

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

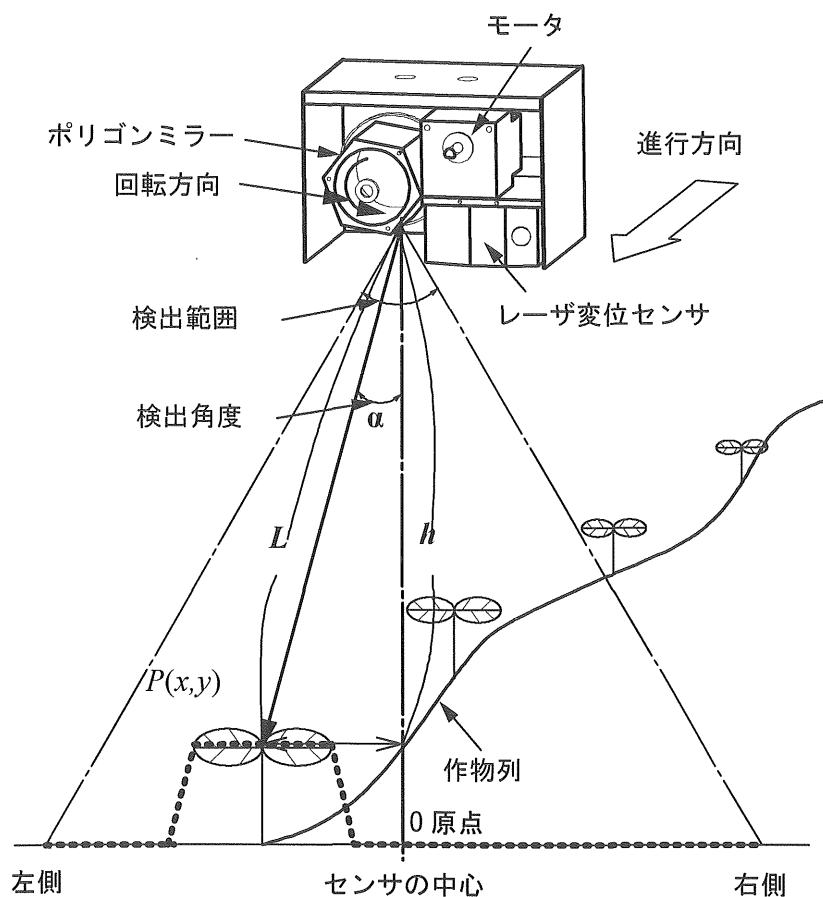


図 3.1 作物列センサの対象物検出原理

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

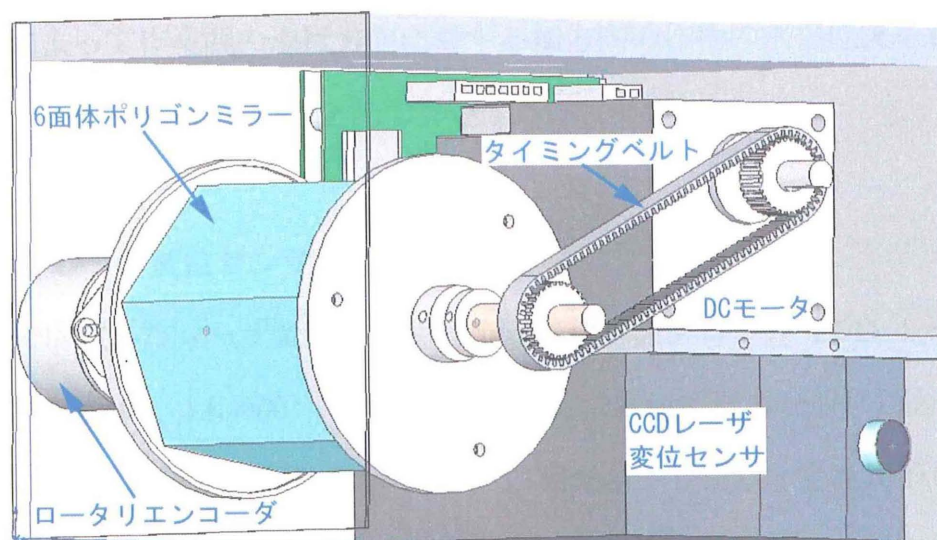


図 3.2 作物列センサの内部構造



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⁾。点線はレーザー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ー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ーが用いられている。

