

農業機械化研究所研究報告

第 41 号

Technical Report of the Institute of Agricultural Machinery

Number 41, March 2012

平成 24 年 3 月

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構
生物系特定産業技術研究支援センター
農 業 機 械 化 研 究 所

農業機械化研究所研究報告 第41号 (平成24年3月)

ロボットトラクタの開発

松尾陽介・行本 修・山本聡史・野口 伸

目 次

緒 言	1
第1章 序 論	2
1. 1 研究の背景—日本農業の現状と課題	2
1. 1. 1 農業機械化の進展と役割	3
1. 1. 2 今後の農業機械に求められる要件	3
1. 1. 3 農業ロボットへの期待	4
1. 2 車両系ロボットと研究・開発動向	5
1. 2. 1 車両系ロボットの構成・特徴	5
1. 2. 2 研究・開発動向	6
1. 3 研究の目標・範囲	7
1. 4 報告の構成	8
第2章 航法システムとロボット車両	10
2. 1 トラクタ作業と航法システム	10
2. 2 ロボットトラクタの航法システム	11
2. 3 航法システム XNAV の開発	12
2. 3. 1 XNAV の位置計測システム	12
2. 3. 2 XNAV の構成	14
2. 4 XNAV 以外の航法システム	15
2. 5 ロボット車両の開発	16
2. 5. 1 ベース車両	16
2. 5. 2 ロボット車両の計測・制御システム	16
2. 6 コントローラ	18
2. 7 安全装備と電源装置他	19
2. 8 摘 要	19
第3章 ロボット作業と作業ソフトの基本	21
3. 1 ロボット作業の方法	21

3. 1. 1	対象作業やほ場の条件	21
3. 1. 2	ロボット作業—標準作業法	21
3. 1. 3	作業の手順	21
3. 2	作業経路と作業区画情報の取得	22
3. 2. 1	作業区画の位置座標系と方位情報	22
3. 2. 2	作業経路の構成・設定	22
3. 2. 3	作業区画情報の取得・記録 (ティーチング)	23
3. 3	作業ソフトの構成	23
3. 3. 1	タスクの分割と構成	24
3. 4	タスク・プランニング部	24
3. 4. 1	ティーチング・モジュール	24
3. 4. 2	作業計画モジュール	26
3. 5	走行・作業制御部	30
3. 5. 1	空走1モジュール	30
3. 5. 2	空走2モジュール	31
3. 5. 3	往復作業モジュール	31
3. 5. 4	周り作業モジュール	32
3. 6	走行・作業のための共通ルーチン	32
3. 6. 1	前進直進制御ルーチン	32
3. 6. 2	後進直進制御ルーチン	34
3. 6. 3	180° 旋回制御ルーチン	35
3. 6. 4	90° 旋回制御ルーチン	35
3. 6. 5	幅寄せ制御ルーチン	37
3. 7	摘 要	39
第4章	ロボット作業 (作業ソフト) の発展—適応性の拡大と信頼性の確保	40
4. 1	経路等の選択肢に関する改良	40
4. 1. 1	経路等の選択肢	40
4. 2	斜め作業法	41
4. 2. 1	斜め作業法における経路計画と車両の誘導方法	41
4. 2. 2	斜め作業法における旋回方法	42
4. 3	回り作業法	42
4. 3. 1	回り作業法における経路計画	42
4. 3. 2	車両の誘導方法と旋回方法	43
4. 4	自己診断と異常時対応	44
4. 4. 1	計測・制御システムと異常等の報知	44
4. 4. 2	オペレータによる初期設定と自己診断	44
4. 4. 3	異常時対応	46

4. 4. 4	自己診断や異常時対応の動作確認	49
4. 4. 5	ロボット作業における動作・適応性に関する考察	51
4. 5	摘 要	51
第5章	ロボット作業の性能評価	53
5. 1	無人作業の評価試験方法	53
5. 1. 1	試験方法の構成	53
5. 1. 2	計測・算出項目と評価	53
5. 2	評価試験の実施	55
5. 2. 1	標準作業法の評価試験	55
5. 2. 2	各作業法の作業性能試験	56
5. 3	航法システム XNAV の評価	60
5. 4	摘 要	60
第6章	ロボット作業の活用—各種作業の実行	61
6. 1	2台同時作業法	61
6. 1. 1	作業試験の方法	61
6. 1. 2	作業試験の結果と評価	62
6. 2	麦播種作業	63
6. 2. 1	播種ソフト	63
6. 2. 2	播種作業試験の方法	64
6. 2. 3	作業試験の結果と評価	64
6. 3	代かき作業	66
6. 3. 1	代かきソフト	66
6. 3. 2	作業試験と結果	67
6. 4	摘 要	69
第7章	ロボットの課題と対応	70
7. 1	ロボットの価格とGPSの利用	70
7. 2	ロボット作業の安全性・信頼性の向上	72
7. 2. 1	作業安全の確保	72
7. 2. 2	ロボット作業の信頼性の向上	73
7. 3	ロボットの有効な利用・運用方法	74
7. 3. 1	ロボット作業のモデルの一例	75
7. 3. 2	ロボット作業のモデル化における考え方	75
7. 4	摘 要	76
第8章	総 括	78
8. 1	航法システムとロボット車両	78

8. 2	ロボット作業と作業ソフトの基本	78
8. 3	ロボット作業（作業ソフト）の発展	79
8. 4	ロボット作業の性能評価	79
8. 5	ロボット作業の活用	79
8. 6	ロボットの課題と対応	80
謝 辞		80
引用文献		81
Summary		83

Technical Report of the Institute of Agricultural Machinery
No.41, Mar., 2012

Development of Robot Tractor

Yosuke MATSUO, Osamu YUKUMOTO,
Satoshi YAMAMOTO, Noboru NOGUCHI

Contents

Preface	-----	1
1. Introduction	-----	2
2. Navigation System and Robot Vehicle	-----	10
3. Basis of Robot Work and Operation Software	-----	21
4. Improvement of Robot Work (Operation Software) - Expansion of Adaptability and Reliability	-----	40
5. Evaluation of Robot Work Performance	-----	53
6. Utilization of Robot Work--Application to Various Works	-----	61
7. Subjects of Robot Work and Countermeasures	-----	70
8. Conclusion	-----	78
Acknowledgement	-----	80
References	-----	81
Summary	-----	83

ロボットトラクタの開発

松尾陽介*・行本 修**・山本聡史***・野口 伸****

2010-7-1 受理

* 基礎技術研究部（現：評価試験部）

** 基礎技術研究部（現：農業・食品産業技術総合研究機構 理事）

*** 基礎技術研究部（現：園芸工学研究部）

**** 北海道大学

抄 録

ロボットトラクタ（以下、ロボット）は、市販トラクタの各部を自動制御できるように改造したロボット車両と、自動追尾型測量装置を用いてロボットの位置情報や方位情報を検出・出力する航法システム XNAV、および経路計画やロボット車両の制御を行う作業ソフトを読み込んだコントローラにより主に構成される。ロボットは、慣行の有人運転作業と同程度の作業能率、作業精度で矩形ほ場のロータリ耕作業を無人で行う性能を有している。ロボットの適応性拡大や効率的な利活用方法の研究として、ロータリ耕作業とは異なる経路による作業や播種作業、代かき作業を行える作業ソフトの開発、及びロボット作業と有人運転作業を同時並行で行う2台同時作業法の提案を行い、ほ場作業試験によりそれらの開発ソフトの性能や作業法の効果等を確認した。2台同時作業法は、オペレータ1人で従来型トラクタによる慣行作業の約1.8倍の能率でほ場作業が行え、ロボットを有効かつ安全に活用する作業法と評価できた。開発したロボットの性能は、慣行の有人運転作業と同程度の作業能率、作業精度で各種の農作業が行えることを確認し、省力効果や取扱い性、信頼性、作業安全の点についても実用利用できるレベルに近いものとする事ができた。

緒 言

我が国の農業は耕地面積の減少や農業者の減少と高齢化、安価な輸入農産物の増加と食料自給率の低迷など多くの課題を抱えている。これらの農業をとりまく情勢に対応し、課題を解決するためには、これまで以上に省力、低コストで、安全かつ高品質な農産物を安定的に生産することが求められる。日本農業においては、この「これまで以上に省力、低コストで、安全かつ高品質な農産物を安定的に生産する」ことに農業機械がどこまで貢献できるかが、その成否を左右すると言っても過言ではない。

一方で、世界的なエネルギー問題や環境問題から、農産物の高品質化や安定生産は、高馬力の農業機械や多量の農薬・化学肥料の投入によるのではなく、省力的かつ高精度に防除や肥培管理が行える農業機械の開発・導入によって達成することが求められている。そのニーズに応え得る農業機械のひとつの姿が「農業ロボット」であり、超省力化と有人作業を超える作業の高精度化が期待され

る。さらに、ほ場で稼働するロボットには、無人運転・作業のために取得する航法情報（位置情報）を、土壌や作物などの情報とリンクさせて精密農業を可能にするという利点もある。

本研究は人間に代わって農作業を行う「農業ロボット」の研究・開発を目標としており、具体的な研究・開発対象は、農用車両の中で最も適用作業や使用頻度が高い乗用トラクタの運転を無人化し、各種のトラクタ作業を無人で行えるロボットトラクタを開発することである。

本報告は、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」（平成13年9月発行、以下「前報」）の続報として、前報で報告したロボットの適応性や利活用方法などの拡大、展開を図った研究の報告である。適応性等の拡大、展開の方法や結果を分かり易くするために、ベースとなる前報の内容や結果、本報でも適用した試験方法については、第2章、3章、5章に重複して述べていることを申し添える。

第1章 序 論

1. 1 研究の背景—日本農業の現状と課題

人間に代わり農作業を行う「農業ロボット」が求められる背景には、日本農業の現状と課題がある。

今日の農業は、世界的に見れば、増大する人口に対して供給不足の傾向にある中で、地球温暖化や異常気象、農地の荒廃といった地球規模の環境問題に対応して、農業生産に伴う環境負荷の低減が求められている。

一方日本の農業は、耕地面積の減少や農業従事者の減少と高齢化、安価な輸入農産物の増加と食料自給率の低迷など多くの課題を抱えている(表1-1)¹⁰⁾。

このような厳しい情勢、課題に対応するために、1999年に日本政府は「食料・農業・農村基本法」を制定し⁸⁾、

(i) 食料の安定供給確保と食料自給率の向上のための効率的・安定的経営として、大規模経営が農業生産の相当部分を担う農業構造の確立

(ii) 農業の多面的機能発揮のための、国土保全、水源かん養、環境保全などの機能重視

(iii) 農業の持続的な発展のための、農業の自然循環機能の維持、増進

(iv) 農村の振興のための、上記(i)~(iii)を実行しうる地域の環境整備

などの方向性が基本理念として示された。

この1999年制定の基本法の下、概ね5年ごとに情勢の変化に対応した基本計画「食料・農業・農村基本計画」

の見直し・策定が行われ、2010年3月に出された基本計画では、

(i) 食料の安定供給の確保に関して、2020年に食料自給率を熱量ベースで50%に向上、食の「品質」「安全・安心」といった消費者ニーズに適った生産体制への転換、生産から消費までにおける「GAP」等の取り組み

(ii) 農業の持続的な発展に関して、個別所得補償制度の導入、多様な用途・需要に対応した生産拡大の取り組みの推進、改正農地制度に基づく農地の確保(現状461万haの維持)と有効利用、

(iii) 農村の振興に関して、「農業・農村の6次産業化」による地域ビジネスの展開と新業態の創出、都市農業の振興と農村コミュニティの維持・再生、中山間地域直接支払制度の検討、農山漁村活性化ビジョンの策定、

などの重点的施策や目標が示された⁹⁾。

これらの「食料の安定供給と自給率の向上」、「食の安全と消費者ニーズへの対応」、「農業の持続的発展」、「農村の振興」といった目標を達成するためには、安全で高品質な農産物を安定的に生産することが求められている。そして、その生産はこれまで以上に省力、低コスト、省資源の下で実現することが求められており、農業機械が果たす役割が非常に大きいと言える。

表1-1 日本農業の状況

項目	単位	1960年頃	1975年頃	1990年	2000年	2004年	2008年
農業総産出額	兆円	1.9	9.1	11.5	9.1	8.7	8.5
農産物輸入額	億\$	9	97	260	358	396	544
耕地面積	万ha	607	557	524	483	471	463
内、水田	万ha	338	317	288	264	257	252
普通畑	万ha	269	240	236	219	214	211
農業就業人口	万人	1454	791	482	389	362	299
内65歳以上の比率	%	—	14	36	53	57	60
熱量供給自給率	%	73	54	48	40	40	41
穀物供給自給率	%	62	40	30	27	28	28

※ 農林水産省：農林水産基本データ集(2010)などから。

1. 1. 1 農業機械化の進展と役割

これまでの日本農業において、農業機械が果たしてきた役割が大きいことはいまでもない。日本農業における農業機械の発達の様子を表 1-2 に示す^{14) 29)}。

動力を持つ本格的な農業機械が普及するのは昭和 30 年代に入ってからである。歩行型トラクタや動力脱穀機、稲を刈取り束ねていくバインダなどが昭和 40 年代にかけて導入され、農機具や畜力に頼っていた昭和 20 年代までの農業に比べ、作業能率が飛躍的に向上した。その後、50 年代からは、より高馬力化が可能な乗用トラクタや自脱コンバインが導入され、昭和 60 年頃には機械化の進展は一応の完成を見る。

昭和 60 年代からは、既存機械の自動化や高速化、汎用化、そして快適化の時代に入り、現在もこの流れの中にある。昭和 30 年代から 60 年頃までの機械化の進展はめざましく、機械化により農作業の能率は飛躍的に向上してきた。昭和 20 年頃に 200 時間/10a を越えていた稲作における単位労働時間は、昭和 40 年代には 100 時間/10a を切るまでになり、60 年頃には 50 時間/10a にまで短縮された。

農業機械は農作業の高効率化を可能にし、このことにより適期作業が可能となり、単位面積当たりの収量の増加をもたらした。また、昭和 50 年代からの農業機械の高

馬力化や 60 年代からの自動化、高速化、汎用化は、経営面積の拡大や作業精度の向上を可能にし、快適化は一層の労働負担の軽減をもたらした。

このように、日本農業における農業機械の果たす役割は、①高能率化による投下労働の削減、②機械利用による労働負担の軽減、③広い負担面積による生産コストの低減、④適期作業による収量の向上、⑤高い作業精度による品質の向上などであり、当然のことながら、現在、そして今後も、農業機械は日本農業には欠くことのできないものである。

1. 1. 2 今後の農業機械に求められる要件

前項で述べたように農業機械が果たすべき役割は大きく、農業従事者の減少や高齢化、食料自給率の低迷など日本農業が抱える課題を解決するために、どのように農業機械を活用すべきか、どのような農業機械を開発すべきかを考える必要がある。

これからの日本農業において、農業機械に求められる要件を挙げると以下のようになる。

- (i) さらなる省力化、低コスト化につながる機械の汎用化、自動化、ロボット化
- (ii) 安全で高品質な農産物を生産するための作業の高精度化

表 1-2 日本農業におけるほ場用農業機械の発達

年 代	変化の様子	具 体 例
昭 20(1945)年～ 農機具時代	人力・畜力・風力・水力 主体農具・農機具	人力脱穀機、牛・馬耕
昭 30(1955)年～ 動力化時代	動力利用機械 機械化の幕開け	エンジン・電動機の利用、歩行型トラクタ、 動力脱穀機、動力ポンプ・・・
昭 40(1965)年～ 歩行型農機時代	歩行型を基幹とした機械化 一斉作業の機械化進展	歩行型トラクタ、バインダ、田植機、 背負い型防除機・・・
昭 50(1975)年～ 乗用型農機時代	乗用型を基幹とした機械化 高馬力、高能率化	乗用トラクタ、乗用田植機、 自脱コンバイン・・・
昭 60(1985)年～ 複合化農機時代	作業機の自動化、高速化、 汎用化、快適化	トラクタ作業機・コンバイン等の高度自動制御、 高速田植機、汎用コンバイン、ラジコン・・・
平 07(1995)年～ 半無人農機時代	乗らない機械、軽労化 ロボット化機械	ケーブル誘導防除機、接木ロボット、搾乳ロボッ ト、半自動収穫ロボット・・・人と機械の協調
平 17(2005)年～ 情報化機械時代	精密農業用機械、情報化機械、 運転・作業アシスト機械	可変施肥機、収量コンバイン、 農作業ナビゲータ、運転・作業アシスト装置
2020～(?) ロボット時代	農業ロボット作業体系 選択的作業機械化、群管理	果菜類選択収穫・摘果・誘引等汎用ロボット、 複数台ロボット車両による協調作業・・・

(iii) 安全な農産物を安定的に生産し、環境への負荷を低減する精密農業を行える機械の開発

これらの要件に対応する機械の活用、開発のための戦略、方法については、かつて製造業分野では、メカトロニクスやロボット技術などの新技術を導入して柔軟な生産体制を確立し、高品質な製品を省力的に低コストで製造、提供することに成功している。農業分野でも新技術を積極的に導入することにより、(i)の要件に対して、1台で多くの作業ができる汎用化や、自動化、ロボット化を推進し、生産のさらなる省力化や低コスト化を図ることが期待される。また、新技術の導入・適用により農業機械作業の高精度化が進めば、より一層安全で高品質な農産物生産が可能となり、(ii)の要件に対応することが可能になると考えられる。

(iii)の要件に対応する精密農業の考え方は古くからあったが、それを実践する上でポイントとなる位置情報の取得が、全地球測位システム(Global Positioning System, 以下「GPS」)の普及により簡便、高精度に行えるようになってから注目されるようになった。精密農業を農業現場で実践するためには、位置情報と土壌や作物の状態情報を取得できる機能、装置を有する精密農業用機械が必要である。

1. 1. 3 農業ロボットへの期待

ここまで、日本農業の現状と課題、農業機械の進展と役割、そして今後の農業機械に求められる要件について述べたが、そこから見えてくる今後の農業機械のあるべき姿のひとつとして「農業ロボット」が挙げられる。農業ロボットには超省力化と有人作業を超える作業の高精度化が期待され、ほ場で稼働するロボットでは、ロボットによる無人作業(以下、「ロボット作業」という)のための位置情報を精密農業にも活用できる。

1) 農業ロボットの定義と分類

農業ロボットは、工場内の製造ラインで稼働している溶接ロボットや組立てロボットなどと同じ範疇の産業用ロボットということができ、まだ研究・開発段階のものが多いため、JISなどの規格の中で明確に定義はなされていない。しかし、農業ロボットは、溶接ロボットなどの産業用ロボットが「自動制御によるマニピュレーシ

ョン機能または移動機能を持ち、各種の作業をプログラムによって実行でき、産業に使用される機械」とJISに定義されていることから、「人間に代わり農作業をプログラムによって自立的に実行する機械」と定義して差し支えないであろう。

農業ロボットが人に代わって行う農作業は、①各種の農業機械を運転・操作する作業と、②簡単な道具や人の手足を直接使って行う作業であり、より具体的には、①はトラクタや田植機、コンバインなどの従来型機械が農作業を行う際の運転・操作であり、②は例えば果菜類の栽培における接木や誘引、摘花、長期間の選択収穫などの従来ほとんど人手のみで行われてきた農作業である。

農業ロボットの分類については、これまでに研究・開発されたロボットをレビューしてみると、上記の対象とする作業とロボットの形態から、主に①の作業を無人化した「車両系ロボット」と、②の人手作業を無人で行う「マニピュレータ系ロボット」に大きく分けることができる。従来型機械にも、農業施設内などで無人で使われている定置型の機械・装置は多いが、これらの機械・装置は自立的情報処理機能を備えておらず、ロボットというより「自動化機械・装置」と呼ぶのが適当と考える¹⁸⁾²⁰⁾。

車両系ロボットの多くは、トラクタや田植機などの既存の車両系機械をベースに、その走行部や作業部、運転操作部を自動制御化するとともに、各部の状態を計測・モニタできるようにして、ロボット車両システムを構成している。そのロボット車両にロボット作業を自立的に行うための航法システムとコントローラ、及びロボット作業のためのソフトウェアをコントローラに組み込む形で、車両系ロボットは構成されるのが一般的である¹⁾³⁾⁷⁾。また、車両系ロボットとして、既存の車両系機械に代わる新たなロボット車両を製作、構成することも考えられ、将来的には低コスト化や汎用化といった点で有望となる可能性は高い。しかし、現時点での開発コストや現状の栽培様式への対応、作業現場への有人移動といった点を考えると、まずは、既存の車両系機械をベースとし、有人運転・作業もできるようにロボット車両を構成する方が適当と考えられる。

一方、マニピュレータ系ロボットは、作業対象の位置や状態を検出する視覚センサとコントローラを装備し、

対象認識や無人作業のためのソフトウェアをコントローラに組み込んで各部を機能させる構成が一般的で、アーム部には市販の電動マニピュレータを適用しているものが多い^{12) 32)}。

2) 農業ロボットへの期待

農業従事者の減少や高齢化に伴う深刻な人手不足が予想される今後の日本農業では、「人間に代わり農作業をプログラムによって自立的に実行する機械」である農業ロボットによる農作業が必要になってくる。

前項での分類における車両系ロボットは、これまで人の運転が必要であった機械を無人運転化したロボットであり、今後の人手不足に対応するロボットである。ロボット作業の能率については、ベースとなる機械の能力によるところが大きく、ロボット化によって機械としての能率向上はあまり期待できない。しかしながら、均一・均質な作業を長時間変わらずに実施できる点で作業精度の向上、均質な農産物の安定的生産への貢献が期待できると考えられる。

一方、比較的小型・軽量の車両系ロボットを適用して、時間をかけてゆっくり作業を行うようにすれば、高負荷作業が減って省エネ作業が行える。また、機械除草を時間をかけて丁寧に行えば、減農薬の安全・安心な農作物の生産が可能となる。さらに、小型・軽量の車両による作業はほ場の踏圧が減ることになるので、環境にやさしい持続的農業を行う上でメリットがある。

マニピュレータ系ロボットは、従来ほとんど人手のみで行われてきた農作業を行うロボットであり、人の集中力が続かない長時間作業において均一・均質な作業を変わらず実施できる点や、昼夜を問わず作業対象の状態を見ながら適正な作業を行える点で、ロボット作業のメリットは大きいと考えられる。

ただし、人手による農作業のすべてが行えるロボットの実現はかなり先のことになると思われ、当面は人との協調作業を前提に、ロボット作業のメリットを生かすことが重要となろう。園芸や畜産では毎日行わなければならない作業も多く、その作業を人とロボットが分担し、短時間の熟練がいる作業は人が行い、長時間の単調作業はロボットに任せる、などにより現状の農作業の困難さは大幅に改善されることが期待される。

1. 2 車両系ロボットと研究・開発動向

本報告におけるロボットの分類である車両系ロボットの一般的な構成要素と特徴について、上記 1. 1. 3 項の 1) の内容を補足して述べるとともに、車両系ロボットのこれまでの研究開発動向をレビューする^{20) 21)}。

1. 2. 1 車両系ロボットの構成・特徴

車両系ロボットのベースとなる車両系機械にはトラクタや田植機、コンバイン、また立毛状態のほ場内で各種作業を行う乗用管理機や各種畑作物・野菜の収穫機、草・芝の刈取り機、牧草関係の作業機械、果樹園用防除機であるスピードスプレーヤなどがある。

これらの車両系機械は、総じて、車輪やクローラを足回りとする走行部と各種作業を行う作業部、及び人が運転、操作を行う運転操作部から構成されている。原動機にはガソリンエンジン、またはディーゼルエンジンが用いられ、エンジンによる機械的動力とともに、油圧動力や電気動力が変換・生成され、各部の駆動に用いられている。

このような車両系機械の運転無人化、ロボット化には、走行部と作業部、運転・操作部の自動制御化と各部の状態の自動計測化、無人作業のための航法システムとその航法システムからの情報の取得・演算や各部の制御を行うコントローラの装備、及び無人作業を実行するソフトウェアの製作・組込みが必要である。

車両系機械の種類により違いはあるが、自動制御化の対象は次の通りである。走行部と運転操作部に関わる対象が、操舵機構、主クラッチ、前/後進/停止を切り替えるシャトル変速(以下、「シャトル変速」)、主/副変速、機関回転数など、作業部と運転操作部に係わる対象が、主クラッチ、PTO (Power Take-off) 変速、機関回転数、作業機昇降、作業入/切などである。

状態の自動計測化が必要な対象としては、上記の自動制御対象の状態と燃料残量や冷却水温度などが挙げられるが、最近の農用車両では既にそれらのセンシング・モニタ機構が備わっている場合が多い。

航法システムは、ロボットが無人走行や無人作業を行うために必要な装置であり、位置情報などの情報(「航法情報」と呼ぶ)を取得するためのセンサ(「航法センサ」と呼ぶ)やデータ通信・処理部などから構成される装置

である場合や、経路に敷設したレールとレールに沿うガイド輪から構成される機構も航法システムといえることができる。ロボットが行う作業や稼働するほ場、走行・作業経路の状況により、ロボット作業に必要な航法情報は異なり、その航法情報を取得するための航法システムも違ってくる。例えば、走行・作業経路が一定、不変で経路付近のほ場面に直接作業を行わない場合は、経路上にレールや電線などを設置し、その経路に沿って機械が移動する機構を航法システムとして用いれば良い⁶⁾。トラクタのように複数の作業を行い、作業によって走行・作業経路が変わる場合は、機械の位置情報を常時、数値として取得できる GPS のような航法センサを適用して航法システムを構成することが適当と考えられる。また、車両系機械では作業部の位置が走行部の後方や側方に偏っている場合が多く、機械の傾斜もランダムに発生することがあるので、機械の向きであるヨー角や傾斜であるロール角、ピッチ角も計測できるセンサを航法センサのひとつとして備えることも、無人作業を高精度で行うためには必要である。

コントローラについては、車両系機械の各部の自動制御化と自動計測化のための情報入出力・通信を主に行う「計測・制御コントローラ」と、無人作業のためのソフトウェアを組込んで実行するとともに、航法センサからの航法情報を入力・処理、計測・制御コントローラと通信して制御指令の出力や状態情報の取得などを行う「メインコントローラ」から構成されるパターンが多い。計測・制御コントローラは車両コントローラということもでき、マイコンベースのものやシーケンサ、プログラマブルコントローラなどがよく用いられる。メインコントローラにはパーソナル・コンピュータ (Personal Computer, 以下「PC」) が用いられることが多いが、研究・開発段階であっても、屋外車両に搭載・使用することから、それらの耐環境性、耐久性に配慮が必要である。

車両系ロボットは、このように、①従来型機械、②各部の自動制御化と状態の自動計測化、③無人作業のための航法システムや航法センサの適用・装備、④航法情報などの取得・演算や各部の制御を行うコントローラの装備、及び無人作業を実行するソフトウェアの製作・組み込み、という大きく4つの要素によって構成され、どの車両を対象(①)に、②~④の要素がどのような方法や方

式によって構成され、機能しているかがそのロボットの特徴といえることができる。

1. 2. 2 研究・開発動向

車両系ロボットの研究開発は、国内では、1970年代の半ば頃に行われたコンバインの自動運転研究²⁾や農用車両の自動操縦研究²⁵⁾が始まりと見ることができる。その後1990年代後半までの主な研究開発例は前報を参照されたい。

ここでは、農用車両の代表に挙げられるトラクタと田植機、コンバインをベースとする車両系ロボットの研究開発の中から、1990年代後半以降に、ほぼ実用作業ができるまでところまで開発がなされたもの3例について、上記の車両系ロボットの4つの構成要素に関する特徴等を述べる形で紹介する。

北海道大学が開発、1998年に発表された「ロボットトラクタ」³⁾は、①56.6kWの市販トラクタをベースに、②電磁バルブの装備などにより油圧の操舵機構やシャトル変速等の操作機構を自動制御できるように改造、③自前基準局を設置したリアルタイムキネマティック GPS (Real Time Kinematic GPS, 以下「RTK-GPS」)により位置情報を計測し、光ファイバージャイロ (Fiber-Optic Gyroscope, 以下「FOG」)及び FOG ベースの慣性計測装置 (Inertia Measuring Unit, 以下「IMU」)により車両のヨー角とロール角、ピッチ角を計測する航法システムを構成している。④コントローラとして、車両各部の計測・制御を行う車両コントローラと、航法情報の演算や無人作業プログラムを実行する PC ベースのメインコントローラを用い、耕うんから播種、管理・防除作業までのトラクタ作業を無人で行うことができる。無人作業は、経路やイベント位置情報を持つ地図データと車両各部の動作状態データを符合させるマップベースガイダンスにより実行されており、ほ場や格納庫間の農道移動も無人で行える拡張性を持っている。

農業研究センター(現、農研機構中央農業総合研究センター)が開発、1998年に公開された「田植えロボット」⁷⁾は、①市販の6条植乗田植機をベースに、②操舵機構や主クラッチなどは油圧制御により、変速機構やスロットルなどは DC サーボモータにより自動制御が行えるようにしている。③自前の基準局を設けた RTK-GPS により位

置情報を、FOGにより車両の向きとしてのヨー角と傾斜角であるロール角、ピッチ角を計測する航法システムを構成、④車両各部の計測・制御をプログラマブルコントローラにより、航法情報の入出力・処理や無人作業プログラムの実行をPCベースのメインコントローラにより行って、往復の無人田植えが行われる。その後、無人の枕地作業やロングマット苗を適用した連続無人作業が行えるよう改良がなされている。

京都大学が開発、2006年に発表された「無人コンバイン」¹⁾は、①市販の2条刈りコンバインをベースに、②ACサーボモータによりクローラの操向制御を、DCモータによりHST変速機構の速度制御を行えるようにしている。③コンバインの位置・姿勢を、携帯電話により補正情報サービスを受信・利用するネットワーク型RTK-GPSとFOGベースのIMUにより検出する航法システムを用いており、④車両各部の計測・制御をマイコンにより行い、航法情報の入出力・処理や無人作業プログラムの実行をノートPCベースのメインコントローラによって行い、矩形区画を外周から収穫していく無人作業を実現している。

日本国内での研究・開発例の主なものは、前報で紹介したものも含め、1998年頃までに一応の完成を見ており、2000年以降は、それまでの開発ロボットの性能向上や実

用化に向けた改良、ベース機械の更新などの研究が主に行われ、現在に至っている。

海外での車両系ロボットの研究・開発は、1960年代に英国や米国の研究機関でトラクタの無人作業に関する研究が行われているが、欧米各国での研究・開発が盛んに行われるようになったのは、GPSの民間利用が広く行われるようになった1990年代の中頃からである。

1990年代中頃からの欧米における研究・開発例として、トラクタ関係では、フィンランドのモジュレーヤ社(1994年)、米国のスタンフォード大学(1998年)、ジョンディア社(1998年)、独国のゲオテック社(1999年)のもの、牧草ハーベスタで米国のカーネギーメロン大学とニューホランド社のもの(1997年)、園芸作業車両で英国のシルソー研究所のもの(1996年)、果樹園作業車両で米国ジョンディア社のもの(2002年)などが挙げられ、英国シルソー研究所のもの以外は、すべてGPSを基幹航法システムとして用いている^{14) 21)}。

欧米では、GPSの補正情報サービスなどの利用環境が整っており、GPSの価格も安価であることから、独国ゲオテック社の無人作業トラクタは農家への試行販売が行われた実績もある。

1. 3 研究の目標・範囲

表 1-3 ロボットの目標仕様^{15) 20) 30)}

ほ場条件	ほぼ水平で区画整理された矩形ほ場、適用区画：100×50 m以上の区画に対応
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	形 式：4輪駆動、20-25 kW級トラクタ 作業機：ロータリ耕うん機 制御対象：操舵、シャトル変速、ブレーキ(左右) ON/OFF、スロットル上げ下げ、作業機昇降、機関燃料カット 付属装備：作業機水平・耕深制御機能、旋回時前輪増速機構等
航法システム	位置情報：計測誤差 ≤ 5 cm、計測周期 ≤ 1 s 方位情報：計測誤差 ≤ 0.3°、計測周期 ≤ 0.1 s
制御装置	試作機では、試作ボードコンピュータ+汎用PC
作業ソフトウェア	対象作業：耕うん、代かき、畝立他 作業方法：枕地処理を含む往復作業
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、遠隔操作車両停止機構

本研究は人間に代わって農作業を行う「農業ロボット」の研究・開発を目標としており、具体的な研究・開発の対象は、農用車両の中で最も適用作業や使用頻度が高い乗用トラクタの運転を無人化し、各種のトラクタ作業を無人で行えるロボットトラクタを開発することである。

開発するロボットの性能目標は、慣行のトラクタによる有人運転作業と同程度の作業能率、精度で作業が行え、その作業は実用利用が可能なレベルとすることである。本研究は、これらの性能を有するロボットの開発から、その作業性能をほ場試験により確認、評価するまでを研究の範囲とした。

表1-3に開発するロボットの目標仕様・性能を示す¹⁵⁾²⁶⁾。開発ロボットの適用ほ場は、比較的規模の大きい水田や畑での作業を前提に、ほ場の出入口や畦畔などが整備されたほぼ水平の矩形ほ場とした。傾斜地や不定形ほ場への対応については、それを実現するための要素技術として航法における傾斜補正や斜め方向作業などの検討・試行までは行うこととした。作業区画の大きさは、我が国の多くの水田が100×30m区画であることを考慮し、その区画を含む100×50mの区画の全面作業は無人で行えることを目標とした。

オペレータについては、作業途中で種子や苗、肥料等の補給を行うことが必要な場合を除き、ほ場内で作業を開始した後はロボット作業に関与する必要がないことを目標とし、ほ場内へのロボットの移動と無人作業の初期設定まではオペレータが行うこととした。また、作業中の異常時対応や人がほ場場内に入ることなどを防止する作業安全の確保のため、ロボットによる作業が行われている間、オペレータは作業ほ場から遠くない場所にて時折ロボットによる作業を監視しつつ、別作業を行うことを前提条件とした。

ロボットのベース車両には、国内での出荷台数が最も多いクラスのトラクタを用い、作業機は、水田作や畑作での耕うん作業に共通的に用いられるロータリ耕うん機を標準の作業機とした。ロボットは、ベーストラクタの操舵機構やシャトル変速、スロットルなどを自動制御できるようにし、制御装置として試作ボードコンピュータと汎用のPCを搭載・適用することとした。

航法システムの目標仕様・性能は第2章の2.1に詳述する。

ロボットが作業を行うためにPCに組み込むプログラム(ソフトウェア、以下「作業ソフト」)は、まず、ロータリ耕うん用のものを慣行の作業法に準じて開発し、それとは異なる経路の作業や播種作業、代かき作業への展開は、そのロータリ耕うん用作業ソフトをベースに行うこととした。また、ロボットによる作業の安全を確保する機能、装置もできるだけ備えることを目指した。

ここに述べた本研究の目標や特徴について、上記1.2.2に紹介した北海道大学におけるロボットトラクタの開発研究と比較してみると、まず、対象とするトラクタの大きさと対象作業の違いが挙げられる。

北海道大学のロボットのベース車両は出力56.6kWの比較的大型のトラクタであり、対象作業としては畑作での作業が中心となる。一方、本研究のベース車両は出力24.3kWの国内での出荷台数が最も多い中・小型クラスのトラクタであり、1枚30a規模の水田の耕うんや代かき作業などに使われることが多い。そのため、例えば、本研究におけるロータリ耕うん用作業ソフトの開発では、作業幅170cm前後のロータリ耕うん作業を、180°旋回を含む隣接往復作業と3周の枕地処理により圃場の端まで処理する経路計画と経路誘導を実現できる作業ソフトの開発が求められる。

また、本研究のロボット作業には、できるだけ実用利用が可能なレベルの作業が行えることを目標としており、ほ場内で作業を開始した後は、オペレータが関与することなく作業が完了できるように、自己診断や異常時対応などの信頼性を確保する機能を充実させることにも重点を置いた。さらに、現状のロボットの機能・性能を前提として、有効な利用・活用方法の提案とその試行、あるいは試算などを行って、今後の展開方向を示すことにも取り組んだ。

1.4 報告の構成

本報告は8章で構成した。

第1章「序論」では、「ロボットトラクタの開発」研究の背景として、日本農業の現状と課題、その課題に対応する農業機械のあるべき姿、及びその姿のひとつである農業ロボットの定義と分類、期待について論じた。そして、農業ロボットの分類のひとつである車両系ロボットの構成と特徴、及びこれまでの研究動向を概観、紹介し

た。さらに、本研究の目標・範囲について述べた。

第2章「航法システムとロボット車両」では、まず、トラクタの無人作業を実現する航法システムについて、一般的な分類や特徴等を概観し、次に、本研究のロボットに適用すべく検討、開発した光学測量装置方式の航法システムの仕様や構成、特徴などを述べた。そして、ロボット作業を行うハードウェアとしてのロボット車両について、市販トラクタ各部の自動制御や計測を行うシステムと、その自動制御・計測や航法情報の取得・処理、ロボット作業のための作業ソフトの実行を行うコントローラ等について、それらの仕様や構成を述べた。

第3章「ロボット作業と作業ソフトの基本」では、第2章の航法システムとロボット車両によるロボット作業の方法と、それを実行する作業ソフトの構成や内容を中心に論じた。作業ソフトの構成や内容、実行される制御については、慣行のロータリ耕うん作業に準じた「標準作業法」に関するものを前報で詳述したが、標準作業法とそれを実行する標準作業ソフトは、本報の第4章、6章で述べる新しい作業法のベースとなっており、作業ソフトの基本として前報の内容を一部修正して記述した。

第4章「ロボット作業（作業ソフト）の発展－適応性の拡大と信頼性の確保」では、ロボットのは場や作業に対する適応性拡大を目的に行った作業重複や経路選択に関する改良と、斜め作業ソフトや回り作業ソフトの開発について論じた。さらに、ロボット作業の信頼性向上と

安全性確保を目的に行った自己診断機能や異常時対応機能の検討・開発及びそれらの実行ソフトの動作確認について論じた。

第5章「ロボット作業の性能評価」では、まず、車両系ロボットによる無人作業の評価を行うために策定した試験方法について記述した。そして、その試験方法を適用・実施したロボット作業の評価試験について、試験結果を述べるとともに評価・考察を行った。本報におけるロボット作業の試験方法は前報で報告したものと同一ものを用いており、試験方法に関する部分と一部の試験結果は前報と重複して記述している。

第6章「ロボット作業の活用－各種作業の実行」では、ロボットの有効な活用方法として2台同時作業法を提案し、その作業試験結果について記述、評価を行った。また、ロータリ耕うん以外の作業への展開として、播種作業と代かき作業を行う作業ソフトの開発及びその作業試験結果について記述し、評価を行った。

第7章「ロボットの課題と対応」では、開発したロボットを農業現場に導入・普及させるには、ロボットの低価格化や安全性・信頼性の向上、有効な利用・運用方法の確立が必要であることを述べるとともに、それらの課題の解決・対応方法について、試算の結果や試行的に行った人・障害物センサの性能調査結果も含めて論じた。

最後の第8章「総括」では本研究をまとめた。

第2章 航法システムとロボット車両

本章では、まず、ロボットによる無人作業を実現する航法システムの仕様や性能について、トラクタ作業の特徴などを検討・考慮して、その目標を示す。次に、本研究のロボットに適用すべく検討、開発した光学測量装置方式の航法システムの仕様や構成、特徴などを論じる。そして、ロボット作業を行うハードウェアとしてのロボット車両について、ベースである市販トラクタの各部の自動制御や計測を行うシステムと、その制御・計測や航法情報の取得・処理、ロボット作業のためのソフトウェアの実行を行うコントローラの構成や仕様などを述べる。

2.1 トラクタ作業と航法システム

車両系ロボットに適用される航法システムの一般的な分類や特徴については前報に記した³⁰⁾。それらの航法システムの中から、本研究の対象であるトラクタの無人作業を実現できる航法システムについて、方式別の適否や

適用時の留意点などを考える。

トラクタ作業における走行経路や走行速度などの航法に係わる特徴として、1辺が20～数百m程度の概ね矩形のは場の中を塗りつぶすように走行していくため、走行範囲はそれほど広くなくても走行距離や連続走行時間が長いことがあげられる。走行・作業経路としては、は場端で180°旋回を行う往復の直進作業が多く、その直進行程は平行で等間隔に行われることが多い。しかし、作業の種類や用いる作業機によって、往復の直進作業の作業間隔は異なり、旋回位置や枕地処理の作業経路も違ってくる。

作業時の走行速度は数cm/s～数m/s(0.1～10km/h)の範囲で、走行路面は不整地で凹凸も多いので、走行中のトラクタは車体の振動と共に、数度程度のロール・ピッチに曝される。また、埃の中、雨の中で走行・作業することもある。走行時間や走行距離は、100×50mの矩形

表2-1 航法システムの分類と特徴³⁰⁾

経路	名称(方式)	検出対象	目標・センサ・施設等	特徴等
固定	固定経路: 機械式	機械式ガイド	レール、パイプ、溝	信頼性高い
	": 非接触式	非接触ガイド	誘導電線、テープ、レーザービーム	経路に自由度なし 設置コスト必要
半固定	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	マーク間の補間必要 自由度やや有り 設置コスト必要
自由	内界情報 : 慣性航法式	加速度	ジャイロ+加速度センサ	データにドリフトがあり補正必要
	": 距離・方位式	距離(速度)+方位	車輪回転+地磁気方位センサ/ジャイロ	設備不要で、比較的ローコスト
	": 車輪回転差式	左/右車輪回転	左/右車輪回転、左/右クローラ回転	
	外界情報: 追尾式	作業境界、作物列等	TVカメラ+画像処理 接触センサ	画像センサ利用では光環境の影響大
	": 相対距離式	壁面、段差、畦畔等	超音波センサ、オフザワイヤ誘導ケーブル	外界情報の信頼性により精度左右
	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	基準局-移動局間で情報通信が必要な場合有り
	": トラバース式	相対距離・角度	トランシット+測距儀(対象追尾)	
": 双曲線航法式	複数の距離	電波灯台、レーザー灯台、GPS	標識間角度・距離の高精度検出が必要	

ほ場内で、作業幅 2 m、作業速度 0.5m/s の耕うん作業を想定すると、総走行距離は約 2.5km で、この 1 枚のほ場を処理する時間は約 1.5 時間になる。

このような走行・作業の特徴を持つトラクタに、まず、固定経路方式の航法システムの適用を考えてみると、トラクタ作業には水田や畑の全面を直接耕うん・整地する作業があるため、固定経路の機械式ガイドを用いる方式は不適と考えられる。非接触式ガイドを用いる方式でも経路が固定されることによる土壌踏圧の影響などが懸念される。

半固定経路のスポットマーク方式も、作業区画内にマークを設置するのは不適であり、作業区画を避けてマークを設置する場合は作業区画の大きさが限定され適当ではないと考えられる。ただし、固定経路方式の誘導ケーブルや半固定経路方式の磁気標識などを作業区画を囲むように設置して、トラクタの区画外へのはみ出しや暴走を防止する目的に使用することは有効である。

内界情報方式は、区画が大きい場合あるいは連続作業時間が長い作業では、累積誤差による航法データの精度低下が問題となる。車輪の回転から移動距離を求める方法は一般のほ場ではスリップによる誤差が懸念される。これらのことから、トラクタの航法システムとして内界情報方式を用いる場合は、他の航法システムと併用し、比較的短い時間や狭い範囲内の航法データは内界情報方式で取得して、他の航法システムによる航法データによりそれを補うことが適当と考えられる。

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ので、自由経路の無人走行を外界情報方式のみで行うのは難しいと考える。

外部標識方式は、高精度な位置情報を逐次取得できるという点から有力な航法システムと考えられる。ただし、距離や角度の計測媒体によっては障害物により計測不能となる場合があり、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、波状地では標識が隠れてしまう場合がある。また、GPS を用いる場合、高い建造物や防風林などが近くにあるほ場では高精度な位置情報の取得が安定的に行えない場合がある。

航法システム全般の留意点として、車両上の計測センサや計測システムにより外界情報や標識、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、車両の傾斜であるロール・ピッチにより誤差が生じるため、その補正を行う必要がある。

