Title	直播テンサイ用自動間引き・除草機の開発に関する研究
Author(s)	寺脇, 正樹
Citation	北海道大学大学院農学研究科邦文紀要, 26(2), 255-316
Issue Date	2004-12-27
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/5634
Туре	bulletin (article)
Note	北海道大学博士論文(2004) Doctorial thesis submitted to the Graduate School of Agriculture, Hokkaido University (2004)
Additional Information	There are other files related to this item in HUSCAP. Check the above URL.
File Information	26(2)_283-302.pdf



C. 間引き・除草シミュレーションの方法

間引き・除草ミュレーションは前章の識別実験で得られたテンサイの識別正答率89.7%と雑草の識別正答率91.0%を用いた場合およびテンサイの識別正答率、雑草の識別正答率を変化させた場合について行った。なお、全てのシミュレーションは平均株間120mm(うね方向の標準偏差30mm、うね直交方向の標準偏差20mm)、目標株間を240mmとして行った。

シミュレーション1は、テンサイの識別正答率 89.7%、雑草の識別正答率 91.0%を用いて、強制間引き距離と間引き・除草後の株間距離の関係および雑草割合と間引き・除草精度の関係を明らかにすることを目的として実施した。雑草割合は、テンサイ1個体当たりの雑草の数を百分率で定義し、0、100、200、300、400、500、600%とした。間引き時期におけるテンサイと雑草の大きさを考慮すると、雑草割合が600%を超えた場合、カメラの視野の範囲内がテンサイと雑草で埋め尽くされてしまう。この状態では、テンサイ個体と雑草の識別が最早不可能であるため、雑草割合の上限値を600%に決定した。

シミュレーション結果は,間引き・除草後のテンサイの平均株間,目標株間からの偏差の2乗平均の平方根(以下,目標株間からの偏差のr.m.s.とする),テンサイの分布およびテンサイ株数比で示した。テンサイ株数比は,間引き・除草後に残されたテンサイ個体数をテンサイおよび雑草の識別正答率100%の場合と比較した値と定義した。

シミュレーション 2 は,テンサイ,雑草の識別正答率と間引き・除草精度の関係を明らかにすることを目的として実施した。テンサイの識別正答率を 80, 85, 90, 95 および 100%の 5 段

階, 雑草の識別正答率を90,92,94,96,98 および100%の6 段階に変化させて、シミュレーションを行った。これらの識別正答率の設定は前章の結果に基づいている。全ての条件においてテンサイ個体数は5,000 個体としたので、模擬テンサイ列は長さ100 mの4うね分に相当する。雑草割合は、前章で使用した画像を調査した結果、間引き時期においてテンサイ1個体当たり約3個体の雑草が存在していたため、雑草割合は300%に設定した。強制間引き距離は後述するシミュレーション1の結果より100 mmに設定した。2つのシミュレーションの各決定条件を、表3.2にまとめる。

D. 結果および考察

a. テンサイ,雑草の識別正答率と間引き・ 除草精度

シミュレーション1による,間引き・除草後の平均株間,強制間引き距離および雑草割合の関係を図3.4に示す。平均株間は,強制間引き距離を一定にすると,雑草割合の増加とともに大きくなった。雑草割合の増加とともにテンサ

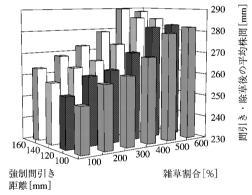


図3.4 間引き・除草後の平均株間と雑草割合, 強制間引き距離の関係

表3.2 シミュレーション条件一覧

	Simulation 1	Simulation 2
テンサイ個体数 (個)	5000	5000
雑草割合(%)	$0 \sim 600$	300
テンサイ識別正答率(%)	89.7	80,85,90,95,100
雜草識別正答率(%)	91.0	90,92,94,96,98,100
目標株間(mm)	240	240
強制間引き距離(mm)	100,120,140,160	100

イとして誤識別される雑草の個体数が増えるこ とになる。この場合,本来残されるべきテンサ イが間引かれる可能性が高くなり、欠株が増え る。それゆえ、雑草割合の増加とともに平均株 間が大きくなったと考えられる。また、雑草割 合を一定にした場合,強制間引き距離の増加と ともに平均株間は大きくなった。平均株間の最 小値は、雑草割合100%、強制間引き距離100 mm 時の251 mm であり、最大値は雑草割合 500%, 強制間引き距離 160 mm 時の 290 mm であった。間引き・除草後の目標株間を 240 mm に設定したので、雑草割合100%、強制間引き距 離 100 mm 時の 251 mm は平均株間の点から すれば、ほぼ目標通りの間引き・除草作業を行 なえたと考えられる。間引き・除草後の平均株 間について分散分析を行なった結果、間引き・ 除草後の平均株間と強制間引き距離、雑草割合 との間には危険率1%で有意な差が認められ た。この結果より、強制間引き距離、雑草割合 共に間引き・除草後の平均株間に影響を与える ことが明らかとなった。

図 3.5 に,目標株間からの偏差の r.m.s. と強制間引き距離,雑草割合の関係を示す。目標株間からの偏差の r.m.s. も平均株間と同じ傾向を示した。目標株間からの偏差の r.m.s. の最小値は雑草割合 100%,強制間引き距離 100 mm時の 64 mm であり,最大値は雑草割合 600%,強制間引き距離 160 mm 時の 127 mm であった。目標株間からの偏差の r.m.s. の最小値でも64 mm と大きくなった。これは雑草をテンサイ

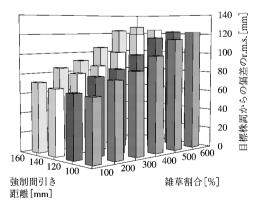
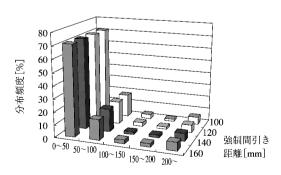


図 3.5 目標株間からの偏差の r.m.s. と雑草割合, 強制間引き距離の関係

と誤識別されることにより生じる欠株の影響が大きいと考えられる。目標株間からの偏差の r. m.s. について分散分析を行なった結果,目標株間からの偏差の r.m.s. と強制間引き距離,雑草割合の間には危険率 1%で有意な差が認められた。この結果より,強制間引き距離,雑草割合共に目標株間からの偏差の r.m.s. に影響を与えることが明らかとなった。

図 3.6 に、雑草割合が 300%時の間引き・除草 後のテンサイの分布頻度と強制間引き距離,雑 草割合の関係を示す。間引き・除草後に目標株 間である 240 mm から絶対値で 0~50 mm, 50 $\sim 100 \text{ mm}, 100 \sim 150 \text{ mm}, 150 \sim 200 \text{ mm} \text{ as } \text{\sharp}$ び200 mm 以上に存在するテンサイの分布頻 度を計算した。間引き・除草後のテンサイの分 布は約70%が目標株間240 mm から±50 mm 以内存在していた。強制間引き距離ごとに見る と、 目標株間から 0~50 mm に分布するテンサ イは強制間引き距離 160 mm 時で 71.3%, 100 mm 時でも同じく 71.3%となる。 目標株間から 100~150 mm までは強制間引き距離が変化し ても分布頻度はほぼ変わっていない。しかしな がら, 目標株間から 150~200 mm に分布する テンサイは強制間引き距離 160 mm 時で 2.8 %, 100 mm 時で 1.6%となった。また, 目標株 間から 200 mm 以上に分布するテンサイは強 制間引き距離 160 mm 時で 6.5%, 100 mm 時 で 5.6%となった。

表3.3 にシミュレーション結果の一例を示す。この例では, No.1 のテンサイを基準株とす



目標株間からの距離[mm]

図 3.6 雑草割合 300%における間引き・除草後の テンサイの分布頻度

No	x 座標 (mm)	植物名	識別結果	強制間引き 100	距離(mm) 160
1	296.1	テンサイ	テンサイ	 残す	 残す
2	308.3	テンサイ	テンサイ	間引く	残す
3	320.6	テンサイ	雑草	除草	除草
4	334.3	テンサイ	テンサイ	残す	残す