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

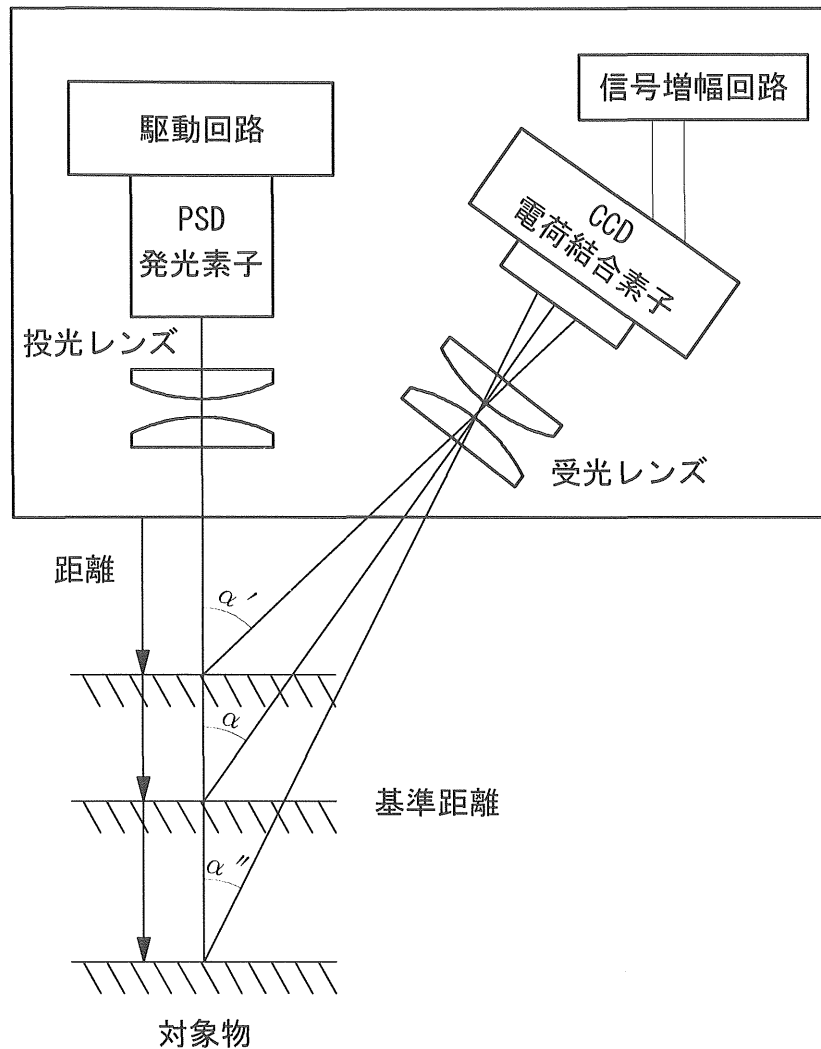


図 3.4 レーザ変位センサの距離計測原理

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 μm , 0.3 mm であり、高精度モードではそれぞれ 0~450 mm, 10 μm , 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	± 250 mm	± 100 mm
スポット径	約 $\phi 0.3$ mm(基本距離にて)	約 $\phi 0.7$ mm(基本距離にて)
分解能	50 μm	10 μm
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 $^{\circ}\text{C}$	
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 6 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。

