若干変動していた。ベース周波数が変動すると積算カウント値も増加し、検量線に代入して得られる換算乳量と実乳量との間には誤差を生じる。

PLM-P2ではコイルの芯となるミルクパイプをテフロン管にすることにより、ミルクパイプ内への残乳の防止を図った。テフロン管を用いたにも関わらず、ベース周波数が変動するという事は、ミルクパイプ内に生乳が残っていたとも考えられる。対策としては、ミルクタップに取り付ける乳量計の角度をより大きくすることが挙げられる。

ベース周波数の変動が残乳によるものではなく、他の要因によりシフトしている場合には、ソフト的に調整することが考えられる。ベース周波数の値を決定し、それからずれている場合には、測定直前の周波数をベース周波数と比較して差を求めておき、測定値からその差を加減して、検量線に代入することにより誤差を減らすことができる。と考えられる。

また、供給電源電圧の安定化により、ベース周波数の変動を減ずることも必要である。

4) 流量変動に対する追従性

実搾乳試験の結果、10秒間毎の積算カウント値は検量線上ではなく、検量線近辺に散らばっており、試験データにはばらつきがあった。搾乳中、生乳の流量は時間と共に増減するが、この増減速度にPLM-P2の検出速度が追いつかず、データがばらついたと考えられる。精度向上

を図るためには流動変動に対する追従性を向上することが必要である。

5) 検量線の精度向上

本乳量計測法では、検量線に10秒間毎の積算カウント値を代入して乳量を求めるが、今回、作成した検量線では生乳の流量が極少量の場合、積算カウント値が527,000以下になると流量0として扱っているため、若干の誤差が発生することも挙げられる。検量線作成のための試験サンプル数を増やし、精度のより高い検量線を作成することも必要であると考えられる。

6.6 摘要

実搾乳試験を実施するため、牛舎既存のパイプラインを利用して搾乳試験を行うことのできる実搾乳試験装置を製作した。実搾乳試験装置及び乳量計PLM-P2を2戸の酪農家へ持ち込み、延べ14頭のホルスタイン種搾乳牛を供試した。

実搾乳試験の結果、搾乳終了時の乳量の誤差の平均値は0.55kg、標準偏差1.11、誤差率の平均値5.0%、標準偏差9.4となった。

誤差の原因がベース周波数の変動と考えられたため、ベース周波数を調整する代わりにシフト値を設定した。積算カウント値にシフト値を加減算し、補正した値で換算乳量のシミュレーションを行った。積算カウント値を補正しない場合の10秒間毎の誤差率は-10.6~42.6%、平均値16.6%であり、終了時の誤差率よりも概して大きくなった。これに対し、積算カウント値を補正した場合には10秒間毎の誤差率は-0.7~18.6%、平均値9.1%となった。全体として、誤差率の平均値が小さくなっていることから、実乳量と換算乳量の搾乳曲線が近似することが期待できた。

本研究において試作したPLM-P2による乳量測定において、理想的な条件としては次の点が挙げられる。

① ベース周波数の変動対策

搾乳試験毎に、ベース周波数が変動していると考えられた。PLM-P2ではコイルの芯となるミルクパイプをテフロン管にすることにより、ミルクパイプ内への残乳の防止を図った。テフロン管を用いたにも関わらず、ベース周波数が変動するという事は、ミルクパイプ内に生乳が残っていたと考えられた。対策としては、ミルクタッ

プに取り付ける乳量計の角度をより大きくすることが挙げられる。

ベース周波数の変動が残乳によるものではなく、他の要因によりシフトしている場合には、ソフト的に調整することが考えられる。ベース周波数の値を決定し、それからずれている場合には、測定値前の周波数をベース周波数と比較して差を求めておき、測定値からその差を加減して、検量線に代入することにより誤差を減らすことができると考えられる。

② 搾乳中の空気流入対策

本方式による乳量計測法においては、生乳の流速が一定であることが前提であり、空気の流入を防止する必要がある。その対策として、ティートカップをすべて装着し、安定した状態になった後、測定を開始するなどの工夫が必要となる。

また、ティートカップ着脱前後に空気が流入した場合には、積算カウント値が極端に大きな値となることがある。この場合には回路のコンパレータを入れるなどして、決められた範囲から外れた値は除去することで対応可能と考えられる。