表 3.3 シミュレーション1の結果例

る。強制間引き距離が160 mmの場合,No.2のテンサイは強制間引き距離内に存在するので間引かれることになる。強制間引き距離が100 mmの場合,No.2のテンサイは走査範囲内にあり,残すべきテンサイの候補となる。この例の場合,目標株間に最も近いテンサイはNo.3であるが,雑草と誤識別され,除草される。それゆえ,強制間引き距離が160 mmの場合,次に残されるテンサイはNo.4となり,株間は383 mmとなった。一方,強制間引き距離が100 mmの場合,No.3が除草されるので次に残されるテンサイは走査範囲内に存在するNo.2となる。また,No.4も残されることになる。この場合,株間はそれぞれ122 mm,261 mmとなった。

このように、テンサイが雑草と誤識別される 可能性がある場合、強制間引き距離を小さくす ることにより、精度良く間引き・除草作業を行 なうことが可能である。強制間引き距離が100 mm の場合,走査範囲の最大値は基準株位置か らの 100 mm から 240 mm 間の 140 mm, 強制 間引き距離 が160 mm の場合, 160 mm から 240 mm 間の 80 mm となる。 目標株間位置に最 も近い位置に存在しているテンサイが雑草と誤 識別された場合, テンサイの走査範囲内で残す べきテンサイを探すことになるので,強制間引 き距離が160 mm の場合, 走査範囲が80 mm と小さいために、残すべきテンサイが存在しな い可能性が高くなる。このため、強制間引き距 離を160 mm に設定した時、目標株間からはず れて分布するテンサイの割合が多くなると考え られた。

以上を考慮すると、強制間引き距離を100 mm とした場合、残されたテンサイは平均株間の240 mm から最もばらつきの小さい範囲内に、目標株間からの誤差も小さく分布した。強

制間引き距離をさらに小さくすれば、残されるテンサイの分布はより平均株間に近く、目標株間からの誤差も小さくなることが予想される。しかしながら、実際の播種間隔は120 mmであり、テンサイの根部や葉部の成長を考慮すると、設定できる最小の強制間引き距離は100 mm程度であろう。従って、本研究では適当な強制間引き距離は100 mmであると結論付ける。

現状での識別正答率を用いた場合のテンサイ 株数比の結果を、図3.7に示す。ここでは、強 制間引き距離を100 mm に設定した。テンサイ 株数比は雑草割合が増加するとともにほぼ直線 的に減少した。雑草割合が400%時でテンサイ 株数比は90.6%となった。テンサイの識別正答 率は89.7%であるので、雑草率が400%以下で あれば、テンサイの識別正答率以上の作業精度 で間引き・除草を行うことが可能であることが 明らかとなった。

b. 強制間引き距離と間引き後の株間距離の 関係

シミュレーション2によるテンサイ,雑草の 識別正答率とテンサイ株数比の関係を図3.8に 示す。テンサイ株数比は雑草識別正答率の増加 にともない,直線的に増加している。

そこで, テンサイ株数比を目的変数, テンサ

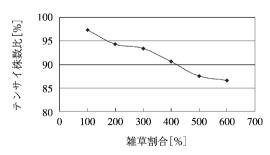


図3.7 テンサイ株数比と雑草割合の関係

イ識別正答率と雑草識別正答率を説明変数として重回帰分析を行った。テンサイ株数比を Z,テンサイ識別正答率を Scr,雑草識別正答率を Wcr とすると,重回帰式は式 (3.1) と求められる。

Z = 0.17 Scr + 0.79 Wcr - 4.61(3.1)テンサイ株数比が大きいということは、テン サイの損失が少ないということで, より高精度 な間引き・除草作業が行なわれていることを表 している。そして、重回帰式における2つの説 明変数の係数を比較すると, 雑草識別正答率の 係数の方が大きかった。このことは、間引き・ 除草作業の精度は雑草の識別正答率の影響の方 が大きいということである。この理由として, 考案した間引き・除草アルゴリズムでは、雑草 をテンサイと誤識別された場合, 雑草でありな がら残す株と判定されることが考えられる。雑 草割合を300%と設定したように、間引き時期 のほ場ではテンサイ個体数より雑草個体数の方 が多い。雑草の絶対数が多いため、数パーセン トの識別正答率の違いであってもテンサイと判 定される雑草個体は相当数に上る。雑草割合を テンサイ個体数の300%である15,000個体に 設定した場合、雑草の識別正答率が1%減少す ると、雑草をテンサイと誤識別され、残される 可能性のある雑草が150個体増えることにな る。このように雑草が残される場合,つまり, 雑草がテンサイと誤識別された場合, 本来残さ れるべきテンサイが間引かれることになり、テ ンサイの損失となる。

雑草の識別正答率を100%と仮定すると、これは雑草を完全に除草することができることを意味するので、ほ場内に全く雑草が存在していないことと同義である。つまり、雑草が残されるべきテンサイの判定に含まれないという点において雑草割合0%とすることができる。よって、テンサイ株数比は全てテンサイの識別正答率が100%の場合、テンサイの識別正答率が80%であっても、テンサイ株数比は97.5%となり、20%のテンサイ(約1,000個体)を雑草と誤識別したにもかかわらず、テンサイの損失は2.5%程度で済む。

以上の結果より、テンサイと雑草の識別において重要なことは、雑草を高精度に識別できるアルゴリズムを開発することと結論付けられた。実際、図3.8より、テンサイの識別が80%と低くても、雑草の識別正答率が100%であれば、テンサイ株数比は97.5%程度であり、テンサイと雑草の識別正答率がそれぞれ95%、96%の場合と同等の精度をもつことが分かる⁶¹⁾⁶²⁾。

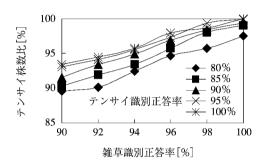


図 3.8 識別正答率の変化とテンサイ株数比の関係

E. 本章のまとめ

本章では、テンサイおよび雑草の識別正答率とテンサイ株損失の関係、ほ場でのそれらの識別において考慮しなければならない条件を明らかにするため、開発した間引きアルゴリズムによるコンピュータシミュレーションをおこなった。

現在までに得られているテンサイと雑草の識別正答率(89.7%,91.0%)を用いて間引き・除草シミュレーションを行った。株間平均,目標株間からの偏差の r.m.s. およびテンサイの分布結果より,平均株間が120 mm,目標株間240 mm という条件の下では,適当な強制間引き距離は100 mm であり,雑草率が400%以下であれば,テンサイの識別正答率以上の作業精度で間引き・除草を行うことが可能であることが明らかとなった。また,テンサイ,雑草の識別正答率を変化させて間引き・除草シミュレーションを行った結果,間引き・除草作業の精度はテンサイの識別正答率よりも雑草の識別正答率に依存していることが明らかとなった。

Ⅳ. 自動間引き・除草機の開発

A. 本章の目的

現在市販されている除草機は主にうね間に作用するものが主流となっているので、市販機を改良して自動間引き・除草作業に使用することは困難である。よって、間引き・株間除草作業に適応した新たな機構および機械を新たに開発する必要がある。このため、本研究では自動制御の間引き・除草機の開発を目的とした。これには、制御システムの開発も付随される。

本章では,自動間引き・除草作業を行う上で 必須となる間引き・除草機構,間引き・除草作 業部および間引き・除草機の設計および開発に ついて述べる。

B. 間引き・除草作業部

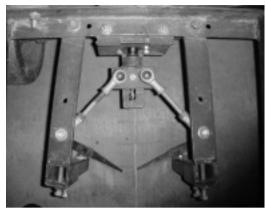
a. 間引き・除草機構

自動間引き・除草機作業では、間引き刃は除草のため常に土に接し、残すべきテンサイ位置にくると間引き刃が逃げてテンサイに触れないような構造を持つ必要がある。本研究では、油圧シリンダとリンク機構を用いて間引き・除草 刃を開閉させる機構を開発した。図 4.1 に間引き・除草機構を示す。

油圧シリンダ(yuken 社製, D04-50, シリンダストローク50 mm)と間引き刃はリンクを介して連結され、油圧シリンダが伸縮することにより、開閉アームに取り付けられた間引き・除草刃が開閉する。油圧シリンダの仕様を表4.1に示す。

間引き時期のテンサイ株の最大径は約150 mm以下であること,間引き・除草作業部はトラクタの後部に取り付けることを想定しているので,うね合わせが難しいためテンサイ株と間引き刃にある程度余裕を持たせなければならないことを考慮し,間引き刃の開距離を120 mmとした。図4.2 に間引き・除草機構の模式図を示す。この図は間引き・除草機構の片側のみを示し,油圧シリンダのロッドが P_{of} 移動し,開閉アームが角度 θ 開いた場合の平面図を示している。