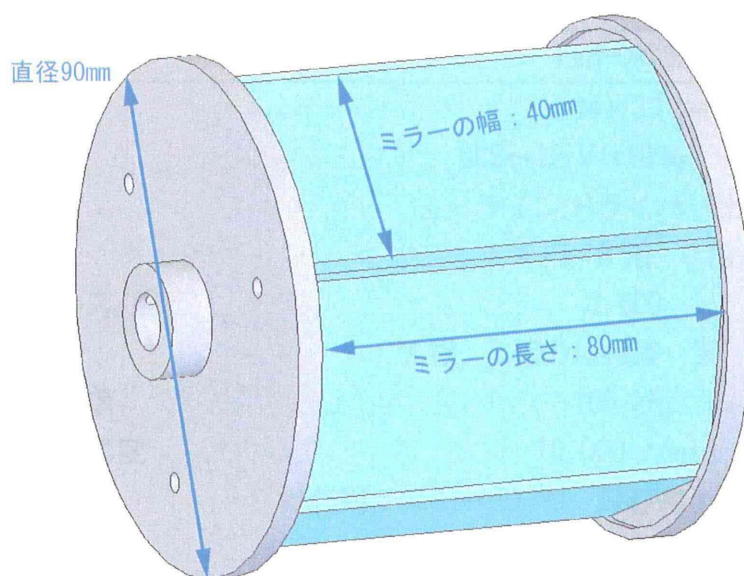


図 3.5 試作したポリゴンミラーの形状

3.2.3 ロータリエンコーダ

レーザ変位センサのレーザ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°回転するごとに出力される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	ラインドライバー出力
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 デジタル入出力ポート主要諸元

