

レーザ式作物列センサによるトラクタ用作業機の
うね自動追従システムの開発に関する研究

**Development of Automatic Guidance System for
Tractor-mounted Implements Using Laser Crop Row Sensor**

2009.3

岩手大学大学院
連合農学研究科
生物環境科学専攻
(帯広畜産大学)

申 宝明

目次

第1章 緒論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 既往の研究	4
1.2.1 作物列センサに関する研究	4
1.2.2 トラクタ用作業機の自動追従に関する研究	9
1.3 研究目的と論文の構成	12
1.3.1 研究目的	12
1.3.2 本論文の構成	12
第2章 畑作の播種・移植，中耕除草作業時のトラクタの うね合わせ作業の現状とその精度	14
2.1 緒言	14
2.2 調査圃場および方法	15
2.2.1 調査対象農家	17
2.2.2 調査項目	17
2.2.2.1 トラクタ作業者の作業状態の調査	17
2.2.2.2 うね合わせの作業精度の調査	19
2.3 実験結果および考察	20
2.3.1 トラクタ作業者の作業状態	20
2.3.2 各農場のうね合わせ精度	22
2.3.2.1 播種・移植作業の場合	22
2.3.2.2 中耕除草作業の場合	26
2.4 本章のまとめ	30

第3章 レーザ式作物列センサの開発	32
3.1 緒言	32
3.2 開発する作物列センサの基本システム	32
3.2.1 CCD レーザ変位センサ	34
3.2.2 6面体ポリゴンミラー	36
3.2.3 ロータリエンコーダ	37
3.2.4 ブラシレスDCモータ	38
3.2.5 計測用コンピュータとインターフェース	39
3.3 作物列位置の認識方法 (ソフトウェア)	40
3.3.1 作物列センサの計測波形	40
3.3.2 対象物の水平位置検出方法	41
3.3.3 作物列の位置検出法	43
3.3.4 ラインマーカ跡の位置検出法	45
3.4 ポリゴンミラーの回転数と計測可能対象物の 大きさに関する基礎実験	47
3.4.1 実験目的	47
3.4.2 基礎実験の方法	47
3.4.3 基礎実験の結果と考察	49
3.5 本章のまとめ	51
 第4章 レーザ式作物列センサの計測精度の評価	 52
4.1 緒言	52
4.2 室内実験	52
4.2.1 実験装置および方法	52
4.2.1.1 実験装置および対象物形状	52

4.2.1.2	実験方法	54
4.2.2	実験結果および考察	57
4.2.2.1	V字モデルの位置検出精度	57
4.2.2.2	作物モデルの位置検出精度	60
4.2.2.3	圃場作業を想定した場合の位置検出特性	62
4.3	圃場実験	64
4.3.1	実験装置および方法	64
4.3.1.1	実験装置および計測対象	64
4.3.1.2	実験方法	66
4.3.2	実験結果と考察	66
4.3.2.1	ラインマーカ跡の位置計測精度	66
4.3.2.2	作物列の位置計測精度	69
4.4	本章のまとめ	73

第5章 トラクタ用作業機のうね自動追従システムの

	油圧制御機構の開発	75
5.1	緒言	75
5.2	トラクタ用作業機のうね自動追従システムの概要	75
5.2.1	油圧制御機構の概要	76
5.2.1.1	油圧スライド装置	77
5.2.1.2	油圧シリンダ	78
5.2.1.3	油圧ポンプ	78
5.2.1.4	電磁弁	80
5.2.2	油圧制御機構の制御特性	82
5.2.2.1	制御電圧による油圧シリンダの	

移動速度の測定方法	83
5.2.2.2 電磁弁の制御電圧と油圧シリンダの 動作特性の結果	84
5.2.3 指令出力装置の概要	85
5.2.3.1 制御用コンピュータと インターフェースボード	85
5.2.3.2 制御用ソフトウェア	87
5.3 本章のまとめ	90
第6章 うね自動追従システムの制御精度の評価	91
6.1 緒言	91
6.2 実験装置および方法	91
6.2.1 実験装置	91
6.2.2 実験方法	92
6.2.2.1 室内実験方法	92
6.2.2.2 圃場実験方法	95
6.3 実験結果および考察	96
6.3.1 室内実験での制御結果の評価	96
6.3.1.1 追従システムのステップ応答特性	96
6.3.1.2 追従システムの周波数応答特性	99
6.3.2 圃場実験での制御結果の評価	111
6.3.2.1 ラインマーカ跡の場合の追従制御の結果	111
6.3.2.2 作物列の場合の追従制御の結果	113
6.4 本章のまとめ	115

第7章 総括	117
7.1 畑作の播種・移植, 中耕除草時のトラクタによる うね合わせ作業の現状とその精度(第2章)	117
7.2 レーザ式作物列センサの開発(第3章)	118
7.3 レーザ式作物列センサの計測精度の評価(第4章)	119
7.4 トラクタ用作業機のうね自動追従システムの 油圧制御機構の開発(第5章)	120
7.5 うね自動追従システムの制御精度の評価(第6章)	121
7.6 結語	122
 量記号一覧	 123
謝 辞	124
参考文献	126

第1章 緒 論

1.1 研究の背景

近年、食糧危機に備えて、世界中で食糧の増産が必要不可欠な状況にあるにもかかわらず、日本の食料自給率は年々減少し、2006年度にはカロリーベースで39%と13年ぶりに40%を割り込んだ。この年は、折しも日本政府が2015年度までに自給率を45%に向上させる取り組みが始まった矢先であった¹⁾。こうした中、国際化の進展によって、海外から安価な農産物が輸入されているが²⁾、地球温暖化や自然破壊、発展途上国の人口増加などから、今後食糧が世界的に不足する時代を迎えつつある⁴⁾。特に、アジア諸国の経済成長の速さと、それ以上に加速する消費によって、益々熾烈になる農産物をめぐる国際競争の結果、日本は今後10年以内に豊かで多様な現在の食生活を大幅に変革しなければならなくなると言われている。この潜在的な食糧危機に対して、日本農業を振興させることが重要であるが、農業就業者の高齢化も進んでおり、基幹的農業従事者の57%が65歳以上と高齢化し、将来の国産の食料供給力に不安を感じる状況にある。この厳しい状況を打開するため、農作業における従事者の労働軽減や作業の安全、作業の高能率化、高精度化が求められている。そのため、これまで以上に農業機械の高精度化や自動化、ロボット化に対する要望が高まっている⁵⁾。

そこで、改善が求められる農作業のひとつに畑作における中耕除草作業の自動化が挙げられる。一般に、除草作業は化学農薬を用いた処理と除草機やカルチベータを利用した物理的な処理に大別されるが、除草剤の目覚ましい発達により大幅な省力化がもたらされた。しかしその反面、除草剤への依存が強まるにつれて、食品としての安全性や生態系の破壊などの環境問題を誘発した⁷⁾。このため、消費者側の農産物の安全性に対する要求は益々高くなっている。ま

た、消費者に食の安全・安心を保障する目的で農林水産省は、産地や品種および使用農薬などの基礎的な生産・流通情報を消費者に提供するトレーサビリティ制度を導入した。このような理由により、無農薬もしくは低農薬で栽培されていない農産物の商品価値は相対的に低下しつつあり、除草剤に依存する農業生産システムは変更を迫られている。

一方、畑作の物理的な除草作業ではうね間の中耕除草にカルチベータやウィーダが使われ⁸⁾、また株間の除草には近年生産コストの低減や省力化のために株間除草機の利用が伸びている。しかし、このような中耕除草の管理作業は、初夏から盛夏にかけて数回行われ⁹⁾、かつトラクタ用作業機と作物の位置関係の調整に極めて精度の高いトラクタのハンドル操作技術を必要としている¹⁰⁾¹¹⁾。また、播種・移植作業をはじめ収穫までの農作業は、トラクタや作業機の大型化、高速化、キャビン付きトラクタの普及に伴って、作業機を作物のうねに合わせる作業が精度的に不十分になっている。特に、播種・移植作業はうね合わせ作業の基礎となり、適正にうね間を保たないとその後の農作業に悪影響を及ぼす。例えば、通常の播種機や移植機は2畦または4畦用が利用されている。しかし、その後の中耕除草作業は4畦用のカルチベータなどが一般的に利用されていることから、播種・移植機で順次往復作業を行う場合、隣接する作物列とのうね間が狭くなったり広がったりすると、図 1.1 に示すように、中耕除草作業時に、カルチベータの除草刃などが赤い枠で示した作物に接触し、その後の作物の生育に重大な損傷を与えてしまうことが予想される。

一般に作業者は、トラクタを運転してうね合わせ作業を正確に行うために、頻繁にトラクタの前輪の位置を調節したり、後方の作業機の状態を無理な姿勢で長時間監視したりしており、単純作業であるにも関わらず、精神的にも肉体的にも重労働となり、その作業を改善することは極めて重要な課題であると考えられる。北海道十勝地方の中耕除草作業時のうね合わせ作業の実態を調査した報

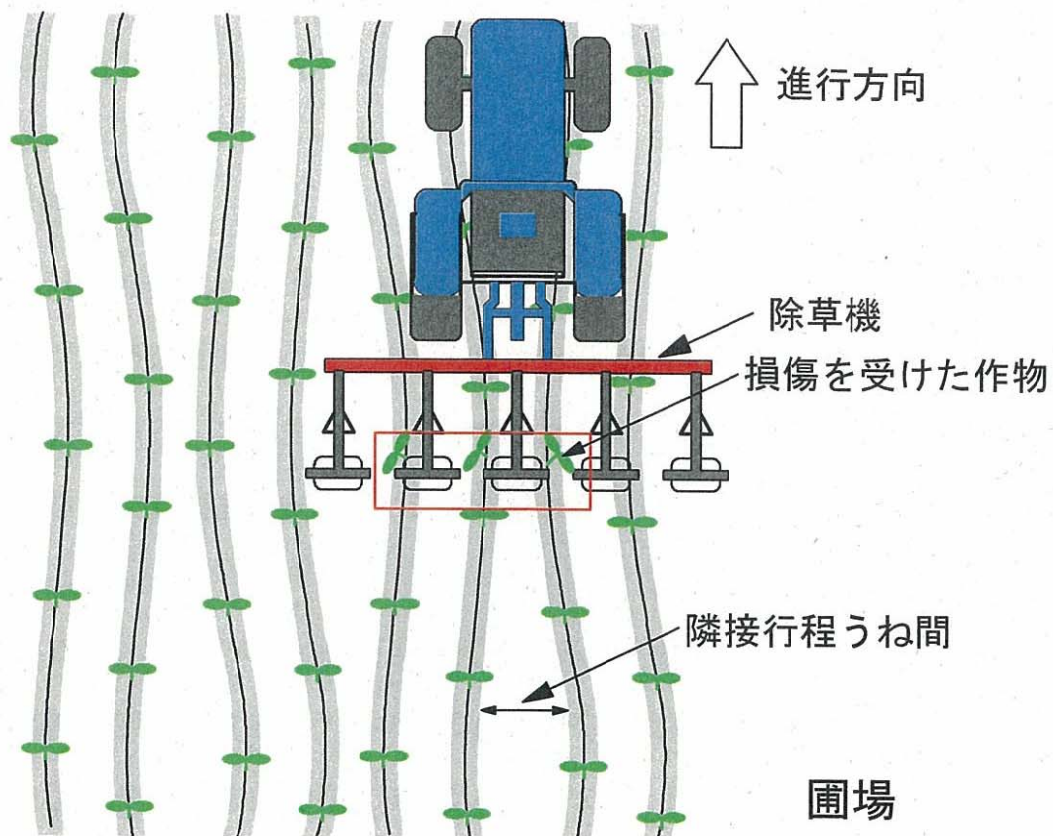


図 1.1 隣接行程でのうね間変動の問題点

告¹²⁾によると、トラクタ作業者は約 10%の割合で後方を振り向いて作業機と作物列の位置関係に注意を払い、前を向いている場合でもトラクタの前輪を作物列に合わせるために細心の注意を払って作業していることが明らかにされている。

このように、畑作の播種・移植、中耕除草、収穫作業は、後方の作業機を作物列やうねに高精度にうね合わせすることが要求され、トラクタ作業者は絶えず重労働を強いられている。また、土壌表面が膨軟な圃場や傾斜地ではトラクタのハンドル操作が難しく、作業者はそのうね合わせ作業に多大な労力を費やしている。さらに、北海道の畑作地帯では年々規模拡大が進む一方、農作業が天候に左右されることから、トラクタ作業機の高速度化や多条化に対する要望も

高くなりつつあり、今後益々トラクタ作業におけるうね合わせ精度の向上に対する新技術の開発が切望されているのが現状である。

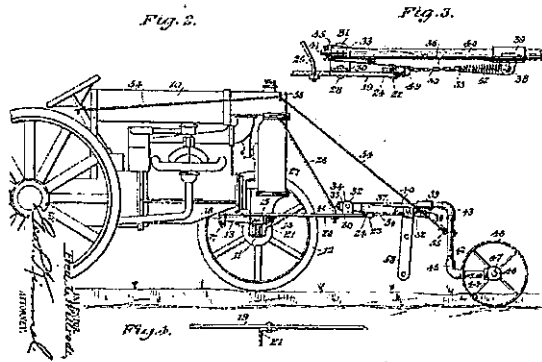
1.2 既往の研究

1.2.1 作物列センサに関する研究

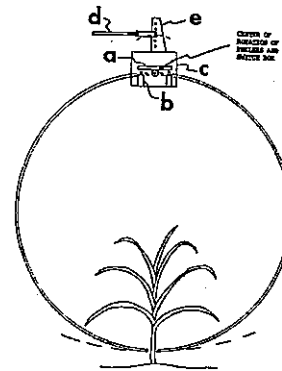
トラクタ用作業機のうね合わせの自動化には作物列の位置を計測するセンサが不可欠である。これまでに、研究されたうね合わせのための作物列センサは大別すると、接触追従方式、マシンビジョン方式、非接触追従方式の3つに分類される。

ここで、3つの方式について詳しく述べると、まず表 1.1 に示す接触追従方式は、機械式のガイドをプラウなどのれき溝や作物列などに接触させてなぞることによってトラクタを自動操舵する方式である。また、図 1.2 は主な作物列センサに関する既往の研究例を示すが、A) 図に示したのは、1924 年にアメリカの特許として出願されたもので、最も古い作物列センサのひとつと考えられる¹³⁾。これは、トラクタのハンドルと前方に設置したガイド車輪をワイヤで結び、ガイド車輪がうねをなぞる接触センサとして機能させることで、トラクタのハンドル操舵を行い、それを自動走行させる手法である。

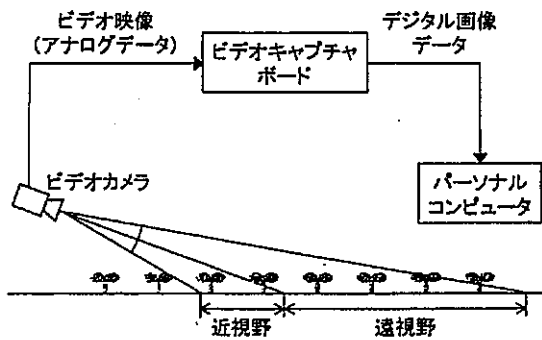
また、1959 年 Richey は、図 1.2 の B) に示すように、円型のワイヤとマイクロスイッチで構成される機械式接触センサを開発し、トラクタ作業のうね合わせの自動化について報告している¹⁵⁾。その後、プラウ耕や中耕除草、収穫作業など多くのトラクタ作業に応用された。しかし、この方式は、目標経路に対する追従精度はある程度確保できるものの、接触させる対象が必要となるため利用条件、作業環境が限定されるという欠点があり、1980 年以降はこの方式の研究はほとんど見られなくなった。しかし、現在一般化している条追従自動操向機能を有した自脱型コンバインにはこの方式が採用されている。



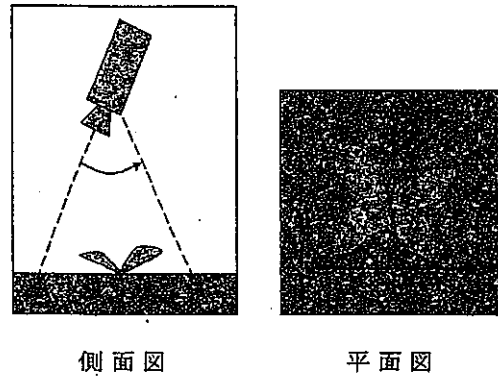
A) Steering attachment for tractors
U.S. Patent, No. 1506706, 1924¹³⁾



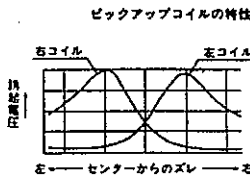
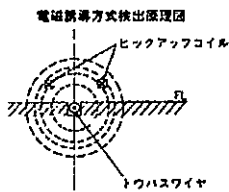
B) Arrangement of feelers and micro switches¹⁵⁾



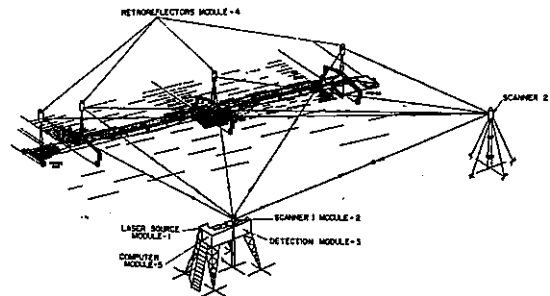
C) ソフトウェア処理システム⁶⁾



D) 被写体全体の撮影 (飯野)⁸⁾



E) 電磁誘導方式における信号と出力特性³⁸⁾



F) Guiding concept for cable-based gantry system⁴⁰⁾

図 1.2 作物列センサに関する主な研究事例の原理

表 1.1 接触追従方式の研究事例

年次	代表開発者	作業内容	センサの種類	文献
1924	Wilrodt, F.L.	Following furrows	wheel	13)
1939	Andrew, F.W.	Plowing	piano wire	14)
1959	Richey, C.B.	Following rows	mechanical feeler	15)
1960	Gilmor, W.D.	Following furrows		16)
1960	Wolfe, J.S.	Cultivations	mechanical feeler	17)
1962	Sieling, S.	Plowing	three wheels	18)
1963	Mittebach, B.	Plowing	mechanical feeler	19)
1971	Rushing, K.	Following rows	mechanical feeler	20)
1972	Warner, M.G.R.	Plowing	mechanical feeler	21)
1974	池田善郎	コンバイン	機械式接触	22)
1976	笈田昭	プラウ耕	機械式接触	23)

表 1.2 マシンビジョン方式の研究事例

年次	代表開発者	作業内容	センサの種類	文献
1989	三竿善明	トラクタ走行	CCD camera	24)
1990	韋 学軍	トラクタ間引き	CCD camera	25)
1992	端 俊一	作物列センサの開発	CCD イメージ	26)
1995	草野信之	作物列の検出	CCD camera	27)
1997	鹿沼隆宏	作物列の検出	CCD camera	28)
1997	鳥居 徹	作物列検出制御	CCD camera	29-32)
1999	岡本博史	作物列の検出	イメージセンサ	5-6)
2002	寺脇正樹	テンサイと 雑草の識別	Hyper spectral camera	33)
2003	山崎 哲	トラクタ走行	CCD カメラ	34)
2005	ECO-DAN	Row following	CCD Camera	35)
2005	飯野泰明	作物と雑草の識別	Hyper spectral camera	8)

つぎに、マシンビジョン方式はカメラとコンピュータを利用したリアルタイム方式の画像処理システムである。車両に CCD カメラやハイパースペクトルカメラなど、「機械の目」を取り付け、画像処理技術を利用して対象物の位置を検出する方式である。表 1.2 にこの方式の主な研究事例を示した。

この方式は、作物の色と土壌の色の違いを利用して作物列を検出する手法である。しかし、発芽直後や作物が圃場面全体に繁茂した時期では、両者の色の違いが明確にならないため、作物列の位置を機械的に特定することは困難になる。また、天候状態によって晴天や曇天、日中や夕方など自然光が大きく変化する状態では色温度補正技術も必要となるなど、高度なコンピュータやソフトウェア技術を必要とする。

さらに、非接触追従方式は表1.3に示すように、電磁気や超音波、レーザ光などを利用した非接触センサによる方式が見られる。

表 1.3 非接触追従方式の研究事例

年次	代表開発者	作業内容	センサの種類	文献
1965	Pickon, D.J.		電磁誘導	36)
1970	Grovum, M.A	トラクタ走行	Laser sensor	37)
1986	中村明徳	無人搬送	電磁誘導	38)
1987	大下泰生	果樹園管理機走行	超音波	39)
1989	Shmulevich, I.	Machine guidance	Laser sensor	40)
1999	Toda, M.	作物列の検出	超音波センサ	41)
1999	Sogaard, H.T.	Tractor seeding	Laser sensor	42)
2004	佐藤禎稔	作物列の検出	三次元視覚センサ	10)11)
2006	Ahamed, T	作業機自動装着	Laser range finder	43)44)
2008	申宝明	うねと作物列の検出	レーザ変位センサ	45)

1965年にPickonらは電磁気に関する研究について報告している³⁶⁾。その原理は図1.2のE)に示すように、電磁誘導ケーブルを地中に埋設し、センサで磁界強度分布を測定してケーブルの位置を検出する方法である。この方法は位置検

出精度が優れているが、走行経路が固定化されるため汎用性に欠ける他、トラクタ走行による土壌踏圧の発生、ケーブル設置コストの問題などから大面積の圃場には適さないことが考えられる。また、超音波に関する研究は大下らが報告しており³⁹⁾、走行車両の前後に超音波センサを装着し、車体と障害物との距離を計測して障害物に接触しないように走行車両の方向制御を行い、果樹園の管理機の走行制御に利用されている。

最後に、レーザ光を利用したセンサについては、1989年にShmulevichらによって報告されている⁴⁰⁾。これは、図1.2のF)に示すように、スキャナモジュールからレーザ光を発し、作業機に設置した角立方体型逆反射体によって反射させ、光センサに投光する。そのときのレーザビームを角度光センサで検出し、そのデータをコンピュータに入力して作業機の位置を算出するものである。その結果によると、400×400 mの圃場で作業機の位置計測精度の誤差は150 mm以内であった。また、Sogaardはレーザセンサを用いた自律走行車両で農作業を行い、走路からの変位が3.5 cm以下であったと報告している⁴²⁾。

近年一般的に利用されているGPSは、全地球的に車両の位置情報を測定できるが、その姿勢を測定することはできない。また、ジャイロは方向情報を計測できるが、それは初期状態からの相対変化であり、地図上の絶対位置を測定できないことからGPSと組み合わせて利用される場合が多い。

一方、レーザセンサは、位置計測に関して多くの利点を持ち、第1に対象物体の姿勢を計測できることである。また、レーザセンサは、予め圃場に目印を設置すれば、その情報を利用して地図上の情報を比較的簡単に取得することができる。第2に、レーザセンサは、第3章でも述べるが、センサ自体は主にレーザ発光素子と受光素子で構成され単純な構造を持ち、GPSなどのセンサと比べて比較的安価に利用できる特徴がある。

以上のことから、本研究で開発するレーザ式作物列センサは、2Dレーザスキ

ャナを三次元視覚センサとして応用したものであり、その計測精度はすでにキャベツ結球の立体形状計測で実証されている⁴⁶⁾。また、この三次元視覚センサを作物列センサに応用した場合の基本的な位置検出性能とその有効性についてもすでに佐藤らが報告している¹⁰⁾¹¹⁾。

1.2.2 トラクタ用作業機の自動追従に関する研究

トラクタに作業機を装着し、作物列に沿って自動追従させる場合、その制御方式を大別すると、トラクタのハンドルを直接制御する走行制御方式とトラクタとは別に作業機側をうねに自動制御させる方式の2つに分類される。

まず、トラクタの走行制御方式とは、トラクタに自動操舵ユニットを取り付

表1.4 トラクタ自動操舵ユニットと作業機アクチュエータの研究事例

年次	代表開発者	論文タイトル	文献
1990	Choi, C. H.	Navigational tractor guidance system	47)
1993	石井一暢	学習機能を有した自律走行車両	48)-51)
1999	井上慶一	自律走行のためのGPS とジャイロのカルマンフィルタによるセンサーフュージョン技術	52)
2000	Pinto, F.A.C.	Vehicle guidance parameter determination from crop row images using principal component analysis	53)
2001	木瀬道夫	RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット	54)-56)
2004	Inoue, K.	A Modeling of a Movement of a Semi-crawler Tractor and an Adaptive Operational Steering Control	57)
2005	ECO-DAN	Local positioning system	35)
2008	東洋農機株式会社	ビートハーベスタ取扱説明書	58)
2008	日農機製工株式会社	ビートハーベスタ取扱説明書	59)

け、トラクタのハンドルをアクチュエータで操舵し、進行方向を自動制御する方式である。トラクタの自律走行に関する研究では、ほとんどがこの方式であり、その主な研究事例を表1.4に示す。

マシンビジョンやGPSを航法センサとした自動操舵ユニットに関する研究は数多く見られ、特に近年のGPSを利用した研究は、農業分野でも、最も完成度が高く、技術的には実用化に近い技術と言える。しかし、GPSのコストや安全対策などの課題も山積しており、実用化までには至っていない。また、無人トラクタが周囲の人間や障害物を認識して回避動作を行う機能を具備することは、安全の確保という点で必要不可欠である。そのために無人トラクタが作業する環境を完全に隔離し、人や他の障害物が存在しない農作業環境を整備することが無人作業にとっては最も都合が良いが、現実的には不可能である。また、この制御方式は条件の良い畑では、問題なく制御できるが、膨軟な圃場や傾斜地ではハンドル操作で走向を迅速に制御できない場面も考えられる。

一方、トラクタ用作業機をうねに追従制御させる方式は、文字通りトラクタ後方の作業機を進行方向に対して左右に制御する方式である。これは、トラクタの3点リンクヒッチと作業機の間には油圧シリンダなどのアクチュエータを装着し、トラクタの走向と独立した状態で作業機を左右にスライドされる方式である。現在、この方式を利用したトラクタ用作業機が市販され、例えば、デンマークのECO-DAN社では、畑作の中耕、除草、防除ならびに施肥作業において油圧操舵機構を利用して作業機の自動うね合わせ作業を実現している³⁵⁾。また、東洋農機株式会社⁵⁸⁾や日農機製工株式会社⁵⁹⁾も接触式センサを利用し、ビートハーベスタの高性能自動うね合わせ装置を開発し、作物列への追従制御を行っている。

以上のことから、本研究では、トラクタの自動走行制御方式ではなく、作業機側をうねに自動追従させる方式を採用した。この研究で最終的に目標として

いるトラクタ用作業機のうね自動追従システムの開発概念は図1.3に示すように、トラクタの3点リンクヒッチと作業機の間、油圧シリンダで構成される油圧制御機構を開発し、トラクタの進行方向に対して作業機を左右にスライドさせてうねに自動追従させるシステムであり、本研究ではその核となるレーザ式作物列センサの開発も含まれる。作物列センサは作業機側に取り付けられ、その下方を通過する作物列や播種・移植機で用いられるうね合わせ用のラインマーカーの水平位置を非接触で検出するものであり、本研究のレーザ式作物列センサは簡便で安価なうね合わせ制御を実現し、畑作の播種・移植、株間除草、防除作業および収穫作業などのトラクタ用作業機の高精度自動化への利用を目的とする。

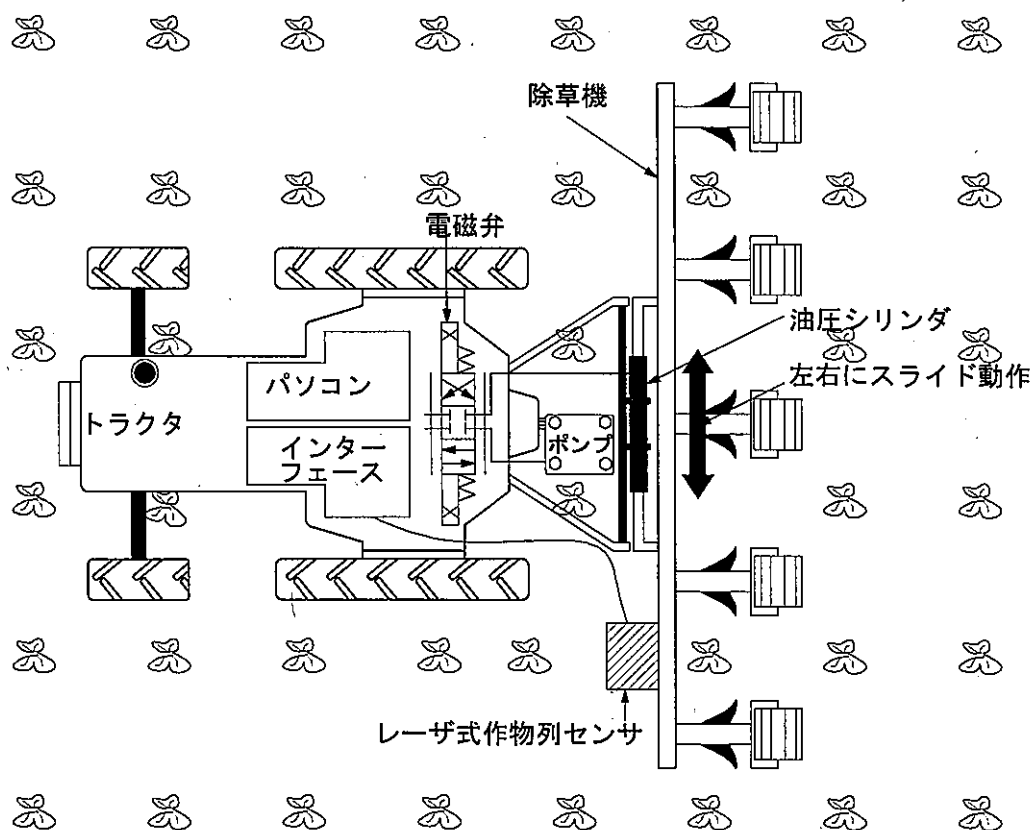


図 1.3 トラクタ用作業機のうね自動追従システムの概念

1.3 研究目的と論文の構成

1.3.1 研究目的

トラクタ作業は、一般にトラクタの後方に種々の作業機を取り付け、作物や土壌の作業位置に対して適切にうね合わせすることが求められる。特に、畑作の播種・移植、中耕除草および収穫作業は、トラクタ後方の作業機を作物列やうねに高精度にうね合わせすることが要求される。しかし現状では、トラクタのハンドル操作は作業者に依存することが多く、作業者の熟練度や操舵技術によって作業精度が大きく変化し、作業者にとってそのうね合わせ作業は精神的にも肉体的にも重労働となっている。このため、トラクタ作業者のハンドル操作を補助するうね自動追従システムの開発が期待されている。

そこで本研究は、実際の畑作作業におけるトラクタ用作業機の作業精度を調査し、また作物列を検出するためのレーザ式作物センサの開発および検出精度を評価し、さらに油圧制御機構の開発と追従精度の評価を行い、最終的に高精度・高能率作業を行える農業機械システムの開発を行う。また、環境保全型農業のために、播種・移植や中耕除草作業の省力化が期待されていることに加え、トラクタ作業者の労働負担を低減する新技術として、レーザ式作物列センサによるトラクタ用作業機のうね合わせのための自動追従システムの開発を目的としている。

1.3.2 本論文の構成

本論文は7章で構成され、まず、第1章では、研究の背景、既往の研究、研究の目的について述べた。

つぎに、第2章では、本研究の必要性を確認するために、畑作での播種・移植、中耕除草作業時のうね合わせ作業の現状と要求される制御特性の実態調査を実施し、その結果について述べる。

第3章では、作物列を検出するために、レーザ式作物列センサを開発し、その概要について述べ、第4章では、開発したレーザ式作物列センサの計測精度を確認するために、室内実験および圃場実験によって作物列センサとしての位置計測精度を評価する。

第5章では、トラクタ用作業機を進行方向に対して左右に制御するために、油圧制御機構を開発し、その概要について述べる。また第6章では、レーザ式作物列センサと油圧制御機構で構成されるうね自動追従システムの制御特性とうね追従精度について室内実験と圃場実験で評価する。

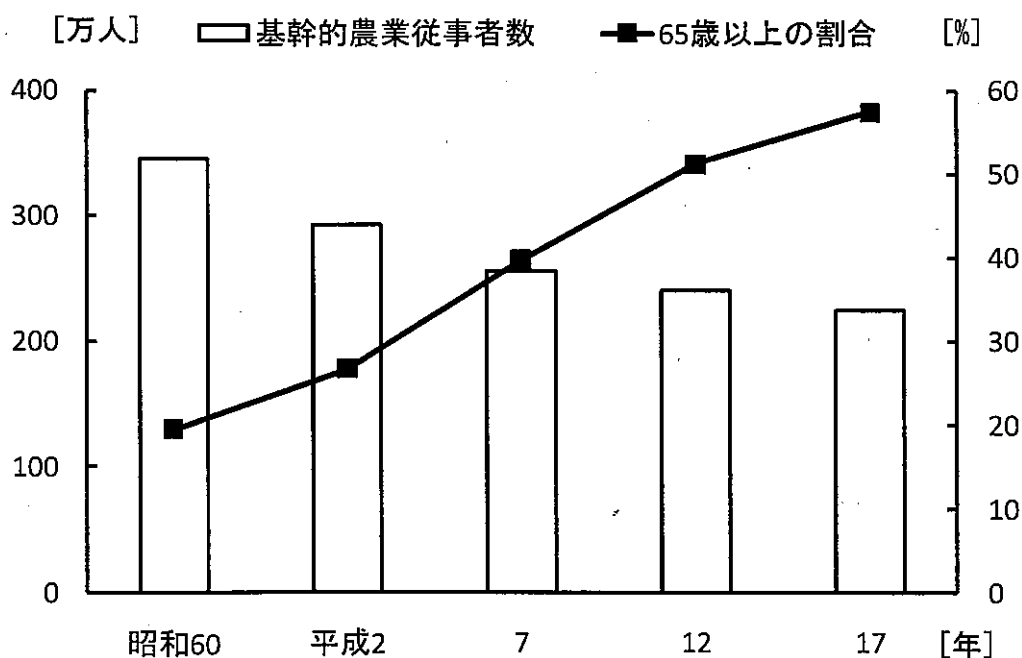
最後の第7章は、本研究の全体のまとめとしての総括である。

第2章 畑作の播種・移植，中耕除草作業時のトラクタの うね合わせ作業の現状とその精度

2.1 緒言

北海道農業は，日本の耕地面積の約25%を占める約119万haである。その農業粗生産額は約1兆700億円に上り全国の約10%を占め，壮健で意欲に富んだ労力を有する大規模専門的農家群を所有しており，政府の各種計画などで絶えず日本の食料供給基地として位置づけられてきた⁶⁰⁾。

その中で十勝地方は，平成17年の統計によると農家1戸あたりの平均耕地面積は35.7haと全国平均の22倍の規模になっている⁶¹⁾。このように，農家の経営規模が大きく，恵まれた土地資源を生かし，大規模で機械化された生産性の高い農業が展開されているように見えるが，図2.1に示すように，基幹的農業



資料：農林水産省「農林業センサス」

図2.1 基幹的農業従事者等の動向

従事者数（農業に主として従事した世帯員のうち、調査期日前1年間の普段の主な状態が農業の仕事に従事していた者の数）は減少し続ける傾向にあり、また65歳以上の農業従事者は57.4%を占めている⁶²⁾。こうした中、農作業の軽労化や自動化に関するシステムの開発が不可欠であるが、そのシステムを開発する際、実際の畑作におけるトラクタ作業の作業精度、従事者の作業状態などに関する研究例はほとんど見られない。

そこで本章は、実際の農作業でのうね合わせ精度を把握するために、畑作における播種・移植および中耕除草作業時のトラクタによるうね合わせ作業の現状とその作業精度を調査し、本研究で開発するトラクタ用作業機のうね自動追従システムに要求される応答性や制御精度などについて検討することを目的とした。

2.2 調査圃場および方法

圃場調査では、トラクタによる播種・移植作業時と中耕除草作業時のうね合わせの状態とその精度について調査した。播種・移植時のうね合わせ作業は図2.2に示すように、作物を播種または定植する際に、トラクタの往復作業による隣接行程のうね間を均一化にするためのうね合わせ作業である。一方、中耕除草時のうね合わせ作業は生育している作物の条間にカルチベータなどの除草刃を通過させ、除草刃が作物に損傷を与えないようにうね合わせすることである。一般に、中耕・除草の作業時間は全農作業時間の約30%であり、また年間の中耕・除草回数は1作物あたり3~5回である。したがって、播種・移植時のうね合わせ作業はその後のトラクタ作業のうね合わせの基礎となり、極めて重要な作業である。

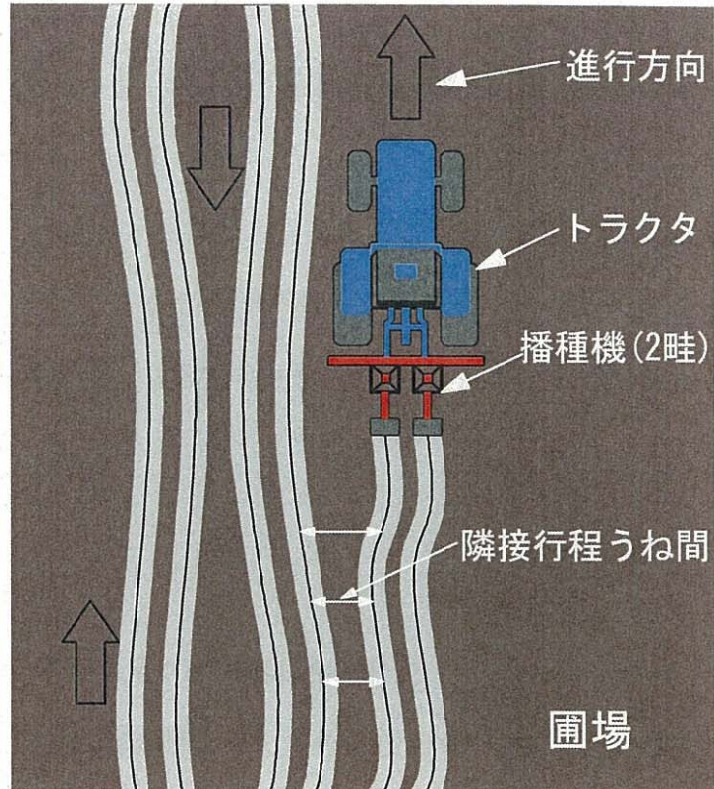


図 2.2 播種・移植作業時のうね合わせの模式図

表 2.1 各農場の作業条件

農場名	農場 A	農場 B	農場 C	農場 D	農場 E
調査日	5月11日	6月1日	5月8日	5月28日	7月11日
作物名	バレイショ	菜豆	テンサイ	テンサイ	小豆
作業内容	播種	播種	移植	中耕除草	中耕除草
供試 作業機	十勝農機 ポテト プランタ PALH-4R	田端農機 総合施肥 播種機 TEB-4WR	サークル鉄工 ビート移植機 BST-2	日農機製工 カルチベータ NCK-5	日農機製工 株間除草機 NAK-5
トラクタ	クボタ M7970	フォード 3000	マッセイ ファーガソン MF-165	インターナ ショナル 444	フォード 3000

2.2.1 調査対象農家

トラクタ作業機のうね合わせ作業の調査対象農家は帯広市近郊の5農場であり、それぞれ農場AからEと称する。川西地区の農場A, B, Cの3ヶ所では、播種・移植時のうね合わせ作業の実態を調査し、幕別町の農場Dと川西地区の農場Eの2ヶ所では、中耕除草作業時のうね合わせ作業の調査を実施した。調査した圃場の栽培作物、供試作業機、作業内容、トラクタなどの圃場条件を表2.1に示した。