開閉アームはL字型で、LAから鉛直方向に伸びた下端に間引き・除草刃が取り付けられて



(a) 上方

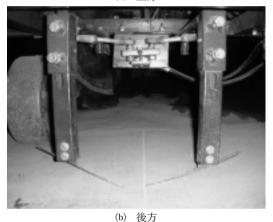


図 4.1 間引き・除草機構

表 4.1 油圧シリンダの仕様

製造会社	t	yuken
型番		D 04-50
ストロー	- ク	50 mm
シリンタ	"内径	28.6 mm
ピストン	/径	32 mm
必要油量	<u>.</u>	32 cc

おり、間引き・除草刃の先端部分は LC を中心とし、半径 l_{AC} の円上にある。 LC,LD は油圧シリンダの伸縮により、回転が可能な回り対偶である。 LA から LC までの距離を l_{AB} ,LB から LC までの距離を l_{BC} ,開き幅を d,LD 周りの回転角度を θ ',連接リンクの長さを l_{BD} および LC から LD までの水平距離を h とすると油圧シリンダロッドの移動距離 P_{Of} と開閉アームの回転角度 θ の関係は式 (4.1) であらわすことがで

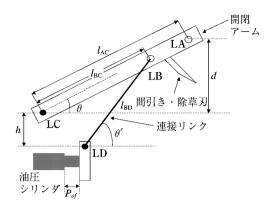


図 4.2 間引き・除草機構の模式図

きる⁶³⁾。

$$P_{of} = l_{BC} (\cos \theta - 1) + \sqrt{l_{BD}^2 - h^2} - l_{BD} \cos \theta \cdot$$

$$\arcsin \left(\frac{l_{BD} \sin \theta + h}{l_{BD}}\right)$$
(4.1)

油圧シリンダロッドの最大変位量 50 mm の時,開き幅 d が 60 mm となるように各部の距離を決定した。間引き・除草刃の先端位置と LA は LC を中心にした同心円上にあるので,間引き・除草刃の開き幅は d と等しくなる。この場合,開き幅 d が 60 mm になるように設計したため,間引き・除草刃の片側の開き幅も 60 mm となる。なお,開き幅 d が 60 mm になる時,開角度 θ は 11.5° となる。このようにして決定した間引き・除草機構の寸法を図 4.3 に示す。

b. 間引き・除草機構の力学

間引き・除草刃は土壌中で開閉するため、LA

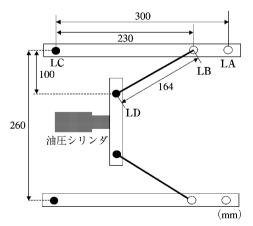


図4.3 間引き・除草機構の寸法

での作用力が開閉能力に大きく影響すると考えられる。図 4.4 に間引き・除草機構中に働く力の関係を示す。油圧シリンダが押す力を F_b とすると、LD において連接リンクに働く力 F_b は F_b を分解することにより、

$$F_b = \frac{F_p}{\cos \theta'} \tag{4.2}$$

となる。

LB における回転方向の分力Fは、

$$F = F_b \sin(\theta - \theta')$$

$$= \frac{F_p \sin(\theta - \theta')}{\cos \theta'}$$

$$= (\tan\theta' \cdot \cos\theta - \sin\theta) \cdot F_p \qquad (4.3)$$

$$ZZC$$
, $\tan\theta' = \frac{h + l_{BC}\sin\theta}{\sqrt{l_{BD}^2 - (l_{BC}\sin\theta + h)^2}}$ CB

から,

$$F = \left(\frac{h + l_{BC}\sin\theta}{\sqrt{l_{BD}^2 - (l_{BC}\sin\theta + h)^2}}\cos\theta - \sin\theta\right) \cdot F_p$$
(4.4)

となる

よって、LA における回転方向の分力 F_a は式 (4.5) で表すことができる 64 。

$$F_{a} = \left(\frac{h + l_{BC}\sin\theta}{\sqrt{b^{2} - (l_{BC}\sin\theta + h)^{2}}}\cos\theta - \sin\theta\right) \cdot \frac{l_{BC}}{l_{AC}} \cdot F_{p}$$

$$(4.5)$$

式 (4.5) の lsc, lsp, h, lac に設計した各部 の長さを代入し, θ の最大値 (11.5°) までの作用力の比 (F_a/F_p) を算出した。開角度と作用力の比の関係を図 4.5 に示す。

開き始めでの作用力の比は 0.75 であり, 開き

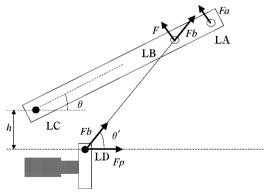


図 4.4 間引き・除草機構に作用する力の関係

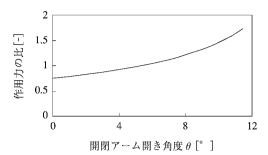


図4.5 開角度と比作用力の関係

角度が大きくなるとともに作用力の比は大きくなり、最大開き角度 11.5° 時で 1.7 となった。使用するトラクタの油圧の吐出圧力は 14.7 MPaであり、油圧シリンダのピストン断面積は 380 mm² であるため、 F_p は 5.6 kN となる。よって、開き始めでの LA における回転方向の力 F_a は約 4.2 kN となる。テンサイほ場の土壌硬度を考慮すると、この 4.2 kN は十分な力であると判断される。

c. 間引き・除草刃

図4.6,図4.7に間引き・除草刃の模式図および外観を示す。間引き・除草刃は長さ250 mmの鋼板を加工したものである。除草時には間引き・除草刃を閉じたまま走行する。この場合,土塊が間引き・除草刃上に留まることが考えられるので,進行方向に対して30°、土壌面に対して30°の角度を持たせている。間引き刃の上を通過する土塊がスムーズに流れるように,刃は刃長中央から刃先に向けて細くし,エッジを鋭利に加工してある。

d. 間引き・除草作業部の構成

前節で開発した間引き・除草機構を用いてほ場で実際に作業できる1うね用間引き・除草作業部のプロトタイプを開発した。図4.8,図4.9に開発した間引き・除草作業部の外観および模式図を示す。

間引き・除草作業部は $2000 \times 500 \text{ mm}$ の枠に取り付けた間引き・除草機構,油圧ソレノイドバルブ (yuken 社製 DSG-03-3 C 60-D 12-50),ゲージ輪,ロータリエンコーダ (小野測器社製 RP-432 Z) を取り付けた第 5 輪から構成されている。機体中央部にはトラクタの 3 点リンクヒッチに取り付けるためのヒッチ部を取り付け



(a) 上方



図 4.6 間引き・除草刃の外観

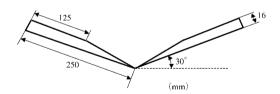


図 4.7 間引き・除草刃の模式図(上方)

た。使用した油圧ソレノイドバルブとロータリエンコーダの仕様を表 4.2, 4.3 に示す。

トラクタの外部油圧取出し口から油圧が供給され、油圧ソレノイドバルブにより油圧の流れ方向を制御することにより、間引き・除草刃を開閉することができる⁶⁵⁾。本研究ではトラクタ前方に画像取得用 CCD ビデオカメラを装着し、実際に間引き・除草作業を行う刃はトラクタ後方に取り付けられているため、刃の位置合わせを行う必要がある。位置合わせを行うため



(a) 上方



図4.8 間引き・除草作業部

に第5輪を用いて,正確に走行距離を計測した。 第5輪の車軸にはロータリエンコーダが取り付 けられており、第5輪と一体となってロータリ エンコーダの軸が回転する。第5輪は市販され ている一輪車用ゴムタイヤを利用した。外周は 静置状態で約1150 mm であった。本試作機は 作物列1列のみの作業を対象とした。テンサイ のうね間が 660 mm より, 間引き・除草機構は トラクタの中心から 330 mm 左側にずらした 位置に取り付けた。ゲージ輪は間引き・除草作 業部の高さを一定にすること、ロータリエン コーダ装着用第5輪が通過する土壌面を均一に することを目的として装着した。このため, 使 用した2つのゲージ輪と第5輪はトラクタの中 心から左右に 660 mm ずらした。トラクタの後 輪と同じ場所を通過するようにした。また、ゲー ジ輪は間引き除草刃と同様に高さを微調整でき