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。

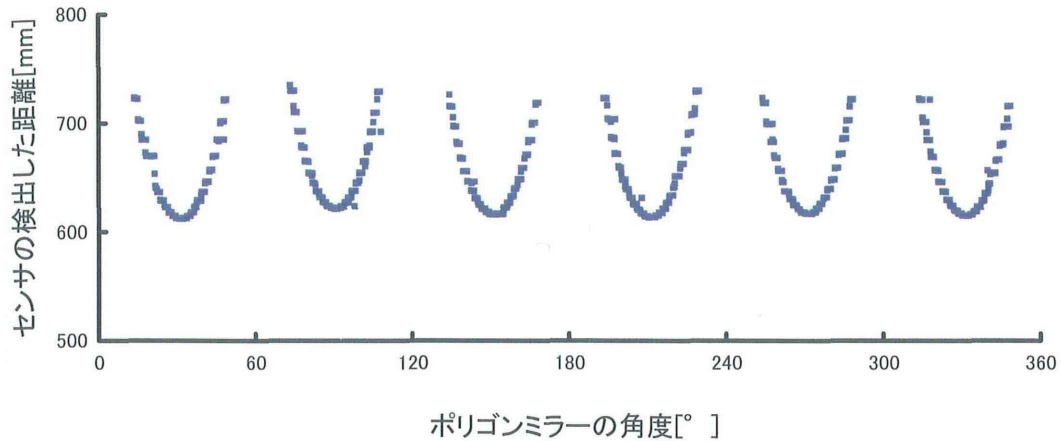


図 3.6 ポリゴンミラー1回転の距離計測波形

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

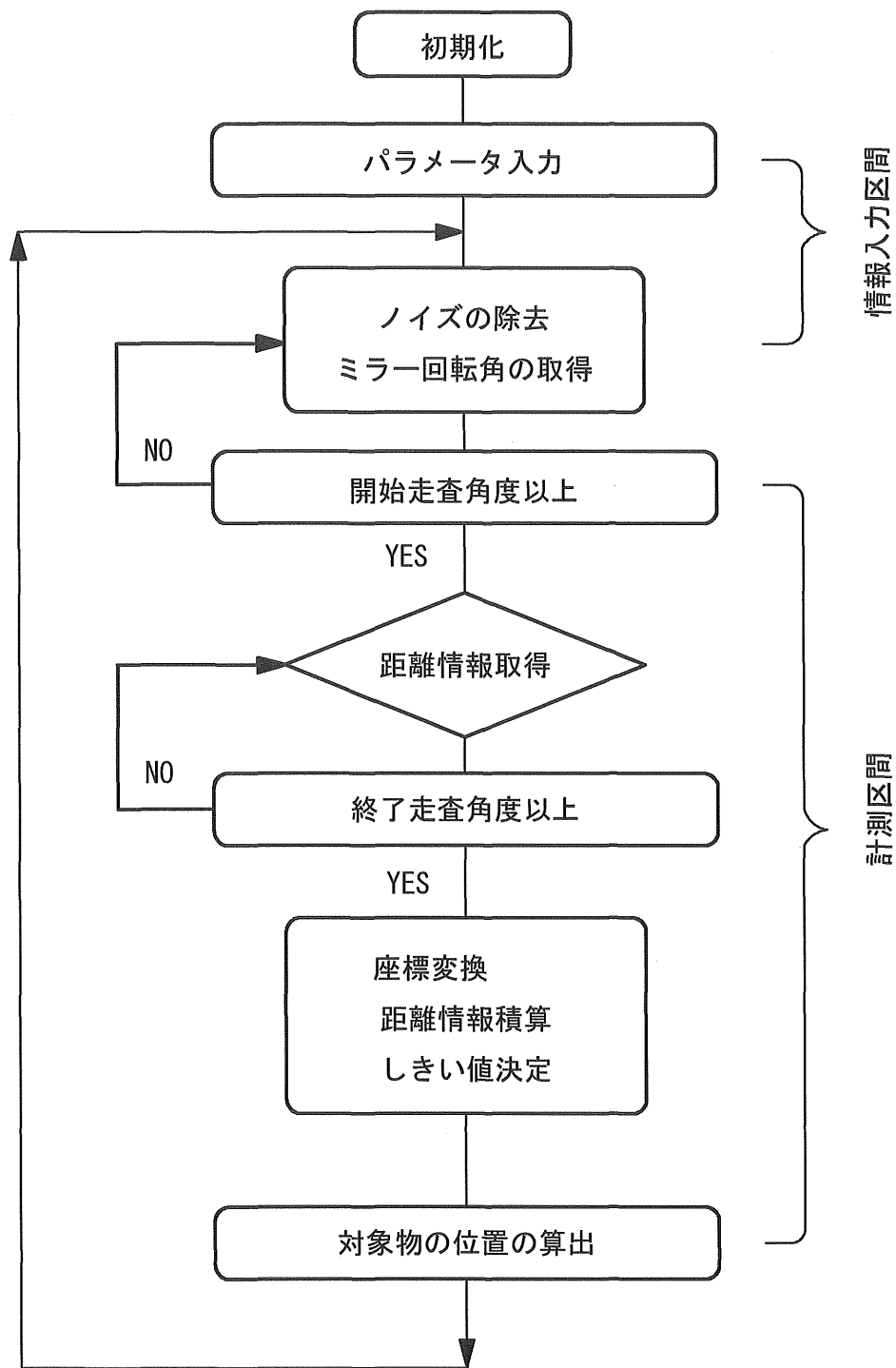


図 3.7 対象物の位置検出のアルゴリズム

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]