2.2.2 調査項目

2.2.2.1 トラクタ作業者の作業状態の調査

一般にトラクタ用作業機は、トラクタ後方の3点リンクヒッチ⁶³⁾に取り付けられていることから、作業者は常に体をねじった姿勢で後方を振り返りながらの長時間労働となるため、作業者への肉体的影響が問題となる。具体的には図2.3と図2.4に示すように、播種・移植作業の場合、トラクタ作業者は常に前方を向く姿勢で作業しているわけではなく、うね間を均一に保つために播種機や移植機で用いられるうね合わせ用のラインマーカで土壌表面に描いた跡に沿ってハンドルを操作したり、後方の作業機の作業状態を確認したりしている。中耕除草作業時も同様に、トラクタ作業者はカルチベータなどの除草刃を正確にうね間の中心を通過させるように、後方を振り向いて、作業機と作物列の位置関係を確認したり、前方を向いている場合でもトラクタの前輪が作物を踏まないように、ハンドル操作に細心の注意を払い、常に腰をひねっている状態で作業を行っている。

そこで、本研究ではトラクタ作業者の作業状態を明らかにするために、ビデオカメラ (SONY, DCR-TRV70) を圃場に設置し、トラクタの後方から各圃場の作業の様子を撮影した。その後、撮影したビデオテープを再生し、トラクタ



図 2.3 播種作業におけるトラクタ作業者の運転姿勢



図 2.4 中耕除草作業におけるトラクタ作業者の運転姿勢

の枕地旋回や作業機の上げ下ろしなどの時間を除いて、播種・移植と中耕除草作業を行っている実作業時間の部分だけを切り取り、3分ごとに時間を区切り、ストップウォッチを用いて、トラクタ作業者がうね合わせのために行った前方確認と後方確認の時間とその頻度を測定し、作業状態を解析した。

2.2.2.2 うね合わせの作業精度の調査

a) 播種・移植作業の場合

播種・移植作業時のうね合わせ精度の調査では、トラクタ作業者がうね合わせを行うために、播種機や移植機の両側に取り付けられているラインマーカを交互に利用して、土壌表面にうね合わせ用のラインを描き、旋回した後のつぎの作業行程で片方の前輪をその跡に合わせてトラクタのハンドル操作を行っている。実際には、図 2.2 に示したように、播種・移植機で往路作業した後に、復路作業でうねつなぎとなった隣接行程のうね間は広くなったり、狭くなったりする。そのうね間の変動に着目し、トラクタの進行方向に対して 0.1 m 間隔に約 50 m に渡ってうね間を実測し、作業者がトラクタ作業機に設定したうね間と実測したうね間の関係を調査分析した。

b) 中耕除草作業の場合

中耕除草作業時のうね合わせの作業精度の調査は、カルチベータや株間除草機による作業が終了した直後に除草刃などが土壌表面に作用した痕跡を利用した。具体的には図 2.5 に示すように、その痕跡と作物列との水平距離を進行方向に対して 1 m 間隔で 50 m に渡って定規で実測し、除草刃がうね間の変動した軌跡を求め、作業機の進行方向に対する作業機の左右の変動を算出した。また、各農場とも進行距離 10 m ごとに作業機が作用した土表面の痕跡の幅を測定し、除草機によって処理された除草範囲を求めた。

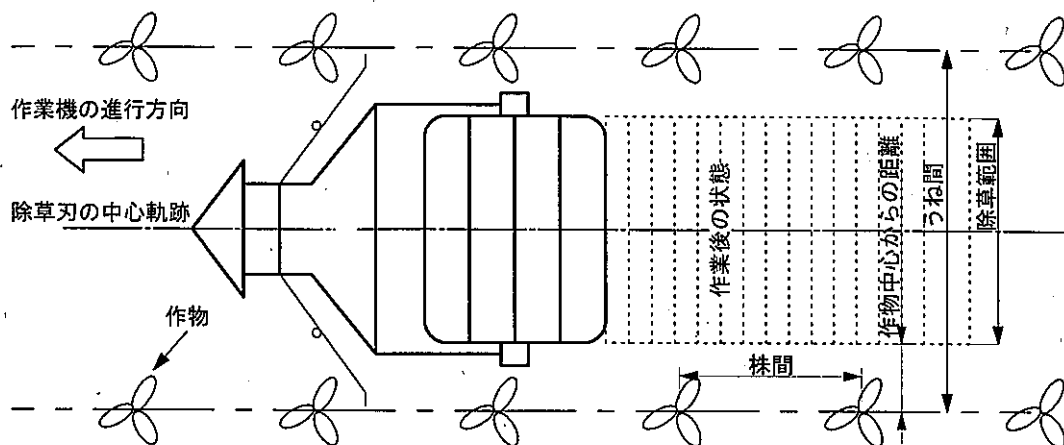


図 2.5 中耕除草作業の作業精度の測定方法

2.3 実験結果および考察

2.3.1 トラクタ作業者の作業状態

ビデオ映像から求めた各農場での作業別トラクタ後方の確認割合と後方確認時間間隔およびその1回当たりの継続時間の調査結果を図 2.6 に示す。まず、農場 B の菜豆の播種作業、農場 C のテンサイの移植作業の後方確認割合は 10% 以下であり、農場 A のバレイシヨの播種でも 15.9%であった。このように、播種・移植作業は、種子や苗の形状がほぼ均一化しているため、農業機械にトラブルが発生しない限り順調に作業できる。そのため、トラクタ作業者はうね間を均一に保つことが重要と考え、トラクタのハンドル操作を慎重に行い、片方の前輪をうね合わせ用のラインマーカ跡に合わせることに集中して作業している。また、作業者は時折施肥状態や苗の植付状態を確認していたが、その割合は低かった。一方、バレイシヨの播種作業では、全自動型ポテトプランタで種イモを切断する状態や種イモの残量、植付状態などを確認するため、トラクタ作業者による後方確認割合は他の作物に比べて若干多い結果となった。

一方中耕除草作業では、農場 D のテンサイ圃場で 27.2%、農場 E の小豆圃場

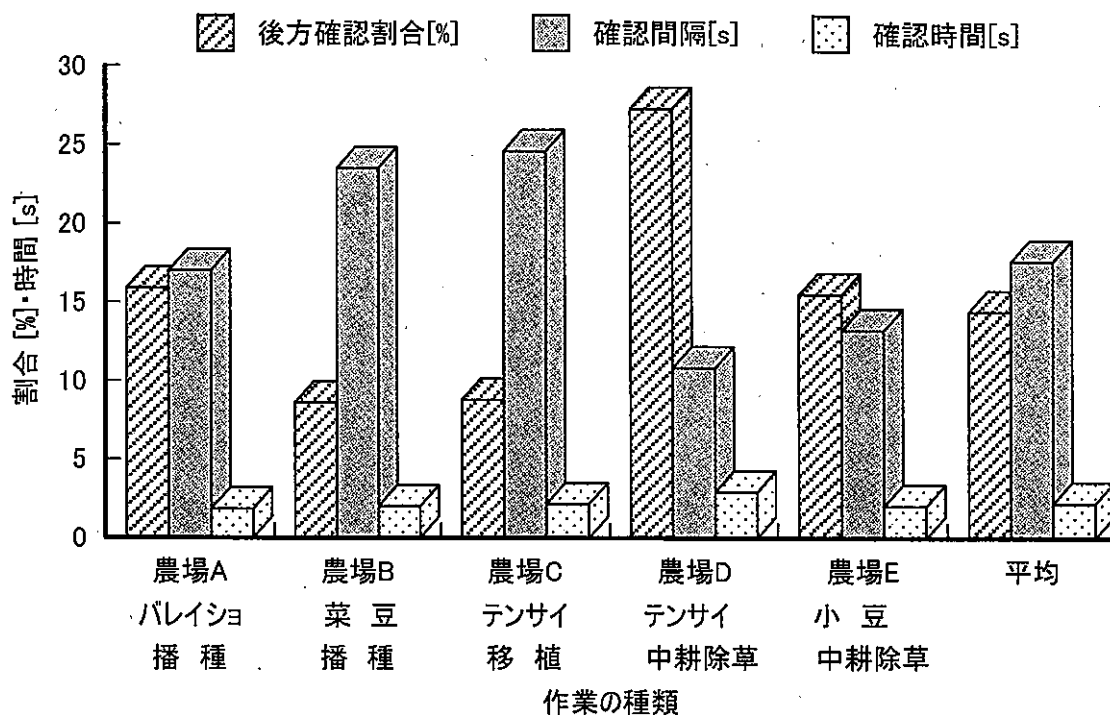


図 2.6 各農場のトラクタ作業者の作業状態

で 15.5%となり、トラクタ作業者の後方確認割合が高くなる結果となった。このように、後方確認割合が高くなる要因として、カルチベータや株間除草機の除草刃は生育している作物のうね間の中心を正確に通過させることが求められるが、進行方向に対して左右に大きく変動すると作物に損傷を与え、その後の生育に影響を及ぼす。そのため、トラクタ作業者は除草刃を隣接する作物列の中央を通過させるように、常に後方の作業機と作物列の位置関係に細心の注意を払うことから、後方確認の割合が高くなるものと考えられる。

また、両作業とも作業者は残りの時間にトラクタの前方を向いて作業をしており、その割合はそれぞれ農場 D が 62.9%、農場 E は 73.5%であった。しかし、作業者はただ漠然と前を見て作業しているわけではなく、片手でハンドルを握り、もう片手の腕をトラクタ後輪のフェインダに載せて体を斜めにした姿勢で

運転し、播種・移植作業ではトラクタの前輪をラインマーカ跡に合わせ、中耕除草作業ではうね間の中央に前輪を合わせて作業している。

つぎに、菜豆の播種とテンサイの移植作業では、トラクタ後方確認割合は比較的少なく、その確認間隔は24.5秒であり、その1回当たりの継続時間は2.2秒であった。しかし、テンサイの中耕除草作業の後方確認間隔は10.8秒であり、1回あたりの確認時間は2.9秒であったことから、中耕除草作業では短い間隔で後方を確認していると言える。

以上のように、トラクタ作業者は播種・移植と中耕除草作業ともに細心の注意を払ってトラクタ作業を行っていることが調査結果からも明らかになった。

2.3.2 各農場のうね合わせ精度

2.3.2.1 播種・移植作業の場合

図2.7は農場A, B, Cでの播種・移植作業時のうね間の変動を示す。横軸は進行距離であり、縦軸はうね間の変動を表す。この変動は、往復作業の隣接行程のうねつなぎのうね間が作業機ごとに設定したうね間に対して広くなったり、狭くなったりしていることを示す。なお、表2.2は各農場の作業精度を示す。

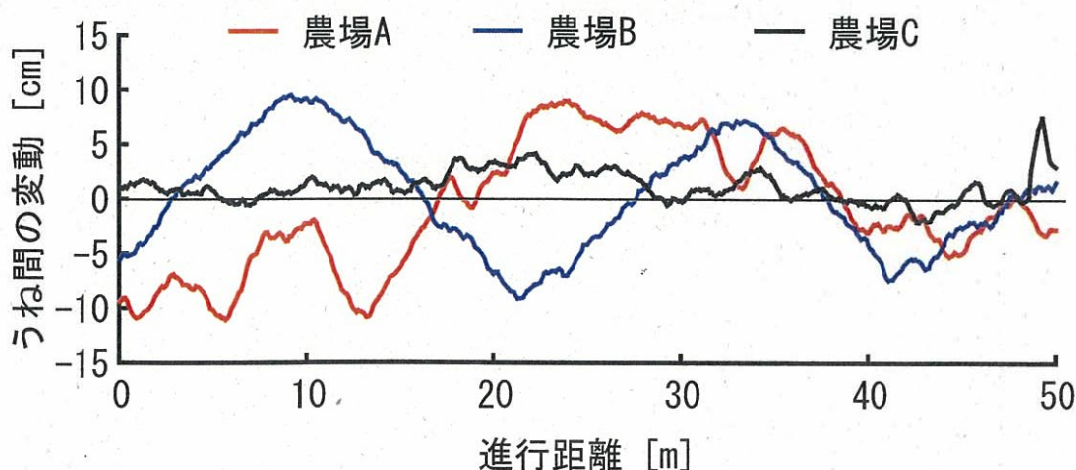


図2.7 播種・移植作業の隣接行程のうね間の変動

表 2.2 各農場の作業精度

農場名	農場 A	農場 B	農場 C	農場 D	農場 E
設定うね間 [cm]	75.0	66.0	66.0	60.0	60.0
平均うね間 [cm]	75.1	64.3	65.1	61.7	60.1
平均株間 [cm]	26.6	20.3	21.6	22.4	21.5
作業速度 [m/s]	0.8	1.0	0.9	0.7	0.9
最大変動 [cm]	11.5	9.5	7.5	8.2	7.2
標準偏差 [cm]	5.8	5.0	1.4	3.8	3.5
RMS [mm]	59.0	50.0	18.0	41.0	36.0
変動係数 [%]	56.2	52.2	42.9	65.1	53.3

注：RMS は 2 乗平均平方根

農場 C でのテンサイの移植作業でのうね間の変動は、全体的に見るとその変動幅は約 10 cm 以内であることが分かる。なお、この場合、設定うね間が 66 cm であるのに対し、作業後の隣接行程のうね間の最大変動は進行距離 45 m 付近で 7.5 cm であり、その場所でのうね間は 73.5 cm となるが、ほぼ良好なうねつなぎ作業が行われていたと言える。しかし、バレイショの播種作業の農場 A ではうね間が大きく変動していることが分かる。作業後のうね間は設定うね間の 75 cm に対して進行距離 22 m の地点で最大 9.0 cm に広がり、また 7 m の地点で最小の 11.5 cm と狭くなった。農場 B でも同様の傾向が見られ、設定うね間の 66 cm に対して、9.5 cm の拡大から 9.0 cm の縮小でうね間が変動していた。

さらに、これらのうね間の変動を度数分布で表したのが図 2.8 である。うねつなぎ作業のうね間が設定うね間より ± 5.0 cm 以上変動した割合は、農場 C が 1% と少なかったのに対し、農場 A と B ではそれぞれ 28%、34% であり、その後の中耕除草作業に影響を及ぼすことが十分に予想された。

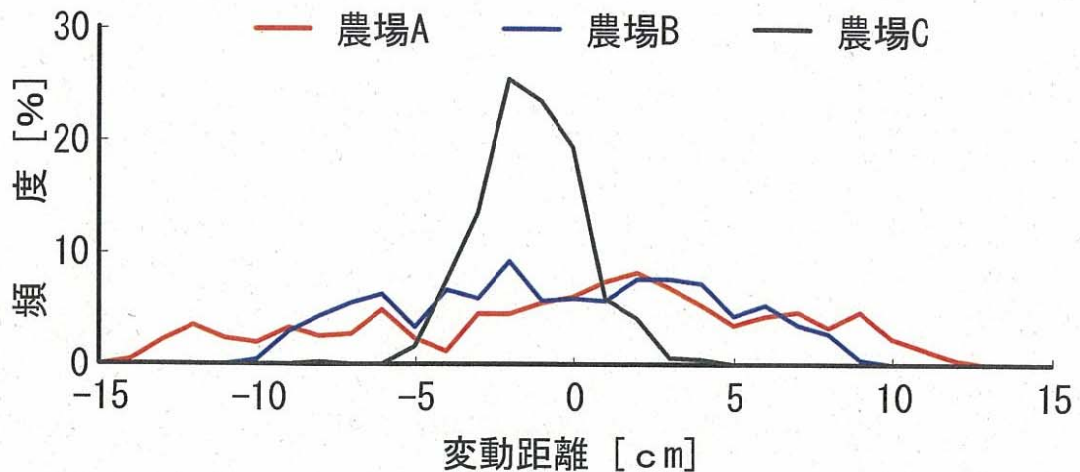


図 2.8 うね間変動の度数分布

トラクタ用作業機のうね自動追従システムを開発する際、要求される周波数応答特性を明らかにするために、これまで述べた圃場での調査結果からうね間の周期性を分析する必要がある。その方法として、高速フーリエ変換のFFT (Fast Fourier Transform) 法を利用した。この方法は不規則な変動に対し、その周期的な特徴を知る手段として利用される。また、FFT 法によりパワースペクトル密度 (Power Spectrum Density, 以後 PSD と称する) を算出し、うね間変動の周波数特性を明らかにした。PSD とは、単位距離当たりの振動波形の平均エネルギーを表し⁶⁴⁾、その結果を図 2.9 に示す。横軸は周波数であり、縦軸は PSD を表す。なお、FFT の計算は Microsoft Excel のアドインである分析ツールのフーリエ解析を利用した。

図中の比較的大きな PSD を示す部分から求めた各農場のうね間の変動の周期性は 0.12~0.18 c/m である。ここで、農場 B でのうね間変動の周期性 0.18 c/m について述べると、図 2.10 に示すように、トラクタの作業速度が 1 m/s のとき、進行方向に対して正弦波状にトラクタが左右に蛇行したと仮定すると、その 1 周期の所要時間は 5.6 秒となり、変動の中心から最大または最小までの時間は

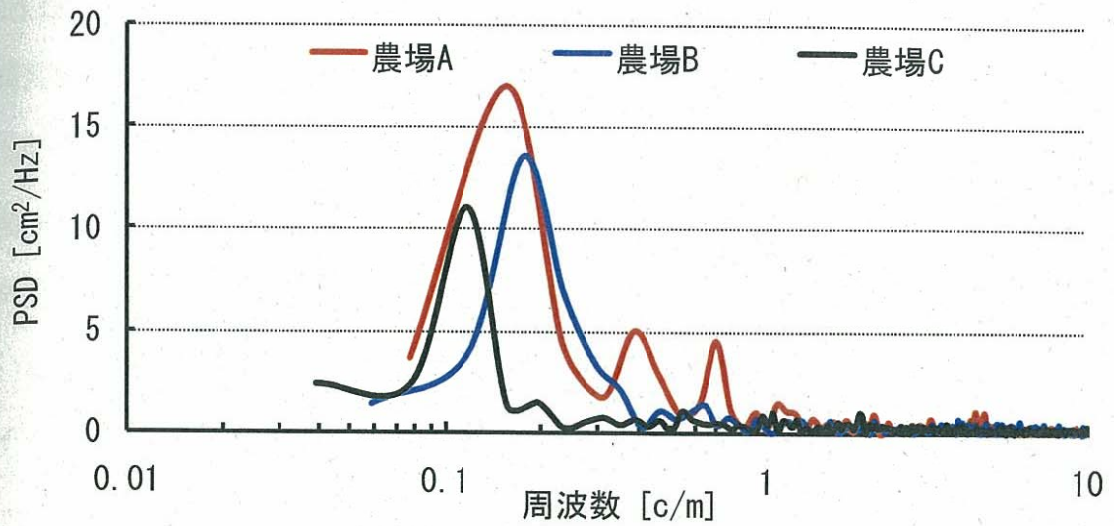


図 2.9 各農場のうね間変動の周波数特性

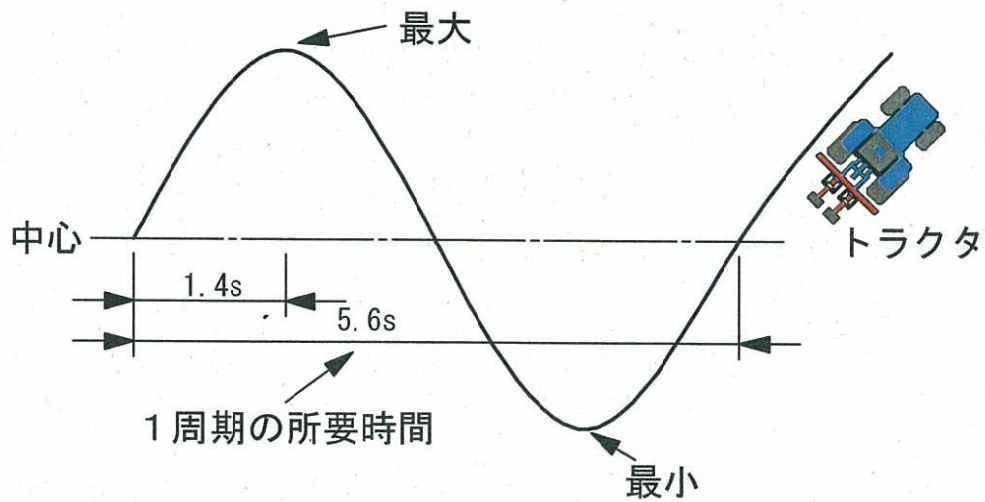


図 2.10 トラクタの正弦波状の蛇行とうね間変動の周期性の関係

$$\text{制御速度} = \frac{\text{差分の最大 [cm]}}{\text{時間 [s]}} = \frac{3.9}{1.4} \approx 2.8 \text{ [cm/s]} \quad (2.1)$$

1.4 秒となる。そこで、今回の調査結果から進行方向に対して 1.4 m ごとにうね間変動のデータを読み出し、1.4 m ごとの前後のデータの偏差すなわち差分を算出した結果、その最大値は 3.9 cm であった。本研究の追従システムは第 1 章の図 1.1 に述べたように、トラクタの 3 点リンクヒッチと作業機の上に油圧のアクチュエータを装着し、作業機を左右に移動させる自動追従システムを採用している。したがって、調査結果から、2.1)式によって播種・移植機を左右にスライドさせてうねに自動追従させる場合、作業機を左右に移動させるアクチュエータの制御速度は農場 B の場合毎秒 2.8 cm となる。

また、トラクタの作業速度が増加すると、要求される制御速度も速くなる。表 2.3 はトラクタの作業速度を 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s に変化させた場合の各農場での要求されるアクチュエータの制御速度を示す。また、トラクタ作業の高速化を考慮し、作業速度を 2.0 m/s に設定すると、作業機を進行方向に対して左右に追従させるアクチュエータの制御速度は農場 A で最大 6.6 cm/s 必要になる。

表 2.3 トラクタの作業速度と要求されるアクチュエータの制御速度の関係

作業速度 [m/s]	追従システムに要求される制御速度 [cm/s]			
	0.5	1.0	1.5	2.0
農場 A	1.7	3.3	5.0	6.6
農場 B	1.4	2.8	4.2	5.6
農場 C	0.7	1.4	2.1	2.8
農場 D	2.5	5.0	7.5	10.0
農場 E	1.5	3.0	4.5	6.0

2.3.2.2 中耕除草作業の場合

図 2.11 は農場 D と農場 E での中耕除草時のうね合わせの作業精度を測定した結果を示す。横軸は作業機の進行距離を示し、縦軸はうね間の中心位置を基準

としたトラクタの進行方向に対する除草刃中心の左右の変動軌跡を示す。正の値は進行方向に対して除草刃の中心が左に偏っていたことを表す。また、図 2.12 はうねの中心位置から除草刃が左右に変動した位置を 1.0 cm ごとに区切り、その出現頻度を求めたものである。

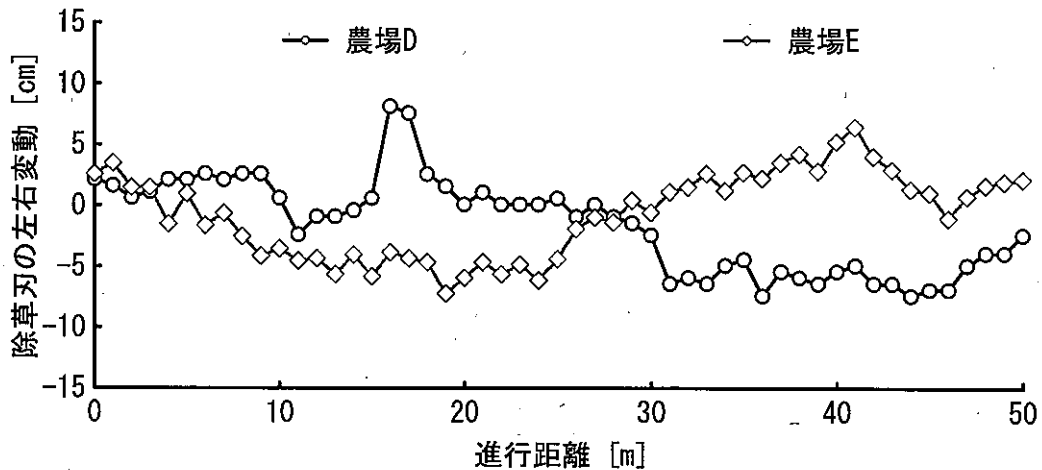


図 2.11 中耕除草作業時の除草刃の変動軌跡

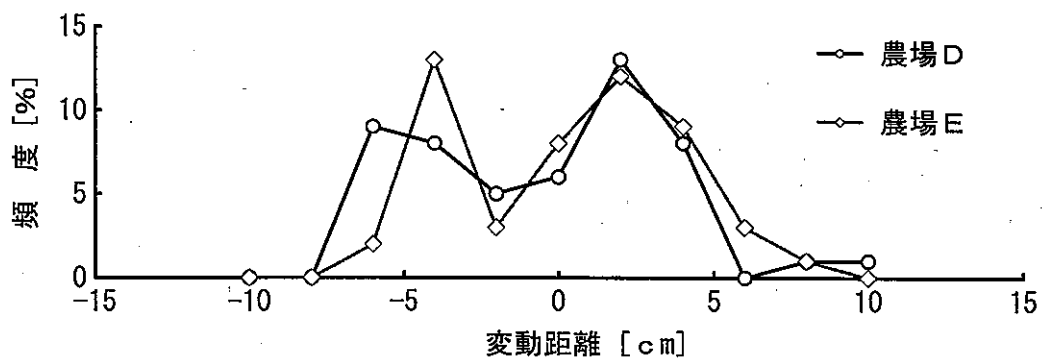


図 2.12 除草刃の変動の度数分布

農場 D のテンサイの中耕除草作業では、進行距離 20 m までは除草刃の作用位置は左側に偏っていたが、30 m 以降では右側に偏って進行した。進行距離 16

m と 31~46 m の地点では、除草刃の大きな変動が見られ、その地点での変動はうね間の中心から 5.0 cm を超えており、最大変動は 16 m の地点で 8.2 cm であり、また全体的な変動は 15.6 cm の範囲であった。特に、除草刃の変動が大きかった地点の様子を図 2.13 に示すが、これはトラクタのハンドル操作が不適切に行われたため、作業機が大きく蛇行し、この付近で生育していた作物に機械的な損傷を与えたことが観察された。この原因は、農場 D の場合、平均うね間が 61.7 cm、カルチベータの平均除草範囲が 36.4 cm、またテンサイの株を真上から見たときの作物の径が 9.0 cm であったことから計算すると、作物に損傷を与えないための除草刃のうね間中心からの許容移動範囲は ± 8.2 cm となるため、このように除草刃が作物に損傷を与える状態になったと考えられる。なお、カルチベータの許容移動範囲の算出方法は 2.2)式に示す。また、除草刃の中心位置の分布は左右に広範囲に渡って分布しており、その標準偏差は 3.8 cm であった。



図 2.13 作物に損傷を与えた様子（農場 D）

$$\text{除草刃の許容移動範囲} = \pm \frac{\text{うね間} - \text{除草範囲} - \text{作物の茎}}{2} \quad (2.2)$$

つぎに、小豆の中耕除草作業の農場 E について考察する。農場 D と同様に除草刃は 13.7 cm の範囲で大きく変動し、進行距離 19 m の地点で最大 7.2 cm の変動があった。しかし、農場 E の平均うね間が 60.1 cm、平均除草範囲が 32.8 cm、小豆の作物の径が 7.6 cm であったことから、作物に損傷を与えないための除草刃の許容移動範囲は±9.9 cm となるため、除草刃が作物に損傷を与えるまでに至らなかったと考えられる。しかし、株間の雑草を処理するために株間除草機に取り付けられている除草ティンが大きく変動したことによって、それが作物に強く接触し、図 2.14 に示すように小豆を引き抜いてしまったことが観察された。また、除草刃中心の変動分布を見ると、農場 D と同様に、-6~+8 cm の範囲に分布しており、その標準偏差は 3.5 cm であった。



図 2.14 除草作業後の作物の様子（農場 E）

また、中耕除草作業でカルチベータなどの作業機を作物列に追従制御する場合、どの程度アクチュエータの制御速度が必要かを確認するために、農場 D と農場 E での除草刃の変動を進行方向に対して 1 m ごとに前後データの差分を求めた。その結果は表 2.3 に併記したように、農場 D が最大の 5.0 cm であった。したがって、トラクタの作業速度を 1 m/s と想定すると、前節の播種・移植機の場合で述べたように作業機が 1 m 進行すると除草刃が 5.0 cm 左右に変動することになるため、中耕除草機をうね間の中心、すなわち作物列に追従させるためのアクチュエータの制御速度は 5.0 cm/s になる。また、慣行の作業速度の 2 倍である速度 2 m/s の場合では最大 10.0 cm/s になる。

2.4 本章のまとめ

農作業の軽労化や自動化に関するシステムを開発する際、実際の畑作におけるトラクタ作業のうね合わせの作業精度や作業者の作業状態についての研究例はほとんど見られない。そこで本章では、トラクタ用作業機のうね合わせ精度を把握するために、畑作の播種・移植および中耕除草作業時のうね合わせ作業の現状とその精度を調査し、開発するトラクタ用作業機のうね自動追従システムに要求される応答性を調査分析した。

- 1) トラクタ作業者の作業状態は、播種・移植作業の場合、農場 B の菜豆の播種、農場 C のテンサイの移植作業では、作業者がトラクタの後方を確認する割合は 10%以下であったが、農場 A のバレイショの播種は 15.9%であった。一方、中耕除草作業では、農場 D のテンサイ圃場で 27.2%、農場 E の小豆圃場では 15.5%となり、トラクタ作業者の後方確認割合が高くなる結果となった。
- 2) 各農場のうね合わせの作業精度は、播種・移植作業の場合、農場 A, B, C の隣接行程のうね間は、作業者が設定したうね間に対してそれぞれ最大 11.5,

9.5, 7.5 cm 変動した。また, 中耕除草作業のうね合わせ作業では, トラクタ用作業機はうね間の中心すなわち作物列に沿って水平位置が概ね調節されているが, その最大変動は農場 D が 8.2 cm, 農場 E が 7.2 cm に達したことから, 作物に機械的な損傷を与えることも観察された。

- 3) 圃場調査から求めた開発目標のうね追従システムに要求される応答性は, 作業の高速化を念頭に入れてトラクタの作業速度を 2.0 m/s に想定すると, 播種・移植作業では作業機をうねに追従させるためのアクチュエータの制御速度は 6.6 cm/s と推定された。また, 中耕除草作業では, 播種・移植作業と比較すると, 制御速度の最大が大きくなり, 制御速度は 10 cm/s となった。

以上のように, 畑作の播種・移植, 中耕除草作業はトラクタ作業者にとって重労働であり, 作業者の労力を軽減し, より高能率で高精度なうね合わせ作業を実現するためにはトラクタ用作業機のうね自動追従システムの開発は極めて重要である。

第3章 レーザ式作物列センサの開発

3.1 緒言

第2章で述べたように、畑作の播種・移植、中耕除草作業の軽労化や高精度・高能率作業を実現するために、トラクタ用作業機のうね自動追従システムの開発が望まれる。本章ではそのシステムの核となるレーザ式作物列センサの開発（以後、作物列センサと称する）について述べる。

3.2 開発する作物列センサの基本システム

本研究で開発する作物列センサは、図 1.1 で述べたように、うねに自動追従

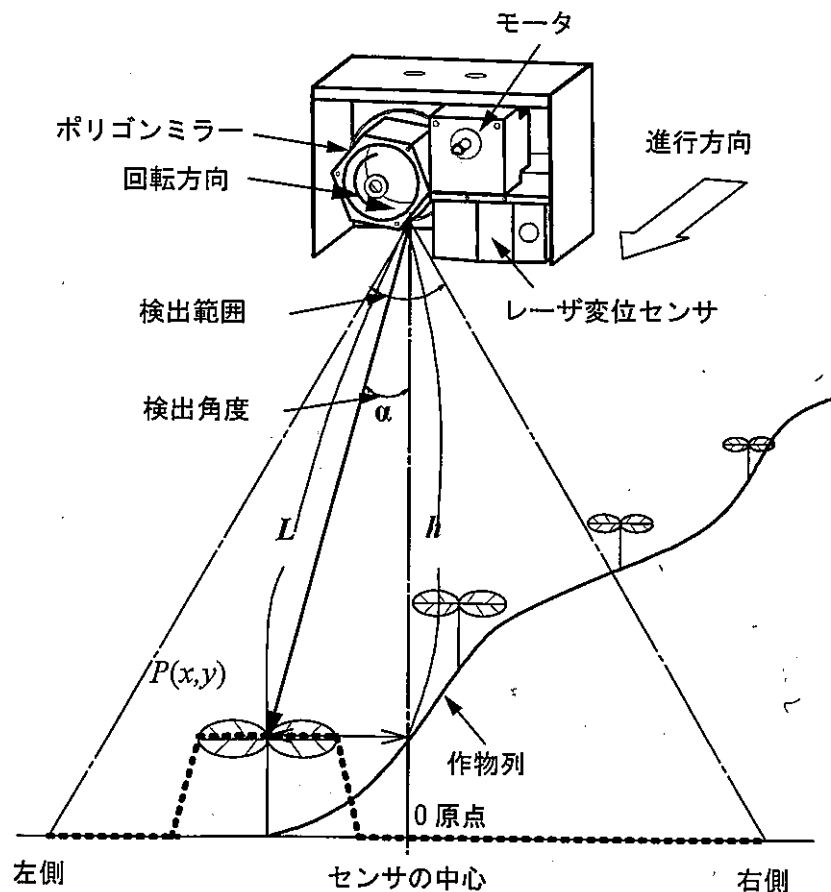


図 3.1 作物列センサの対象物検出原理

させるトラクタ用作業機に取り付け、図 3.1 に示すように、下方の作物列もしくは播種・移植機などで利用される V 字溝のラインマーカ跡をトラクタ進行方向に対して横方向の左右の水平位置を検出する。そこで、下方の作物列の位置を連続的にしかもピンポイントで計測するためにレーザ変位センサを採用した。また、トラクタ進行方向に対して断面方向の形状を連続的に計測するために、6 面体ポリゴンミラーを製作し、ミラーの回転でレーザビームの方向を連続的に変化させる方式を採用した。したがって、開発した作物列センサは図 3.2、図 3.3 に示すように、CCD レーザ変位センサ、6 面体ポリゴンミラー、ロータリエンコーダおよび可変速ブラシレス DC モータで構成され、その他に、ロータリエンコーダの回転角度をコンピュータに出力するための出力パルス分周回路や計測用コンピュータおよび A/D 変換ボードで構成される。

また、作物列センサの計測原理は、図 3.1 に示したようにレーザ変位センサから発せられるレーザ光をミラーに対して横方向から図のように照射し、ミラーが回転して連続的に下方の水平面を左側から右側に向かってその距離を計測

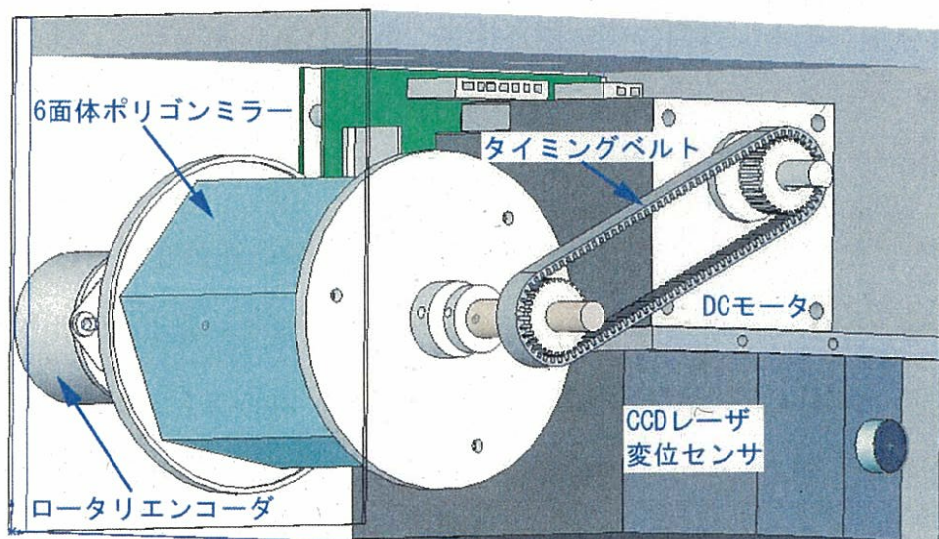


図 3.2 作物列センサの内部構造



図 3.3 作物列センサの外観

し、うねの断面形状を計測する⁴⁵⁾。点線はレーザ変位センサがその形状を計測した距離データを表す。この計測波形のデータをコンピュータに入力し、ソフトウェアによって作業機の進行方向に対する横方向の作物の水平位置を算出する。なお、その算出方法は3.3.2節で詳述する。

3.2.1 CCD レーザ変位センサ

本研究で供試したレーザ変位センサは市販の超ロングレンジ CCD レーザ変位センサ (Keyence, LK-500) である。その距離の測定原理は一般に、図 3.4 に示すように、三角測量を応用したものであり、発光素子 (PSD) と受光素子 (CCD) の組み合わせで構成され、発光素子には半導体レーザが用いられている。

半導体レーザが発するレーザ光は投光レンズを通して集光され、測定対象物に照射し、投光されたレーザ光は対象物の表面で拡散反射する。その反射光の一

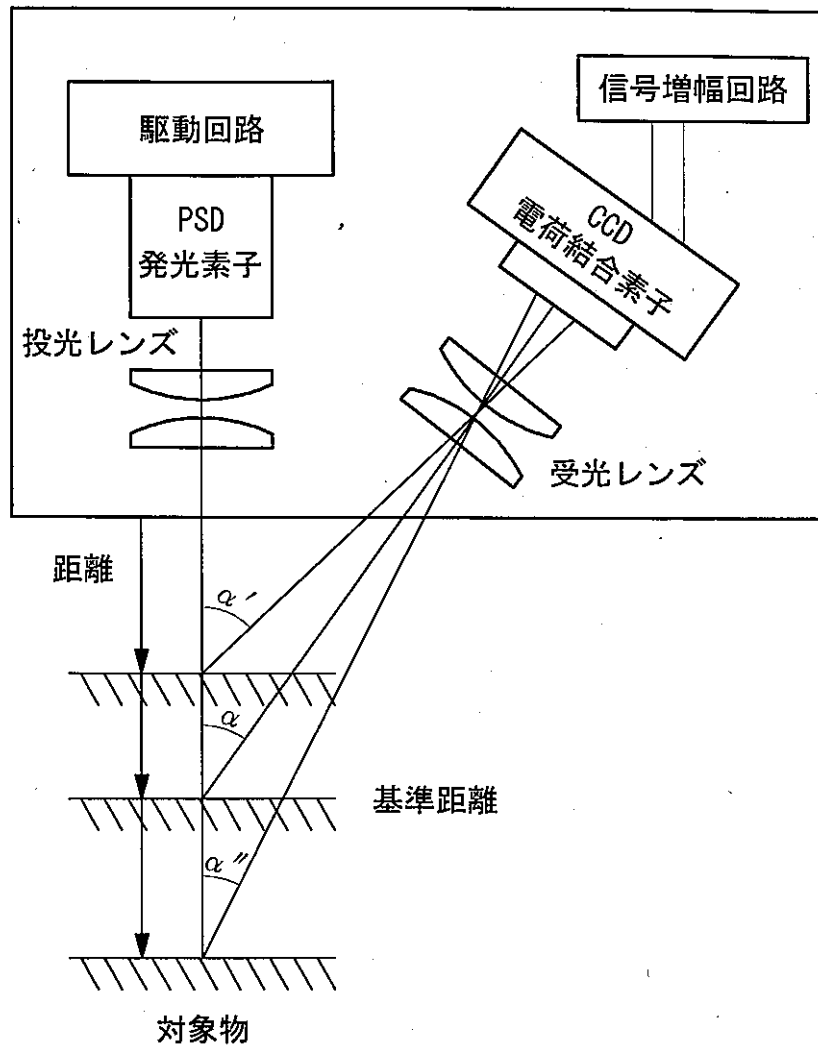


図 3.4 レーザ変位センサの距離計測原理

部が受光レンズで集光され、CCD 上に結像する。対象物の位置が図のように上下に変位すると、拡散反射光を集光する角度 α が変化し、CCD 上の結像位置が移動する。その位置を計測することによって対象物の変位量すなわちセンサから対象物までの距離を非接触で計測することができる。また、センサはその距離に応じたアナログ電圧を出力することから、本研究ではこの計測信号を後述のアナログ入出力ボードを用いてコンピュータに入力し、対象物までの距離を計測した。