2. 2 ロボットトラクタの航法システム

前項のトラクタ作業の特徴と航法システムの適用に関する検討を踏まえ、また、ロボットによる無人作業（以下、「ロボット作業」）のほ場や作業に対する適応性を高いものとするを考えると、ロボットに適用する航法システムは、ほ場や作業に対する汎用性が高く、絶対的なロボットの位置情報と進行方位情報を逐次取得できるものが望ましい。取得する位置情報や方位情報の精度や周期については、1.3 項で述べたロボットの目標仕様を達成するために、表 2-2 に示す仕様・性能を満足する必要があると考えられる¹⁵⁾。

位置情報の計測精度については、作業重複幅を 10cm 前後と想定し、残耕がないようにその半分の 5 cm が許容できる誤差である。進行方位情報の計測精度については、何らかの事情により位置情報が得られない場合でも、数 m 程度の無人走行は方位情報のみにより行えるようにすることを前提に、0.3° を許容誤差とした。

航法情報の取得周期は、位置情報では 1s 以下を、進行方位情報では 0.1s 以下を目標とした。位置情報については、進行方位情報を 0.1s 周期で計測できれば、ロボットトラクタがほぼ一定速度で走行することを前提にデッドレコニングにより補間することが可能である。

これらの要件、仕様を満足する航法システムとして、ロボットの位置情報計測は外部標識方式により行い、進行方位情報の計測は内界情報方式により行うものについて、まず、既存の航法システムや航法センサの中から適用できるものを調査、検討した。その結果、進行方位情

表 2-2 ロボットの航法システムの目標仕様・性能^{15) 30)}

適用範囲	100×50m以上の区画
計測情報と精度等	ほ場内位置情報：計測誤差：5 cm 以下 計測周期：1 s 以下
	進行方位情報：計測誤差：0.3° 以下 計測周期：0.1 s 以下
取扱い性等	動力源は発電器やバッテリーで対応。 設営や起動が簡易かつ迅速に行えること。

報の計測は高精度な地磁気方位センサ (Terrestrial Magnetism Sensor, 以下「TMS」)やジャイロセンサの適用により実現可能と考えられたが、位置情報の計測については、航法システムのコスト上限の目安をトラクタの市販価格と同レベルの数百万円程度までとしても、目標の仕様や性能を満足するものは見あたらなかった (1995年生研センターによる調査結果)。

そこで、ロボットに適用する航法システムの位置情報を計測する部分は、外部標識方式を前提に新規開発を行うこととした。

2. 3 航法システム XNAV の開発

ロボット作業に適用する航法システムを「XNAV」と呼ぶ。その XNAV では、ロボットの進行方位情報は内界情報方式の既存センサを適用して計測することを前提として、ロボットの位置情報を外部標識方式により計測するシステムの開発に取り組んだ。開発対象の位置計測システムは、市販トラクタをベース車両とするロボットに適用することを目的に、トラクタの位置計測システムとして開発を進めた。

その航法システム XNAV の位置計測システムとして、当初、TV カメラと光波測距儀、及びトラクタ上に設置する標識から構成されるオリジナルなシステムの開発に取り組んだ。しかし、その開発中に、計測原理をほぼ同じくする測量装置が測量機器メーカーから市販され、所期の性能を有するものであったため、オリジナルの位置計測システムの開発は中断し、市販の測量装置を用いたものを XNAV の位置計測システムとした。

2. 3. 1 XNAV の位置計測システム

XNAV は、ほ場外の定点に基準局装置を設置し、その基準局装置がトラクタを移動局として観測してその位置を計測し、その計測位置情報は無線通信によりトラクタに送信する方式とした。表 2-1 の航法システムの種類に従うと、外部標識方式の位置計測システムであり、位置算出の方式は「トラバース式」に分類される³⁰⁾。

位置計測の原理は図 2-1 のように、移動局であるトラクタ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 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 、 θ_H 、

θ_V よりターゲット点の座標 $P(x_p, y_p, z_p)$ を下式によって求めるものである。

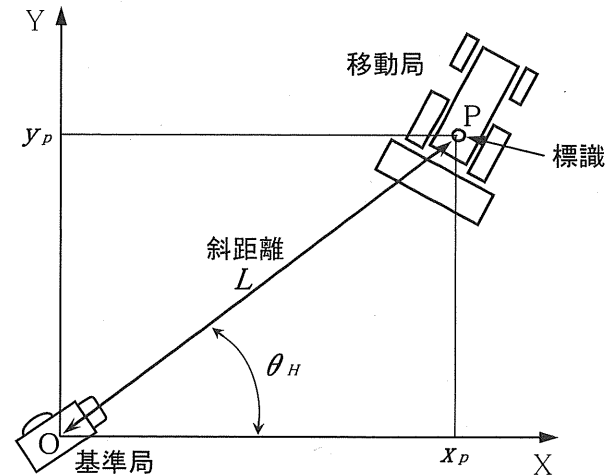


図 2-1 XNAV の位置計測の原理^{15) 30)}

$$x_p = L \cdot \cos \theta_H \quad (2.1)$$

$$y_p = L \cdot \sin \theta_H \quad (2.2)$$

$$z_p = L \cdot \sin \theta_V \quad (2.3)$$

1) トータルステーション AP-L1

トータルステーション AP-L1 (図 2-2) は (株) トプコン製の測量装置であり、この AP-L1 はひとつのレーザー光により光反射標識の追尾、測距を行い、標識点の 3 次元座標位置を算出できる自動追尾型測量装置である。

標識を見失った際に自動探索を行って標識の追尾を復帰する機能も備えている。AP-L1 の主な仕様を表 2-3 に示す。AP-L1 の追尾と測距のためのターゲットは 1 つで

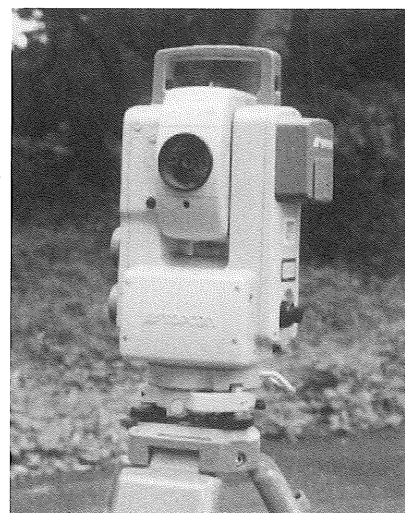


図 2-2 自動追尾型測量装置 AP-L1 ((株) トプコン)



図 2-3 光反射標識

あり、そのターゲットには6分割位置に再帰反射型の光反射プリズムを配した図 2-3 の光反射標識を用いる¹⁵⁾。

この AP-L1 の移動体の位置計測性能について、ほ場内を走行するトラクタ上に光反射標識を搭載し、その位置計測精度や自動追尾性能を調査した。その結果、位置情報の計測精度や周期は、XNAV の基準局装置として目標を十分に満足するものであり、標識の自動追尾性能もトラクタの移動速度等からみて良好と判断された。そこで、AP-L1 を XNAV の基準局装置として用いることとした。

2) 位置計測システムの構成

XNAV の位置計測システムを図 2-4 に示す。

XNAV における計測位置情報は、AP-L1 から基準局コントローラに取り込まれ、スペクトラム拡散 (Spread Spectrum, 以下「SS」) 通信方式の無線通信モデムを介して移動局へ送信する。基準局コントローラにはノート PC を用い、機器間のデータ通信は RS232C により、その通信

表 2-3 AP-L1 の主な仕様^{15) 30)}

自動追尾部	追尾角速度 : 10°/s 視準精度 : ±2' (角速度 10°/s の時) 使用レーザ : LED レーザ (クラス 1)
測 距 部	測距範囲 : 7~700m 測距精度 : ±(10mm+2ppm) 測距間隔 : 0.5 s
測 角 部	測角精度 : 3"
機能その他	標識自動探索・追尾復帰機能 (探索範囲可変), 追尾速度・測距精度可変, データ通信 : RS232C, 無線モデム有

(注) 表中仕様は移動体を自動追尾・測距することを前提とした場合のもの。

や処理のプログラムは C 言語により作成した。無線通信モデムには SS 通信機 (株) クラリオン製, JX-1100A) を用いた。

XNAV の位置計測システムにおける移動局はロボット車両 (トラクタ) に搭載された光反射標識と位置情報を受信する SS 通信機 JX-1100A, 及び車両上コントローラとなる。

3) 位置計測性能

AP-L1 単体の位置計測精度は、製品の公称精度として移動体が 500m 程度離れて誤差 2 cm 以下とされる。XNAV の位置計測システムでは、基準局の AP-L1 から移動局へのデータ通信に約 0.2 秒の時間を要しており、トラクタが速度約 0.5m/s で走行する場合、車両上での取得位置情報の誤差は最大 12cm 程度になる。しかし、トラクタは速度一定で走行、作業する 경우가多く、この時間遅れに起因する誤差は位置情報の時間当たり変化つまり走行速度から補正可能であり、0.1s 毎の速度と方位情報に基づくデッドレコニングにより 5 cm 程度の誤差がキャンセルされ、XNAV の位置計測誤差はほぼ 5 cm 以下と評価できる。位置情報の計測周期は製品の仕様値として平均 0.5s である。

XNAV の適用範囲は、AP-L1 の自動追尾と測距の可能距離、あるいは計測位置情報の無線通信距離により決定される。1.0m/s 程度までの速度で走行するトラクタの位置計測に適用して、見通しが良ければ、自動追尾、位置計測、及びデータ通信が約 500m 離れて行えることを予

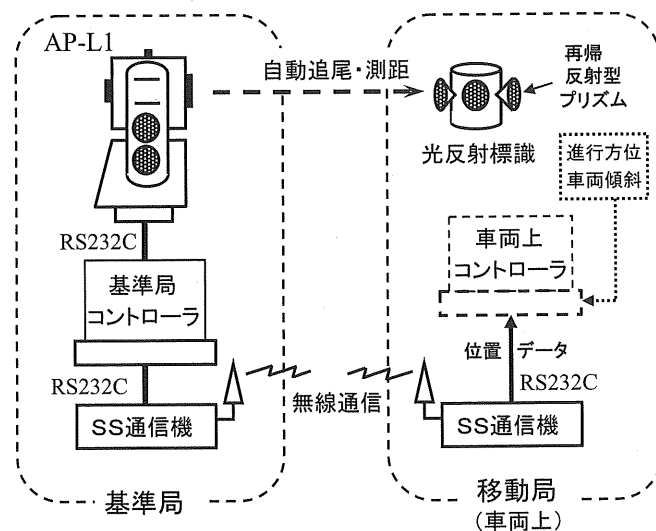


図 2-4 XNAV の位置計測システム¹⁵⁾

備試験で確認した。

下記の進行方位情報も含む航法システムXNAVとして、ロボットの無人走行に適用した場合の航法の精度については、第5章で述べる。

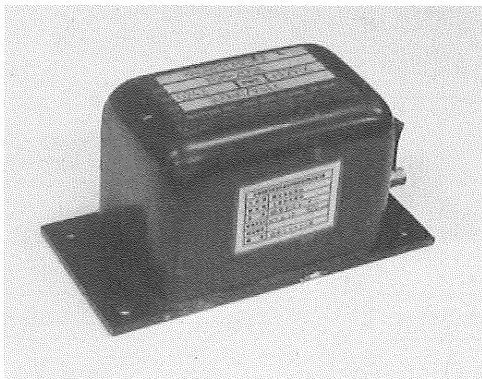
2. 3. 2 XNAVの構成

1) 進行方位情報の計測

XNAVをロボットの航法システムとして適用する場合には、進行方位情報は内界情報方式の既存センサをロボットに搭載・計測することとし、既存センサの候補としてはジャイロセンサやTMSがあげられた。2.2項の表2-2に示した進行方位情報の目標検出精度 0.3° を確保でき、後述する車両の傾斜による誤差補正を行うことを前提とすると、ジャイロセンサには光ファイバージャイロFOGをベースとするもの、TMSではフラックスゲート・タイプの3次元型のものが適当と考えられ、市販のセンサを調査した。

FOGベースのものとして、日本航空電子工業(株)製の型式名JCS7401なる慣性計測装置IMUがある。IMUは車両の進行方位角であるヨー角とともに車両の傾斜であるロール角とピッチ角も計測可能で、計測位置情報の傾斜による誤差の補正もIMUの出力から行うことが可能である。TMSでは、米国ワトソン社製の型式名FGM-200A(図2-5)が3次元のTMSとして利用可能である。ただし、同センサには傾斜を計測する機能はない。

IMUが計測できる進行方位情報はヨー角の変化であり、計測される相対的な方位角変化にはドリフト誤差を含む特性がある。そのため、ロボット作業のための航法情報として用いるためには、現在の進行方位を位置情報の変



(W45×L70×H48mm)

図2-5 ワトソン社製3次元TMS

化から求めて、定期的に基準方位の設定を行うとともにドリフト誤差のキャンセルを行う必要がある。

ワトソン社製のTMSは、その3次元の地磁気成分出力から車両の進行方位を絶対的な磁方位角として求めることができる。そのため、取得される進行方位情報の取扱いが容易であるという利点はあるが、高精度な方位情報検出には、搭載車両の着磁状態や傾斜による誤差の補正を行う必要がある。

IMUとTMSそれぞれ長所、短所はあるが、TMSにより計測される進行方位情報が絶対的な磁方位角でありデータの取扱いが容易である点、また、TMSを用いた農用車両の進行方位計測に関しては、高精度化のための補正方法も含め生研センターは多くの知見を持っていたことから、TMSを進行方位情報の計測に用いることとした。

2) TMSによる方位計測における誤差補正

TMSをロボットに搭載して方位計測を行う場合、①ロボットが持つ磁気の影響、②ロボットの傾斜の影響、③周囲の構造物や他の車両等の影響により誤差を生じる。TMSによりロボットの進行方位情報を高精度に取得するためには、これらの誤差を補正する必要がある³⁰⁾。

①のロボットが持つ磁気の影響の補正は「磁気環境補正」と呼んでおり、ロボット自身の磁気がTMS検出方位に及ぼす影響量を計測して、その影響量(「磁気環境補正值」)をキャンセルすることにより誤差の補正が行える。その補正值の計測では、TMSを搭載したロボットを、周囲に強い磁気が存在しない平坦な場所で 360° 旋回して行う方法が基本であるが、簡易な方法として、ロボットを正反対方向の 180° 向きが異なる2方向に向けてTMS出力を計測することによっても求めることができる。

前記②のロボットの傾斜による影響の補正は「傾斜補正」と呼んでおり、ロボットつまりTMSの傾斜角に基づいて、TMSの3次元出力に空間座標の回転変換を施し、幾何学的にロボット上のTMSが水平の時の方位角を求めることによって行われる。本補正では、TMSを搭載したロボットの傾斜角(ロール角、ピッチ角)を高精度に計測することが重要である。

TMSにより方位計測を行う場合の、前記③の周囲の構造物や他の車両の影響については、ロボットの位置により影響の大きさが異なり、その影響の大きさをロボット

が作業する区画内のすべての場所で計測、または推定することは困難である。そのため、ロボットの作業区画の近く 10m 程度以内に大きな構造物がある場合や 5m 程度以内に他の車両が存在する場合は、その付近でロボット作業の精度、特に直進作業の精度が低下する可能性があることを考慮する必要がある。

以上の補正を施した TMS による進行方位情報の計測誤差については、試験結果から、ロボットの走行時において $0.3\sim 0.5^\circ$ と推定され、目標仕様の 0.3° より若干精度が低下する可能性がある性能である。

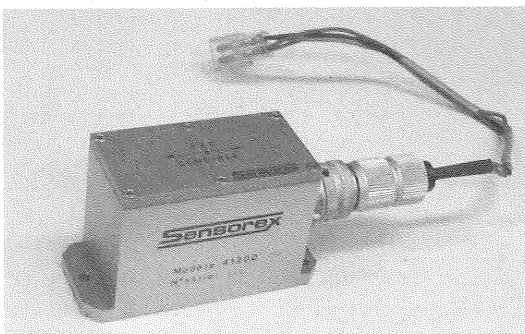
3) 傾斜角の計測

上記の TMS 出力の傾斜補正を行うためには、ロボットの傾斜角を計測する必要がある。また、XNAV における位置計測のターゲットである光反射標識はロボットの最高点である地上高 2.2m に装備されており、ロボットの傾斜が大きい場合には、XNAV の計測位置を地上面に落とした場合の位置誤差も大きいものとなり、例えば傾斜角 3° で位置誤差は約 12cm となる。このため、XNAV による計測位置情報に対しても、ロボットの傾斜による補正を行う必要がある。

ロボットの傾斜角の計測については、トラクタの振動や比較的低周波数の揺動の影響を受けにくいセンサとして、サーボ型の傾斜センサ（フランスのセンソレックス社製、Model41200）をロール方向とピッチ方向に 2 個装備して計測を行うこととした。用いた傾斜センサを図 2-6 に示す。

4) XNAV の出力情報

XNAV では、ほ場外の基準局で計測された位置情報が



(W 35×L 67×H 50mm)

図 2-6 ロボットに装備した傾斜センサ

ロボットに無線送信される。その送信情報は、位置計測システムの AP-L1 が計測したロボット上の光反射標識の位置情報であり、その形式は 3 次元の XYZ 座標値として、単位 m、小数点以下 3 桁までのテキストデータである。この XYZ 座標値と基準局コントローラであるノート PC のタイマ値としての位置情報計測時間が単位 s、小数点以下 3 桁までのテキストデータで基準局コントローラからロボットへ無線通信される。AP-L1 による計測位置の更新周期は仕様上 0.5s となっているが、実際の計測ではその周期は一定でなく、概ね $0.4\sim 0.6s$ の範囲である。

航法システム XNAV では、ロボットの進行方位情報は上記 1) のとおりロボットに搭載した TMS から出力され、航法情報の傾斜補正を行う際に必要なロボットの傾斜情報とともにロボットのコントローラに取り込まれる。この部分は図 2-4 の移動局における点線部である。

TMS 出力と傾斜センサ出力はいずれも $\pm 5V$ のアナログ電圧値であり、TMS の 3 次元の地磁気成分に対応する電圧値出力 3 ch と傾斜センサ 2 個の電圧値出力 2 ch が、ロボットのコントローラに装備した AD 変換ボードを介して計測される。計測電圧値に基づく車両進行方位と車両傾斜の演算はコントローラに組み込んだソフトウェアにより行われ、同時に、取得位置情報の傾斜補正がロボットのコントローラが受信した位置情報に対して実施される。

2. 4 XNAV 以外の航法システム

ロボット作業に適用する航法システムの開発では、外部標識方式の XNAV だけでなく、下記 2 方式の航法システムも、農林水産省の農業機械等緊急開発事業の下、それぞれ (株)クボタと日本航空電子工業 (株) が中心となって開発を行った。

- (i) ほ場周囲に電線を敷設するオフ・ザ・ワイヤ電磁誘導方式 (以下、「LNAV」と呼ぶ)
- (ii) 慣性航法装置を併用した GPS 方式 (以下、「SNAV」と呼ぶ)

これらの航法システムについては、ロボット作業を行うための作業ソフトを開発して、第 5 章で述べるロボット作業の性能評価まで行った。しかし、ロボットの位置計測方法や作業方法などに違いがあることから、それらの仕様や構成、試験結果に関する内容は本報告に含めな

かった。

なお、航法システム LNAV は、ほ場周囲に構造物や障害物などがあっても適用可能であり、また降雨や降雪、霧といった気象条件による影響をほとんど受けないというメリットがある。SNAV は、GPS を基幹とする航法システムとして、GPS の低価格化や補正情報サービスの充実などの今後の動向によっては、最も有望な航法システムになり得ると考えられ、適用場面や今後の技術動向などにより、航法システムの方式や構成は1つに限定されるものではない。

2. 5 ロボット車両の開発

本項では、ロボットのベース車両であるトラクタと、その各部の自動制御、計測を行うシステムの構成や仕様について述べる¹⁶⁾。以下、各部の改造や各種機器・コントローラの装備などによりロボット作業が行えるようにした車両部分を「ロボット車両」と呼ぶ。

2. 5. 1 ベース車両

ロボットの性能目標は「有人運転の場合と同程度の能率、精度で作業が行える」であり、ロボットのプラットフォームとなるベース車両は市販のトラクタと同等の作業性能を有する必要がある。当初、航法システムなどの各種装置、機器の搭載や装備を前提とし、各部の制御性などが優れたロボット専用の車両システムを新たに開発、適用することを検討した。しかし、作業ほ場までの移動では、公道走行における安全確保から有人運転を行う必要があり、また、トラブル発生時には有人運転作業により作業を継続できることも必要である。さらに、「有人運転の場合と同程度の能率、精度で作業が行える」車両システムの新規開発にはコストと時間がかかることも考慮して、既存の市販トラクタをベースに各部を自動制御できるように改造し、ロボット車両を開発した。

ベース車両には、機関出力 24.3kW のトラクタ「クボタ GL321」((株)クボタ製)を選定し、作業機は作業幅 170cm のロータリ耕うん作業機を装備した。表 2-4 にクボタ GL321 の主な仕様を、図 2-7 に開発したロボット車両を示す。

ベース車両は、クラッチ操作なしで前進・後進/停止の変速が行える「シャトル変速」機構や、約 40° 以上の

操舵による旋回時に前輪が増速される旋回時前輪増速機構(通称「倍速ターン」機構)、作業機のワンタッチ昇降機構、作業機の自動耕深・水平調整機能などを有しており、自動制御を行うために装備する制御装置・機器の構成等を簡素化することが可能であった。

2. 5. 2 ロボット車両の計測・制御システム

ロボット車両の製作では、上記の市販トラクタの操舵機構やシャトル変速、スロットル、作業機昇降などの操作機構に DC モータなどのアクチュエータを装備し、コントローラからの信号により各操作機構の運転・操作を自動制御できるように改造を施した。また、各操作機構の状態や燃料残量、冷却水温度などのロボット各部の状態・状況をコントローラによりデジタル計測できるように、トラクタの既設センサや新たに装備したセンサの出力を自動計測するシステムを構成し、ロボット車両に装備した。これらの制御・計測の対象と制御方法、適用センサなどの概要を表 2-5、表 2-6 に、また、2.6 項で述べるコントローラを含めた計測・制御のブロック図を

表 2-4 ベース車両「クボタ GL321」の主な仕様^{16) 30)}

型式	クボタ GL321
形式	前2輪操舵, 4輪駆動
機関出力	24.3kW / 2800 rpm
車両単体の寸法等	全長 3180×全幅 1455×全高 1985 mm 輪距(最小): 前輪 1130×後輪 1110 mm 軸距: 1750 mm 機体質量: 1280 kg
付属装備	作業機耕深・水平自動制御, 旋回時前輪増速機構, パワーシフト変速機構など

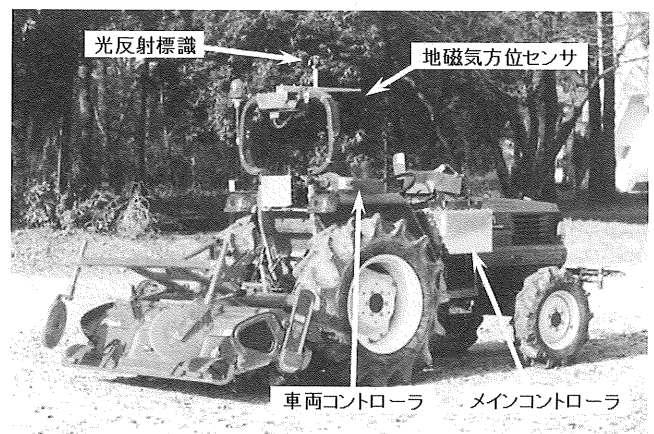


図 2-7 開発したロボット車両^{16) 30)}

図 2-8 に示す。

1) 各部の自動制御

操舵機構の制御では、ステアリングホイールの回転を伝えるステアリング軸の途中を切断し、切断部に電磁クラッチと DC サーボモータ及びギヤ機構を組み込んで、DC サーボモータによる自動操舵と手動操舵を電磁クラッチのスイッチ切り替えにより行えるようにした。自動操舵においては、コントローラからの舵角信号に基づき確実な制御が行われるように、操舵角をピットマンアームに装備したポテンシオメータにより計測してフィードバック制御を行った。そのフィードバック制御では、舵角に応じた操舵角速度の制御として目標舵角付近で操舵角速度を小さくする制御を適用し、目標舵角付近でのハンチングの発生を抑える等、円滑な自動操舵が行われるようにした。また、停止状態ではは場面とタイヤ間の抵抗が大きく、操舵用モータのトルクでは目標の操舵角が得られない場合があったため、ロボット停止状態での自動操舵は極力避けるようにした。

前進・後進/停止を切り替えるシャトル変速の制御では、変速軸を切断して変速機構側の軸端に電動シリンダを装備、操作側の軸端にスイッチを装備して、手動操作も電動シリンダの作動により行われるようにした。電動シリンダによる変速制御では、変速軸の前進・後進位置

表 2-5 ロボット車両の制御対象等¹⁶⁾

制御対象	制御方法
操舵機構	DC サーボモータ位置制御
スロットル	DC モータ 2 位置制御
シャトル変速	DC 電動シリンダ位置制御
左右ブレーキ	油圧当て止め ON/OFF 制御
作業機昇降装置	昇降スイッチ電気信号制御
燃料カット	ソレノイド制御

表 2-6 ロボット車両の計測対象等¹⁶⁾

計測対象	計測部位、適用センサ
舵角	ピットマンアーム、ポテンシオメータ
変速位置	シャトル変速軸、リミットスイッチ
作業機位置	3P ロアーリンク、ポテンシオメータ
機関回転数	オルタネータ P 端子パルス、パルスカウンタ
PTO の入/切	PTO ギヤシフト、リミットスイッチ
油圧レバー位置	レバー回転軸、ポテンシオメータ
燃料残量	燃料ゲージ、ポテンシオメータ
冷却水温度	冷却水温、水温センサ

にリミットスイッチを装備して、確実な変速操作が行われるようにフィードバック制御を適用した。

スロットルの制御では、スロットル操作機構に DC モータを組み込み、手動により設定したパートスロットルとフルスロットルとの 2 位置の自動制御が行えるように

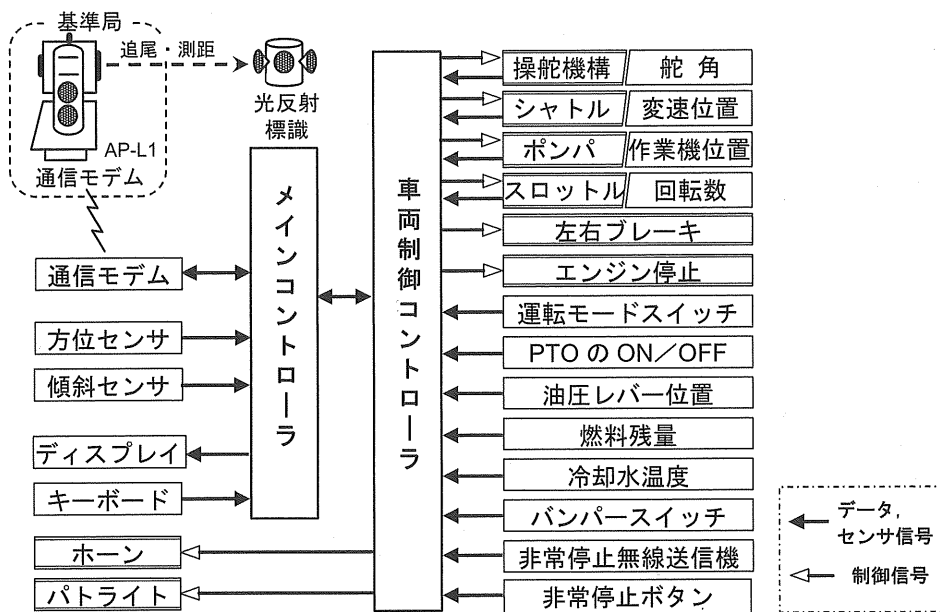


図 2-8 ロボット車両の計測・制御システム

した。2位置制御については、トラクタ作業では作業時のフルスロット運転と空走時の設定パートスロットル運転が多いことを前提に、制御システムを簡素化することを考慮して適用した。

ブレーキの制御は、左/右車輪のブレーキ・ロッドに油圧シリンダを装備し、左右別々にブレーキの ON/OFF が行えるようにした。作業機の昇降は、ポジションレバーによる作業時位置の設定を手動により行った上で、上げ/下げの制御を、ワンタッチ昇降機構の電気スイッチ操作をコントローラに取り込むことによって行えるようにした。

2) 各部の状態計測

ロボット車両の計測対象と計測部位、適用センサは表 2-6 のとおりであり、上記のフィードバック制御を行うための状態検出のほか、第4章で述べるロボット作業前の自己診断や作業中の異常時対応の機能を充実するために、多岐にわたって状態計測、検出が行えるようにした。

これらの状態計測では、多くはトラクタに既設のセンサの出力をコントローラに取り込み、コントローラのデジタル入力機能や AD 変換機能等により出力値の計測を行った。舵角やシャトル変速位置、PTO の ON/OFF は、ポテンショメータやリミットスイッチを新規に装備して、それらの状態計測を行った。

状態計測におけるセンサ出力の判断基準値の設定では、各部の状態・状況を実際に作って、その時のセンサ出力をモニタして行ったが、判断基準値の設定は、センサ取り付け部のズレやセンサの出力特性の経年変化があるため、定期的に行う必要がある。

2.6 コントローラ

本項では、ロボット車両に搭載・装備して作業ソフトの実行などを行うコントローラの構成や仕様などについて述べる。

コントローラは、航法情報やロボット各部の状態などの各種内界情報を取り込み、経路計画を行い、各部の制御値を状況に応じて決定してロボット各部の制御を行う。図 2-8 に示したように、コントローラはメインコントローラと車両制御コントローラの2つにより構成した。

メインコントローラには、作業ソフトの書換えや入替

えが容易で、多様な入出力信号に適応可能なように、かつ耐環境性や耐久性を考慮して、拡張スロットを内蔵したファクトリコンピュータ (NEC 製 FC9821Ka) を適用した。拡張ボードには A/D 変換ボードやシリアル通信ボードなどを用い、主に航法システムからのデータ入力に使用した。また、作業開始前の各種設定や自己診断、異常時対応などではオペレータとのインターフェースが必要であり、ディスプレイやキーボードを収納可能な形で装備した (図 2-9)。

車両制御コントローラには CPU の動作周波数 10MHz のものを用い、モータや油圧電磁弁、リレーなどの制御出力の他、多岐にわたる状態検出を行うために、A/D 変換入力やシリアル通信 (RS232C) などの各種入出力を数チャンネル持ったものとした。この車両制御コントロー

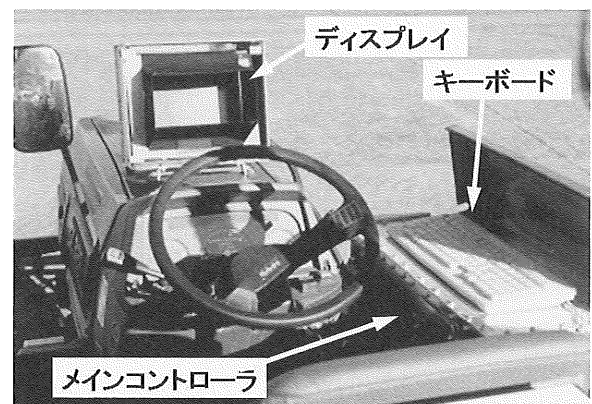
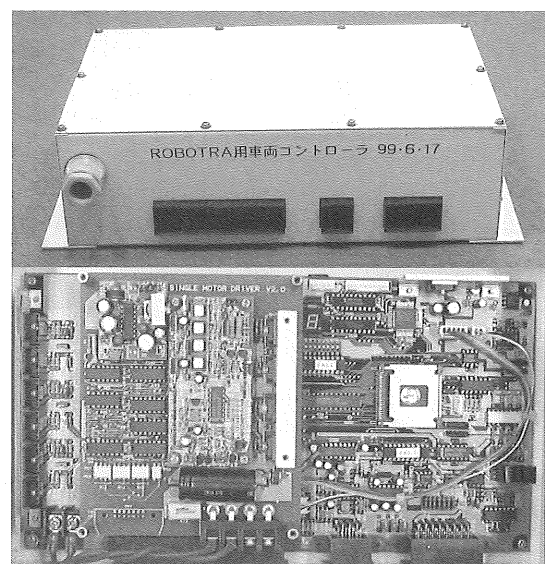


図 2-9 メインコントローラのディスプレイとキーボード¹⁶⁾



(ボード : 150×280mm)

図 2-10 車両制御コントローラ

ラは(株)クボタがロボット車両専用に製作したものであり、その外観とボードを図 2-10 に、主な仕様を表 2-7 に示す。

表 2-7 車両制御コントローラの主な仕様

CPU	H8/532 (10MHz)
A/D 変換	8ch
割り込み	タイマ, ウォッチドッグ, RS232C, ラジコン(NMI)
シリアル通信	RS232C 1ポート
PWMポート	モータドライバ(FET) 3ch使用
その他	外部パルスカウンタ 2ch使用, 電源 DC12V

2. 7 安全装備と電源装置他

ロボット作業時の作業安全を確保する機能として、障害物への接触時に非常停止する機能などを備えた。ロボット車両前部に装備したバンパースイッチが障害物に接触すると非常停止機構が動作して停止する他、携帯型の無線送信機のスイッチや、左右フェンダに装備したボタンスイッチにより非常停止が行われる。非常停止機構は、車両制御コントローラにこれらのスイッチの ON 情報が入力されると、スロットル下げ→機関燃料カット→左右ブレーキ ON→シャトル変速中立のシーケンスが瞬時に実行されるよう構成した。ロボット車両に装備したバンパースイッチやボタンスイッチ、非常停止無線送信機を図 2-11 の(a)~(c)に示す。

この他、第 4 章の 4.4 項で述べるロボット作業中の異常時対応として、位置情報が設定した作業区画外となった場合など、事故や暴走につながる可能性がある場合には非常停止する機能を持たせた。

ロボット車両に搭載・装備したコントローラや各種センサなどの機器の電源については、ベース車両の DC12V バッテリから得るようにした。そのために、搭載・装備機器をすべて DC 電源で駆動できるものとするとともに、非常停止時などに搭載機器の電源を落とす必要がなく、また機関始動時に一時的に電圧低下がないように、10分

程度のバックアップ用バッテリーを有する専用の電源装置を製作、装備した。電源装置は日本航空電子工業(株)の協力を得て製作した。

本章で述べたロボット車両各部の制御や計測、安全の本章で述べたロボット車両各部の制御や計測、安全のための装備や搭載機器類については、それらの装備、搭載にあたって、防塵、防水、及び防振対策を施すとともに、コントローラなどの収納ボックスには冷却ファンも装備した。ロボット車両の耐環境性や耐久性に関しては、1997年12月に最終版のロボット車両を製作してから13年、約120ha、700時間以上の作業試験やデモンストラーションを行って、搭載・装備機器に大きなトラブルや故障はなく、メインコントローラに装備した拡張ボードに不具合が生じて交換したことが主な保守であった。

2. 8 摘要

ロボットに適用する航法システムの仕様や性能について、トラクタ作業の特徴などの観点から検討し、その目

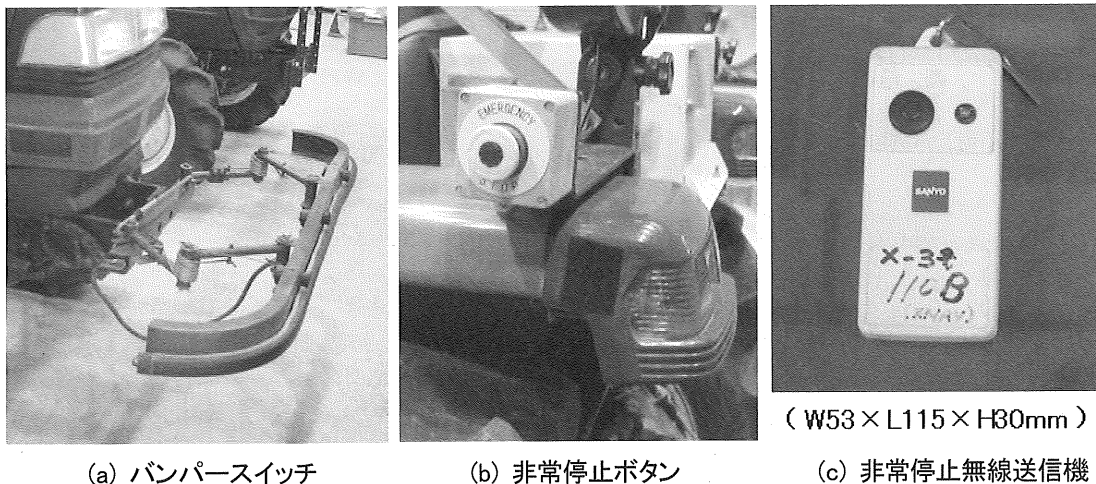


図 2-11 ロボット車両の非常停止用スイッチ等

標を示した。次に、ロボットに適用すべく開発した外部標識方式の航法システムの仕様や特徴などを述べた。また、ロボット作業を行うハードウェアとしてのロボット車両について、ベースである市販トラクタの各部の自動制御や計測を行うシステムと、その制御・計測や航法情報の取得・処理、ロボット作業のための作業ソフトの実行を行うコントローラの構成や仕様などを述べた。

(1) 各種方式の航法システムをトラクタの無人作業に適用する場合の適否や留意点を検討するとともに、ロボットに適用する航法システムの目標仕様、性能を検討、設定した。その目標を満足する既存航法システムは見あたらず、位置情報検出を外部標識方式により行い、進行方位情報は内部情報方式により計測する航法システムを、新規に開発することとした。

(2) 外部標識方式トラバース式の航法システム XNAV は、市販の自動追尾型トータルステーション AP-L1 をほ場外の定点に設置して位置情報を計測する基準局装置として用いたもので、500m 程度まで離れて移動体の位置を誤差 5 cm 以下、計測周期 0.5s で計測できる性能が確認された。

(3) 航法システム XNAV では、位置情報の計測を AP-L1 により行い、進行方位情報は地磁気方位センサ (TMS) をロボットに搭載して計測するシステムとした。また、計測位置情報と TMS 出力に対して、ロボットの傾斜による誤差の補正を行うために傾斜センサを搭載・使用した。

(4) XNAV の基準局で計測された位置情報は無線通信に

より車両上コントローラに送信され、TMS と傾斜センサの出力は車両上コントローラに AD 変換ボードを介して取り込まれる。TMS による進行方位情報の計測精度は、ロボットの走行時において $0.3\sim 0.5^\circ$ と推定された。

(5) ロボット車両の自動制御システムは、市販トラクタのクボタ GL321 をベースに、その操舵機構やシャトル変速、スロットル、作業機昇降などの操作機構に DC モータ等のアクチュエータを装備し、コントローラからの信号により自動制御できるように構成した。

(6) 各操作機構の状態や燃料残量、冷却水温度など各部の状態・状況をコントローラによりデジタル計測できるように、トラクタに既設のセンサや新たに装備したセンサの出力を自動計測するシステムを構成した。

(7) 主に航法情報を入力し作業ソフトの実行を行うメインコントローラには NEC 製のファクトリコンピュータを用い、各部の自動制御・計測のための車両制御コントローラには (株)クボタが新規に製作したものをを用いた。

(8) 安全装備として、障害物接触時や遠隔操作、作業ソフトによる異常検出によって非常停止する機能を装備した。

(9) これらロボット車両各部の制御や計測、安全のための機器の装備、及びコントローラ等の搭載・装備にあたっては耐環境性や耐久性を考慮した。製作してから 13 年、多くの作業試験やデモンストレーションを行って、ロボット車両に大きな故障やトラブルは起きていない。

第3章 ロボット作業と作業ソフトの基本

本章では、ロボット作業の方法とそれを実行するソフトウェア（「作業ソフト」と呼ぶ）の構成や内容を中心に論じる。作業ソフトは、ロボットのメインコントローラに組み込み、ロボット作業の方法をその手順にそって実行するコンピュータ・プログラムであり、第2章で述べたロボットの航法システムやロボット車両、コントローラのハードウェアを目的に合わせて効率よく動作、機能させるために不可欠なものである。

まず、第1章の1.3項に概要を記したロボット作業の方法や条件を述べ、次にロボット作業の経路設定と作業区画情報の取得に関する方法について述べる。作業ソフトの構成や内容、実行される走行・作業制御については、慣行のロータリ耕うん作業に準じた「標準作業法」に関するものを前報で詳述したが、標準作業法及びそれを実行する「標準作業ソフト」は、本報告の第4章、6章で述べる新しい作業法などのベースとなっているので、作業ソフトの基本としてあらためて記述する。

ロボットによる作業または無人作業は、以降、特に断らない限り「ロボット作業」という。

3.1 ロボット作業の方法

3.1.1 対象作業やほ場の条件

1.3項で述べた本研究の目標や範囲と重複する部分もあるが、以下に論じる作業ソフトの構成や内容の前提となるロボット作業の対象や条件について述べる。

対象とする作業は、まず、作業の方法や経路の点で他のトラクタ作業や農用車両作業と共通点が多いロータリ耕うん作業を選んだ。対象とするほ場は、比較的規模の大きい水田や畑を前提に、ほぼ水平で矩形のほ場とし、短辺側にほ場の出入りがあることを前提とした。

また、ロボット作業の条件として以下を設けた。

- (i) 機械置き場などから作業ほ場へのロボットの移動は、オペレータが手動運転して行う。または、有人運転のトラクタや運搬車等によりけん引して移動する。
- (ii) 航法システム XNAV の基準局は作業ほ場から遠くない定点に設置してあり、作業前に、その起動や初期設定を行う。

- (iii) オペレータは、作業途中で資材等の補給を行うことが必要な場合を除き、ロボット作業を開始した後はロボット作業に関与する必要がないこととする。ただし、作業中の異常時対応や人がほ場内に入ることなどを防止するため、オペレータは作業ほ場から遠くない場所においてロボット作業を監視しつつ、別作業を行うことを想定する。

3.1.2 ロボット作業—標準作業法

第2章で記したように、ロボットは市販トラクタをベースとしたものであり、作業機も市販のロータリ耕うん作業機を用いている。さらに適用する航法システム XNAV がロボットのほ場内位置情報と進行方位情報を時々刻々得られる航法システムであり、自由度の高い経路設定とその経路に沿う高精度な車両誘導を行うことができる。これらから、ロボットによるロータリ耕作業は、有人運転による慣行のロータリ耕に準じた作業方法で行うことが適当、かつ有効と考えられた。また、慣行のロータリ耕における作業の経路は、他のトラクタ作業における経路と共通する部分も多く、他作業への展開が行い易いことから、ロボット作業の経路も慣行作業の経路と同様なものとするのが適当と考えられる。

これらの理由から、ロボットによるロータリ耕は、まず矩形区画の周辺部分を除く中央付近を長辺方向に往復作業し、その後、枕地部分を含めた周辺部分を周り作業して、区画全面のロータリ耕を行う方法を採用した。

この作業方法を「標準作業法」と呼び、その標準作業法を実行するための作業ソフトを「標準作業ソフト」と呼ぶ。

3.1.3 作業の手順

XNAV を用いてロボット作業を行う場合の手順は以下とした²²⁾。

- (i) オペレータがロボットを手動運転して、ほ場の出入口からロボットをほ場内に移動する。ロボットは、出入口に近い位置に長辺方向に向けた状態で停止する。
- (ii) XNAV の基準局の起動、初期設定を行う。XNAV

基準局の起動, 初期設定の手順は第4章の4. 4. 2項に記述する。

- (iii) ロボット上のメインコントローラを起動し, 作業ソフトを立ち上げる。
- (iv) その区画で初めてロボット作業を行う場合は, ロボット作業のための作業区画情報を取得・設定する「ティーチング」を行う。既に作業区画情報を取得・設定済みの場合は, コントローラに保存されている情報を下記(v)において読み込む。
ティーチングの内容等は3. 2. 3項と3. 4. 1項に記述する。
- (v) 作業ソフトの実行によるディスプレイ表示に従って, 作業区画情報の読み込みや作業条件の設定, ロボット各部の設定などを行った後, ロボット作業を開始する。
- (vi) ロボット作業が行われている間, オペレータは作業ほ場から遠くない場所で別作業などを行いながら, 時々ロボット作業の監視を行う。
- (vii) ロボット作業が完了したら, オペレータがロボットに乗り込んで終了処理を行い, ほ場外へ手動運転により移動する。