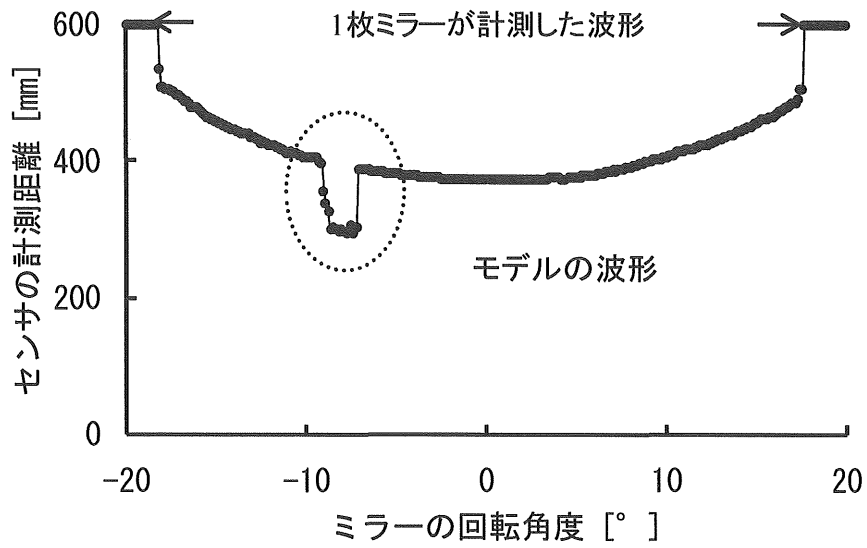
L : レーザ変位センサの計測距離[mm]

α : 検出角度[°]

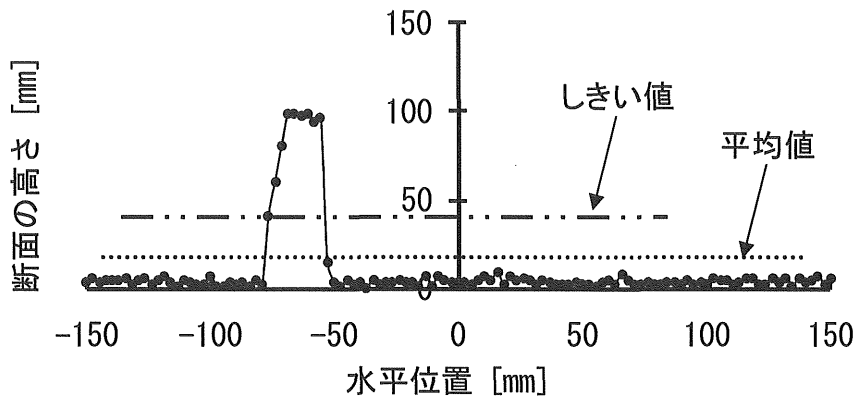
したがって、作物列センサはその下方を通過する作物の株ごとに、その水平位置 x を計測し、連続的に現れる株の作物列の位置を計測することができる。

3.3.3 作物列の位置検出法

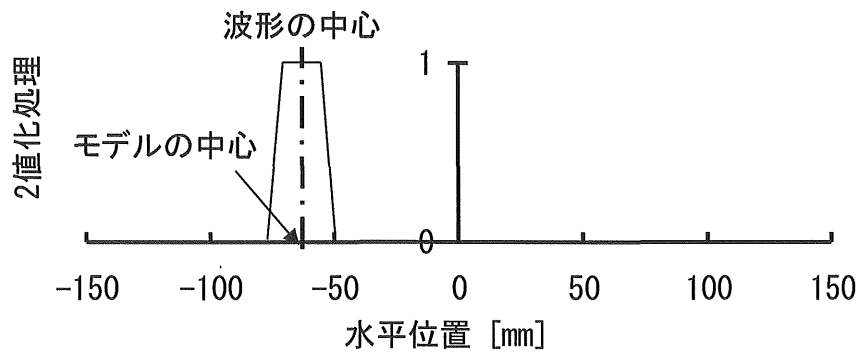
図 3.1 に示したように、センサの左側に 2 葉の状態の作物モデルが存在する場合、ミラー1枚が走査したときのセンサの計測波形は図 3.8 の a) に示すようになる。その距離データを 3.2)式と 3.3)式によって極座標から直交座標系に変換すると図 3.8 の b) のようになる。このような計算によって、土壌表面と作物の断面形状が求められ、その波形を見るとセンサがその作物を検出している位