供試したレーザ変位センサの主要諸元を表 3.1 に示す。測定モードはロングモードと高精度モードがあり、測定距離、分解能、スポット径は、ロングモードでそれぞれ 250~750 mm, 50 μ m, 0.3 mm であり、高精度モードではそれぞれ 0~450 mm, 10 μ m, 0.7 mm であるが、本研究では大きな作物を広範囲に測定するため、測定モードはロングモードに設定して利用した。また、サンプリング周波数は 976 Hz であり、使用環境の照度は 10,000 lx 以下となっているが、晴天日でも太陽光が直接受光素子に入射しない限り距離計測は可能であった。

表 3.1 レーザ変位センサの主要諸元

型 式	センサヘッド: LK-500 アンプユニット: LK-2500	
	ロングモード	高精度モード
測定モード	ロングモード	高精度モード
基準距離	500 mm	350 mm
測定範囲	\pm 250 mm	\pm 100 mm
スポット径	約 ϕ 0.3 mm(基本距離にて)	約 ϕ 0.7 mm(基本距離にて)
分解能	50 μ m	10 μ m
サンプリング周波数	976 Hz	
使用周囲照度	白熱ランプ・蛍光灯 10000 lx 以下	
使用周囲温度	0~50 $^{\circ}$ C	
使用周囲湿度	35%~85%RH	

3.2.2 6面体ポリゴンミラー

前述のようにトラクタの進行方向に対して横方向のうねの断面形状を作物列センサで連続的にかつ高速に計測する場合、レーザビームは図 3.1 に示したように照射する方向を連続的に偏向する必要がある。そこで、図 3.2, 図 3.3 に示したように、ミラーを回転させてレーザビームの方向を偏向させる方式を考案した。ポリゴンミラーを 6 枚のミラーで構成した理由は、センサを地面から 500 mm の高さに設定した場合、計測するうね断面の水平距離の範囲を幾何学的に約 1m としたためである。また、図 3.5 はその 6 面体ポリゴンミラーの外観と寸

法を示し、ミラーを取り付ける六角柱は直径 100 mm のアルミ丸棒から削り出し、それにレーザー光の反射特性に合わせた特注のアルミ蒸着ミラーを 6 枚貼り付けた。なお、そのミラーは表面反射鏡であり、その寸法は長さが 80 mm、幅は 40 mm である。

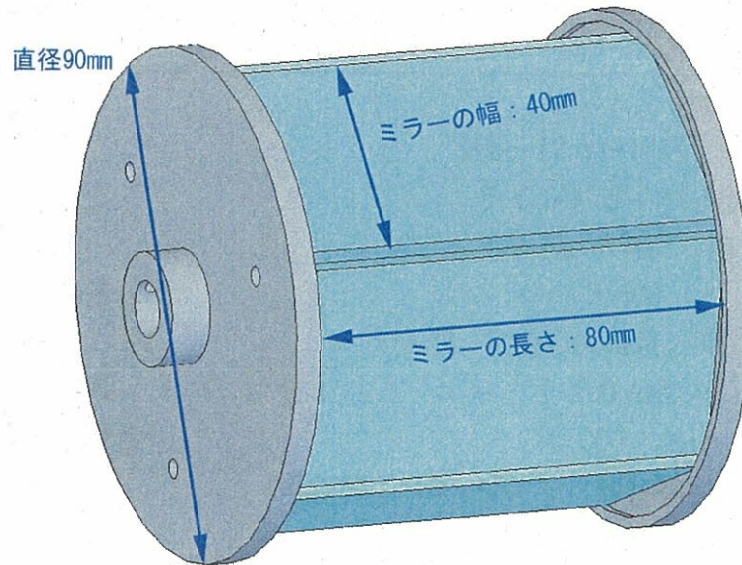


図 3.5 試作したポリゴンミラーの形状

3.2.3 ロータリエンコーダ

レーザー変位センサのレーザー光がポリゴンミラーの回転によって照射方向を変えながら下方の土壌表面形状を計測することから、そのときのレーザー光が照射されている地面の位置を算出するために、表 3.2 に仕様を示すインクメント型ロータリエンコーダ (OMRON, E6H-CWZ3X) を供試した。ロータリエンコーダは図 3.2 に示したように、ミラーの回転軸に固定され、ミラーの回転角度を 0.1° ごとに 1 パルス出力する。したがって、ロータリエンコーダの A 相は 1 回転で 3,600 個のパルスを出力するため、そのパルスの分周回路を製作し、回転角度に相当する 0~3,600 のデジタル値を BCD (Binary Coded Decimal, 2 進化

10進数)形式に変換して出力するようにした。なお、ミラー1回転ごとのデータの初期化は、ロータリエンコーダが360°回転することによって出力されるZ相パルスによって行った。分周回路が出力するBCDコードは後述のデジタル入力ボードを介してコンピュータに入力した。

表 3.2 供試ロータリエンコーダの仕様

型番	E6H-CWZ3X
外形寸法	φ44×33 mm
電源電圧	DC5~12 V(+10%, -5%)
出力形態	ラインドライバ出力
出力相	A相, B相, C相
分解能 (パルス/回転)	3,600
出力位相差	A相, B相の位相差 90° ±45°
最高応答周波数	100 kHz
許容最高回転速度	10,000 r/min
周囲温度範囲	動作時: -10~+70 °C 保存時: -30~+85 °C (ただし、氷結しないこと)

3.2.4 ブラシレス DC モータ

ポリゴンミラーを回転させるために、表 3.3 に示す可変速ブラシレス DC モータ (オリエンタルモータ, HBL210-GN) を供試した。速度制御範囲は可変抵

表 3.3 ブラシレス DC モータ HBL シリーズ

モータユニット	品名: HBL210-GN	ギヤヘッド	品名: 2GN3K
取り付け角	60 mm	ギヤタイプ	平行軸
定格出力	10 W	減速比	3
最大電流	2 A	許容トルク	0.2 N・m
起動トルク	0.06N・m	許容荷重	30 N
定格トルク	0.05N・m	許容	1.55
速度制御範囲	300~2000 r/min	モーメント	J (10 ⁻⁴ ・kg・m ²)

抗によって 300~2,000 rpm で調節可能であるが、モータに減速比 3 のギヤヘッドを装着したため、最終的な出力軸の回転速度は 100~660 rpm となる。ポリゴンミラーは、図 3.2 に示したように、モータとポリゴンミラー側に減速比 1 のタイミングプーリを取り付けタイミングベルトで駆動した。

3.2.5 計測用コンピュータとインターフェース

本研究では、作物列センサからの距離情報やロータリエンコーダからの角度情報を入力し、作物列の水平位置を算出するコンピュータと、第 5 章以後で述べる制御システムの制御用コンピュータを共用するために、独自に組み立てたパーソナルコンピュータを供試した。CPU は Pentium 4, 2.0 GHz, メインメモリは 256 Mbytes であり、OS は Microsoft Windows 2000 である。プログラム開発言語としては Microsoft Visual C++6.0 を使用し、作物列センサ用の計測プログラムを C 言語で制作した。また、レーザ変位センサとロータリエンコーダの計測データの入出力装置として、アナログ入出力ボード (Contec, AD12-16) とデジタル入出力ボード (Contec, PIO32/32L) を装着した。インターフェースボードの主要諸元を表 3.4 と表 3.5 に示す。いずれも PCI スロット装着型のインターフェースボードである。

表 3.4 アナログ入出力ボードの主要諸元

形式	CONTEC アナログ入出力ボード AD12-16 (PCI) E
入力形式	シングルエンド入力 16 チャンネル 非絶縁ユニポーラ 0~+10V
アナログ入力抵抗	1 M Ω 以上
変換速度	最大 1 μ sec/ch.
非直線性誤差	± 3 LSB
消費電流	DC5 V 1800 mA (最大)
外部回路電源	DC12~24 V ($\pm 15\%$)
使用条件	温度 0~50 $^{\circ}$ C 湿度 20~90% (ただし、結露しないこと)

表 3.5 デジタル入出力ボード主要諸元

形式	CONTEC デジタル入力ボード PI032/32L
入力形式	フォトカプラ絶縁電流駆動入力(ソースタイプ)
入力抵抗	3 k
入力応答時間	1 msec 以内
I/O アドレス	8 ビット×32 ボード
消費電流	DC5 V 300 mA
外部回路電源	DC12~24 V (±15%)
使用条件	温度 0~50 °C 湿度 20~90% (ただし, 結露しないこと)

3.3 作物列位置の認識方法 (ソフトウェア)

3.3.1 作物列センサの計測波形

作物列センサは, 図 3.1 に示したように, レーザビームを 6 面体ポリゴンミラーの回転で偏向させて下方の高さ形状を連続的にピンポイントで計測する。ポリゴンミラーは 6 枚のミラーを取り付けてあるため, 図 3.6 に示すように, ミラーが 1 回転するごとにそのセンサ下方の水平面までの距離を 6 回計測することになる。この図は作物列センサを地面から 600 mm の高さに固定し, センサで鉛直下方の水平面をポリゴンミラーを 1 回転させたときのレーザ変位センサの出力波形を示す。この図の横軸は, ロータリエンコーダの角度情報を示し, 縦軸はセンサが計測した地面までの距離を表している。なお, ロータリエンコーダは 0.1°回転するごとに 1 パルス出力するので, 10 パルスが 1°の回転角度に相当する。このように, 1 回転で 6 個の湾曲した波形がそれぞれ得られるが, 各波形の最も距離が短いところがセンサの真下に相当し, そのときの角度を各ミラーの基準角度とした。また, 左側の始点の角度を開始走査角度, 右側の終点の角度を終了走査角度とし, 表 3.6 にこれらの角度を示す。

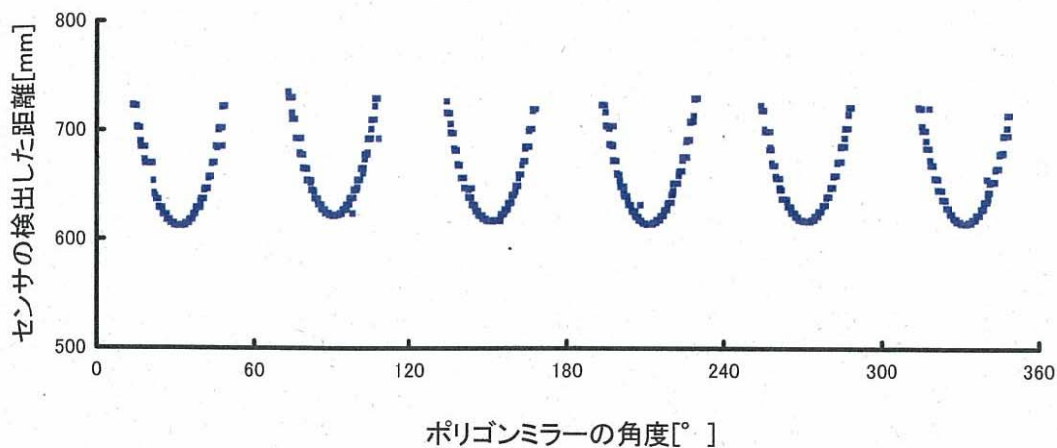


図 3.6 ポリゴンミラー1回転の距離計測波形

表 3.6 ポリゴンミラーの回転角の設定値

ミラーNo.	1	2	3	4	5	6
開始走査角度[°]	11.2	71.2	131.2	191.2	251.2	311.2
基準角度[°]	31.2	91.2	151.2	211.2	271.2	331.2
終了走査角度[°]	51.2	111.2	171.2	231.2	291.2	351.2

3.3.2 対象物の水平位置検出方法

対象物の位置検出方法について以下に詳述する。図 3.7 はソフトウェアによる対象物の位置検出のアルゴリズムを示す。フローチャートに示すように、まずコンピュータはインターフェースや各種データの初期化を行う。また、レーザ変位センサが計測した距離情報を A/D 変換ボードを介してコンピュータに入力する際やミラーの回転角度情報をデジタル入出力ボードを介して読み込む際のノイズ混入を防ぐために、インターフェース付属のソフトウェアのデジタルフィルタを起動する。つぎに、センサから入力されたデータを計算して、図 3.1 に示したように、辺 L と辺 h で挟まれた検出角度 α を算出し、対象物の中心位置を計測する。この場合、レーザ光が鉛直下方に向いたときのミラーの角度を 0° とし、それが 0° になったときにセンサが計測する距離データを高さ h にな

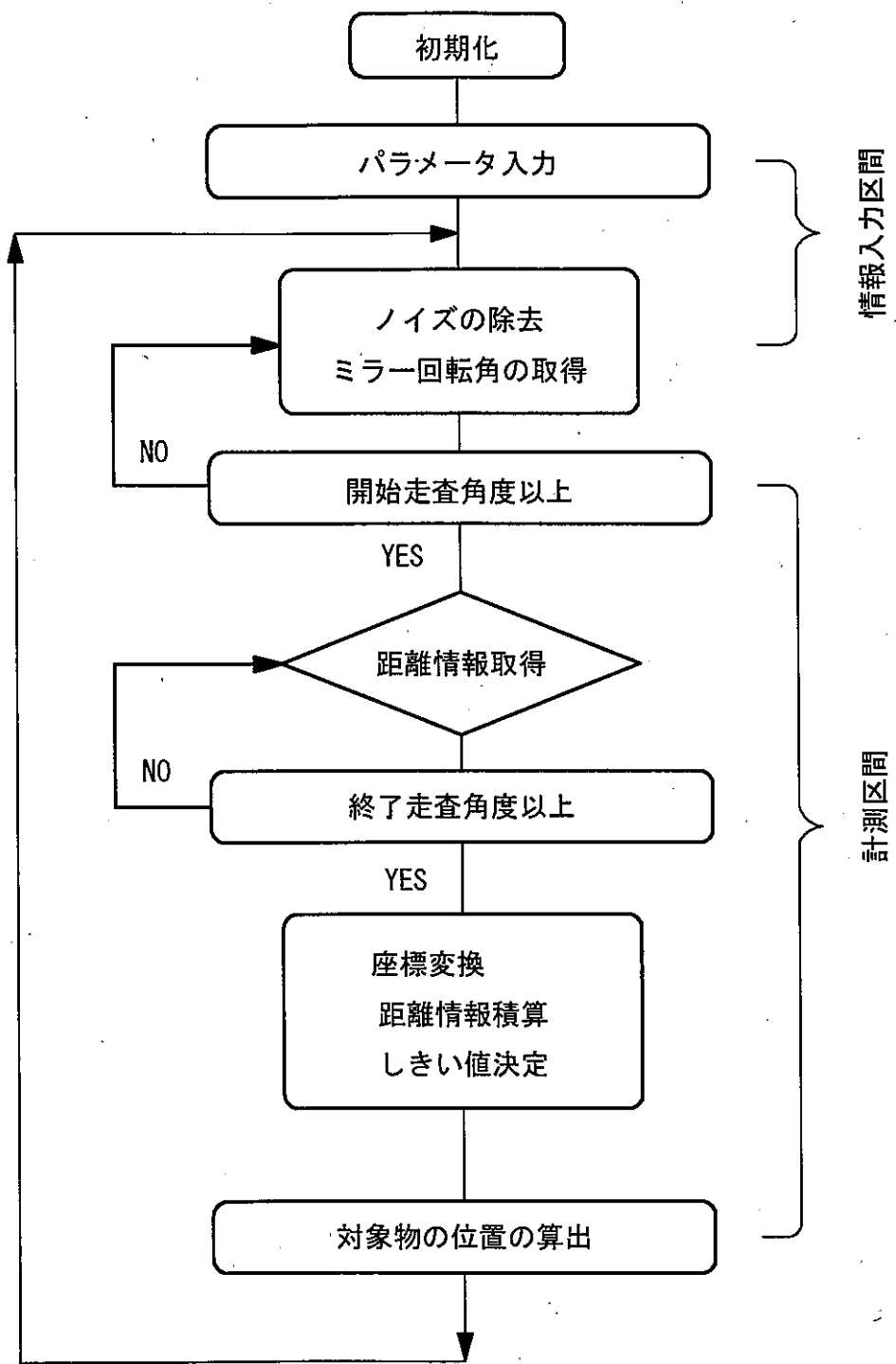


図 3.7 対象物の位置検出のアルゴリズム

るようにする。したがって、求める対象物の中心の水平位置 x は、3.1)式によって求められる。

$$x = h \times \tan \alpha \quad 3.1)$$

また、レーザ変位センサの計測距離 L を用いて点 $P(x, y)$ の座標を求めると、3.2)式と 3.3)式のように極座標系で表すことができる。

$$x = L \times \sin \alpha \quad 3.2)$$

$$y = L \times \cos \alpha \quad 3.3)$$

ここに、 x : 求める作物列の水平位置[mm]

y : 作物までの高さ[mm]

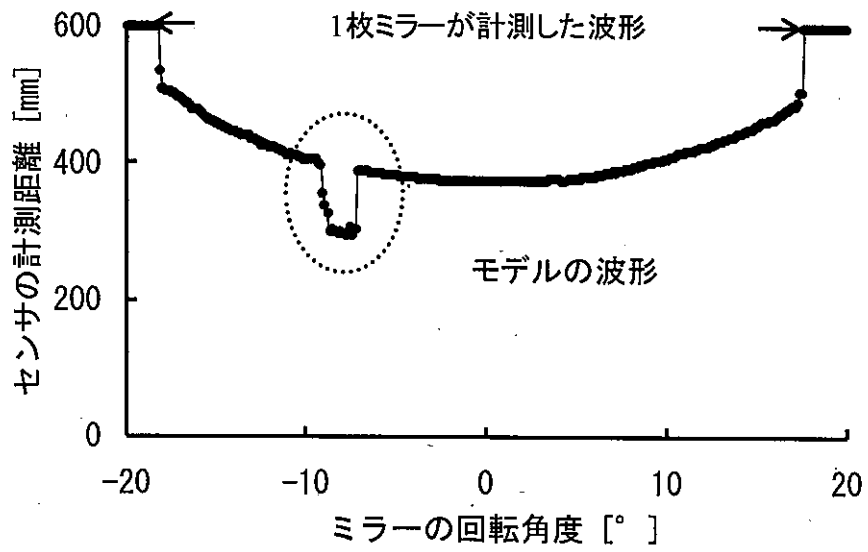
L : レーザ変位センサの計測距離[mm]

α : 検出角度[°]

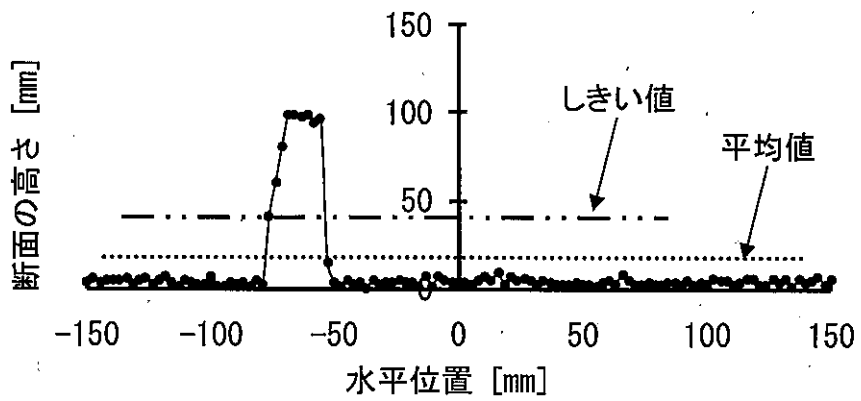
したがって、作物列センサはその下方を通過する作物の株ごとに、その水平位置 x を計測し、連続的に現れる株の作物列の位置を計測することができる。

3.3.3 作物列の位置検出法

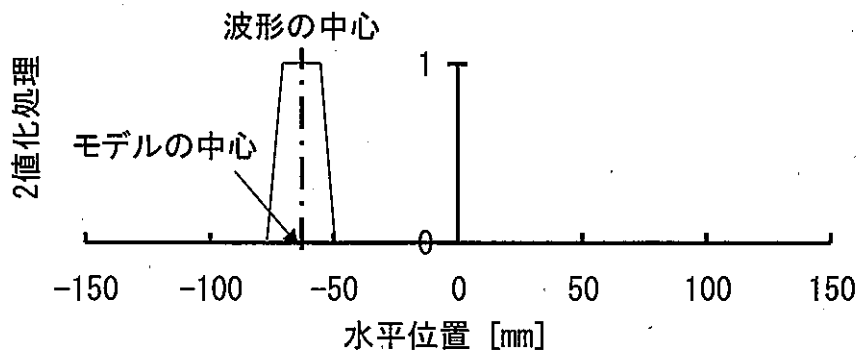
図 3.1 に示したように、センサの左側に 2 葉の状態の作物モデルが存在する場合、ミラー1枚が走査したときのセンサの計測波形は図 3.8 の a) に示すようになる。その距離データを 3.2)式と 3.3)式によって極座標から直角座標系に変換すると図 3.8 の b) のようになる。このような計算によって、土壌表面と作物の断面形状が求められ、その波形を見るとセンサがその作物を検出している位



(a) 作物モデルの断面形状の計測波形



b) 直交座標変換後の断面形状の波形



(c) 2値化処理後の波形

図 3.8 レーザ変位センサの計測波形と作物の水平位置検出方法

置が視覚的にも確認できる。作物の位置を抽出する場合、図に示す全ての断面高さのデータで平均値を求め、その平均値で2値化処理を行うと、作物以外に大きな土塊などが存在する場合にその凹凸を検出してしまい、それを作物として誤認する可能性があった。そこで、その平均値に対して一定のオフセット値を加えたしきい値を設定した。図3.8のc)は、そのしきい値によって計算された距離データを2値化処理したものであり、コンピュータはその矩形波の水平中心位置を作物が生育している位置として算出するアルゴリズムを採用した。

3.3.4 ラインマーカ跡の位置検出法

図3.9は総合施肥播種機による作業状況を示す。図のように、播種作業を行う場合、うね合わせ作業をするためにラインマーカを用いて土壌表面にV字溝を描き、図2.2に示したようにそれにトラクタの前輪を合わせてうね合わせ作



図3.9 総合施肥播種機の作業の風景

業を行っている。そこで、播種機などで利用されるラインマーカ跡すなわち V 字溝の断面形状（以後、V 字モデルと称する）を計測する場合、図 3.10 に示すように、V 字モデルの波形は作物の場合の波形と異なり水平面より低くなって

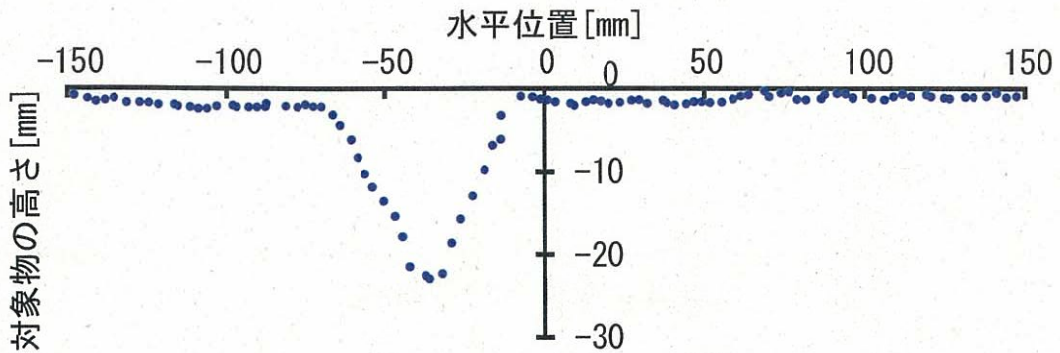


図 3.10 V 字モデルの断面形状の計測波形

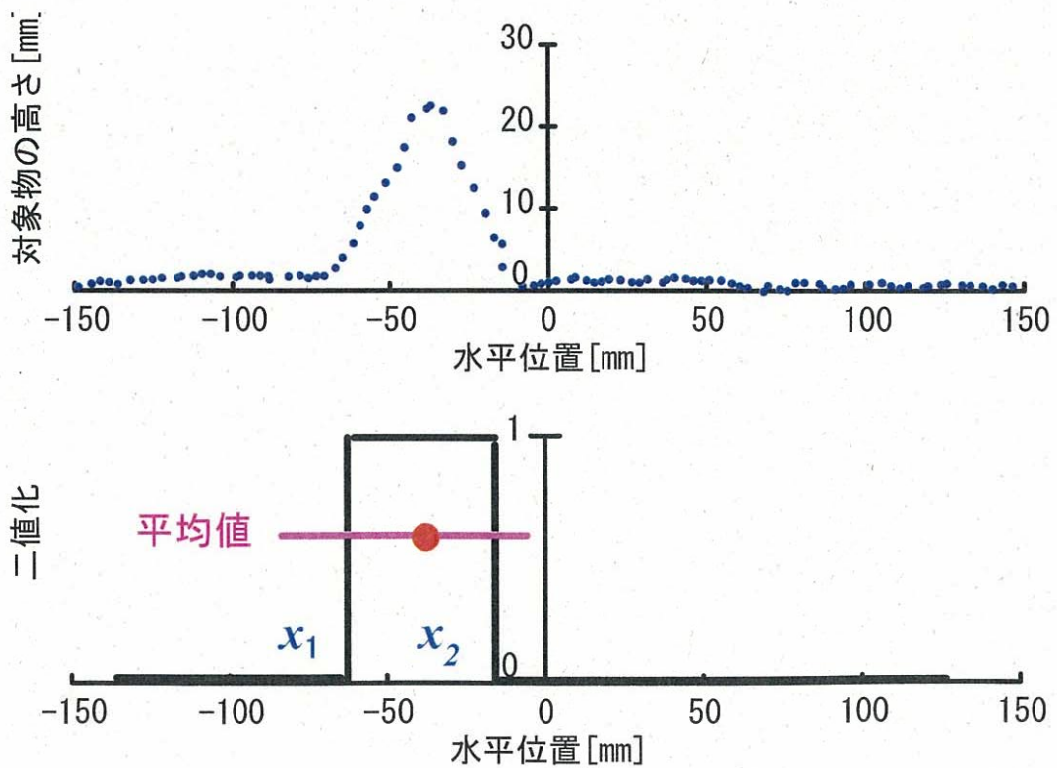


図 3.11 V 字モデルの位置検出原理

おり、この波形に対して作物の場合の計測アルゴリズムでは自動位置計測ができなくなる。したがって、図 3.11 に示すように、波形を水平軸で反転させて正側に溝の突起を現れるように処理し、その後二値化処理を行って枠の左側端の水平距離 x_1 と右側端の水平距離 x_2 と加算して、2 で除して平均の水平位置を計算することで、赤いマークで示す V 字モデルの中心位置を算出できるような位置計測プログラムを制作した。

3.4 ポリゴンミラーの回転数と計測可能対象物の大きさに 関する基礎実験

3.4.1 実験目的

作物列センサで作物の位置を検出する場合、レーザ変位センサのサンプリング間隔とポリゴンミラーの回転数の間には密接な関係があり、ミラーの回転数を高くすると、センサが計測する水平位置の距離間隔が広くなり、対象物が小さい場合、作物列センサはその位置を計測できなくなる。また、作物列センサは、圃場で作業機などに取り付けポリゴンミラーの回転によって下方を通過する作物やうねの断面形状を計測することから、ミラーの回転数が低下すると、作業機の作業速度が速いほど進行方向に対する走査距離や走査角度が大きくなり、その間に存在する作物の位置を検出できなくなる。そこで、本実験では、ポリゴンミラーの回転数と作物列センサが計測できる作物の大きさを明らかにした。

3.4.2 基礎実験の方法

作物列センサで位置を計測する対象物としてマメ科作物が 2 葉の状態になった場合を想定して作物モデルを厚紙で製作した。なお、表 3.7 に示すように草高を 100 mm とし、葉の 2 葉方向の横幅を 10~220 mm まで大きさを 10 mm ずつ変

えて22種の作物モデルを供試した。計測方法は、作物モデルを水平面上に置き、レーザ変位センサの出力波形をデジタルオシロスコープ(岩崎通信機, LT-GP02)で観察し、その検出の有無を判断した。センサの距離情報はアンプユニットからアナログ電圧で出力されるため、その出力接点をオシロスコープの入力接点に接続した。センサからの距離情報は図 3.12 に示したように、左図の作物モデルがない場合は波形がなめらかに湾曲し、作物モデルがある場合は右図のように波形の途中に矩形状の急激な波形の変化が現れ、センサがその作物モデルを検出したことを意味する。実験は、図 3.1 に示したように、レーザ式作物列センサの設置高さを 500 mm にし、作物モデルをセンサの中心位置、センサの中

表 3.7 作物モデルの形状

モデル番号	設置方法	横幅[mm]	縦幅[mm]	高さ[mm]
1		10	5.0	
2		20	5.0	
3		30	7.5	
4		40	10.0	
5		50	12.5	
6		60	15.0	
7		70	17.5	
8		80	20.0	
9		90	22.5	
10	作物モデルの横 はセンサの走査 軌跡と平行にな るよう設置す る。	100	25.0	100
11		110	27.5	
12		120	30.0	
13		130	32.5	
14		140	35.0	
15		150	37.5	
16		160	40.0	
17		170	42.5	
18		180	45.0	
19		190	47.5	
20		200	50.0	
21		210	50.0	
22		220	50.0	

心位置から左側 150 mm の位置および右側 150 mm の 3 箇所作物モデルを設置して作物列センサによる計測の有無を判断した。また、ポリゴンミラーの回転数が速くなるとレーザ変位センサのサンプリング間隔の関係で、センサが対象物を検出する水平方向の距離間隔が拡大することから、本実験では可変速モータによりポリゴンミラーの回転数を 60~220 rpm の間で変化させて、同様の実験を行い、センサによる作物モデル計測の有無を求めた。

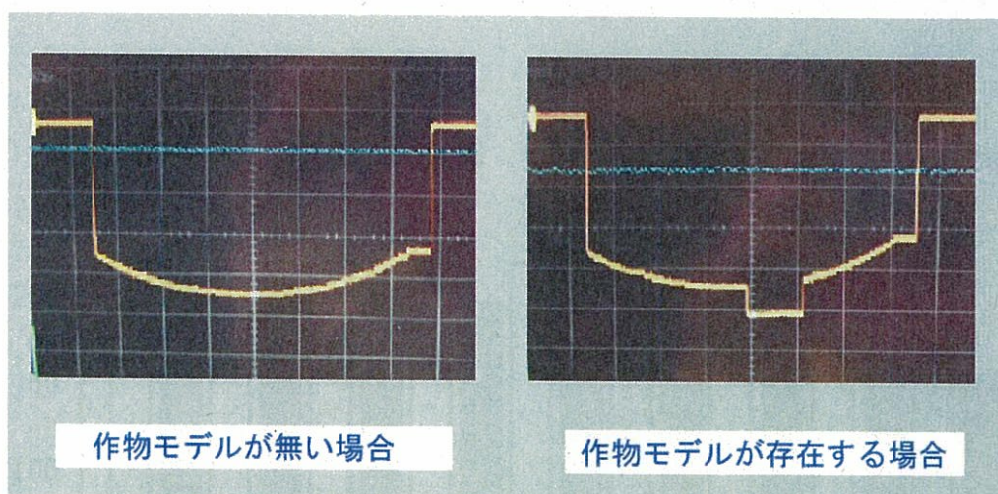


図 3.12 作物モデルの計測有無の波形の違い

3.4.3 基礎実験の結果と考察

図3.13はポリゴンミラーの回転数と作物列センサがその作物モデルを計測できる大きさの関係を示す。図の横軸は設定したポリゴンミラーの回転数を示し、縦軸は作物モデルを作物列センサの中心位置あるいは中心位置から左右 150 mm の水平位置に設置したときのセンサによる作物モデルの計測の有無を示したものである。

図に示したように、センサの中心位置から左右 150 mm の位置に作物モデルを置く場合、ポリゴンミラーの回転数が 60 rpm のとき、測定可能な作物モデル

の大きさは20~200 mm であるのに対し、160 rpm 以上になるとセンサが計測できる作物モデルの大きさの範囲が少しずつ狭くなり、200 rpm では大きさが60~170 mm になり、小さい作物モデルを計測することが困難になった。しかし、作物モデルをセンサの中心位置に置いた場合では、大きさが210 mm までの作物モデルを計測することができた。また、モータの回転速度を極端に低くすると回転ムラなどが生じたことから、モータの定格回転数前後に設定することが望ましいと言える。

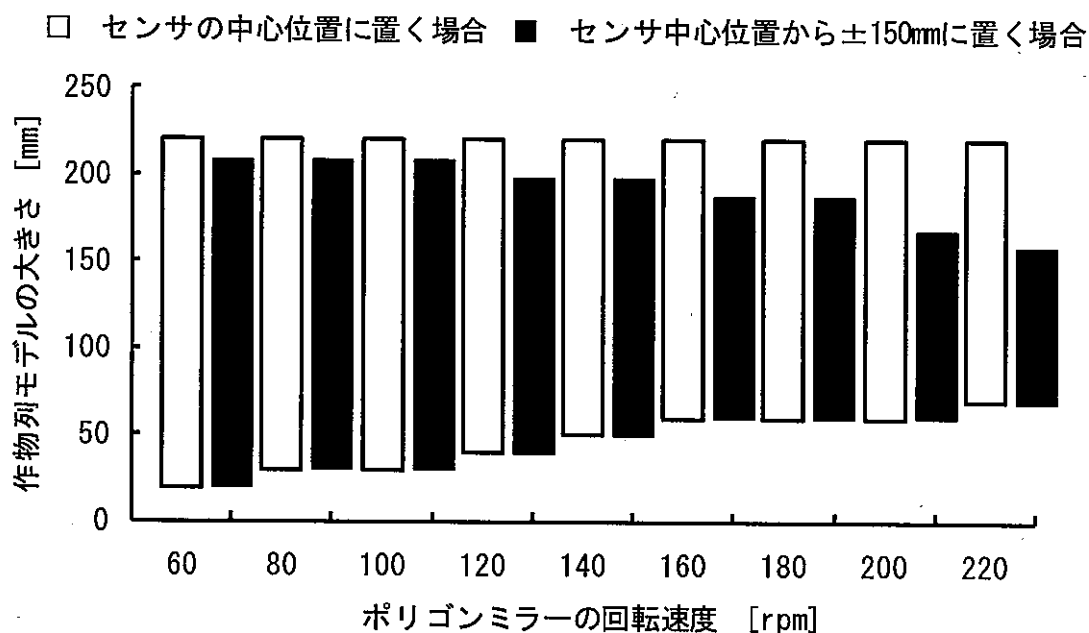


図 3.13 ポリゴンミラーの回転数と作物列センサが計測できる作物モデルの大きさの関係

以上の基礎実験の結果から、作物モデルがセンサの中心位置または左右30~200 mm に位置する場合、確実にその水平位置を検出するためには、開発したレーザ式作物列センサのポリゴンミラーの回転数を100~140 rpm に設定することが妥当であると考えられる。

3.5 本章のまとめ

開発したレーザ式作物列センサは主に、レーザ変位センサ、6面体ポリゴンミラー、可変速モータ、ロータリエンコーダおよびコンピュータで構成されるが、本章では作物列センサの計測原理や概要、作物列検出のソフトウェアについて述べた。

- 1) 本研究で供試したレーザ変位センサは CCD 式で、その測定距離は 250~750 mm であり、対象物までの距離を非接触で計測できる。また、センサはトラクタ用作業機に取り付けられるが、進行方向に対して横方向下方の土壌表面や作物の高さ形状を計測する。そのために、可変速モータを用いて 6 面体ポリゴンミラーを回転させ、レーザ変位センサから発するレーザ光の向きを変え、下方の断面形状を計測できるようにした。
- 2) 作物列センサの距離情報や角度情報から作物列の水平位置を算出するために自作の計測用パーソナルコンピュータを供試し、C 言語による計測用プログラムを開発した。
- 3) 供試したレーザ変位センサのサンプリング間隔の影響で、ポリゴンミラーの回転数を高くすると小さな作物の葉を検出できなくなる。基礎実験の結果、本研究の作物列センサの場合、ポリゴンミラーの回転数は 100~140 rpm が最適であることが判明した。

以上のように、本章では、レーザ式作物列センサを開発し、その計測原理と概要について述べた。次章の第 4 章では、その計測精度に関する評価を実施する。

第4章 レーザ式作物列センサの計測精度の評価

4.1 緒言

前章では、開発したレーザ式作物列センサの概要を述べた。本章は、作物列センサの基本的な位置検出精度を評価するために室内実験と圃場実験を行い、作物列やラインマーカ跡の検出特性を明らかにすることを目的とした。そのために、以下の実験を実施した。

室内実験では、まず生育している作物を想定した作物モデルと播種機や移植機で土壌表面に描かれるうね合わせ用のラインマーカ跡を想定したV字モデルについて、それらが静止している状態での位置計測精度を明らかにする。つぎに、実際の圃場作業を想定し、作物がセンサの下方を連続的に通過する走行シミュレータを利用して作物が一定の株間で断続的にセンサの下方に現れることを再現した場合の作物列検出特性を実験的に明らかにする。

また、圃場実験では、作物列センサをトラクタの前部に取り付け、圃場で走行させ、播種・移植機用のラインマーカ跡および実際の作物列を対象物とした場合の検出特性を明らかにすることを目的とした。

4.2 室内実験

4.2.1 実験装置および方法

4.2.1.1 実験装置および対象物形状

室内実験で利用した実験装置は、図4.1に示すように、圃場模擬走行試験装置と開発した作物列センサである。圃場模擬走行試験装置は、図のように回転ドラムの表面に等間隔に厚紙で製作した作物モデルを取り付け、それを回転させてセンサの下方を作物が連続的に通過する状態を再現した。さらに、これはモータとクランク機構によってトラクタが進行方向に対して左右に蛇行する状

態を再現できる走行シミュレータである。

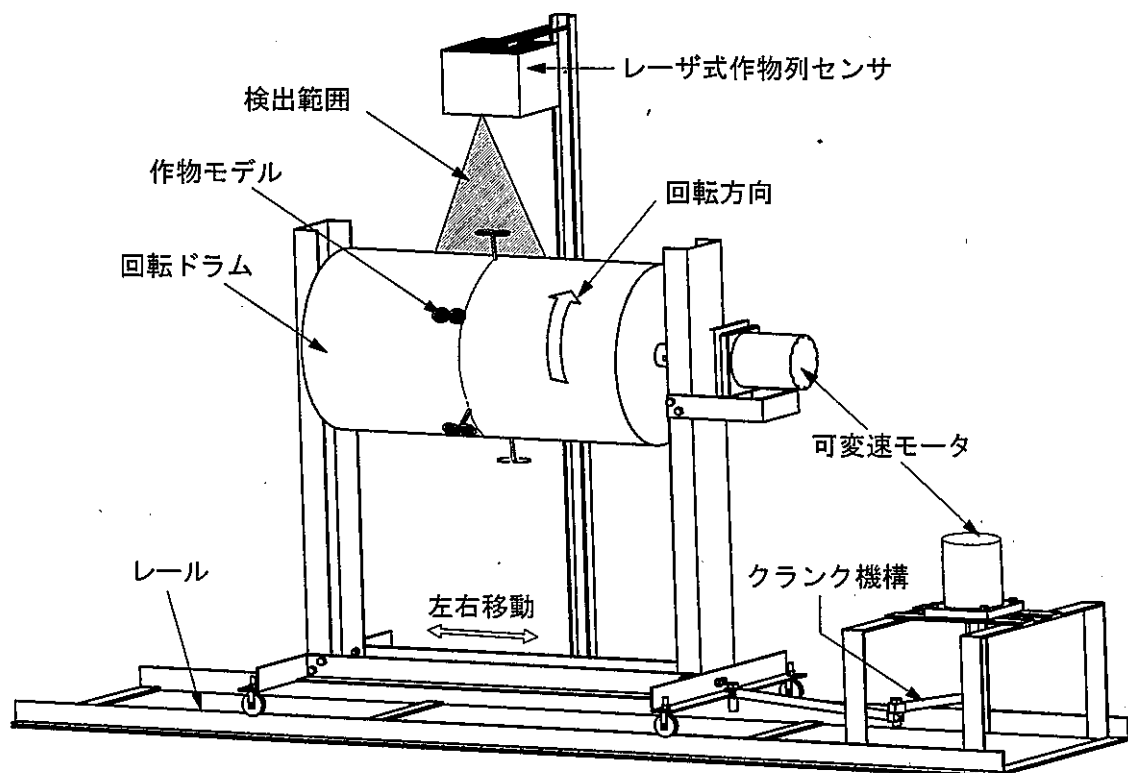


図 4.1 圃場模擬走行試験装置によるセンサの計測精度評価

つぎに、供試した対象物は V 字モデルと作物モデルである。一般に畑作の播種・移植作業のうね合わせ作業を行う場合、トラクタ作業者は播種機の両側に装備しているラインマーカを交互に土壤に作用させて、土壤表面に V 字状断面のラインマーカ跡を物理的に描いて、次の行程では図 2.2 に示したようにトラクタ作業者は前輪をそれに合わせてハンドル操作を行っている。本研究では図 4.2 に示すように、このラインマーカ跡を模倣して厚紙で作製したものが V 字モデルであり、また作物モデルはマメ科作物が 2 葉になったときを想定して厚紙で作製したものである。なお、V 字モデルは 1 種類、作物モデルは 3 種類であり、それぞれモデル A、B、C、D と称し、その詳細を表 4.1 に示す。