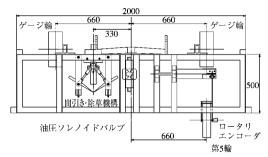


図 4.9 間引き・除草作業部の模式図

表 4.2 ロータリエンコーダの仕様

製造会社	小野測器
型番	RP-432 Z
光源	発光ダイオード
受光素子	フォトトランジスタ
応答周波数	$0 \sim 50 \text{ kHz}$
使用電源	DC 5 V \pm 0.25 V
消費電流	100 mA 以下
出力波形	"1" 4.5 V±0.5 V "0" 0.3 V

表 4.3 油圧ソレノイドバルブの仕様

製造会社	yuken
型番	DSG-03-3 C 60-D 12-50
最大流量	120 1/min
最高使用圧力	31.5 MPa
タンク側許容背圧	16.0 MPa

る構造となっている。第5輪は取り付け腕が垂直方向に上下できる構造となっているため,地表面の凸凹に適応できる。

C. 間引き・除草機の制御システム

a. 自動間引き・除草機の制御部

間引き・除草機はトラクタの前方に取り付けた画像取得用 CCD ビデオカメラ、識別・演算用パーソナルコンピュータ(IBM 社製 THIN-KPAD、Celelon400MHz、以下 PC とする)、機構制御用ワンチップコンピュータ(Microchip 社製 PIC16F877-20PT、20MHz、以下 PICとする)、画像キャプチャユニット、トラクタ後部に取り付けた間引き・除草作業部およびコントロールボックスからなる。コントロールボックスは自動・手動切り替えスイッチ、手動スイッチおよび電子回路から構成されている。図

4.10, 図 4.11 にコントロールボックスの外観および画像キャプチャユニットを示す。

ここで、試作した間引き・除草機による作業 の概要について述べる。トラクタ前方に装着し た CCD ビデオカメラにより画像を取得する。 取得した画像はキャプチャユニットを介して PC に送られる。PC は画像処理により識別を行 う。識別結果がテンサイであり、間引き・除草 アルゴリズムにより残すべきテンサイ株と判断 された場合には間引き・除草刃を開き, 刃がテ ンサイに触れない状態にする。CCD ビデオカメ ラから間引き・除草刃までの距離は固定値であ るため、第5輪で走行距離を測定することによ り、間引き・除草刃の作動タイミングを合わせ ることが可能となる。上記のように、自動間引 き・除草作業では、画像の取り込み、画像処理 によるテンサイと雑草の識別, ロータリエン コーダからのパルス数カウントおよび間引き・ 除草機構制御信号送出を行わなければならな



図4.10 コントロールボックス



図 4.11 画像キャプチャユニット

い。このうちリアルタイム処理が必要なロータリエンコーダからのパルス数カウントおよび間引き・除草機構の開閉制御については PIC を用いた。図4.12 に PIC 基盤の外観を示す。PIC 基盤はシリアルポート、8 ビットのパラレルポートを4つ持っており、本システムでは制御信号送出用、パルス入力用に2つのパラレルポートを使用し、PC との通信用にシリアルポートを使用した。

b. 制御アルゴリズム

図4.13に制御の概略図を示す。本システムではパルス数のカウントをPICで行っているため、PCはカウントされているパルス数を知ることができない。よって、PCがシリアル通信を介してPICからパルス数を受けるシステムとした⁶⁶⁾⁶⁷⁾。残すテンサイの位置の情報はPCからパルス換算でPICに送信される。しかしながら、PICはメモリーの制限上、数個の株位置情報しか保持できないため、株位置情報はまずPCの配列上に保持され、PICが保持している1つの動作(間引き・除草刃の開閉)が終了す

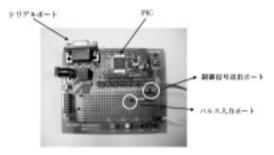


図 4.12 PIC 基盤の外観

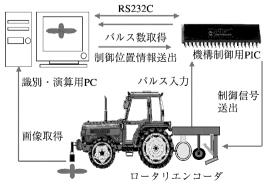


図 4.13 間引き・除草機の制御の流れ

るごとに、PC に対して次の動作情報の送信を要求し、その情報を PIC が受け取ることにより、間引き・除草作業を行う。

識別・演算ソフトの開発環境は、Borland 社製 Delphi 5.0 J professional である。PIC の制御 ソフトの開発環境は Microchip Technology 社 製 MPLAB Ver 5.7 であり、コンパイラとして CCS 社製 C コンパイラ PCM Ver 3.128 を用いた。コンパイルされた Hex ファイルを秋月電子通商社製ライティングソフト PIC Programmer Ver 2.8.6 を使用して PIC に書き込んだ⁶⁸⁾⁶⁹⁾。

図4.14(a)および(b)に PC および PIC の制御フローチャートを示す。PC が処理を開始すると、常に CCD ビデオカメラからの画像の取り込み、PIC からのデータ受信を待つ状態となり、間引き・除草作業の動作が終了したと判断された場合には PC 処理の終了となる(図4.14(a))。PIC が処理を開始すると割り込み処理待ちアイドルループに入る。PC と同様に間引き・除草作業が終了したと判断された場合にはPIC 処理の終了となる(図4.14(b))。

PC が CCD ビデオカメラからの画像を取り込んだ時のフローチャートを図 4.15 (a)に示す。本システムでは、画像の取り込みの間隔は自作識別ソフトウェアにより制御可能である。設定された間隔ごとにイベントを発生させることにより、自作識別ソフトウェアは CCD ビデオカメラからの画像を取り込むことができる。なお、アナログデータである CCD ビデオカメラ画像は画像キャプチャユニットによりデジタル化さ

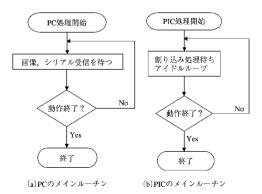


図 4.14 制御メインルーチンのフローチャート

れ、PC のメモリに格納される。

PC は画像を取り込むと PIC に対して'0'を送信する。 PIC 側はシリアルデータを受信するため,図 4.16 (b)に示すシリアルデータ受信割り

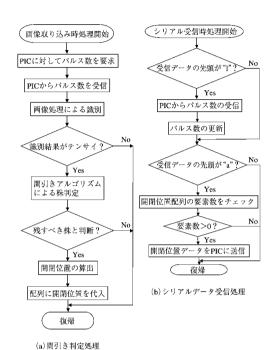


図 4.15 PC のサブルーチンのフローチャート

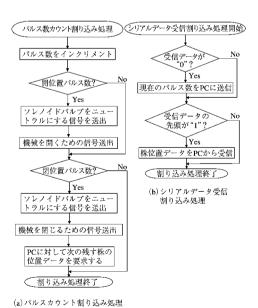


図 4.16 PIC の割り込み処理ルーチンのフロー チャート

込み処理を開始する。この場合, 受信したデー タは'0'のため、PIC がその時点で保持してい るパルス数を PC に送信する。この時、PIC は データの種類を識別するためデータの先頭に識 別用文字として'1'を付記する。PC は PIC から のデータを受信するため,図4.15(b)に示したシ リアル受信時処理を開始する。この場合,受信 データの先頭が'1'であるため、PIC からパル ス数が送られてきたものとし、パルス数を読み 取り、PC がそれまで保持していたパルス数を 更新する。パルス数を更新した後, 画像処理に よる識別を開始し、識別結果がテンサイであれ ば,前章で述べた間引きアルゴリズムによる株 判定を行う。残すべき株と判定された場合,保 持しているパルス数に基づき開閉位置を算出 し,この開閉位置情報を配列に代入する。識別 結果がテンサイでない場合, この処理は終了と なる。

PIC 側はロータリエンコーダからのパルスが Low から High に立ち上がると同時に図4.16(a)に示したパルスカウント割り込み処理を開始する。まず、パルス数をインクリメントし、開位置のパルス数であるかを判定する。開位置のパルス数であれば、油圧ソレノイドバルブをニュートラルにする信号を油圧ソレノイドバルブに送出した後に、間引き・除草機構を開くための信号を送出する。開位置でない場合は、閉位置のパルスであるか判定する。閉位置の場合には、油圧ソレノイドバルブをニュートラルにした後、間引き・除草機構を閉じるための信号を送出する。その後、PC に対して次の株位置