3. 2 作業経路と作業区画情報の取得

3. 2. 1 作業区画の位置座標系と方位情報

XNAV を用いる場合, その基準局装置 AP-L1 の設定により, ロボット上に設けた移動局標識の位置座標系の原点や座標軸の方向は任意に設定することが可能である。ロボット作業を行う矩形区画の座標系については, 長辺方向が座標系の X 軸と平行に, 短辺方向が Y 軸と平行になるよう XNAV の設定を行うこととした。

また, 座標系の原点は XNAV 基準局から遠い側の長辺上またはその付近に設け, X 座標のプラス方向は XNAV 基準局から見て右側方向, Y 座標のプラス方向は XNAV 基準局から見て左側, 手前側方向になるように設定した (図 3-1)。なお, XNAV の座標系の設定は, 基準局装置 AP-L1 が測量装置であり, 測量において用いられる座標軸やその方向に合わせて設定したものである。

ロボットの進行方位情報のとり方については, 地磁気方位センサ TMS により方位を取得しているため, 磁北を 0° , 時計回りに東が $+90^\circ$, 南が $+180^\circ$, 反時計回り

に西が -90° , 南が -180° なる方位値を設定した。

3. 2. 2 作業経路の構成・設定

慣行作業における作業経路と同様な経路として, 図 3-2 の作業経路を構成, 設定した。ほ場の出入口に近い角部をロボットの作業前の停止位置とし, その場所をロボット作業の開始位置として, 往復作業の開始位置までの空走経路 1, 枕地における 180° 旋回を含む長辺方向の往復作業経路 1 ~ N_c , 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, 及びほ場角部での 90° 旋回を含む周り作業経路 11 ~, 21 ~, 31 ~ から, ロボットの作業経路を構成した^{15) 23)}。

空走, 旋回を含む往復作業, 周り作業のいずれにおいても, 作業機を含むロボットが作業区画からはみ出さないことを前提として, ロボットの先端から後部に装着しているロータリ耕作業機の後端までの長さが約 4m あり, 往復作業における枕地の長さは 4m 以上が必要である。

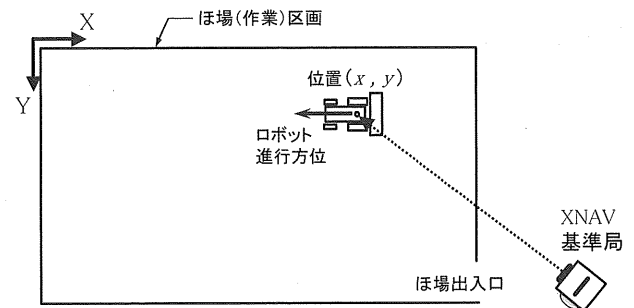


図 3-1 ロボットの作業区画と航法システムXNAVの座標系

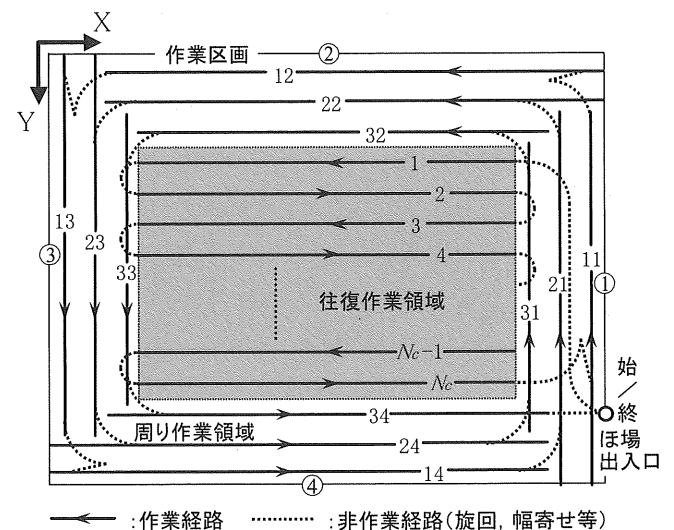


図 3-2 ロボットの作業経路^{15) 23)}

その400cmを超える枕地の処理には、適用したロータリ耕作機機の作業幅が170cmであるので、周回数3（ $(170\text{cm}-\text{重複 } 15\text{cm}) \times 3 = 465\text{cm} > 400\text{cm}$ ）の周り作業が必要となる。ロータリ耕の隣接行程間の作業重複幅については、XNAVの航法データに基づくロボットの位置決め精度が±5cm以内と想定し、ロータリ耕作機機の作業幅170cmに対して、往復作業時が10cm、周り作業時が15cmを確保することとした。周り作業時の重複幅を大きめに設定したのは、先に行う往復作業における180°旋回や切返し、幅寄せにより枕地のほ場面が荒れていることを想定したためである。

この作業経路の構成、設定においては、実際の作業経路の最終終了位置となる3周目の周り作業の終了位置をほ場の出入口付近として、作業重複幅が15cmとなる3周の周り作業経路を作業区画の外周位置を基準として設定し、その周り作業領域を作業区画全体から差し引いた領域を往復作業領域とすることとした。3周目の周り作業の終了位置をほ場の出入口付近としたのは、作業終了位置からロボットをほ場外へ移動する際の移動距離を短くするためである。

この作業経路の設定方法では、周り作業領域を作業区画全体から差し引いた往復作業領域を、作業重複をどのように振り分けて往復作業を行うかについてはいくつかの選択肢が考えられる。その選択肢と往復作業行程の経路設定方法は第4章の4.1項に記述する。

3. 2. 3 作業区画情報の取得・記録（ティーチング）

前項の作業経路を構成・設定し、また作業経路上のロボット作業を行うためには、作業区画の大きさや向き等の情報を得る必要があり、XNAVを適用した作業では、作業区画4辺のXNAV座標系の位置情報と、区画4辺に平行な方向の情報を取得する。その方向の情報は往復作業や周り作業におけるロボット作業の基準方向となる²⁶⁾。

この作業区画に関する情報を取得、記録する手順を、ロボットへの作業区画情報の「ティーチング」と呼んでおり、最外周の周り作業経路（図3-2の11→12→13→14）上を、ロボットをマニュアル運転により一周する間に必要な情報を取得して、ティーチングを行うこととした。そのマニュアル運転による一周走行を「ティーチン

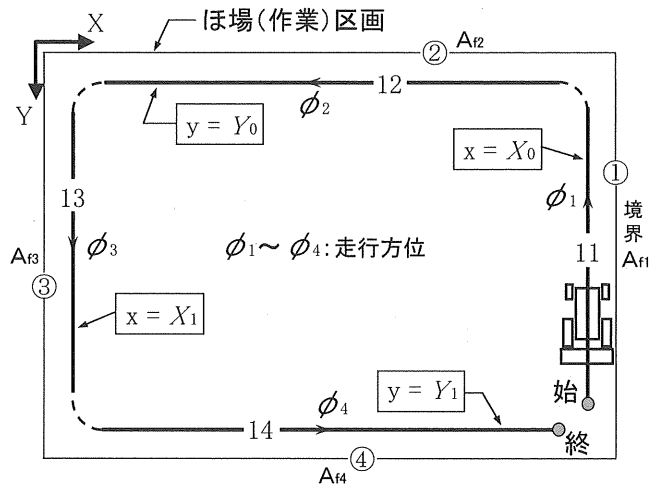


図3-3 ティーチング走行経路と取得・記録情報

グ走行」と呼ぶ。

実際には、3.2.1項で記したように、矩形区画の長辺方向が座標系のX軸と平行、短辺方向がY軸と平行になるようにXNAVを設定した上で、ティーチング走行における各辺に沿う走行中に、XNAVの位置情報とTMSの進行方位情報を相当数サンプリングして、その平均値から作業区画情報を取得、記録する。このティーチングのための走行経路と取得・記録情報を図3-3に示す。また、ティーチングのための作業ソフトとオペレータによる手順の詳細は3.4.1項に記す。

作業区画の位置情報については、XNAVの座標系における区画4辺の位置座標が分かれば、必ずしもティーチング走行を行って取得する必要はない。しかし、区画の向きに応じた作業の基準方向に関する情報については、ティーチング走行中のTMS出力から取得する方法が、取得情報の再現性の点から、またTMSによる方位計測における磁気環境補正值の取得・更新が行えること（3.4.1項の2）に記載）から望ましいと考えられる。

ティーチングは、通常、ひとつの作業区画において初めて作業を行う前に一度行えば良い。ただし、XNAVにより計測される位置情報の座標系と作業区画の関係が変わった場合や、ロボットの着磁状態に変化が見られる場合には、改めてティーチングを行って作業区画情報の更新と磁気環境補正值の更新を行う必要がある。

3. 3 作業ソフトの構成

ロボット作業を行うための作業ソフトはコンピュータ・プログラムとしてメインコントローラに読み込み、

実行される。当初は、そのほとんどをMS-DOSベースのC言語で記述し、車両コントローラとの通信部分などの一部はアセンブラ言語により記述、作成した。その後、Windows95ベースのC言語によるものに変換した。

3. 3. 1 タスクの分割と構成

作業ソフトにより実行される作業の範囲は、作業区画の情報を取得・記録するティーチングの実施またはティーチング既実施の場合の作業区画情報の読み込みから、ロボット作業完了後の終了処理までとし、図3-4に作業ソフトの全体構成を示す³⁰⁾。作業ソフトは、ティーチングとその結果得られた作業区画情報から作業経路の設定を行う「タスク・プランニング部」と、設定された作業経路上の走行、作業を遂行する「走行・作業制御部」に分割して構成した^{15) 26)}。

タスク・プランニング部は、作業区画情報を取得しロボットに教示する「ティーチング・モジュール」、読み込まれた作業区画情報から作業経路を生成する「作業計画モジュール」から構成した。走行・作業制御部は、ほ場出入口付近の停車位置から往復作業の開始位置まで移動する「空走1モジュール」、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2モジュール」、そして枕地部分を含む区画周辺部を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、構成した。

以下に、作業ソフトの詳細とオペレータによる設定等の手順及びロボットの動作を、構成毎に示す。

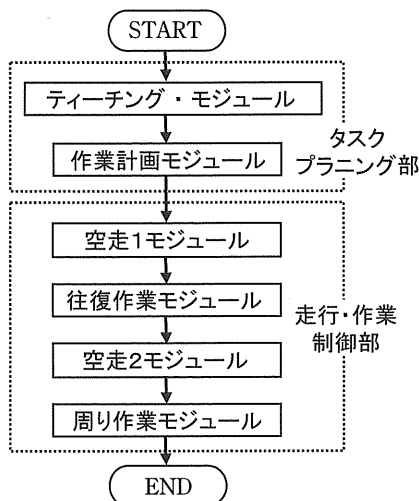


図3-4 作業ソフトの全体構成³⁰⁾

3. 4 タスク・プランニング部

3. 4. 1 ティーチング・モジュール

ティーチング・モジュールは、3.2.3項の図3-3のように、図中の「始」位置からオペレータがロボットをマニュアル運転し、矩形の作業区画の4辺①(境界 A_n)～④(境界 A_m)に沿う外周経路上を走行する間に、ロボットの位置情報と進行方位情報を計測し、作業区画情報を演算、記録するプログラム・モジュールである。

1) ティーチングの手順とソフトウェアの流れ

オペレータによる操作を含むティーチング・モジュールのフローチャートを図3-5に示す。実際のティーチングにおけるオペレータが行う手順と作業ソフトの流れ([]内)を、以下(i)～(vii)に示す。

(i) 作業ソフトを起動、ティーチングを行うモードを選択し、ティーチングの結果である作業区画情報を記録するファイル名を入力する。

[ティーチング・モジュールへ分岐、位置・方位情報の取得状態の確認、ティーチングの実施手順の表示]

(ii) ロボットをマニュアル運転し、図3-3の外周経路11上の辺①(境界 A_n)に平行な走行状態になったらティーチング情報取得開始のキー入力を行う。

[情報取得開始のキー入力を受け、第1ティーチング行程の位置・方位情報の取得・記録を開始]

(iii) 上記状態を維持して10～20m程度走行した後に、情報取得終了のキー入力を行い、次の外周経路12へ向かう。その際の走行経路は任意。

[情報取得終了のキー入力を受け、位置情報は記録値の平均を計算、方位情報は記録値を保存、次の情報取得開始のキー入力を待つ]

(iv) 外周経路12上の辺②(境界 A_m)に平行な走行状態になったら、ティーチング情報取得開始のキー入力を行う。

[情報取得開始のキー入力を受け、第2ティーチング行程の位置・方位情報の取得・記録を開始]

(v) 上記状態を維持して10～20m程度走行した後に、情報取得終了のキー入力を行い、次の外周経路13へ向かう。その際の走行経路は任意。

[情報取得終了のキー入力を受け、位置情報は記録

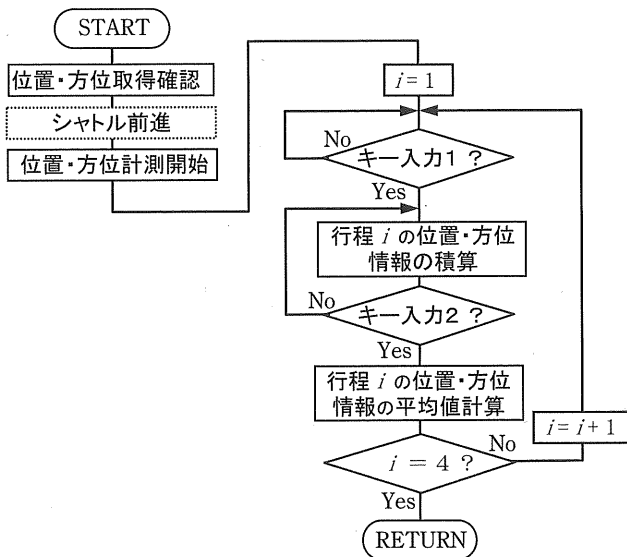


図 3-5 ティーチング・モジュールの流れ

値の平均を計算，方位情報は記録値を保存，次の情報取得開始のキー入力を待つ]

(vi) 上記(iv), (v)を，第 3，第 4 ティーチング行程に対しても行う。

(vii) 第 4 ティーチング行程での情報取得終了のキー入力後，一旦停止し，取得・演算されたティーチング・データ，つまり作業区画情報を確認し，ティーチングを終了する。

[情報取得終了のキー入力を受け，第 4 ティーチング行程のデータ処理を行った後，全取得データの処理を行って作業区画情報を算出し，その表示とファイル保存を行う]

2) ティーチングにおけるデータ取得と処理

ティーチング走行中の位置情報と方位情報の記録は，オペレータがロボット上コントローラのキー入力を行うことにより開始され，次のキー入力により終了される。

その計測・記録の周期は，位置情報が航法システム XNAV の位置情報更新周期である約 0.5s，方位情報が約 0.1s としており，ティーチング走行の必要距離，時間は，マニュアル運転による走行速度を 0.5~1.0m/s 程度として，距離 10m，または 10 秒程度行なえば十分である。そのティーチング走行は，ロボット作業の領域とその進行方位に関する情報を高精度に取得するために，最外周の作業経路上，つまり作業区画の外周辺に対し作業幅の半

分内側で外周辺に平行な経路上の直進走行をできるだけ慎重に行う必要がある。ただし，情報の記録開始のキー入力から記録終了のキー入力までの区間以外では，ティーチング走行の経路や速度は任意であり，作業区画の角部はショートカットする，また速度を上げて走行することに問題はない。

ティーチング走行中に取得・記録された位置情報については，ティーチング行程毎に平均値を求めて作業区画情報を得る。矩形の作業区画と XNAV の位置座標の座標系は，3.2.1 項で述べたように，区画の長辺，短辺方向が X 軸，Y 軸方向と平行な設定としており，ティーチング走行中の X 座標値または Y 座標値の平均値から最外周の作業経路 11~14 の位置を求める。図 3-3 に示した経路 11~14 の位置を順に $x=X_0, y=Y_0, x=X_1, y=Y_1$ とし，作業区画①(境界 A_1)~④(同 A_4)の位置を順に $x=X_{10}, y=Y_{10}, x=X_{11}, y=Y_{11}$ とすると，作業幅 $W (=170\text{cm})$ で，

$$A_{1,x} : X_{b0} = X_0 + W/2 \quad (3.1)$$

$$A_{2,y} : Y_{b0} = Y_0 - W/2 \quad (3.2)$$

$$A_{3,x} : X_{b1} = X_1 - W/2 \quad (3.3)$$

$$A_{4,y} : Y_{b1} = Y_1 + W/2 \quad (3.4)$$

となる。

なお，区画や経路，位置などを示す記号や変数の添え字の末尾に「.x」あるいは「.y」を付した。これは，座標系として X 座標値あるいは Y 座標値に係わる値を持つことを示しており，例えば，末尾に「.x」が付いている経路は X 座標値によって決定されるもので，Y 座標軸に平行な経路を表している。

一方，方位情報については，高精度取得のために TMS の磁気環境補正値をティーチング走行中に求め，その補正値による補正を行った後の方位情報から，図 3-3 に示したロボット作業の基準方位 $\phi_1 \sim \phi_4$ を求める。TMS の磁気環境補正値は TMS を搭載したロボットが持つ磁気がセンサ出力に及ぼす影響量であり，ティーチング時に互いに直角方向である 11 行程，12 行程，13 行程，14 行程を走行中に TMS 出力を取得し，その平均値から磁気環境補正値を求めた。この方法は，第 2 章の 2.3.2 項の 2) に記述した簡易な方法を，直交する 4 方向にロボットを向けた方法に拡張したものである。

3. 4. 2 作業計画モジュール

作業計画モジュールは、ティーチングにより取得、記録された作業区画情報に基づき、ロボット作業の走行・作業経路や作業開始/終了位置などを生成、設定するプログラム・モジュールである^{23) 26)}。

この作業計画モジュールで生成・設定するものは、往復作業と周り作業における作業経路の位置、及び経路上の走行と作業の開始/終了位置、作業をしない移動走行の停止位置などのイベント位置である。これらのイベント位置は、作業の開始/終了などを作業区画上の位置として設定したもので、実際のロボット作業における個々の動作の開始や終了では、航法システム XNAV の計測基準位置である光反射標識とロータリ耕作機作業部などの位置関係を考慮して、動作の開始や終了を行う必要がある。

慣行のロータリ耕作に準じた標準作業法における作業経路を図3-2に示したが、ここで一部修正した図3-6をもって、以下に、その作業経路やイベント位置の設定方法を詳述する。

1) 周り作業領域と往復作業領域

作業経路の生成、設定では、作業の終了位置である3周目の周り作業の終了位置をほ場の出入口付近として、3周の周り作業の経路をまず設定する。そして、その作業経路による周り作業領域をほ場全体から差し引いた領域を往復作業領域として、適当な重複幅で往復作業を行う行程数と経路を設定するようにした。

ロボット作業の終了位置をほ場の出入口付近としたのは、作業終了位置からほ場を出るまでの空走距離をできるだけ少なくして既作業域を荒らさないようにするためである。

作業経路を決める要素のひとつである隣接作業行程の作業重複幅については、航法システム XNAV の検出位置情報に基づくロボットの位置決め精度が±5cm 以下であることを前提に、往復作業における重複幅は10cm とした。周り作業では、往復作業における180° 旋回により路面が荒れている枕地が作業経路となるため、作業重複幅をやや大きめの15cm とした。

まず、図3-6のほ場区画①(境界 A_n)~④(同 A_m)位置を順に $x=X_{b0}$, $y=Y_{b0}$, $x=X_{b1}$, $y=Y_{b1}$ とし、3周の周り作

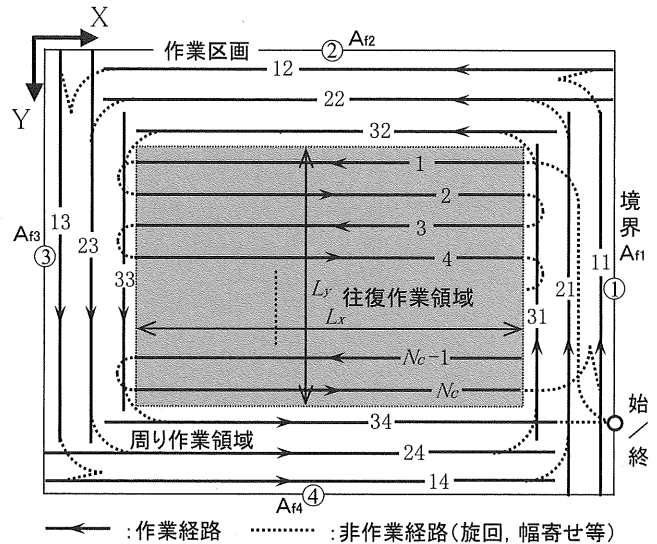


図3-6 標準作業法の作業経路^{15) 23)}

業の作業重複幅を dr ($=15\text{cm}$), 周り作業領域の内のり $A_{r1.x} \sim A_{r4.y}$ の位置を順に $x=X_{r0}$, $y=Y_{r0}$, $x=X_{r1}$, $y=Y_{r1}$, 作業幅 W として、

$$\begin{aligned} A_{r1.x} : X_{r0} &= X_{b0} - 3(W - dr) - dr \\ &= X_{b0} - 3W + 2dr \end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned} A_{r2.y} : Y_{r0} &= Y_{b0} + 3(W - dr) + dr \\ &= Y_{b0} + 3W - 2dr \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned} A_{r3.x} : X_{r1} &= X_{b1} + 3(W - dr) + dr \\ &= X_{b1} + 3W - 2dr \end{aligned} \tag{3.7}$$

$$\begin{aligned} A_{r1.y} : Y_{r1} &= Y_{b1} - 3(W - dr) - dr \\ &= Y_{b1} - 3W + 2dr \end{aligned} \tag{3.8}$$

となる。

次に、周り作業領域と往復作業領域との作業重複幅も dr ($=15\text{cm}$) として、往復作業領域の境界線(外のり) $A_{s1.x} \sim A_{s4.y}$ の位置を順に $x=X_{s0}$, $y=Y_{s0}$, $x=X_{s1}$, $y=Y_{s1}$ とすると、

$$\begin{aligned} A_{s1.x} : X_{s0} &= X_{b0} - 3W + 3dr \\ &= X_{b0} - 3(W - dr) \end{aligned} \tag{3.9}$$

$$\begin{aligned} A_{s2.y} : Y_{s0} &= Y_{b0} + 3W - 3dr \\ &= Y_{b0} + 3(W - dr) \end{aligned} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned} A_{s3.x} : X_{s1} &= X_{b1} + 3W - 3dr \\ &= X_{b1} + 3(W - dr) \end{aligned} \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned} A_{s4.y} : X_{s1} &= Y_{b1} - 3W + 3dr \\ &= Y_{b1} - 3(W - dr) \end{aligned} \tag{3.12}$$

となる。

2) 往復作業の作業経路と作業開始／終了位置

上記の式(3.9)～(3.12)から、往復作業領域の長さ L_x と幅 L_y ($L_x \geq L_y$) は、

$$L_x = X_{s0} - X_{s1} = X_{b0} - X_{b1} - 6(W - dr) \quad (3.13)$$

$$L_y = Y_{s1} - Y_{s0} = Y_{b1} - Y_{b0} - 6(W - dr) \quad (3.14)$$

となり、幅 L_y を行程数 N_c 、作業重複幅を d_0 ($=10\text{cm}$) で往復作業する場合、

$$N_c = \text{INT}(L_y / (W - d_0) + 1) \quad (3.15)$$

(INT())は小数部分を切り捨てた整数を求める関数

となる。

ここで、往復作業の作業重複幅を 10cm 以上の d_s として、一定の作業ピッチ W_c により作業を行う場合は、

$$W_c = L_y / N_c \quad (3.16)$$

$$d_s = W - W_c \quad (3.17)$$

となり、 j 行程目の作業経路 $RST(j)$ は作業ピッチ W_c を用いて、

$$RST(j).y = Y_{b0} + 3(W - dr) + W / 2 + (j - 1)W_c \quad (1 \leq j \leq N_c) \quad (3.18)$$

となる。

往復作業の作業経路としては、この他に、往復作業の第1行程から最終行程の1つ前までの作業重複幅を 10cm で作業し、最終行程の作業重複幅を 10cm 以上として調整するパターンや、結果として往復作業領域が大きくなるが、第1行程から最終行程まで重複幅 10cm を維持して作業するパターンなどが考えられる(第4章の4.1.1項)。

往復作業の作業開始位置と終了位置については、往復作業領域の短辺側の境界線であり、その位置は式(3.9)、(3.11)の $A_{s1.x}$ 、 $A_{s3.x}$ となる。

この位置は作業区画上の座標位置であり、作業を開始／終了するための動作位置としての作業機降下／上昇操作位置は、ロボット上の光反射標識とロータリ耕作業機の作業部中央までの進行方向距離と、作業機の降下操作を行って作業機が下位置(作業位置)に降りるまでの時間に移動する距離を考慮する必要がある。

その光反射標識とロータリ耕作業機の作業部中央までの進行方向距離を l_m 、作業機が降下するまでの時間に

移動する距離を D_{d1} とすると、往路と復路における作業機の降下操作位置 $PSG_{s.x}$ 、 $PSB_{s.x}$ と上昇操作位置 $PSG_{e.x}$ 、 $PSB_{e.x}$ は、

<往路(図3-6の奇数行程)>

$$PSG_{s.x} = X_{b0} - 3(W - dr) - l_m + D_{d1} \quad (3.19)$$

$$PSG_{e.x} = X_{b1} + 3(W - dr) - l_m \quad (3.20)$$

<復路(図3-6の偶数行程)>

$$PSB_{s.x} = X_{b1} + 3(W - dr) + l_m - D_{d1} \quad (3.21)$$

$$PSB_{e.x} = X_{b0} - 3(W - dr) + l_m \quad (3.22)$$

となる。

なお、 D_{d1} は作業機昇降のための油圧の絞り程度や機関回転数、走行速度により、数値が変わるパラメータである。

一方、車両の走行制御を行う上で必要となる往路、復路の目標方位 ϕ_{scd} 、 ϕ_{sbd} は、3.4.1項の2)のティーチング走行で取得した基準の進行方位 $\phi_1 \sim \phi_4$ のうち、長辺方向の方位を使用する。

$$\text{<往路>} \quad \phi_{scd} = \phi_2 \quad (3.23)$$

$$\text{<復路>} \quad \phi_{sbd} = \phi_4 \quad (3.24)$$

3) 往復作業の前の空走1と後の空走2の走行経路

空走1は、ほ場の出入口付近のロボット作業の開始位置から最初の往復作業の経路までの移動のための走行である。短辺①(境界 A_n)に近い区画内の開始位置に長辺方向に向いて停車しているロボットは、作業の開始指令を受けた後に空走1として、図3-7において、

(i) 停車位置の短辺①からの距離により一旦前進または後進を行い(Ⓐ)

(ii) 右 90° の前進旋回を行い(Ⓑ)

(iii) 短辺①に平行な経路を作業開始位置方向に向けて直進走行し(Ⓒ)

(iv) 図3-6の行程番号1の往復作業経路(式(3.18)の $j=1$ の経路)に乗るべく左 90° 前進旋回を行って(Ⓓ) 停止し

(v) その後所定の距離後進して(Ⓔ) 停止する

までを行う。なお、空走 1 における 90° 旋回は、旋回場所に余裕があるので片ブレーキを用いない旋回を行う。

空走 1 における(i)の前進、後進について、上記(ii)の右 90° 旋回の開始位置を基準位置 $P_{A11,x}$ として、作業開始時の停車位置がその基準位置より 50cm 以上前方である場合は基準位置まで後進し、50cm 以上後方である場合は基準位置まで前進する。この前進または後進は、ロボットの停車位置が前方過ぎて、空走 1 の旋回位置や走行経路が往復作業領域内で行われ、往復作業領域内のほ場が荒れることを避け、また後方過ぎて空走 1 が区画境界付近で行われることを防ぐために行う調整である。

基準位置 $P_{A11,x}$ は、上記(iii)の経路 $R_{A1,x}$ を短辺①から距離 200cm の位置とし、その経路上走行の目標方位を ϕ_{A1} 、片ブレーキを用いない 90° 前進旋回の旋回半径を r_0 とすると、

$$R_{A1,x} = X_{b0} - 200 \quad (3.25)$$

$$\phi_{A1} = \phi_1 \quad (3.26)$$

$$P_{A11,x} = R_{A1,x} + r_0 \quad (3.27)$$

となり、上記(iv)の左 90° 前進旋回の開始位置 $P_{A12,y}$ は、

$$\begin{aligned} P_{A12,y} &= RST(1)_y + r_0 \\ &= Y_{b0} + 3(W - dr) + W / 2 + r_0 \end{aligned} \quad (3.28)$$

となる。

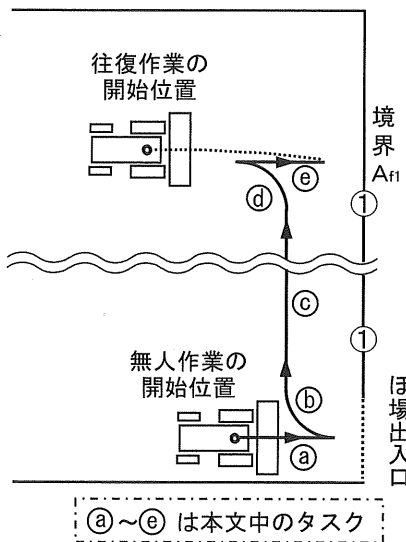


図 3-7 空走 1 の走行経路

上記(v)の左 90° 旋回後の後進は、行程番号 1 の往復作業の作業開始位置までに、その経路上の進行横方向の位置を合わせる前進幅寄せの走行距離を確保するための後進であり、以降の往復作業における行程端での 180° 旋回後の後進と同じく、後進距離は 150cm に設定した。

空走 2 は、往復作業の終了位置から周り作業の開始位置までの移動のための走行である。周り作業の作業経路は次項 4) で述べるが、最外周から周り作業を始める場合の最初の周り作業経路 (図 3-6 の経路 11) の開始位置はほ場の出入口付近の一隅とし、反時計回りの 3 周の周り作業の終了位置つまり経路 34 の終端位置もその一隅に近い位置とする。往復作業の終了位置は往復作業の行程数が奇数の場合と偶数の場合で異なり、以下に、場合分けをして空走 2 の経路を述べる。

a) 行程数 N_c が奇数の場合

式(3.15)の行程数 N_c が奇数の場合は、最終の往復作業の終了位置が周り作業を開始する位置の反対側の短辺側となるので、図 3-8 において、

- (i) 往復作業の終了位置から 180° 旋回を行い (a)
- (ii) 旋回後の位置を経路とする走行により周り作業の経路 11 の位置に達するまで、つまりロボット前端が短辺①に達するまで空走直進して (b) 停止し
- (iii) 所定距離 後進した (c) 後
- (iv) 最外周の周り作業経路 11 に乗るべく左 90° 前進旋回を行って (d) 停止する

までが空走 2 となる。なお、空走 2 における 180° 旋回では片ブレーキは使用しない旋回を行い、90° 旋回は、

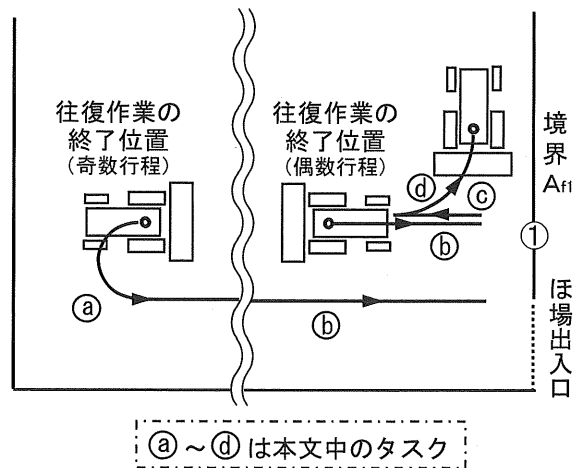


図 3-8 空走 2 の走行経路

周り作業における行程間の90°旋回と同様に、片ブレーキを使用しての旋回としている。

空走2の経路とイベント位置について、(ii)の直進走行経路 $R_{A2.y}$ と目標方位 ϕ_{A2} 、その停止位置 $P_{A21.x}$ 、及びロボット前端から光反射標識までの進行方向距離を l_{fm} 、180°旋回は旋回半径 r_{r0} の倍の旋回が行われるとして、

$$R_{A2.y} = Y_{b1} - 3(W - dr) - W / 2 + 2r_{r0} \quad (3.29)$$

$$\phi_{A2} = \phi_4 \quad (3.30)$$

$$P_{A21.x} = X_{b0} - l_{fm} \quad (3.31)$$

(iii)の後進と(iv)の90°旋回は、3.6.4項の1)の外周90°旋回制御に従って行う。

b) 行程数 N_c が偶数の場合

行程数 N_c が偶数の場合は、往復作業の終了位置が周り作業の開始位置の近くであり、往復作業の終了後、その経路のまま直進走行し (㉑)、位置 $P_{A21.x}$ に達したら、上記(iii)の後進 (㉒)、左90°前進旋回 (㉓) を行って停止する。

4) 周り作業の作業経路

矩形のほ場区画の各辺①(境界 A_{f1})～④(同 A_{f4})に平行な経路を3周する周り作業の作業経路を、作業幅が W 、隣接行程の作業重複幅が dr (15cm)として、図3-6の行程別に記す。なお、下記の作業行程の式に含まれるインデックス k は、周り作業の周回数を示し、例えば、図3-6の11行程、21行程、31行程の行程番号の前側の値1、2、3が k となる。

a) 11, 21, 31 行程

区画 A_{f1} に平行な作業行程 11, 21, 31 の経路及び目標方位 ϕ_{RD1} は、

$$\begin{aligned} \text{経路} : RRD(k)_{1.x} &= X_{b0} - W / 2 \\ &\quad - (k - 1)(W - dr) \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$\text{目標方位} : \phi_{RD1} = \phi_1 \quad (3.33)$$

ロボットの位置ベースで見た作業の開始位置 $PRD_{k1.s.y}$ 、終了位置 $PRD_{k1.e.y}$ は、
11行程、21行程が、

$$PRD_{k1.s.y} = Y_{b1} - l_{fm} \quad (3.34)$$

$$PRD_{k1.e.y} = Y_{b0} + 2(W - dr) - l_{fm} \quad (3.35)$$

31行程が、

$$PRD_{k1.s.y} = Y_{b1} - (W - dr) - l_{fm} \quad (3.36)$$

$$PRD_{k1.e.y} = Y_{b0} + 3(W - dr) - l_{fm} \quad (3.37)$$

となる。

b) 12, 22, 32 行程

区画 A_{f2} に平行な作業行程 12, 22, 32 の経路及び目標方位 ϕ_{RD2} は、

$$\begin{aligned} \text{経路} : RRD(k)_{2.y} &= Y_{b0} + W / 2 \\ &\quad + (k - 1)(W - dr) \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\text{目標方位} : \phi_{RD2} = \phi_2 \quad (3.39)$$

ロボットの位置ベースで見た作業の開始位置 $PRD_{k2.s.x}$ 、終了位置 $PRD_{k2.e.x}$ は、

12行程、22行程が、

$$PRD_{k2.s.x} = X_{b0} - l_{fm} \quad (3.40)$$

$$PRD_{k2.e.x} = X_{b1} + 2(W - dr) - l_{fm} \quad (3.41)$$

32行程が、

$$PRD_{k2.s.x} = X_{b0} - (W - dr) - l_{fm} \quad (3.42)$$

$$PRD_{k2.e.x} = X_{b1} + 3(W - dr) - l_{fm} \quad (3.43)$$

となる。

c) 13, 23, 33 行程

区画 A_{f3} に平行な作業行程 13, 23, 33 の経路及び目標方位 ϕ_{RD3} は、

$$\begin{aligned} \text{経路} : RRD(k)_{3.x} &= Y_{b1} + W / 2 \\ &\quad + (k - 1)(W - dr) \end{aligned} \quad (3.44)$$

$$\text{目標方位} : \phi_{RD3} = \phi_3 \quad (3.45)$$

ロボットの位置ベースで見た作業の開始位置 $PRD_{k3.s.y}$ 、終了位置 $PRD_{k3.e.y}$ は、

13行程、23行程が、

$$PRD_{k3.s.y} = Y_{b1} + l_{fm} \quad (3.46)$$

$$PRD_{k3.e.y} = Y_{b0} - 2(W - dr) + l_{fm} \quad (3.47)$$

33 行程が,

$$PRD_{k3s.y} = Y_{b0} + (W - dr) + l_{m} \quad (3.48)$$

$$PRD_{k3e.y} = Y_{b1} - 3(W - dr) + l_{m} \quad (3.49)$$

となる。

d) 14, 24, 34 行程

区画 A_{f4} に平行な作業行程 14, 24, 34 の経路及び目標方位 ϕ_{RDA} は,

$$\begin{aligned} \text{経路} : RRD(k)_{4.y} &= Y_{b1} - W / 2 \\ &\quad - (k-1)(W - dr) \quad (3.50) \end{aligned}$$

$$\text{目標方位} : \phi_{RDA} = \phi_4 \quad (3.51)$$

ロボットの位置ベースで見た作業の開始位置 PRD_{k4s} 終了位置 PRD_{k4e} は,

14 行程, 24 行程が,

$$PRD_{k4s.x} = X_{b1} + l_{m} \quad (3.52)$$

$$PRD_{k4e.x} = X_{b0} - 2(W - dr) + l_{m} \quad (3.53)$$

34 行程が,

$$PRD_{k4s.x} = X_{b1} + (W - dr) + l_{m} \quad (3.54)$$

$$PRD_{k4e.x} = X_{b0} - 3(W - dr) + l_{m} \quad (3.55)$$

となる。

なお, 最外周である外周 1 の行程 11~14 とその内側の外周 2 の行程 21~24 における作業の終了位置は, 最終的な作業ソフトでは, 上記式による終了位置より作業重複幅が若干大きくなる「ロボット前端が前方の区画境界に達した位置」としている。これは, ほ場の四隅付近はほ場の表面が荒れていることが多いことを想定し, 未作業部分を極力作らないための対応である。また, 周り作業の最終行程である 34 行程の経路については, 往復作業の重複幅を最終行程まで終始 10cm 一定で行った場合には, 往復作業の最終行程との作業重複幅が大きくなる場合があり, その場合には, 34 行程の経路を未作業領域の中央とする選択肢がある。

3. 5 走行・作業制御部

前項のタスク・プランニング部で計画・設定した走行・作業経路上の直進走行や, 次作業や次経路へ移るための

旋回, 移動, 幅寄せ, 作業機の昇降などの走行制御や作業制御を行う走行・作業制御部は, 3.3.1 項で述べたように, 「空走 1 モジュール」, 「往復作業モジュール」, 「空走 2 モジュール」, 及び「周り作業モジュール」によって構成し, 各モジュールは「前進直進制御」や「後進直進制御」, 「180°旋回制御」, 「90°旋回制御」等のための共通ルーチンにより構成するようにした。

以下に, 各モジュールの概要と流れを述べ, 構成する共通ルーチンは【】で記す。共通ルーチンの機能や特徴などは 3.6 項に述べる^{27) 28) 15)}。

3. 5. 1 空走 1 モジュール

空走 1 は, ほ場の出入口付近のロボット作業の開始位置から最初の往復作業の経路までの移動走行である。空走 1 を実行するプログラム・モジュール「空走 1 モジュール」の走行経路とフローを図 3-9 に示す(走行経路図は図 3-7 と同じ)。

ほ場の出入口付近に長辺方向に向いて停車しているロボットは, 作業の開始指令を受けた後,

- (i) 停車位置の短辺①(境界 A_{fi})からの距離に応じて一旦前進, または後進を行い ⇒【前進直進制御】、【後進直進制御】
- (ii) 右 90° の前進旋回を行い ⇒【前進 90° 旋回制御】
- (iii) 短辺① に平行な経路を作業開始位置方向に向けて直進走行し ⇒【前進直進制御】

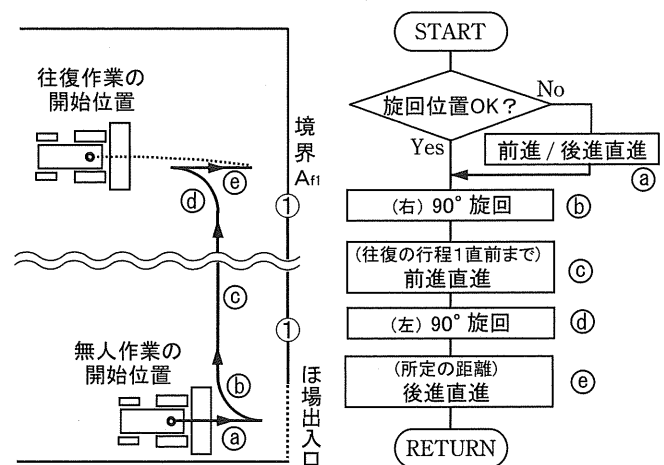


図 3-9 空走 1 モジュールの走行経路とフロー

(iv) 図 3-6 の行程番号 1 の往復作業経路, つまり式(3.18)の $j=1$ の経路に乗るべく, 左 90° 前進旋回を行って停止し ⇒ 【前進 90° 旋回制御】

(v) その後所定の距離, 後進して停止する ⇒ 【後進直進制御】

までを行う。

3. 5. 2 空走 2 モジュール

空走 2 は, 往復作業の終了位置から周り作業の開始位置までの移動のための走行である。空走 2 を実行するプログラム・モジュール「空走 2 モジュール」の走行経路とフローを図 3-10 に示す (走行経路図は図 3-8 と同じ)。

往復作業の終了位置は, 往復作業の行程数が奇数の場合と偶数の場合で異なり, 行程数が奇数の場合は以下の (i) から, 偶数の場合は (ii) のイ. から空走が行われる。

その流れは,

(i) 行程数が奇数の往復作業終了位置から 180° 旋回を行い ⇒ 【 180° 旋回制御】

(ii) のア. 旋回後の位置を経路とする走行によりロボット前端が区画境界①(境界 A_{ri}) に至るまで空走直進して (iii) へ ⇒ 【前進直進制御】

(ii) のイ. 行程数が偶数の往復作業終了位置からロボット前端が区画境界①に至るまで空走直進 ⇒ 【前進直進制御】

(iii) 所定距離 後進した後, 最外周の周り作業経路 11 に乗るべく左 90° 前進旋回を行う ⇒ 【前進 90° 旋

回制御】

である。

3. 5. 3 往復作業モジュール

往復作業は, 作業区画周辺部の周り作業領域を除く往復作業領域内を, 事前に設定した作業経路に沿って往復作業するものである。枕地での 180° 旋回を含む一連の往復作業を実行する往復作業モジュールのフローチャートを図 3-11 に示す。

その主な流れは, 3.5.1 項の空走 1 に引き続いて,

(i) 図 3-12 の経路 1 の往行程経路上を, 幅寄せを行いながら前進し, 作業開始

位置から終了位置までを前進直進・作業する ⇒ 【前進直進制御】

(ii) 作業終了後に反時計回りの 180° 旋回を行う ⇒ 【 180° 旋回制御】

(iii) 図 3-12 の経路 2 の復行程経路上を, 幅寄せを行いながら前進し, 作業開始位置から終了位置までを前進直進・作業する ⇒ 【前進直進制御】

(iv) 作業終了後に時計回りの 180° 旋回を行う ⇒ 【 180° 旋回制御】

を繰り返す流れとなる。往復作業が往行程つまり奇数行程で終わる場合は (i) で終了し, 復行程つまり偶数行程で終わる場合は (iii) で終了して, 3.5.2 項の空走 2 が行われる。