③ 電源電圧の安定化

PLM-P2は、供給電源電圧が変動すると出力の値も変動し、ベース周波数の変動、出力の異常を生じることから、供給電源電圧の変動防止策を講ずる必要がある。

実搾乳試験の結果、誤差の平均値は0.55kg、標準偏差1.11、誤差率の平均値5.0%、標準偏差9.4であり、市販の乳量計と比べ若干大きな値となった。現状では実用化は難しいが、条件を整え、さらに検量線を再検討することにより計測精度の向上が期待されることから、本乳量計測法を用いた乳量計測は可能であると考えられた。

7 総括

本研究ではパイプラインミルク用の乳量計を試作し、供試牛数14頭について実搾乳試験を行った。誤差率の平均値は5.0%、標準偏差9.4と若干大きな値となったが、条件を整えることにより誤差率を小さくすることが期待できることから、本方式による乳量計測は可能と考えられた。本方式による乳量計を実用化するに当たって、解決すべき問題として、電源電圧の安定化、空気吸入時の対応、ベース周波数の変動対策、検量線の精度向上、装

置のコンパクト・軽量化が挙げられる。

乳成分の違いによる乳量計の作動状況の把握、各種の乳牛飼養管理条件下でのデータ収集及び装置改良が必要である。

以上、新方式による乳量計開発のための基礎試料が得られた。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、研究環境を整えていただいた生物系特定産業技術研究推進機構芦澤利彰元理事、菅原敏夫前理事、また、オランダでの研究発表並びに研究報告の取りまとめの機会を与えていただいた木田滋樹理事に心より御礼申し上げます。また、本研究「周波数可変型乳量計の開発」は、財団法人畜産近代化リース協会よりの受託研究であり、関係者各位に厚く御礼申し上げます。さらに、ご協力いただいた埼玉大学工学部電子工学科大谷文雄技官をはじめとする電子計測講座の各位に心より感謝いたします。本研究の現地試験では、遠藤牧場、須賀牧場の多大なるご協力・ご配慮を賜りました。ここに、深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 農林水産省畜産局畜産経営課 編：平成12年度畜産経営の動向，中央畜産会，5-6，2000.4
- 2) 道宗直昭：乳量計測と測器，農業施設学会誌，19(2)，55-60，1988
- 3) 昭和60年度事業報告，農業機械化研究所，105-106，1985.2
- 4) 昭和61年度事業報告，生研機構・農業機械化研究所，103-104，1986.2
- 5) 昭和62年度事業報告，生研機構・農業機械化研究所，99-100，1987.2
- 6) 平成元年度事業報告，生研機構・農業機械化研究所，171-172，1989.2
- 7) 平成2年度事業報告，生研機構・農業機械化研究所，197-198，1990.2
- 8) 平成3年度事業報告，生研機構・農業機械化研究所，185-186，1991.2
- 9) 青木秀彦：アナログ回路の設計・製作，CQ出版，18-24，1989.7
- 10) 菅野允：基礎電気電子計測，コロナ社，55-63，1986
- 11) 電子工業教育研究会編：エレクトロニクス用語辞典，オーム社，8-64
- 12) 平成4年度事業報告，生研機構・農業機械化研究所，179-180，1992.2
- 13) 福森功・古山隆司：周波数可変型乳量計の開発，平成4年度受託研究報告書，生研機構・農業機械化研究所，3-11，1993.3
- 14) 平成5年度事業報告，生研機構・農業機械化研究所，183-184，1993.2
- 15) 福森功・古山隆司：周波数可変型乳量計の開発，平成5年度受託研究報告書，生研機構・農業機械化研究所，2-10，1994.3
- 16) 鈴木雅臣：新・低周波／高周波回路設計マニュアル，CQ出版，199-223，1988
- 17) 平成6年度事業報告，生研機構・農業機械化研究所，185-186，1994.2
- 18) 福森功・古山隆司：周波数可変型乳量計の開発，平成6年度受託研究報告書，生研機構・農業機械化研究所，3-23，1995.3
- 19) 畜産大辞典，養賢堂，301，1978
- 20) T. Furuyama, N. Doshu, I. Fukumori : Development of a milk volume measurement method using detection of the resonance frequency, Dutch-Japanese workshop on Precision Dairy Farming, IMAG-DLO, 109-112, 1998.9
- 21) 搾乳作業の省力化に関する研究，農林水産技術会議事務局，133-114，1979.2
- 22) 応用統計ハンドブック編集委員会：応用統計ハンドブック，養賢堂，1989
- 23) トランジスタ技術編集部：電子回路部品活用ハンドブック，CQ出版，1985
- 24) 乳業技術講座編集委員会：牛乳，朝倉書店，150-175，1963.9