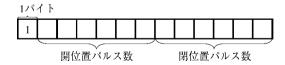


図 4.17 開閉位置情報のデータ構造

データを要求するために、PCに'a'を送信す る。PC がこの信号を受信した場合,図 4.15(b) に示した PC 側のシリアル受信時処理が開始さ れる。この場合, 受信データの先頭は 'a' となる ため, 開閉位置の配列をチェックし, その要素 数が 0 より大きい場合には、開閉位置情報を PIC 側に送信する。この時、PC はデータの種類 を識別するためデータの先頭に識別用文字とし て '1' を付記する。開閉位置情報のデータ構造を 図 4.17 に示す。開閉位置パルス数はそれぞれ 6 桁の整数で表現されている。PIC側がこのデー タを受信すると、図4.16(b)に示したシリアル受 信時処理を開始する。受信データの先頭が'1'で あるので, PC から送られる株位置を受信し, 処 理の終了となる。表 4.4 にシリアル通信で用い た識別記号と作業内容の一覧を示す。

図 4.18 に本機の電気・油圧回路を示す。電源にはトラクタのバッテリを使用した。PIC およびロータリエンコーダは 5 V で作動するため,3端子レギュレータを使用し,12 V から 5 V に減圧した。本回路には自動・手動切り替えスイッチ,手動スイッチを備えている。手動の場合,手動スイッチを切り替えることにより,トラクタからの 12 V 電圧が直接油圧ソレノイドバルブに作用し,油圧シリンダが伸縮する。自動の

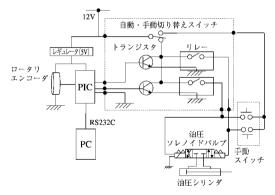


図 4.18 間引き・除草機の電子・油圧回路

表 4.4 シリアル通信で用いた識別記号と作業内容一覧

	$PC \rightarrow PIC$	$PIC \rightarrow PC$
0	パルス数の要求	_
1	テンサイ位置データの送信	パルス数の送信
a	-	テンサイ位置データの要求

場合は、PIC からの制御信号が送出されることにより、油圧シリンダが伸縮する。しかしながら、PIC からの 5 V 制御信号では油圧ソレノイドバルブを直接駆動することは不可能であるので、トランジスタにより 5 V 制御信号を 12 V に増幅した後、リレーを介して油圧ソレノイドバルブを駆動する。

D. 本章のまとめ

本章では間引き・除草機構, 間引き・除草作業部および間引き・除草機の開発について述べた。

開発した間引き・除草機構は油圧シリンダにより、開閉アームに取り付けられた間引き・除草刃が開閉する。間引き・除草刃の開き幅は120mmに設計した。

間引き・除草作業部は間引き・除草機構,油 圧ソレノイドバルブ,ゲージ輪,ロータリエン コーダを装着した第5輪から構成されている。 また,間引き・除草機はCCDビデオカメラ, PC,PIC,画像キャプチャユニット,間引き・ 除草機およびコントロールボックスから構成されている。PICはロータリエンコーダのパルスカウントおよび油圧ソレノイドバルブへの制御信号送出のために使用される。PCとPICが通信を介してパルス数を共有することにより,間引き・除草刃を制御することができるアルゴリズムを開発した。また,自動制御のための電子・ 油圧回路および制御アルゴリズムも開発した。

V. 自動間引き・除草機の性能試験

A. 本章の目的

本章では開発した自動間引き・除草機の性能を検討した。まず、基本的な性能として間引き・除草刃の開閉時間、制御信号を送出してから間引き・除草刃が反応するまでの反応時間を調べた。室内実験を行うことにより、CCDビデオカメラ取り付け位置、ロータリエンコーダの距離測定性能、間引き・除草刃の開閉位置精度および間引きアルゴリズムの性能を検討した。これら2つの実験結果を考慮し、間引き時期のテンサイを用いてほ場実験を行った。これら実験の結果より、試作した自動間引き・除草機の性能を評価した。

B. 自動間引き・除草機の基本的性能 a. 性能試験の目的

間引き・除草機構の基本的性能を明らかにす るために2つの実験を行った。1つは、間引き・ 除草刃の開閉時間と油圧流量および土壌硬度の 関係を調べるための実験である。土壌硬度と開 閉時間の関係を調べることにより、試作した間 引き・除草刃が実際のほ場において的確に動作 するか検証することができる。もう1つは反応 時間を調べる実験である。間引き・除草刃の開 閉時間を測定することにより、間引き・除草刃 の軌跡を推定することができる。間引き・除草 刃の軌跡は、実際の間引き・除草において必ず 考慮しなければならないパラメータである間引 き・除草刃の開閉位置を設定するために必須で ある。また、PIC が制御信号を送出してから実 際に間引き・除草機が動き始める反応時間を測 定することにより、トラクタを走行させながら 間引き・除草機を制御する場合必然的に起こる 制御遅れを補正することが可能となる。以下, 2つの実験方法について述べる。

b. 実験方法

1) 間引き・除草刃の開閉時間の測定

試作した間引き・除草機構は第Ⅳ章で述べたように、トラクタの外部油圧取り出し口からの油圧を利用して、油圧シリンダを伸縮することにより開閉する。このため、開閉時間はトラクタからの油圧流量に依存することになる。また、間引き・除草刃は土壌に接しながら開閉するため、土壌硬度とも関係があると考えられる。そこで、油圧流量と土壌硬度を変化させ開閉時間を測定した。

本研究で使用したトラクタ(イセキ社製, TGS 33)の場合、トラクタの外部油圧取り出し口からの油圧流量とトラクタの機関回転数には比例関係があり、機関回転数 1500 rpm で 15 1/min, 2000 rpm で 20 1/min となる。油圧流量に関しては、トラクタの機関回転により油圧流量を調節し、15,20 1/min の 2 段階に設定した。また、土壌硬度との関係を調べるため、間引き・除草刃を土壌に接地させない、ロータリ作業直後の土壌、テンサイ列の土壌およびトラクタで踏圧された土壌の 4 つの土壌条件に対して油圧

流量を変化させて間引き・除草刃の開閉時間を 測定した。実験ほ場には北海道大学北方生物圏 フィールド科学センター生物生産研究農場のテ ンサイほ場を使用した。

土壌硬度の測定はコーンペネトロメータを使用し、10点を計測し、その平均値を土壌硬度とした。開閉時間の測定はポテンショメータ(緑測器社製、LP-100F)を用い、ポテンショメータの出力電圧をデータロガー(KEYENCE社製、NR-2000)に記録した。図5.1に間引き・除草機構に取り付けたポテンショメータを、表5.1にポテンショメータの仕様を示す。ポテンショメータを油圧シリンダのロッドと同一軸上に取り付け、油圧シリンダの伸縮と共にポテンショメータが伸縮するようにした。

実験は、設定した油圧流量、ほ場においてトラクタの走行速度を $0.1 \,\mathrm{m/s}$ に設定し、間引き・除草刃を手動スイッチにより開閉させた。

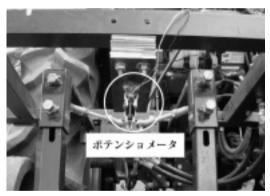


図 5.1 間引き・除草機構に取り付けたポテンショ メータ

表 5.1 ポテンショメータの仕様

製造会社	緑測器
型番	LP-100 F
有効ストローク	100 mm
全抵抗值	$10~\mathrm{k}\Omega$
全抵抗值偏差	$\pm 20\%$
直線性	$\pm 0.3\%$
出力スムーズネス	0.1%以下
絶縁抵抗	DC 500 V 100 MΩ以上
抵抗温度係数	$\pm 400 \text{ rpm/}^{\circ}\text{C}$
フリクション	0.98 N 以下

ポテンショメータは軸が伸縮することにより出力電圧が変化する。この電圧値をデータロガーによりサンプリングレート 1 kHz で記録し、電圧値の変化とサンプリングレートより開閉時間を算出した。開閉の試行はそれぞれの条件下で各 10 回行った。

2) 間引き・除草刃の反応時間の測定

間引き・除草刃は第IV章で述べたように、PIC から制御信号が送出され、トランジスタでの信号増幅、リレーを介してソレノイドバルブにより油圧の流れの方向を変化させて、開閉される。トラクタで走行しながら間引き・除草刃を制御する場合、この電気系および油圧系の反応時間を考慮しなければ、制御遅れにより位置合わせの誤差が増大する。そこで、PIC が制御信号を送出してから間引き・除草機構が動き出すまでの反応時間を測定した。