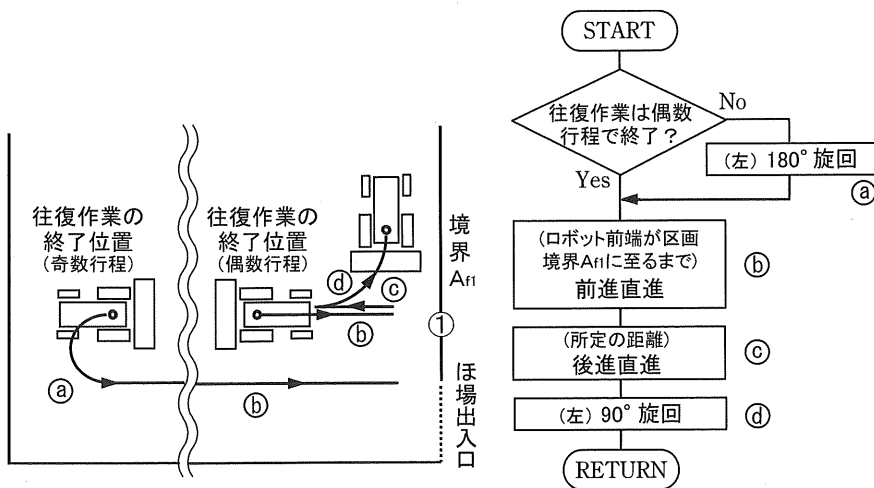


図 3-10 空走 2 モジュールの走行経路とフロー

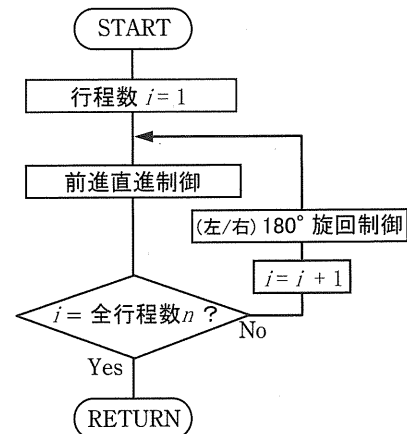


図 3-11 往復作業モジュールのフロー³⁰⁾

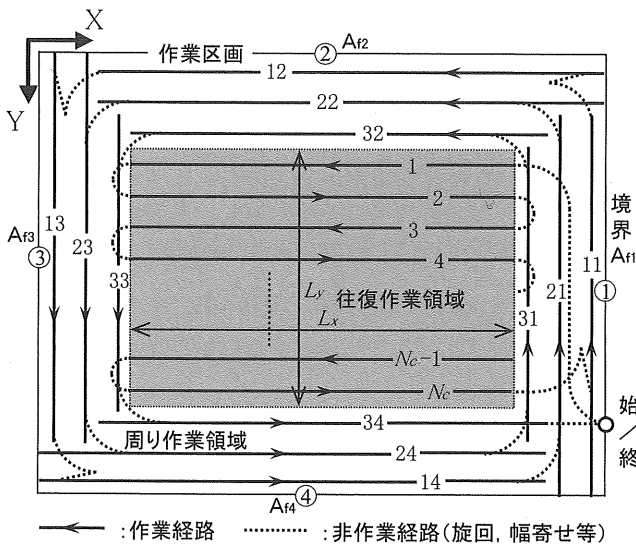


図 3-12 標準作業法の作業経路(同図 3-6)^{15) 23)}

3. 5. 4 周り作業モジュール

周り作業は、上記往復作業及び空走 2 に続いて行う 3 周の外周作業であり、枕地を含む往復作業領域の外側を区画 4 辺に平行な作業により区画全面の処理を完結する作業である。区画の四隅での 90° 旋回と前進、後進の幅寄せ走行、及び区画 4 辺に平行な直進作業を行うルーチンから構成される周り作業モジュールのフローチャートを図 3-13 に示す。

周り作業の履行順は区画境界に沿う最外周の作業を最初に行い、順次内側の周り作業に進む順を標準としたが、内側の周り作業から始める方法や、最外周の周り作業は手動運転により行うべく省略する方法も選択可能とした。

以下は、最外周を最初に行う標準の周り作業の手順・流れであり、3.5.2 項の空走 2 に続いて、

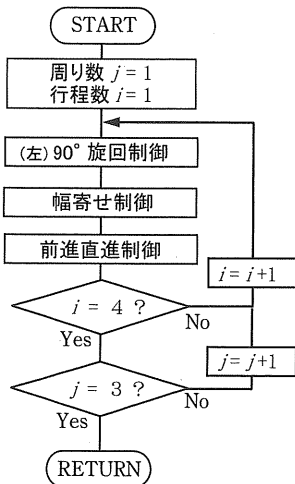


図 3-13 周り作業モジュールのフロー

- (i) 図 3-12 の行程経路 11 上に乗るべく、同経路の位置と目標方位に対する位置偏差と方位偏差が基準値以下になるまで前進幅寄せを行い、その後、作業機位置が区画境界④(境界 A_{f4})の位置になるまで後進幅寄せを行って停止する ⇒【幅寄せ制御】
- (ii) その停止位置から、ロボット前端が区画境界②(境界 A_{f2})の位置に達するまで、経路 11 上を前進直進・作業する ⇒【前進直進制御】
- (iii) 所定距離へ後進して停止する ⇒【後進直進制御】
- (iv) 次の行程経路 12 に乗るべく左 90° 前進旋回を行って、幅寄せ 1 と幅寄せ 2 を行う、⇒【前進 90° 旋回制御】、【幅寄せ制御】

を、繰り返して最外周である外周 1 の周り作業が行われる。

次に行う外周 2 の周り作業への移行では、上記(iii)の後進距離を長くして、(iv)の行程経路 21 に乗るべく左 90° 前進旋回へと進む。次の内周の周り作業への移行も同様に行われる。周り作業における直進作業行程の作業開始位置は、外周 1 と外周 2 では、作業機位置がロボット後方の区画境界となる位置であり、内周では、作業機位置が外周 2 による作業境界から 15cm の作業重複分を確保した位置とした。作業終了位置は、経路計画上では、その後の周り作業で処理する領域または既に行われた周り作業で処理された領域から作業重複 15cm を確保した位置となるが、外周 1 と外周 2 の周り作業では、作業重複幅を若干大きめとして、ロボット前端が前方の区画境界の位置となる位置とした。

3. 6 走行・作業のための共通ルーチン

上記の各モジュールを構成する共通ルーチンは、走行経路の位置や走行、旋回の目標方位、作業の開始位置、終了位置などのパラメータを「引数」として与えることにより、前進や後進の直進走行・作業、旋回、幅寄せが状況に応じて行われるプログラム単位である。以下に各ルーチンの機能や特徴を記す^{27) 28)}。

3. 6. 1 前進直進制御ルーチン

前進直進制御ルーチンは、現在位置から所定の走行終了位置までの間、ロボットが目標の走行経路上を、目標

の進行方位を維持して前進の直進走行が行われるように操舵を行い、また所定の位置で作業が行われるように、作業機の昇降、機関回転数の上げ下げ、走行/停止のシヤトル変速の切替えなどを行うルーチンである。本ルーチンの実行において、上位の階層から与えられる主な引数としてのパラメータは、走行の開始/停止位置、走行経路の位置と目標進行方位、作業の開始/終了位置である。

上記 3.5 項の各モジュールにおいて、旋回後に前進してロボットを目標経路上で目標進行方位に向ける誘導、つまり幅寄せを行う場合があるが、この前進幅寄せ時の操舵制御も、制御当初の目標経路や目標進行方位に対する偏差は大きいものの本項の前進直進制御と同じ制御方法を適用して行う。

ロボットに目標経路上の直進を行わせる方法は、これまでの車両の直進制御研究において、PID 制御器のような線形のものからファジィ制御やニューラルネットワークなどを適用した非線形なものまで数多く提案されている。乗用車に比べて低速で、操舵角が大きい農用車両の直進制御に線形な制御器を使用する場合には、目標経路に対する進行横方向の偏差の大きさに応じてゲインを変更することが安定的な直進制御を維持する上で必要となる。これは、農用車両の動きを線形で取り扱うことが難しいことを意味する。

このような理由から、本研究におけるロボットの直進

のための操舵制御では、目標経路に対する横方向偏差が小さい場合から比較的大きい場合まで、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 3-14 に示した直進制御ルーチンは、作業を伴う走行制御のフローであり、XNAV からの位置データと地磁気方位センサからの方位データに基づいて、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は、数秒間方位データのみによって走行制御を行うようにして、ロボット作業ができるだけ継続的に安定的に行われるようにした。なお、位置データと方位データに基づく操舵の制御周期は 0.5s に設定した。

位置データと方位データに基づき、目標進行方位を維持しつつ目標経路上を前進直進する操舵制御則は、図 3-15 に示したジオメトリにおいて式(3.56)を用いた。農用車両の場合、横方向偏差 Δr (d) 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て、制御器を設計した研究にみられる¹¹⁾。すなわち、農用車両の場合、舵角に対して車輪のコーナリングフォースが非線形に変化し、その変化により発生する非線形な横すべり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。車輪のコーナリングフォースは、操舵角が大きくなるとその非線形な挙動が顕著となるため、修正すべき横方向偏差 $\Delta r(t)$ が大きくなると、操舵角に制限を与える形の飽和特性を制御器 (式(3.56)) にもたせることにした。

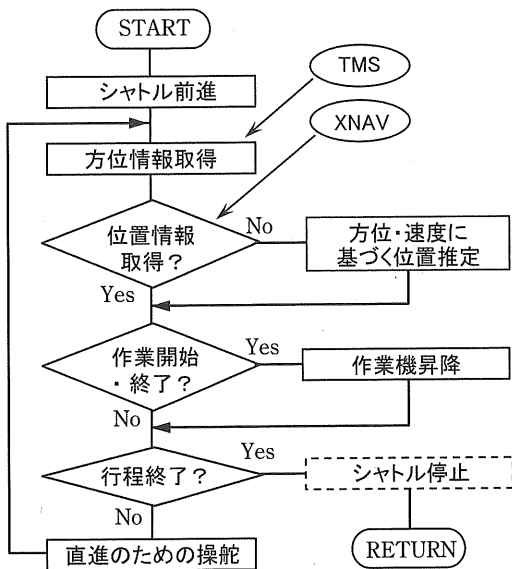


図 3-14 前進直進制御ルーチンのフロー³⁰⁾

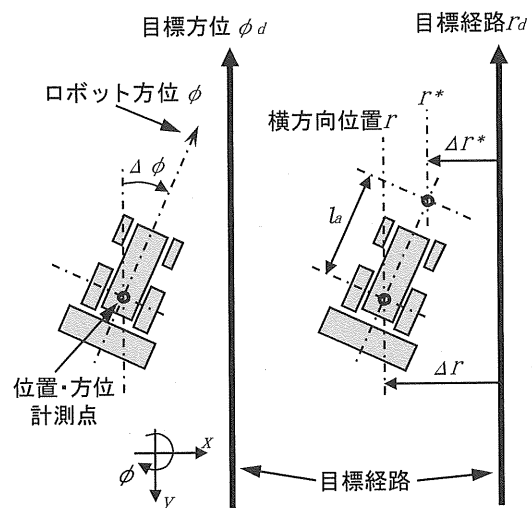


図 3-15 前進直進におけるジオメトリ³⁰⁾

$$\phi(t) = -\alpha \int_0^t \Delta r(t) dt - \beta \times \tanh(\Delta r^*(t) / \gamma) \quad (3.56)$$

ここで、 $\phi(t)$ は時刻 t における操舵角、 $\tanh(\)$ は双曲線関数、 α 、 β 、 γ は制御ゲインであり、ゲイン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。式(3.56)を離散形で表すと、

$$\phi_t = -\alpha \sum_{i=0}^t \Delta r_i \Delta t - \beta \times \tanh(\Delta r_i^* / \gamma) \quad (3.57)$$

Δt は制御の時間単位 (ステップ) であり、1 ステップは前述した制御周期 0.5s になる。図 3-15 に示したように $\Delta r(t)$ 、 $\Delta \phi(t)$ は時刻 t における目標経路 r_d 、目標方位 ϕ_d との偏差を示しており、式(3.58)~(3.60)として表される。

$$\Delta r(t) = r(t) - r_d \quad (3.58)$$

$$\Delta \phi(t) = \phi(t) - \phi_d \quad (3.59)$$

$$\Delta r^*(t) = r^*(t) - r_d \quad (3.60)$$

$r(t)$ 、 $\phi(t)$ は時刻 t における横方向位置と方位である。式(3.60)中の $r^*(t)$ は図 3-15 に示したように、標識位置を距離 l_a だけ前方に変換し、操舵制御における進行方位に基づく前進補償量として機能する。この前方距離 l_a の大きさも制御ゲイン同様、実験によって決定し、

$$r^*(t) = -l_a \sin(\Delta \phi(t)) + r(t) \quad (3.61)$$

となる。

また、位置データが正常に取得できなかった場合に、地磁気方位センサからの方位データのみにより操舵制御するために、作業速度 v を導入し、ロボットの横すべりは無視して、操舵角は式(3.62)式によって計算される。

$$\phi(t) = -\alpha' v \sin(\Delta \phi(t)) - \beta' \Delta r(t) \quad (3.62)$$

方位データにより操舵制御する場合、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必要がある。そこで、ロボットの横すべりをできるだけ発生させないように大舵角は与えないこととし、直進時の操舵角に $-10^\circ \sim +10^\circ$ の制限を与え、式(3.63)のヨー角の変化から横方向偏差 $\Delta r(t)$ を推定した。

$$\Delta r(t) = \int_0^t v \sin(\Delta \phi(t)) dt \quad (3.63)$$

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式(3.64)のように表される。

$$\Delta r_k = v \sum_{i=0}^k \sin(\Delta \phi_i) \Delta t \quad (3.64)$$

また、微弱な地磁気を検出する TMS のデータ $\phi(t)$ 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、式(3.65)の平滑化フィルタ (擬似的 RC フィルタ) を構成し、算出された値を操舵制御のための入力値とした。

$$\phi_t = 10/15 \sum_{i=-4}^0 ((i+5) \Delta \phi_i \Delta t) \quad (3.65)$$

式中のステップ i は現在の時刻 t から 0.1s 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の開始/終了つまり作業機の降/昇操作や走行停止などの作業スケジュールについては、例えば速度 0.5m/s で走行・作業中に、0.5s 毎の位置データ更新に基づいて制御を行った場合は最大 25cm の位置決め誤差が生じるため、デッドレコニングによる位置推定により位置決めの補間を行った。すなわち、直前の 2 位置から走行速度を計算し、位置データが更新されるまでの間は、走行速度から 0.1s 周期でロボット位置を推定することにより、作業スケジュールとの比較に基づく位置決めの精度を高めた。なお、デッドレコニングによる位置推定は、次の位置データが取得されるまでの約 0.5s 間であり、次に位置データが更新されれば、デッドレコニングで問題となる位置誤差の累積はクリアされる。

3. 6. 2 後進直進制御ルーチン

後進直進制御は、現在位置から所定の走行終了位置までの間、ロボットが目標の走行経路上を、目標の進行方位を維持して後進の直進走行が行われるように操舵を行うルーチンである。

この後進直進制御は、上記 3.5 項の各モジュールの中

で、旋回後の「所定距離後進して停止」の動作や後進して幅寄せする場合に用いる制御であり、本ルーチンの実行における上位の階層からの主な引数となるパラメータは、走行の開始/停止位置、走行経路の位置と目標進行方位である。

この制御では、基本的には上記 3.6.1 項の前進直進制御と同じ操舵制御則を適用し、前進直進制御における前方距離 l_a を考慮した制御の適用である式(3.61)を、後方距離 l_b を考慮した操舵制御則が適用される。 l_a と l_b の大きさは実験によって決定しており、実際には、走行速度 0.5m/s において $l_b = 3.0m$, $l_a = 2.5m$ と、 l_b が l_a より若干大きい値となっている。

後進直進制御においても、位置データが正常に取得できなかった場合には、地磁気方位センサからの方位データのみによる操舵制御を行うこととした。また、周り作業における作業開始位置は後進走行の終了位置であり、進行方向での高精度な位置決めが必要であるため、上記の前進直進制御の場合と同様の位置決め方法を適用した。

3.6.3 180° 旋回制御ルーチン

往復作業では、目標経路上の直進走行・作業が前進直進制御ルーチンによって行われた後に、180° 旋回に移行する。180° 旋回の制御を行うものが 180° 旋回制御ルーチンであり、その制御ルーチンにおけるロボットの動きとフローを図 3-16 に示す。

往復作業における行程間隔は、作業重複幅を 10cm は確保することとして 160cm またはそれ以下となる。行程間隔 160cm の 1/2 である 80cm の半径で旋回を行うためには、ロボット車両の舵角最大で、「倍速ターン」と呼ばれている旋回時前輪増速機構の機能と片ブレーキを利かせて旋回を行う必要がある。この旋回をフルスロットル状態で行うと、目標の旋回角での旋回の終了、停止が高精度で行えない可能性が高いので、180° 旋回は機関回転をパートスロットル状態に下げで行うこととした。旋回の経過・終了判断は、旋回による車両方位の変化である旋回角を TMS により計測して行う。

ほ場内での 180° 旋回では、路面条件やロボット車両の性能から半径 80cm の旋回が行えず、それより旋回半径が大きくなる場合が多い。そこで、180° 旋回では以下の切返しを行うこととした。

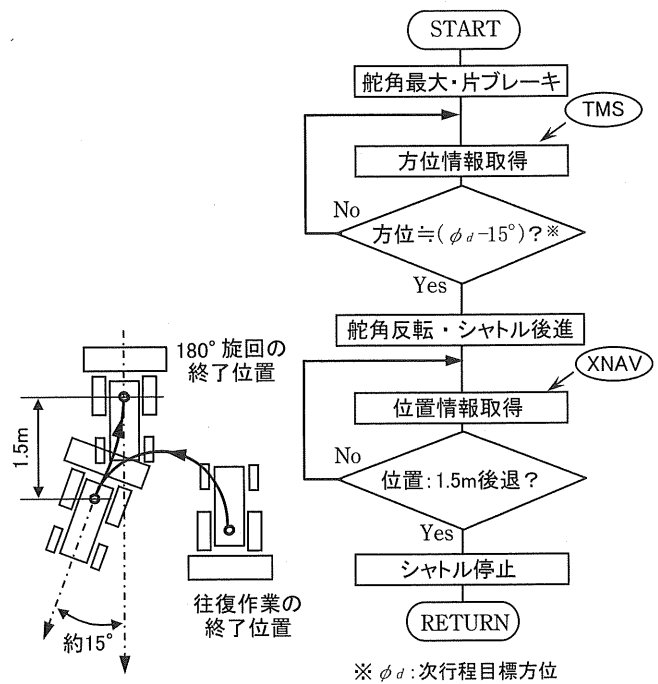


図 3-16 180° 旋回制御における動きとフロー³⁰⁾

その切返しは、旋回中の旋回角が 165° 程度となった時点で前進による旋回を終了し、その後、逆方向に操舵して 1.5m 後進する動作である。この後進における操舵角については、後進距離 1.5m により車両の向きが 15° 変わるように、すなわちこの切返し後に車両の向きが次行程の目標進行方位 ϕ_d となるように舵角を計算・決定した。この切返しは、旋回後のロボット位置を次作業行程の目標経路にできるだけ近づけるとともに、次作業行程の作業開始位置までの前進幅寄せ距離を長めに確保することも目的として実施することとした。

なお、3.5.2 項の空走 2 モジュールの(i)の 180° 旋回制御は、片ブレーキを用いない、旋回角 180° までの旋回を行う制御となる。

3.6.4 90° 旋回制御ルーチン

90° 旋回制御は、上記 3.5.1 項と 3.5.2 項の空走、及び 3.5.4 項の周り作業のモジュールに組み込まれており、3.5.1 項の空走 1 における 90° 旋回制御を除き、旋回前に所定距離後進する動作を行うこととしている。

旋回における条件として、3.5.2 項の(iii)の 90° 旋回と最外周である外周 1 の周り作業における 90° 旋回では、区画境界の外側に畦畔などが存在する場合も多いため、旋回中に右前車輪が区画境界からはみ出さないよう

にする必要がある。また、その内側の外周2の周り作業における90° 旋回では、旋回の外側にある外周1での既作業域内にできるだけ右前車輪が踏み込まないようにする必要がある。一方、最も内側の内周の周り作業では、90° 旋回の外側と内側に既作業域があり、その既作業域内にできるだけ右前車輪と左後車輪が踏み込まないようにする必要がある。以下、外周1と外周2の周り作業における90° 旋回を「外周90° 旋回」、内周の周り作業における旋回を「内周90° 旋回」と呼んで、その特徴等を以下に述べる。

1) 外周90° 旋回制御

外周90° 旋回では、旋回外側の区画境界に、または作業重複幅を考慮した既作業域の内側15cmの線までに右前車輪が至らない旋回を行う必要がある。

図3-17、図3-18において、これらの境界線を正面に見た②の状態から、左向きの外周90° 旋回を最大舵角で行った場合、旋回半径を r_t 、旋回中心の座標を $O(0, 0)$ 、②における後車軸中心位置を $P_2(r_t, 0)$ 、旋回角 θ の時点での後車軸中心位置を $P_\theta(x_\theta, y_\theta)$ 、右前輪外側位置を $P_f(x_f, y_f)$ とすると、

$$x_\theta = r_t \cos \theta \tag{3.66}$$

$$y_\theta = -r_t \sin \theta \tag{3.67}$$

$$\begin{aligned} x_f &= x_\theta - l_f \sin(\theta - \gamma_f) \\ &= r_t \cos \theta - l_f \sin(\theta - \gamma_f) \end{aligned} \tag{3.68}$$

$$\begin{aligned} y_f &= y_\theta - l_f \cos(\theta - \gamma_f) \\ &= -r_t \sin \theta - l_f \cos(\theta - \gamma_f) \end{aligned} \tag{3.69}$$

となる。なお、 l_f は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、 r_t は実験による測定値から決定し、 l_f と γ_f はロボット車両の諸元から以下のように計算される。

$$l_f = \sqrt{(((b_{wf} + b_f) / 2)^2 + l_{wb}^2)} \tag{3.70}$$

$$\gamma_f = \tan^{-1}(((b_{wf} + b_f) / 2) / l_{wb}) \tag{3.71}$$

式(3.69)において、 y_f が最小となる状況が、右前輪外側位置が最も境界線に近づく状況となるので、

$$L = r_t \sin \theta + l_f \cos(\theta - \gamma_f) \tag{3.72}$$

この式の最大値分、旋回開始時点②の後車軸中心位置が境界線から離れていれば、旋回中に境界線から右前輪外側位置がはみ出すことはない。

外周90° 旋回の前のロボットの動作は、図3-17において、ロボット前端が境界線に到達した①で前進直進作業を終了、停止し、その後②まで距離 L_b の後進を行ってから前進の90° 旋回を開始する。その①から②への後進距離 L_b は、①における後車軸中心位置のY座標値の絶対値 h_f を、式(3.72)の最大値 L_{max} から減じた距離となる。

このようにして旋回前に距離 L_b の後進を行うことにより旋回中に境界線から右前輪がはみ出すことはないが、旋回角が90° まで旋回を行った後のロボット位置は次行程経路より内側となる。その旋回後のロボット位置は次行程経路より計算上約65cm内側となり、その65cmは次項3.6.5の幅寄せ量としては大きいものであるため、以下の車両誘導を旋回の後半に組み込んだ。

その車両誘導は、外周90° 旋回では旋回角70° 程度まで最大舵角による急旋回を行い、その後は、舵角を戻して前進による幅寄せに移行する誘導である。これらの

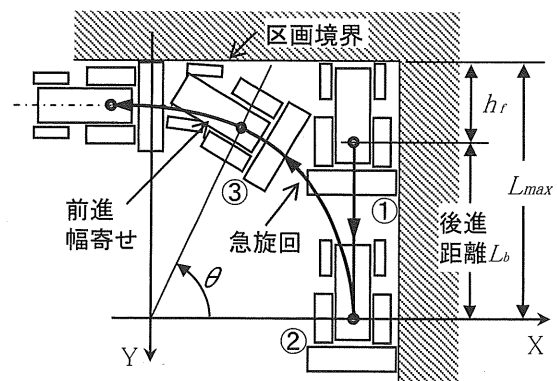


図3-17 外周90° 旋回におけるロボットの動き

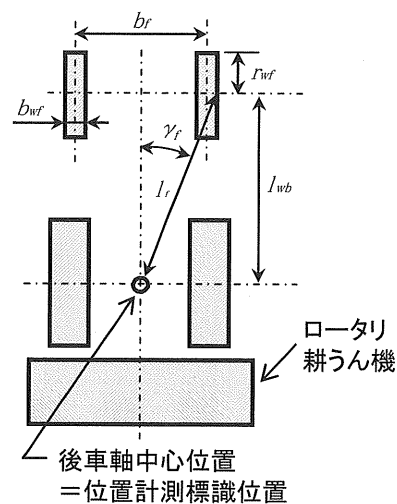


図3-18 ロボット車両のディメンジョン³⁰⁾

外周 90° 旋回の流れを図 3-19 に示す。なお、90° 旋回も 180° 旋回と同様、急旋回の部分は舵角最大で倍速ターンの機能と片ブレーキを利かせて行い、機関回転はパートスロットル状態に下げている。

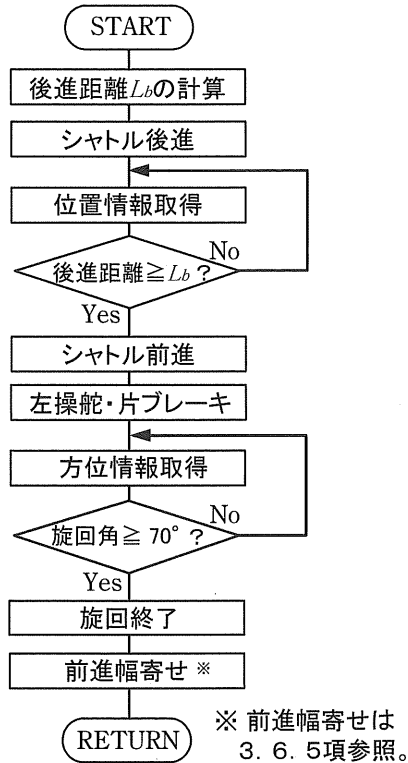


図 3-19 外周 90° 旋回制御ルーチンのフロー

2) 内周 90° 旋回制御

内周の周り作業における 90° 旋回では、旋回外側と旋回内側に既作業域があり、その作業域にできるだけ右前車輪と左後車輪が踏み込まないことが望ましい。

最外周から周り作業を行う場合、内周の周り作業を行う時点での未作業部分は作業幅 170cm から重複幅 15cm の両端分 30cm を差し引いた幅 140cm の帯状部分であり、ロボット車両と作業機のディメンジョン及び最小旋回半径から判断して、この未作業部分の中だけで旋回を行うのは不可能である。そこで、旋回中に既作業域に車輪が踏み込むことは不可避であるが、旋回後の幅寄せ時にはできるだけ既作業域に踏み込むことが無いように旋回方法の検討・設計を行った。

旋回後の幅寄せ時に既作業域への踏み込みを少なくするためには、旋回後の幅寄せ量をできるだけ小さくすることが肝要であり、90° 旋回を最大舵角で旋回角 90° ま

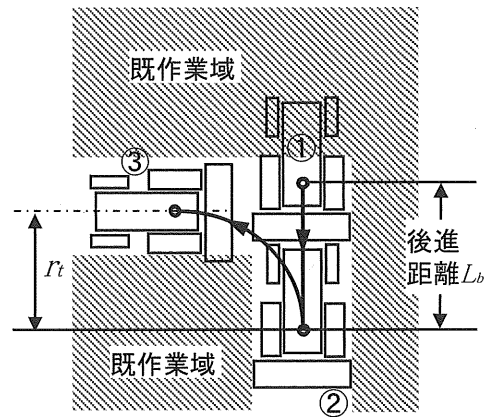


図 3-20 内周 90° 旋回における動き

で行うこととして、旋回終了時にロボットが次行程経路上に高精度で位置するよう下記の車両誘導を行った。

図 3-20 において、旋回開始位置②の Y 座標位置 y_{p2} は、次行程経路の Y 座標位置 y_{rt} に最大舵角での旋回半径 r_t を加えたものとして、前進直進作業の終了位置①から旋回開始位置②への後進距離 L_b を求める。

$$y_{p2} = y_{rt} + r_t \tag{3.73}$$

$$L_b = y_{p2} - y_{p1} \tag{3.74}$$

この時、ほ場における旋回半径は路面状態の時空変動によって変わるため、逐次行われる内周 90° 旋回の結果から、旋回半径を学習して調整することとした。つまり、最初の内周 90° 旋回における旋回半径 r_t の初期値は外周 90° 旋回で用いた値を用い、その旋回の前位置②における y_{p2} と、旋回後の③における y_{p3} から、

$$r_t = y_{p2} - y_{p3} \tag{3.75}$$

を求めて、旋回半径 r_t の大きさを学習し、次の 90° 旋回での旋回半径は学習・更新した旋回半径 r_t を用いることとした。内周 90° 旋回の流れを図 3-21 に示す。

3. 6. 5 幅寄せ制御ルーチン

幅寄せは、180° 旋回や 90° 旋回の後には、その位置から次の作業開始位置までの間にロボットを次行程の経路上に乗せるとともに目標の進行方向に向ける誘導動作である。そのための車両の制御は、前進による幅寄せでは前記 3.6.1 項の前進直進制御ルーチンを、後進による幅寄せでは 3.6.2 項の後進直進制御ルーチンを適用して行われる。

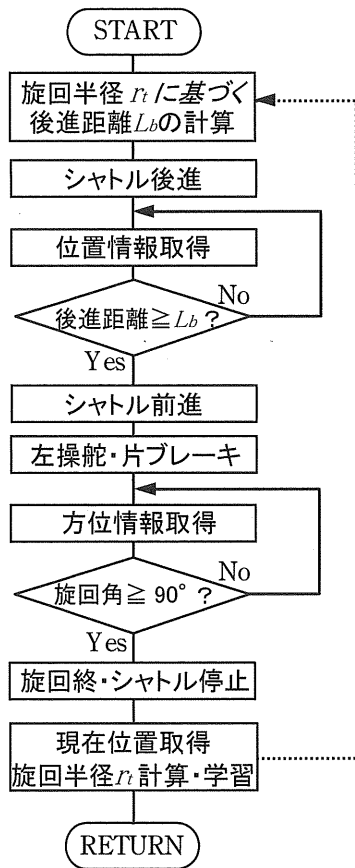


図 3-21 内周 90° 旋回制御ルーチンのフロー

往復作業における 180° 旋回後の幅寄せでは 3 周の周り作業を行うとして、幅寄せのための進行距離が約 4.5 m あるため、前進による幅寄せのみにより必要な幅寄せを完了できる。しかし、最外周である外周 1 の周り作業の 1 行程目から 2 行程目への移行時以降 (図 3-12 の行程 11⇒12, 12⇒13, 13⇒14) や、外周 1 の周り作業から外周 2 への移行時 (行程 14⇒21), 外周 2 から内周への移行時 (行程 24⇒31) における 90° 旋回後の幅寄せにおいては、旋回後の位置から作業開始位置までの距離は後方に約 1.8m と短いため、その距離の後進幅寄せのみで幅寄せを完了することは難しい場合がある。

そこで、周り作業における 90° 旋回後の幅寄せでは、幅寄せの程度が大きい場合は前進幅寄せと後進幅寄せを組み合わせを行い、幅寄せの程度が小さい場合は後進幅寄せのみを行うこととした。この制御方法は、幅寄せ時の車両の動きを小さく抑えて既作業域への車輪の踏込みを小さくするとともに、ロボットの冗長な動きを防止することを目的としている。この制御のルーチンを幅寄せ

制御ルーチンと呼び、以下に具体的な制御方法を記す。制御方法の概略を図 3-22 に、制御の流れを図 3-23 に示す。

90° 旋回の終了位置③は、前記 3.6.4 項の 1) の外周 90° 旋回の場合には旋回角 70° 程度までの最大舵角による旋回の終了位置であり、3.6.4 項の 2) の内周 90° 旋回の場合には旋回角 90° までの最大舵角による旋回の終了位置である。

旋回の終了位置③において、現在位置 (X_{p3}, Y_{p3}) と幅寄せ後の目標位置 (X_{p5}, Y_{p5}) から幅寄せの程度を評価して、前進幅寄せを行うか否かを決定する。

$$\Delta X = |X_{p5} - X_{p3}| \tag{3.76}$$

$$\Delta Y = |Y_{p5} - Y_{p3}| \tag{3.77}$$

$$\Delta \phi = \phi_{p5} - \phi_{p3} \tag{3.78}$$

$$\zeta = \tan^{-1}(\Delta X / \Delta Y) \tag{3.79}$$

ここに ϕ はロボットの向き (方位) であり、添え字が 5 の値は幅寄せ後の目標値、つまり次行程の目標方位である。式(3.79)の ζ は幅寄せの程度、言い換えれば幅寄せの難度を示す値であり、しきい値 ζ_t より大きい場合は前進幅寄せと後進幅寄せを行い、小さい場合は後進幅寄せのみを行う。しきい値 ζ_t は実験により決定し、「5°」を通常用いている。

前進幅寄せを行う場合の幅寄せ目標値は、進行横方向

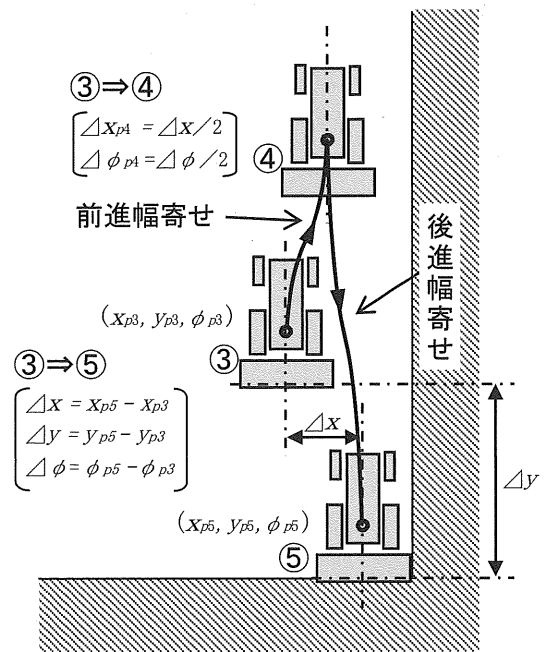


図 3-22 幅寄せ制御における動き³⁰⁾

位置としての幅寄せ量が式(3.76)の Δx の 1/2, ロボットの向きが式(3.78)の $\Delta \phi$ の 1/2 としており, 位置と向きの偏差がいずれも目標値以下となったら, 前進幅寄せを終了して後進幅寄せに移行する。

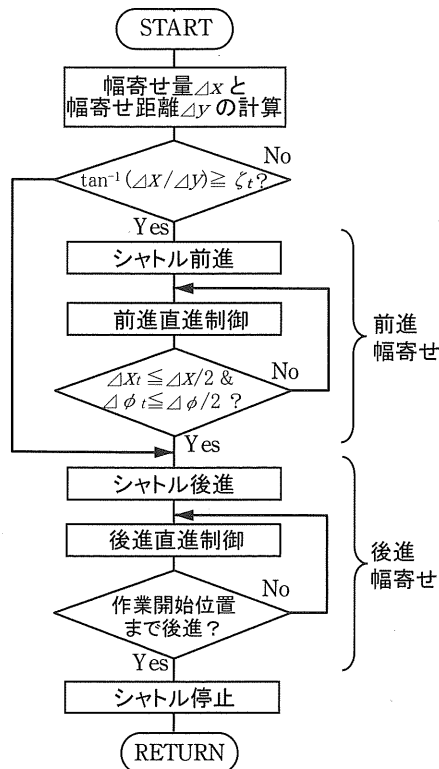


図 3-23 幅寄せ制御ルーチンのフロー

3. 7 摘要

航法システム XNAV とロボット車両によるロボット作業の方法や条件を検討, 策定した。ロボット作業では, ティーチングにより作業を行う区画の情報を取得, 設定し, 経路計画を行う。そして, その経路に沿う作業を航法情報に基づきロボット車両を制御して実行する。これらの方法, 手順を実行するコンピュータ・プログラムである作業ソフトを, モジュールやルーチンに分割して作成, 構成した。

(1) ロボット作業は, ほぼ水平な矩形圃場を対象に, 慣行のロータリ耕作業に準じた作業方法—区画周辺部を除く中央付近を往復作業し, その後, 枕地部分を含めた周辺部分を周り作業する方法により行うこととした。この作業方法を「標準作業法」, 実行する作業ソフトを「標準作業ソフト」と呼ぶ。

(2) ロボット作業を行う区画の大きさと向きの情報は, ある区画に対して初めの 1 回, 最外周の周り作業経路上

をマニュアル運転により一周する間に取得する。このティーチングにより得られた区画境界の位置情報と目標方位情報から, 標準作業法の往復作業と周り作業の経路を生成する。

(3) 作業ソフトは, ティーチングと作業経路の生成を行う「タスク・プランニング部」と, 生成・設定された経路に沿う走行, 作業を遂行する「走行・作業制御部」に分割, 構成した。

(4) 作業経路の生成では, 周り作業の終了位置をほ場の出入口付近として, 3 周の周り作業経路を, 作業重複幅 15cm を確保して設定し, その周り作業による処理領域を差し引いた往復作業領域を, 10cm 以上の重複幅を確保して往復作業する行程数と経路を設定する。また, 経路に沿う走行と作業の開始/終了位置, 作業をしない移動走行の停止位置などのイベント位置を設定する。

(5) 走行・作業制御部は, ほ場出入口付近の停車位置から往復作業開始位置まで移動する「空走 1 モジュール」, 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」, 往復作業終了位置から周り作業の初期位置まで移動する「空走 2 モジュール」, 枕地部分を 3 周の周り作業により処理する「周り作業モジュール」に分割, 構成した。

(6) これらのモジュールは, 「前進直進制御」, 「後進直進制御」, 「180° 旋回制御」, 「90° 旋回制御」, 「幅寄せ制御」のための共通ルーチンから構成した。前進と後進の直進制御では, 目標経路を維持する操向制御を行うアルゴリズムを, ロボットの位置情報と進行方位情報に基づく操舵制御則を設計して開発した。

(7) 周り作業の各行程間に行う 90° 旋回制御は, 直進作業終了位置からの所定距離分の後進と, 左向き旋回の組み合わせにより行う。最外周である外周 1 と外周 2 の周り作業では, 旋回中に右前車輪が区画境界からはみ出さないように, また既作業域に踏み込まないように行う。内周の周り作業では旋回後の幅寄せ時に既作業域にできるだけ車輪が踏み込まないように行う。

(8) 周り作業における 90° 旋回後の幅寄せ制御では, 幅寄せ程度が大きい場合は前進幅寄せと後進幅寄せを組み合わせ, 幅寄せ程度が小さい場合は後進幅寄せのみにより行うこととした。この制御では, ロボットの動きを小さく抑えて既作業域への踏み込みを小さくしつつ, ロボットの冗長な動きを防止するように車両制御を行った。

第4章 ロボット作業（作業ソフト）の発展—適応性の拡大と信頼性の確保

本章では、前章で述べたロボット作業の標準作業法を実行する作業ソフトをベースに、その適応性の向上・拡大を図った研究について述べる。さらに、ロボット作業を高い信頼性と安全性を確保して開始、実行、終了できるようにするための支援機能について述べる。

適応性の向上・拡大では、標準作業法を実行する「標準作業ソフト」における作業重複幅や作業経路の履行順等を選択・設定できるようにした改良や、区画長辺に対して斜めに往復作業を行う「斜め作業法」や区画4辺に平行な直進作業を区画全面で行う「回り作業法」への展開を行った。斜め作業法は、畝立て栽培後の耕うん・整地を効率的に行うことや矩形でない区画の作業が必要となる斜め方向作業を想定した作業法であり、回り作業法は、収穫や草刈り作業、施肥作業などをロボットにより行うことを前提に提案した作業法である²³⁾。

4. 1 経路等の選択肢に関する改良

標準的なロボットの作業方法である「標準作業法」は、矩形区画の周辺部を除く部分を長辺方向の往復作業により処理し、その後、往復作業における枕地を含む区画周辺部を数周の周り作業により処理する作業方法である。標準作業法の履行において、ほ場条件に応じて作業重複幅や作業順を変更して効率的な作業が行われるようにすることを目的に、作業重複幅の設定や作業経路の履行順

等を選択できるように改良を行った。

4. 1. 1 経路等の選択肢

標準作業法における設定経路は、ほ場の大きさや出入口の位置などの条件によっては、往復作業における作業重複幅が必要以上に大きくなる場合や作業終了位置が出入口から遠くなる場合がある。そこで、ほ場条件に応じて、往復作業の作業重複幅の設定方法や周り作業経路の履行順などを変更して、空走を少なくするなど、より高精度で効率的な作業が行われるよう改良を行った。

1) 作業重複幅の設定と振り分け

ほ場区画の短辺方向の幅が小さい場合、第3章の式(3.14)~(3.16)により求められる作業ピッチ W_c が小さくなる場合がある。往復作業における W_c が小さく作業重複幅が大きいと、既作業域側の車輪が既作業域や既作業域と未作業域の境界線上を通過する場合があります。左右車輪が通る路面の状態の違いにより直進性が低下する場合があります。そこで、行程数は N_c で、往復作業の作業ピッチを式(3.16)の W_c にする場合と、作業ピッチを常に160cm一定とする選択肢を設けた。

作業ピッチを160cm一定にした場合は往復作業領域が広がるため、図4-1の行程 N_c と行程34との作業重複幅が大きくなるが、行程34の経路を行程 N_c と行程24の中央とし、左右車輪の通過路面の条件をほぼ同じにする選択肢も設けた。

2) 周り作業経路の履行順等

図4-1の設定経路例では、周り作業は外周から内周へ進めることとして、往復作業から周り作業への移行における非作業経路等を設定した。しかし、ほ場への出入口が例えば図の右下角にある場合、無人走行・作業の開始、終了点は行程14の延長上に設けるのが適当と考えられる。そこで、周り作業の作業経路は同じで、履行順を内周からとする選択肢を設けた。この選択肢では、図4-1における行程 N_c から内周行程31への移行と、同じ内周の行程間の移行は、後述4.3項の回り作業における巡回制御法(図4-5)を適用した。

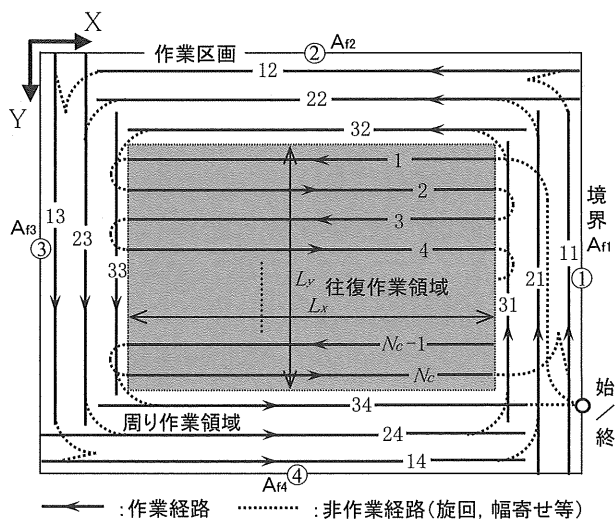


図4-1 標準作業法における設定経路例(同図3-6, 図3-12)^{15) 23)}

また、例えば、区画境界付近に電柱などの障害物がある場合などにおいて、それを回避する走行が必要な場合は、最外周の周り作業を有人運転作業で行うことも、周り作業経路の履行順の選択に関わらず選択できるようにした。

4. 2 斜め作業法

図4-1の標準作業法における往復作業領域を、区画の長辺に対して任意角度の斜め方向に往復作業する作業法を「斜め作業法」として、その経路計画とロボット作業を行う「斜め作業ソフト」の開発を行った。

斜め作業法は、例えば、畝立て栽培後の畝崩しを含む耕うん・整地作業を想定し、標準作業法とは異なる斜め方向に効率的に往復作業する作業法として提案したものである。また、ロボット作業を矩形でないほ場区画でも実施可能とするためには、ほ場区画の大部分を処理する往復作業の作業方向に対して任意の斜め方向となる周り作業を行える必要があり、本斜め作業法は、その任意の斜め方向作業を可能とする方法を提案することも目標とした。

斜め作業ソフトの開発にあたっては、ロボットの位置決め・制御のアルゴリズムは、ロボットの制御性能等を確認済みの標準作業ソフトに極力準ずるようにした。なお、斜め作業法における枕地を含む区画周辺部の周り作業は標準作業法における周り作業と同様に行うこととした。