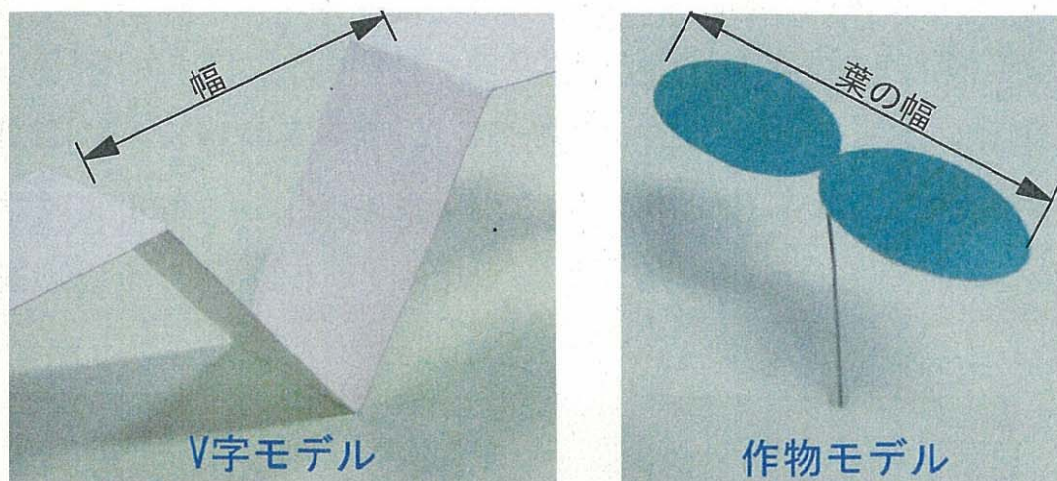


図 4.2 検出対象物の形状

表 4.1 検出対象物形状の詳細

	V字モデル		作物モデル		
モデル	A	モデル	B	C	D
幅 [mm]	60	葉の幅 [mm]	100	150	200
高さ [mm]	70	高さ [mm]	60	75	100

4.2.1.2 実験方法

まず、検出対象物が静止している状態で、作物列センサの位置計測精度を評価した。供試レーザ変位センサの計測基準距離が 500 mm であるため、作物列センサの地面からの設定高さは 400, 500, 600 mm の 3 段階に設置した。対象物は図 4.3 に示すように、センサの鉛直下方に設置し、指示針とスケールを用いて対象物をセンサの中心から左右 200 mm の範囲で、順次 20 mm 間隔に水平移動させ、それぞれの位置で対象物の計測を行い、その設置位置とセンサの検出位置の関係を求めた。なお、ポリゴンミラーの回転数は 100 rpm に設定し

た。位置検出データは1枚のミラーが回転するごとに1点のデータが取得され、ポリゴンミラー1回転では6個のデータが得られるが、本実験では各設置位置において約50点のデータを取得した。それらのデータは、4.1)式に示すように、RMS (Root Mean Square : 2乗平均平方根) を算出して検出精度を評価した。

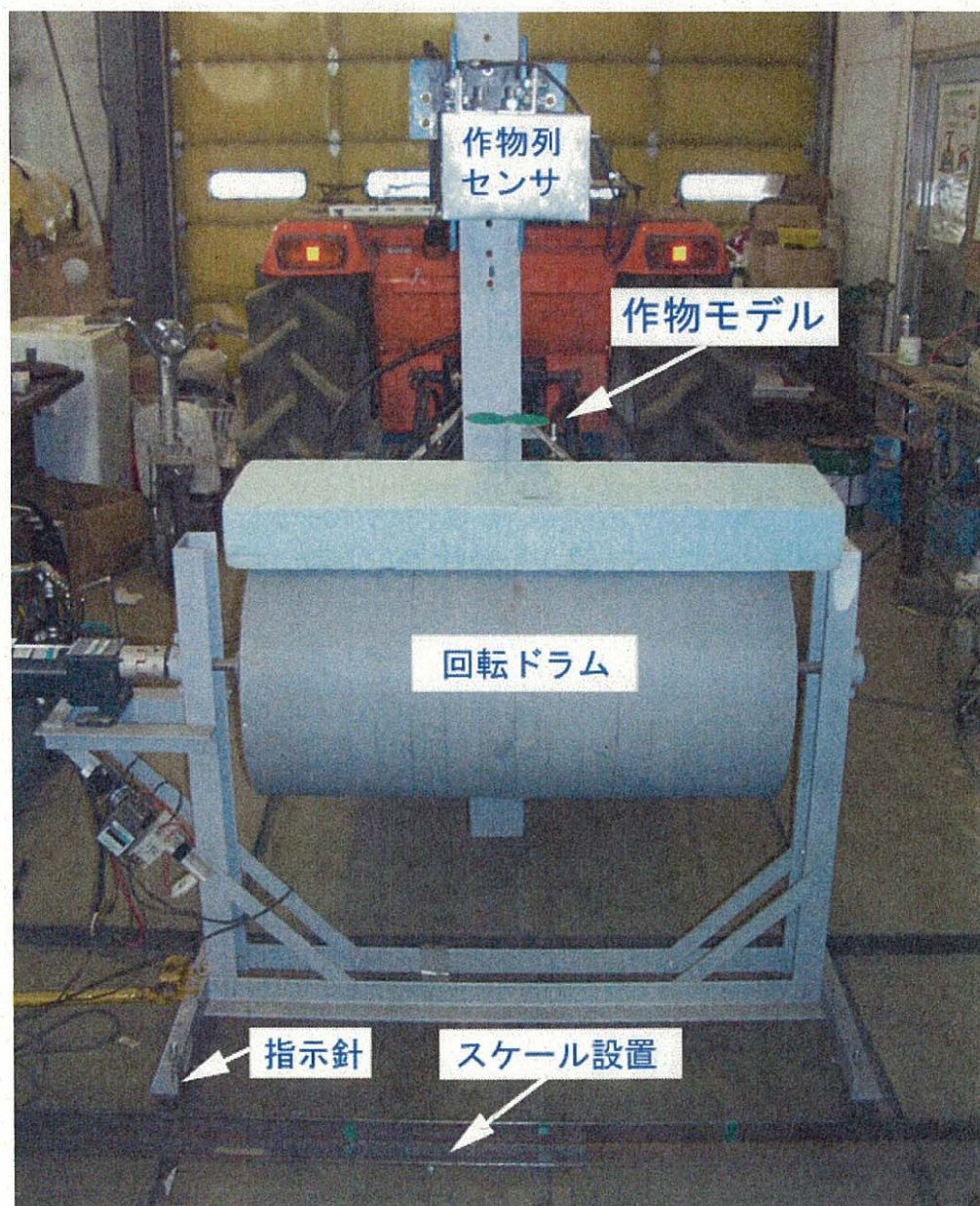


図 4.3 圃場模擬走行試験装置による対象物の計測方法

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^2} \quad (4.1)$$

ここで、 n : データ数

x_i : 基準値に対する誤差 [cm]

圃場作業を想定した実験は、実際に圃場実験を行う前に、室内で外乱を取除き、さらに冬季間でも実験を行えるように、それを再現したものである。図 4.1 に示したように、作物列センサは圃場模擬走行試験装置の上方に設置した。草高 100 mm の作物モデルを回転するドラム表面に 221 mm 間隔で 6 個取り付けた。その回転ドラムは可変速モータ (ORIENTAL MORTER, MSD590-501CD) によって、実際のトラクタ用作業機の色度になるようにドラム表面での周速度を設定し、圃場作業のように一定株間で作物がセンサの下方を断続的に通過する状態を再現した。なお、設定した回転ドラムの周速度すなわち想定した作業速度は 0.5, 1.0, 1.5 m/s である。

また、実際の圃場作業では、トラクタ作業者のハンドル操作などによってセンサの下方を通過する作物列が進行方向に対して左右に変化することが考えられる。そこで、本実験装置はクランクと滑り子機構によって回転ドラム全体を回転軸方向に左右に揺動させることができ、その揺動振幅はクランクアームの長さを変えることで 100, 150, 200, 300 mm の 4 段階に調節することができる構造とした。さらに、圃場作業での蛇行運転を想定する正弦波状の揺動は、クランク軸に取り付けた可変速 AC モータ (ORIENTAL MORTER, BHF62AT-50) によって 0~48 rpm (0~0.8 Hz) の間で無段階に調節することにより、正弦波の波長を変化させて行った。なお、揺動時の作物列の位置は表 4.2 に示すレ-

ザ距離センサ（松下電工，LM100）でその軌跡を計測した。

表 4.2 作物列移動軌跡の計測用レーザ距離センサの仕様

センサヘッド形式	Matsushita Electric Works LM100
アンプユニット形式	Matsushita Electric Works ANL1251
分解能	150/500/150 μm
測定範囲	250 \pm 150 mm
耐環境性	0 \sim 45 $^{\circ}\text{C}$

4.2.2 実験結果および考察

4.2.2.1 V字モデルの位置検出精度

作物列センサの設定高さを 400, 500, 600 mm の 3 段階に設置した場合の V 字モデルの設置位置とセンサがその V 字モデルを検出した位置の関係を図 4.4 に示す。図の横軸は V 字モデルの設置位置を示し，縦軸は作物列センサがその V 字モデルを計測した位置を表す。

図のように，V 字モデルの設置位置が左右 \pm 180 mm の範囲では，その設置位置とセンサの検出位置の関係はほぼ直線関係を示した。ここで，センサの計測精度の詳細を表 4.3 に示すが，両者が直線関係を示す範囲のセンサの設定高さ別の検出精度の 2 乗平均平方根の RMS は設定高さが低い方から順にそれぞれ 2.8, 3.0, 1.9 mm であった。

この結果から V 字モデルがセンサの鉛直下方の水平距離 \pm 180 mm の任意の位置に存在する場合，開発したセンサは作物列センサとしてほぼ十分な位置計測精度を有すると判断できる。このように，V 字モデルの設置位置が左右 \pm 180 mm 以内では，設置位置とセンサの検出位置の関係はほぼ直線関係を示しているが，この範囲よりも広い両端の左右 \pm 200 mm 付近ではセンサの検出位置が設置位置よりも若干内側に検出する傾向が見られた。特に，センサの設

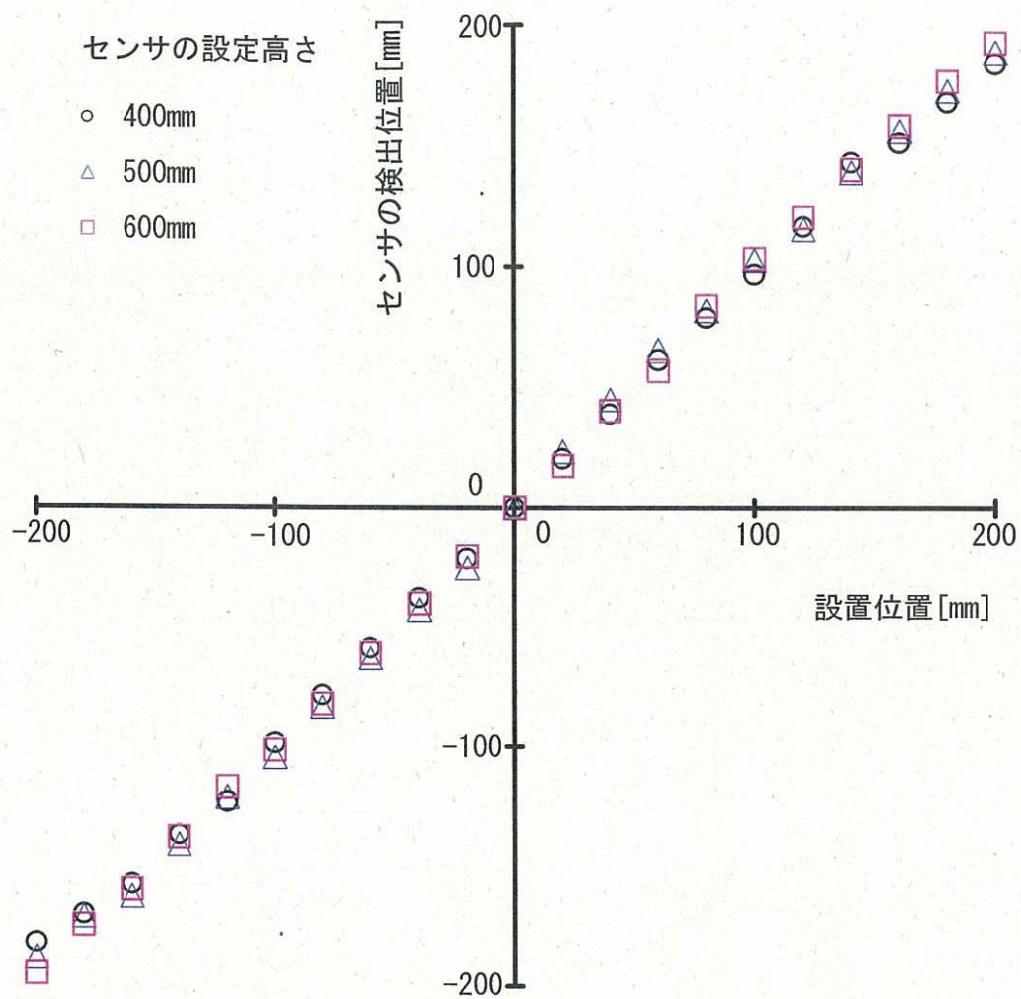


図 4.4 V字モデルの設置位置とセンサの検出位置の関係

表 4.3 作物列センサの検出精度 (V字モデル)

センサの 設定高さ [mm]	設置位置 (±200 mm の範囲)	設置位置 (±180 mm の範囲)
	計測誤差 RMS [mm]	計測誤差 RMS [mm]
400	5.1	2.8
500	3.7	3.0
600	3.0	1.9

定高さが 400 mm の場合、V 字モデルを 200 mm に設置するとセンサの検出位置は 184.9 mm となり、これは作物列センサがセンサの中心から V 字モデルまでの距離を短く計測したということを示す。この現象が起こる理由は図 4.5 に示すように考えられる。センサの設定高さを 400 mm にした場合、V 字モデルの一部がセンサの検出範囲からはみだしていることに起因する。具体的には、コンピュータは検出範囲以内の断面形状のデータのみでその対象物の中心位置を算出することから、図のように実際の V 字モデルの設置位置よりもセンサの中心方向に近い状態でその位置を計測する特性を示す。しかし、開発するトラクタ作業機のうね自動追従システムは、図 1.3 に示したように、制御システムによってセンサが常に制御目標のラインマーカ跡や作物列の真上に位置するように制御されることから、センサの計測範囲の両側で若干計測精度が低下することは、本研究の追従システムを考えると実用上問題にならないと考えられる。

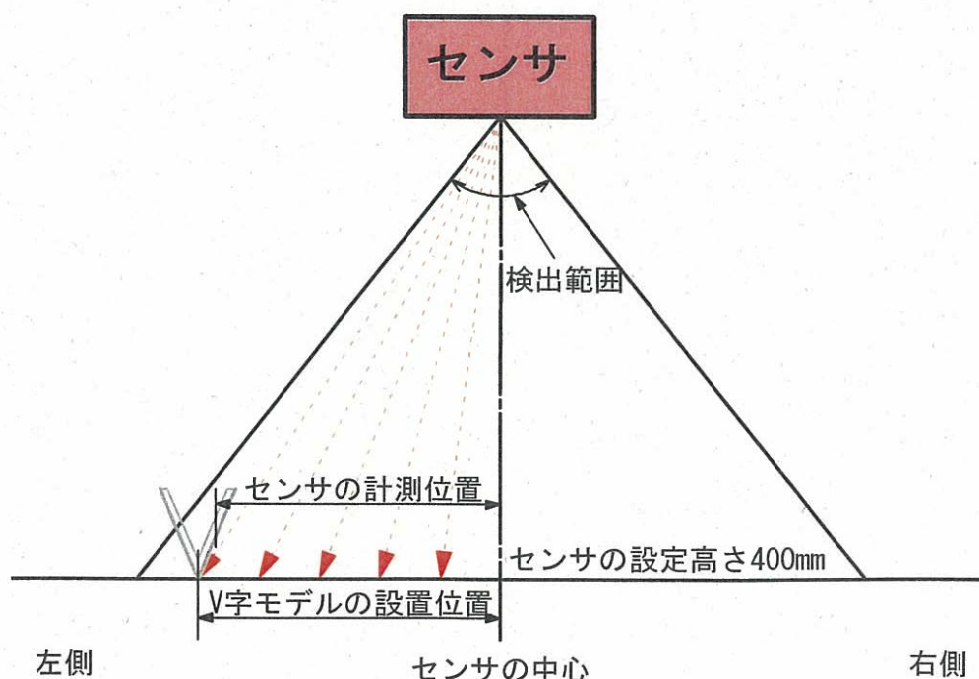


図 4.5 センサの計測範囲付近で計測誤差が大きくなる理由

4.2.2.2 作物モデルの位置検出精度

作物モデルの設置位置は茎の位置を基準として設置し、作物列センサの設定高さを400, 500, 600 mmにした場合の作物モデルの設置位置とセンサがその作物モデルを計測した位置の関係を作物モデルごとに図4.6から図4.8に示した。また、表4.4は作物モデルを対象とした場合の作物列センサの検出精度を示す。

いずれの図もV字モデルの場合と同様に作物モデルの設置位置がセンサの中心から左右 ± 180 mm以内の範囲では、作物モデルの葉の幅別のセンサの計測精度のRMSは、モデルBが4.2 mm, Cは4.3 mm, Dが5.7 mm以下であり、作物モデルの設置位置とセンサの検出位置の間にはほぼ直線関係が見られる。しかし、水平距離が ± 180 mmを超えると検出位置は設置位置に対して逡減的に減少する傾向が見られた。これは前述のV字モデルでも述べたように作物がセン

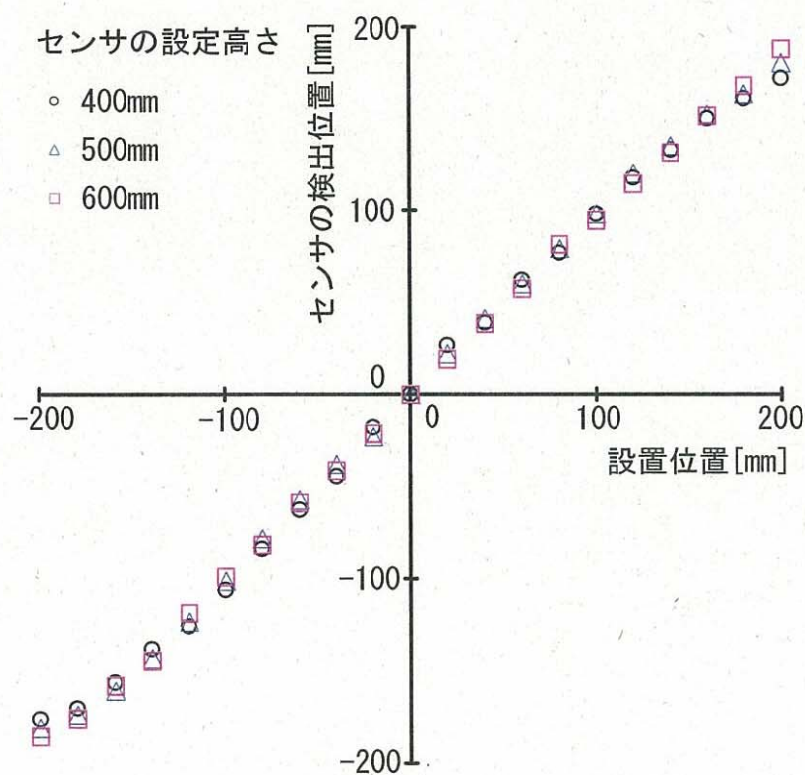


図 4.6 Bモデルの設定位置とセンサの検出位置の関係

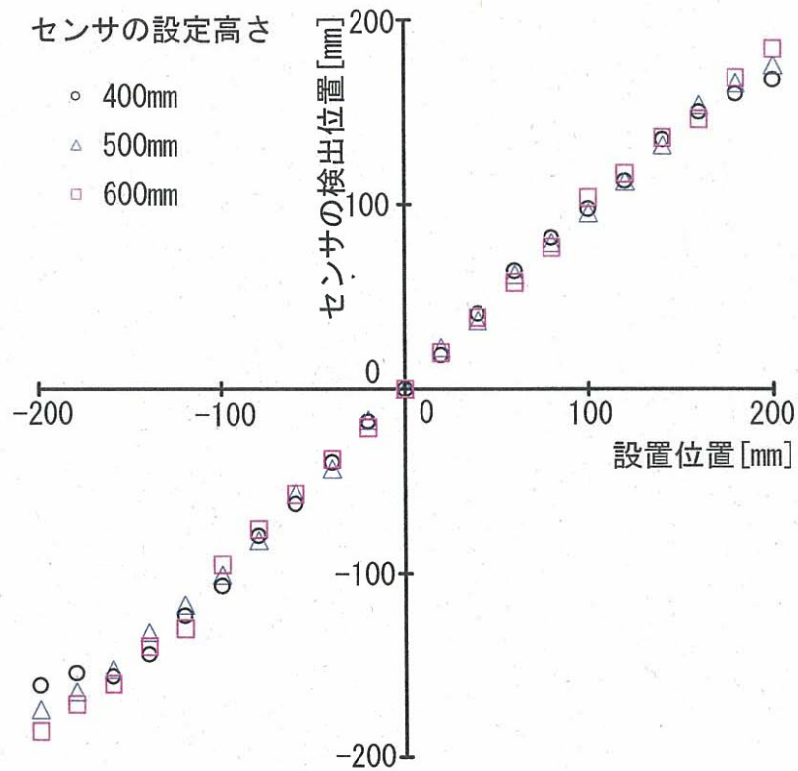


図 4.7 Cモデルの設置位置とセンサの検出位置の関係

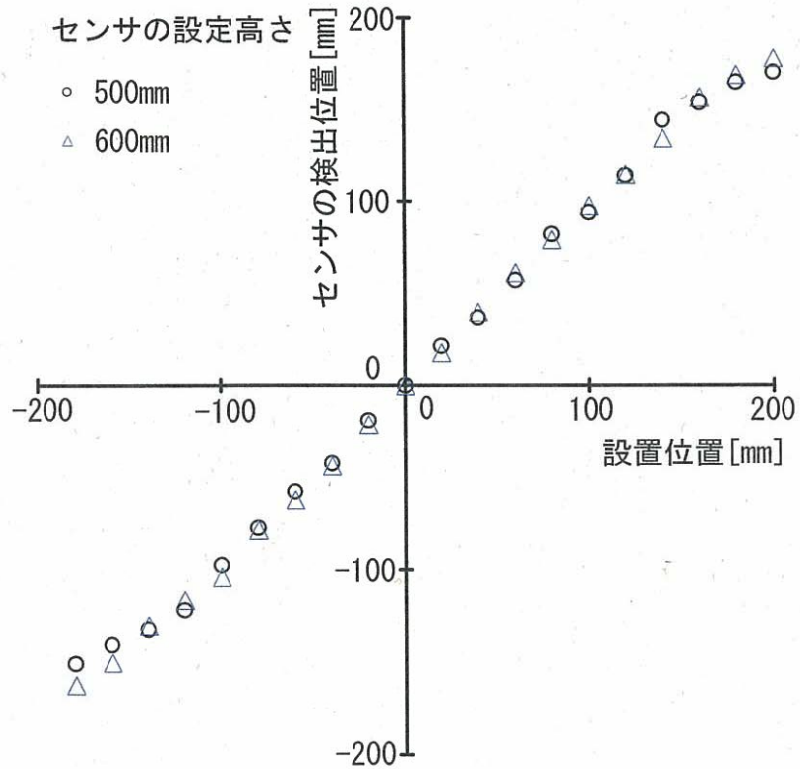


図 4.8 Dモデルの設置位置とセンサの検出位置の関係

表 4.4 作物列センサの検出精度(作物モデル)

設定高さ [mm]	設置位置(±200 mm の範囲) 計測誤差 RMS [mm]			設置位置(±180 mm の範囲) 計測誤差 RMS [mm]		
	400	500	600	400	500	600
モデル B	6.3	4.9	5.1	4.2	2.6	3.5
モデル C	7.2	7.0	6.0	3.8	4.2	4.3
モデル D	—	7.5	7.2	—	5.7	4.1

サの測定範囲の境界からはみ出したことに起因する。また、各図に示すように、いずれのセンサの設定高さにおいても葉の幅が大きく草高が高くなると、センサの検出範囲が狭くなり、センサの誤差の RMS は大きくなる。しかし、3 種類の作物モデルの計測誤差の RMS は 5.7 mm 以下であった。

このように、作物列センサの V 字モデルと作物モデルの位置検出精度は、実験の範囲において誤差の RMS はいずれも 6 mm 以下であり、作物列センサとしての計測精度は十分に高いと判断できる。

4.2.2.3 圃場作業を想定した場合の位置検出特性

図 4.9 から図 4.11 に葉の幅 100 mm のモデル B を供試し、圃場模擬走行試験装置を利用して室内で圃場走行を想定した実験結果を示す。これらは、周速度（作業速度）を 0.5, 1.0, 1.5 m/s の 3 段階に変化させ、作物列に正弦波状の左右の変化を与えた場合の作物列センサの位置計測精度である。各図の上図は、作物列の軌跡とセンサが検出した個々の作物モデルの位置検出結果であり、下図はセンサの検出誤差を示す。

いずれの周速度でも、実線で示す作物列の軌跡に対して、センサはその下方を不連続に通過する個々の作物モデルの水平位置を正しく計測していることが明らかであり、作物列の正弦波状の軌跡と丸印で示すセンサの計測値はほぼ一

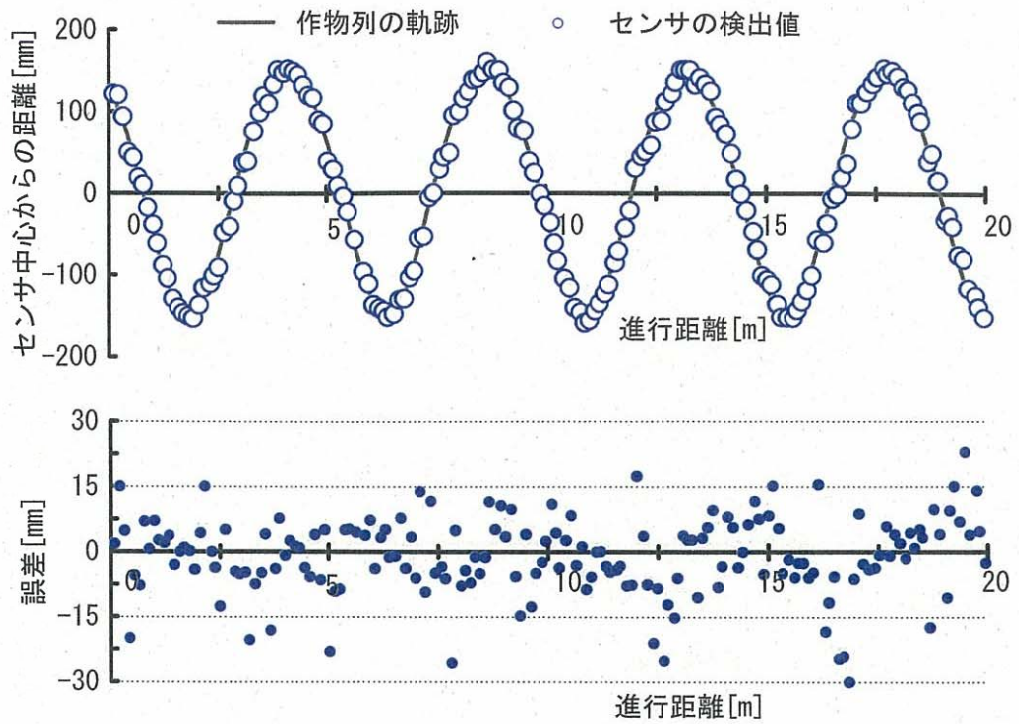


図 4.9 センサの検出精度 (周速度 0.5 m/s, 周波数 0.2 Hz)

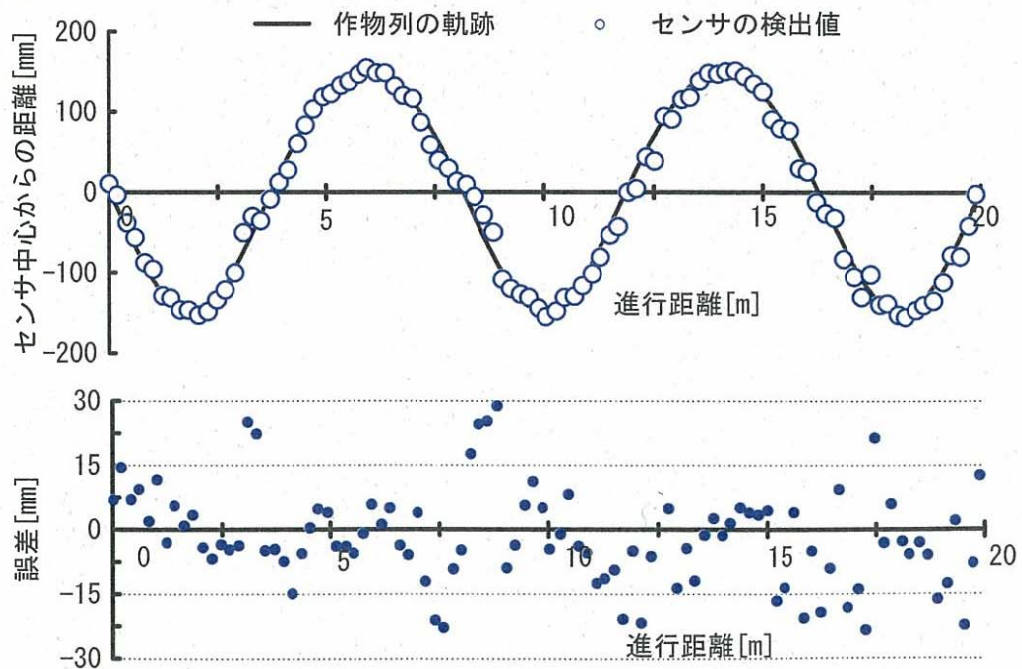


図 4.10 センサの検出精度 (周速度 1.0 m/s, 周波数 0.1 Hz)

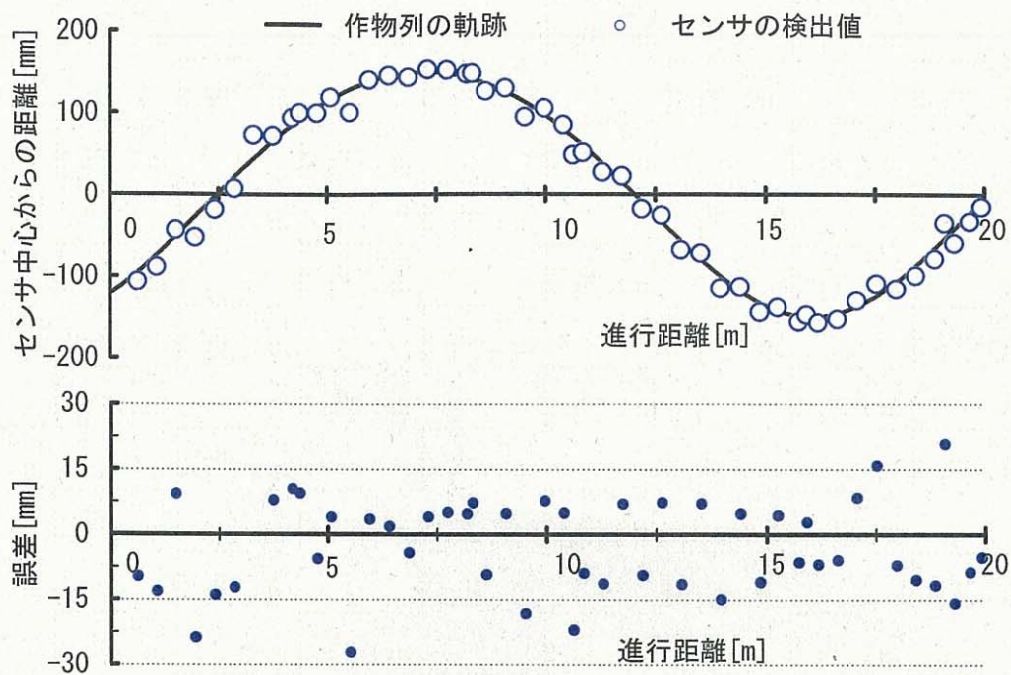


図 4.11 センサの検出精度 (周速度 1.5 m/s, 周波数 0.08 Hz)

致していることが確認できる。下図の検出誤差を見ると、個々の作物モデルの誤差が ± 25 mm を超える場合が見られるものの、全体的に見ると誤差はほとんどが ± 10 数 mm 以内に収まっている。また、センサの検出誤差の RMS は作業速度が低い順に、それぞれ 5.6, 5.8, 5.2 mm であり、実験の作業速度の範囲以内では作物列センサの位置検出特性に影響を与えないと言える。

4.3 圃場実験

4.3.1 実験装置および方法

4.3.1.1 実験装置および計測対象

圃場実験の実験装置は、図4.12に示すように、主にトラクタ(クボタ, ZL1-33)と作物列センサおよびトラクタの走行軌跡を記録する導水管などである。また、計測対象物は図 4.13 に示すように、うね合わせのためのラインマーカ跡と作物

列とした。ラインマーカ跡の場合は4畦用の播種機(タバタ, TJC-4U)でV字溝のラインマーカ跡(幅60mm, 深さ70mm)を土壌表面上に描き実験に供試し, また作物列の位置計測実験では供試作物として菜豆(大正金時)を本学の精密実験圃場に栽培し, 草高が約120mmの状態のときに実験に供試した。



図 4.12 供試したトラクタと作物列センサ

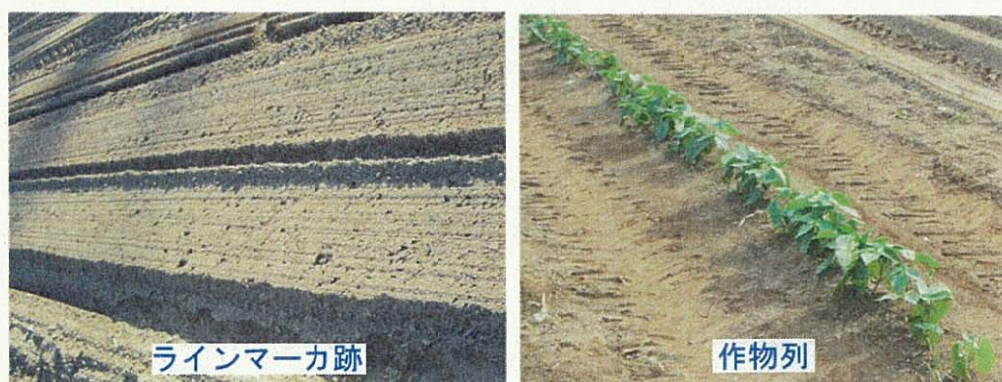


図 4.13 圃場での計測対象物

4.3.1.2 実験方法

圃場で作物列センサの計測精度を評価するために、図 4.12 に示したように作物列センサを地面から 500 mm の高さになるようにトラクタの前部に取り付けて実験を行った。また、実験は図 4.14 に示すように、ラインマーカ跡や作物列に沿って走行させるが、故意に蛇行運転したときのトラクタの軌跡はセンサ横に設置した導水管から地面に水を滴下させて描き、その水滴の軌跡から作物列までの距離を実測してセンサの検出精度を評価した。なお、ラインマーカ跡および作物列の測定区間はトラクタの進行距離を約 20 m とし、トラクタの作業速度は 0.5, 1.0, 1.5 m/s の 3 段階に設定して実験を行った。

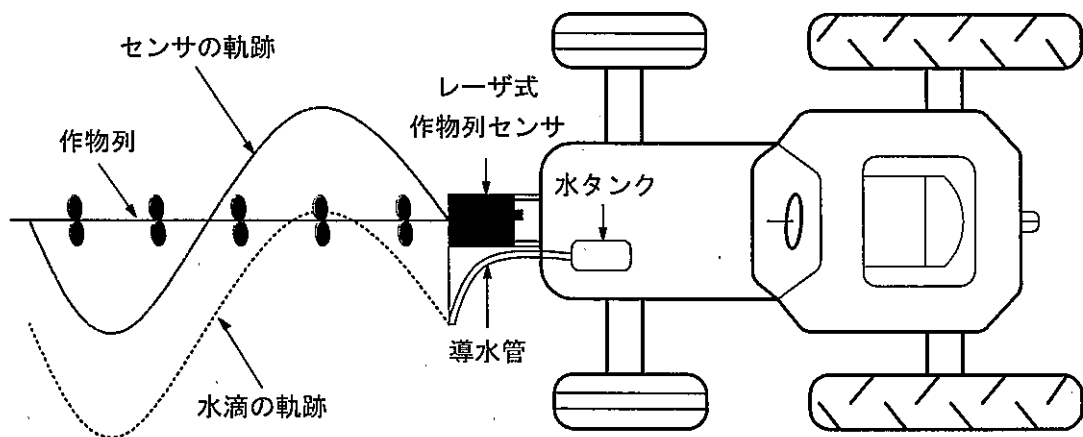


図 4.14 圃場実験による作物列センサの評価法

4.3.2 実験結果と考察

4.3.2.1 ラインマーカ跡の位置計測精度

図 4.15 は、圃場でのラインマーカ跡について、作業速度を 0.5, 1.0, 1.5 m/s の 3 段階に変化させ、作物列センサによる位置検出結果を示し、表 4.5 はそ