測定には近接センサとデータロガーを用いた。近接スイッチは、非接触で検出物が近づいたことを検出するセンサであり、検出コイルより高周波磁界を発生する。この磁界に検出物体(金属)が近づくと電磁誘導により、検出物体に誘導電流(渦電流)が流れる。この誘導電流を検出すると、センサは電圧を出力する。間引き・除草機が静止している時はセンサが反応せず、間引き・除草機構が動き始めた瞬間にセンサが反応する位置を特定し、近接センサを取り付けた。間引き・除草機構に取り付けた近接センサを図5.2 に、仕様を表5.2 に示す。PICの制御信号送出ポートと近接センサの出力信号をサンプリングレート1kHzでデータロガーに



図 5.2 間引き・除草機構に取り付けた近接センサ

表 5.2 近接センサの仕様

製造会社	オムロン
型番	E 2 E-X 8 MD1
検出距離	$8 \text{ mm} \pm 10\%$
電源電圧	DC 12~24 V

記録した。試行は10回行った。

c. 基本的性能測定の結果および考察

1) 間引き・除草刃の開閉時間の測定結果および考察

土壌硬度の測定結果は、ロータリ作業後の土壌が地表面において平均 0.06 MPa、テンサイのほ場が 0.12 MPa、トラクタで踏圧された土壌が 0.19 MPa となった。ポテンショメータの出力例を図 5.3 に示す。出力例は油圧流量 20 1/min、土壌硬度 0 MPa 時のものであり、間引き・除草刃が閉じている時の出力電圧値はおよそ1.68 V であり、間引き・除草刃が開ききった時の出力値はおよそ 4.25 V であった。ここで、土壌硬度が 0 MPa は間引き・除草刃を土壌に作用させないで開閉を行ったという意味である。

土壌硬度と開閉時間の関係を図5.4に示す。 土壌硬度0.06 MPa はロータリ作業直後の土

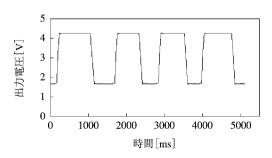


図5.3 ポテンショメータの出力例

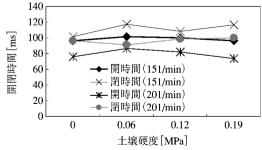


図 5.4 土壌硬度と開閉時間の関係

壊, 土壌硬度 0.12 MPa はテンサイ列の土壌, 土壌硬度 0.19 MPa はトラクタで踏圧された土 壌である。

開時間の最小値は土壌硬度 0.19 MPa,油圧流量 20 1/min 時の 74 ms であり,最大値は土壌硬度 0.06 MPa,油圧流量 15 1/min 時の 101 ms であった。閉時間の最小値は土壌硬度 0.06 MPa,油圧流量 20 1/min 時の 91 ms であり,最大値は土壌硬度 0.06 MPa,油圧流量 15 1/min 時の 118 ms であった。開時間と閉時間を比較すると,各条件において,閉時間よりも開時間の方が平均して約 15 ms 速くなっている。これは,本研究で使用した油圧シリンダはピストンロッドが貫通型ではないため,ピストンロッドの体積分だけ開方向では必要な油量が少なくなるためである。

土壌硬度と開閉時間の関係を見ると、土壌硬度が大きくなっても開閉時間はほとんど変化しない。この結果より、通常の作物生育において想定される程度の土壌硬度であれば、本研究で試作した間引き・除草刃は土壌の硬さの影響を受けず開閉することが可能である。油圧流量と開閉時間の関係を見ると、油圧流量201/minの方が若干開閉時間は速くなったが、その差は開時間で平均19 ms、閉時間で平均15 msとなり、実際に使用する上では問題にならない差と考えられる。以上の結果より、間引き・除草作業を行う場合、油圧流量を151/min以上に設定すれば、十分な開閉時間を得られることが明らかとなった。

実験によって得られた開閉時間から左右両刃の間引き・除草刃の先端の軌跡を推定した。開閉時間は土壌硬度 0.12 MPa,油圧流量 20 1/min 時の値を使用した。開閉時間はそれぞれ 80ms,100msとなる。軌跡は間引き・除草刃が閉じた状態で原点から出発し,y軸正の方向に走行する。50mmに達した時点で間引き・除草刃は開き始め、開ききった後、その状態で50mm走行する。50mm走行した後間引き・除草刃は閉じ始め、閉じきった後、その状態で50mm走行するものとした。軌跡の算出は1msごとに左右両刃の先端位置を幾何学的に算出し、プロットした。設定したトラクタの走行速度は

 $0.1 \, \text{m/s}$, $0.2 \, \text{m/s}$ および $0.5 \, \text{m/s}$ である。間引き・除草刃の軌跡を各速度ごとに図 $5.5 \, \text{(a)} \sim \text{(c)}$ に示す。

間引き・除草刃の動作は円弧運動になるため、静止している状態で間引き・除草刃を開閉した場合、左右の間引き除草刃の先端位置は開くときには後方に20mm、閉じるときには前方に20mm移動することになる。走行速度が0.1m/sの場合では間引き・除草刃が開き始めた位置と開き終わった位置を比較すると、約12mm後方に移動することになり、走行速度が0.2m/sでは、4mm後方で、間引き・除草刃の移動はほぼ真横になる。また、走行速度が0.5m/sの場合には、間引き・除草刃が後方に移動する

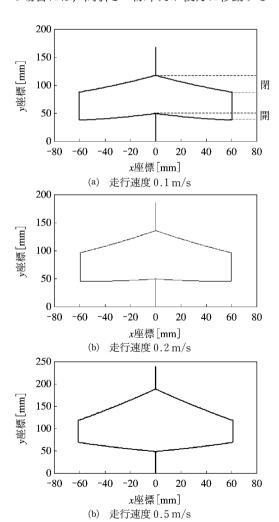


図 5.5 間引き・除草刃の軌跡

置を比較すると、走行速度 0.1 m/s では約 30 mm, 0.2 m/s では約 40 mm, 0.5 m/s では約 70 mm 前方に移動することになる。間引き・除草 刃が開く場合、走行速度が 0.1~0.2 m/s の低速であれば間引き・除草刃は進行方向と逆向きに移動しながら開き幅が大きくなっていくため、設定した開位置が誤差等により変化したとしてもテンサイを傷付ける可能性は少ないと考えられる。一方、間引き・除草刃が閉じる場合、低速であっても間引き・除草刃は前方に移動しながら、開き幅が小さくなっていくため、設定した開位置が誤差等により変化した場合、開く場合と比較してテンサイを傷つける可能性が高いと考えられる。動跡線で囲まれた部分が間引き・除草刃が作

距離よりも進行距離の方が大きくなるため、間

引き・除草刃は約20mm前方に移動する。間引

き・除草刃が閉じ始めた位置と閉じ終わった位

軌跡線で囲まれた部分が間引き・除草刃が作 用しない部分となる。それぞれの速度において 間引き・除草刃が作用しない部分の面積を求め た。ただし, 開閉時の軌跡は直線に近似した。 走行速度 0.1 m/s では 7,320 mm², 0.2 m/s で は8,640 mm², $0.5 \,\mathrm{m/s} \,$ では $11,340 \,\mathrm{mm}^2$ とな る。速度が大きくなるにつれ、間引き・除草刃 が作用しない部分の面積が大きくなった。これ は、開閉時間内に進行方向の向きに進む距離が 走行速度の大きさにつれ大きくなるためであ る。テンサイに触れない程度にこの面積を小さ くすることが除草作業にとって有利となる。間 引き・除草刃の開閉時間は 100 ms 前後である。 トラクタの油圧流量を考慮すると, これ以上高 速にすることは困難であると考えられる。この 面積を小さくする方法の一つとして、間引き・ 除草刃の開き幅を現在の設定値である 120 mm より小さくすることが考えられる。CCD ビデオ カメラはトラクタ前方に、間引き・除草機はト ラクタ後方に取り付けられているため、 開き幅 を小さくすると, うね合わせが困難になる。 岡 本ら70)-72) は画像処理により作物列を検出する センサを開発した。このセンサを用いれば,開 き幅を小さくしてもテンサイを傷付けることな く自動間引き・除草作業を行うことが可能であ ると考えられる。