4. 2. 1 斜め作業法における経路計画と車両の誘導方法

斜め作業法の設定経路例を図4-2に示す。ロボット作業における位置座標系は矩形区画の短辺、長辺と座標軸が平行になるように設定しており、長辺に対して角度 θ の斜め方向作業を行う場合、作業時の目標経路はX切片をDとして、

$$X = -Y / \tan \theta + D \quad (4.1)$$

の直線となる。この経路上の走行のためには、刻々のロボット位置 (X_i, Y_i) が、この直線に沿うように操舵を行う必要がある。

ここで、斜め方向作業のロボットの位置決め・制御のアルゴリズムを、標準作業ソフトのそれに準ずるよう、車両位置 (X_i, Y_i) と目標経路について、斜め角度 θ による下式の座標変換を行い、

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

座標変換を施した Y_t を一定に保つよう操舵することにより、経路上の直進走行が行われるようにした。

図4-2の網掛けした斜めの往復作業領域の長さ L_x と幅 $L_y(L_x \geq L_y)$ は標準作業法のそれと同じとし、領域の対角線長さ L_{xy} 、対角線角度 α は、

$$L_{xy} = \sqrt{(L_x^2 + L_y^2)} \quad (4.3)$$

$$\alpha = \tan^{-1}(L_x / L_y) \quad (4.4)$$

である。斜め往復作業の対角線方向の作業ピッチ W_d 、行程数 N_d 、実作業ピッチ W_a は、それ以上の作業重複幅を確保する目標作業重複幅 d_0 として、

$$W_d = (W - d_0) / \cos(\alpha - \theta) \quad (4.5)$$

$$N_d = \text{INT}((L_{xy} / W_d) + 1) \quad (4.6)$$

(INT() は小数部分を切り捨てた整数を求めるもの)

$$W_a = (L_{xy} / N_d) \times \cos(\alpha - \theta) \quad (4.7)$$

となる。

図4-2の斜め往復作業領域の左上角の点を点P(P_x, P_y)、区画境界線①～④の位置を順に $x = X_{i0}, y = Y_{i0}, x = X_{f1},$

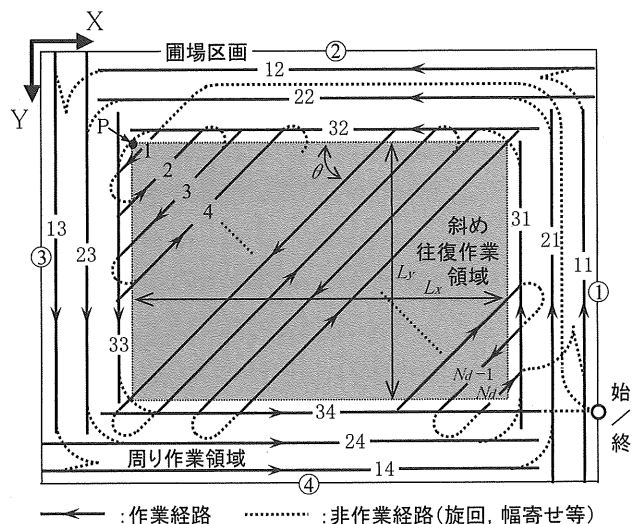


図4-2 斜め作業法における設定経路例²³⁾

$y = Y_{b1}$, 作業幅 W , 周り作業における作業重複幅 d_r とすると,

$$P_x = X_{b1} + 3W - 3d_r \quad (4.8)$$

$$P_y = Y_{b0} + 3W - 3d_r \quad (4.9)$$

であり, 第1行程の経路上の点 $V(V_x, V_y)$ は,

$$V_x = P_x + (Wd/2) \sin \theta \quad (4.10)$$

$$V_y = P_y + (Wd/2) \cos \theta \quad (4.11)$$

となる。ここで, 式(4.2)の Y_i の目標値となる第1行程の経路 Y_{d1} は, 点 V も座標変換を行って,

$$Y_{d1} = V_x \sin \theta + V_y \cos \theta \quad (4.12)$$

となる。第2行程以降の目標経路は, Y_{d1} に実作業ピッチ Wd を順次加えたものとなる。

斜めの往復作業の開始位置, 終了位置は, 刻々のロボット位置 (X_i, Y_i) そのものが, 往復斜め作業領域の内側であるか否かによって判断することとした。実際には, 未作業域を残さないように, 作業領域を X 軸方向に $(W/2 \times \sin \theta)$, Y 軸方向に $(W/2 \times \cos \theta)$ だけ, 両端で広げて作業開始位置, 終了位置の判断を行う。斜め作業ソフトは, 標準作業法の往復作業方法をベースに座標変換を適用して構成, 開発し, 斜め角度 θ は任意に選択できるようにした。

4. 2. 2 斜め作業法における旋回方法

斜め作業法の往復作業における行程端での旋回方法については以下のような特徴を持たせた。

行程端での 180° 旋回では, 区画境界に対する斜め角度と旋回方向によっては, 旋回中に区画境界をはみ出す場合がある。また, 旋回後, 次行程の作業開始位置までの距離が小さく, 十分な幅寄せができない場合もある。そこで, ほ場区画に対する角度が鋭角になる側で 180° 旋回を行う場合, 図4-2では下方及び右方の枕地での旋回時には, 旋回前に一旦後進して旋回中に区画からはみ出すことがないようにした。また, 逆の状況となる旋回, 図では上方及び左方の枕地での旋回時では, 旋回後に一旦後進して幅寄せ距離を確保することとした。これらの旋回におけるロボットの誘導については, 斜め角度 θ に依

じて, その実施及び後進距離が選択, 設定されるようにした。

4. 3 回り作業法

図4-1の標準作業法における往復作業領域も区画4辺に平行な直進作業を順次繰り返して, 区画全面を回りながら作業する「回り作業法」を提案する。

この回り作業法は, 標準作業法における周り作業を区画全面に対して行う作業法ということができる。回り作業法を行う回り作業ソフトについて, 標準作業ソフトの経路計画と周り作業を行うモジュールをベースに, 作業を均等に, かつ円滑に履行できるように経路計画を行い, また旋回における車両誘導法に特徴を持たせて作業ソフトの開発を行った。

4. 3. 1 回り作業法における経路計画

回り作業法では区画4辺に平行な1回りの作業を1単位と考え, まず, 区画全面を処理するための周回数を決定する。1回りの作業によって長辺方向作業を2行程行うので, 区画の短辺方向の幅を適当な作業重複幅となる作業ピッチで除し, 商が偶数になるように周回数を決定する。すなわち, 区画境界線①~④の位置を順に $x=X_{b0}$, $y=Y_{b0}$, $x=X_{b1}$, $y=Y_{b1}$, 区画の幅を T_w , 作業幅 W , 目標作業重複幅 d_0 , 長辺方向作業行程数 N_r , 周回数 N_m とすると,

$$T_w = Y_{b1} - Y_{b0} \quad (4.13)$$

$$N_r = \text{INT}(T_w / (W - d_0)) \quad (4.14)$$

(INT() は小数部分を切り捨てた整数を求めるもの)

$$N_r \text{ が奇数: } N_m = (N_r + 1) / 2 \quad (4.15)$$

$$N_r \text{ が偶数: } N_m = (N_r + 2) / 2 \quad (4.16)$$

となり, 隣り合う行程間の作業ピッチ W_r は,

$$W_r = T_w / (N_m \times 2) \quad (4.17)$$

となる。

このように決定した周回数と作業ピッチで行う回り作業法は, 区画の外側から中央へ回り作業を進めていく経路(以下, 「回り作業法1」), 中央から外側に向かって回り作業を進めていく経路(以下, 「回り作業法2」)の2

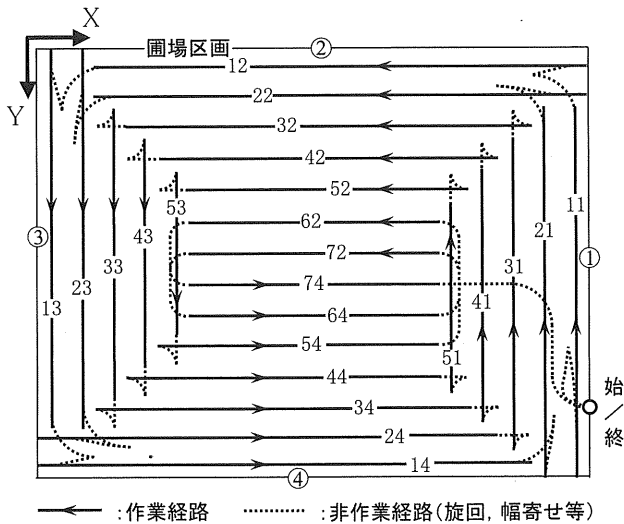


図 4-3 回り作業法 1 における設定経路例²³⁾

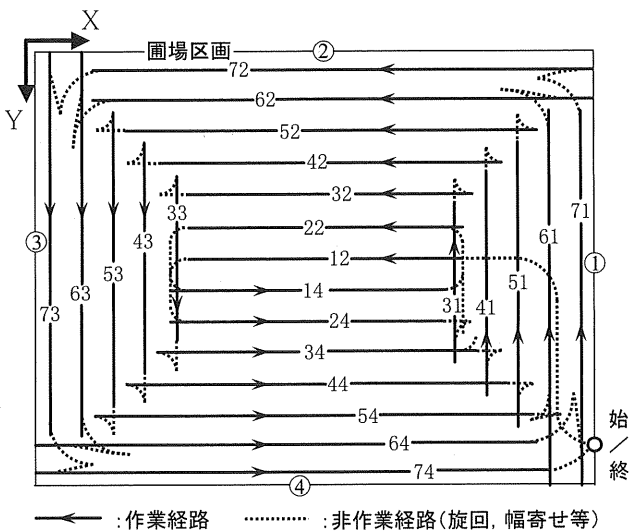


図 4-4 回り作業法 2 における設定経路例

通りを行えるようにした。

回り作業法 1 は、収穫や草刈り作業などを行うことを前提とした作業法であり、その設定経路例を図 4-3 に示す。なお、図における区画中央付近の 6 周目と 7 周目は、短辺方向作業の作業距離がかなり小さくなるため、長辺方向作業のみ（図の経路：62, 64, 72, 74）を行うこととした。回り作業法 2 は、耕うん作業や施肥作業などを行うことを前提とした作業法であり、その設定経路例を図 4-4 に示す。

4. 3. 2 車両の誘導方法と旋回方法

この経路に沿うロボット作業は、標準作業法と同様、第 3 章で述べた経路上の直進制御法や旋回制御法、幅寄

せ制御法を用いて行う。ただし、回り作業法では行程間の旋回はすべて 90° 旋回であり、前進と片ブレーキを使わない後進旋回を行って、ほ場表面をできるだけ荒らさないようにした。また、旋回や幅寄せ時に、回り作業法 1 では未作業域への踏み込みを少なくするように、回り作業法 2 では既作業域の踏み付けを少なくするように車両誘導を行った。

旋回での車両誘導では、区画周辺部の 2 回り（図 4-3 の 11-24 行程）では標準作業法の周り作業時と同様の旋回を行う。それ以外（図 4-3 の 31-54 行程）では、図 4-5 に示すように、直進作業終了後、距離 L_f だけ空走前進し、その後、舵角一定（50° 程度）で後進による 90° 旋回を行う。旋回後は前進と同時に幅寄せを行い、作業開始位置になった時点で作業機を下げ、直進作業を開始するようにした。この一連の旋回誘導において、旋回前の前進空走距離 L_f の大きさは、初期値としての適当な値 L_{f0} により最初の前進と旋回を行い、旋回後の前進幅寄せ距離 d_r の大きさによって、次の旋回における L_f を適正値に修正することとした。つまり、

$$L_f = L_{f0} - d_r \quad (4.18)$$

なる修正を行って、前進空走距離 L_f を調整することにより、旋回後の車両位置が直進作業の経路上にできるだけ近くなるようにした。この修正は旋回を行う毎に実施され、ほ場表面の状態などによって変化する後進の旋回半径を、実際の車両誘導結果に基づいて学習することを意図したものである。

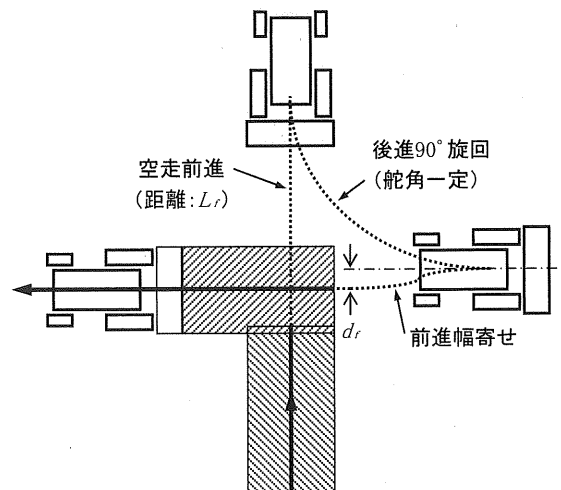


図 4-5 回り作業法における 90° 旋回の方法²³⁾

回り作業ソフトは、標準作業ソフトの経路計画と周り作業を行うモジュールをベースに、行程間の旋回における車両誘導方法等を変更して開発した。

4. 4 自己診断と異常時対応

ロボット作業を高い信頼性と安全性を確保して開始、実行、終了できるようにするための支援機能として、ロボット各部の動作状況などを作業前にチェックする「自己診断」の機能と、作業中の異常等を検出し適切な対応を行う「異常時対応」の機能を検討し、それらを履行するプログラムを開発して作業ソフトに付加した。

ここでは、その自己診断と異常時対応の項目や内容、オペレータによる対応、機能や動作の確認試験について述べる²²⁾。

4. 4. 1 計測・制御システムと異常等の報知

自己診断や異常時対応を確実に実施するためには、航法システムやロボット車両各部の状態を高い信頼性で検出できる必要があり、また、異常等の検出を報知し、その対応を適正かつ円滑に行われるようにする装置も必要である。これらに対応するロボット車両の計測・制御システムや表示・入力装置については第2章の2.5項、2.6項、及び2.7項で述べた。

異常の検出や発生をオペレータ等に報知する方法として、ロボットの見えやすい位置に装備した警告灯（(株)パトライト製）を点灯させ、またロボットのベース車両である市販トラックのホーンを鳴動させることとした。図4-6にベース車両の安全フレーム側方に装備した警告灯を示す。

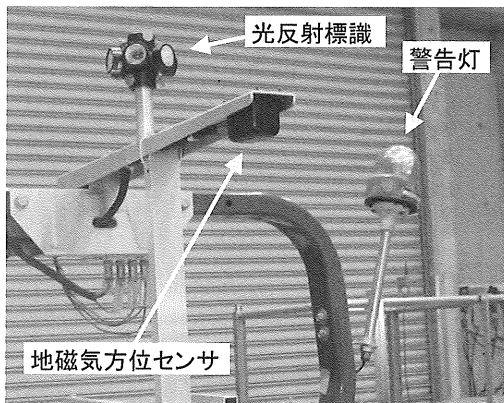


図4-6 安全フレーム側方に装備した警告灯

4. 4. 2 オペレータによる初期設定と自己診断

ロボット作業を開始する際、航法システムから航法情報が正常に取得できない、ロボット各部の設定が不適切、制御対象が正常に動作しないなどの状況にあると、作業の開始や適正な実行、継続が行えないことになる。

そこで、ロボット作業を開始する前に、航法情報やロボット各部の設定、制御対象の動作などをロボット自身がチェックし、異常があった場合はオペレータに知らせ、その内容と対応方法を表示して対応を要求する自己診断ソフトを開発・作成し、作業ソフトに組み込んだ。

ロボット作業を行う場合、オペレータにより航法システムやロボットの初期設定が行われ、作業ソフトの起動とソフト上の初期設定が終了すると、自己診断が実施される。以下に、オペレータによる初期設定と自己診断の項目や要領を述べる。

1) オペレータによる初期設定

初期設定では、ロボットの作業区画内への移動、航法システム XNAV の設定・起動、ロボット各部の設定、作業ソフトの起動・実行が順に行われる。作業ソフトの起動・実行では、初めての作業ほ場でロボット作業を行う場合には、作業区画の大きさ等を取得・設定するティーチングの実行を選択し、作業区画の最外周を有人運転により一周してティーチングデータの取得・設定を行う（第3章の3.2.3項、3.4.1項参照）。

以下に、XNAV の基準局が作業区画の近くに設置してあり、ティーチングデータが既に取得・設定済みである場合の初期設定等の手順、要領を記す。

a) ロボットの作業区画内への移動

矩形の作業区画の角部に近い短辺上に出入口があることを前提に、その出入口から作業区画内に入り、ロボットをほぼ長辺方向に向けて停止する。

b) XNAV の設定・起動

第2章2.3.1項に述べた基準局の位置計測装置 AP-L1 と無線通信モデム付きの基準局コントローラ（ノート PC）の電源 ON、ほ場定点に設置してある光反射標識の AP-L1 による視準と数値入力、及びノート PC の位置情報処理・通信ソフトの起動を行う。この手順のうち、ほ場定点の光反射標識の視準と数値入力は、作業区画の位置座標系を設定するための処理であり、これらの XNAV

に係わる設定・起動に要する時間は数分である。

c) ロボット各部の設定

ロボット上のコントローラの起動や各部の設定の手順を以下に示す。

- (i) ロボットのメインコントローラ電源 ON, 作業ソフトの起動
- (ii) 作業機の作業時位置を油圧ポジションレバーにより調整した後, 作業機昇降スイッチにより作業機を上げ
- (iii) PTO 変速レバー及び主・副変速レバーを適当な速度段に設定
- (iv) 旋回などの非作業時の機関回転数を「パートスロットル回転数」として, スロットルレバーにより手動設定
- (v) ロボットの運転モードスイッチを ON し, 自動運転モードに設定

なお, これらの設定はすべて手動で行い, 設定の順番は前後しても特に問題はない。また, これらの設定項目, 要領は作業ソフト起動後の初期画面に表示するようにしている。

d) 作業ソフトの実行

ロボット上ディスプレイの画面表示に従って数値等の入力を行う。設定・入力項目は, ティーチングデータのファイル名入力, 作業経路の選択, 設定速度段である。作業ソフトの設定・入力が終了すると, 下記の自己診断が実行される。上記 c) のロボット各部の設定と作業ソフトの実行に要する時間は, 自己診断において不適な設定等があった場合の対応により時間が変わってくるが, 5~10 分程度である。

2) 自己診断の項目と内容

表 4-1 に自己診断の項目と内容例をチェックの実施順で示し, 以下に各項目の要点を述べる。チェックの結果が不適な場合の対応等については, 次項 3) に述べる。

a) 位置情報

ロボットの位置情報について, その取得・通信状態が正常であること, 現取得位置が作業区画内の初期位置付近にあることをチェックし, チェック結果が適正であれば次のチェックへ移行する。

b) 方位・傾斜情報

表 4-1 自己診断の項目と内容例²²⁾

No.	項目	チェック内容 [例]
1	車両位置情報	①正常取得? ②適正初期位置?
2	車両方位情報	①正常取得? ②長辺方向?
3	車両傾斜情報	①正常取得? ②ロール角/ピッチ角 小? [$< 8^\circ$]
4	燃料残量	燃料は十分? [$> 1/2$]
5	運転モード	自動運転モード(自動スイッチ ON)?
6	油圧レバー	下位置? [$<$ 中央位置]
7	PTO 変速	PTO 変速入り?
8	自動操舵	左/右の自動操舵? [左/右 5°]
9	機関回転制御	パート⇒フル⇒パートスロットル?

ロボットの進行方位情報と車両の傾斜情報であるロール角, ピッチ角について, それらの情報の正常取得や現取得情報が適正であることをチェックする。

c) ロボット各部の設定

表 4-1 の No.4~7 のチェックは車両コントローラを介した状態取得, 基準値との比較によって行われる。走行速度段である主・副変速レバー位置の設定チェックは, その計測手段を備えていないために実施していないが, リミットスイッチ等の装備による計測, 設定チェックは容易に付加可能である。

d) 自動制御対象

自動操舵とスロットル制御つまり機関回転の上げ/下げについては, その場で自動制御が行われ, センサ出力により適正な制御の履行がチェックされる。前進・後進/停止の切替えであるシャトル変速と作業機昇降の制御は, 作業の開始後すぐに動作の確認ができること, 自己診断中の制御は急発進等の危険が伴うことから, 自己診断中では実施していない。ブレーキの駆動については, 初期設定や自己診断中にロボットが動かないように, 運転モードスイッチが ON された時点でブレーキがかかるようにしており, その際にチェックできる。機関停止機能のチェックについては現状では自己診断に含めていないが, 非常停止のための機能として, そのチェックはロボット車両の保守点検として時々行う必要がある。

3) 自己診断における不適時の対応と作業の開始

a) 不適時の対応

前項 2) の a) ~ d) のチェックにおいて, チェックの結果が不適であった場合は, 各チェックが行われる毎

にオペレータに対応を求める手順を踏んでいる。その流れは以下の(i)~(iv)である。

- (i) ホーンを鳴らして、自己診断で不適があったことをオペレータに報知
 - (ii) ディスプレイに不適な項目と内容、及び必要な対応を表示
 - (iii) その表示に従ってオペレータが不適な項目・内容を解消する対応を行い、対応が終了したらキーボードのリターン・キーを押す
 - (iv) リターン・キーが押されたら再チェックが行われ、再チェックの結果が適正なら次のチェックへ移行
- (ii)のディスプレイ表示については、例えば、表4-1のNo.6の油圧レバーの位置チェックまでが適正であり、No.7のPTO変速入りのチェックが不適であった場合の表示を図4-7に示す。その表示に従ってPTO変速を入れ、

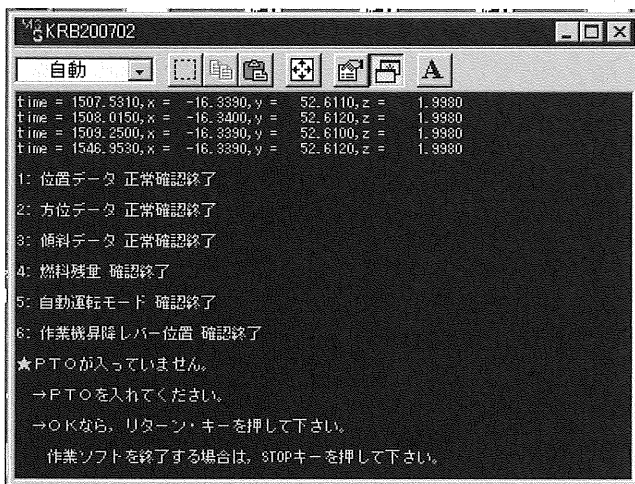


図4-7 自己診断におけるディスプレイ表示例1²²⁾

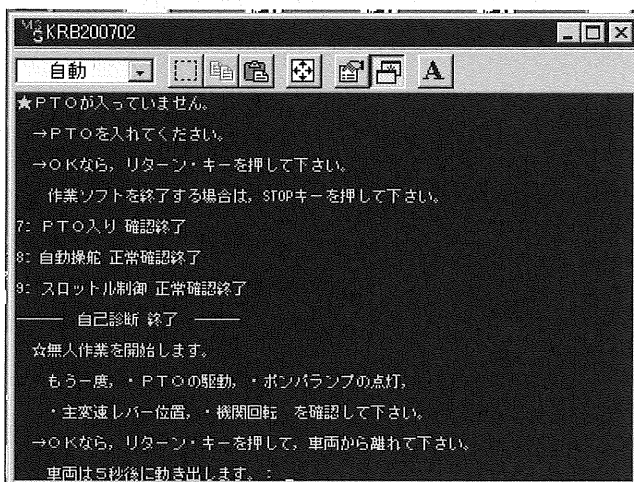


図4-8 自己診断におけるディスプレイ表示例2²²⁾

リターン・キーを押した後の表示は図4-8となる。同図には、その後の自動操舵、スロットル制御のチェックが適正で、作業を開始できるまでの表示が含まれている。

b) ロボット作業の開始

すべての項目の自己診断が終了し、適正であればロボット作業の開始となる。図4-8の「自己診断 終了」後の表示に従ってリターン・キーが押されると、5秒後に作業が開始される。

4. 4. 3 異常時対応

ロボット作業において、作業環境の変化やロボット自身のトラブルにより適正な作業を続行できないような異常事態が発生することがあり、場合によっては、暴走などの危険な状況やロボット自身の損傷など修復不能な状況に陥ることも想定される。

そこで、作業中に、航法情報の取得や走行・作業の状態などをロボット自身がチェックし、異常があった場合は走行や作業を自動停止し、オペレータに異常の発生を報知して対応を求める異常時対応を行うプログラムを開発・作成し、作業ソフトに組み込んだ。

1) 異常の検出と対応

ロボットが作業中にチェック、検出する異常と対応を表4-2にまとめて示す。位置情報と走行速度に関する異常時対応については、詳細を以下に述べる。オペレータによる対応とロボット作業の復帰については次項2)に述べる。

a) 位置情報

作業中は、終始、位置情報のチェックが行われ、そのチェック、異常時対応の流れ例を図4-9に示す。

(1) 位置情報 1, 2

位置データが2s以上正常取得・更新されない場合には位置異常アラーム1を発生する。このアラームは、基準局のAP-L1がロボット上の光反射標識の追尾を見失った場合など、位置データの正常な取得が行われない場合に発生するが、AP-L1には光反射標識見失い時の自動探索・追尾復帰機能があるため、このアラーム発生時には走行を一時停止し、警告灯のみを点灯して一定時間復帰を待つ対応を行う。復帰の待ち時間は30sとしている。

一定時間待っても位置データの正常取得が再開され

表 4-2 異常時対応の項目と内容例²²⁾

No.	項目	異常の判断 [例]	対応 [*]
1	位置情報1	位置データの異常? あるいは更新なし? [$<30s$]	走行停止, 警報(警告灯), 自動復帰待ち
2	位置情報2	更新なし? [$\geq 30s$]	走行停止, 警報, 表示
3	位置情報3	位置データ区画外?	走行停止, 作業機上げ, 警報, 表示
4	走行速度1	速度超過? [$>$ 作業時 V_{s1}]	走行停止, 作業機上げ, 警報, 表示
5	走行速度2	速度低下? [$<$ 作業時 V_{s2} / 空走時 V_{s3}]	走行停止, 警報, 表示
6	車両傾斜	ロール角/ピッチ角 大? [$>15^\circ$]	走行停止, 機関停止, 警報, 表示
7	作業状態1	作業機-作業位置(下位置)?	走行停止, 警報, 表示
8	作業状態2	機関回転数低下(過負荷)? [$<$ フルスロットル $\times 60\%$]	走行停止, 警報, 表示
9	自動制御	メイン/車両コントローラ間情報通信 正常?	通信リセット, 走行停止, 警報, 表示
10	燃料残量	燃料残量少? [$<1/4$]	走行停止, 警報, 表示
11	障害物検出	障害物への接触? [バンパースイッチ ON]	機関停止, 警報, 表示

※「警報」はNo.1の対応(警告灯のみ)を除き, 警告灯+ホーン。
 「表示」はディスプレイへの異常内容や対応等のメッセージ表示。

ない場合は, 位置異常アラーム2を発生し, 警告灯とホーンにより異常を報知(以下, 「異常報知」), 「★位置データが取得できません。⇒AP-L1などをチェックして下さい。」のメッセージをディスプレイに表示して, オペレータに対応を要求する。

(2) 位置情報3

正常取得された位置データが設定した作業区画外のデータである場合は, 即, 位置異常アラーム3を発生させ

る。このアラームは, 何らかの原因によりロボットが区画外に出た場合, もしくは位置情報取得システムに異常があった場合に発生するが, 畦畔の乗り越えや暴走などの危険な状況が想定されるので, 走行停止, 作業機上げ, 異常報知を行い, 「★ロボット位置が区画外, あるいは位置データが異常です。⇒必要に応じ, 自動ボタンをOFFし, 手動運転で移動して下さい。」を表示する。

b) 走行速度

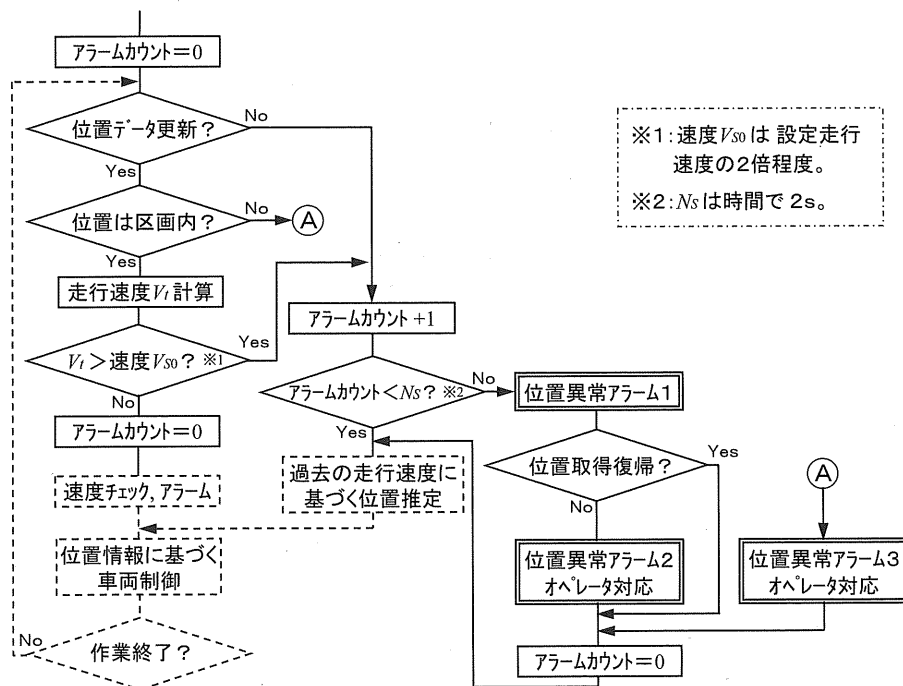


図 4-9 位置情報に関する異常時対応の流れ例²²⁾

上記 a) の位置情報チェックで正常と判断された位置データの時間的変化からロボットの走行速度を算出し、3つの速度基準値 V_{s1} , V_{s2} , V_{s3} により速度のチェックを行い、また、旋回時にはロボットの進行方位データの時間的変化をチェックする。基準値 V_{s1} , V_{s2} , V_{s3} の値は、設定走行速度に対して、順にその1.5倍、0.5倍、0.3倍を標準の値とした。

(1) 走行速度 1

作業時の走行速度が V_{s1} を超えた場合は速度超過アラームを発生する。このアラームは、ロータリ耕におけるダッシング現象等により走行速度が設定以上に早くなった場合に発生するが、暴走など危険な状況が想定されるので、走行停止、作業機上げ、異常報知を行い、「★速度が速すぎます。⇒ダッシングの場合は速度段を落とす、耕深を浅くする等の対応をして下さい。」を表示する。

(2) 走行速度 2

作業時の走行速度が V_{s2} 以下になった場合、非作業時の走行速度が V_{s3} 以下になった場合、あるいは旋回時の車両の方位データの時間的変化が小さい場合は、速度低下アラームを発生する。このアラームは、スリップ等により走行速度が遅くなった場合や、何らかの原因でロボットが発進しない、あるいは止まってしまった場合に発生するが、走行停止、異常報知を行い、「★走行異常です。シャトル変速の異常か、スリップが考えられます。⇒スリップの場合は、自動ボタンをOFFし、手動運転で作業を再開する位置に移動して下さい。」を表示する。

2) オペレータによる対応とロボット作業の復帰

上記1) a) (1) の位置異常アラーム1の場合を除き、各アラームが発生した場合、異常報知がなされるので、オペレータはロボットに乗車し、ディスプレイの表示に従って異常への対応を行う。対応は、基本的にオペレータによる各部のチェックや操作、調整と、キーボードとディスプレイを用いたロボットのコントローラとの対話によって進められる(図4-10)。

ロボットが区画外に出た場合やスリップ時、燃料補給などの対応では、ロボットを任意に移動させることも必要であるため、オペレータが運転モードスイッチをOFFにすれば手動運転ができるようにしている。異常な状態を解消するための対応を行い、正常な状態への復帰がな

されたと判断される場合は、各アラームで表示される「対応が終了したら、リターン・キーを押して下さい。」に従ってリターン・キーを押すと、必要に応じて異常な状態の再チェックが行われ、次の指示が表示される。

次の指示は、位置情報アラーム2や燃料補給アラームの場合は、速度段を変えるような対応は行われないので、「作業を再開します。リターン・キーを押せば、3秒後に作業を再開します。」を表示し、キーボードのリターン・キーが押されたことが確認され次第、3秒後にロボット作業が再開される。なお、作業の再開では、各アラーム発生時点のロボットの状態が記憶されており、その状態が再現されるので、通常、リターン・キーを押すだけで適正に作業が再開される。

オペレータが走行速度段を変える対応を行う可能性があるアラーム発生時には、「走行速度段を変えましたか? 変えた場合は『100』を、変えない場合は『0』をキーインして下さい。」が表示される。その表示に対して『100』をキーインすると走行速度段の入力要求の表示画面が出て、変更した走行速度段を入力すると、速度に応じたパラメータである走行・作業時の自動操舵ゲインや走行速

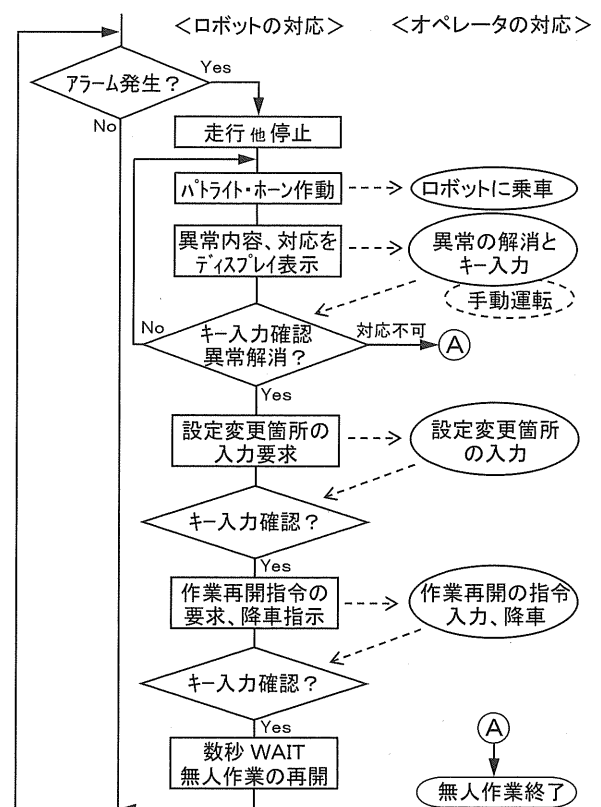


図4-10 異常時対応におけるロボットとオペレータの対応²²⁾

度アラームの基準値などが書き換えられる。

さらに、速度超過アラームや作業状態アラーム、自動制御の通信異常アラームの場合は、異常が検出されてロボットが停止するまでの間に適正作業が行われなかった区間が残る場合もあり、その場合には、手動運転により必要な移動と作業を行った後にロボット作業を再開することを可能とした。その対応を行った場合の作業の再開では、ロボットの状態をアラーム発生時点とは異なる状態に変える必要がある場合も想定され、キー入力により作業再開時のロボットの状態を変更できるようにした。

以上のような対応を行った後にロボット作業の再開がなされるが、アラームの発生に対して、異常な状態の解消や正常な状態への復帰が行えないと判断される場合は、オペレータにより作業ソフトの実行をその場で中止し、その後の作業は手動運転により行うことができる。

4. 4. 4 自己診断や異常時対応の動作確認

開発、作成した自己診断機能と異常時対応機能の動作について、実際に異常や不適な状態を作って確認試験を行った。以下に、表4-1と表4-2の各項目について実施した動作確認試験と結果、及び各チェックにおける基準値の設定などに関する考察を述べる。

1) 自己診断機能の動作確認

表4-1のNo.1~3の車両位置、方位、傾斜情報については、航法システムXNAVの基準局からの位置情報の送信/非送信、方位センサと傾斜センサの信号線の接続/非接続、及びロボットの初期位置や初期方位、車両傾斜の適/不適な状況を作って動作確認試験を行い、各項目のチェック及び対応の正常動作を確認した。実際の作業前の航法情報や車両情報のチェックでは、情報の取得や通信がセンサの異常や信号線の断線等により正常に行われない状況を確実にチェック、検出できることが重要であり、情報が正常である場合のデータ範囲を考慮して基準値の設定を行った。

No.4の燃料残量については、ロボット車両の燃料計表示が目視でほぼ1/2、及び $1/2 \pm 1/16$ となる状況を作り動作確認試験を実施した結果、表示が1/2の状況で「残量不足」と判断される場合とされない場合があった。燃料残量センサの精度やロボットの傾斜の影響により残量

検出値の再現性は必ずしも高くないので、その程度を考慮した基準値の設定が必要である。

No.5~7のチェックについては、電気スイッチのON/OFF検出やポテンシオメータ出力の2値判断による状態検出が確実に実行され、問題なく自己診断の機能が働くことを確認した。

No.8の自動操舵の動作チェックは停止状態で行われるため、ほ場面の抵抗により指令舵角どおりの操舵舵角が得られず、自己診断結果が「不適」となることがしばしばあった。そのため、動作チェックの基準値(表4-1では左/右 5°)を小さめにして自動操舵の可否のみをチェックし、自動操舵の精度チェックはロボットの保守点検として別途行うこととした。

No.9の機関回転制御のチェックについては、ベーストラクタの回転計の検出精度が比較的高く、自動制御の可否、及びパートスロットルとフルスロットルの回転数をチェックする機能は問題なく動作した。

2) 異常時対応の動作確認

a) 位置情報1, 2

表4-2のNo.1とNo.2の項目について、作業中にXNAVの基準局装置AP-L1によるロボット上の光反射標識への追尾を一時的に遮って、位置情報の計測、送信が行われない状況を作り、30s以内の自動復帰(位置情報1の対応)、または30s以上復帰なし時の対応(位置情報2の対応)の動作を試験した。

走行方向が異なる5回の試験の結果、AP-L1による追尾を遮ってから平均4.0sで異常時対応としての走行停止が行われ、走行停止後にAP-L1の前から人が退くと30s以内(平均28.1s)に標識の探索、追尾の復帰が行われ、位置情報1の対応が正常に行われた。走行停止後も追尾を遮り続けた場合は、30s後に位置情報2の対応が行われることを確認した。

この試験において、追尾を遮ってから走行停止までに約5秒を要したが、その原因は、位置データの更新が無くとも2秒間は進行方位情報のみに基づく自動操舵が行われ、その後に異常時対応の処理が行われるためである。また、自動復帰の待ち時間30sは、AP-L1による標識見失い時の自動探索・追尾復帰時間を、ロボットの走行速度が1.0m/s程度までの状況で試験、調査した結果

に基づき設定した基準値である。

b) 位置情報3

区画境界に近い場所のロボット作業中に、ロボット上の標識のみを区画外に故意に持ち出すことによって位置データが区画外となる状況を作り、表4-2のNo.3:位置情報3の異常時対応について動作確認試験を行った。標識の区画外への持ち出しは、速度異常などの他の異常時対応が動作しないよう作業時の走行速度と同程度の速さで、かつAP-L1による追尾を外さないように注意して行った。

5回の試験の結果、標識が区画外に出て位置データが区画外になった後、平均2.0sで異常時対応としての走行停止が行われた。この結果から、走行速度約0.5m/sの作業中に区画外へ出た場合、最大1m出た時点で走行停止が行われることとなる。現状のロボットでは、標識はロボットの左右方向中央の後車軸上に設置されているため、標識が区画外に出た瞬間に走行停止が行われてもロボットの大半が区画外に既に出ている状況となる。この対応では危険を未然に防ぐには不十分と考えられ、本異常時対応の判断基準値は標識の位置を考慮して区画境界よりも内側に設定する、あるいは区画外へのロボットのはみ出しを検出するセンサをロボット外周部に別途装備し、適切な位置で迅速な非常停止が行われる対応が必要と考えられる。区画外へのはみ出しを検出するセンサとしては、区画境界の畦畔等を地面の凹凸として検出する超音波センサやレーザスキャナ等が考えられるが、その選定では、地面の凹凸と作物や雑草、畝等を確実に識別・検出できる必要があることなどを考慮する必要がある。

c) 走行速度1, 2

速度超過に関する走行速度1の対応ではチェックの基準値を設定速度 $\times 1.5$ とし、速度段H-1(設定速度0.5m/s)での作業中に速度段を故意に上げて速度超過の対応が行われるか否かを試験した。また、速度低下に関する走行速度2の対応ではチェックの基準値を設定速度 $\times 0.5$ とし、速度段L-8(設定速度0.48m/s)での作業中に速度段を故意に下げて速度低下の対応が行われるか否かを試験した。なお、走行速度1と走行速度2の試験において、試験開始時の速度段がH-1とL-8で異なるものとしたのは、ベアストラクタの変速機構から、走行速度1の試験では『H-1速→H-2速→H-3速・・・』の速度段上げが、

走行速度2の試験では『L-8速→L-7速→L-6速・・・』の速度段下げが、クラッチの断続なしで滑らかに行えるためである。

走行速度1の異常時対応の試験を5回行った結果、速度超過の基準値が0.75m/sである状況で、速度段H-1で作業中に速度段をH-2(設定速度0.71m/s)に上げててもアラームは発生せず、H-3(同0.87m/s)に上げることによりアラームが発生、走行停止が行われた。試験時のAP-L1計測位置情報から走行速度の変化を調べた結果でも、アラームが適正に機能したことが確認されたが、走行速度が基準値を超えてから走行停止までに約3.1sを要していた。この対応では、例えば、作業行程の終わりに近い状況でダッシングが起きて速度超過が発生した場合は、異常時対応が行われても区画をはみ出す可能性がある。現状では、アラーム発生の条件を基準値以上の速度が3回連続検出されることを条件としており、より安全側の対応を行う場合は基準値の大きさと速度超過の連続検出の回数を減らす必要がある。

走行速度2の対応についての試験では、速度段L-8での作業中(設定速度0.48m/s)に速度段をL-5(設定速度0.21m/s)まで落とした場合にアラームが発生し、速度低下の基準値が0.24m/sであることから、適正なアラームの発生が確認された。本対応は、走行速度1の速度超過の対応ほど確実性・迅速性が必要ではないが、作業負荷の変動による若干の速度低下には反応せず、スリップ等の作業の継続に支障がある場合には確実に機能する基準値の設定が必要であると考えられた。

d) 車両傾斜ほか

表4-2のNo.6~8, 10の項目について、車両傾斜の対応では作業区画を大きめに設定して畦畔に乗り上げる状況を作り、作業状態1では最初の往復作業の開始前に故意に油圧レバーを上げて作業機が下がらない状況を作り、作業状態2では耕うん作業中に故意に耕深設定を深くして作業負荷を増し機関回転数が低下する状況を作り、また燃料残量では燃料残量が1/4以下の状況を作って、各対応の動作確認試験を行った。

試験の結果、いずれの項目についても所期の動作が正常に行われることが確認された。これらの項目の中では、作業状態2の対応において機関回転数のチェック基準値を低めに設定すると、作業負荷の増大により機関回転数

が低下して異常が検出された時には機関停止つまりエンスト寸前であり、そのままエンストする場合があった。その基準値はトラクタのエンジン性能や自動耕深調節機構の動作状況を考慮して設定する必要がある。

e) 自動制御

No.9の自動制御が不可の場合の対応では、ロボット作業中に故意に運転モードスイッチを自動 OFF にして自動制御が行われない状況を作って確認試験を行った。この試験により異常の検出までは行われたが、自動制御が不可の状況なので当然の結果として走行停止などの対応は行われなかった。

これまでの700時間を超えるロボット作業の中で、自動制御が正常に行われなかった異常はメインコントローラと車両コントローラ間のシリアル通信の異常によるものが数回あったが、作業ソフトによる通信の自動リセットにより正常な通信及び自動制御への復帰が行われ、ロボット作業の履行に大きな問題は無かった。しかし、コントローラの異常により各部の自動制御が行えなくなると暴走することも考えられるので、コントローラの異常を確実に検出し強制的に機関停止を行うなどの対応が必要と考えられる。

f) 障害物検出

障害物検出の対応では、ロボット前部に装備したバンパースイッチと超音波センサが障害物に接触または障害物を検出した場合に、車両コントローラ内のみの処理により即座に機関停止が行われ、その後、警報やディスプレイ表示が行われる。作業中にバンパースイッチに物を接触させる試験を行った結果、接触により機関停止が行われてロボットが停止するまでの時間、距離は、速度約0.5m/sでの作業中で0.4s以下、約0.35mであり、警報と表示の対応も問題なく行われた。