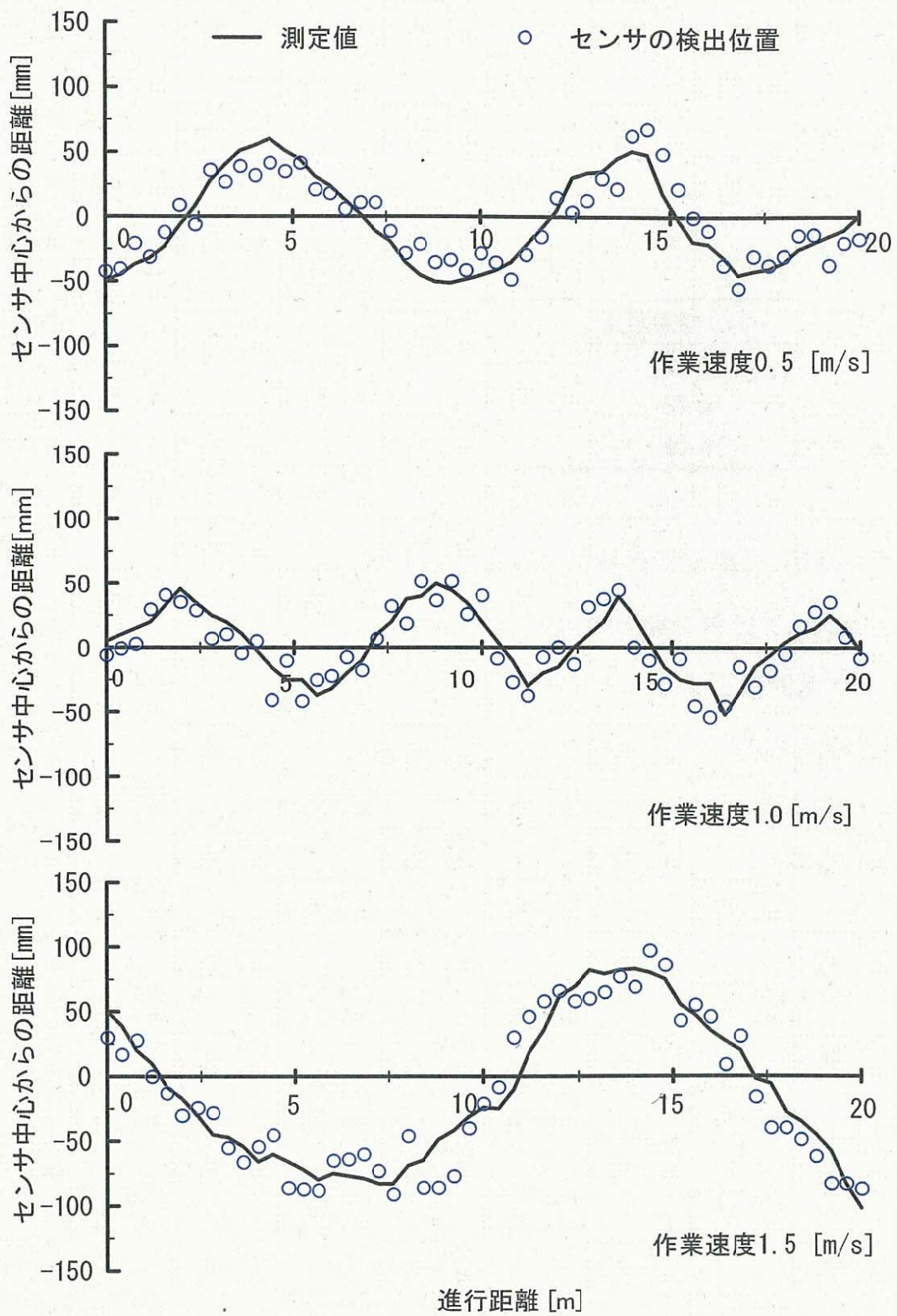


図 4.15 圃場でのラインマーカ跡の計測結果

の計測精度の評価結果を示す。いずれのグラフも横軸は実験を行ったトラクタの進行距離を示し、縦軸は作物列センサの中心を基準にトラクタの進行方向に対する横方向の左右のラインマーカ跡の中心位置を示し、正は進行方向に対して右にずれていることを示す。

表4.5 ラインマーカ跡の検出精度

作業速度 [m/s]	RMS [mm]	変動係数 C_v [%]
0.5	14.5	54.5
1.0	14.0	57.9
1.5	17.6	40.4

上図のトラクタの作業速度を 0.5 m/s に設定して蛇行した場合、図のように実線で示す水滴の軌跡から求めたラインマーカ跡の位置に対して、丸印で示す作物列センサの計測位置は全体的にほぼ一致していることが判断できる。また、このときの進行距離 20 m 間のセンサの位置計測誤差は RMS で 14.5 mm であった。しかし、進行距離 4 m および 13 m 付近では、23 mm および 26 mm の差異が見られた。この原因は土壌表面に大きい土塊が存在し、センサがその土塊を計測した影響で誤差が大きくなったと考えられる。

つぎに、作業速度を 1.0 m/s に設定した場合は、進行距離 5 m と 16 m の付近で、前述の理由により約 30 mm の差異が見られたが、全体的には水滴の位置から求めた実線で示す実際のラインマーカ跡とセンサが検出した位置は中図のようにほぼ一致していることは明らかである。なお、この作業速度での全体のセンサの位置計測誤差は RMS で 14.0 mm であった。

さらに、作業速度が 1.5 m/s の場合、進行距離 10 m の付近では 40 mm の差異が見られ、誤差の RMS は 17.6 mm となった。このように、ラインマーカ跡は通常連続的に土壌表面に描かれるため、計測精度の RMS の違いは小さくなり、作業速

度の変化によるラインマーカ跡の位置検出特性への影響は少ないと考えられる。

以上のように、作物列センサでラインマーカ跡の位置検出を行った結果、室内実験の結果に比べると計測誤差のRMSは3倍ほど大きくなったが、描かれる土壌表面のV字溝の形状や土塊の状態を考慮すると、播種・移植機のうね合わせの位置を検出するセンサとしてはほぼ実用的な計測精度であると判断できる。

4.3.2.2 作物列の位置計測精度

図4.16は草高120mmの大正金時の作物列について、作業速度を0.5, 1.0, 1.5 m/sの3段階に変化させ、前述のラインマーカ跡の場合と同様に作物列センサによるその作物列の位置計測結果を示し、表4.6はセンサの計測精度を示す。

トラクタの作業速度が0.5 m/sの場合、進行距離5.5 mおよび13 m付近では、26 mmと32 mmの差異が見られたが、全体的には水滴の位置から求めた実線で示す実際の作物列とセンサが検出した丸印で示す個々の作物の計測位置はほぼ一致しており、センサの位置計測誤差のRMSは17.4 mmであった。計測誤差が部分的に大きくなった原因は、本研究の場合、作物の生育位置は土壌表面に株が現れた位置をその水平位置としているが、作物の生育状態によって真上に直線的に生育することはなく、曲がって生育する。一方、作物列センサは上部の作物の葉の位置を計測する原理であるため、作物が曲がって生育した場合、このように誤差が大きくなると考えられる。

表4.6 作物列の検出精度

作業速度[m/s]	RMS[mm]	変動係数 C_v [%]	決定係数 R^2
0.5	17.4	39.9	0.9848
1.0	22.6	42.7	0.9685
1.5	29.6	58.3	0.9773

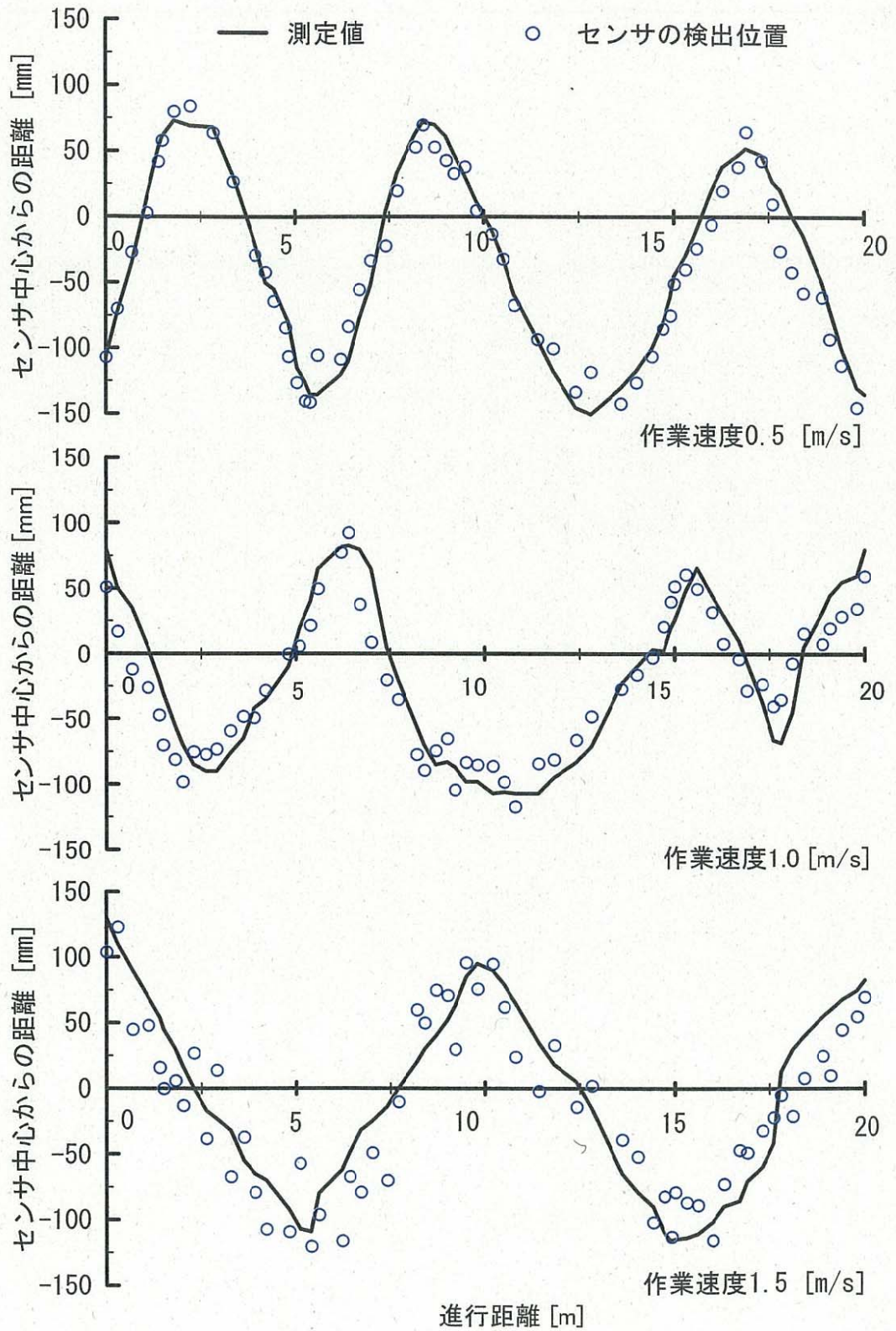


図 4.16 圃場での作物列の計測結果

つぎに、作業速度 1.0 m/s の場合は、進行距離 1 m と 7 m の付近では、センサの計測位置に前述の速度と同様に 39 mm と 40 mm の差異が見られた。しかし、センサの計測誤差は実線の作物列の位置に対して左右にほぼ平均的に変動しており、計測誤差の RMS は 22.6 mm であった。さらに、作業速度 1.5 m/s の条件では、センサの計測誤差の RMS は 29.6 mm となり、作業速度の増加に伴ってセンサの位置計測誤差が若干大きくなる傾向が見られた。しかし、表に示したように実際の作物列の位置とセンサが検出した位置の間には高い直線関係が認められ、両者の決定係数はいずれも 0.968 以上であり、作物列センサは作物列の位置を十分に検出できると判断できる。なお、決定係数とは、回帰直線の当てはまりの良さを示す指標であり、両者の相関係数を 2 乗することで求められる。

以上、圃場実験でのラインマーカ跡および作物列において作物列センサの計測精度を述べたが、両者の誤差を比較すると図 4.17 に示すように、いずれの作業速度においても、ラインマーカ跡の方が作物列の計測結果よりも高い計測精度

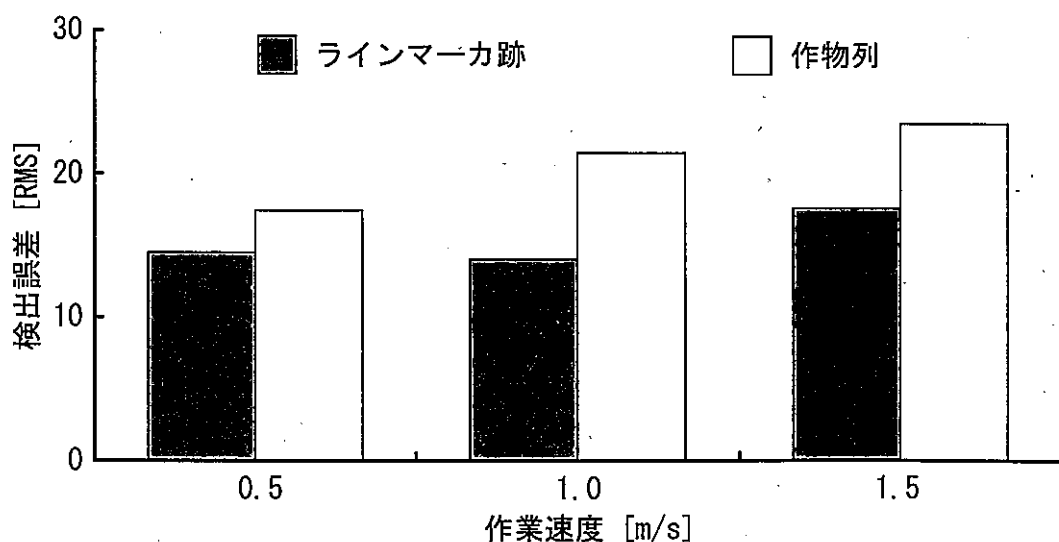


図 4.17 圃場実験での検出精度の比較 (RMS)

を示している。これは、ラインマーカ跡の実験結果でも述べたように、V字溝が連続して土壌表面に描かれることに起因し、このようにトラクタが走行していても、V字溝は進行方向に対して静止状態となり、左右方向のみに水平位置が変化することになるためであると考ええる。

一方、作物列の場合は、作業速度が増加するにつれて、センサの計測誤差は増える傾向を示した。これは、作業速度が速くなると、作物列センサはポリゴンミラーを回転させてトラクタの進行方向に対して断面の方向を走査してその形状を計測することから、進行方向に対する走査間隔が広くなることと、センサの走査軌跡とうね断面方向となす角度（以後、センサの走査角度と称する）が大きくなるために作物列の計測誤差が大きくなったと考えられる。この現象は図4.18に示すように、ポリゴンミラーの回転数を一定にした場合、センサの進行速度が1 m/s から2 m/s に変化すると、図に示すようにセンサが地面を走査する間隔が2倍に広がる。また、作業速度が遅い場合は走査角度が小さくなり、図のように作物が生育している場合、センサは作物の全幅を検出し、その中心位置を作物列の中心として検出する割合が多くなる。しかし、作業速度が増すとセンサの走査角度も大きくなり、作物の中心をレーザ光が通過して正しい中心位置を検出する場合もあるが、図のように作物の両端をレーザ光が走査する割合も多くなる。したがって、2葉の片方の葉の情報のみで作物の中心位置を算出して作物列を求めるため、センサの検出位置は作物列の中心から離れて算出される割合も多くなり、センサの計測誤差のRMSが作業速度の増加に伴って大きくなったものと推察できる。

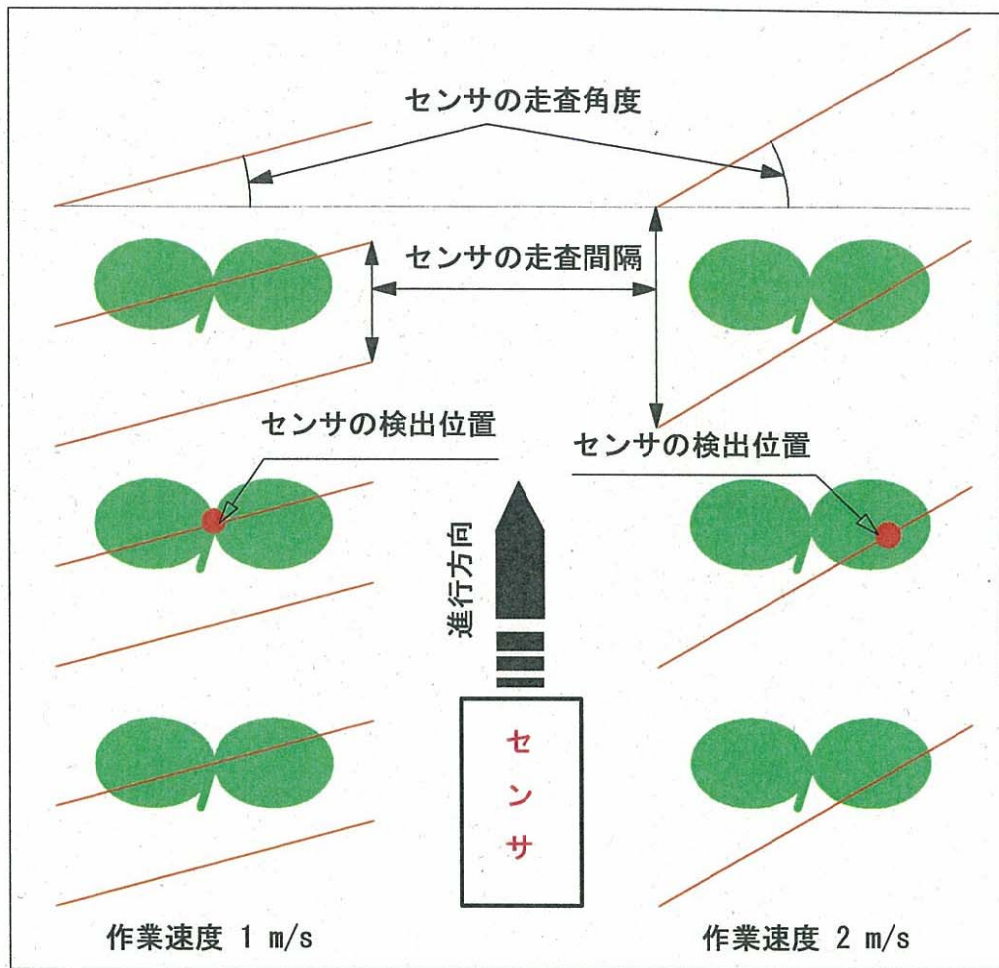


図 4.18 作物列の場合のセンサの計測精度に及ぼす要因

4.4 本章のまとめ

本章では、前章で開発したレーザ式作物列センサの位置計測精度について室内実験と圃場実験を実施して評価した。

- 1) 室内実験において、センサは水平面上に置かれた作物モデルの水平位置をセンサ中心から左右 ± 180 mm の範囲で計測可能であり、V 字モデルと作物モデルを検出した場合の検出誤差 RMS はいずれのセンサの設定高さにおいてもその最大が 5.7 mm 以下であった。

- 2) 圃場実験において、V字溝のラインマーカ跡を計測した実験では、トラクタの作業速度を0.5~1.5 m/sに設定した場合、センサが検出した位置の誤差のRMSは20 mm以下であった。また、作業速度が増加しても誤差のRMSは大きく変化しなかったことから、ラインマーカ跡を検出する場合にはトラクタの作業速度には影響されないと言える。
- 3) 実際の圃場に作付けした大豆の作物列の検出実験の場合は、トラクタの作業速度が増加するにつれて、センサの検出誤差のRMSは17 mmから29 mmに増加したものの、全体的には作物列センサでその作物列の水平位置を計測することは精度的にも十分であり、作物列センサの有効性が圃場実験でも確認できた。

以上のように、本研究で開発したレーザ式作物列センサはトラクタ用作業機のうね自動追従システムのセンサとして十分に利用可能であると結論づけられた。そこで、つぎの第5章ではうね自動追従システムを実現するための油圧制御機構の開発を行う。

第5章 トラクタ用作業機のうね自動追従システムの 油圧制御機構の開発

5.1 緒言

これまで述べたように、実際のトラクタ作業、特に畑作の播種・移植、中耕除草作業では、作業者がうねに作業機を合わせるために、肉体的にも精神的にも重労働が強いられており、その高精度自動化に対する要望も高い。そこで、前章ではトラクタ用作業機のうね自動追従システムの核となるレーザ式作物列センサを開発し、その概要を述べ、その作物列センサが実際の作物列やラインマーカ跡を十分に検出できることを実験的に明らかにした。

うね自動追従システムを開発する次の段階として、トラクタ用作業機を自動制御するための油圧制御機構の開発が必要となる。本章では、その油圧制御機構を開発し、その構成と基本的な制御特性について説明する。

5.2 トラクタ用作業機のうね自動追従システムの概要

本研究で開発するトラクタ用作業機のうね自動追従システムの基本構想は第1章で述べたように、トラクタの3点リンクヒッチと作業機間に新たな油圧スライド装置を開発して装着し、その装置によって作業機側をトラクタの進行方向に対して左右に動作させるものである。図5.1に供試トラクタとうね自動追従システムの様子を示す。うね自動追従システムは主に油圧制御機構、レーザ式作物列センサおよび計測制御用コンピュータで構成される。油圧制御機構はコンピュータの指令制御電圧によって作業機をトラクタの進行方向に対して左右に制御する。また、作物列センサはうねの位置情報や作物列の情報を計測し、入出力ボードを介してコンピュータに入力する。制御方式は、コンピュー

ソフトウェアによって算出される位置情報を基に対応する制御電圧を出力する後述のPID (Proportional Integral Derivative) 制御⁶⁵⁾⁶⁶⁾⁶⁸⁾の比例要素の部分を採用した。コンピュータから出力される制御電圧は油圧の電磁弁のスプールの開閉操作を行い、油圧の切換方向と油圧流量を制御し、トラクタ用作業機を高速かつ滑らかにうねに追従させることができる。



図 5.1 供試トラクタとうね自動追従システムの外観

5.2.1 油圧制御機構の概要

開発する油圧制御機構は、主に油圧スライド装置、油圧ポンプ、電磁弁で構成される。以下にそれぞれの機器について述べる。

5.2.1.1 油圧スライド装置

油圧スライド装置は図 5.2 に示すように、固定フレーム、移動フレーム、油圧シリンダで構成され、トラクタのローリンクと作業機のローリンクヒッチの間に取り付けられる。トラクタのローリンクを触れ止めで固定することで、固定フレームはトラクタ本体に固定されるため、油圧シリンダを左右に作動させることにより、そのロッドに取り付けられている移動フレームが固定フレーム上でトラクタ本体と独立した状態で左右に制御できる。これによって、移動フレームのローリンクに取り付けられている作業機をトラクタの進行方向に対して左右に移動させることができる。また、シリンダの制御にはコンピュータから電気信号を電磁弁に出力し、その制御電圧の正負によって油圧シリンダに流れ込む作動油の方向を制御する方式を採用した。

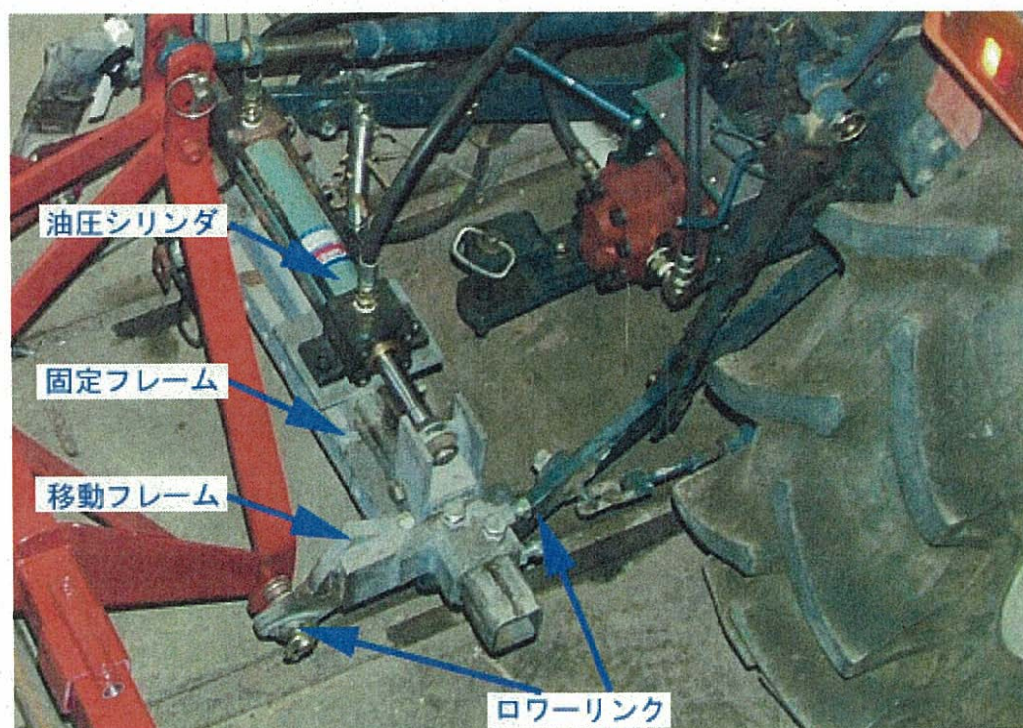


図 5.2 油圧スライド装置の概要

5.2.1.2 油圧シリンダ

本研究で供試した油圧シリンダ（油研工業，CJT140）は市販されているものであり，その主要諸元を表 5.1 に示す。最大ストロークは 200 mm の両ロッド型油圧シリンダであり，最高制御速度は 400 mm/s である。第 2 章で述べた播種・移植，中耕除草作業を行う場合，うね合わせ作業に要求される最大のトラクタ用作業機の左右の制御速度は，トラクタの作業速度が 2 m/s の場合 100 mm/s であるため，この油圧シリンダは十分対応できると考える。

表 5.1 シリンダの仕様

形 式	油研工業株式会社CJT140-LA50B200B-ABD-EKN-2
シリンダ内径	50 mm
ロッド径	18 mm
呼び圧力	14 MPa
最大ストローク	200 mm
使用速度	最高400 mm/s, 最低8 mm/s
出 力	9.43 kN
流量 (速度10 mm/s)	0.8 L/min

5.2.1.3 油圧ポンプ

トラクタ用作業機を作物列に追従させるための油圧シリンダの油圧源として，室内実験では，油圧発生ユニット（油研工業，YA-16-B）を利用し，その詳細を表 5.2 に示す。圃場実験では，携帯の不便さや圃場に電源がないことなどの理由で油圧発生ユニットを利用することが困難であり，また今後の圃場作業を考慮して油圧発生ユニットと同等の油圧発生能力を持つギヤポンプ（三星，GPF3N-44-L）を供試した。その詳細を表 5.3 に示す。また，ギヤポンプを駆動するために，トラクタの PTO 軸に図 5.3 に示す自作の変速機を取り付けた。この変速機は供試油圧ポンプの常用回転数がトラクタ PTO 軸の回転数よりも高いことから，PTO 軸回転数を 2.5 倍に増速するように設計して供試した。

表 5.2 油圧発生ユニットの仕様

形 式	油研工業株式会社 YA-16-B-4-1.5-41
押しのけ容積	15.8 cc/rev
最高使用圧力	7.0 MPa
圧力調整範囲	1.2~7 MPa
タンク容量	40 L
電動機出力	1.5 kW×4P
電源電圧	AC 200 V

表 5.3 油圧ポンプの仕様

形 式	MITSUBOSHI GPF3N-44-L
押しのけ容積	44 cc/rev
定格圧力	6.8 MPa
回転数	500~2300 rpm

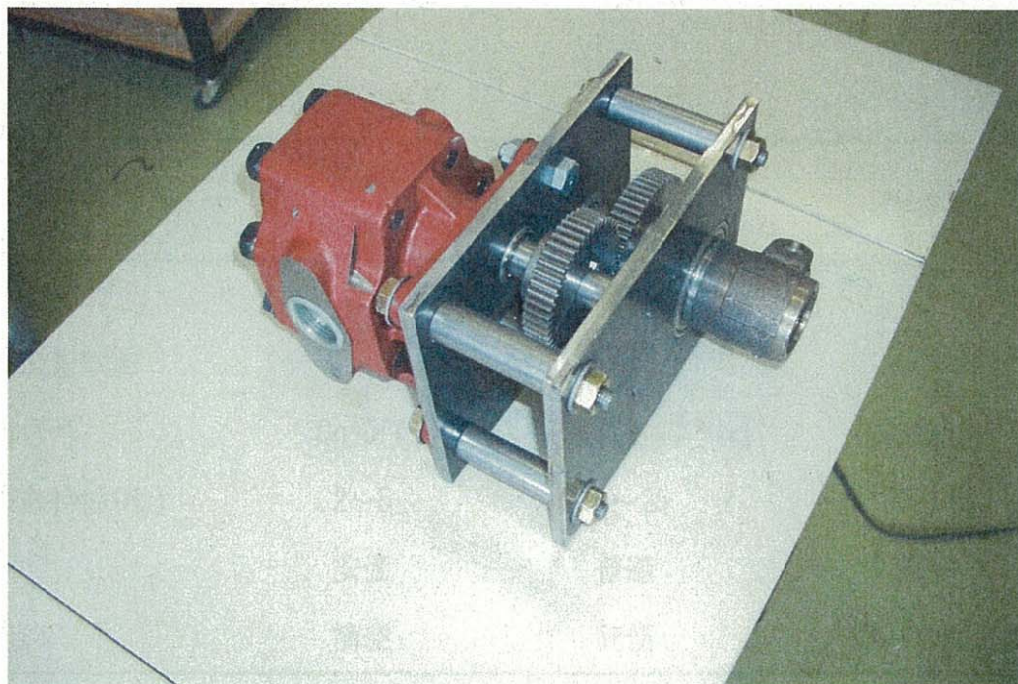


図 5.3 油圧ポンプと PTO 軸変速機

5.2.1.4 電磁弁

作物列センサで作物の水平位置を検出してコンピュータによって油圧制御機構を自動制御する際、電磁式制御弁が必要であり、その電磁式制御弁の選定を行った。なお、電磁弁とは、電氣的駆動弁の一種であり、電磁石（ソレノイド）の磁力を用いてプランジャと呼ばれる鉄製のスプールを動かすことで弁の開閉を行い、流体を通す管での流れの開閉制御に用いられる。

一般に、油圧制御弁は表 5.4 に示すように 3 種類に大別される。いずれも作動油の流動方向の制御は可能であるが、通常の方法制御弁はその制御信号にオンオフ信号を利用し、電磁弁から出力される作動油の流量は制御できないことからアクチュエータの速度制御には不向きである。また、その切換頻度は低く、毎秒約 2~5 回である。これに対して電磁比例方向流量制御弁とサーボ弁は方向制御だけではなく流量も制御でき、しかも高速制御できることから有効である。しかし、サーボ弁は高価であり、しかも取扱いが難しいことから、本研究では電磁比例方向流量制御弁（以後、単に電磁弁と称する）を利用した。

表 5.4 油圧制御弁の特徴

	方向 制御弁	電磁比例方向流 量制御弁	サーボ弁
方向制御	○	○	○
速度流量制御	×	○	○
制御信号	On-Off	電流制御	電流制御
周波数特性[Hz]	2~5	10~25	100~450
価格	安価	普通	高価
取扱い	簡便	簡便	ノウハウが必要

供試した電磁弁（不二越，ESD-G01）は従来の4方向電磁弁に直流比例ソレノイドを採用することにより，方向切換と速度制御の両機能を兼ねた電磁比例弁であり，左右の直流比例ソレノイドに入力する電流によって油圧の方向切換と流量が制御でき，その切換頻度は毎秒25回である。一般に，コンピュータから出力された制御電圧で直接電磁弁を駆動するにはパワーが不足するので，それをあるレベルまでパワー増幅することが必要である。そのため，小形パワー増幅器（不二越，EBA-PD1）を利用した。その特性としては，小さな偏差信号にも応答するように高い増幅率を有し，制御部のソレノイドを駆動するのに十分な出力が得られる。また，パワー増幅器の零点調整で使用する圧力，流量の下限を設定することができ，ゲインの調整で入力信号電圧と出力電流の比率を調整できることから，制御の安定度，応答性などを容易に調節できる。なお，供試した電磁弁と小形パワー増幅器を図5.4に示し，それらの仕様を表5.5に示す。

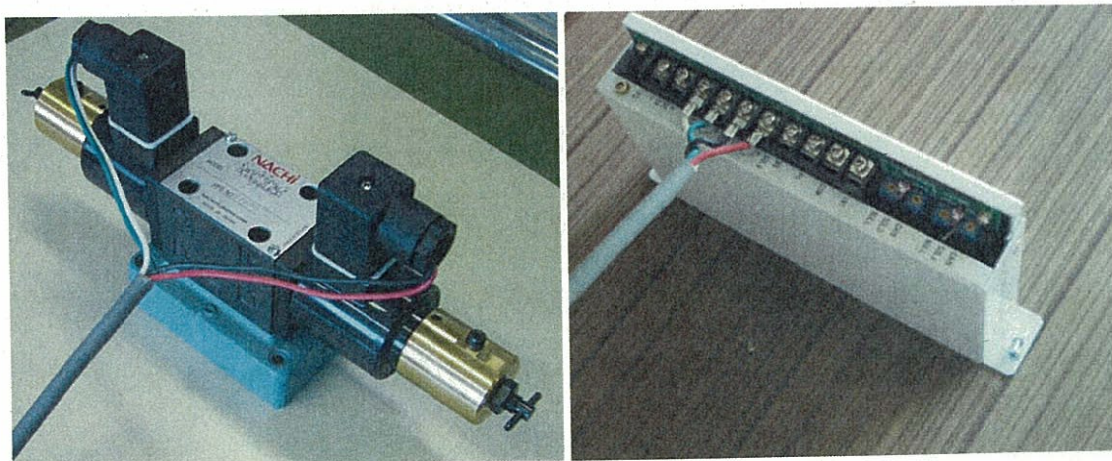


図5.4 供試した電磁弁（左）と小形パワー増幅器（右）

表 5.5 供試した電磁弁と小形パワー増幅器の仕様

電磁弁		小型パワー増幅器	
型 式	ESD-G01 -C520-12	型 式	EBA-PD1-NW (Z) -D2-10
最高使用圧力	25 MPa	駆動ソレノイド	S0La, S0Lb
定格流量	20 L/min	最大出力電流	900 mA
最大流量	25 L/min	入力電圧	-10~+10V DC
定格電流	850 mA	零点調整 (NULL)	0~900 mA
コイル抵抗	20 Ω (20 $^{\circ}$ C)	ゲイン調整 (GAIN)	(0~900 mA)/5 V 入力
ヒステリシス	5%以下	許容周囲温度	0~50 $^{\circ}$ C
応答時間	0.04 s	駆動対象弁	方向流量制御弁
質 量	2.2 kg	質 量	0.6 kg

5.2.2 油圧制御機構の制御特性

開発した自動追従システムのための油圧制御機構の動作特性は、供試する電磁弁の流量や応答性などによって変化する。特に、本研究で供試した電磁弁は前節で述べたように、作動油の方向と流量を同時に制御できる。その関係は図 5.5 に示すように、入力電流が 400 mA 以上にならないと、作動油の流量はゼロとなり、また入力電流が 800 mA 以上になると流量が最大に達し、油圧シリンダの移動速度は頭打ちとなる。油圧シリンダの移動速度を 100 mm/s で移動させる場合、青い矢印線に示すように、電磁弁に出力する電流は約 600 mA である。この電流を発生させるための電圧はパワー増幅器のゲインの調整によって変化するが、実線に示すようなゲインに設定した場合、制御電圧は 4.2 V になる。この関係を求めるため、制御電圧と油圧シリンダの移動速度の関係を求めるための予備実験を行った。

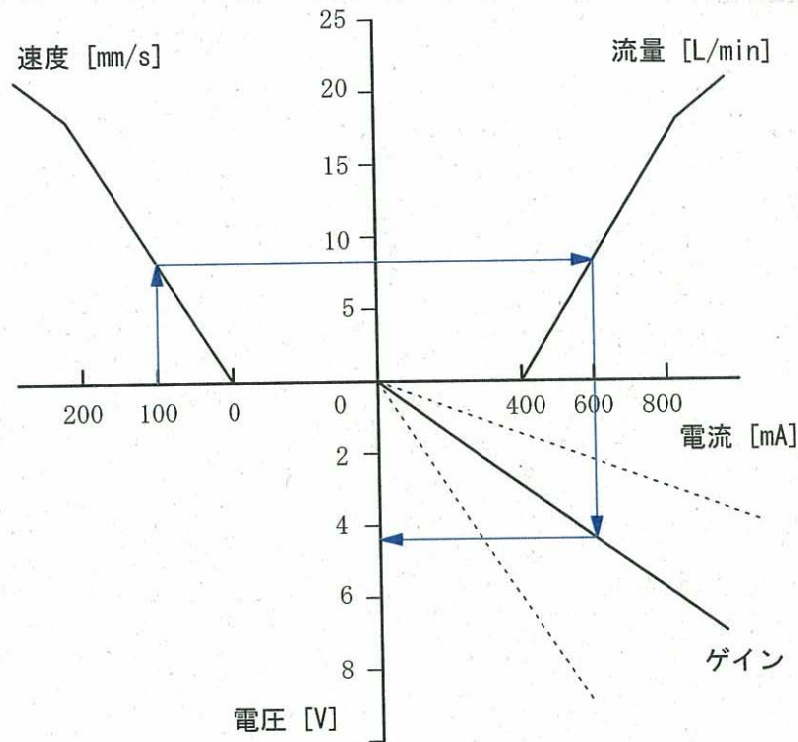


図 5.5 制御電圧と電磁弁の流量特性

5.2.2.1 制御電圧による油圧シリンダの移動速度の測定方法

電磁弁の流量特性の測定方法は、図 5.6 に示すようにコンピュータから、±10 V の範囲で 1 V ごとに制御電圧を出力し、小型パワー増幅器を介して、油圧シ

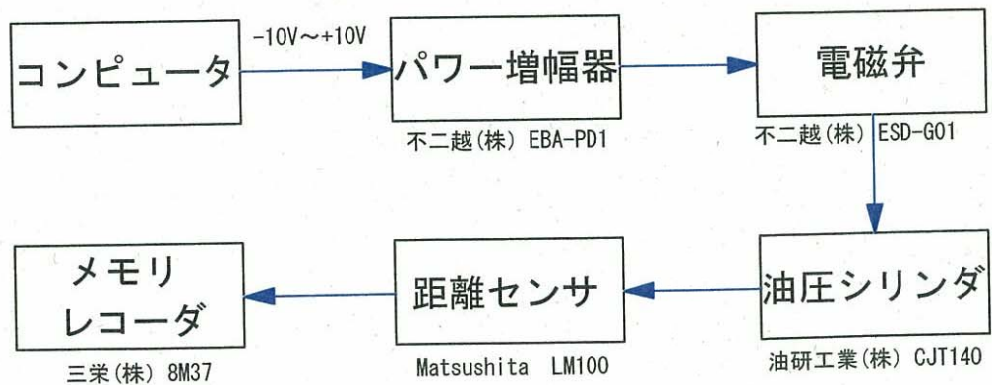


図 5.6 制御電圧と油圧シリンダの移動速度の測定方法

リンダを無負荷状態で動作させる。また、油圧シリンダの移動距離はレーザ距離センサで計測し、メモリレコーダで記録して求めた。

5.2.2.2 電磁弁の制御電圧と油圧シリンダの動作特性の結果

図5.7は電磁弁へ入力した制御電圧と油圧シリンダの移動速度の関係を示す。制御電圧が正の場合は、油圧シリンダのロッドは右に動き、負の場合は左に動作していることを示す。全体的に見ると、制御電圧の正負によって油圧シリンダの動作する方向が変化するが、 ± 1 V以内に電磁弁が動作しないオフセットが存在する。また、制御電圧が ± 8 Vを超えると、制御電圧がそれ以上高くなっても、油圧シリンダの移動速度が比例的に増加しない特性を示した。しかし、制御電圧を $\pm 1 \sim \pm 8$ Vに設定した場合、油圧シリンダの制御速度がほぼ直線的に増加する特性を示すことが明らかになり、線形制御が可能になる。

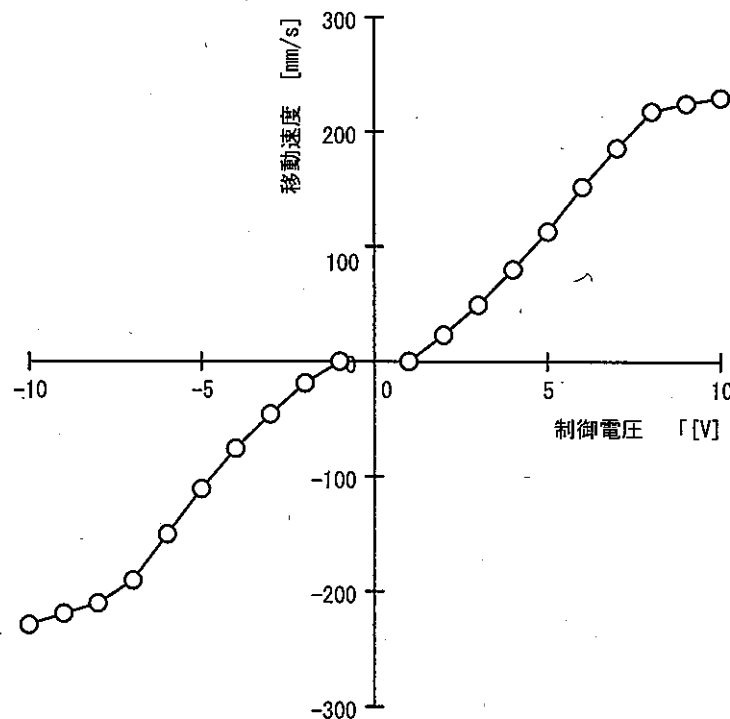


図5.7 制御電圧と油圧シリンダの移動速度

また、図 5.8 は、図 5.7 を基に 5.1) 式により電磁弁の流量特性を求めたものである。制御電圧が ±8 V 以上になると流量は 18 L/min 程度で頭打ちになり、電磁弁の仕様書とほぼ同じ特性を示し、この制御機器構成で本油圧制御機構は問題なく作動していることが確認できた。