2) 間引き除草刃の反応時間の測定結果およ び考察

PIC が制御信号を送出してから間引き・除草機構が動き出すまでの反応時間を測定した結果,平均で128 msであった。よって,間引き・除草刃は,開く目標位置から128 ms遅れて開くことになる。さらに,トラクタの走行速度が速くなるにつれて目標位置との誤差は大きくなる。この制御遅れによる誤差を小さくするにはトラクタの走行速度ごとに間引き刃の開閉位置を設定しなければならない。従って,本システムを有効に動作させるためには,走行速度のリアルタイム測定が必要とされる。

C. 模擬テンサイによる作動精度確認実験

a. 実験の目的

試作した間引き・除草機においては、CCDビ デオカメラはトラクタの前方に, 間引き・除草 機は3点ヒッチリンクによりトラクタの後方に 装着することにしている。よって,画像を取得 した CCD ビデオカメラから間引き・除草刃ま で距離があるため, 位置合わせが求められる。 このため、本研究では、間引き・除草機の走行 距離の計測に第5輪を使用した。第5輪の車軸 にロータリエンコーダを取り付け、出力パルス 間隔から走行距離を求めた。ロータリエンコー ダはその特性上,累積誤差を持つという欠点が あるため、CCD ビデオカメラと間引き・除草刃 の距離が長くなると誤差が増大する可能性があ る。そこで、模擬テンサイによる精度確認実験 に先立ち、CCD ビデオカメラから間引き・除草 刃までの距離を3段階に設定し,CCDビデオカ メラ取り付け位置と開閉精度の関係を確認し た。次いで、室内において模擬テンサイを用い て自動間引き間引き作業を行い,作業精度およ び間引きアルゴリズムの性能を検討した。

b. CCD ビデオカメラ位置による精度確認

1) 実験装置および方法

本研究で開発した間引き・除草機はトラクタ前方の CCD ビデオカメラにより取得した画像の中心からトラクタ後方に装着した間引き刃中央まで 3,780 mm の間隔がある。この距離を変化させた場合に精度が良くなるようであれば、CCD ビデオカメラの取り付け位置の変更を検

討しなければならない。よって、本実験では、 CCD ビデオカメラからの画像の中心から間引き・除草刃までの距離を3,780,2,000 および1,000 mm の3段階に設定した距離と間引き・除草刃の開閉精度を検討した。また、トラクタの走行速度についても、0.1、0.2 および0.3 m/s の3段階に設定し、走行速度と間引き・除草刃の開閉精度についても検討した。

CCD ビデオカメラから間引き・除草刃までの 距離が 2,000, 1,000 mm の場合,使用したトラ クタの構造上,CCD ビデオカメラをトラクタ前 方に取り付けることが不可能であるので,トラ クタ後方に CCD ビデオカメラを取り付けるこ とになる。後方に CCD ビデオカメラを取り付けることになる。後方に CCD ビデオカメラを取り付けることになる。後方に CCD ビデオカメラを取り付けることになる。と間引き・除草刃が開閉するソフトを 離になると間引き・除草刃が開閉するソフトを 開発した。本研究では、第Ⅳ章で述べたように、 ロータリエンコーダからのパルスのカウントと 制御信号の送出は PIC により行うことになっ ている。しかしながら、本実験の場合、画像処理を行う必要がないため、パルスのカウント, 制御信号の送出は PC のパラレルポートを使用 した。

実験は北海道大学農学部農業機械特別実験室内のシルト土壌槽において行った。図5.6に示すように、間引き・除草刃から設定した距離離れた位置にマーカを設置し、トラクタは静止した状態から設定した速度で走り始める。各速度ともに、油圧流量は201/minとした。間引き刃の開位置はマーカの前方50mmで間引き・除草刃が完全に開くように、閉位置はマーカの50mm後方で閉じ始めるように、反応時間および開閉時間を考慮し設定した。開閉位置での座標

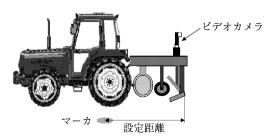


図 5.6 カメラ位置の決定実験の模式図

関係を図5.7に示す。

この場合,ロータリエンコーダの1パルス当たりの走行距離をq,設定距離をsl (mm),反応時間をRt (ms),間引き除草刃の開時間をOt (ms),マーカから間引き・除草刃が開き終わる,閉じ始める位置までの距離をsd (mm),トラクタの走行速度をv (m/s)とすると,開位置 O_{posi} と閉位置 C_{posi} はパルス数換算で式 (5.1) および (5.2) と表すことができる。

$$O_{posi} = \frac{sl - sd - (Ot + Rt) \times v}{q}$$
 (5.1)

$$C_{posi} = \frac{sl + sd - Rt \times v}{q} \tag{5.2}$$

ここで,第 5 輪の大きさとロータリエンコーダ出力インターバルの関係から q=3.13 と実測され,Rt,Ot は前節の結果よりそれぞれ 128 ms,80 ms,本実験ではマーカ中心から 50 mm 前後で開閉させるため sd は 50 mm となる。

間引き・除草刃の開閉の様子は間引き・除草 刃の上方に間引き・除草刃の動作確認用ビデオ カメラ (SONY 社製, DCR-PC 10) を取り付け た。撮影された画像から開閉位置を測定した。 間引き・除草機構に取り付けたビデオカメラを 図 5.8 に示す。

2) 実験結果および考察

間引き・除草刃の動作を撮影した画像を解析することにより、設定した開閉位置からの誤差を算出した。開閉位置それぞれでの設定距離、速度と誤差の関係を表 5.3 に示す。

開位置での誤差の範囲は-30~35 mm であり、閉位置での誤差の範囲は開位置と同様に-30~35 mm であった。開位置および閉位置にお

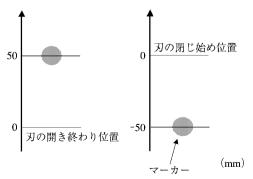


図 5.7 開閉位置での座標関係



図5.8 間引き・除草機構に取り付けたビデオ カメラ

いて、マーカと刃の距離を一定にして、速度の違いと誤差に関係があるかどうかを調べるために一元配置の分散分析を行った。その結果、全ての条件において有意な差は認められなかった。同様に、設定速度を一定にして設定距離の違いと誤差に関係があるかどうかを調べるために一元配置の分散分析を行った。その結果、全ての条件において有意な差は認められなかった。この結果より、速度が0.3 m/s までであれば精度が変化しないことが明らかとなり、カメラ中心から間引き・除草刃までの距離を現在の約4,000 mm より短くしても間引き・除草刃の開閉精度は変化しないので、現在の位置で適当であると判断された。

c. 模擬テンサイを用いた自動間引き実験

1) 実験装置および方法

試作した間引き・除草刃の開閉精度,開発した間引きアルゴリズムの性能を検証するために,模擬作物を用いた自動間引き実験を行った。模擬テンサイはデジタルカメラで撮影したテンサイの画像を基にして,紙で作成した。図5.9に模擬テンサイを示す。

本葉方向の長さが 135 mm,子葉方向の長さが 70 mm であり、間引き時期のテンサイとしては標準的な大きさである。この模擬テンサイを北海道大学農学部農業機械特別実験室内のシルト土壌槽に配置して実験を行った。模擬テンサイの配置はIII章で述べたシミュレーションで作成した模擬テンサイ列(平均株間 120 mm,標準偏差 30 mm)のデータを使用した。

	() [>13		
走行速度(m/s)	設定距離(mm)	標準偏差(mm)	誤差の範囲(mm)
	3,780	12	-15~30
0.1	2,000	10	$-5\sim\!25$
	1,000	6	$-10\sim\!20$
	3,780	14	<u>−5~35</u>
0.2	2,000	5	$-5 \sim 15$
	1,000	12	$-30\sim15$
	3,780	7	$-10\sim\!20$
0.3	2,000	11	$-35\sim\!20$
	1 000	6	$-20\sim25$

表 5.3 設定速度,設定距離と精度の関係

(a) 開位置基準

(b) 閉位置基準

走行速度(m/s)	設定距離(mm)	標準偏差(mm)	誤差の範囲(mm)
	3,780	10	$-5\sim\!25$
0.1	2,000	8	$-10\sim\!25$
	1,000	6	$-10\sim15$
	3,780	10	$-5\sim\!25$
0.2	2,000	4	$-10 \sim 15$
	1,000	16	$-35\sim0$
	3,780	6	-10~20
0.3	2,000	17	$-35 \sim -5$
	1,000	10	$-30\sim15$