(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

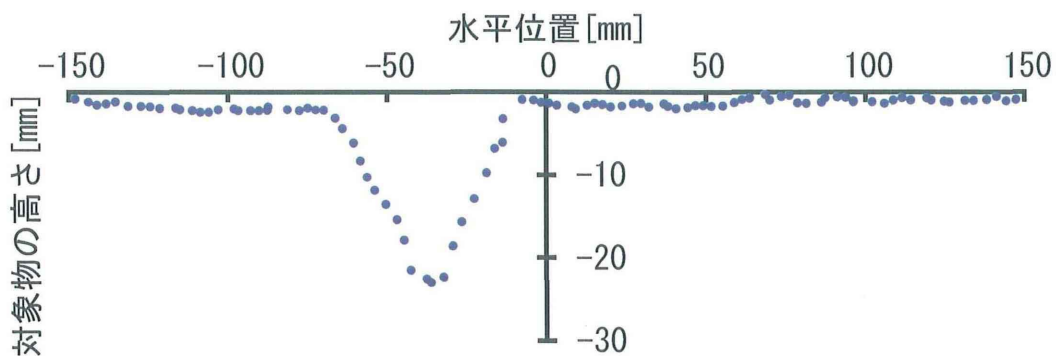


図 3.10 V 字モデルの断面形状の計測波形

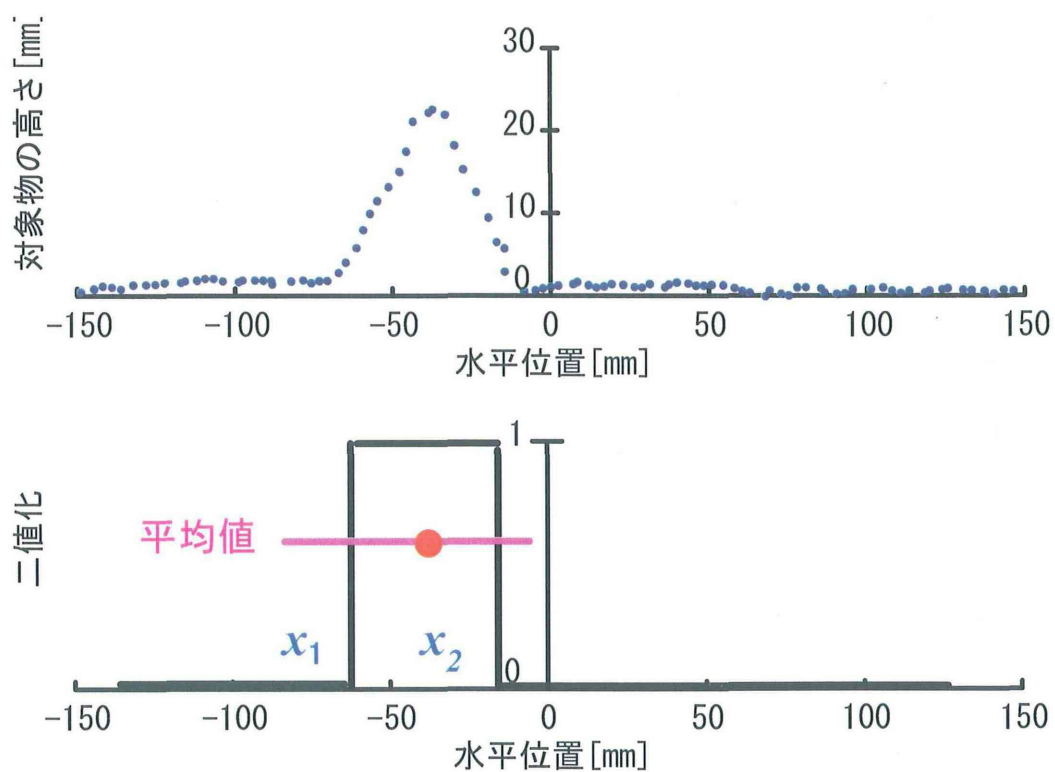


図 3.11 V 字モデルの位置検出原理

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 るように設置す 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 箇所で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。

