HOKKAIDO UNIVERSITY

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; TERAWAKI, Masaki
Description	北海道大学博士論文 (2004) Doctorial thesis submitted to the Graduate School of Agriculture, Hokkaido University (2004)
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	https://hdl.handle.net/2115/5634
Type	departmental bulletin paper
File Information	26(2)_283-302.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

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 120 mm（うね方向の標準偏差 30 mm，うね直交方向の標準偏差 20 mm），目標株間を 240 mm 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 ～600	300
テンサイ識別正答率（%）	89.7	80,85,90,95,100
雑草識別正答率（%）	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，50〜100 mm，100〜150 mm，150〜200 mmおよび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

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

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

表 3.3　シミュレーション 1 の結果例

No	x 座標 (mm)	植物名	識別結果	強制間引き距離（mm） 100	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

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。

$$Z = 0.17\,Scr + 0.79\,Wcr - 4.61 \qquad (3.1)$$

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に依存することになる。雑草の識別正答率が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，D 04-50，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

(a)　上方

(b)　後方

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	yuken
型番	D 04-50
ストローク	50 mm
シリンダ内径	28.6 mm
ピストン径	32 mm
必要油量	32 cc

図4.2　間引き・除草機構の模式図

きる[63]。

$$P_{of}=l_{BC}(\cos\theta-1)+\sqrt{l_{BD}{}^2-h^2}-l_{BD}\cos\theta\cdot\arcsin\left(\frac{l_{BD}\sin\theta+h}{l_{BD}}\right) \quad (4.1)$$

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_p とすると，LDにおいて連接リンクに働く力 F_b は F_p を分解することにより，

$$F_b=\frac{F_p}{\cos\theta'} \quad (4.2)$$

となる。

LBにおける回転方向の分力 F は，

$$F=F_b\sin(\theta-\theta')=\frac{F_p\sin(\theta-\theta')}{\cos\theta'}=(\tan\theta'\cdot\cos\theta-\sin\theta)\cdot F_p \quad (4.3)$$

ここで，$\tan\theta'=\dfrac{h+l_{BC}\sin\theta}{\sqrt{l_{BD}{}^2-(l_{BC}\sin\theta+h)^2}}$ であるから，

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

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]。

$$F_a=\left(\frac{h+l_{BC}\sin\theta}{\sqrt{b^2-(l_{BC}\sin\theta+h)^2}}\cos\theta-\sin\theta\right)\cdot\frac{l_{BC}}{l_{AC}}\cdot F_p \quad (4.5)$$

式（4.5）の l_{BC}，l_{BD}，h，l_{AC} 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4.3　間引き・除草機構の寸法

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 2000×500 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

(b)　後方

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

(b)　後方

図 4.8　間引き・除草作業部

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 ～50 kHz
使用電源	DC 5 V±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 l/min
最高使用圧力	31.5 MPa
タンク側許容背圧	16.0 MPa

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THINKPAD，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 4.10　コントロールボックス

図 4.11　画像キャプチャユニット

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

(a)PCのメインルーチン　(b)PICのメインルーチン

図4.14　制御メインルーチンのフローチャート

(a)間引き判定処理　(b)シリアルデータ受信処理

図4.15　PCのサブルーチンのフローチャート

(a)パルスカウント割り込み処理　(b)シリアルデータ受信割り込み処理

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5Vで作動するため，3端子レギュレータを使用し，12Vから5V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12V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4.17　開閉位置情報のデータ構造

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 → PIC	PIC → 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5V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5V制御信号を12V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120 mm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 l/min，2000 rpmで20 l/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 l/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-100 F）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 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
全抵抗値	10 kΩ
全抵抗値偏差	±20%
直線性	±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	±400 rpm/°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 1 kHz 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	E2E-X8MD1
検出距離	8 mm±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 l/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壌，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。

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

開時間の最小値は土壌硬度0.19 MPa，油圧流量20 l/min時の74 msであり，最大値は土壌硬度0.06 MPa，油圧流量15 l/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 l/min時の91 msであり，最大値は土壌硬度0.06 MPa，油圧流量15 l/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20 l/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15 l/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 l/min時の値を使用した。開閉時間はそれぞれ80 ms，100 ms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。50 mm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50 mm走行する。50 mm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50 mm走行するものとした。軌跡の算出は1 ms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 m/s，0.2 m/s および 0.5 m/s である。間引き・除草刃の軌跡を各速度ごとに図 5.5 (a)〜(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 20 mm，閉じるときには前方に 20 mm 移動することになる。走行速度が 0.1 m/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 12 mm 後方に移動することになり，走行速度が 0.2 m/s では，4 mm 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 0.5 m/s の場合には，間引き・除草刃が後方に移動する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 20 mm 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。

(a)　走行速度 0.1 m/s

(b)　走行速度 0.2 m/s

(b)　走行速度 0.5 m/s

図 5.5　間引き・除草刃の軌跡

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 m/s では 11,340 mm² 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ユニットを開発する手間を省くため，本実験では，画像処理を行わず，PC上で設定した距離になると間引き・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20 l/minとした。間引き刃の開位置はマーカの前方50 mmで間引き・除草刃が完全に開くように，閉位置はマーカの50 mm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。

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

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

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。

表 5.3　設定速度，設定距離と精度の関係

(a)　開位置基準

走行速度（m/s）	設定距離（mm）	標準偏差（mm）	誤差の範囲（mm）
0.1	3,780	12	−15〜30
	2,000	10	−5〜25
	1,000	6	−10〜20
0.2	3,780	14	−5〜35
	2,000	5	−5〜15
	1,000	12	−30〜15
0.3	3,780	7	−10〜20
	2,000	11	−35〜20
	1,000	6	−20〜25

(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）
0.1	3,780	10	−5〜25
	2,000	8	−10〜25
	1,000	6	−10〜15
0.2	3,780	10	−5〜25
	2,000	4	−10〜15
	1,000	16	−35〜0
0.3	3,780	6	−10〜20
	2,000	17	−35〜−5
	1,000	10	−30〜15

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 240 mm，強制間引き距離はⅢ章のシミュレーション結果から，100 mm 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示す。

図 5.11　株間距離推定のための模式図

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。

$$IDis = (PNo_1 - PNo) \cdot q - (y_2 - y_1) \times MpD \tag{5.3}$$

本実験では，模擬テンサイの図心の 15 mm 手前で間引き・除草刃が開き始め，図心を 15 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 と同様に $G_1(x_1,\ y_1)$ 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_{gc} 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。

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

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。

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

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)]。

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 l/min
画像取得間隔	1 Hz
トラクタ走行速度	0.1 m/s
試行	3回
開閉位置	図心の15 mm前後

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