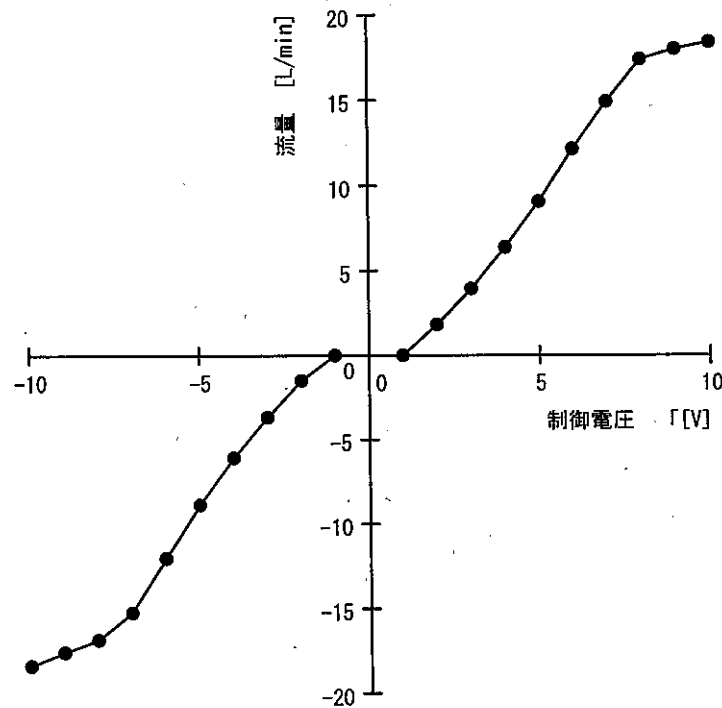


図 5.8 電磁弁の流量特性

$$\text{油圧流量[L/min]} = \frac{\text{シリンダ断面積[cm}^2] \times \text{流速[mm/s]}}{600} \quad 5.1)$$

5.2.3 指令出力装置の概要

5.2.3.1 制御用コンピュータとインターフェースボード

指令出力装置の全景を図 5.9 に示す。これは、制御用コンピュータとデジタル入出力インターフェースボードおよび D/A 変換ボードで構成される。制御用

コンピュータは第3章で述べた計測用コンピュータと同様であり、作物列センサによって制御目標の位置情報を取得して制御量を決定し、制御電圧を出力するものである。また、D/A変換ボード（CONTEC, DA12-16）は電磁弁を駆動する小形パワー増幅器にアナログ信号を出力する装置である。前述のように、トラクタ用作業機を自動制御する際、電磁弁を利用したが、本研究で供試した電磁弁は、コンピュータからのデジタル信号で直接制御できないため、D/A変換ボードを介してデジタル信号をアナログ信号に変換し、制御電圧を出力した。その詳細を表5.6に示す。なお、図に示される電光表示ボードは作物列センサが検出している作物列の位置を視覚的にモニタできるようにしたものである。作物列センサが計測した作物列の水平位置がセンサ中心から±10 mm（後述の不感帯が10 mmの場合）以内であれば、ボードの中央にある緑のLEDが点灯し、それ以上の場合には、その水平位置に応じたLEDが点灯するようにした。

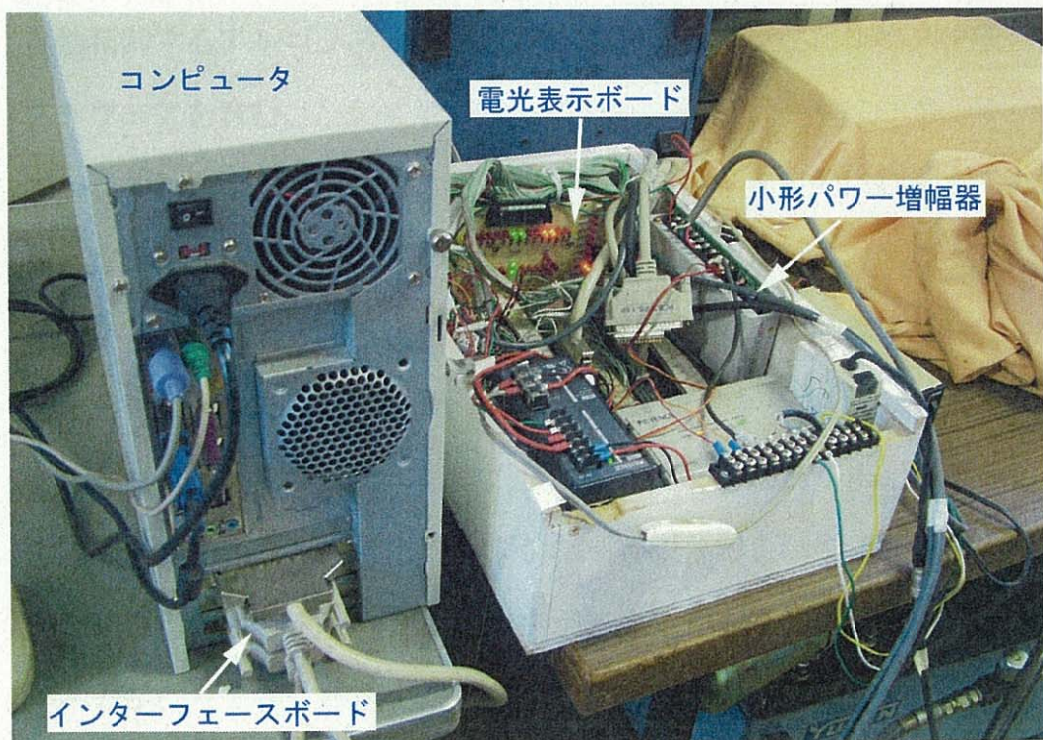


図5.9 制御用コンピュータとインターフェースボードの外観

表 5.6 アナログ出力ボードの主要諸元

形式	CONTEC DA12-16 (PCI)
出力形式	シングルエンド出力 16 チャンネル
出力レンジ	非絶縁ユニポーラ 0~+10 V
アナログ入力抵抗	1 M Ω 以上
変換速度	最大 10 μ sec/ch
非直線性誤差	± 3 LSB
消費電流	DC5V 1400 mA (最大)
外部回路電源	DC12~24 V ($\pm 15\%$) (1点あたり 4 mA/12 V~8 mA/24 V)
使用条件	温度 0~50 $^{\circ}$ C 湿度 20~90% (ただし, 結露しないこと)

5.2.3.2 制御用ソフトウェア

制御用ソフトウェアは、作物列センサで計測した作物列の位置情報に基づいて油圧制御機構に取り付けられている作業機をトラクタの進行方向に対して左右に自動制御するアルゴリズムで構成され、第3章で述べた作物列位置の計測用ソフトウェアを含む。

まず、この制御プログラムは、トラクタ用作業機を安定的に制御するために不感帯と移動平均法を採用している。不感帯とは、設定値に対して上下に許容する範囲を与えることであり、制御誤差がその範囲内では制御信号を出力しないことを意味し、本研究ではその不感帯の幅を変更できるようにした。一般に、制御を行う場合、制御目標との制御誤差はゼロであることが求められる。しかし、本追従システムでは、ほんのわずかな制御誤差でも制御信号を出力すると制御が頻繁に行われ、トラクタ用作業機が過度に左右に移動して振動が生じ、制御が不安定になる。そこで、不感帯を設け、わずかの制御誤差では制御せず、ある程度制御目標から離れた時点で制御信号を出力することで、制御の安定性を向上させた。

また、作物列センサはトラクタの走行に伴って作物列の株ごとの位置情報を順次計測するが、移動平均法はその個々の位置情報を順次 n 個分加算して平均値を求める方法である。この方法を本研究の追従システムに採用することによって、急激な株の左右の変動があっても、作物列計測のデータが平滑化されて安定的な制御が得られると考えられた。

追従システムの滑らかで迅速な制御を得るために、PID 制御の比例要素の部分を採用した。PID 制御は、フィードバック制御の一種であり、入力値の制御を出力値と目標値との偏差を取り、その積分および微分の 3 つの要素によって制御を行う方法である⁶⁶⁾。その中の比例要素によって、作物列センサが計測したセンサ中心から作物列までの水平距離に応じて制御電圧を変化させて出力するものであり、その偏差すなわち制御誤差が大きいほど油圧シリンダの制御速度を速くして制御目標に迅速に制御させるものである。

つぎに、本研究で開発した制御ソフトウェアのアルゴリズムについて説明する。図 5.10 は開発したうね追従制御アルゴリズムのフローチャートを示す。図のように、作物列センサが計測したセンサ中心から作物列までの水平距離が予め設定した不感帯以上になった場合、制御電圧の正負と大きさを決定し、電磁弁にその制御電圧を出力する。それによって、トラクタ用作業機は油圧制御装置によってトラクタの進行方向に対して左右に移動し、制御目標の作物列に追従するように制御される。

このように、作物列センサが計測した制御誤差が不感帯以上であればその誤差に応じた制御電圧が油圧制御装置の電磁弁に出力され、その正負によって方向を制御し、電流の大きさによって制御速度を決定する。本研究では、これら一連の制御方法でトラクタ用作業機をうねに自動追従制御できるようにし、次章の第 6 章では室内実験および圃場実験でその制御特性を評価する。

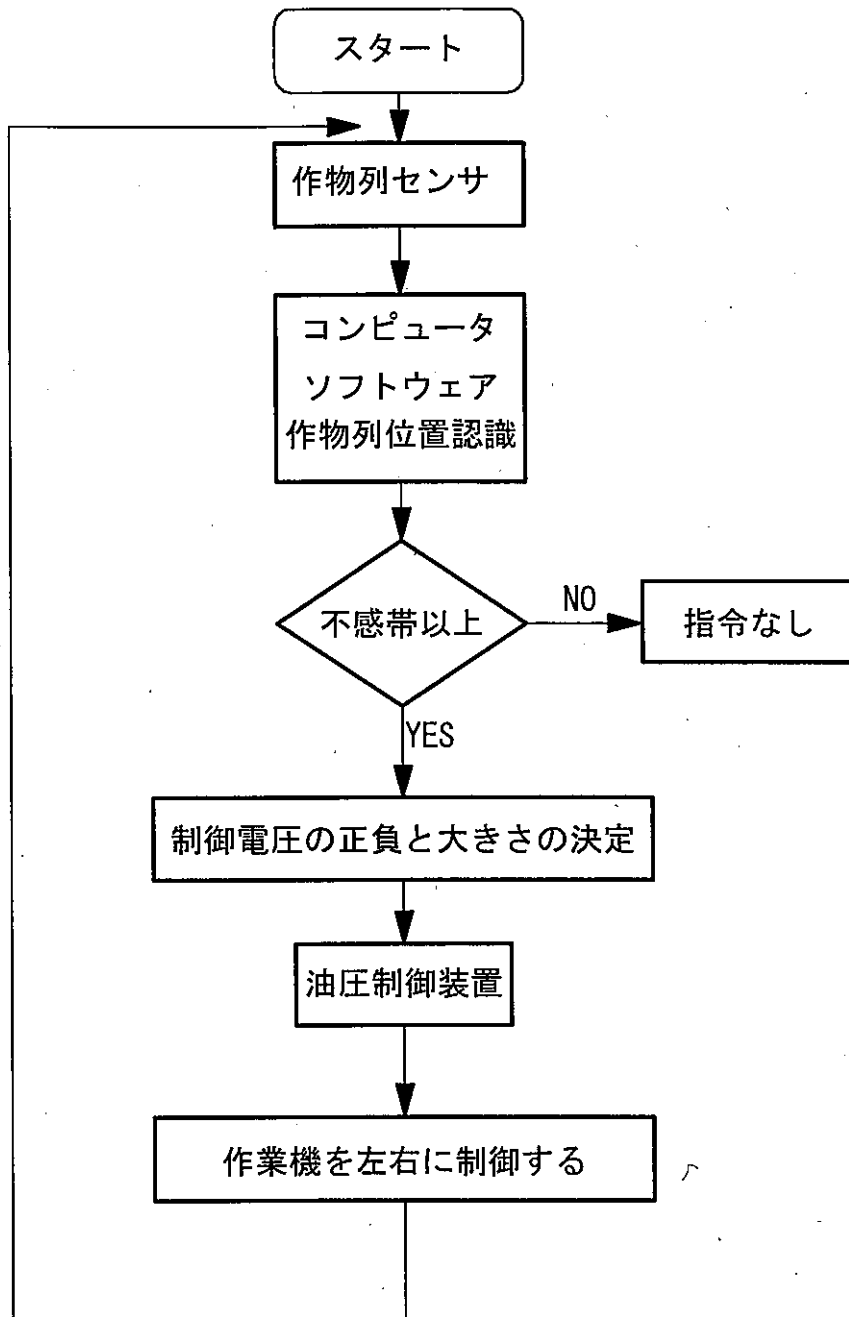


図 5.10 制御のアルゴリズムのフローチャート

5.3 本章のまとめ

本章では開発したトラクタ用作業機のうね自動追従システムの油圧制御機構の概要とその基本的な油圧装置の制御特性について述べた。本研究の油圧制御機構は主に油圧スライド装置、油圧ポンプ、電磁弁、計測制御用コンピュータおよび制御ソフトウェアで構成される。

- 1) 油圧スライド装置はトラクタのローリンクと作業機のローリンクヒッチの間に取り付けられ、油圧シリンダによって作業機を左右に移動させるものである。
- 2) 油圧制御機構の制御特性は制御電圧の正負によって、動作方向を制御し、電流の大きさによって制御速度を変えることができる。なお、制御電圧を $\pm 1 \sim \pm 8$ Vの範囲に設定すると、制御電圧と油圧シリンダの移動速度は正比例関係となり、線形制御が可能となった。
- 3) 本研究で開発した制御ソフトウェアは、トラクタ用作業機のうね追従制御を滑らかにかつ迅速に行うためにPID制御の比例要素の部分の基本とし、さらに制御の安定性を向上させるために不感帯処理法や移動平均法などを採用した。

第6章 うね自動追従システムの制御精度の評価

6.1 緒言

前章までにトラクタ用作業機のうね自動追従システムを構成するレーザ式作物列センサと油圧制御機構および計測制御ソフトウェアの概要について述べた。本章では、室内実験と圃場実験を行い、開発したうね自動追従システムの制御特性と制御精度を明らかにすることを目的とした。

室内実験では、うね自動追従システムの基本的な制御特性を明らかにするためにステップ応答特性と周波数応答特性試験を行う。また圃場実験では、実際にトラクタの3点リンクヒッチに作業機モデルを装着し、それに開発した作物列センサを取付け、制御目標のラインマーカ跡と作物列について追従システムの制御精度を評価する。

6.2 実験装置および方法

6.2.1 実験装置

図 6.1 は室内および圃場実験で供試したトラクタ（クボタ，ZL1-33）と作業機モデルおよび搭載したコンピュータと追従システムの様子を示す。図のように、油圧スライド装置をトラクタの3点リンクヒッチのロワーリンクに取り付け、作物列センサを自作の作業機モデルのフレームに設置した。センサの位置は、ラインマーカ跡を計測する場合は作業機モデルのフレーム中心とし、作物列を計測する場合はそのフレームの中心から 300 mm（うね間 600 mm の場合）左側に取り付け、センサが作物の真上を通過するように取付けた。また、圃場実験ではコンピュータや各種センサ、制御機器の電源として交流 100 V-900 W の発電機（ヤマハ，EF900iS）を用いたが、実際のトラクタ作業では DC12 V 用のインバータを利用することも可能である。

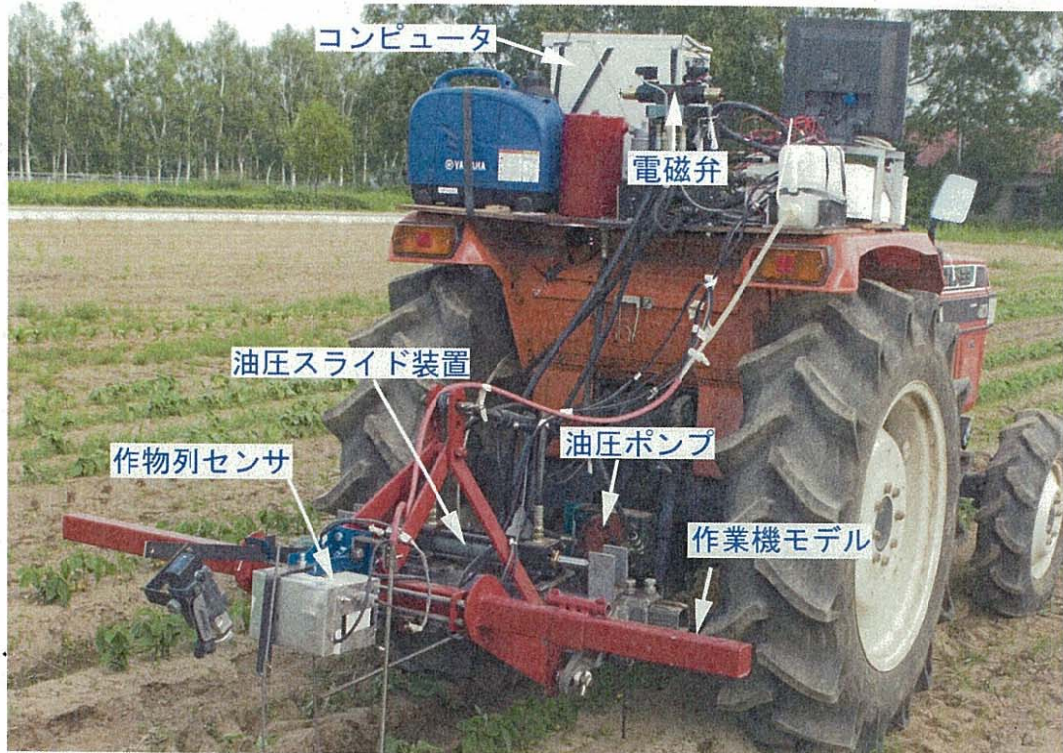


図 6.1 供試トラクタとうね自動追従システムの様子

6.2.2 実験方法

6.2.2.1 室内実験方法

室内実験では、開発したうね自動追従システムのステップ応答と周波数応答特性について実験を行った。

ステップ応答特性とは、制御目標を瞬時に動かし、この目標に追従し、整定するまでの所要時間を評価するものである。本システムの制御プログラムは、前章で述べたように、作物列センサが出力するミラーごとの位置計測データを移動平均で平滑化処理し、制御を安定させるために設けた不感帯を変えることによって制御特性が変化する。そこで、計測データの移動平均を 1, 3, 5 個の 3 段階に設定し、不感帯を 10, 15, 20, 25 mm の 4 段階に設定して形状が明確な V 字モデルを供試してステップ応答試験を行った。追従システムにステップ変化を与える方法は図 6.2 に示すように、まず a の V 字モデルをセンサの真下

に設置し、その上にスライド板をかぶせ、A 窓でセンサからのレーザビームが a の V 字モデルを計測できる状態にしてシステムを安定させる。つぎに、スライド板を瞬時に矢印の方向に移動させ、a の V 字モデルを覆い隠すと同時に B 窓で b の V 字モデルを現れるようにして瞬時的なステップ変化を与えた。このときのステップ距離は 60, 100, 140 mm の 3 段階に変化させ、実験を行った。

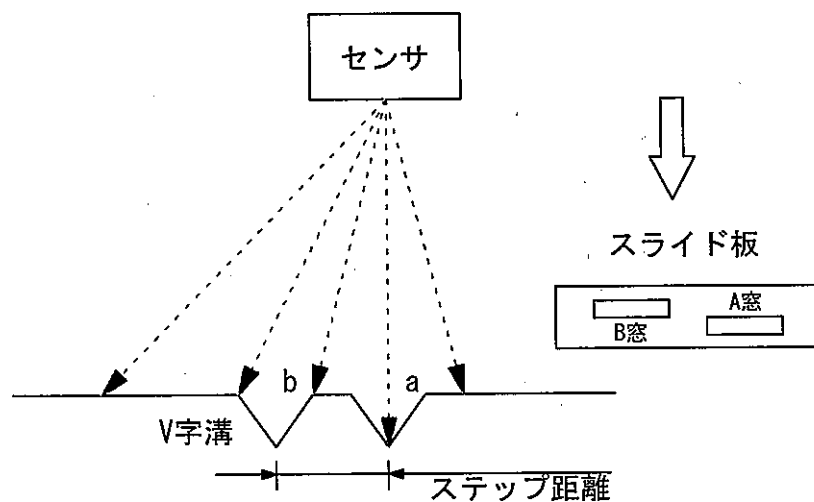


図 6.2 ステップ応答性の測定方法

なお、追従システムの追従軌跡はレーザ距離センサ（松下電工，LM100）で計測し、メモリレコーダ（日本電気三栄，8M37）で記録して求めた。

周波数応答特性は圃場で作物列がトラクタの進行方向に対して左右に蛇行している状態を想定したものである。実験は図 6.3 に示すように第 4 章で利用した圃場模擬走行試験装置の上に厚紙で作製した V 字モデルを設置し、クランク機構によって、左右の全振幅を 150 mm，周波数を 0.025～0.33 Hz の範囲で 11 段階に変化させて V 字モデルの左右の動きに対して油圧スライド装置によって作業機モデル全体を追従させた。表 6.1 は周波数応答試験の設定実験パターンを示すが、合計 22 回の実験を行った。なお、制御目標の V 字モデルの左右の

移動軌跡と作業機モデルの追従軌跡はレーザ距離センサで計測し、A/D変換カードを介してその距離データをノート型パソコンに取り込み、両者の関係から周波数応答特性を評価した。

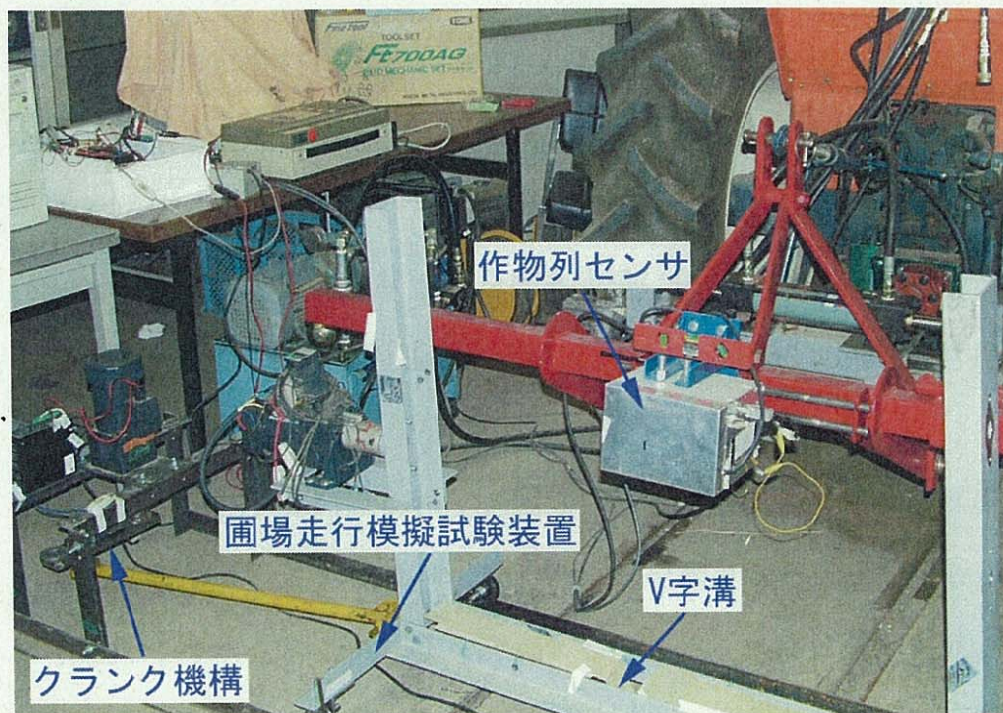


図 6.3 周波数応答特性の実験風景

表 6.1 周波数の設定パターン

不感帯 [mm]	回転速度 [rpm]	周波数 [Hz]
±10 ±20	1.50	0.025
	2.00	0.033
	2.40	0.040
	3.00	0.050
	3.80	0.060
	5.00	0.080
	6.00	0.100
	10.0	0.170
	12.0	0.200
	15.0	0.250
	20.0	0.330

6.2.2.2 圃場実験方法

圃場実験では、播種・移植作業と中耕除草作業を想定したうね自動追従システムのうね合わせの制御精度について評価した。

制御目標は、播種・移植作業の場合では往復作業時に土壌表面に描かれるラインマーカ跡がうね合わせの水平位置となり、中耕除草作業では作物列がうね合わせの目標位置となる。そこで、本学の精密実験圃場において、前者のラインマーカ跡の場合は、ロータリハローで碎土整地後、土壌表面に第4章と同様に幅60 mm、深さ70 mmのV字溝を描き実験に供試し、また後者の作物列の場合は大豆を栽培し、草高約60mm、葉の幅約100 mmの状態のときに実験を実施した。

うね自動追従システムの制御精度を圃場で評価する場合、トラクタ走行の軌跡と作業機の位置すなわち作物列センサの軌跡を測定する必要がある。第4章では、作物センサの位置計測精度を評価する際、水を地面に滴下させ、トラクタの前部に取り付けた作物列センサの通過軌跡を測定した。今回の実験でも、同様の方法で予備実験を行ったが、自動追従システムの制御動作によって作業機モデルが頻繁に左右に動き、落下する水滴が乱れて正確に作業機モデルに取り付けたセンサの通過軌跡を求めることができなかった。そこで、図6.4に示すように、トラクタ側にその中心位置を示すマーカと作業機モデル側に取り付けた作物列センサの中心位置を示すマーカをそれぞれ取り付け、そのマーカを制御目標のラインマーカ跡や作物の直上まで下ろし、ビデオカメラでその位置関係を撮影した。まず、ビデオ動画をパソコンに取り込み、進行距離0.2 m間隔⁶⁷⁾に静止画を取得し、コンピュータディスプレイ上で定規ツールを利用してそれぞれのマーカや制御目標の位置を測定した。つぎに、その位置関係からトラクタの進行方向に対するトラクタ中心の水平位置と作物列センサすなわち作業機モデルの追従軌跡を求めた。作業機モデルに取り付けたセンサの設定高さ

は土壌表面から 400 mm であり，トラクタの作業速度は 0.5, 1.0, 1.5 m/s の 3 条件で行い，制御目標の作物列やラインマーカ跡に沿って約 20 m 走行させた。

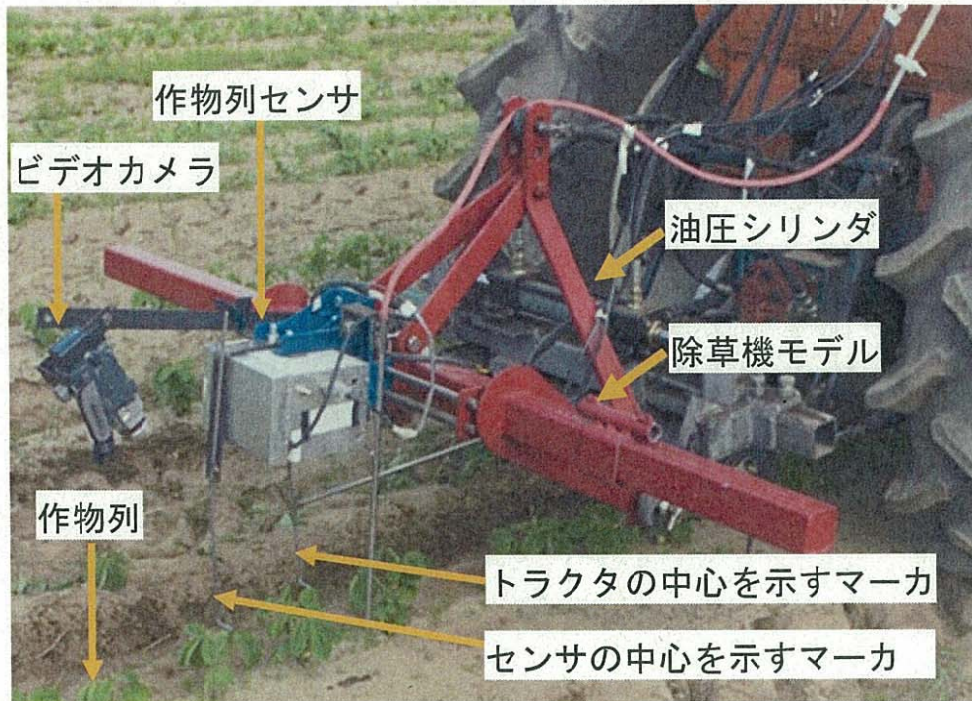


図 6.4 圃場での追従システムの制御特性の測定方法

6.3 実験結果および考察

6.3.1 室内実験での制御結果の評価

6.3.1.1 追従システムのステップ応答特性

うね自動追従システムのステップ応答特性を求める前に，制御システムの応答性や安定性に影響を及ぼす不感帯と移動平均個数を任意に変化させてその制御特性を検討した。図 6.5 は計測データの移動平均個数と制御目標との不感帯とステップ応答時の関係を示す。x 軸の「1 の 10」や「5 の 10」の項目名の前の数値の 1 や 5 は移動平均個数を表し，後ろの 10 が設定した不感帯を表す。y

軸はステップ応答の質を評価するむだ時間や整定時間および制御誤差を示す。いずれも小さい数値であれば、応答性が速く、かつ制御の安定性が高いことを意味する。

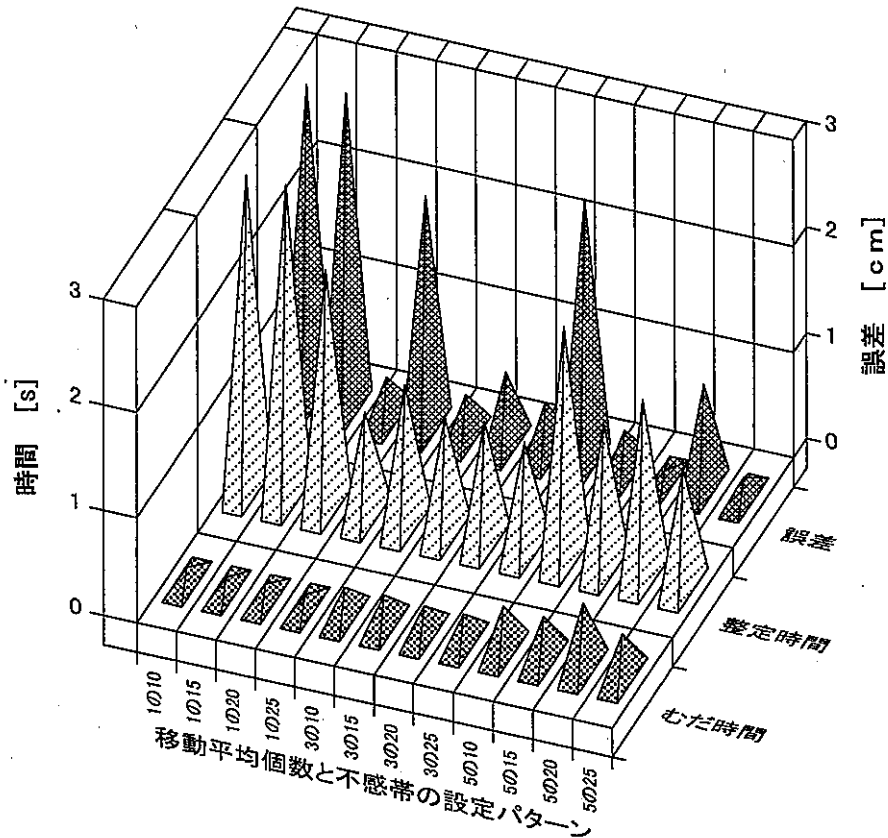


図 6.5 移動平均個数と不感帯の違いによるとステップ応答特性

全体的に見ると、移動平均個数を 3 個にした場合、整定時間や誤差が少なくなることから、制御上設定したパラメータが適当であると思われ、その中で、特に移動平均個数が 3 個で、かつ不感帯が 10 mm の条件が最もステップ応答の制御特性が向上することを確認した。そこで、これ以降の追従制御の実験では、この移動平均個数と不感帯を基本として実験を行った。なお、むだ時間とは制御電圧が出力されてから制御対象が動作し始まるまでの時間であり、また整定時間は制御対象が動作し、その制御目標に達し、再び制御対象が静止するまでの時間で表す。さらに、誤差は制御目標が静止したときの制御目標との偏差を

意味する。

図 6.6 はステップ応答試験のシステムの追従軌跡の結果を示す。作物列センサは瞬間的にステップ状に変化した V 字モデルの制御目標の位置を検出し、コンピュータが電磁弁に制御信号を出力するまでに 0.22 s を要したことを示している。その後、電磁弁の作動によって油圧シリンダが動作し、ロッドが動くまでに 0.07 s を要した。制御信号の出力が遅れた理由は、本研究で開発した作物列センサは 6 面体ポリゴンミラーを 140 rpm で回転させて位置計測を行うことから 1 枚のミラーの走査時間が 0.07 s となり、その時間間隔で一個の作物列の位置データが取得される。そこで、今回供試作成した制御プログラムでは、制御の安定性を図るため、前述のように求められた作物列の個々の位置を順次 3 個加算して平均値を連続的に求める移動平均法を採用していることから、瞬間的に計測位置が変化しても、そのデータを平滑化処理するために、このような時間遅れが生じることに起因する。

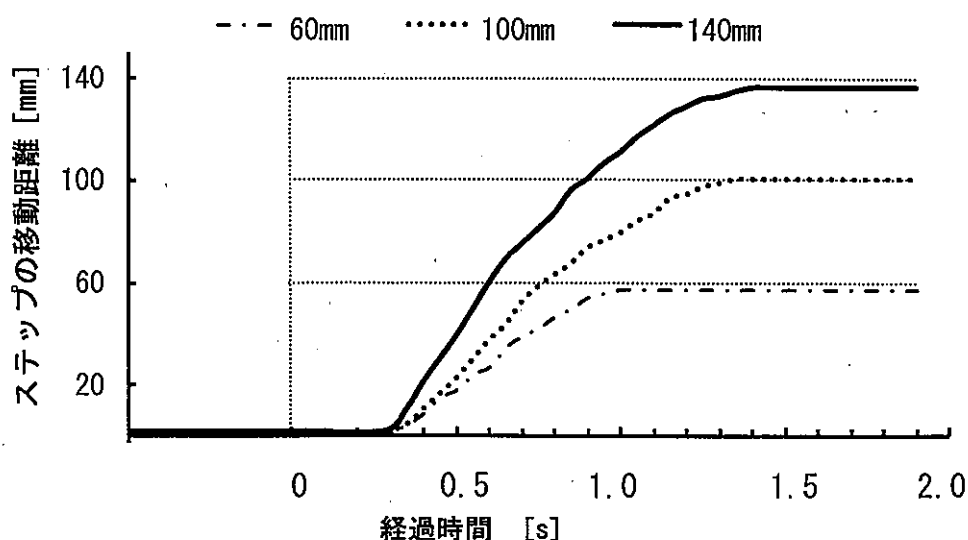


図 6.6 ステップ応答の移動距離と追従軌跡の関係

また、油圧シリンダのロッドが動作するまでの所要時間が 0.07 s であった理由は、油圧配管の伸び縮みの他、電磁弁のスプールの移動に要する時間が主な原因と考えられる。

つぎに、図のように追従軌跡の勾配はステップ距離が大きいほど大きくなり、追従速度が速くなることを意味する。これは、本システムの場合、PID 制御の比例要素の部分を採用し、制御対象が制御目標との偏差すなわち制御誤差が大きいほど電磁弁に出力する制御電圧を高くし、油圧シリンダの移動速度を高めようとしたためである。なお、その詳細を表 6.2 に示す。

表 6.2 ステップ距離とシリンダ移動速度の関係

ステップ距離[mm]	60	100	140
整定時間[s]	1.0	1.4	1.4
シリンダの移動速度[mm/s]	60	74	100

6.3.1.2 追従システムの周波数応答特性

圃場模擬走行試験装置のクランク機構を利用して、周波数を 0.025 Hz から 0.33 Hz までの 11 段階に変化させ、制御目標の V 字モデルを正弦波状に変化させてうね自動追従システムの周波数応答特性を評価した。図 6.7 から図 6.17 は不感帯が ±10 mm の場合であり、図 6.18 から図 6.28 は不感帯 ±20 mm の場合の結果をそれぞれ示す。各図の横軸は経過時間であり、縦軸は制御目標と追従システムの応答軌跡の振幅の水平距離を示す。

まず、周波数を 0.025~0.1 Hz (不感帯 ±10 mm が図 6.7 から図 6.13, 不感帯 ±20 mm が図 6.18 から図 6.24) に設定した場合、本追従システムの制御の安定を図るために、不感帯を設定したことから、V 字モデルの位置が正弦波状に左右に変化したのに対し、本システムの応答軌跡は階段状に動作して追従している。これは、作物列センサが V 字モデルの真上を通過するように常に油圧スラ

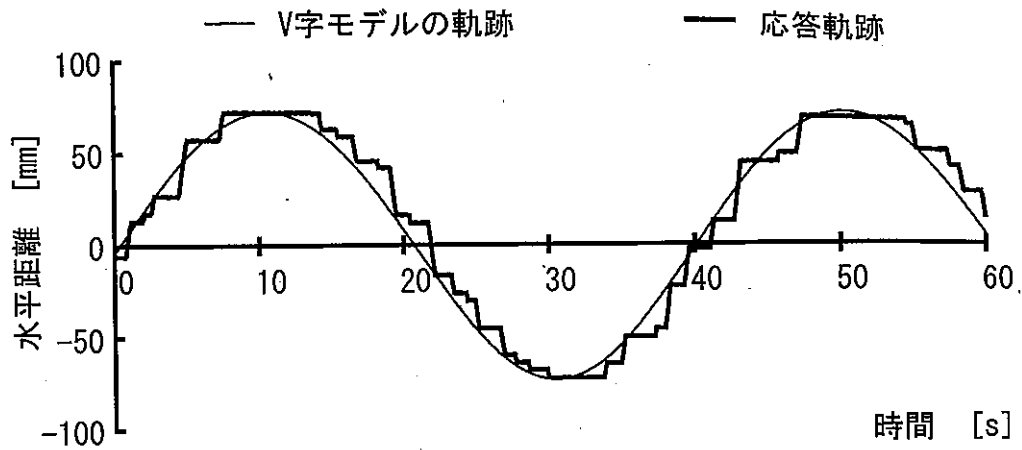


図 6.7 周波数応答軌跡 (不感帯±10 mm, 周波数 0.025 Hz)