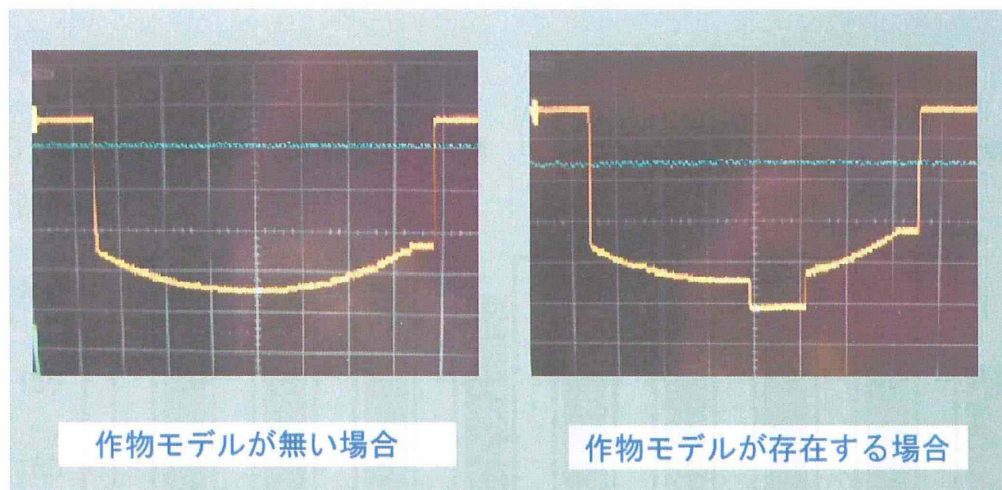


図 3.12 作物モデルの計測有無の波形の違い

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。

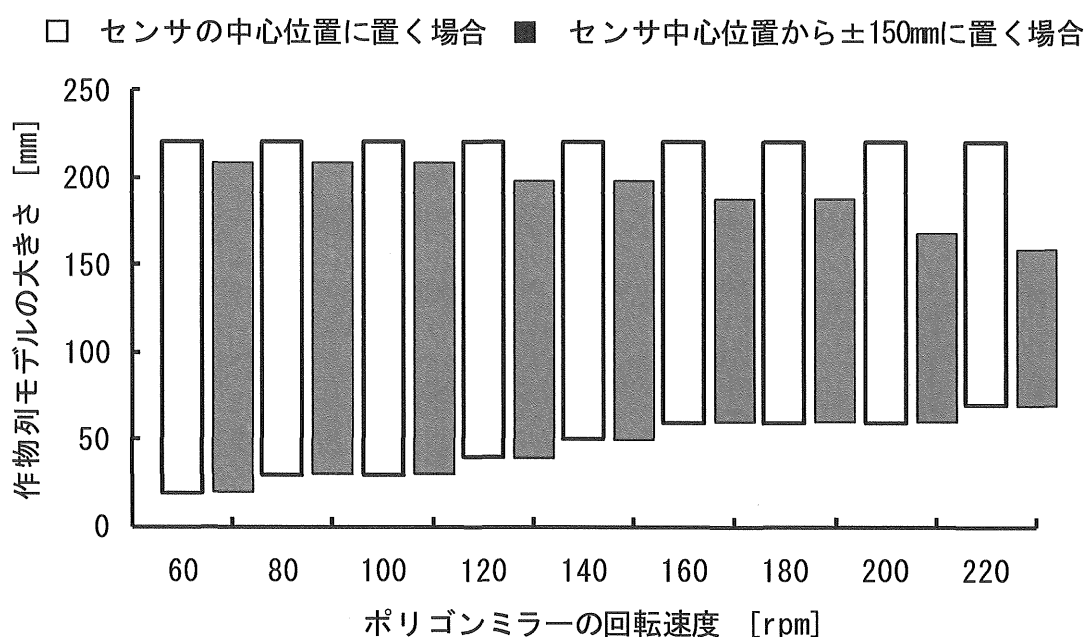


図 3.13 ポリゴンミラーの回転数と作物列センサが計測できる作物モデルの大きさの関係

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。