Summary

Development of a Milk Volume Measurement Method

Using the Detection of Resonance Frequency

Takashi FURUYAMA, Naoaki DOSHU, Isao FUKUMORI, Yasuo NAKAGAWA

Precision management of individual cows is essential for dairy farms to produce high-quality milk at low cost. A simple method for milk volume measurement of individual cows is one important factor.

We developed a milk volume measurement method to obtain the milk volume of individual cows. Our method uses a non-contact sensor that allows easy attaching, detaching and cleaning.

Permeability and permittivity generally vary from one substance to another. When milk and air, which have differing permeability and permittivity, flow through a coil as a mixture at a constant velocity, the electrostatic capacity of the coil varies in proportion with the volume of milk. Therefore, the volume of milk that flows with bubbles contained in it can be measured by detecting the variation of the electrostatic capacity of the coil.

A coil is wound around a pipe made of non-magnetic material; a LC oscillator is prepared by combining this coil (L) with capacitor (C), a resonance circuit is prepared by combining this LC oscillator, and this resonance circuit is configured. The electrostatic capacity of the coil varies in proportion with the volume of milk and causes the resonance frequency of the resonance circuit to vary proportionally. Because the velocity of the milk flowing in the pipe is roughly constant, variations of resonance frequency are added up a certain period. The volume of milk that passes through the coil can be estimated from the correlation between the added resonance frequencies and the volume of raw milk that flows during that period.

The circuit is composed of a detecting oscillation circuit using a LC oscillator, a reference oscillation circuit incorporating a 5MHz crystal oscillator, a wave detector, a low-pass filter, and a comparator.

The prototype milk meter uses a thermal compensating capacitor for the circuit to reduce the influence of external temperatures. Teflon pipe is used for the coil mounting pipe to prevent milk from sticking to the inner wall of the pipe. The milk meter is mounted on and united with the distributor connected to the pipeline. We utilized a frequency counter and a personal computer for the data processing section. Power (DC 9V) must be supplied from the outside; we used a stabilized power source.

The results of average error in the reduced milk volume immediately after measurement completion was +0.55kg (-1.63 to +2.48 kg), and the average error rate was +5.0% (-11.6 to 21.4%, standard deviation:9.4).

Although the average error rate was somewhat large at +5.0%, the reduced milk volume per unit

length of time included many cases where the value of the practical milking volume and that of the reduced milk volume were comparable. Differences between the practical milking volume and the reduced milk volume occurred when the milking volume became extremely low near the end of milking. But there were many instances when the practical milking volume and the reduced milk volume were nearly in accord during the period from immediately after the start of milking to the decrease in milking volume. This indicated the feasibility of milk volume measurement using this method.

In our tests, there were only 14 sample cows, and they were limited to Holsteins. Therefore, it is necessary to perform milking tests under more diverse conditions in the future. Further, the influence of the inflow of air as well as the insufficient stability of the test equipment was cited as problems during these tests and requires rectification.

Although data collection and modifications must be performed under various cow breeding and management of conditions to improve the accuracy and stability of this measurement method, the feasibility of using this method for milk volume measurement is apparent, and research into putting this method to practical use is expected.

農業機械化研究所研究年報 第32号

平成13年9月 印刷・発行

Technical Report of Institute of
Agricultural Machinery No. 32

頒価1,450円

〒331-8537
埼玉県さいたま市日進町1丁目40番地2

生物系特定産業技術研究推進機構
・農業機械化研究所

1-40-2, Nisshin, Saitama, Saitama,
331-8537 Japan
Tel. 048-654-7000

Institute of Agricultural Machinery
Bio-oriented Technology Research Advancement Institution

印刷・製本 / 株式会社 三 元 社