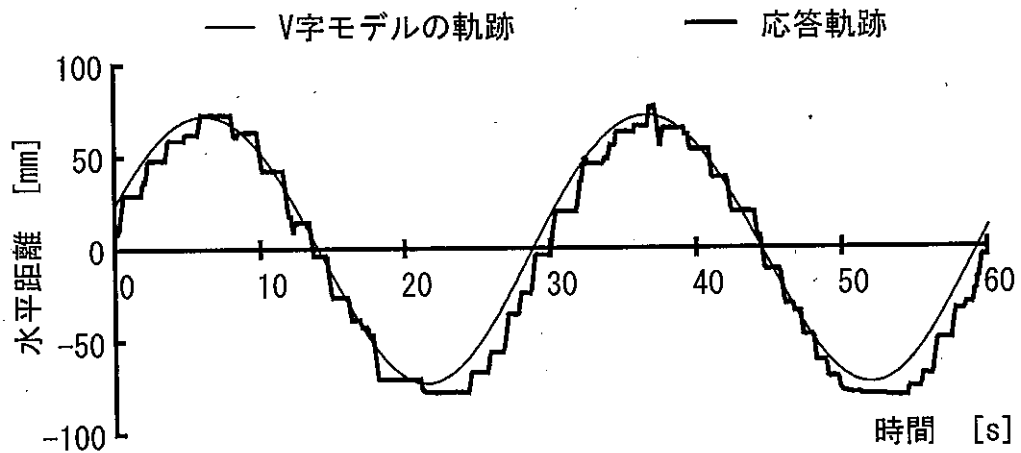


図 6.8 周波数応答軌跡 (不感帯±10 mm, 周波数 0.033 Hz)

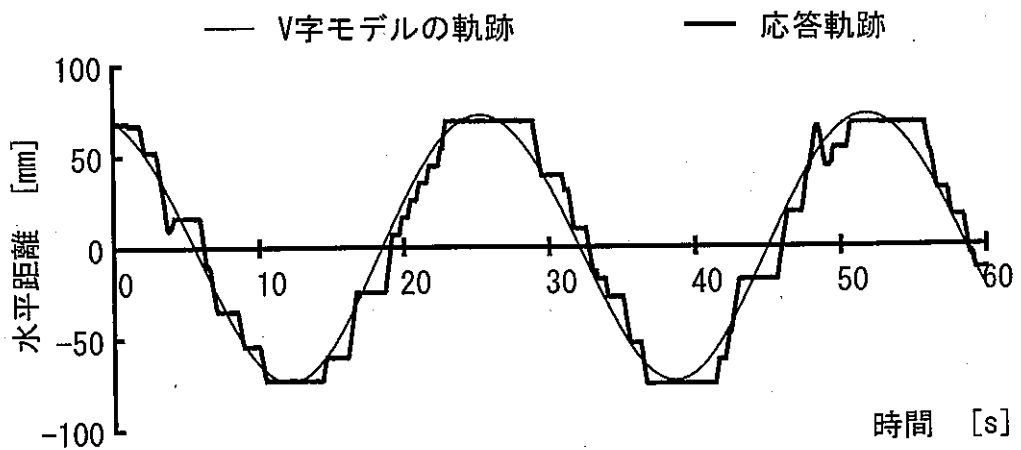


図 6.9 周波数応答軌跡 (不感帯±10 mm, 周波数 0.04 Hz)

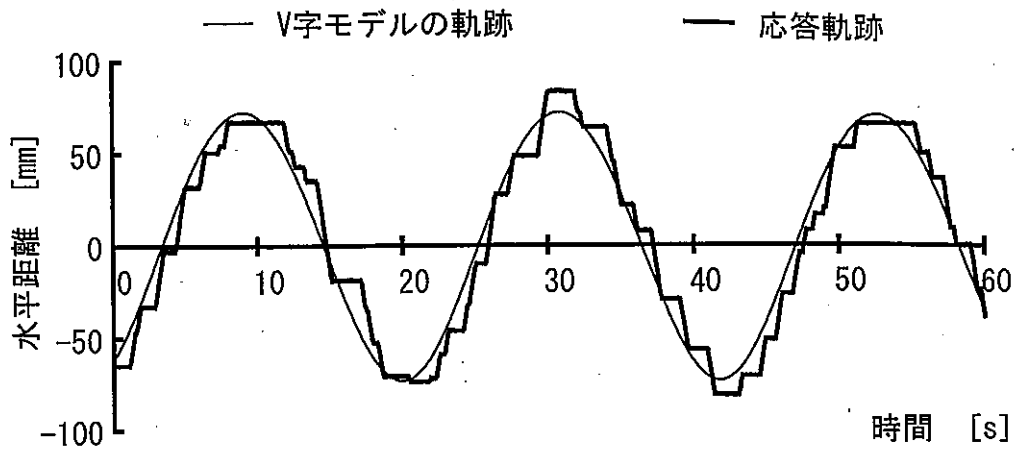


図 6.10 周波数応答軌跡 (不感帯 ± 10 mm, 周波数 0.05 Hz)

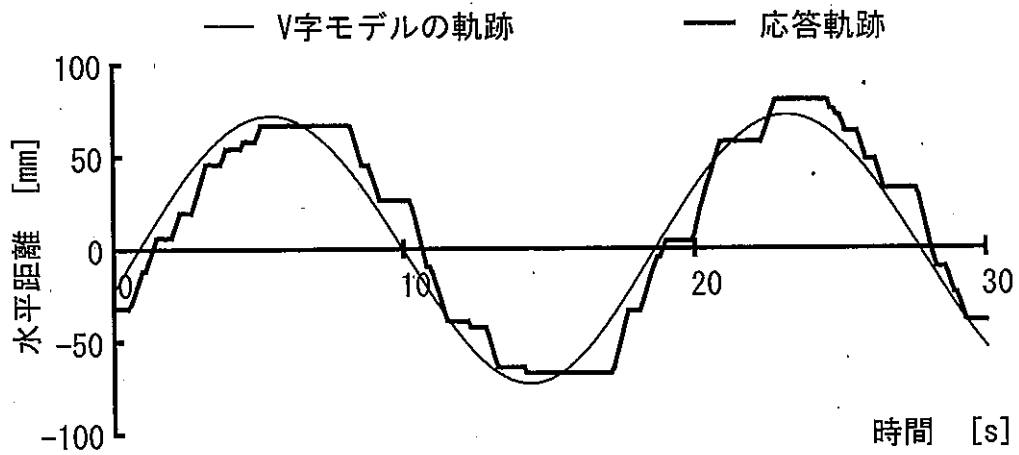


図 6.11 周波数応答軌跡 (不感帯 ± 10 mm, 周波数 0.06 Hz)

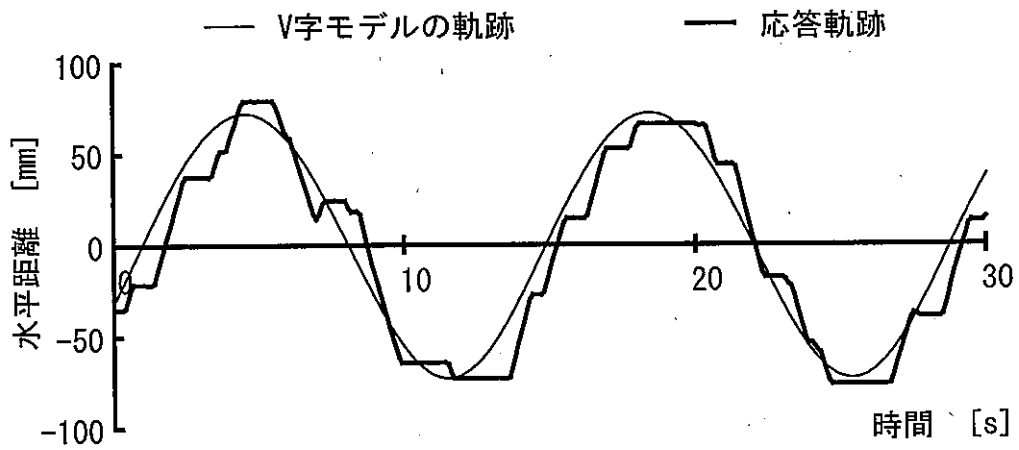


図 6.12 周波数応答軌跡 (不感帯 ± 10 mm, 周波数 0.08 Hz)

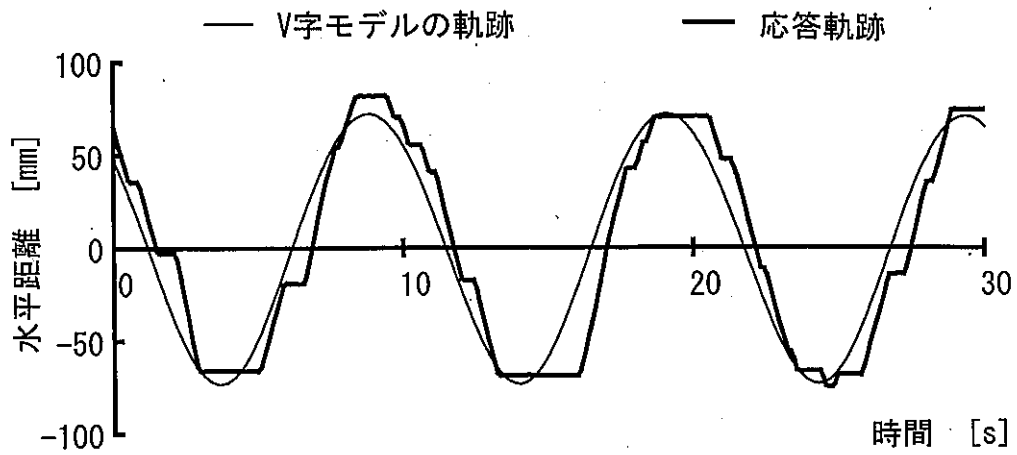


図 6.13 周波数応答軌跡 (不感帯±10 mm, 周波数0.1 Hz)

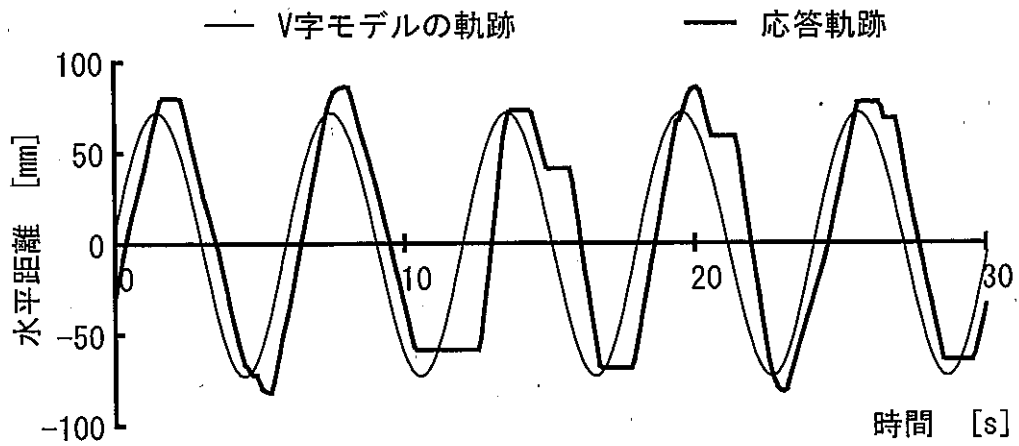


図 6.14 周波数応答軌跡 (不感帯±10 mm, 周波数0.17 Hz)

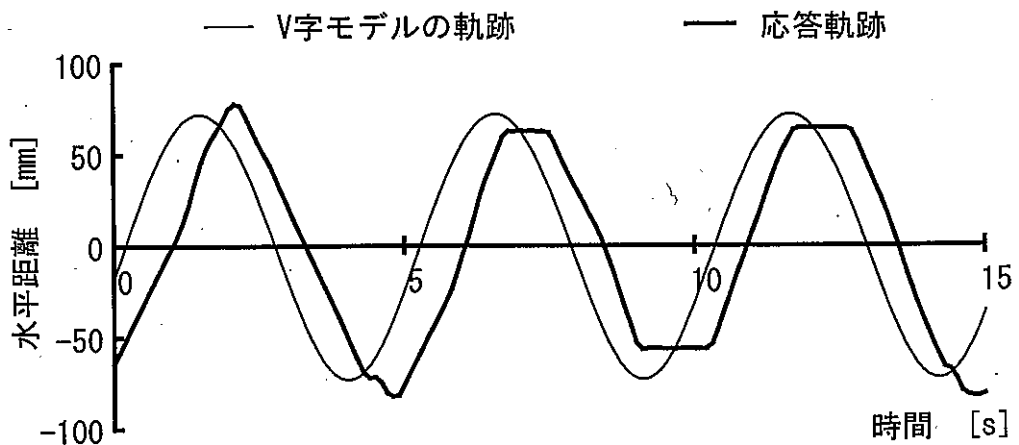


図 6.15 周波数応答軌跡 (不感帯±10 mm, 周波数0.2 Hz)

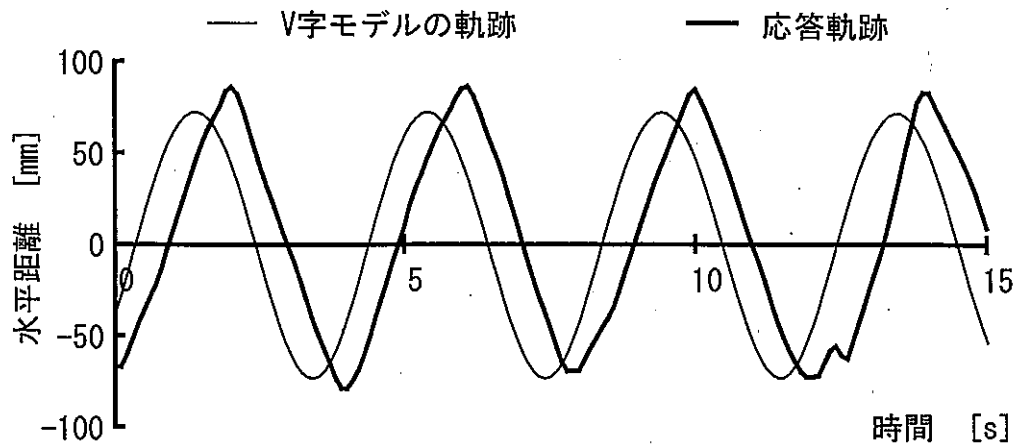


図 6.16 周波数応答軌跡 (不感帯 ± 10 mm, 周波数 0.25 Hz)

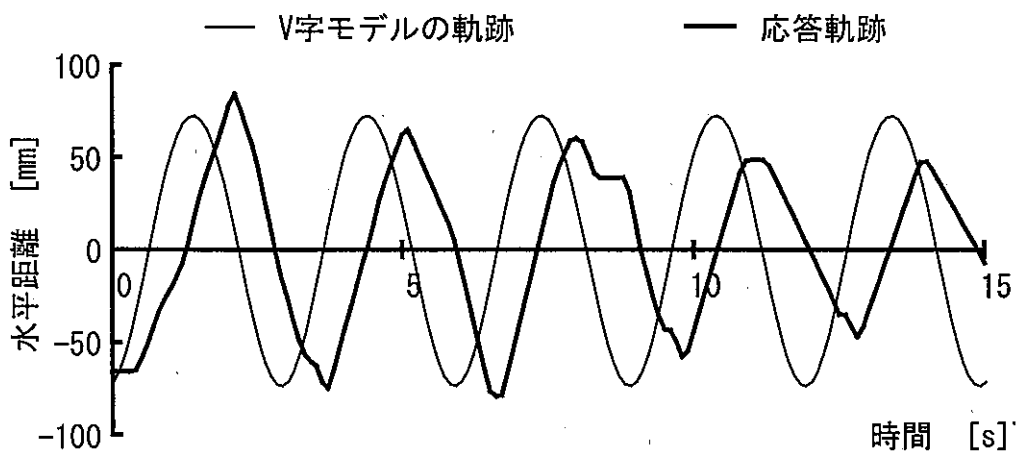


図 6.17 周波数応答軌跡 (不感帯 ± 10 mm, 周波数 0.33 Hz)

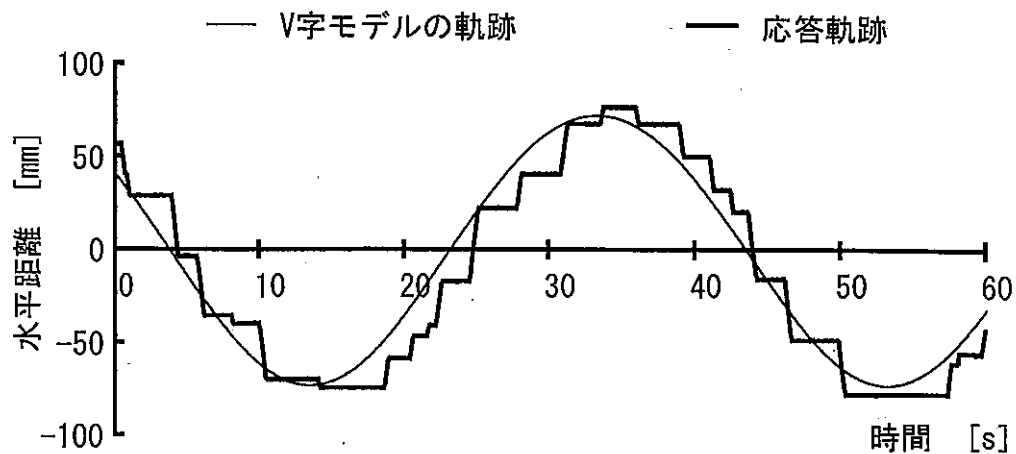


図 6.18 周波数応答軌跡 (不感帯 ± 20 mm, 周波数 0.025 Hz)

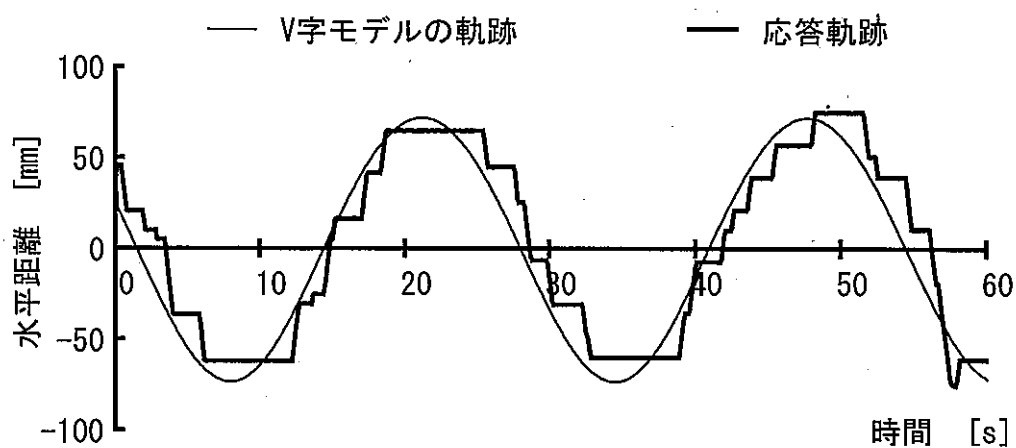


図 6.19 周波数応答軌跡 (不感帯 ± 20 mm, 周波数 0.033 Hz)

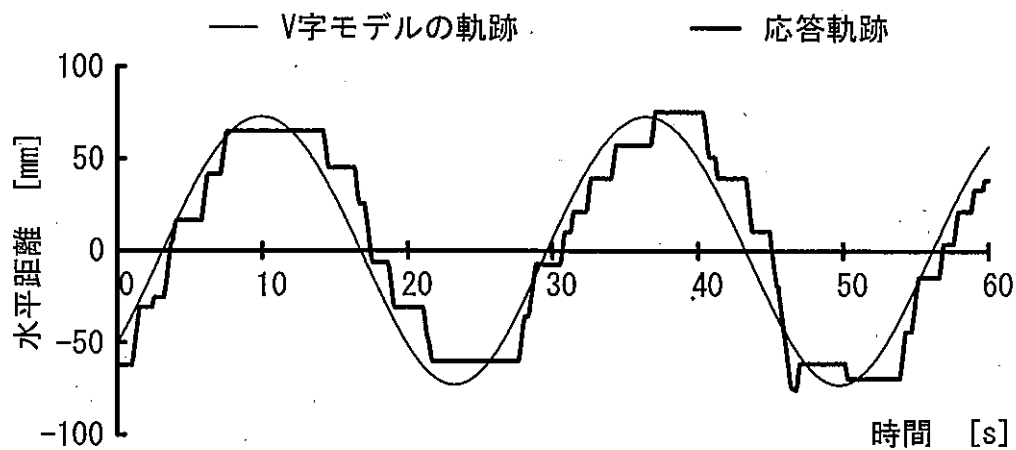


図 6.20 周波数応答軌跡 (不感帯 ± 20 mm, 周波数 0.04 Hz)

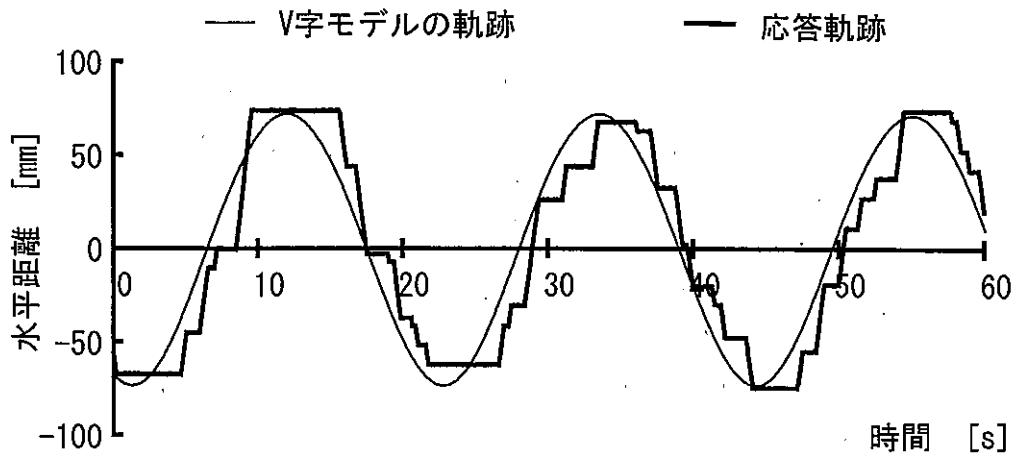


図 6.21 周波数応答軌跡 (不感帯 ± 20 mm, 周波数 0.05 Hz)

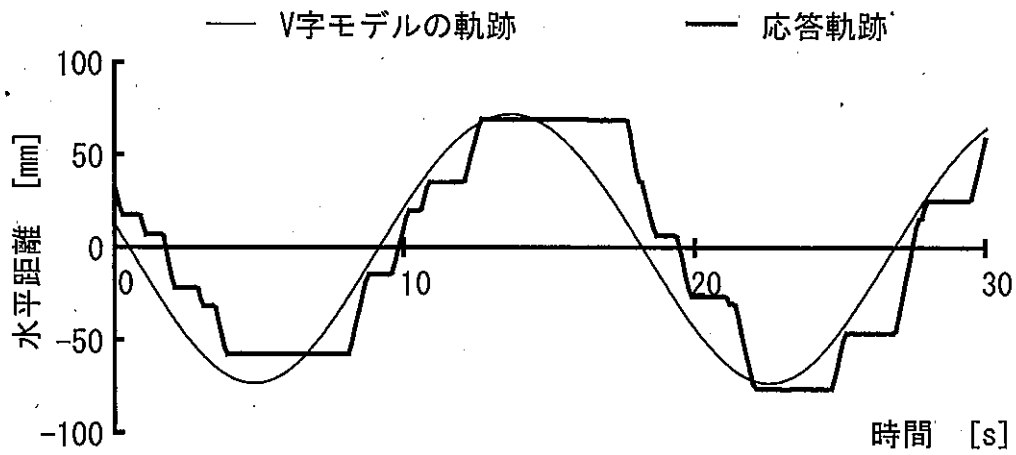


図 6.22 周波数応答軌跡 (不感帯 ± 20 mm, 周波数 0.06 Hz)

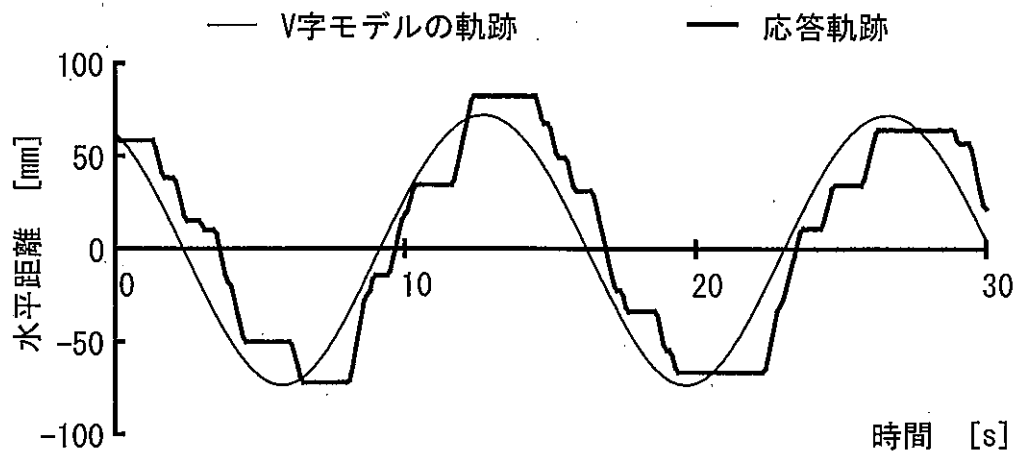


図 6.23 周波数応答軌跡 (不感帯 ± 20 mm, 周波数 0.08 Hz)

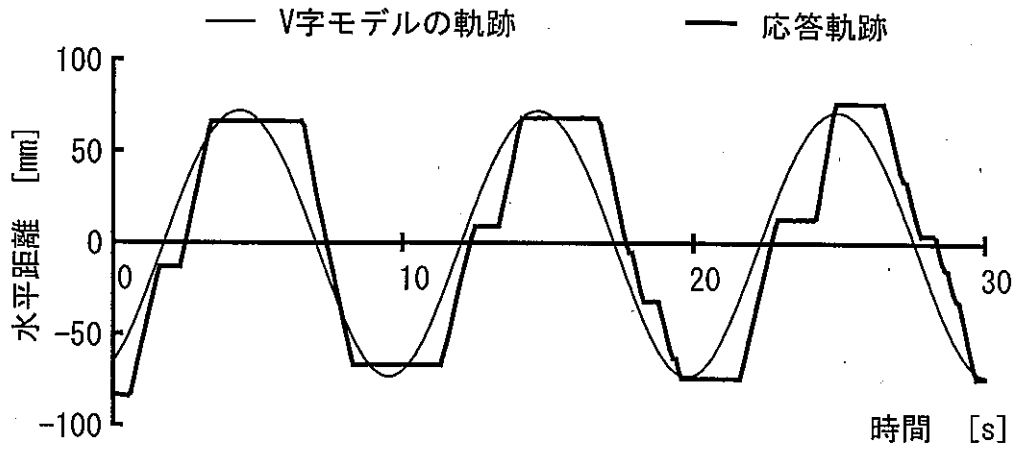


図 6.24 周波数応答軌跡 (不感帯 ± 20 mm, 周波数 0.1 Hz)

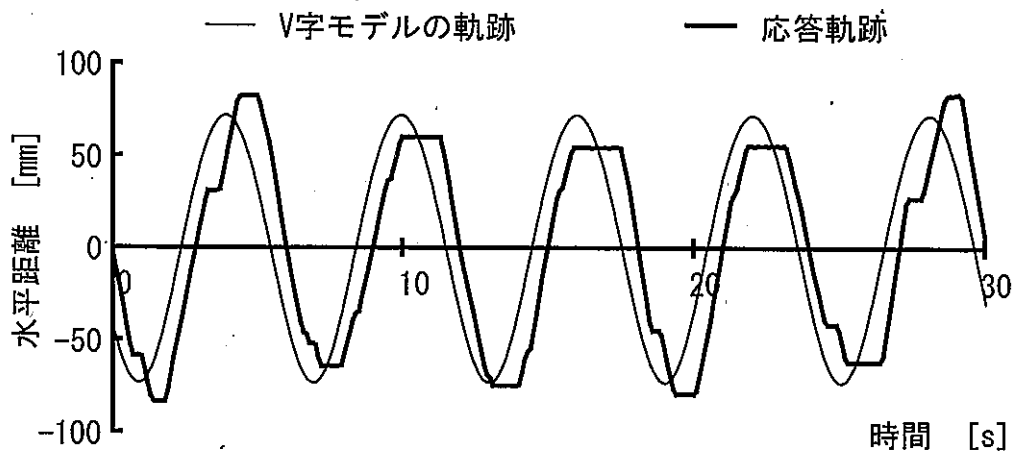


図 6.25 周波数応答軌跡 (不感帯 ± 20 mm, 周波数 0.17 Hz)

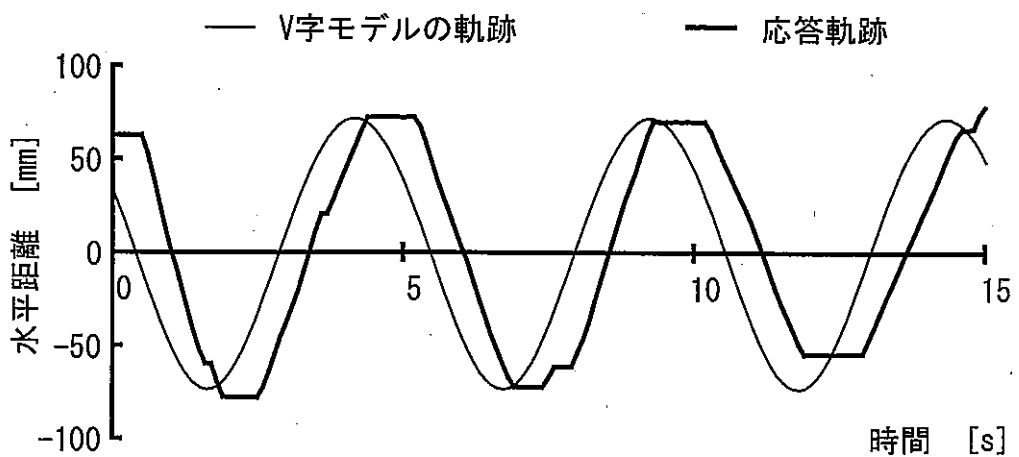


図 6.26 周波数応答軌跡 (不感帯 ± 20 mm, 周波数 0.2 Hz)

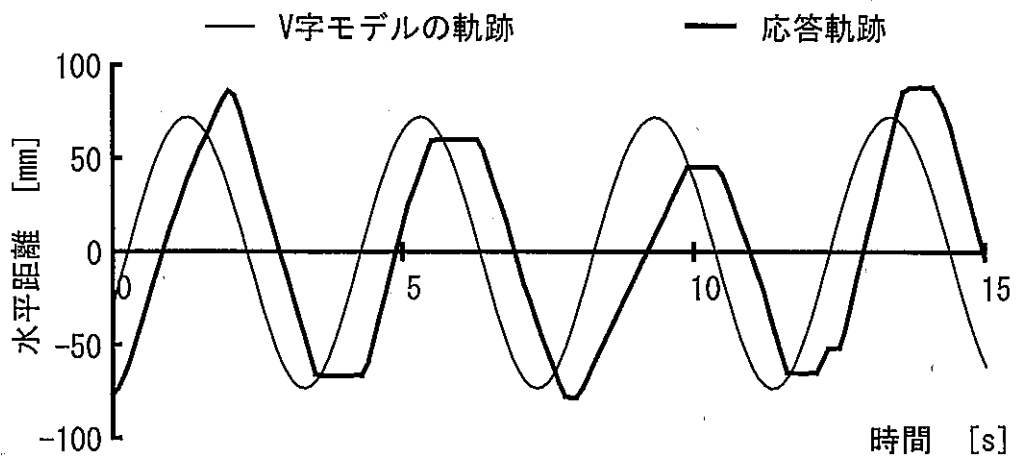


図 6.27 周波数応答軌跡 (不感帯 ± 20 mm, 周波数 0.25 Hz)

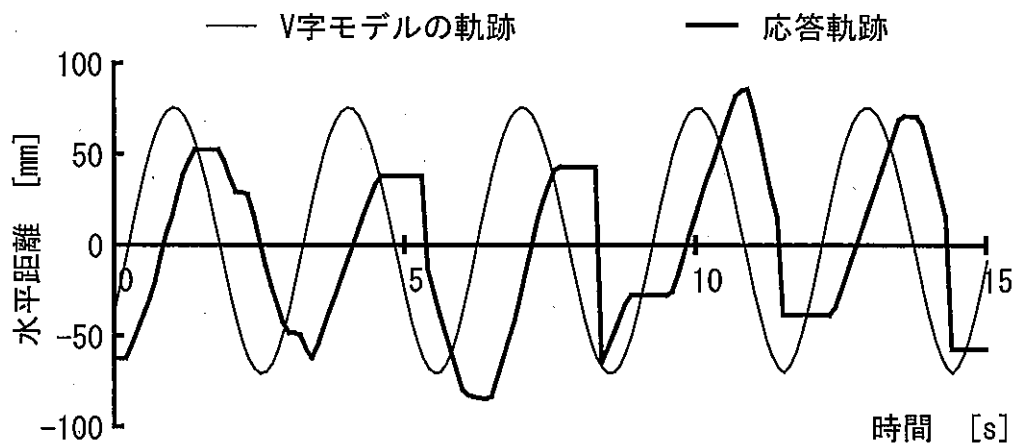


図 6.28 周波数応答軌跡 (不感帯 ± 20 mm, 周波数 0.33 Hz)

イド装置を自動制御するが、作物列センサとV字モデルの偏差すなわち制御誤差が不感帯以内であれば制御信号が出力されないため、電磁弁は動作せず油圧シリンダは停止状態となる。その後、制御目標が動き両者の偏差が不感帯よりも大きくなると再び制御信号が出力され、油圧シリンダが動作するためにこのように、追従軌跡が階段状になった。また、図 6.7 と図 6.13 を比べると周波数

の増加につれて、階段状に動作するステップ量が少なくなる傾向が見られた。これは、周波数が高くなることによって、V字モデルの移動速度が速くなり、V字モデルと作物列センサの水平距離の偏差が不感帯に納まって、またすぐに不感帯を超えてしまうため、制御信号が頻繁に出力されてしまうことに起因する。さらに、同じ周波数でも、図 6.11 と図 6.22 のように不感帯が $\pm 10 \text{ mm}$ と $\pm 20 \text{ mm}$ の応答軌跡を比較すると、 $\pm 20 \text{ mm}$ の場合は不感帯が大きいため制御信号が頻繁に出力されず、全体的に制御の遅れが大きくなる傾向が見られた。

周波数が $0.17 \sim 0.33 \text{ Hz}$ の条件では、不感帯 $\pm 10 \text{ mm}$ の場合を図 6.14 から図 6.17、不感帯 $\pm 20 \text{ mm}$ の場合を図 6.25 から図 6.28 に示すように、階段状の追従システムの応答軌跡は見られなくなった。これは、V字モデルの左右の移動速度が速くなり、追従システムはその制御誤差を解消するように追従動作するが、常にそれが不感帯より大きくなり、電磁弁が常時作動状態になってしまうためである。

制御システムの周波数応答特性は、一般に 6.1), 6.2) 式に示すようにゲイン特性と位相特性で評価される^{68,69)}。図 6.29 は入力 V字モデルの正弦波状の軌跡

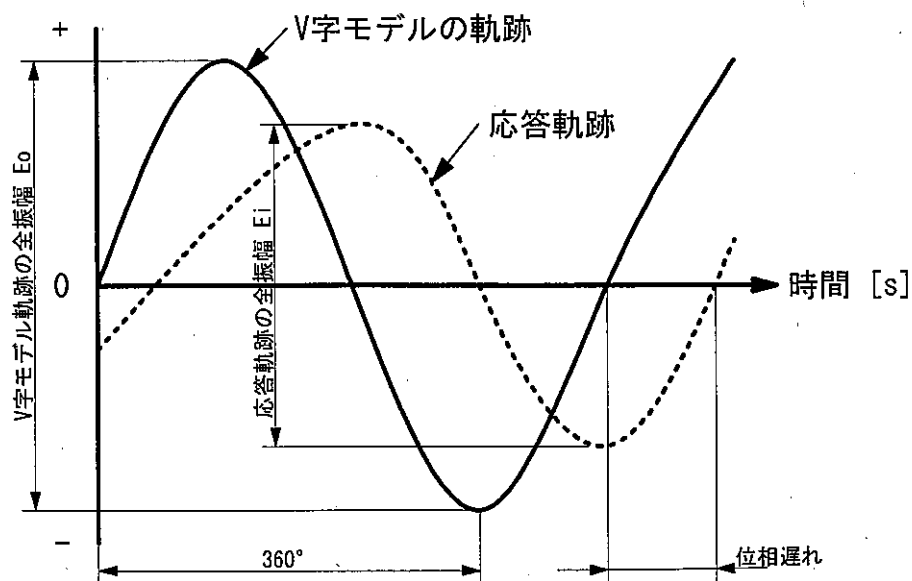


図 6.29 周波数応答特性の評価方法

と出力の追従システムの応答軌跡を示す。ゲインは 6.3)式のように、V 字モデルの軌跡の全振幅と追従システムの応答軌跡の全振幅の比であり、また位相遅れはその周波数における V 字モデルの軌跡に対してシステムの応答軌跡の時間的な遅れから求められる角度である。

$$G = |G(j\omega)| \quad 6.1)$$

$$\varphi = \angle G(j\omega) \quad 6.2)$$

$$G_{dB} = 20\log_{10} G = 20\log_{10} E_0/E_i \quad 6.3)$$

ここに、

G : 伝達要素

$G(j\omega)$: 周波数伝達関数

φ : 位相遅れ [°]

G_{dB} : ゲイン, V 字モデルの軌跡と追従システムの応答軌跡の比 [dB]

E_0 : V 字モデルの軌跡の全振幅 [mm]

E_i : 追従システムの応答軌跡の全振幅 [mm]

ここで、周波数応答特性の実験結果を基に、ボード線図を描き、応答軌跡の周波数特性を分析し、その結果を図 6.30 に示す。横軸は設定した周波数の対数値であり、縦軸はゲイン特性と位相特性を示す。一般に、ゲイン G は変化が大きいため、6.3)式によって、ゲインの値を対数値で計算して評価される。

図に示すように、制御目標の周波数の増加につれて、ゲインが次第に低下し、位相遅れが大きくなる傾向が見られる。特に、周波数が 0.1 Hz を超えると、本追従システムの位相遅れは急激に大きくなり、制御の遅れが顕著に現れる特性を示している。しかし、ゲイン-3 dB 以内の最大応答周波数を求めると 0.25 Hz

であり、その時の位相遅れは 56° であった。

したがって、本自動追従システムは、周波数 0.25Hz の正弦波状に変化する対象物に対して十分に追従できることが判明した。また、第2章の実際圃場で調査したうね自動追従システムに要求される周波数の $0.12\sim 0.18\text{Hz}$ を上回っていることから、実際の作物列の変動に対しても本研究で開発した自動追従システムは十分に追従できると判断できた。