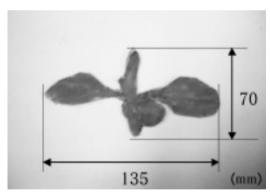


図 5.9 室内実験で使用した模擬テンサイ

模擬テンサイの配置は3つのパターンを用い,使用したテンサイは26個であった。自動間引き作業後の目標株間を240mm,強制間引き距離はⅢ章のシミュレーション結果から,100mmとした。本研究で開発した間引き・除草アルゴリズムでは雑草と識別された場合には間引き・除草刃を閉じたままにするので制御が不必要となる。よって,本実験では模擬雑草は用い

ず模擬テンサイのみを使用した。

CCD ビデオカメラ画像の縦方向 240 pixel が 地表面上 300 mm になるように CCD ビデオカ メラの取り付け位置を設定した。本実験ではト ラクタの走行速度を 0.1 m/s, 画像取得間隔を 1 Hz に設定したため, 現在の画像とその1秒後 の画像を比較すると必然的に重複する部分が現 れる。また,画像の周辺近くに位置する植物は 画像内に入りきらず, 識別対象となる植物が切 れてしまうことが予想される。本研究の識別手 法では形状特徴量をパラメータとして使用して いるため, 画像が切れてテンサイおよび雑草の 形状が変化すると、識別に影響を及ぼすと考え られる。これらの理由から、本研究では図5.10 に示すように,縦方向においては中央部から1/3 部分、横方向においては左右端から30 pixel以 上の部分を識別範囲(図5.10中の白い部分)と し,この範囲に図心が存在する植物のみを識別 対象とした。

間引き時期にトラクタを走行させながら撮影

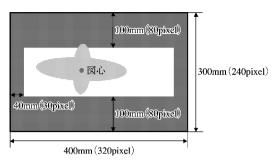
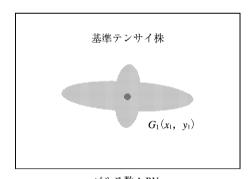


図 5.10 取得画像内における識別対象範囲

したテンサイ画像を調査した結果,運転に不慣れなオペレータであってもこの画像範囲内にテンサイを収めることは十分可能であり,この時期のテンサイの大きさであれば,中央部から1/3部分の範囲内に図心が存在する場合,画像内に入りきらず,切れてしまうことはなかった。

シミュレーションにおける間引き・除草アルゴリズムでは、予め模擬作物列のテンサイおよび雑草の位置を作成した後、残すべきテンサイを決定したが、実機で自動間引き・除草作業を行う場合には、基準株からの株間を推定する必要がある。図 5.11 に株間推定のための模式図を



パルス数:PNo $G_2(x_2, y_2)$ \mathcal{S} \mathcal{S}

図 5.11 株間距離推定のための模式図

示す。

基準株と判断されたテンサイの図心を G_1 (x_1, y_1) とし,この画像をPC が取り込んだ時のPIC が計測したパルス数をPNo とする。基準が発見された後に,テンサイと判定されたテンサイの図心を $G_2(x_2, y_2)$ とし,この画像をPC が取り込んだ時のPIC が計測したパルス数を PNo_1 とすると,推定される基準株から株間距離 IDis はロータリエンコーダの1 パルス当たりの走行距離をq,画像縦方向1 pixel 当たりの長さをMpD とすると図心位置とpixel 数の関係から式(5.3) と表すことができる。

$$IDis = (PNo_1 - PNo) \cdot q - (y_2 - y_1) \times MpD$$

$$(5.3)$$

本実験では,模擬テンサイの図心の $15 \, \mathrm{mm}$ 手前で間引き・除草刃が開き始め,図心を $15 \, \mathrm{mm}$ 通過した後に閉じ始めるように設定した。画像内のテンサイの図心位置を図 $5.12 \, \mathrm{clipk}$ に $G_1(x_1, y_1)$ とし,この画像を PC が取り込んだ時の PIC が計測したパルス数を PNo,間引き・除草刃が閉じている状態での画像の中心から間引き・除草刃までの距離を D_{ce} ,PIC が信号を送出してから反応するまでの時間を Rt,間引き除草刃の開時間を Ot,閉時間を Ct,走行速度v,図心位置から開き始め,閉じ始めまでの設定距離を Sd とすると,テンサイの図心位置と画像中心の距離 D_{SC} は式(5.4) と表すことができる。

$$D_{gc} = (119 - y_1) \times MpD \tag{5.4}$$

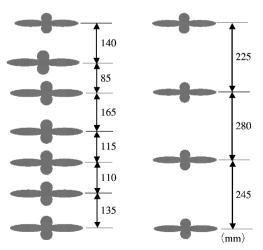


図 5.12 間引きによる株間の変化の一例

よって,本実験での開位置 *Open_p* はパルス単位で式 (5.5) で表すことができる。

$$Open_p = PNo + \frac{D_{ce} + D_{gc} - sd - (Rt + Ot) \times v}{q}$$
(5.5)

間引き・除草刃が開いている状態の場合,閉じている場合と比較して間引き・除草刃は開いている状態よりも後方に移動することになる。後方に移動した距離を Ed とすると,閉位置 $Close_p$ はパルス単位で式 (5.6) と表すことができる。

$$Close_p = PNo + \frac{D_{ce} + D_{gc} + Ed + sd - (Rt + Ct) \times v}{q}$$
(5.6)

ここで、MpD, D_{ce} , q, Ed, Rt, Ot, Ct および v は定数であり、キャリブレーション実験により、画像縦方向 1 pixel 当たりの長さ MpDは 1.33 mm、画像の中心から閉じている状態での間引き除草刃までの距離 D_{ce} は 3,894 mm、ロータリエンコーダ出力 1 パルス当たりの走行距離 q は前節で述べたように 3.13 mm、間引き・除草刃の後方移動距離 Ed は 20 mm、反応時間 Rt は前節の測定結果より 128 ms、開閉時間 Ot, Ct も前節の結果より,それぞれ 80 ms,100 ms と決定され,走行速度 v は本実験では 0.1 m/s と設定した。

本実験は室内環境で行われたため、II章で述べた色情報を用いた識別は困難なため、本実験では形状特徴量のみを用いた識別を行った。本実験の実験条件を表 5.4 に示す。

2) 実験結果および考察

本実験結果を表 5.5 に,本実験で設置した模擬テンサイの並び方および自動間引き作業後の株間例を図 5.12 に示す。実験前に設置した模擬テンサイは 26 個であり,模擬テンサイ列の平均株間距離は 149 mm であった。理想的に間引き

表 5.4 模擬テンサイを用いた室内実験の条件

設定株間	平均 120 mm,標準偏差 30 mm
間引き後の目標株間	240 mm
強制間引き距離	100 mm
油圧流量	20 1/min
画像取得間隔	1 Hz
トラクタ走行速度	$0.1\mathrm{m/s}$
試行	3 回
開閉位置	図心の 15 mm 前後

作業を行った場合,残すべき模擬テンサイ数は 26 個のうち 56.5%の 16 個となり,この場合の 平均株間距離は 229 mm となった。実機で行った場合,表 5.5 に示すように,間引き・除草刃が開き,残された模擬テンサイ数は理想状態の場合と同様に 16 個,平均株間距離は 229 mm,テンサイ株数比は 100%となった。この結果より,開発した間引き・除草アルゴリズムおよび 株間距離推定は適切であることが示唆された73)74)。

開閉位置の誤差を表 5.6 に,開閉位置での間引き刃の様子を図 5.13 および図 5.14 に示す。開位置での誤差平均は 14.8 mm,最大誤差は 26.6 mm であり,閉位置での誤差平均は 20.9 mm,最大誤差は 43.2 mm となった。

画像処理を行わないで開閉精度を求めた前節の CCD ビデオカメラ位置決定実験の結果は、本実験と設定値が同じである走行速度 0.1 m/s、マーカとの間引き・除草刃の距離が 3780 mm の場合、開位置の誤差の標準偏差が 12 mm、最大値が 30 mm であり、閉位置では誤差の標準偏差が 10 mm、最大値が 25 mm となった。この結果と比較すると、本実験の開閉精度は標準偏差、最大値の面から多少悪くなったといえる。

表 5.5 模擬テンサイを用いた実験結果

	平均株間距離 (mm)	残すべきテンサイ数 (本)	テンサイ株数比 (%)
間引き・除草前	149	26	_
理想間引き	229	16	100
実機による間引き	229	16	100