障害物が人の場合は、非接触型センサが数m手前で確実に人を検出して異常時対応が機能することが望ましい。しかし、ロボットに装備している超音波センサは植生等による誤動作もあって機能しないようにしており、適正に機能・動作する非接触型障害物センサの選定、装備が必要である(第8章8.2.1項参照)。

4.4.5 ロボット作業における動作・適応性に関する考察

自己診断と異常時対応の機能を組み込んだ作業ソフトにより、これまでに約120ha、700時間以上の作業試験やデモンストレーションを行って、自己診断機能は問題なく動作し、異常時対応機能も希ではあるが所期の動作が行われ、ロボット作業を円滑に開始、実行、完了することができた。

しかしながら、上記の動作確認試験の結果から、異常時対応において異常が検出されてからロボットの走行停止が完了するまでに時間がかかるという課題があった。異常の内容によっては、動作時間が短い燃料供給カットによる機関停止の対応を行う、走行停止が速やかに行われるような制御機構の見直し・改良を行う必要があると考えられた。また、設定した基準値の大小により、異常な状態ではないにもかかわらず異常と判断してしまうことや、異常な状態であるにもかかわらず異常が検出されないことも想定される。そのため、基準値の設定では、各種の条件下での動作確認試験により適正な基準値を検討するとともに、ロボット作業を行うほ場や作業の条件に応じた適正な基準値を選択・設定する必要がある。さらに、ロボット各部の状態を検出するセンサの出力値や出力特性は経年変化することがあるので、それらの出力を定期的に確認し、必要に応じてセンサ等の較正、あるいは基準値の変更を行う必要があると考えられる。

4.5 摘要

ロボット作業の適応性向上・拡大の研究として、標準作業法における作業重複幅や作業経路の履行順等を選択・設定できるようにした改良や、区画長辺に対して斜めに往復作業を行う「斜め作業法」や区画4辺に平行な直進作業を区画全面で行う「回り作業法」への展開を行った。

さらに、ロボット作業を高い信頼性と安全性を確保して開始、実行、終了できるようにするために、作業前に実施する自己診断と作業中に行われる異常時対応を行うプログラムを開発・作成し、作業ソフトに組み込んだ。

(1) 慣行のロータリ耕作業法に準じた標準作業法を実行する標準作業ソフトについて、ほ場の大きさなどの条件に応じて作業重複幅の設定方法や設定経路の履行順などを変更、選択できるようにした。

(2) 斜め作業法は、畝立て栽培後の耕うん・整地を効率

的に行うことや矩形でない区画の作業で必要となる斜め方向作業を想定した作業法である。

その斜め作業ソフトは、標準作業ソフトをベースに開発し、斜め作業の経路計画と車両誘導では斜め角度に基づく座標変換を適用することにより、任意の斜め作業角度を設定・履行できるように開発を行った。

(3) 回り作業法は、収穫や草刈り作業、施肥作業などをロボットにより行うことを前提に提案した作業法であり、標準作業法における周り作業を区画全面に対して行う作業法といえることができる。

回り作業ソフトについて、標準作業ソフトの経路計画と周り作業を行うモジュールをベースに、区画外側から中央に向かって作業を進める方法と、逆に、中央から外側へ作業を進める方法の経路計画とロボット作業を実行する作業ソフトの開発を行った。本作業ソフトでは、作業を均等かつ円滑に履行できるような経路計画と、旋回における車両誘導法に特徴を持たせた。

(4) 自己診断や異常時対応を確実に実施するために、ロボット車両各部の状態を検出できるシステムを構成し、また、オペレータとロボットが対話を行うための表示・

入力装置を備えた。

(5) 作業前のオペレータによる初期設定として、航法システムの設定・起動、ロボット各部の設定、作業ソフトの起動・実行を順に行い、その所要時間は5~10分程度である。

(6) 自己診断では、航法情報の正常な取得やロボット各部の適正な設定・動作などをロボット自身がチェックし、異常があった場合は、オペレータに異常の内容と対応方法を表示して対応を要求する。

(7) 異常時対応では、航法情報の取得や走行・作業の状態などを適宜チェックし、何らかの異常があった場合は、走行や作業、機関の停止、異常報知などが行われた後に、正常な状態への修正や復帰処理がオペレータとロボットの対話により進められる。

(8) 自己診断と異常時対応の機能は、各項目の動作確認試験を行って所期の動作が行われることを確認した。また、これらの機能を組み込んだ作業ソフトにより、これまでに多くの作業試験やデモンストレーションを行って、いずれの機能も問題なく動作し、ロボット作業を円滑に開始、実行、完了することができた。

第5章 ロボット作業の性能評価

本章では、ここまで述べた航法システムとロボット車両、及び作業ソフトを統合したロボットの性能評価に関して、ロボット作業の評価試験を行うために策定した試験方法と、その試験方法を適用して行ったロボット作業の評価試験の結果について述べる。

5. 1 無人作業の評価試験方法

ロボットの性能評価を行うに当たって、車両系ロボットの性能やロボット作業の効果等を評価する試験方法の存在を調べたが、試験方法として確立されたものは見あたらなかった。そこで、生研センターの評価試験部や、ロボットの研究・開発で協力を得た北海道大学農学部、山形県農業試験場などに意見を求め、農作業を行う車両系ロボットの性能や効果等を評価する試験方法の策定を行った¹⁶⁾。なお、本項では、検討・策定した評価試験方法の対象を、従来の試験方法の対象である有人運転作業と対比して「無人作業」という。

5. 1. 1 試験方法の構成

試験方法は、ロボット作業の能率や精度を確認する作業性能試験、無人作業を行うための機器の設置や初期設定等の難易、安全性等を確認する取扱い試験、耐環境性

やロボット作業の安定性、信頼性を確認する信頼性試験により構成した。

ロボットの作業性能試験では、枕地を含めた区画全面を作業し、作業時間や作業軌跡、作業が行われなかった面積、既作業域を車輪で踏付けた距離、区画外へのはみ出しなどを計測し、無人作業の性能を評価する。また、ロボット車両を有人運転作業する慣行作業も同じ試験方法の下で実施し、対照試験とする。取扱い試験では、数名の試験員が機器の設置や設定などを実際に行って評価を行う。信頼性試験は、何回かの作業性能試験を通じて、ハードウェアの耐環境性やソフトウェアの信頼性などを評価することとした。

5. 1. 2 計測・算出項目と評価

表 5-1 に作業性能試験において計測、評価するための項目の一部を示す。

表 5-1 の項目において、「総時間」は作業のために必要な全作業時間であり、無人作業では、作業前に行う航法装置の設置やロボットの初期設定の時間、作業中のトラブル処理時間、作業後の航法装置の撤去時間などの非作業時間が総時間に含まれる。慣行の有人運転作業では、通常、「機械作業時間」と同じ時間となる。

表 5-1 無人作業の評価試験の評価項目^{16) 30)}

評価項目	定義・算出式等
総時間	初期設定、監視等を含む作業の開始から終了までの全作業時間。
機械作業時間	機械が実際に作業を行っていた時間。
機械能率	機械作業時間を実作業面積で除した値 (min/10a)。
作業能率	監視以外で、作業のために作業者が拘束される時間を実作業面積で除した値 (min/10a)。
作業拘束時間比	監視以外で、作業のために作業者が拘束される時間の総時間に対する割合 (%)。
非作業時間比	機械作業以外の時間(総時間-機械作業時間)の総時間に対する割合 (%)。
未作業面積	区画周辺部等の作業が不可能な場所を除き、作業が行われなかった面積の総和 (a)。
総踏付け距離	既作業領域内に最終的に残ったタイヤ踏付け跡の総延長距離 (m)。
総はみ出し面積	区画外に踏み込んだタイヤ跡や区画外にはみ出した作業跡の総面積 (m ²)。
直進性	往復作業方向の各無人作業行程 ($j=1\sim n$) 毎の、作業方向に直交する向き (X) の軌跡の値 X_{ij} ($j=1\sim m$) の標準偏差 L_i の、全無人作業行程の平均値 L_s (cm)。→図 5-1 参照
直進の振れ幅	上記 X_{ij} ($j=1\sim m$) の最大値と最小値の差の、全無人作業行程の平均値 L_a (cm)。→図 5-1 参照
直進の平行度	往復作業方向の各無人作業行程の軌跡 (X_{ij} , Y_{ij}) の 1 次回帰直線について、目標とする進行方向 Y 軸となす角度の絶対値の、全無人耕うん行程の平均値 θ (°)。→図 5-1 参照
トラブル処理時間	無人作業中にオペレータが何らかの処理を必要とするトラブルがあった場合、そのトラブル処理に要した総時間 (min)。

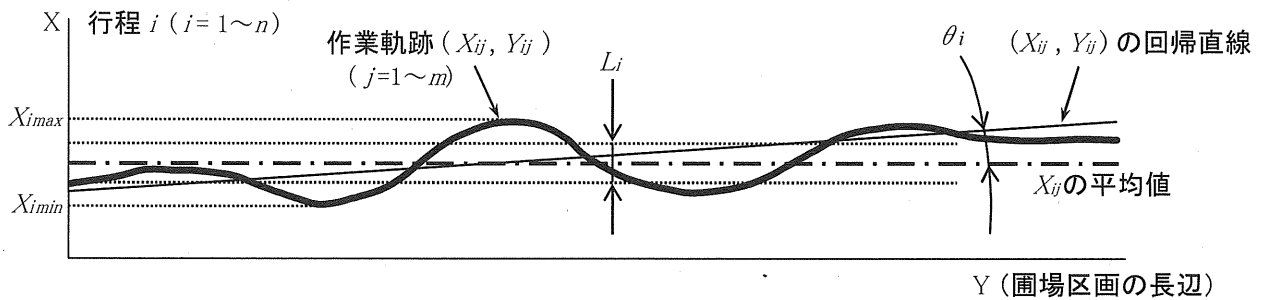


図 5-1 直進作業の精度に関する評価指標の説明図^{16) 30)}

「機械能率」は単位面積を作業するのに要する時間であり、機械の性能に左右される他、有人作業では作業者の能力に、無人作業では経路計画を含む作業ソフトの性能により数値が変わる。

「作業能率」と「作業拘束時間比」、「非作業時間比」は無人作業の効果を評価する指標であり、従来の性能試験方法にはない新たな項目として設定した。いずれの項目も、航法システムの設営やロボットの初期設定など、無人作業のために作業者が行うべき事項に要する時間に関わるものであり、それらの値が小さければ無人作業の効果が高いと評価できる。

「未作業面積」から「直進の平行度」までの項目は、それぞれ作業の精度を評価する指標である。「総踏付け距離」は、枕地での旋回や幅寄せ、切返しの際に既作業域をタイヤで踏付けた跡の総延長距離であり、耕うん作業や播種作業などでは、その距離が出来るだけ少ない方が望ましい。「総はみ出し面積」は、タイヤ跡や作業跡の区画外へはみ出した面積であり、ゼロであることが望ましい指標である。

「直進性」、「直進の振れ幅」、「直進の平行度」の3項目は直進作業の精度を評価する指標であり、航法システムによる位置や方位の検出精度、航法情報に基づく車両の誘導・位置決め精度など、ロボットの制御性能を評価する重要な指標となる。これらの評価指標の説明図を図5-1に示す。直進性は、往復作業における各行程直進作業時の進行横方向 X_{ij} の標準偏差 L_i を式(5.1)、(5.2)により

$$X_{iav} = \sum_{j=1}^m (X_{ij} / m) \quad (5.1)$$

$$L_i = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^m (X_{ij} - X_{iav})^2 / (m-1) \right)} \quad (5.2)$$

$$L_s = \sum_{i=1}^n (L_i / n) \quad (5.3)$$

求め、その全行程平均値 L_s として式(5.3)により求める。

直進性は作業軌跡の進行横方向へのズレの程度を評価する指標なので、その数値は進行横方向の位置決め精度とほぼ一致すると考えられる。

直進の振れ幅は、各行程直進作業時の進行横方向 X_{ij} の最大値と最小値の差について、その全行程平均値 L_a として式(5.4)により求める。

$$L_a = \left(\sum_{i=1}^n (X_{imax} - X_{imin}) \right) / n \quad (5.4)$$

直進の平行度は、各行程軌跡の1次回帰直線の進行方向 Y 軸に対する角度 θ_i について、その全行程平均値 θ として式(5.5)により求める。

$$\theta = \left(\sum_{i=1}^n \text{abs}(\theta_i) \right) / n \quad (5.5)$$

これら3つの指標算出のための軌跡データ範囲は、各行程とも、180°旋回後に直進作業を開始した時点から現行程の直進作業終了時点までとし、サンプリングデータはほぼ2s間隔(速度0.5m/sで約1m間隔)とした。データの間隔については、算出値に基づき信頼性の高い評価を行うためには、できるだけ小さいインターバルで高精度な作業軌跡の計測を行う必要がある。

作業軌跡の計測については、航法システム XNAV の位置計測システムを用いて行うこととし、無人作業の場合は、XNAV の位置計測システム AP-L1 の出力をロボットに無線通信するとともに、基準局コントローラのノート PC に作業軌跡として記録した。対照試験として行う有人運転による慣行作業では、AP-L1 を単に軌跡計測のみを使用して作業軌跡を計測・記録した。作業軌跡を構成する位置データは、ロボットの後車軸中央位置、地上高

2.2m に設置した光反射標識の位置データであり、ロータリ耕作機の後端から約 1m 前方の位置である。

作業区画は作業試験の前に、踏み付け距離などは作業試験終了後に、測定者が光反射標識を持って作業区画の外周や作業区画内を回り、AP-L1 により計測した光反射標識の位置を順次ノート PC に取込んで計測・記録した。

5. 2 評価試験の実施

5. 2. 1 標準作業法の評価試験

1) 評価試験の方法

前項の評価試験方法を適用し、埼玉県鴻巣市の生研センター附属農場において、ロボットによる無人ロータリ耕作機の評価試験を行った。供試は場はコンバイン収穫後未作業の水田で、土性はシルト質壤土、土壌群は灰色低地土である。作業性能試験は 1997 年 12 月 11 日に、ロボット区とロボット車両を有人運転により作業した慣行区の 2 試験区を設け、ロボット作業は標準作業法（標準作業ソフトを実行）により行った。

作業性能試験の区画は、未作業状態のほ場内に 50a (50 × 100m) の区画をヒモで区切って設定した。ロータリ耕作機の作業幅は 170cm であり、往復作業における作業重複幅は 10cm を目標とし、作業速度はいずれの試験区も約 0.5m/s、速度段で H-1 速以上を目標にした。耕深は 12cm を目標とし、ベーストラクタの耕深制御機構の調整・設定を行った。慣行区は、山形県農業試験場の熟練オペレータがロボットを手動運転して行った。

ロボット区における航法システムの設営、設定に要する時間は、作業能率を求める場合の作業時間に含めた。また、作業区画等のティーチングデータの取得については、1 つの作業区画に対して、はじめの 1 回だけ行えば良いことから、既に取得済みのものとした。



図 5-2 生研センター附属農場での作業性能試験

取扱い試験は、トラクタ作業の経験のある山形県農業試験場の職員 3 名に、用意した取扱説明書に従ってロボット作業を実施してもらい、取扱い性の良否などについて聞き取りを行って実施した。ロボット区においてオペレータが行うことは、作業前が、手動運転によるロボットの移動や航法システムの設営と設定、ロボット上の機器と各部の初期設定であり、作業中は作業の監視と異常時に必要な対応を行うことである。作業終了後は、ロボットと航法システムの終了処理及び移動である。

2) 試験結果と考察

作業性能試験の様子を図 5-2 に、試験結果を表 5-2 に、ロボット作業の軌跡を図 5-3 に示す。

a) 作業能率

表 5-2 の作業能率に関する結果を見ると、機械能率や圃場作業効率はロボット作業と慣行作業とではほぼ同程度の結果であった。ロボット作業による省力化の効果を最も評価できる指標として求めた作業者能率は慣行作業の

表 5-2 作業性能試験の結果例 ^{16) 30)}

試験実施場所	生研センター附属農場	
	ロボット区	慣行区
試験区	ロボット区	慣行区
圃場区画面積 (a)	50.00	49.99
作業速度段	H-1	H-1
総時間 (min)	142.1	126.3
機械作業時間 (min)	128.5	122.9
作業(耕うん)面積 (a)	49.74	49.09
実作業速度 (m/s)	0.50	0.50
耕深 (cm)	10.5	10.2
機械能率 (min/10a)	25.7	24.6
作業者能率 (min/10a)	2.7	25.3
圃場作業効率 (%)	76.1	77.8
作業者拘束時間比 (%)	9.5	100.0
非作業時間比 (%)	9.5	2.7
未作業面積 (a)	0.0	0.4
総踏み付け距離 (m)	67.4	13.1
総はみ出し面積 (m ²)	-	-
直進性 (cm)	2.7	19.1
直進の振れ幅 (cm)	12.6	68.5
直進の平行度 (°)	0.01	0.44
トラブル処理時間 (min)	-	3.4 [*]

※ ダッシングと区画設定ひもの作業機へのからみ除去によるもの。

約 1/10 であり、単位時間あたりの作業面積で見ると約 10 倍、作業者拘束時間比は 10%以下となり、ロボット作業により超省力化が図られた結果となった。

b) 作業精度

表の作業精度に関する結果を見ると、総踏付け距離を除き、ロボット作業が慣行作業を明らかに上回る作業精度で作業が行われたという結果であった。

総踏付け距離については、明らかにロボット作業の方が多結果となった。これは、有人運転の慣行作業に比べて、ロボットによる旋回後の幅寄せや切返しと比較的緩やかに行われ、目標とする幅寄せや切返しに距離を要した結果と考えられた。ロボットの場合、自動操舵の速度が必ずしも速くないことや、地面とタイヤ間の抵抗から停止状態では大きな操舵は切れない（操舵モータに過負荷がかかる）ことから、現状では旋回後の幅寄せや切返しを比較的緩やかに行わざるを得ない。踏付け距離を減らすためには、操舵制御系の構成を見直すとともに、より効率的な旋回や幅寄せ、切返しを行うための車両誘導方法の検討が必要であると考えられた。

c) 取扱い性と信頼性

取扱い試験の結果、3名の試験員ともロボット作業を順調に実施することができた。しかしながら、取扱説明書において、各種搭載機器の初期状態の説明やキーボードを使っての設定値入力の方法の説明等が不十分で、機器の設定や操作について試験員が疑問を持つ点があ

り、取扱説明書の内容について検討、改良が必要であると考えられた。

ロボットの取扱い性を向上するためには、従来型の取扱説明書の充実とともに、作業前の各種設定や異常発生時の対応を行うためのマンマシンインターフェースの充実も重要である。現状のロボットにおいても、コントローラを ON にした後は作業ソフトが起動し、ディスプレイとキーボードによる対話形式によって設定や操作が進められるようにしているが、このようなマンマシンインターフェースの検討、改良を加えれば、取扱い性がより改善されるものと考えられる。

また、ロボット上のディスプレイにはパソコン用の液晶ディスプレイを用いており、雨除けと日除けのカバーは装備しているものの、直射日光の方向によっては見難いとの指摘があり、視認性の改善が必要である。

ロボット作業の信頼性については、上記作業性能試験を含めて、これまでにほ場試験やデモンストレーションを延べ 120ha 以上実施したが、第2章の 2.7 項でも述べたように、航法システムやロボットの改造箇所、搭載機器などに大きな故障やトラブルなどはなく、耐環境性や耐久性について問題ないことが確認された。

5. 2. 2 各作業法の作業性能試験

1) 作業性能試験の方法

第4章で述べた斜め作業法、及び2通りの回り作業法

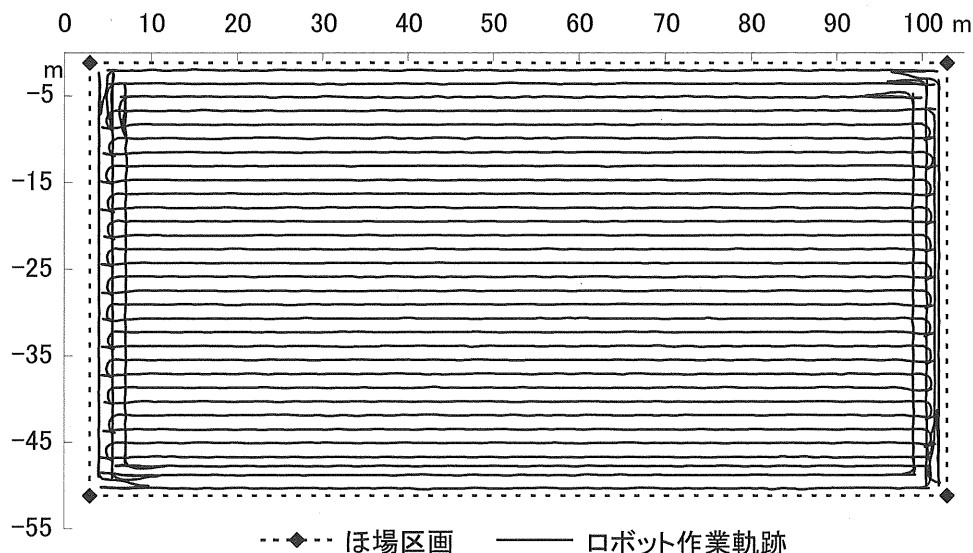


図 5-3 航法システム XNAV によるロボット作業の軌跡^{16) 30)}

のロボット作業について、ベースとなる標準作業法も含め、開発した作業ソフトによるロータリ耕うんの作業試験を行った²³⁾。

各作業法の比較を行うために、いずれの作業法の試験も同一の試験ほ場：生研センター内試験ほ場（区画 19 × 52m のほぼ平坦な畑地）で行い、作業速度は約 0.5m/s（速度段 H-1 速）とし、斜め作業法における斜め角度は 45° とした。試験ほ場は作付けを行っていない畑地であり、雑草が少ない表面が乾燥している 12 月に試験を実施した。土性は壤土、土壌群は黒ボク土である。

2) 試験結果と考察

図 5-4、図 5-5、図 5-6 に標準作業法と斜め作業法、回り作業法 2 の試験の様子を示す。また、表 5-3 に作業試験の結果、図 5-7～図 5-10 にロボットによる標準作業法と斜め作業法、回り作業法 1、回り作業法 2 の走行・作業軌跡を示す。走行・作業軌跡の測定方法は 5.1.2 項に示したとおりである。

表に示した試験結果の中の指標は、5.1 項で述べた作業性能試験における計測・評価指標であり、直進性や直



図 5-4 標準作業法の試験



図 5-5 斜め作業法の試験²³⁾

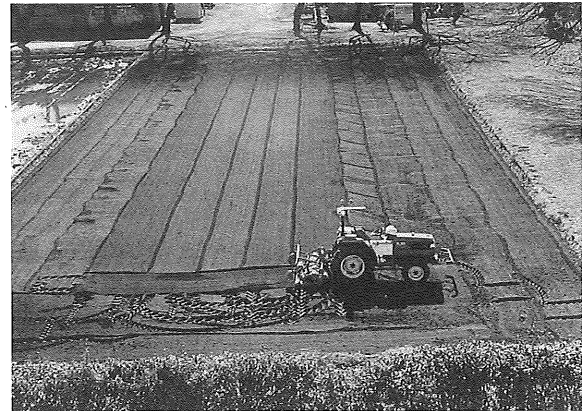


図 5-6 回り作業法 2 の試験²³⁾

進の平行度は、上記の AP-L1 計測の位置データに基づく作業軌跡から算出、評価した。

表の結果や作業時の走行・作業軌跡から、いずれの作業法でも残耕や区画からのロボットのはみ出しはゼロで、直進性や直進の平行度といった指標についても総じてロボットの制御が良好に行われたことを示す結果であった。

機械能率はロボットの作業能率と見ることができ、旋回の回数が多く非作業の割合が多い斜め作業法では、機械能率は低くなった。回り作業法では標準作業法と同程度であった。

総踏み付け距離では、回り作業法 2 は、作業行程間の 90° 旋回や幅寄せを行う領域がその後作業を行う未作業域である場合が多く良好な結果が得られた。回り作業法 1 では、その領域が既作業域である場合が多いため当然の結果として既作業域の踏み付け距離が多くなった。

直進性や直進の平行度については、斜め作業法と回り作業法 2 が若干低い結果となった。いずれの作業法でも、旋回後の次行程作業開始時に進行横方向の偏差が残っている場合が多かったが、斜め作業法では距離が短い作業行程が多いことから、その偏差により行程当たりの横方向偏差が大きくなる傾向にあることが考えられた。回り作業法 2 では、1 周前の周回作業で旋回や幅寄せを行って路面に凹凸ができた領域が次の周回作業の作業経路となること直進制御の精度を低下させる原因になると考えられた。

回り作業法において導入した前進と後進 90° 旋回による車両誘導法（第 4 章 図 4-4）は、旋回半径を学習して安定的に行われることを意図したが、前輪操舵の車両

表 5-3 各作業法による作業試験結果²³⁾

項目※ \ 作業法	標準作業法	斜め作業法	回り作業法 1	回り作業法 2
試験日	1998年12月12日	1998年12月9日	1998年12月21日	1998年12月4日
作業速度 (m/s)	0.49	0.49	0.49	0.50
機械能率 (min/10a)	35.90	45.36	35.26	35.22
作業能率 (min/10a)	3.78	3.78	3.78	3.78
作業者拘束時間比 (%)	10.63	8.40	10.82	10.82
残耕面積 (a)	0.0	0.0	0.0	0.0
総踏付け距離 (m)	47.54	57.41	234.68	21.37
直進性 (cm)	1.9	3.4	1.9	3.5
直進の平行度 (°)	0.05	0.18	0.05	0.13

※ 表 5-1 に示した評価指標 (項目)。

による大舵角での後進旋回では車両後部の位置や車両方位の変化が大きく、必ずしも再現性の高い車両誘導、位置決めが行なえなかった。後進 90° 旋回では、旋回角 70° 程度以降は舵角を戻して後進幅寄せに移行するなどの方法を検討する必要があると考えられた。

3) 各作業法の総合評価

上記試験結果から、ロボットにより、標準作業法だけでなく、斜め作業法や回り作業法を高効率、高精度で実施できることが明らかとなった。このことから、ロボットトラクタ、あるいは類似の構成のロボット車両システムにより、施肥作業や草刈り作業なども高効率、高精度

で実施できるものと考えられる。また、斜め作業ソフトの任意の斜め作業を行うアルゴリズムを適用することにより、矩形でない区画でもロボット作業が行えると考えられた。

標準作業法は作業時の走行方向が区画4辺のいずれかに平行であり、有人運転でも作業方向の判断や位置決めのための目標が取り易い作業法と言える。これに対し、斜め作業法は、斜め作業時の作業方向や作業開始、終了位置の見極めが難しく、有人運転作業は容易ではない。また、区画の中央から外側に向かう回り作業法2は、無駄のない作業を進めていくためには、まず、最初の行程の経路や作業開始、終了位置を的確に見極める必要があ

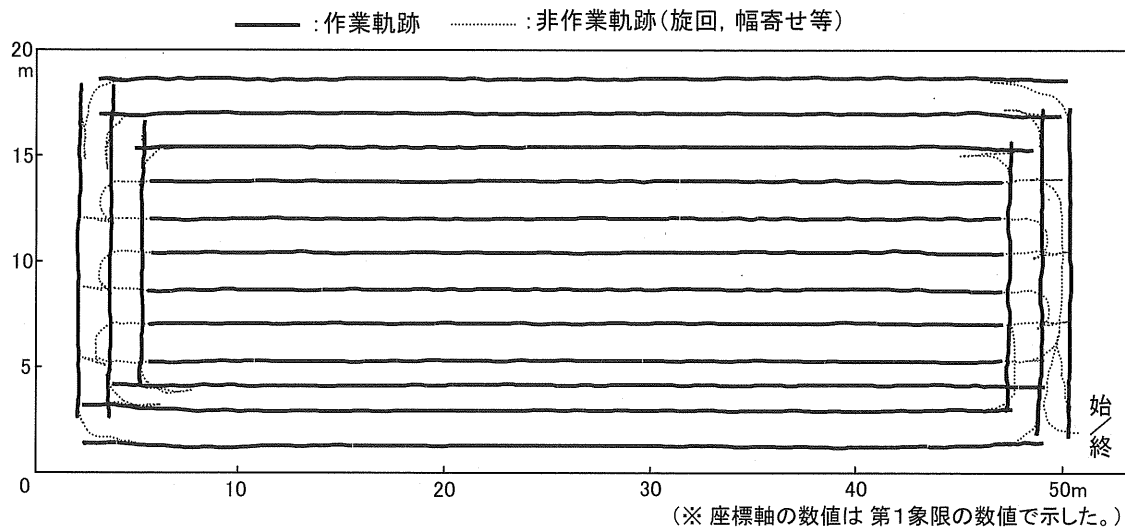


図 5-7 ロボットによる標準作業法の走行・作業軌跡

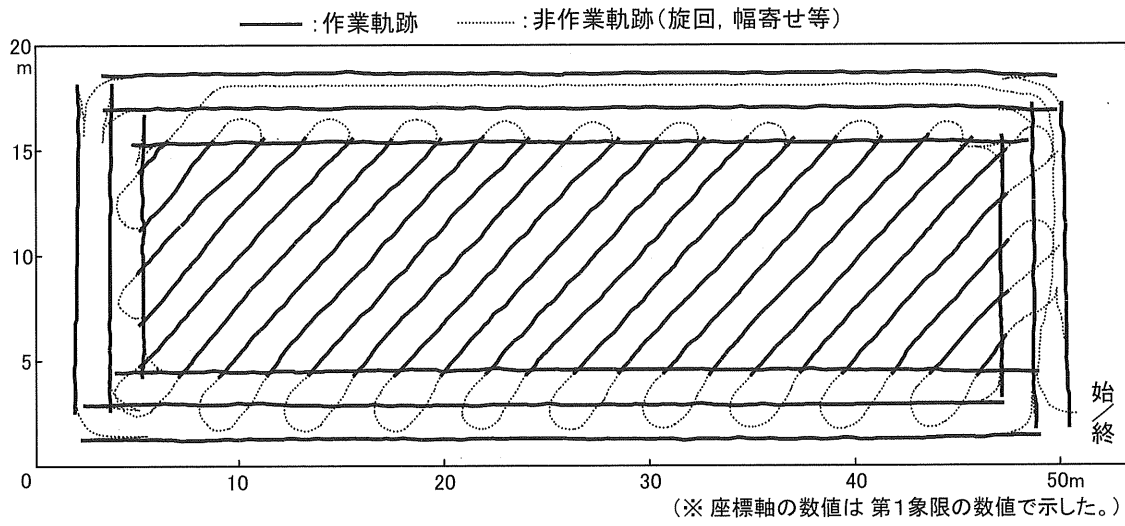


図 5-8 ロボットによる斜め作業法の走行・作業軌跡

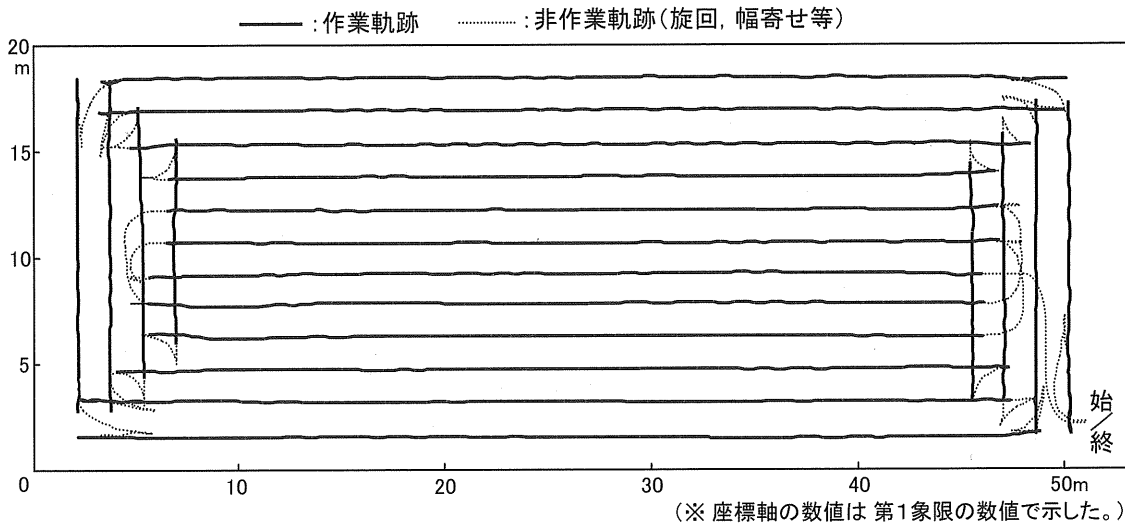


図 5-9 ロボットによる回り作業法1の走行・作業軌跡²³⁾

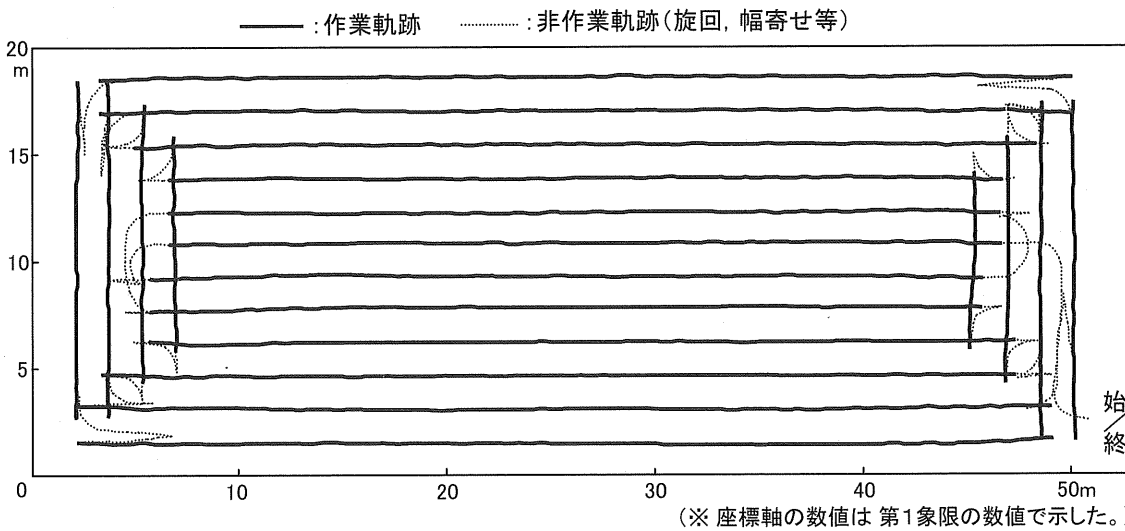


図 5-10 ロボットによる回り作業法2の走行・作業軌跡

り、有人運転作業の場合、目視だけで見極めを行うのは困難である。

このように、斜め作業法や回り作業法2は、経路計画と時々刻々の位置情報に基づいて車両誘導を行うロボットによって、はじめて、その高能率、高精度な実施が可能となる作業法とすることができる。

5. 3 航法システム XNAV の評価

上記の作業性能試験の結果などから、航法システム XNAV について、そのロボット作業における航法性能や取扱い性等を評価した。

1) 航法性能

作業性能試験では作業重複幅を 10cm に設定してロボット作業を行ったので、未作業面積がゼロの場合、進行横方向の車両の位置決め精度は 5 cm 以下と評価できる(表 5-3, 直進性参照)。また、設定作業区画に対する作業面積の割合や作業精度に関する指標の数値は、ロボット作業の方が慣行作業よりも高かった。熟練オペレータによる有人運転作業の位置決め精度が 5 cm 程度と考えると、XNAV による位置検出精度は誤差 5 cm 以下と評価できると考えられた。

2) 取扱い性

初期設定では AP-L1 の設置や設定にやや時間を要するが、AP-L1 の設置台を常設しておけば、それらに要する時間は 5 分程度であり、取扱い性に問題はないと考える。XNAV の基準局の電源については、商用電源が得られなくても、200W 程度の発電機があれば十分である。

3) 適用場面等

XNAV は、位置情報計測に関してはロボットが動く範囲を基準局から常に見通せる条件下では問題なく適用できるシステムである。方位情報計測に関しては、地磁気方位センサにより方位情報を計測しているため、ほ場の近くに地磁気を乱す構造物がある場合はロボット作業の精度が低下する場合があるが、その影響が大きいのは構造物に近い区画周辺部の作業時であり、最外周の周り作業は手動運転により行うなどの対応も可能である。

XNAV の適用範囲は、基準局と移動局であるロボット間の通信距離と AP-L1 の標識追尾、測距可能距離に制限されるが、見通しが良ければ基準局から半径 500m の範

囲でロボット作業が可能であり、XNAV の移設も難しいことではないので、問題は少ないと考える。

5. 4 摘要

航法システム XNAV とロボット車両、及び作業ソフトを統合したロボットの性能評価を行うために、無人作業の評価試験方法を検討・策定するとともに、ロボットによるロータリ耕作の評価試験を生研センター附属農場や生研センター内試験ほ場において行った。

(1) ロボット作業の性能を評価するために、無人作業の能率や精度を確認する作業性能試験や、取扱い試験などから構成される評価試験方法を検討・策定した。

(2) 作業性能試験では、作業能率や作業拘束時間比などの無人作業の効果を評価する指標や、直進性や直進の平行度などのロボット作業の精度を評価する指標を試験・評価項目に採用した。

(3) 策定した評価試験方法を適用し、生研センター附属農場のコンバイン収穫後水田に 50a の区画を設定して、標準作業法のロボット作業の評価試験を行った。試験では同条件で慣行の有人運転作業も行った。

(4) 評価試験の結果、50×100m の矩形区画において、慣行の有人運転作業と同程度の作業能率でロボット作業を行うことが可能であった。直進性等の作業精度では有人運転作業を上まわる作業が行われた。

(5) ロボットの取扱い性については、トラクタ作業の経験がある人なら、取扱説明書に従って問題なくロボットの運用ができることが分かったが、取扱い性に関する疑問点、改良点もいくつか指摘された。

(6) 第4章で述べた斜め作業法、及び2通りの回り作業法のロボット作業について、ベースとなる標準作業法も含め、開発した作業ソフトによるロータリ耕うんの作業性能試験を行った。

(7) 作業試験の結果、作業速度約 0.5m/s で、いずれの作業法によっても残耕や区画はみ出しのない良好なロボット作業を行うことができた。

(8) 斜め作業法や回り作業法2は、経路計画と時々刻々の位置情報に基づいて車両誘導を行うロボットによって、はじめて、その高能率、高精度な実施が可能となる作業方法である。

(9) 評価試験の結果から、航法システム XNAV の航法性能は目標性能を満足するものであった。その取扱い性や適用場面についても問題は少ないと評価された。

第6章 ロボット作業の活用—各種作業の実行

本章では、ロボット作業の効率的な利活用方法やロータリ耕以外への適用に関する研究について述べる。

具体的には、まずロボット作業の安全で効率的な利用方法として、作業途中で資材補給等で作業者の関与が必要でないロータリ耕において、1人のオペレータがロボットに作業を行わせながら従来型トラクタの有人運転作業を行う作業方法を提案し、その作業方法を適用したほ場試験結果について述べる。次に、ロータリ耕以外の作業への適用として、播種作業を行う「播種ソフト」と代かきを行う「代かきソフト」を作成し、それらの作業ソフトの構成や特徴、及び作業試験結果を述べる。播種作業ではロボット作業により作業者を減らすことを目標とする試験を、代かき作業ではロボット作業により効率的な作業が行えることを確認する試験を行った^{4) 13) 24)}。

6.1 2台同時作業法

ロボットによるロータリ耕では、航法システムの設定や作業区画情報の読み込み、走行速度段の設定などの初期設定を作業前に行えば、後はロボットのみによる区画全面の無人作業が行われる。一方、第4章で述べたように、ロボットには作業前の自己診断機能、作業中の異常時対応機能が備わっており、ロボット作業の開始、実行が円滑に行われるように対応を行っている。

しかし、作業区画内のほ場条件の変化が大きい場合は、走行速度段やPTO速度段、耕深を作業の途中で変えざるを得ない場合がある。また、ほ場を柵で囲うといったことが一般的でない農業現場ではロボット作業中に作業区画内に人が入る場合も想定される。このような状況の検出やロボット作業の再開・継続は異常時対応機能により行われるが、状況に応じた適切な走行速度段の選定・変更などの対応は、試作したロボットでは、作業員であるオペレータの判断、対応に頼る必要がある。

そこで、試作したロボットによる作業を安全かつ高い信頼性で実施し、オペレータ1人当たりの作業能率を向上させる作業方法として、オペレータがロボット作業を時々監視しつつ、同じほ場内またはロボット作業を見通せる別のほ場において有人作業を行う作業形態が考えられる。その作業形態を「2台同時作業法」と呼び、その

作業試験として、1人のオペレータがロボットによる無人ロータリ耕を行い、それを時折監視しながら従来型トラクタを運転してロータリ耕を行う作業試験を実施した。

6.1.1 作業試験の方法

1) 試験条件

作業試験は、北海道立中央農業試験場のえん麦刈取り後未作業のほ場で行い、ほ場内に30×165mの矩形区画を3区並べて設定し(図6-1)、中央の1区画を空け、1つの区画を有人運転作業を行う慣行区、もう1つの区画をロボット作業を行うロボット区として試験を行った。ほ場の土性は砂壤土、土壌群は黒ボク土で、試験は1998年10月13日に行った。

有人運転作業用のトラクタには、ロボットのベーストラクタと同じクボタGL321を用い、ロータリ作業機も作業幅170cmの同仕様ものを使用した。

前提条件として、対象区画では定常的にロボット作業が行われており、ロボットの航法システムXNAVの基準局装置AP-L1は区画外の適当な場所に常設されていると仮定し、その起動と設定のみを毎回のロボット作業の前に行うこととした。また、作業区画情報を取得するティーチングは実施済みであり、作業前にコントローラから作業区画情報を読み込めば良いこととした。この航法システムとティーチングに関する前提条件は、6.2項の麦播種作業試験と6.3項の代かき作業試験も同様とした。

作業の方法は、両試験区とも標準的なロータリ耕作法、つまり、区画の内側を隣接往復作業により、外周枕地は3周の周り作業により処理する方法とし、ロボット

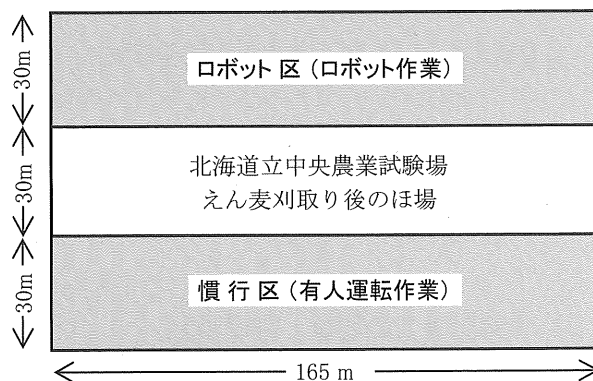


図6-1 2台同時作業法の作業試験区²⁴⁾

の作業ソフトは第3章で述べた標準作業ソフトを用いた。オペレータはトラクタ作業に慣れた同試験場の職員とし、作業速度はほ場の状態から両試験区とも約0.5m/s(速度段H-1速)、耕深は12~13cmを目標にトラクタの自動耕深制御機能を使用して作業を行った。目標の耕深を得るための作業部の設定は、オペレータが事前の確認、調整を行って決定したが、下記2)の手順(ii)において、区画内の適当な場所で調整作業を行って確認、設定することもできる。