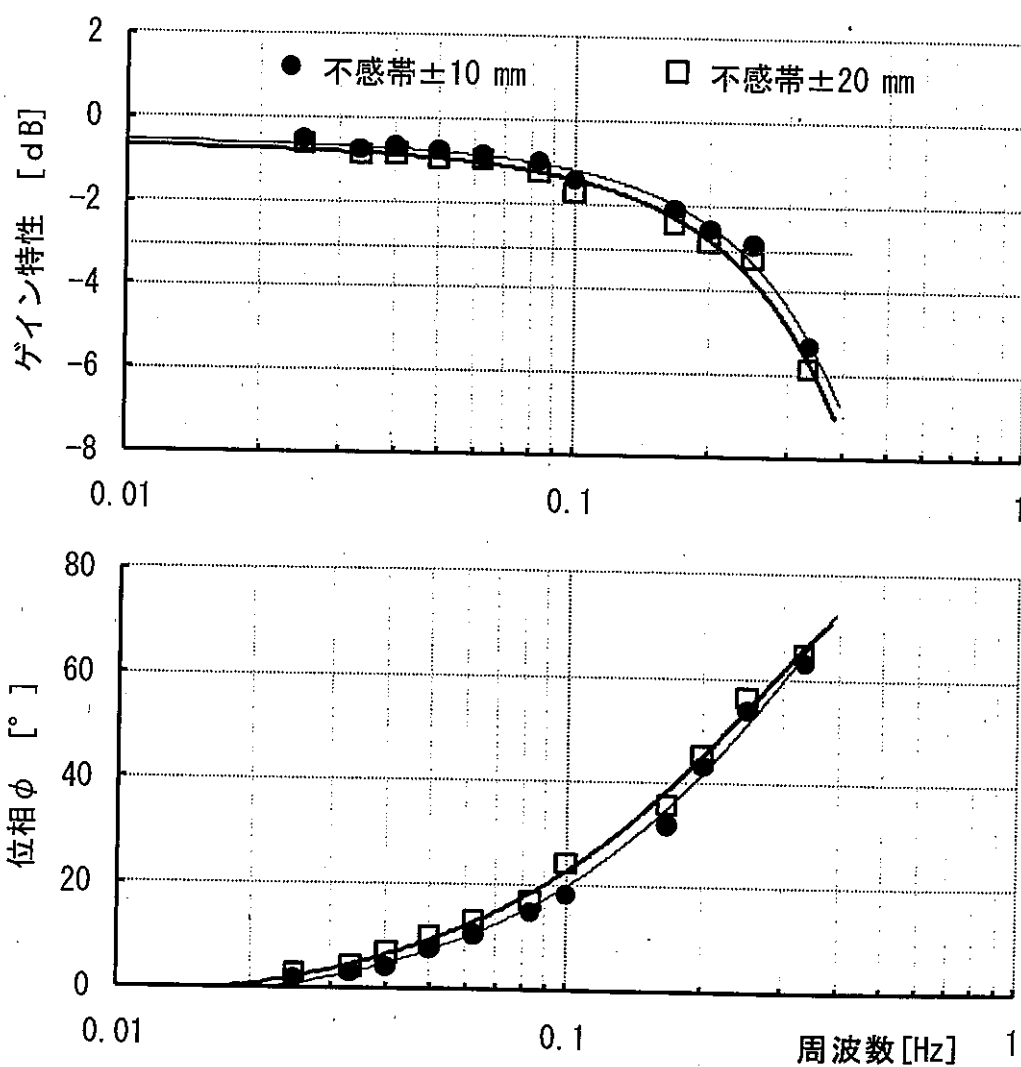


図 6.30 周波数応答のボード線図

6.3.2 圃場実験での制御結果の評価

6.3.2.1 ラインマーカ跡の場合の追従制御の結果

図6.31は、圃場に播種機でラインマーカ跡を描き、そのラインマーカ跡を制御目標にうね自動追従システムを制御させた場合について作業速度 0.5, 1.0, 1.5 m/s の3段階に変化させた結果を示す。横軸はトラクタの進行距離を示し、いずれのグラフも細線のトラクタ中心の軌跡はラインマーカ跡の中心位置を基準にトラクタが左右に蛇行した軌跡を示す。また、太線は作業機モデルすなわち作物列センサの中心がそのラインマーカ跡に制御された結果を示す。なお、縦軸の正側はトラクタの進行方向に対して左側に位置したことを示し、表 6.3 はラインマーカ跡の追従精度の評価の値を示す。

表 6.3 ラインマーカ跡の追従精度

作業速度[m/s]	トラクタ中心の軌跡	作業機中心の軌跡
	RMS[mm]	RMS[mm]
0.5	43.3	13.1
1.0	50.8	14.5
1.5	66.7	19.4

トラクタの走行速度を 0.5 m/s に設定した場合、トラクタ中心の軌跡は進行距離 20 m 間で -5 mm ~ 86 mm の範囲で右から左に向かって蛇行し、その最大変動は 4.8 m 付近で 86 mm であり、測定区間全体の RMS は 43 mm であった。一方、作物列センサは下方の V 字溝の位置を検出し、図のように作業機モデルを制御目標に追従制御していることが明らかであり、その最大誤差も 30 mm に納まり、測定区間全体の RMS も 13.1 mm に低下した。また、中図の作業速度を 1.0 m/s に設定した場合は、トラクタ中心の軌跡は -71 mm ~ 84 mm の範囲で大きく蛇行し、全体の RMS は 50.8 mm であったが、作業機モデルの中心の軌跡は自動追従によって大きく変動せず、RMS は 14.5 mm に留まった。さらに、下図の作業

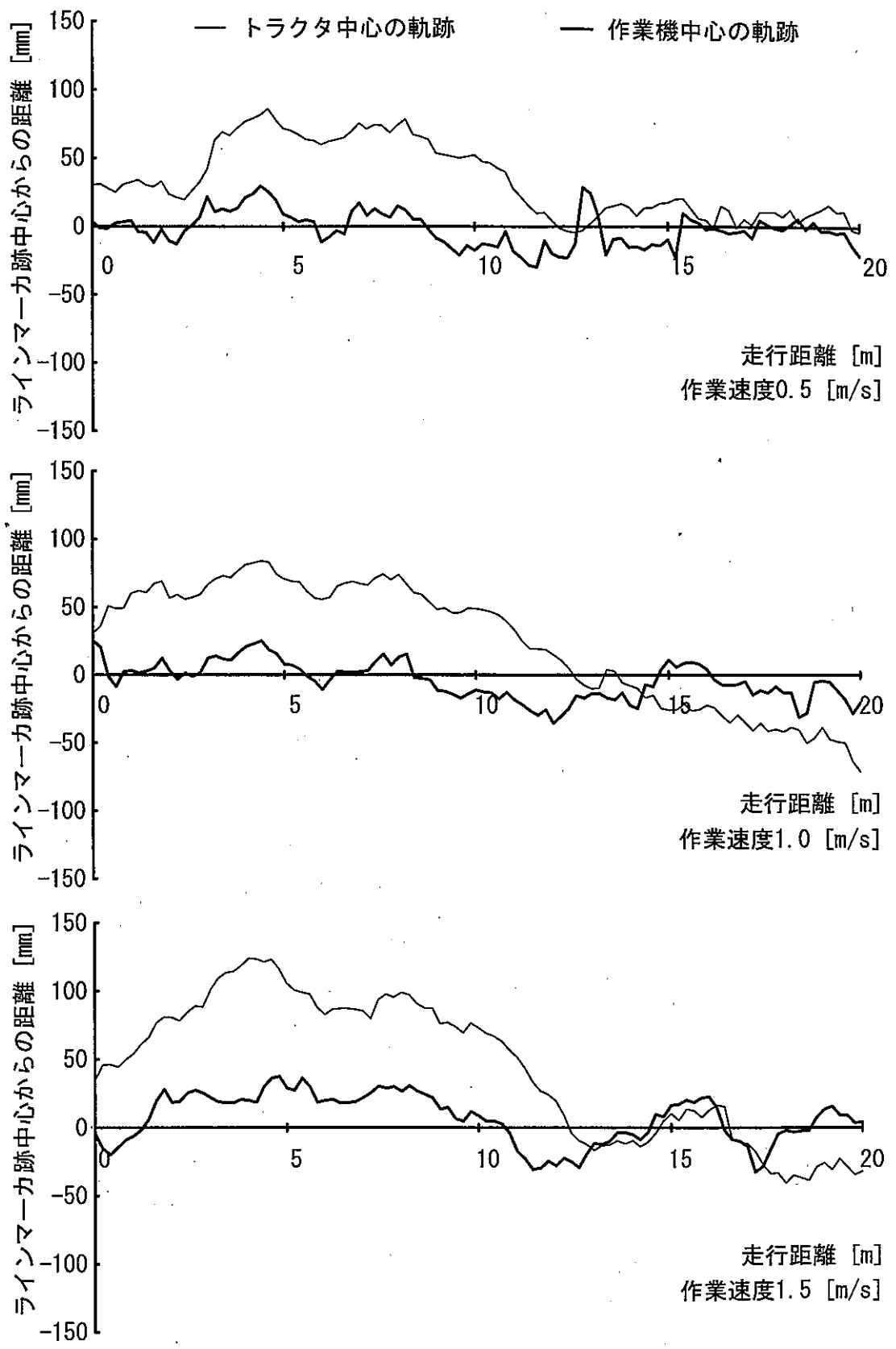


図 6.31 追従システムの制御結果 (ラインマーカ跡)

速度を 1.5 m/s に設定した場合、トラクタの軌跡の RMS は 66.7 mm と大きくなったが、作業機モデルの中心軌跡の RMS は 19.4 mm であり、トラクタ軌跡の 29.1% になった。

以上のように、いずれの作業速度でも、トラクタ中心の軌跡を示す細線に対してうね自動追従システムで制御された作業機中心を示す太線は最大でも 37 mm であり、また RMS が 19.4 mm 以下と極めて良好に制御されている。したがって、ラインマーカ跡の追従制御において、本システムは十分なうね追従精度を有していることが確認できた。

6.3.2.2 作物列の場合の追従制御の結果

圃場に大豆を栽培し、その作物列を制御目標とした場合の自動追従システムの制御結果を図 6.32 に示し、表 6.4 はその追従精度の評価の値を示す。なお、図の各軸と図中の線種の意味は前述のラインマーカ跡の場合と同様である。

まず、上図のトラクタの作業速度を 0.5 m/s に設定した場合、トラクタ中心の軌跡は進行方向に対して左側に偏って進行し、8 m 付近で最大 112 mm の変動が生じた。また、進行距離 20 m 間の変動を RMS で求めると 59.7 mm となり、実際の中耕除草作業を考慮すると、第 2 章で述べたようにトラクタ作業者が適切にハンドル操作を行わないと作物に損傷を与える可能性が十分に考えられる。一方、作物列センサを取り付けた作業機モデルの軌跡を見ると、全体的にうね自動追従システムはその作業機モデルを作物列に沿って制御し、その制御誤差の最大は 58 mm であり、その制御誤差の RMS が約 1/3 の 18.6 mm に低下し、良好に制御されたと判断できる。

つぎに、トラクタの作業速度を 1.0, 1.5 m/s に設定した場合でも、トラクタが左右に蛇行しているにもかかわらず、0.5 m/s の場合と同様に作業機モデルが作物列に沿って制御されている。特に、図に示すように、作業の後半 15 m から

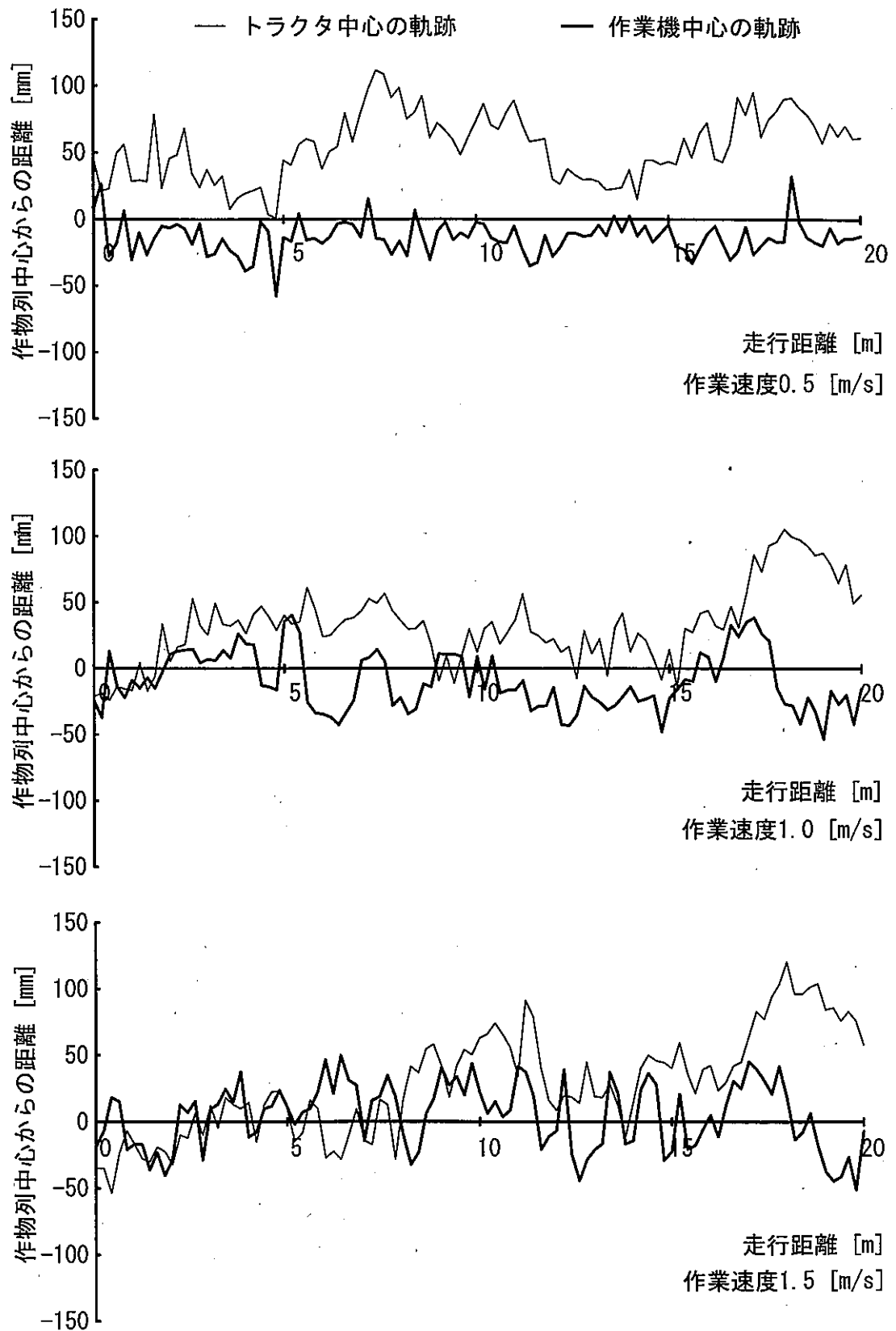


図 6.32 追従システムの制御結果(作物列)

表 6.4 作物列の追従精度

作業速度 [m/s]	トラクタ中心の軌跡	作業機中心の軌跡
	RMS [mm]	RMS [mm]
0.5	59.7	18.6
1.0	43.7	23.9
1.5	47.8	25.4

トラクタ中心の軌跡の最大変動はそれぞれの作業速度で 106, 120 mm であるのに対し、作業機モデルの中心軌跡は最大でもそれぞれ 41, 49 mm と変動が小さくなり、制御目標の作物列に自動追従していることが明らかである。なお、制御誤差の RMS は前述のラインマーカ跡の場合に比べると、若干大きくなるものの、それぞれ 23.9, 25.4 mm であった。また、表に示すように、作業速度の増加につれて、本システムの追従精度の RMS は若干増加する傾向が見られた。その原因は、第 4 章で述べたように作業速度が増すと作物列センサの走査間隔と走査角度が大きくなり、センサの検出誤差が大きくなるために生じたと考えられる。しかし、開発したうね自動追従システムの制御誤差の RMS は実験の作業速度範囲内で最大でも 25.4 mm 以下であったことから、本システムはレーザ式作物列センサによって作物列を連続的にかつ非接触に検出し、トラクタ用作業機を制御目標に制御することが精度的にも十分可能であることが明らかになった。

6.4 本章のまとめ

本研究は畑作における播種・移植、中耕除草作業時のトラクタ用作業機のうね自動追従システムの開発を最終目的としている。そこで本章は、前章で開発した追従システムの制御精度について室内実験と圃場実験を実施した。

1) 室内実験では、自動追従システムのステップ応答特性と周波数応答特性を実

験的に求め、その制御特性を分析した。ステップ応答特性の場合、本システムは PID 制御の比例要素の部分を採用しており、ステップ距離が大きいほど、油圧シリンダの移動速度は速くなることが確認できた。また、周波数応答特性の場合、周波数が 0.1 Hz 以上になると、位相遅れが急激に大きくなり、制御の遅れが顕著に現れる特性を示した。しかし、ゲイン-3 dB 以内の最大応答周波数を求めると 0.25 Hz であり、その時の位相遅れは 56° であった。したがって、本システムは、0.25 Hz 以内で左右に変化する制御目標に対して十分追従できることが判明した。

- 2) 圃場実験では、トラクタの作業速度を 0.5, 1.0, 1.5 m/s に設定し、制御目標のラインマーカ跡で実験を行った結果、本システムの追従制御の誤差の RMS は作業速度の増加に伴い、若干大きくなるものの、その値は 19.4 mm 以下であった。また、作物列の追従実験でも同様な結果になり、追従制御の誤差の RMS は 25.4 mm 以内であったことから、本追従システムは作物列を確実に検出し、トラクタ用作業機をその制御目標に自動制御することが精度的にも十分可能であることが判明した。

以上のように、本研究で開発したうね自動追従システムの追従精度は室内実験と圃場実験で評価され、本システムの有効性が明らかになった。

最後に、本研究は、畑作のうね合わせの高精度・自動化を目的にレーザ式作物列センサと油圧スライド装置を利用したトラクタ用作業機のうね自動追従システムの開発を目的として実施したものである。開発したレーザ式作物列センサの計測精度や自動追従システムの基本的特性は、本研究で述べたように室内実験や圃場実験でその基本的な性能が明らかとなり、今後のトラクタ作業の自動化や高速化、作業者の労力軽減などに貢献できる基本的な技術と考える。

第7章 総括

現在、食糧危機に備えて、世界中で食料の増産が必要不可欠な状況にあるにもかかわらず、日本の自給率は低下し続けている。特に、農業従事者の減少と高齢化、それに伴う耕地面積の減少が日本の農業の現状である。このような状況で農地経営の拡大、作業能率の向上を実現して食料の増産を図るには、作業負担の軽減、省力化などの対策が不可欠であるため、トラクタ作業の自動化や高能率化が期待される。そこで、本研究は作物列センサを開発し、それによるトラクタ用作業機のうね自動追従システムの開発を目的としている。これまでに、作物列センサに関する研究は、国内外を問わず多く研究されてきた。しかし、既往の研究では、自然光の影響を受けやすいことやコストの面などの問題で実用段階に至っていない。

上記の問題点を踏まえ、簡便で安価なレーザ式作物列センサの開発を行い、それによるトラクタ用作業機のうね自動追従システムの開発を行った。

7.1 畑作の播種・移植、中耕除草時のトラクタによるうね合わせ作業の現状とその精度（第2章）

トラクタ用作業機のうね合わせ精度を把握するために、畑作の播種・移植および中耕除草作業時のうね合わせ作業の現状とその精度を調査し、開発するトラクタ用作業機のうね自動追従システムに要求される応答性を調査分析した。

- 1) トラクタ作業者の作業状態は、播種・移植作業の場合、農場 B の菜豆の播種、農場 C のテンサイの移植作業では、作業者がトラクタの後方を確認する割合は 10%以下であったが、農場 A のバレイショの播種は 15.9%であった。一方、中耕除草作業では、農場 D のテンサイ圃場で 27.2%、農場 E の小豆圃場では 15.5%となり、トラクタ作業者の後方確認割合が高くなる結

果となった。

- 2) 各農場のうね合わせの作業精度は、播種・移植作業の場合、農場 A, B, C の隣接行程のうね間は、作業者が設定したうね間に対してそれぞれ最大 11.5, 9.5, 7.5 cm 変動した。また、中耕除草作業のうね合わせ作業では、トラクタ用作業機はうね間の中心すなわち作物列に沿って水平位置が概ね調節されているが、その最大変動は農場 D が 8.2 cm, 農場 E が 7.2 cm に達したことから、作物に機械的な損傷を与えることも観察された。
- 3) 圃場調査から求めた開発目標のうね追従システムに要求される応答性は、トラクタの作業速度を 2.0 m/s に想定すると、播種・移植作業では作業機をうねに追従させるためのアクチュエータの制御速度は 6.6 cm/s と推定された。また、中耕除草作業では、播種・移植作業と比較すると、制御速度の最大が大きくなり、制御速度は 10 cm/s となった。

以上のように、畑作の播種・移植、中耕除草作業はトラクタ作業者にとって重労働であり、作業者の労力を軽減し、より高能率で高精度なうね合わせ作業を実現するためにはトラクタ用作業機のうね自動追従システムの開発は極めて重要である。

7.2 レーザ式作物列センサの開発 (第3章)

開発したレーザ式作物列センサは主に、レーザ変位センサ、6 面体ポリゴンミラー、可変速モータ、ロータリエンコーダおよびコンピュータで構成されるが、本章では作物列センサの計測原理や概要、作物列検出のソフトウェアについて述べた。

- 1) 本研究で供試したレーザ変位センサは CCD 方式で、その測定距離は 250～750 mm であり、対象物までの距離を非接触で計測できる。また、センサは

トラクタ用作業機に取り付けられるが、進行方向に対して横方向下方の土壌表面や作物の高さ形状を計測する。そのために、可変速モータを用いて6面体ポリゴンミラーを回転させ、レーザ変位センサから発するレーザ光の向きを変え、下方の断面形状を計測できるようにした。

- 2) 作物列センサの距離情報や角度情報から作物列の水平位置を算出するために自作の計測用パーソナルコンピュータを供試し、C言語による計測用プログラムを開発した。
- 3) 供試したレーザ変位センサのサンプリング間隔の影響で、ポリゴンミラーの回転数を高くすると小さな作物の葉を検出できなくなる。基礎実験の結果、本研究の作物列センサの場合、ポリゴンミラーの回転数は100~140 rpmが最適であることが判明した。

以上のように、本章では、レーザ式作物列センサを開発し、その計測原理と概要について述べた。

7.3 レーザ式作物列センサの計測精度の評価（第4章）

この章では、前章で開発したレーザ式作物列センサの位置計測精度について室内実験と圃場実験を実施して評価した。

- 1) 室内実験において、センサは水平面上に置かれた作物モデルの水平位置をセンサ中心から左右±180 mmの範囲で計測可能であり、V字モデルと作物モデルを検出した場合の検出誤差RMSはいずれのセンサの設定高さにおいてもその最大が5.7 mmであった。
- 2) 圃場実験において、V字溝のラインマーカ跡を計測した実験では、トラクタの作業速度を0.5~1.5 m/sに設定した場合、センサが検出した位置の誤差のRMSは20 mm以下であった。また、作業速度が増加しても誤差のRMS

は大きく変化しなかったことから、ラインマーカ跡を検出する場合にはトラクタの作業速度には影響されないとと言える。

- 3) 実際の圃場に作付けした大豆の作物列の検出実験の場合は、トラクタの作業速度が増加するにつれてセンサの検出誤差のRMSは17 mmから29 mmに増加したものの、全体的には作物列センサでその作物列の水平位置を計測することは精度的にも十分であり、作物列センサの有効性が圃場実験でも確認できた。

以上のように、本研究で開発したレーザ式作物列センサはトラクタ用作業機のうね自動追従システムのセンサとして十分に利用可能であると結論づけられた。

7.4 トラクタ用作業機のうね自動追従システムの 油圧制御機構の開発 (第5章)

この章では開発したトラクタ用作業機のうね自動追従システムの油圧制御機構の概要とその基本的な制御特性について述べた。本研究の油圧制御機構は主に油圧スライド装置、油圧ポンプ、電磁弁、計測制御用コンピュータおよび制御ソフトウェアで構成される。

- 1) 油圧スライド装置はトラクタのローリンクと作業機のローリンクヒッチの間に取り付けられ、油圧シリンダによって作業機を左右に移動させるものである。
- 2) 油圧制御機構の制御特性は制御電圧の正負によって、動作方向を制御し、電流の大きさによって制御速度を変えることができる。なお、制御電圧を $\pm 1 \sim \pm 8$ Vの範囲に設定すると、制御電圧と油圧シリンダの移動速度は正比例関係となり、線形制御が可能となった。

- 3) 本研究で開発した制御ソフトウェアは、トラクタ用作業機のうね追従制御を滑らかにかつ迅速に行うために PID 制御の比例要素の部分を基本とし、さらに制御の安定性を向上させるために不感帯処理法や移動平均法などを採用した。

7.5 うね自動追従システムの制御精度の評価 (第6章)

この章は、前章で開発したうね追従システムの制御精度について室内実験と圃場実験で評価した。

- 1) 室内実験では、自動追従システムのステップ応答特性と周波数応答特性を実験的に求め、その制御特性を分析した。ステップ応答の場合、本システムは PID 制御の比例要素の部分を採用しており、ステップ距離が大きいほど、油圧シリンダの移動速度は速くなることが確認できた。また、周波数応答の場合、周波数が 0.1 Hz 以上になると、位相遅れが急激に大きくなり、制御の遅れが顕著に現れる特性を示した。しかし、ゲイン-3 dB 以内の最大応答周波数を求めると 0.25 Hz であり、その時の位相遅れは 56° であった。したがって、本システムは、0.25 Hz 以内で左右に変化する制御目標に対して十分追従できることが判明した。
- 2) 圃場実験では、トラクタの作業速度を 0.5, 1.0, 1.5 m/s に設定し、制御目標のラインマーカ跡で実験を行った結果、本システムの追従制御の誤差の RMS は作業速度の増加に伴い、若干大きくなるものの、その値は 19.4 mm 以下であった。また、作物列の追従実験でも同様な結果になり、追従制御の誤差の RMS は 25.4 mm 以内であったことから、本追従システムは作物列を確実に検出し、トラクタ用作業機をその制御目標に自動制御することが精度的にも十分可能であることが判明した。

以上のように、本研究で開発したうね自動追従システムの追従精度は室内実験と圃場実験で評価され、本システムの有効性が明らかになった。

7.6 結語

最後に、本研究は、畑作のうね合わせの高精度・自動化を目的にレーザ式作物列センサと油圧スライド装置を利用したトラクタ用作業機のうね自動追従システムの開発を目的として実施したものである。開発したレーザ式作物列センサの計測精度や自動追従システムの基本的な制御特性は、本論文で述べたように室内実験や圃場実験でその基本的な性能が明らかとなり、今後のトラクタ作業の高精度自動化や高速化、作業者の労力軽減などに貢献できる基本的な技術と考える。

量記号一覧

- RMS : 二乗平均平方根, 統計値の散らばり具合を表す数値 [mm]
- PSD : 単位距離当たりの振動波形の平均エネルギー [cm^2/Hz]
- α : レーザ式作物列センサの検出角度 [$^\circ$]
- L : レーザ式作物列センサの計測距離 [mm]
- h : レーザ式作物列センサと土壌表面との垂直距離 [mm]
- P : 作物列の中心点
- x : 求める作物列の水平位置 [mm]
- y : P 点の y 軸座標
- x_1 : 二値化処理を行って枠の左側端の水平距離 [mm]
- x_2 : 二値化処理を行って枠の右側端の水平距離 [mm]
- n : データ数
- x_i : 基準値に対する誤差 [mm]
- C_v : 変動係数, データの変動を相対的に表すもの [%]
- R^2 : 決定係数, 相関係数を 2 乗したもの
- PID : 比例要素, 積分要素, 微分要素を合わせて構成される制御方式
- G : 伝達要素
- $G(j\omega)$: 周波数伝達関数
- φ : 位相遅れ [$^\circ$]
- G_{dB} : ゲイン, V 字モデルの軌跡と追従システムの応答軌跡の比 [dB]
- E_0 : V 字モデルの軌跡の全振幅 [mm]
- E_i : 追従システムの応答軌跡の全振幅 [mm]

謝 辞

本研究論文は、2006年4月から2009年3月まで、博士課程の学位論文として、岩手大学大学院連合農学研究科生物環境科学専攻（帯広畜産大学所属）博士課程在学中に行われたものである。

本研究の遂行と論文をまとめるにあたり、帯広畜産大学畜産学部地域環境学研究部門地域環境工学分野の佐藤禎稔准教授には主指導教官として、研究計画から研究方法、圃場調査、分析方法および本研究論文の作成まで、全般にわたり終始懇切丁寧に御指導をいただき、心から深甚な感謝の意を申し上げます。佐藤先生には学部からの長きにわたり終始かわらぬ暖かいご指導とご鞭撻を賜っただけでなく、研究者としての、また一人の人間としての生き方についても多くのことを学ばせていただき、貴重な財産となりました。

また、帯広畜産大学畜産学部地域環境学研究部門地域環境工学分野の岸本正准教授をはじめ、弘前大学農学生命科学部園芸農学科生物生産環境学研究室の張樹槐准教授、岩手大学農学部農学生命課程の武田純一准教授には、本研究の取りまとめにあたり、終始懇切なるご指導と論文のご校閲を賜りました。記して謝意を表します。

元帯広畜産大学教授、現十勝農業機械協議会事務局長の松田清明先生には、本研究のご指導のほか学業生活の面などでもたくさんの面倒を見ていただき、深く感謝しております。本研究の実験装置の立案や製作にあたり、ご協力をいただいた元帯広畜産大学技官の神田晃氏、および現本学非常勤職員の飯島和司氏に心から感謝します。それから、本学在学中に共同研究としてご協力をいただいた研究室の佐藤栄基先輩、村上匡由君、小椋聡君、片岡章君をはじめ同輩後輩の研究室の学生に対して心からお礼を申し上げます。

お忙しいところ本研究の圃場調査にご協力をいただいた幕別町の渡辺農場と

杉本農場, 帯広市川西地区の高田農場と渋谷農場, 佐藤農場, 小野嶋農場の方々にお礼を申し上げます。

さらに, 在学中に奨学金を頂いた, 平和中島財団, 日本政府文部科学省に深く感謝の意を表します。

最後に, 日本に留学して以来, 長きに渡って支えていただきました専修大学北海道短期大学の工藤正義教授と美唄市の農家貞広一夫氏ご一家に心より御礼申し上げます。ありがとうございました。また末尾ながら, 遅い帰りと休日の通学にも理解を示してくれた家族や励ましてくれた中国在住の両親および義父母に対して心から感謝します。

参 考 文 献

- 1) 久野貴敬:日本農業復活への農業機械の役割について, 農機誌 70(3), 1-2, 2008
- 2) 陳軍, 武田純一, 鳥巢諒, 朱忠祥:連結車両型移動ロボットの後退制御について(第1報), 農機誌 68(1), 104-110, 2006
- 3) 陳軍, 武田純一, 鳥巢諒, 朱忠祥:連結車両型移動ロボットの後退制御について(第2報), 農機誌 68(1), 111-118, 2006
- 4) 橋本直樹:見直せ日本の食料環境, 養賢堂, 59, 2004
- 5) 岡本博史, 端俊一, 高井宗宏:自動うね合わせのための作物列センサ(第1報), 農機誌 61(6), 159-167, 1999
- 6) 岡本博史, 端俊一, 高井宗宏:自動うね合わせのための作物列センサ(第2報), 農機誌 62(2), 66-72, 2000
- 7) 石田茂樹, 下名迫寛, 宮本啓二, 松田清明, 山島由光, 白旗雅樹:畑作用株間除草機の除草性能(第1報), 農作業研究 30(3), 191-198, 1995
- 8) 飯野泰明, 岡本博史, 片岡崇, 端俊一:ハイパースペクトルイメージングによる作物と雑草の識別, 農機北支部報 45, 21-26, 2005
- 9) 松田清明, 宮本啓二, 下名迫寛, 石田茂樹, 山島由光, 白旗雅樹:畑作用株間除草機の除草性能(第2報), 農作業研究 30(3), 199-205, 1995
- 10) 佐藤禎稔, 松田清明, 佐藤栄基, 申 宝明:三次元視覚センサによる作物列出システムの応用, 農機北支部報 44, 29-34. 2004
- 11) Satow T., Matsuda, K., Shen B., Hironaka K., D.L.S. Tan: Development of laser crop row sensor for automatic guidance system of implements, Automation technology for Off-Road Equipments 2004, American society of agricultural engineers, USA. ISBN 1-892769-45-X: 131-139

- 12) 箕浦邦雄, 西崎邦夫, 岸本正: 北海道十勝地方の畑作・酪農におけるトラクタ運転姿勢, 農機誌 69(2), 79-86, 2007
- 13) Wilrodt, F.L.: Steering attachment for tractors, U.S. Patent, No. 1506706, 1924
- 14) Andrew, F.W.: Automatic tractor control, U.S. Patent, No. 2259193, 1941
- 15) Richey, C.B.: "Automatic Pilot" for farm tractors, Agricultural engineering 40 (2), 78-79, 93, 1959
- 16) Gilmour, W.D.: An automatic control system for farm tractors, Journal of agricultural engineering research 5 (4), 418-432, 1960
- 17) Wolfe, J.S., Bull, D.A.: Tractor steering in row crop cultivations III. Influence of the steering gear ratio on steering performance, Journal of agricultural engineering research 5 (4), 406-417, 1960
- 18) Sieling, S.: Self-steering tractor ready for production, Farm mechanization, 282, 1962
- 19) Mittebach, B.: Ein automatishen pflug, Landtechnische forschung 13 (2), 51-52, 1963
- 20) Rushing, K.: Developing the driverless tractor, Agricultural engineering 52 (5), 260-262, 1971
- 21) Warner, M.G.R., Harries, G.O.: An ultrasonic guidance system for driverless tractor, Journal of agricultural engineering research 17 (1), 1-9, 1972
- 22) 池田善郎他: コンバインの自動操向装置に関する研究, 農機誌 35(4), 368-377, 1974
- 23) 笈田昭, 田野信博: トラクタの自動走行, 農機誌 38(3), 438-440, 1976
- 24) 三竿善明: 自動操向トラクタの開発 (第1報), 農機誌 51(1), 21-28, 1989
- 25) 韋学軍, 高井宗宏: 低速無人作業機の自動操向制御に関する研究 (第1報), 農機誌 52(5), 19-26, 1990

- 26) 端俊一, 高井宗宏: 一次元イメージセンサを使用した作物列センサ, 農機誌 54(1), 1992
- 27) 草野信之, 伊能憲英, 木谷収, 岡本嗣男, 鳥居徹: 自律走行のための作物列の画像処理に関する研究 (第1報), 農機誌 57(4), 37-44, 1995
- 28) 鹿沼隆宏, 岡本嗣男, 鳥居徹: 画像処理による作物列検出および自己位置同定 (第1報), 農機誌 59(2), 57-63, 1997
- 29) 鳥居徹, 木谷収, 岡本嗣男, 草野信之, 伊能英憲: 自律走行のための作物列の画像処理に関する研究 (第2報), 農機誌 57(6), 53-39, 1995
- 30) 鳥居徹, 岡本嗣男, 高見沢暁, 鹿沼隆宏: 画像処理による作物列検出および自己位置同定 (第2報), 農機誌 59(5), 37-44, 1997
- 31) Torii, T., Kitade, S., Teshima, T., Okamoto, T., Imou, K., Toda, M.: Crop row tracking by an autonomous vehicle using machine vision (part 1), Journal of JSAM 62 (2), 41-48, 2000
- 32) Torii, T., Takamizawa, A., Okamoto, T., Imou, K.: Crop row tracking by an autonomous vehicle using machine vision (part 2), Journal of JSAM 62 (5), 37-42, 2000
- 33) 寺脇正樹, 片岡崇, 岡本博史, 端俊一: 形状特徴によるテンサイと雑草の識別, 農機誌 64(2), 57-63, 2002
- 34) 山崎哲, 端俊一, 片岡崇, 岡本博: 農用機械の自律直進走行のための画像処理アルゴリズム, 農機北支部報 43, 17-22, 2003
- 35) ECO-DAN, Local positioning system, 2005
<http://www.eco-dan.com/download/brochurer/eco-dan-uk-lowpdf>
- 36) Pichon, D.J., Steinbuegge, G.W.: Propagating audio-frequency magnetic field through soil, Transactions of the ASAE 8 (2), 264-266, 1965
- 37) Grovum, M.A., Zoerb, G.C.: An automatic guidance system for farm tractors,

Transactions of the ASAE, 565-573, 576, 1970

- 38) 中村明德：電磁誘導方式無人搬送車の特徴，無人搬送システムガイドブック 45-48，流通研究社（東京）1986
- 39) 大下泰生，他：自動走行管理機の開発（第1報），農機東北支部報 34, 31-36, 1987
- 40) Shmulevich, I., Zeltzer, G., Brunfeld A.: Laser scanning method for guidance of field machinery, Transactions of the ASAE 32 (2), 425-430, 1989
- 41) Toda, M., Kitani, O., Okamoto T., Torii T.: Navigation method for a mobile robot via sonar-based crop row mapping and fuzzy logic control, Journal of agricultural engineering research 72 (4), 299-309, 1999
- 42) Søgaard, H.T.: Evaluation of the accuracy of a laser optic position determination system, Journal of agricultural engineering research 74, 275-280, 1999
- 43) Ahamed, T., Takigawa, T., Koike, M., Honma, T., Hasegawa, H., Zhang, Q.: Navigation using a laser range finder for autonomous tractor (Part 1), Journal of JSAM 68 (1), 68-77, 2006
- 44) Ahamed, T., Takigawa, T., Koike, M., Honma, T., Hasegawa, H., Zhang, Q.: Navigation using a laser range finder for autonomous tractor (Part 2), Journal of JSAM 68 (1), 78-86, 2006
- 45) Shen, B., Satow, T., Hironaka, K., Zhang, S.: Development of laser crop row sensor for automatic guidance system of tractor-mounted implements, Journal of JSAM 70 (6), 90-96, 2008
- 46) 佐藤禎稔，宮本啓二，松田清明：三次元視覚センサによるキャベツ結球の形状計測と収穫適期判定，農機誌 63(1), 87-92, 2001
- 47) Choi, C.H., Erbach, D.C., Smith, R.J.: Navigational tractor guidance system, Transactions of the ASAE 33 (3), 699-706, 1990

- 48) 石井一暢, 寺尾日出男, 野口伸: 学習機能を有した自律走行車両に関する研究 (第1報), 農機誌 56(4), 53-60, 1994
- 49) 石井一暢, 寺尾日出男, 野口伸: 学習機能を有した自律走行車両に関する研究 (第2報), 農機誌 57(6), 61-67, 1995
- 50) 石井一暢, 寺尾日出男, 野口伸: 学習機能を有した自律走行車両に関する研究 (第3報), 農機誌 60(1), 51-58, 1998
- 51) 石井一暢, 寺尾日出男, 野口伸, 木瀬道夫: 学習機能を有した自律走行車両に関する研究 (第4報), 農機誌 60(2), 53-58, 1998
- 52) 井上慶一, 大塚寛治, 杉本光穂, 村上則幸, 黎文: 自律走行のための GPS とジャイロのカルマンフィルタによるセンサーフュージョン技術, 農機誌 61(4), 103-113, 1999
- 53) Pinto, F.A.C., Reid, J.F., Zhang, Q., Noguchi, N.: Vehicle guidance parameter determination from crop row images using principal component analysis, Journal of agricultural engineering research 75, 257-264, 2000
- 54) 木瀬道夫, 野口伸, 石井一暢, 寺尾日出男: RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット (第1報), 農機誌 63(5), 74-79, 2001
- 55) 木瀬道夫, 野口伸, 石井一暢, 寺尾日出男: RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット (第2報), 農機誌 63(5), 80-85, 2001
- 56) 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3報), 農機誌 64(2), 102-110, 2002
- 57) Inoue, K., Murakami, N., Miyaura, S.: A Modeling of a movement of a semi-crawler tractor and an adaptive operational steering control, automation technology for Off-Road Equipments 2004, American society of agricultural engineers, USA. ISBN 1-892769-45-X: 348-359
- 58) ビートハーベスタ取扱説明書, 東洋農機株式会社, 2008

- 59) ビートハーベスタ取扱説明書, 日農機製工株式会社, 2008
- 60) 飯澤理一郎: 北海道農業動向解析, 農機誌 68(5), 9-12, 2006
- 61) 十勝農業協同組合連合会: 十勝の農業 2005, 1, 2005
- 62) 農業センサス: 農業統計調査事務所, 2005
- 63) 田中孝: 新版農業動力学, 三点リンクヒッチ, 文永堂出版株式会社, 171-176, 1995
- 64) 安居院猛, 中嶋正之: FFT の使い方, 産報出版株式会社, 39, 149-153, 1982
- 65) 玉城勝彦, 瀬川敬, 澁谷幸憲, 飯島渡: 傾斜草地における広幅施肥作業に向けた履帯車両の自動走行制御技術 (第 2 報), 走行速度制御の向上, 農機誌 68(3), 65-71, 2006
- 66) 近藤文治: 基礎制御工学, 森北出版社, 162-164, 1980
- 67) Alcaraz, J.M., Yamashita, J., Sato, K.: Development of a trailer-mounted mechanical drawbar control system for a tractor-trailer combination operation in greenhouse, Journal of JSAM 70 (2), 80-89, 2008
- 68) 岡本嗣男: 生物生産のための制御工学, 朝倉書店, 18-19, 2003
- 69) 金子敏夫: JIS に基づく油圧回路図の見方・書き方 (第 2 版) オーム社, 108, 1985