2) 作業の手順

上記条件の下、オペレータが行う作業等の手順は以下のとおりとした。

- (i) 2台同時作業法の開始として、作業区画外に設置済みのAP-L1を起動し、その初期設定を行う。
- (ii) 作業区画の近くにあるロボットをロボット作業区画内に手動運転で移動する。作業区画内の停止位置はほ場の出入口付近の適当な位置で良く、下記(iii)の作業開始後、ロボットは自己位置を認識して予定の作業起点まで適切な経路上を空走して行く。
- (iii) ロボットの初期設定として、作業区画情報の読み込みや速度段の設定、作業ソフトによる自己診断を行った後、ロボット作業を開始する。
- (iv) 作業区画の近くにある従来型トラクタを慣行区内に移動し、有人運転作業を開始する。
- (v) オペレータは有人運転作業を行いつつロボット作業の状況を時々監視し、トラブルなどがあれば対応する。また、ロボットの区画外への暴走などの非常事態に備え、リモコン非常停止装置を携帯して作業を行う。
- (vi) 有人運転作業が終了したら、トラクタを慣行区外に移動するとともに、ロボット作業が終了した段階で終了処理を行い、ロボットを区画外に移動させて2台同時作業法の終了とする。ロボット作業が先に終了した場合も、最後にロボットを区画外に移動させて全作業の終了とする。

3) 作業試験での調査・評価項目

両試験区の作業とも、作業手順の所要時間を測定、調査して作業能率を評価し、作業の軌跡等を測量、調

査して直進性や残耕面積などの作業精度を評価した。また、航法システムを含むロボットの取扱い性についての評価も行った。6.2項の麦播種作業試験も含め、作業能率や作業精度の評価における指標の算出などでは第5章で述べた評価試験方法を用いた。

6. 1. 2 作業試験の結果と評価

作業試験の様子を図6-2に、主な作業能率、作業精度に関する測定結果を表6-1に示す。

1) 作業状況と作業能率

両試験区とも、前項2)の手順(i)~(vi)をトラブルなく遂行することができ、目標の耕深12~13cmを維持したロータリ耕を区画全面に対し行うことができた。慣行区の有人運転作業では、隣接往復作業や周り作業はロボット区の作業と同じ速度段H-1速により行われたが、空



図6-2 2台同時作業法の作業試験²⁴⁾

表6-1 2台同時作業法の作業試験結果²⁴⁾

項目*	総・合	慣行区	ロボット区
耕うん可能面積 (a)	98.6	49.3	49.3
実耕うん面積 (a)	98.1	49.0	49.1
総作業時間 (min)	127.6	-	-
初期設定時間 (min)	2.9	-	2.9
無人作業時間 (min)	123.9	-	123.9
有人作業時間 (min)	115.5	115.5	-
撤去時間 (min)	0.8	-	0.8
機械能率 (min/10a)	24.4	23.6	25.2
作業能率 (min/10a)	13.0	23.6	0.8
残耕面積 (a)	0.04	0.04	0.00
総踏付け距離 (m)	96.4	49.3	47.1
直進性 (m)	-	0.11	0.04
直進の平行度 (°)	-	0.09	0.01

※ 評価指標(項目)については、第5章の表5-1参照。

走や旋回は速度段を適宜変更して行われたため、全作業時間はロボット区より短く、慣行区の機械能率はロボット区をやや上回る結果となった。慣行の有人運転作業の作業能率は表 6-1 の慣行区の機械能率として 23.6min/10a、2 台同時作業法では、作業の総時間 127.6min を実耕うん面積 98.1a で除した 13.0min/10a であり、その比は 1.82 となった。この結果から、ロボットを利用した 2 台同時作業法により、オペレータ 1 人で慣行作業の約 1.8 倍の能率で作業が行えることが確認された。

2) 作業精度

表 6-1 の作業精度に関する結果から、作業が行われなかった残耕面積は慣行区で 0.04a あったが、ロボット区ではゼロであった。旋回時などに既作業域に侵入した結果である総踏み付け距離は、慣行区とロボット区に大きな差はなかった。慣行区（有人運転作業）の総踏み付け距離が 5.2.1 項の生研センター附属農場での試験結果に比べて大きくなったのは、オペレータの技量の違いによるところもあったが、本試験でのオペレータが、ロボット作業に遅れることがないように、必要以上にロボットを意識したことが大きな原因と考えられた。

直進性や直進の平行度は明らかにロボット作業が慣行作業を上回る結果となった。

3) 取扱い性と総合評価

航法システムを含むロボットの取扱い性については、取扱説明書を用意し、また 1 時間程度の練習を行ったこともあり、「取扱いが難しい」といった評価はオペレータから聞かれなかった。この結果は、第 5 章での試験と同様の結果であった。ロボット作業が円滑に実施され、トラブルなく終了したことは、作業前の自己診断機能によるところが大きく、その機能を有することがロボットの取扱い性に問題がないと評価される一因と考えられた。

上記のとおり、2 台同時作業法は特に問題なく実施することができ、ロボット作業がトラブルなく行われれば、同作業法によりオペレータ 1 人で従来型トラクタによる慣行作業の約 1.8 倍の能率で作業が行えることを確認した。このことから、総合的に見て 2 台同時作業法はロボットを有効かつ安全に活用する作業法と評価できた。

ただし、ロボット作業にトラブルがあった場合は、有

人作業も一時中断する必要があり作業能率が低くなるので、作業前の初期設定を適切に行うとともに、作業状況の確認を作業前に行うことも必要である。一方で、作業試験では有人運転作業がロボット作業より 8.4 分早く終了しており、オペレータはその待ち時間に次のほ場作業を行うことも可能であることから、有人作業とロボット作業を組み合わせた作業法は更に高能率で作業を行える可能性がある。

今回行った作業能率の試験、評価では、ロボットの作業ほ場までの移動時間や作業状況の確認・調整時間は含まなかった。その理由は、これらの時間が従来の有人・慣行作業でも必要な時間であり、これらの時間がロボット作業と有人作業の並行実施によっても増えないことを前提条件としたためである。その前提条件は、ロボットの作業ほ場までの移動は有人運転の従来型トラクタにロボットが自動追従して、あるいはロボットと作業機を搭載したトレーラを従来型トラクタでけん引して移動することにより実現される。また、従来型トラクタは作業機も含めてロボットと同型式のものとして、作業状況の確認・調整はロボットまたは従来型トラクタにより 1 回行えば良いことにより実現される。

6. 2 麦播種作業

大区画ほ場の小麦の施肥・播種作業（以下、「播種作業」）は通常 2 人で作業が行われ、1 人は主にオペレータとして播種機を装着したトラクタの運転を行い、もう 1 人は補助者として肥料と種子を積載した運搬車を運転・移動しながら、適宜、播種機に種子と肥料を補給する作業を行う。この通常 2 人で行われる大区画ほ場の播種作業にロボットを適用し、1 人作業で行う省力化について検討、試験した。具体的には、ロボットにより播種作業を行う作業ソフト「播種ソフト」を作成し、農家ほ場において作業試験を実施した。

6. 2. 1 播種ソフト

大区画ほ場での小麦播種作業は長辺方向の隣接往復作業のみで行うことが多く、播種ソフトは標準作業ソフトの隣接往復作業を行う部分をベースに構成した。往復作業の行程間隔である作業ピッチは播種機の作業幅 270cm（畦間 30cm×9 畦）であり、ロータリ耕の作業重複幅を

含む作業ピッチ 160cm より大きいため、行程端での旋回ではトラクタの片ブレーキ及び旋回時前輪増速機構「倍速ターン」の機能を効かせない設定とした。旋回時の舵角は、旋回半径が作業幅の半分 135cm 程度となる舵角を事前に調査・確認し、同舵角を旋回時に与えた。

作業試験ほ場の長辺が 286m で、使用播種機のホoppa 容量と施肥・播種量から概ね 2 往復に 1 回、肥料と種子の補給を行う必要があることから、2 往復に 1 回、ほ場端で停止するように播種ソフトを作成した。種子等の補給を行いながら隣接往復作業を行う手順と、播種ソフトの流れ ([] 内) は以下のとおりである。

(i) 種子等の補給を行う側のほ場端にロボットを手動運転で移動し、ロボットの初期設定を行う。

[播種ソフトの起動→作業区画情報の読み込み等初期設定]

(ii) 播種機のホoppa に種子・肥料を入れ、作業を開始する。

[作業開始キー入力待ち→キー入力検出→播種機上げ→シャトル前進]

(iii) 播種開始位置まで前進移動後、播種作業を開始し、行程の作業終了位置で作業停止、180° 旋回する。

[開始位置で播種機下げ→スロトル上げ→終了位置で播種機上げ、スロトル下げ→旋回のための操舵→180° 旋回後操舵戻し]

(iv) 上記(iii)を 2 往復繰り返す。

(v) 2 往復後に 180° 旋回、肥料・種子の補給位置まで後進移動し停止して、(ii)へ。

[旋回後、シャトル変速: 停止→後進→停止 →播種機下げ]

(vi) (ii)~(v)を、作業予定区画の作業が終了するまで繰り返す。

6. 2. 2 播種作業試験の方法

ロボットによる播種作業試験は北海道河西郡芽室町の農家ほ場で行い、ほ場はスイートコーン作付け後に耕うん整地を行った畑地で、土性が壤土、土壌群は黒ボク土である。播種機は、田端農機具製作所製の型式名 TW-7 (トラクタ直装式、7 畦用) を 9 畦用に改造したものをを用いた。同播種機はロボットの機関出力 24.3kW のベーストラクタに装備、作業するには重量バランスが適当で

ないが、作業速度を低めに設定して試験を行った。

試験は 286×65m の矩形区画で行い、上述のとおり、2 往復に 1 回、種子等の補給を行う長辺方向の隣接往復作業を実施した。作業者については、種子等の補給は慣行作業と同じように行いたいという農家の要望によりオペレータと補助者の 2 名を配置し、オペレータはロボットの取扱いと作業の監視及び補給作業を、補助者は補給作業と補給時の種子等を積載した運搬車の運転・移動を行うこととした。このため、ロボット作業により 1 人作業を可能とする省力化の検証については、作業状況を観察して評価した。また、ロボット区に他に慣行区を設け、慣行区ではロボットを有人運転して播種作業を行うこととし、その区画は 286×22m とした。

ロボット区、慣行区とも、播種作業や種子等の補給の所要時間を測定して作業能率を調査するとともに、作業の軌跡を測定、調査して直進性や直進の平行度などの作業精度を評価した。また、上記の 2 台同時作業法の試験と同様、航法システムを含むロボットの取扱い性についての評価も行った。試験は 1999 年 9 月 18 日に行った。

6. 2. 3 作業試験の結果と評価

ロボット作業の様子を図 6-3 に、作業能率や作業精度の測定結果を表 6-2 に示す。

1) 作業状況と作業能率

ロボットによる播種作業はトラブルなく順調に行うことができた。

作業速度とほ場作業量はロボット区が 0.86m/s、0.68ha/h であったのに対し、慣行区が 1.17m/s、

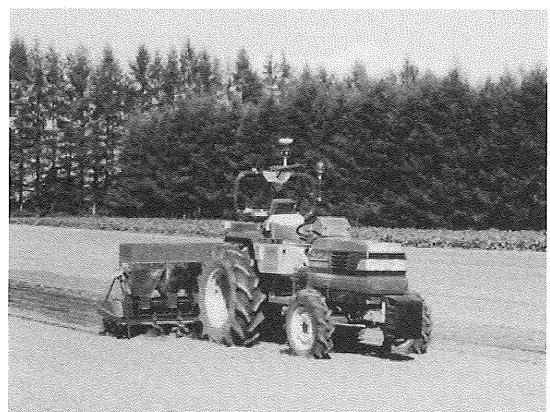


図 6-3 ロボットによる播種作業試験²⁴⁾

表 6-2 播種作業試験の結果²⁴⁾

項 目		慣行区	ロボット区
作業面積 (ha)		0.62	1.85
平均作業速度 (m/s)		1.17	0.86
作業時間 (min)		43.0	163.1
ほ場作業量 (ha/h)		0.86	0.68
作業時間 割合 (%)	播 種	76.2	82.0
	補 給	14.5	11.5
	移動・旋回	9.3	6.5
作業者能率 1 (h/ha) ※ ¹		2.31	2.94
作業者能率 2 (h/ha) ※ ²		1.32	0.34
直進性 (m)		0.08	0.05
直進の平行度 (°)		0.02	0.01
播種行程 隣接条間	平均 (cm)	31.5	31.8
	標準偏差 (cm)	6.5	8.2

※¹：総作業時間で見た作業者 1 人当たりの能率

※²：作業に拘束された時間で見た作業者 1 人あたりの能率

0.86ha/h であった。これはロボット作業における設定作業速度が低かったためであり、ロボット作業では作業前の設定速度段 (H-3 速) を作業終了まで変えなかったのに対し、慣行作業では作業負荷に応じてオペレータが適宜、速度段を H-4 速に上げたことによる。

播種と種子等の補給に要した時間の内訳を見ると、作業速度が高かった慣行区で播種の割合が小さくなったが、作業速度が同じと仮定した場合の補給に要する時間割合はロボット区と慣行区でほぼ同じであった。

総作業時間で見た作業者 1 人当たりの能率は表の作業者能率 1 として、ロボット区が 2.94h/ha、慣行区が 2.31h/ha となり、作業速度が高かった分、慣行区の能率が高い結果となった。一方、作業に拘束された時間に基づき作業者 1 人当たりの能率を試算すると、ロボット区では 2 人の作業者が補給のみに拘束されたと見ることができ、表の作業者能率 2 として 0.34h/ha、慣行作業では 1 人が全作業に拘束され、1 人が補給に拘束されたと考えられ、その能率は 1.32h/ha となった。さらに、作業の観察から、ロボット区における補給はオペレータ 1 人でも十分に行えると考えられ、補給に要する時間が増えたとしても、省力的な播種作業が行えると考察された。

2) 作業精度

表 6-2 の試験結果から、作業時の直進性はロボット区が 5 cm、慣行区が 8 cm であり、ロボット区では目標直進経路からの横方向偏差がほぼ 5 cm 以下の高精度作業が行われた。各行程の播種作業跡の平行度についても表の直進の平行度からロボット区の方が良い結果となった。

各行程の隣接条間については、目標の 30cm に対しロボット区が平均 31.8cm、慣行区が平均 31.5cm であり、ロボット区と慣行区はほぼ同等であった。隣接条間の標準偏差はロボット区の方が大きい結果となった。この結果は、行程端の枕地を小さめに設定したことにより 180° 旋回後の前進幅寄せ距離が短くなり、次行程の作業開始位置までに予定経路に乗る幅寄せが完了しなかったことによると考えられた。

ロボット区での播種開始位置と終了位置について、進行方向に 0.5m 程度のズレが生じた行程があった。この結果は、ロボットのベーストラクタの油圧揚力に対して播種機が重過ぎたため、重量が変わる播種機の昇降を安定して行えなかったことによると考えられた。

3) 取扱い性と総合評価

航法システムを含むロボットの取扱い性については、上記 6.1 項の 2 台同時作業法の試験結果と同様、「取扱いが難しい」といった評価は聞かれなかった。

播種作業では種子や肥料の補給を適宜行う必要があり、ロボットを用いても完全無人で作業を完了することはできないが、ロボットの適用により慣行の 2 人作業を 1 人作業で行うことが可能である。また、その 1 人作業も、長時間の隣接条間を維持する運転操作の負担から解放され、時折監視を行いつつ必要な時に補給を行えば良いことから、ロボットによる播種作業は省力化と軽労化が達成される活用方法と考えられる。

ロボットによる播種作業において改良が必要な点としては、行程端での 180° 旋回後の前進幅寄せを短い距離で行えるようにすること、さらに、旋回後の幅寄せ必要量をできるだけ小さくするために、それまでの旋回後の幅寄せ必要量を学習して旋回時の舵角を調整する機能を持たせることが必要と考えられた。また、播種作業に限らず、広いほ場での作業では目視による作業状況の監視は 300m 程度までが限界であり、作業状況を遠隔モニタ

できる方法を検討することが必要と考えられた。

6. 3 代かき作業

水田の代かき作業（以下、「代かき」）は、トラクタに代かきロータリを装着して、ロータリ耕と同様に往復作業と外周の周り作業を組み合わせる方法などにより行われる。ロータリ耕との違いは、往復作業や周り作業における行程端での旋回時も作業機を上げずに作業を行う場合が多く、その旋回は大きめに緩やかに行って、ほ場面を荒らさないよう、また土寄せが少ないように作業が行われることである。また、一面の作業を1回だけでなく作業方向を変えて繰り返し、念入りに攪拌と均平を行うことも代かきの特徴である。

ロボットにより代かきを行うために、標準作業ソフトをベースに、その往復作業や周り作業における旋回部分の変更や作業方向を変えての繰り返し作業などを行う等の改良を加えて「代かきソフト」を作成し、そのソフトを用いての作業試験を行った。

6. 3. 1 代かきソフト

1) 往復作業

標準作業法における往復作業は隣接行程作業として行っているが、代かきソフトによる往復作業は区画の一端から2行程分を空けて往復作業を開始し、行程端の180°旋回を大きめに行って、旋回後の直進作業は前作業行程から1行程空けて行うようにした。その1行程おき往復作業を区画の一端から反対側に向けて繰り返して行き、区画の反対側端までに2行程分を残す程度に近づいたら、折返して空けた行程を作業して行く「1行程おき折返し往復作業」を行うようにした（図7-4の右上）。

各行程端での180°旋回は、まず、代かきロータの作業幅分より若干小さめの旋回半径 R_0 が得られる舵角 θ_0 で90°旋回を行い、次の1行程分空けた作業経路から R_0 の距離分手前まで直進した後に、再び上記舵角 θ_0 で90°旋回を行って180°旋回がなされるようにした。なお、折返しの際の行程端での旋回は舵角を大きめにして連続的に180°旋回し、隣接作業が行われるようにした。

この往復作業は、直進作業を区画の長辺方向に行うものと、短辺方向に行うものを設定し、作業の繰り返しにおいて、それらを交互に行うこととした。この往復作業

の方向を変えて代かきを行う方法は、一般に「縦横法」と呼ばれている。

2) 周り作業

代かきソフトによる周り作業は、上記の往復作業が終わった後に、区画の最外周とその内側1周を処理する周り作業1と、さらにその内側の1周を処理する周り作業2を行うこととした。代かき回数設定に応じた履行の流れを図6-4に示す。

周り作業における角部での90°旋回は、上記往復作業における180°旋回の初めの90°旋回と同じとし、作業機は上げずに作業を行いながらの旋回とした。旋回後は続けて前進の直進作業行程に移行する。

3) 代かき回数の選択と各作業の履行

作業回数については、最大4回まで一面の作業を繰り返すことを選択できるようにした。図6-4のように、1回がけで終わる場合は長辺方向の往復作業を行った後、外2周の周り作業と内1周の周り作業を行って作業を終了する。2回がけの場合は、1回がけの往復作業、外2週の周り作業の後、短辺方向の往復作業を行い、外2週の周り作業と内1周の周り作業を行う。3回がけでは、2回がけの後、再び長辺方向の往復作業と周り作業を、

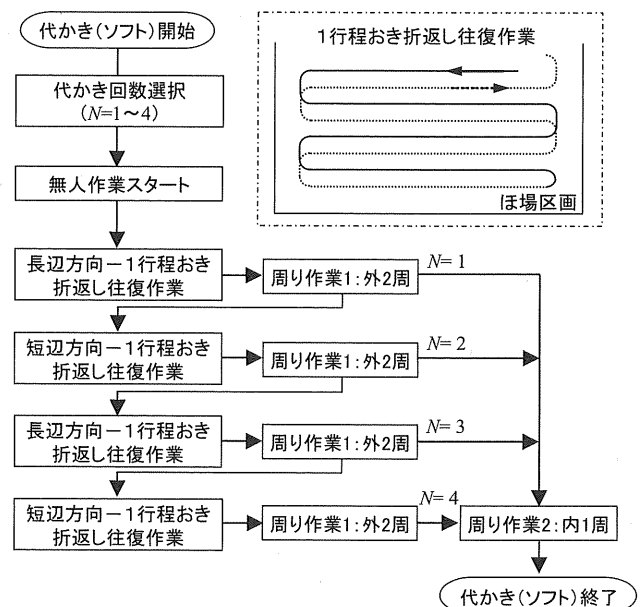


図6-4 代かきにおける往復作業方法と代かきソフトの流れ²⁴⁾

4回がけでは、3回がけの後、再び短辺方向の往復作業と周り作業を行う。

6. 3. 2 作業試験と結果

1) 作業試験の方法

作業試験は生研センター附属農場の水田で行い、代かきソフトを用いたロボット作業を行うロボット区と、農場職員がロボット車両を有人運転して慣行作業を行う慣行区を設定した。供試ほ場（水田）の土性はシルト質壤土、土壌群は灰色低地土であり、作業試験は2000年6月8日に、作業結果（均平状況）の測定は6月12日、13日に行った。

代かき作業機には作業幅2.3mの代かきロータを用いた。ロボット区は30a(50×60m)の区画で、上記の代かきソフトによる作業を、縦横法により2回がけした。慣行区には慣行Ⅰ区として50a(50×100m)と、慣行Ⅱ区として30a(50×60m)を設け、慣行Ⅰ区では代かきソフトによる作業と同じ縦横法で2回がけを行った。慣行Ⅱ区は、慣行作業でよく行われる「順次法」と呼ばれる作業法を2回がけして代かきを行った。順次法は、2～数行程分を空けた往復作業を、行程端で180°旋回を行いながら1行程ずつ横にシフトして行くもので、コイル状の経路を取りながら塗りつぶすように代かきを行っていく作業法である。

作業速度については、ロボット区では0.7m/s程度になるよう、速度段をH-2速に設定した。慣行区の作業速度は基本的に任意としたが、ある程度低めに設定したロボット区と同じH-2速あるいは、H-3速で行うようにオペレータに指示した。耕深については、ロボットが作業中に作業機の高さを変更できないため、ロボット区とともに

に慣行Ⅰ区は作業機の下げ位置一定で作業を行い、慣行Ⅱ区では作業機の下げ位置はオペレータが任意に上げ下げすることとした。慣行Ⅰ区では、ロボット区と作業方法も同様とし、ロボット作業との作業能率や作業状況の比較を目標として作業条件などを設定した。それに対し、慣行Ⅱ区は、オペレータの任意な作業設定ができるなど、代かきの仕上がりにも留意した作業を目標にした。なお、すべての試験区で、ベーストラクタの機能である自動耕深制御は作動させる設定とした。

試験での測定項目は、作業時間や作業速度、残耕面積、場所毎の作業回数、および作業後のほ場表面の均平状況とした。それらの測定方法として、作業速度や残耕面積、場所毎の作業回数は、ロボット区では航法システムXNAVの基準局装置AP-L1の位置出力を記録・解析して求め、慣行区も手動運転のロボット車両の動きを同様に計測・記録して求めた。作業後の均平状況は、AP-L1の位置検出対象である光反射プリズムを人が持ってほ場内を歩き回り、ほ場表面のプロフィールをロボット区と慣行Ⅱ区の各区内100点の高さを含む3次元位置データを計測して求めた。

2) 試験結果—作業能率

ロボット作業の様子を図6-5に、主な試験結果を表6-3、図6-6、図6-7に示す。

ロボットによる代かきはトラブルもなく順調に行うことができた。

作業速度は、ロボット区が平均0.70m/sであったのに対し、慣行Ⅰ区が平均0.82m/s、慣行Ⅱ区が平均0.78m/sであり、オペレータが状況に応じて作業

表 6-3 代かき作業試験の結果²⁴⁾

項 目	ロボット区	慣行Ⅰ区	慣行Ⅱ区
作業面積 (a) (m)	30 50×60	50 50×100	30 50×60
作業方法	縦横法	縦横法	順次法
平均作業速度 (m/s)	0.70	0.82	0.78
残耕面積 (a)	0.43	0.90	0.55
ほ場作業量 (ha/h)	0.22	0.28	0.14
ほ場表面の高 低差	最大(cm)	14.0	—
	標準偏差(cm)	2.7	—
			10.0 1.8



図 6-5 ロボットによる代かき作業試験²⁴⁾

速度を調整した慣行区がやや高い結果となった。ほ場作業量は、ロボット区と慣行Ⅰ区が同様の作業方法を用いたため作業速度に応じた結果となったが、

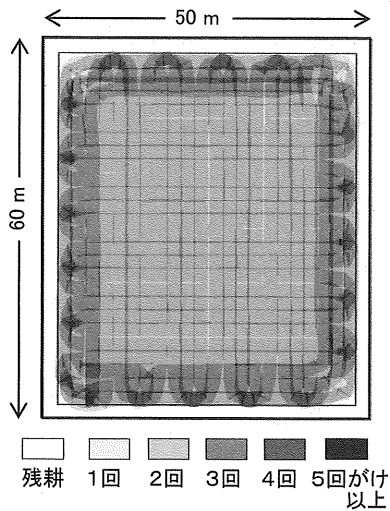
慣行Ⅱ区ではかなり作業の重複が多くなり、ほ場作業量は低くなった。

3) 試験結果—作業精度

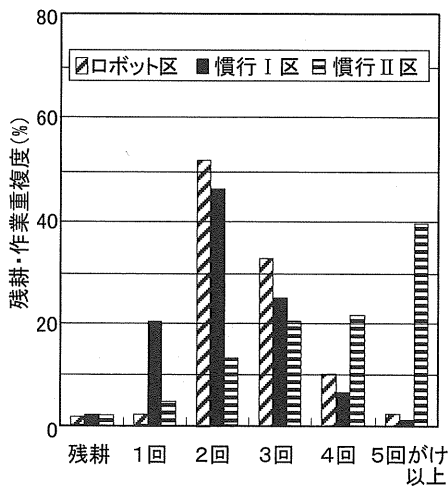
2回がけの作業によっても作業が行われなかった残耕面積はロボット区が最も少なく、慣行Ⅰ区とⅡ区では、単位面積当たりではほぼ同程度の残耕があった。

図6-6の結果から、場所毎の作業回数(作業重複度)については、ロボット区の往復作業の領域ではほぼ目標の2回がけが行われていた。慣行Ⅰ区は1回がけの領域が比較的多かった。慣行Ⅱ区は、目標より多い3回がけ以上の重複領域が多く、またそのばらつきも多かった。この結果から、作業の重複度については、ロボット区が目標の3回がけを効率良く行っており、無駄のない作業が行えることが分かった。代かきでは、作業を行った領域やその回数を目視で見分けることは難しく、さらに行程を空けて作業することが多いため、目視に頼る有人の慣行作業では効率の良い作業が難しいことを示している。一方、ロボット作業は設定した作業経路で忠実に作業ができるので、代かきを効率的に行うことができる。

代かきの大きな目的であるほ場面の均平状況については、慣行Ⅱ区ではオペレータがほ場面の高低差に配慮して作業速度と耕深を調整したことにより、比較的高低差が少ない仕上がりとなった。しかし、ロボット区では自動耕深制御機能は使用したが、作業速度と作業機の下げ位置設定が一定であったため、高低差がある程度残る結果となった(表6-3, 図6-7)。



(a) ロボット区の作業軌跡



(b) 残耕と作業重複度

図6-6 ロボット作業の作業軌跡と作業重複度²⁴⁾

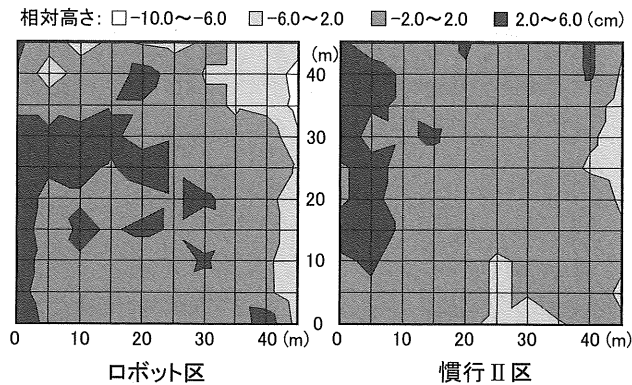


図6-7 代かき後のほ場表面の相対高さ等高線図²⁴⁾

4) 総合評価と課題

上記の試験結果から、ロボットによる代かきは設定した作業経路で忠実に作業が行えるので、無駄のない効率的な作業を行うことができることが分かった。一方で、代かきの仕上がり精度を確保するためには、ほ場の高低差に応じて、また、直進作業時と旋回作業時によって作業速度や耕深を調節する機能を持たせることや、有人運転作業と組み合わせた作業方法などを検討する必要があると考えられた。

6.4 摘要

ロボットの有効な利活用方法として、まず1人のオペレータがロボットに作業を行わせながら従来型トラクタの有人運転作業を行う「2台同時作業法」を提案し、作業試験を行った。次に、ロータリ耕以外の作業として播種作業と代かき作業をロボットにより行う方法について、これらの作業ソフトを作成し、作業試験を行った。

(1) 2台同時作業法によりロータリ耕を行った結果、1人のオペレータでロボット作業と有人運転作業を同時に行うことが可能で、直進性などの作業精度はロボット作業が有人運転作業より優れていた。

(2) 2台同時作業法により、オペレータ1人で従来型トラクタによる有人運転作業の約1.8倍の能率でロータリ耕を行うことができ、同作業法はロボットの有効かつ安全な活用法であると評価できた。

この作業法を有効に実施するためには、ロボット作業がトラブル無く行われるように初期設定を適正に行うことや、有人作業とロボット作業を時間の無駄がないよう

に組み合わせる必要がある。

(3) 標準作業ソフトをベースに「播種ソフト」を作成し、農家ほ場で作業試験を行った結果、ロボット作業と肥料や種子の補給を1人で行う麦播種作業を高精度で行えることを確認した。ロボットによる播種作業は、省力化と軽労化を達成できるロボットの活用法であると評価できた。

(4) 標準作業ソフトをベースに、作業方向を変えての繰り返し作業を任意に選択・設定できる「代かきソフト」を作成した。作業試験の結果、ロボットによる代かきは効率的で無駄のない経路で行えることを確認できた。しかし、代かきの仕上がり精度を高めるためには、作業速度や耕深を適宜調節できる機能が必要であると考えられた。

(5) これらの作業試験において、航法システムを含むロボットの取扱い性については特に問題はなく、ロボット作業は円滑にトラブルなく行われた。

第7章 ロボットの課題と対応

第6章までにロボットの構成や機能、ほ場試験により実証した性能等を述べた。開発したロボットは、慣行のトラクタによる有人運転作業と同程度の作業能率、精度で各種の無人作業が行える性能を有しており、無人作業の取扱い性や信頼性、安全性についても、実用利用できるレベルに近いものとすることができた。

しかし、このロボットを現状の日本の農業現場つまり農家作業に導入・普及させるためには、まだ解決・対応すべき課題があり、それはロボットの低価格化と安全性・信頼性の更なる向上、及び農業現場での有効な利用・運用方法の確立である。これらの課題の現状と解決・対応方法について、試算の結果や試行的に行った人・障害物センサの性能調査結果も含めて以下に論じる。

7. 1 ロボットの価格とGPSの利用

ロボットの価格について、現状のロボットをトラクタメーカーなどから市販化することを前提に試算を行った。

ベースとなる市販トラクタは20kWクラスで250万円前後である。最新の市販トラクタは全油圧操舵機構や電子油圧変速機構、電子ガバナーなどの各部操作のドライブ・パイ・ワイヤー化が進んでおり、ロボット車両としてコントローラからの指令により各部を自動制御できるようにする改造や、各部状態の計測システムの構成・装備に係る経費は50万円程度(①)と見ることが出来る。

作業ソフトを含むコントローラの装備には、メインコントローラに市販の小型PCを用いることとして作業ソフト込みで35万円、各部の計測・制御を行う車両制御コントローラは市販のトラクタやコンバイン用の計測・制御用コントローラ数台と必要な入出力モジュールにより構成して15万円、合計50万円程度(②)が必要と考えられる。

航法システムXNAVの価格は、基幹となる自動追尾型測量装置AP-L1の最新版が230万円、無線通信機が10万円、小型PCを用いる基準局用コントローラと電源装置で20万円、ロボットの進行方位と傾斜を計測する地磁気方位センサと傾斜センサの装備に係る経費が10万円で、計270万円程度(③)と見積もることができる。地磁気方位センサと傾斜センサには、別研究で開発した自

動直進田植機用の方位センサユニットを適用することとした¹⁹⁾。

これらを合計すると、ベーストラクタが250万円で、ロボット化のための改造・機器装備経費は上記①、②、③の合計370万円で、アフターサービス等の経費が通常農機より割高に加算されて400万円程度と見積もることができ、ロボットの価格は計650万円となる。

この約400万円のロボット化経費は、比較的規模の小さい家族経営の農業にとっては、ロボット利用による省力化や軽労化、作業精度向上の効果が生産コスト低減にあまり結びつかず、高いものと考えられる。このような経営の農家にもロボットを普及させるためには、同経費を20kWクラスのトラクタ価格250万円よりも少額に抑える必要があると考える。

一方、比較的規模が大きく雇用労働に頼る割合の大きい農業においては、ロボット利用による効果が生産コスト低減にもたらず効果は大きく、400万円のロボット化経費は決して高いものではないと考えられる。大規模な農業経営では使用トラクタも大型のものが多く、同経費はベーストラクタが大型になってもほぼ同額であり、ベーストラクタの価格に対する同経費の割合は小さいものとなる。さらに、第6章の第1項で述べた2台同時作業法は、1人のオペレータでほぼ2人分の機械作業を行うことが可能であり、1人で2台以上の同時作業への拡大も期待される。このようなロボットの活用方法は、規模が大きく雇用労働に頼る農業においてより有効であり、雇用者による作業精度の低下やバラツキをロボット作業により小さくできるというメリットもある。

上記のように、ロボットを導入・利用する農業経営の状況により、約400万円のロボット化経費の評価は違ってくるものの、同経費は低減するに越したことはない。その低減には、同経費の半分以上を占める航法システムのコストを下げる事が考えられる。航法システムXNAVの場合、基幹となる自動追尾型測量装置AP-L1の価格が現時点で230万円であるが、今後、その価格が大きく下がることはあまり期待できない。その理由は、同測量装置の需要は測量分野が中心であり、その需要に農業ロボットでの需要を加えても、さほど大きくなること

は考えにくく、価格の低減には限度があると考えられる。

航法システムの低コスト化が期待されるのは、全地球測位システム GPS を適用した航法システムである。日本においても、後述する MSAS 方式の補正情報の無料配信が国土交通省により行われるようになり、GPS 利用のインフラ整備が進みつつあり、今後のコスト低減と高性能化が期待される。表 7-1 は、現在我が国で利用できる GPS の性能やコストをまとめたものであるが、位置検出精度数 cm のリアルタイムキネマティック方式の RTK-GPS が自前の固定局を設けなくても利用可能であり、コストも XNAV システムと大差なく、今後の更なる低コスト化、高性能化が期待される。

MSAS 方式の GPS は、航空機用として国土交通省が運用する運輸多目的衛星用衛星航法補強システム (MSAS: MTSAT Satellite-based Augmentation System) の補正情報を利用するもので、補正情報が無料配信されるためランニングコストが不要であり、数十万円の初期投資のみで利用できる。MSAS 方式の GPS は位置検出精度 (誤差) が 50cm 程度とされているが、ほ場近くに絶対位置が既知の定点を設けておき、作業前にロボットをその定点に定置させて誤差をキャンセルすれば、作業ほ場の区画情報との整合が可能である。また、その後の無人走行では、光ファイバージャイロなどから構成される方位・姿勢センサとハイブリッドすることにより高精度な位置決めが可能であり、ロボットの航法システムとして適用するこ

とが十分可能と考えられる。

StarFire-GPS は、米国の総合農機メーカーであるジョンディア社が補正情報の配信などの運用も行っている GPS システムであり、比較的低コストで精密農業や農用車両の自動走行に必要な位置検出性能を有する「農業用 GPS」ということができる。これまでに農業・農機用として数千台が販売・利用され、位置検出の安定性や信頼性も高く、今後、日本でも低コストで利用できるようになれば、ロボットの航法システムとして使われるものとなる。

アンテナを複数搭載・装備することにより、搭載車両の方位や姿勢を高精度で検出できる GPS も数十万円程度のものが市販化されており、GPS がロボットの航法システムとして最有力であることは言うまでもない。しかし、各種の補正情報の配信・取得の安定性、信頼性にまだ不十分なところがあることも事実であり、その対応として、GPS による高精度な位置検出が行えない場合を補うことのできる航法システムをハイブリッドする形で適用することが必要である。あるいは、複数のロボットによる同時作業や各種ロボットによる一貫作業体を行うロボットファームを前提に、自前の補正情報配信システムを構築して安定性・信頼性を確保することも考えられる。

その他のロボット化経費については、トラクタを始めとする農用車両で各部操作のドライブ・バイ・ワイヤー

表 7-1 我が国で利用できる GPS 位置検出システム

名称・種類	補正情報の配信	位置精度	価格(円)※	特徴等
単独 GPS	補正なし	10 m	数千	安価, 取扱い容易
ビーコン GPS	海保庁がビーコン電波により無料配信	2.0 m	10 万	比較的安価, 中精度 内陸部では単独 GPS に
MSAS-GPS	国交省が人工衛星から無料配信	0.5 m	30 万	比較的安価, 中高精度 2007 年度から正式運用
OmniStar-GPS など	民間会社が人工衛星から有料配信	0.5 m	70 万 +補正情報料	やや高価, 中高精度
StarFire-GPS	民間会社が人工衛星から有料配信	0.2 m	150 万 +補正情報料	高価, 高精度, 農業用で実績有り 米国での初期コスト: 40 万円
RTK-GPS	民間会社が携帯電話網等を使い有料配信	0.05m	250 万 +補正情報料	高価, 超高精度 携帯電話網での補正情報配信有り

※ 日本での数台程度の購入価格。補正情報料は 1~3 万円/月、月単位での契約可能。

化や自動制御化が進んでいること、また車載のコントローラとして使用できるコンパクトなPCが高性能、安価になっていることから、今後、徐々に低減していくものと考えられる。

7. 2 ロボット作業の安全性・信頼性の向上

本研究では、オペレータは、作業ほ場内へのロボットの移動とロボット作業の初期設定及び開始操作を行った後は、種子や肥料等の補給やトラブル等への対応を除きロボット作業に関与する必要がないこととした。また、第3者が作業ほ場内に入ること等を防止する作業安全のために、オペレータは作業ほ場から遠くない場所にいて、時折ロボット作業を監視しつつ別作業を行うことを前提条件とした。

ロボットには、作業の安全性や信頼性を確保するための装備・機能として、障害物に接触した場合に非常停止する機構やオペレータが無線送信機のボタンを押すことにより非常停止する機構を装備し、また、第4章で述べた作業前の自己診断機能や作業中の異常時対応機能を付加することにより安全で信頼性の高い無人作業が行えるように対策を講じた。

しかし、農業現場である屋外ほ場は解放空間であることが普通であり、第3者がロボットに近づく可能性は高く、遠くない場所にいるオペレータが時折監視してもそ

の状況に100%気付くという保証はない。この作業環境の中、ロボットの導入・普及には更なる作業安全の確保が必要と考えられる。

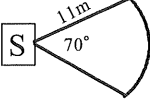
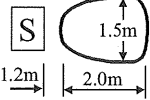
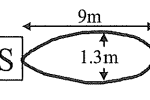
7. 2. 1 作業安全の確保

第3者が作業中のロボットに近づくことがあっても危険を回避するためには、人がロボットに近づいた状況を100%の信頼性で検出してロボット作業を停止できるようにする必要がある。

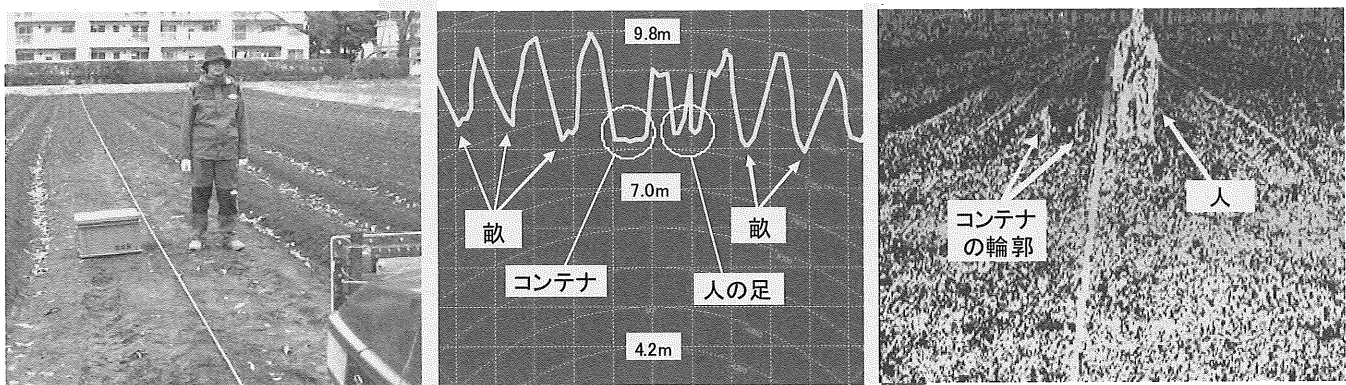
この対応を実現するためのポイントは、ロボットの周囲半径10m程度の範囲内に人が入ったことを確実に検出できるセンサやセンサシステムを装備することにある。検出範囲については、人が作業中のロボットに故意に駆け寄る場合を除けば、半径10mの範囲で人を検出して非常停止することにより危険は回避できると考えられる。しかし、検出範囲10mの人検出センサで、ロボットに搭載・装備して所期の性能を発揮できるものは意外に少ない。

表7-2は、市販の人・障害物センサや自動車用のビジョンセンサについて、屋外での人の検出性能を調査した結果などをまとめたものである¹⁷⁾。表のNo.2と3は障害物センサと称されるもので、超音波や赤外線を用いた反射型センサである。これらは数万円以下で市販されており、10m程度までの検出範囲内にいる人の存在を検出

表7-2 人・障害物検出センサの性能等¹⁷⁾

No.	名称(型式等)	検出対象, 原理	価格	人検出範囲 [※]	機能, 特徴等
1	焦電型 赤外線センサ (センザイ用)	人, 動物 熱源(赤外線)の 動きを検出	数 千円		存在のみ検出。 車両等の熱源の動きを検出する場合有り。安価。
2	超音波センサ スイッチ (オムロン E4A-3K)	人, 障害物全般 超音波の反射	2.5 万円		存在のみ検出。 距離検出型も有るが、やや高価。 地面に反応, 外乱の影響大きい。
3	光ビーム型 障害物センサ (サクス PX-26)	人, 障害物全般 光ビームの反射	4.0 万円		存在のみ検出。 サブセンサ(横方向用)を追加可能。 地面に反応する。
4	レーザー スキャナ (ジグ LMS221)	人, 障害物全般 レーザー光の反射	60 万円	半径 50m 程度の 半円(180°)内	扇形平面を高速でスキャン。対象までの距離や幅も検出可能。畝等を検出でき、自動追従用センサとして併用可能。
5	ステレオビジョンシステム (富士重工業)	人, 障害物全般 ステレオ画像 処理	数十 万円	半径 30m 程度の 視野(40°前後)内	対象までの距離, 対象の大きさや形状も識別可能。 自動運転用センサとして併用可能。

※ 人検出範囲は屋外での実測値, または屋外試験結果に基づく評価値。



(a) ほ場内の人とコンテナ
(8m 前方に存在)

(b) レーザースキャナの
データシート

(c) ビジョンシステムによる
取得距離画像

図 7-1 レーザースキャナと自動車用ビジョンシステムによるほ場内の人・障害物の検出結果例¹⁷⁾

できるが、人とそれ以外の物体を識別できないため、作物や雑草にも反応する、ロボットが傾斜した場合には地面にも反応するという問題がある。数千円程度の安価な人検出センサとして、建物の玄関などに設置される防犯ライトに用いられる焦電型赤外線センサがある(表の No.1)。赤外線を出す熱源の動きを検出することから人や動物に反応するセンサとして適用できるが、動くロボットに搭載・利用するため、動かない作物やほ場面の熱に反応する誤動作があることや、応答性や信頼性が高くないことに難点がある。

60 万円程度とコスト的には高くなるが、表の No.4 のレーザースキャナは検出範囲も大きく、出力データの処理により人や障害物までの距離計測や、ある程度の人とそれ以外の識別も可能である(図 7-1)。また、先行車両や走行レーンの認識ができる自動車用のステレオビジョンシステム(表の No.5)は 10 万円程度のコストで乗用車にオプション装備されているが、このビジョンシステムも取得データの処理によりほ場内の人や障害物などの情報を得ることができる(図 7-1)。これらのスキャナやビジョンシステムは、データ処理用のコントローラを用いる必要はあるが、人や障害物を検出するセンサとして用いるとともに、畝や作物列を検出して追従制御させるための航法システムとして併用することも可能である。

自動車に用いられる運転支援や安全確保のためのセンサやセンサシステムは、最近各種のものが開発・実用化されており、使用環境や使用目的が近いことやコスト的に安価であることから、農業における車両系ロボットに

適用・導入できる可能性が高く、その動向に注目する必要がある。

第三者が作業中のロボットに近づくことを回避するためには、作業ほ場内に人が入らないようにする対応も有力である。そのために、作業ほ場を柵などにより囲って立ち入り禁止とすることが考えられるが、柵などの設備費用が必要である点が課題である。設備費用の点では作業ほ場が点在する場合は尚更であり、同費用低減のためには、できるだけ作業ほ場を集めて、あるいは集まっている状況で、その周りを囲むようにすることが望ましい。ロボットを有効かつ安全に利用・運用するためには、作業ほ場が集まっており、ロボットの倉庫や基地からほ場までの移動やほ場間の移動は、第三者が通行しない専用道路を通ることが望ましく、このような構成の農場、ファーム全体を囲うことができれば最善である。一方で、作業ほ場毎に柵等で囲うことは費用の面で難点はあるものの、ロボットが万一暴走した場合、柵にバンパースイッチが触れて非常停止する、電気柵で囲った場合は電気を検出して非常停止するような暴走時対応も同時に行える点でメリットがある。

7. 2. 2 ロボット作業の信頼性の向上

ロボットによる作業の信頼性確保に関しては、作業前の自己診断機能や作業中の異常時対応機能により、想定される異常やトラブル、各部設定の不具合等を検出して適正な作業が開始、継続、完了できるような対応を行っている。ロボットの導入・普及に向けて、これらの機能

の課題は、ロボット作業の開始後に異常等が発生した場合に、オペレータがロボットの作業場所まで行って行う対応が多いことである。第6章で述べた2台同時作業法や後述するロボットの有効な利用・運用方法では、ロボット作業中にオペレータは他の作業にできるだけ専念できることが重要であり、そのためには、異常等が発生してもロボットが自ら対応できるように、あるいはオペレータがロボットの作業場所まで行くことなく対応できるようにする必要がある。これには以下が求められる。

- (i) 異常やトラブルへの対応としての各部の設定変更などをロボットが自ら行えるようにする。
- (ii) 発生した異常やトラブルなどの内容や原因をより細かく把握、特定できるようにする。
- (iii) その異常などの内容や原因を遠隔でオペレータに通知し、オペレータから遠隔でロボットに指示ができるようにする。
- (iv) 異常などへの対応をロボットが自ら判断し、行えるようにする。

(i)については、第2章で述べたロボットの自動制御できる対象を増やす必要があり、現状の制御対象に加えて、主変速、副変速、PTO 変速のシフトの自動制御化、作業機高さと機関回転数のアナログ的調整、及び機関の始動を自動制御できるようにする必要がある。これらの自動制御化は、ロボット化経費の増につながるものの、最新のトラクタでは難しいものではない。

(ii)は、例えば、作業中の速度低下があった場合に、その速度低下が車輪のスリップによるものか、作業負荷の増大によるものかを、位置変化から算出する速度値と機関回転数、作業機位置などを総合的に評価して判断できるようにすることが求められる。

(iii)は、ロボットとオペレータ間で情報を双方向通信できる無線通信・制御システムを構成・適用する必要がある。現状のロボットでも遠隔で非常停止が行える無線送信機を備えており、その機能拡充により実現できるものである。

(iv)については、(i)と(ii)の対応と作業ソフトの異常時対応機能の充実により行える機能である。異常やトラブルの適正な判断と各部の設定変更の適切な対応が行われるソフト作成に工夫が必要と考えられるが、判断・対応が難しい場合は、(iii)の装置によりオペレータに対応

を求めれば良いと考える。

ロボット作業の信頼性の向上では、各部の作業前設定をほ場条件などに応じて適切に行うことが重要であることは言うまでもない。2台同時作業法では、ロボット車両のベーストラクタと有人運転作業に用いるトラクタ及び作業機を同一のものとすれば、作業ほ場の違いによる対応は必要かもしれないが、別々に設定や確認を行う手間は省ける。

7. 3 ロボットの有効な利用・運用方法

第6章で述べた2台同時作業法はロボットの有効な利活用方法のひとつであり、この作業法を適用することにより、オペレータ1人で従来型トラクタによる慣行作業の約1.8倍の能率で作業を行うことができた。また、同じく第7章で述べたロボットによる播種作業により、慣行の2人作業を1人作業で行うことが可能となり、その1人作業もトラクタの長時間にわたる運転から解放されるので軽労化が達成される。

これらのロボットの利用・運用方法に関する検討や提案、ほ場作業による実証については、本研究では、一部のトラクタ作業を対象に、ほ場内作業の能率向上や省力化などの効果を試験、評価するに止まっている。農業現場への導入・普及を考えた場合、ロボットのほ場までの移動や播種作業における種子や肥料のほ場までの運搬、播種作業中のオペレータの空き時間の有効活用などについて検討する必要がある。さらには、ロボットを導入する農場におけるほ場の並びや移動のための農道を含む構成も、ロボットを効率的かつ安全に利用・運用する上で重要な要素となる。もちろん、費用対効果の点でメリットが高い経営規模や経営形態などは、他にも増して検討を行う必要がある事項である。

第1章で述べた農業ロボットへの期待が高まる中、ロボットトラクタを含む車両系ロボットの実用化に向けて、「農用ロボット車両による農作業システムの研究」を2007年度から開始した。この課題は、各種の車両系ロボットを導入・適用して行う水稲作について、人の関わり方や農場の構成等も含めた生産システムとしてのモデルを策定する、また、策定したモデルの実証試験を既開発ロボットを用いて行う研究課題であり、ロボットの有効な利用・運用方法を明らかにすることを目的とした研究

課題である。

以下に、ロボットの有効な利用・運用方法を明らかにするために行ったロボット作業のモデル化研究の一部を紹介するとともに、ロボット作業のモデル化における考え方について論じる。

7. 3. 1 ロボット作業のモデルの一例

ロボット作業のモデルのひとつとして、ロボット化による省力・省人化に主眼を置き、規模 10ha 以上の水稲作において、資材等の運搬・供給を含むほ場作業をオペレータ 1 人で行うモデルを検討、策定した。モデルの策定に当たっては、育苗から収穫籾の調製までの作業と適用ロボットの種類や性能等について以下の前提条件を設定した。

- (i) 苗は育苗センターから購入し、収穫籾は共乾施設で処理する。
- (ii) 導入・適用するロボットは、ロボットトラクタ、ロボット田植機、ロボット管理機、及びロボットコンバインとする。
- (iii) 資材の供給等が不要な作業はロボット作業と従来機械による有人運転作業を同時並行で行う。
- (iv) 資材の供給等が必要な作業は作業者が運搬・供給を行う。
- (v) ロボットの移動方法は、専用農道上を作業者が運転する従来トラクタや運搬車等に自動追従して移動する。
- (vi) ロボットは、ほ場の出入口付近で 5 分程度の初期設定を行えば、資材の補給等を除くほ場内作業は完全無人で行うことができる。
- (vii) ロボットのベース機械と従来機械は同等クラスとし、ロボット作業の能率・精度は従来の機械作業と同等とする。
- (viii) 作業中の資材や燃料の補給、トラブル対応等が必要な状況はロボット自身が検出し、オペレータに無線通信等により報知する。
- (ix) 各種ロボット間で航法システムやコントローラを載せ替え共用化することにより、ロボットのコスト低減と作業性能の均一化を図る。

これらの条件を前提に策定したモデルの一例について、従来作業の方法やロボット適用作業の方法と効果、及び

労働時間の試算結果を表 7-3 に示す。モデルにおいて、資材等の供給等が必要でない耕うんや代かき、機械除草作業では、ロボット作業と従来機械の有人運転作業の並行実施により 1.8 倍の作業能率の向上が達成されると見込んだ。この 1.8 倍の能率向上は本研究の 2 台同時作業法の結果を適用したものである。資材や収穫物の運搬・供給を要する作業では、ロボットがほ場作業を行い、作業者が運搬・供給を行うことにより、1.5 倍または 1.3 倍の能率向上がなされると想定した。これらの能率向上が達成されることを前提にロボット作業の労働時間を試算した結果、従来作業に比べ約 20% の労働時間の削減つまり省力化が達成されると見込まれた⁵⁾。

7. 3. 2 ロボット作業のモデル化における考え方

前項のロボット作業のモデルは、水稲作における各種作業を、各種のロボット 1 台と従来型機械をオペレータ 1 人で運用・作業して行うモデルの一例である。このモデルでは、資材や収穫物の運搬・供給が必要な施肥や田植え、収穫の作業では、作業者は専ら資材等の運搬・供給を行うこととしてロボット利用作業の効果を 1.5 倍、または 1.3 倍と見込んだ³⁾。

オペレータが 1 人でロボットを利用・運用する方法は、資材等の運搬・供給が必要でない作業では、本研究で提案した 2 台同時作業法のように慣行作業の 1.8 倍、またはそれ以上の省力化効果を得ることができる。しかし、資材等の運搬・供給が必要な作業においては、資材等の運搬を行う作業者に空き時間や待ち時間が生じる可能性が高く、収穫作業では逆にロボット作業に空き時間や待ち時間が生じる可能性があり、省力化の効果が 1.5 倍を超えることは難しいと考えられる。このような空き時間や待ち時間を少なくするためには、ロボットの作業能率やホッパ・タンク容量、オペレータが行う資材等の運搬の能力や運搬距離などを考慮した上で、有人運転作業も並行して行うモデル、複数台のロボットを 1 人で運用するモデル、さらに複数のオペレータにより有人運転作業とロボット作業を並行実施するモデルなどを検討する必要がある。

当面、ロボット作業の安全性や信頼性の観点からオペレータが必ず関与することを前提にする必要がある。こ

表 7-3 水稲作におけるロボット作業のモデルと効果試算の一例⁵⁾

作業	従来作業における 使用機械・方法	慣行推定 延べ労働 時間(T1)	慣行推定 総労働 時間(T2)	ロボット作業の方法/効果 [有人作業の内容等]	ロボット 推定延べ 労働時間 (T3)	ロボット 省力効果 (T4)	ロボット 推定 総労働 時間(T5)
		h-人/ha	h-人/ha		h-人/ha	h-人/ha	h-人/ha
耕うん ・砕土	40kW 級トラクタ +ロータリ	6.3	9.0	ロボット無人+従来トラ有人 /効果 R=1.8	3.5	2.8	6.2
基肥施用	40kW 級トラクタ +肥料散布機	0.3	0.4	ロボット無人+運搬・供給有人 /効果 R=1.3	0.2	0.1	0.3
代かき	40kW 級トラクタ +代かきハロー	5.0	7.1	ロボット無人+従来トラ有人 /効果 R=1.8	2.8	2.2	4.9
田植え	8条植田植機	3.6	5.1	ロボット無人+運搬・供給有人 /効果 R=1.5	2.4	1.2	3.9
水管理	自動水管理装置	9.0	12.9	[見回りと水管理] (/効果 R=1.0)	9.0	0.0	12.9
畦畔 草刈り	畦畔草刈り機	4.0	5.7	[1ha 水田で 600m草刈り] (/効果 R=1.0)	4.0	0.0	5.7
雑草防除	乗用管理機 +8条除草機	10.9	15.6	ロボット無人+従来管理機有人 /効果 R=1.8	6.1	4.8	10.8
追肥施用	乗用管理機 +肥料散布機	1.3	1.9	ロボット無人+運搬・供給有人 /効果 R=1.3	1.0	0.3	1.6
病虫害 防除	乗用管理機 +ブームスプレー	2.6	3.7	ロボット無人+運搬・供給有人 /効果 R=1.3	2.0	0.6	3.1
収 穫	6条自脱型コンバイン	4.5	6.4	ロボット無人+籾運搬有人 /効果 R=1.5	3.0	1.5	4.9
計		47.5	67.8		34.0	13.5	54.3

※ ロボット作業の「ロボット無人」はロボットトラクタ, ロボット田植機, ロボットビークル, ロボットコンバインによる無人作業。「有人」は有人作業。
ロボット作業の効果 R は, 従来作業と比べてロボット作業により作業能率が向上する割合(作業員1人当たりの想定倍率)。

労働時間: T1 = 作業回数×100/(0.36×作業速度×作業幅×作業効率), 資材等の運搬・供給が必要な作業は ×1.5

T2 = T1/0.7(= 平均的実作業時間率), T3 = T1/ロボット作業の効果 R, T4 = T1-T3, T5 = T2-T4

の前提の下, ロボットを有効に利用・運用するためのモデル化においては, オペレータが行う作業とロボット作業のどちらにも, 空き時間や待ち時間が生じないように両作業を組み合わせることが重要である。その組み合わせを考える場合には, ロボット作業と有人作業の作業能率, 資材等の供給・運搬の時間間隔などの作業に直接関わる要素や, ロボットの倉庫から作業ほ場までの移動やほ場間の移動にオペレータが関わる程度・時間などの要素を考慮する必要があるが, これらの要素に自由度や可能性を多く持たせると, 策定されるロボット作業のモデルは無際限に多くなる。

そのため, ロボット作業のモデルに関わる要素については, 前項で設定した前提条件のように, できるだけ現状のロボットの機能, 性能, そして農業現場の状況を踏まえたものとし, 自由度や可能性を持たせるとしても, 当面実現の可能性の高いものとする必要があると考えら

れる。そして, その実現の可能性が高い要素については, それを実現する方向でロボット自身の開発・改良を進め, また, それを実現する方向でロボット作業のための環境整備を行って, ロボット作業の導入・普及を推進することが重要である。

7. 4 摘 要

開発したロボットを現状の日本の農業現場つまり農家作業に導入・普及させるためには, ロボットの低価格化と安全性・信頼性の更なる向上, 及び農業現場での有効な利用・運用方法の確立が必要である。

(1) 開発したロボットをトラクタメーカーなどから市販化する場合, その価格は, ベーストラクタが 250 万円として, それにロボット化のための改造・機器装備等の経費約 400 万円を加えた 650 万円程度と見積もることができた。

(2) ロボット化経費の低減には、航法システムに GPS 位置検出システムを適用することが有望であり、GPS 利用のためのインフラ整備や性能向上、利用コスト低減などの動向が注目、期待される。

(3) ロボット作業の安全確保では、人がロボットに近づいた状況を 100%の信頼性で検出して作業を停止する機能を持たせる必要があり、信頼性の高い人検出センサの選定が重要である。

(4) ロボット作業の信頼性向上では、異常時対応機能において、異常等の状況把握と各部の自動制御をより細かく行えるようにして、オペレータがその状況を遠隔で把握し、対応を遠隔で指示・実行できるようにする必要がある。異常等への対応をロボットが自ら判断・実行できれば、より望ましい。

(5) 農業現場への導入・普及を前提としたロボットの有効な利用・運用方法について、省力・省人化を目的に、水稲作における資材等の運搬・供給を含むほ場作業をオペレータ 1 人で行うモデルを検討、策定した。

(6) ロボット作業のモデル化においては、ロボットのほ場までの移動や資材等の運搬・供給の方法、有人運転作業とロボット作業の効率的な組み合わせ、ほ場の並びや農道を含む適用農場の構成、さらには費用対効果の点でメリットが高い経営規模などを検討、考慮する必要がある。これらの要素は、できるだけ現状のロボットの機能や性能、農業現場の状況を踏まえたものとし、自由度や可能性を持たせるとしても、当面実現の可能性の高いものとする必要がある。

第8章 総括

本研究は、人間に代わって農作業を行うロボットトラクタ（以下、ロボット）を開発し、その性能評価と実用化に向けた検討を行ったものである。

無人運転のための航法システムには光学測量装置を基幹とする XNAV システムを適用し、ロボット車両には市販の乗用トラクタを改造して適用した。ロボット作業を行うソフトウェアとして、慣行のロータリ耕作業に準じた作業方法により矩形区画を完全無人で作業できる作業ソフトを適用した。これらの構成要素を統合したロボットにより 50a 区画のほ場で作業試験を行い、慣行の有人運転作業と同程度の作業能率、作業精度でロボット作業を行うことができた。

ロボットの適応性拡大や効率的な利活用方法の研究として、各種経路の作業や播種、代かき作業を行える作業ソフトの開発、及びロボット作業と有人運転作業を同時並行で行う 2 台同時作業法の提案を行い、ほ場作業試験によりそれらの開発ソフトの性能や作業法の効果等を確認した。2 台同時作業法は、オペレータ 1 人で従来型トラクタによる慣行作業の約 1.8 倍の能率では場作業が行え、ロボットを有効かつ安全に活用する作業法と評価できた。

開発したロボットの性能は、慣行の有人運転作業と同程度の作業能率、作業精度で各種の農作業が行え、省力効果や取扱い性、信頼性、作業安全の点についても実用利用できるレベルに近いものとすることができた。

以下、構成要素毎の開発内容や性能試験結果、課題などを個別にまとめる。

8. 1 航法システムとロボット車両

ロボットに適用する航法システムの目標仕様、性能を検討、設定した。その目標を満足する既存航法システムは見あたらず、位置情報を外部標識方式により、進行方位情報を内部情報方式により計測する航法システムを適用することとした。

ロボットの航法システム XNAV では、外部標識方式トラバース式の位置計測システムをほ場外の定点に設置し、トラクタの位置を計測して、無線通信によりトラクタに送信する方式とした。位置計測システムの基準局装置に

は、市販の自動追尾型トータルステーション「AP-L1」を適用し、500m 程度まで離れてトラクタの位置を誤差 5 cm 以下、計測周期 0.5s で計測できる性能が確認された。航法システム XNAV では、地磁気方位センサ (TMS) をトラクタに搭載して、進行方位情報を計測・取得した。TMS 出力と計測位置情報に対してはロボットの傾斜による誤差の補正を行った。

ロボットの車両システムには、市販トラクタのクボタ GL321 をベースに、操舵機構やシャトル変速、スロットル、作業機昇降などを自動制御できるように改造して用いた。また、各操作機構や車両各部の状態をコントローラによりデジタル計測できるように、ベーストラクタの既設センサや新たに装備したセンサの出力を自動計測するシステムを構成した。

ロボットのメインコントローラにはファクトリコンピュータ (NEC 製, FC9821Ka) を、各部の自動制御・計測のための車両制御コントローラには (株)クボタが製作したものを用いた。

安全装備として、障害物接触時や遠隔操作、作業ソフトによる異常検出により非常停止する機能を装備した。

8. 2 ロボット作業と作業ソフトの基本

ロボット作業は、ほぼ水平な矩形ほ場において、慣行のロータリ耕作業に準じて、区画周辺部を除く中央付近を往復作業し、その後、枕地部分を含めた周辺部分を 3 周作業・処理する方法により行うこととした。この作業方法を「標準作業法」とし、その作業を行うためのコンピュータ・プログラムを「標準作業ソフト」とした。

ロボット作業を行う区画の情報は、作業区画の最外周の周り作業経路上を手動運転により一周する「ティーチング」を行って取得する。

作業ソフトは、ティーチングと経路計画を行う「タスク・プランニング部」と、生成した経路に沿う走行、作業を遂行する「走行・作業制御部」により構成した。

走行・作業制御部は、ほ場の出入口付近から往復作業の開始位置まで移動する「空走 1 モジュール」、区画の中央付近を往復作業する「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

2モジュール」,そして枕地部分を周り作業する「周り作業モジュール」に分割,構成した。これらのモジュールは,「前進直進制御」,「後進直進制御」,「180° 旋回制御」,「90° 旋回制御」,「幅寄せ制御」のための共通ルーチンから構成した。

8. 3 ロボット作業(作業ソフト)の発展

ロボット作業の適応性向上・拡大の研究として,標準作業法の改良の他,区画長辺に対し斜めに往復作業を行う「斜め作業法」や,区画4辺に平行な直進作業を区画全面に行う「回り作業法」への展開を行った。

慣行のロータリ耕作に準じた作業を行う標準作業法については,ほ場の大きさなどの条件に応じて作業重複幅の設定方法や設定経路の履行順などを変更,選択できるようにした。

斜め作業法では,その経路計画と車両誘導に斜め角度に基づく座標変換を適用することにより,標準作業ソフトをベースに斜め角度を任意に設定できる「斜め作業ソフト」を開発した。

回り作業法では,区画外側から中央に向かって作業を進める方法と,逆に,区画中央から外側へ作業を進める方法を行うための経路計画とロボット作業を実行する「回り作業ソフト」の開発を行った。

次に,ロボット作業の信頼性向上と安全性確保を目的に,作業前に実施する「自己診断」と作業中に行われる「異常時対応」を行うプログラムを開発し,作業ソフトに組み込んだ。

自己診断はオペレータによる初期設定の後に行われ,航法情報の正常な取得やロボット各部の適正な設定・動作などをロボット自身がチェックし,異常があった場合はオペレータに修正対応を要求する。異常時対応では,作業中の航法情報の取得や各部の動作状態などを適宜チェックし,異常があった場合は,作業の停止,警報などの後,正常状態への修正や復帰処理がオペレータとロボットの対話に基づき進められる。これらの機能の動作は故意に異常な状況を作った試験により確認した。

8. 4 ロボット作業の性能評価

上記の航法システム,ロボット車両,及び作業ソフトを統合したロボットの性能評価を行うために,無人作業

の評価試験方法を策定するとともに,ロボットによるロータリ耕作の評価試験を行った。

評価試験においては,無人作業の効果を評価するために作業能率などの指標を設定し,ロボット作業の精度を評価するために直進性や直進の平行度などの指標を設定して,測定と評価を行った。

埼玉県鴻巣市の生研センター附属農場での評価試験では標準作業法のロボット作業の試験を行い,ロボット車両を有人運転で作業する対照試験も実施した。評価試験の結果,50×100mの矩形ほ場において,有人運転作業と同程度の作業能率でロボット作業を行うことが可能であった。直進性等の作業精度では有人運転作業を上回る作業が行われた。

ロボットの取扱い性についても,トラクタ作業の経験者を対象に評価試験を行った。試験の結果,用意した取扱説明書に従って初期設定等を行うことが可能であり,問題なくロボット作業を開始,終了できることが分かった。

斜め作業法と2通りの回り作業法のロボット作業について,ベースとなる標準作業法も含め,開発した作業ソフトによるロータリ耕うんの作業試験を行った。作業試験の結果,いずれの作業法でも残耕や区画はみ出しのない良好なロボット作業を行うことができた。これらの新たに提案,開発した作業法は,ロボット作業によって,はじめて高効率・高精度な作業の実施が可能な作業方法である。

8. 5 ロボット作業の活用

ロボットの有効な利用方法として,1人のオペレータがロボットに作業を行わせながら従来型トラクタの有人運転作業を行う「2台同時作業法」を提案し,作業試験を行った。また,ロータリ耕以外の作業として播種作業と代かき作業をロボットにより行う方法について,これらのロボット作業を行う作業ソフトを作成し,作業試験を行った。

2台同時作業法によりロータリ耕を行った結果,1人のオペレータでロボット作業と有人運転作業を同時に行うことが可能で,直進性などの作業精度はロボット作業が有人運転作業より優れていた。本作業法により,従来型トラクタによる有人運転作業の約1.8倍の作業能率

でロータリ耕を行うことができ、ロボットの有効かつ安全な活用法であると評価できた。

標準作業ソフトをベースに「播種ソフト」を作成し、農家ほ場で作業試験を行った結果、ロボット作業と肥料や種子の補給を1人で行う麦播種作業を高精度で行えることを確認した。ロボットによる播種作業は、省力化と軽労化を達成できるロボットの活用法であると評価できた。

標準作業ソフトをベースに、作業方向を変えての繰り返し作業を任意に選択・設定できる「代かきソフト」を作成した。作業試験の結果、ロボットによる代かきは効率的で無駄のない経路で行えることを確認できた。しかし、代かきの仕上がり精度を高めるためには、作業速度や耕深を適宜調節できる機能が必要であると考えられた。

8.6 ロボットの課題と対応

開発したロボットを現状の日本の農家作業に導入・普及させるためには、ロボットの低価格化と安全性・信頼性の更なる向上、及び農業現場での有効な利用・運用方法の確立が必要である。

開発したロボットをトラクタメーカーなどから市販化する場合、その価格はベーストラクタが250万円として、それにロボット化のための改造・機器装備等の経費400万円程度を加えて、650万円程度と見積もることができた。そのロボット化経費の低減には、航法システムにGPS位置検出システムを適用することが有望であり、GPS利用のためのインフラ整備や性能向上、利用コスト低減の今後の動向が注目、期待される。

ロボット作業の安全確保では、人がロボットに近づいた状況を100%の信頼性で検出して作業を停止する機能を持たせる必要があり、高精度・高信頼性の人検出センサの選定が必要である。

ロボット作業の信頼性向上では、異常時対応における異常の検出とロボット各部の制御をより細かく行えるようにして、オペレータがその状況を遠隔で把握し、対応を遠隔で実行できるようにする必要がある。異常等への対応をロボットが自ら判断・実行できれば、より望ましい。

農家作業への導入・普及を前提としたロボットの有効

な利用・運用方法について、水稻作での資材等の運搬・供給を含むほ場作業をオペレータ1人で行うモデルを検討、策定した。

ロボット作業のモデル化においては、ロボットのほ場までの移動や資材等の運搬・供給の方法、有人運転作業とロボット作業の効率的な組み合わせ、ほ場の並びや農道の配置を含む適用農場の構成、さらには費用対効果の点でメリットが高い経営規模などを検討、考慮する必要がある。これらの要素は、できるだけ現状のロボットの機能や性能、農業現場の状況に沿ったものとする必要がある。

謝辞

本報告では、前報（農業機械化研究所研究報告第32号、2001年）で報告した研究も含め、ロボットトラクタを構成する航法システムやロボット車両、ロボット作業用ソフトの研究、ロボット作業の評価試験、さらに開発ロボットの改良研究と導入・普及に向けた課題の検討まで、20年に亘って行った研究の主に後半部分について報告しました。

研究を始めた当初は、ロボットを構成する要素技術の研究を手探りでやっている感があったが、1993年から本研究が農林水産省の「農業機械等緊急開発事業」の課題として行われることになり、農業機械メーカーやセンサメーカーの協力も得て、5年後の1998年には開発ロボットにより実用レベルの無人作業が行えるまでに進展した。

この「緊プロ事業」における研究開発は本研究の前半部分になるが、当時の生研機構の菅原敏夫元理事、基礎技術研究部の鈴木正肚元部長、鷹尾宏之進元部長からは貴重なご助言を頂き、深く感謝する次第であります。ロボットの製作やほ場試験の実施では基礎技術研究部の特別研究員であった油田克也君や附属農場の千葉哲朗元場長にご協力をいただいた。また、ロボットの評価試験では山形県農業試験場の芳賀泰典氏、後藤克典氏にご指導とご協力を賜り、深く感謝いたします。

さらに同事業では、株式会社クボタの伊藤勝美氏、入江康夫氏、藤井保夫氏、山中之史氏、日本航空電子工業株式会社の一杉則昭氏、肥後正氏ほかの皆様に、多大な

ご協力を頂きました。

緊プロ事業の下で実用レベルの農作業が行えるまでに至ったロボットについて、その後の改良や適応性等の向上・拡大研究、技術の周知・普及に向けたデモンストラーションなどの取り組みは本研究の後半部分であり、本報告の中心部分である。その後半部分では、生研機構の木田滋樹元理事、農業・食品産業技術総合研究機構の大森昭彦元理事、竹原敏郎前理事、生研センターの津賀幸之介元所長、同基礎技術研究部の小倉昭男前部長、及び後藤隆志部長から、ご指導とご助言を頂いたことに深く感謝する次第であります。また、基礎技術研究部の研究員であった濱田安之君には作業ソフトの改良やほ場試験などで共に研究を行い、ほ場試験の実施では北海道立中央農業試験場の原 令幸氏、関口健二氏にご協力頂いたことに、深く感謝いたします。

最後に、本報告をまとめるにあたり、終始懇切なご指導とご教示を賜りました京都大学大学院農学研究科の梅田幹雄名誉教授に深甚の謝意を表します。また、報告の作成にあたり、貴重なご助言とご指摘を賜りました京都大学大学院農学研究科の近藤 直教授、中嶋 洋准教授に厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 1) 飯田訓久, 山田裕介: GPS とジャイロを用いた無人コンバインによる稲収穫, 農業機械学会誌, 第 68 巻第 6 号, 138-143, 2006
- 2) 金藤祐治, 関 毎仁, 兼武祐二, 上谷弘踐: コンバインの自動化研究 (第 1 報), (第 2 報), 農業機械学会第 35 回年次大会講演要旨, 66-67, 1976
- 3) 木瀬道夫, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾日出男: RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット (第 1 報), 農業機械学会誌, 第 63 巻第 5 号, 74-79, 2001
- 4) 生物系特定産業技術研究推進機構: 航法機能を用いた農用車両知能化装置の開発—耕うんロボットの用途拡大に関する研究, 平成 12 年度生物系特定産業技術研究推進機構事業報告, 12-13, 2001
- 5) 生物系特定産業技術研究支援センター: 農用ロボット車両による農作業システムの研究—ロボット農作業のモデル化と耕うん・田植えロボットによる作業実証, 平成 19 年度生物系特定産業技術研究支援センター事業報告, 200-201, 2008
- 6) 戸崎紘一, 宮原佳彦, 市川友彦, 水倉泰治: 誘導ケーブル式果樹無人防除機の開発 (第 1 報), 農業機械学会誌, 第 58 巻第 6 号, 101-110, 1996
- 7) 長坂善禎, 谷脇 憲, 大谷隆二, 重田一人, 佐々木泰弘: 自動走行田植機の開発 (第 1 報) —リアルタイムキネマティック GPS による位置認識と自動走行—, 農業機械学会誌, 第 61 巻第 6 号, 179-186, 1999
- 8) 農林水産省: 食料・農業・農村基本法のあらまし, 1999
- 9) 農林水産省: 食料・農業・農村基本計画, 2010
- 10) 農林水産省: 農林水産基本データ集, 2010 他
- 11) 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
- 12) 林茂彦, 雁野勝宣, 黒崎秀仁, 有馬誠一, 門田充司: V 字型整枝されたナスを対象としたロボット収穫システム (第 1 報), 植物工場学会誌, 第 15 巻第 4 号, 205-210, 2003
- 13) 北海道立中央農業試験場農業機械部: 自律走行トラクタの圃場作業性, 平成 11 年度農業機械施設試験成績書, 156-170, 2000
- 14) 松尾陽介, 行本 修: 先進型アグリビジネスの創造—日本型農業を支える次世代農業機械への期待, ソフトサイエンス社, 128-141, 1998
- 15) 松尾陽介, 行本 修, 入江康夫, 一杉則昭, 野口 伸: 耕うんロボットの航法技術と作業性能 (第 1 報) —開発目標と 3 方式の航法システム—, 農業機械学会誌, 第 63 巻第 3 号, 114-121, 2001
- 16) 松尾陽介, 行本 修, 入江康夫, 一杉則昭, 寺尾日出男, 芳賀泰典: 耕うんロボットの航法技術と作業性能 (第 2 報) —車両等の仕様と作業性能の評価試験—, 農業機械学会誌, 第 63 巻第 3 号, 122-129, 2001
- 17) 松尾陽介: 農用車両のメカトロ化・自動化のための要素技術, 平成 16 年度生研センター研究報告会資料, 生物系特定産業技術研究支援センター, 79-80, 2005
- 18) 松尾陽介: 農業用ロボット最前線—③これまで

- の研究成果 (2005/11/3 週号-11 面), ④車両系ロボット (2005/11/4 週号-9 面), 農業共済新聞, 2005
- 19) 松尾陽介, 濱田安之, 小倉昭男: 自動直進田植機の開発促進評価試験, 平成 17 年度生研センター研究報告会資料, 生物系特定産業技術研究支援センター, 23-31, 2006
- 20) 松尾陽介: ロボット化技術を応用した農業機械の開発戦略, 平成 18 年度新農業新技術セミナー「進展するロボット化技術と農業機械の開発・改良」資料, 生物系特定産業技術研究支援センター・新農業機械実用化促進(株), 3-20, 2007
- 21) 松尾陽介: 近未来の農業生産技術—農用車両ロボットの開発事例と今後の展望, 果樹園芸, JA 全農えひめ, 第 61 巻第 1 号, 15-17, 2008
- 22) 松尾陽介, 行本 修, 野口 伸, 濱田安之: 耕うんロボットの適応性と信頼性の向上 (第 1 報) —無人作業の信頼性向上と安全性確保—, 農業機械学会誌, 第 70 巻第 2 号, 104-112, 2008
- 23) 松尾陽介, 行本 修, 野口 伸: 耕うんロボットの適応性と信頼性の向上 (第 2 報) —無人作業方法の適応性拡大—, 農業機械学会誌, 第 70 巻第 3 号, 82-88, 2008
- 24) 松尾陽介, 行本 修, 山本聡史, 野口 伸, 原 令幸: 耕うんロボットの適応性と信頼性の向上 (第 3 報) —耕うんロボットによる各種無人作業の実行—, 農業機械学会誌, 第 71 巻第 3 号, 85-93, 2009
- 25) 八木 茂, 武長 孝, 津賀幸之介, 瀬山健次, 梶山道雄: 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, ビークルオートメーション技術研究会, 47-48, 1978
- 26) 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—, 農業機械学会誌, 第 60 巻第 3 号, 37-44, 1998
- 27) 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—, 農業機械学会誌, 第 60 巻第 4 号, 29-36, 1998
- 28) 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—, 農業機械学会誌, 第 60 巻第 5 号, 53-61, 1998
- 29) 行本 修: 農業の現状と農業用ロボット開発状況, ロボット, (社) 日本ロボット工業会, 第 135 号, 11-18, 2000
- 30) 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, 農業機械化研究所研究報告, 生物系特定産業技術研究推進機構, 第 32 号, 19-76, 2001
- 31) 行本 修: 自律走行ロボットによる圃場作業の可能性, 農業機械学会シンポジウム「未来の食糧生産を支える農業ロボット・自動化フォーラム」講演論文集, 1-20, 2002
- 32) Monta, M., Kondo, N., Ting, K. C.: End-effectors for Tomato Harvesting Robot, Artificial Intelligence for Biology and Agriculture, Artificial Intelligence Review, An International Survey and Tutorial Journal, Kluwer Academic Publishers (Netherlands), Vol. 12, Nos. 1-3, 11-25, 1998

Summary

Development of Robot Tractor

Yosuke MATSUO, Osamu YUKUMOTO,
Satoshi YAMAMOTO, Noboru NOGUCHI

The robot tractor is mainly made up of a robot vehicle using commercially available tractor, so that respective parts be remodeled for automatic control, a navigation system called “XNAV” that detects and outputs robot positioning information with help of an auto-tracking type surveying device, and a controller loaded with an operation software which executes path planning and controls the robot vehicle. The robot has almost the same ability as conventional manned tractors and is capable of unmanned rotary tilling on a rectangular field at the same performance and precision level.

To improve the adaptability and the utility of robot work, we developed a software that enables a path operation different from the one for conventional rotary tilling, seeding, and soil-puddling. The field test then verified the performance and the effect of the newly developed software. We proposed a double-vehicle work method by which robot operation and manned operation are performed simultaneously. With this method, an operator was proved to be able to perform a field work at an efficiency of 1.8 times as that of usual work with a conventional tractor. The result confirmed that this simultaneous method enables an effective and safe utilization of the robot.

The robot performance was confirmed to be enough for its practical use from the viewpoint of labor saving, handling easiness, reliability, and work safety. Various farm works are done by the robot with work efficiency and accuracy almost at the same level as those of usual manned operation.

The details of development, results of performance tests and subjects for each component are summarized below.

1. Navigation System and Robot Vehicle

For the XNAV navigation system used in this research, an auto-tracking type surveying device “AP-L1” (Topcon Corporation) is set outside the field, and it automatically tracks the light reflector placed above the center of the rear axle of the tractor, and detects the tractor positioning information by around 0.5-second

time cycle. We confirmed that this system enabled measuring the tractor position at a distance of 500m with an error of 5cm or less.

The tractor heading information is measured and obtained by a geomagnetic direction sensor (“TMS”) mounted on the tractor. Errors due to the tractor inclination are compensated for the TMS output and measured position information.

For the robot vehicle system, a commercialized tractor (Kubota GL321) is used by modifying the mechanisms such as steering mechanism, shuttle transmission, throttle and implement elevation to be controlled automatically. An automatic measurement system of the outputs of existing sensors of the base tractor and newly installed sensors was configured, so that the controller could digitally measure the conditions of operating mechanisms and each part of the vehicle. A factory computer (NEC FC9821Ka) is used for the robot main controller, and a custom made controller by Kubota Corporation is used for automatic control and measurement of each part.

A safety mechanism is equipped to stop operation in case of contact to an obstacle or detection of any abnormality.

2. Robot Work and Operation Software

We designated a “basic operation method” and called a computer program to perform that operation “basic operation software”. This basic operation method is based on a rotary tilling work by use of respective implement.

The robot work for the basic operation method was designed to perform returning operations in the central area, excluding the peripheral area, and then the robot practiced turning around operation in the peripheral area, including the headland, in an almost horizontal rectangular field, which is similar to the case in customary rotary tilling.

Information on the field lot to perform robot work is obtained through “teaching” step in which the robot is manually traveled along the operation path around the outermost periphery of the work filed lot.

The operation software is composed of the “task planning section”, which performs teaching and path planning, and the “traveling and operation control section”, which performs traveling and operation along the generated path.

The traveling and operation control section is composed of four modules: the “off-work transfer 1 module” for moving from the entrance of the field to the work starting position, the “round-trip operation module” for processing to the central

area of the field lot, the “off-work transfer 2 module” for moving from the end position of round-trip operation to the initial position for turning around operation, and the “circular operation module” for turning around operation in the headland. These modules are composed of common routines for “straight forward control”, “straight backward control”, “180° turning control”, “90° turning control”, and “sideways movement control”.

3. Improvement of Robot Work –Expansion of Adaptability and Reliability

To expand the adaptability of robot work, we improved the basic operation method and proposed “diagonal operation method” in which the robot returns straight along a diagonal of the field lot and “round operation method” in which the robot runs straight forward all over the field along the four sides of field lot.

We modified the basic operation software, in which work is performed as in customary rotary tilling. In doing so, we secured that the method to set the work overlapping width and the order of paths were changed and selected according to work conditions such as field lot size.

For diagonal operation, we developed an operation software to set an arbitrary diagonal angle on the basis of the basic operation software, by applying geometric transformation to path planning and vehicle guidance, based on the diagonal angle.

For round operation, we developed an operation software so that path planning and robot work could proceed both from the outside toward the center and from the center toward the outside of the field lot.

To improve the reliability and ensure the safety of robot work with XNAV, we developed programs to perform “self-diagnosis” before starting work and issue “abnormality alarming” during work, and incorporated these into the operation software.

After the operator makes initial settings, the robot performs self-diagnosis in which it checks itself for ordinary acquisition of navigation data and appropriate setting and operation of each part of the robot. If it detects any abnormality, the robot requires the operator to take corrective measures. For abnormality alarming issuance, normal acquisition of navigation data during work and appropriate setting and operation of each part of the robot are checked. If any abnormality is detected, corrective measures are taken to restore the robot to the normal state based on a dialogue between the operator and the robot after the work is stopped and an alarm is issued. Operation of these functions was verified through tests on intentionally created abnormal conditions.

4. Evaluation of Robot Work Performance

We established testing methods for unmanned work and conducted evaluation tests of rotary tilling in farm fields by the robot, in order to evaluate the work performance of the robot we have discussed, integrating the navigation system, robot vehicle and operation software.

We set indexes such as operator efficiency in order to evaluate the effect of unmanned work we also set indexes such as straight traveling performance and parallel traveling performance in order to evaluate the accuracy of robot work.

In the evaluation test conducted in the experimental farm of IAM-BRAIN in Konosu City, Saitama Prefecture, a reference test on manned operation of the robot vehicle was also conducted. The test results indicated that it was possible to perform robot work at an efficiency almost equal to that of manned operation in a 50 × 100m field. Robot operation was superior to manned operation in terms of work accuracy such as straight traveling performance.

The handling easiness of the robot was also evaluated by operators experienced in tractor work. The results indicated that the operator could perform the initial setting according to the operation manual, and could start and finish robot work without any problem.

Rotary tilling tests, using the operation software developed for diagonal operation and round operation, suggested that the robot could work well without leaving untilled areas and without traveling out of the field lot. The diagonal operation and round operation method that we have proposed and developed can be performed at high efficiency and high accuracy only by the robot work.

5. Utilization of Robot Work – Application to Various Works

For an effective utilization of the robot, we proposed “simultaneous double-vehicle work method” in which an operator carries out a conventional (manned) tractor operation while executing the robot work, and we conducted work tests on it. Furthermore, we developed an operation software to perform seeding and soil-puddling work in addition to rotary tilling with the robot, and conducted working tests with it.

By performing rotary tilling work with the simultaneous double-vehicle work method, it was possible for an operator to perform robot work and manned operation simultaneously. Robot work was superior to manned operation in terms of work accuracy, such as straight traveling performance. With this work method, it is possible to perform rotary tilling at a work efficiency of 1.8 times as that of

manned operation using a conventional tractor; therefore, we confirmed that this method was effective and safe for utilizing robots.

We prepared seeding software based on the basic operation software and conducted work tests in a farmer's field there, we confirmed that an operator performed the robot work of wheat seeding and fertilizer spreading with high accuracy including their replenishment. The evaluation confirmed that seeding with the robot could reduce labor and release farmers from hard work.

Based on the basic operation software, we prepared a soil-puddling software that enables arbitrary selection and setting of repetitive work while changing travel direction. Test results confirmed that soil-puddling with robot could be carried out along an efficient route with a complete coverage. However, to improve the accuracy of soil-puddling, a function for an appropriate adjustment of work speed and tilling depth was considered to be required.

6. Subjects of Robot Work and Countermeasures

To introduce and expand the developed robot to current farm work in Japan, it is necessary to solve some remaining issues; a lower price, further enhanced safety and reliability of the robot and establishment of a method for effective utilization as well as operation of the robot at agricultural sites.

The price to introduce the robot into the market from a tractor manufacturer is estimated to be about 6.5 million yen, assuming that the price of the base tractor is 2.5 million yen and the modification as well as equipment cost for converting it into a robot is 4 million yen. Employment of a GPS position detection system for the navigation system seems promising to reduce the cost of robotization. Therefore, the focus is on arrangement of the infrastructure, improvement of performance, and reduction of the utilization cost of the GPS.

To ensure robot work safety, the robot must have a 100% reliable function to detect a human approaching and then to stop its work; thus, it is necessary to select human detecting sensors that have high accuracy and high reliability.

The reliability of robot work can be improved by securing the detection of abnormalities and the control of robot component in detail and precisely; the operator must be able to understand such a situation from a distance and remotely execute corrective measures. It is even more desirable for the robot itself to be able to judge any abnormality and take the corrective measures.

For an effective operation of the robot for farming, we studied and established a model by which an operator performs field work in a rice paddy, including

transport and supply of materials.

To model the robot work, it is necessary to consider methods to move the robot to the field, methods for transport and supply of materials, and for an efficient combination / coordination of manned operation and the robot work. Also, configuration of the farm including the arrangement of fields and farm roads, and increase of farm management size to achieve higher cost performance should be considered. These elements of model robot work should reflect the present available state of robot's function and performance, as well as the current state of agricultural sites.

本報告の取扱いについて

本報告の全部又は一部を無断で転載・複製
(コピー) することを禁じます。

転載・複製に当たっては必ず原著者の許諾
を得て下さい。

農業機械化研究所研究報告 第41号

平成24年3月 印刷・発行
頒価567円(本体価格540円)

Technical Report of the Institute
of Agricultural Machinery No.41

〒331-8537

埼玉県さいたま市北区日進町1丁目40番地2

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構
生物系特定産業技術研究支援センター
農業機械化研究所
Institute of Agricultural Machinery
Bio-oriented Technology Research Advancement Institution
National Agriculture and Food Research Organization

URL: <http://www.naro.affrc.go.jp/brain/iam/>

印刷・製本 / ニッセイエプロ株式会社