



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)_255-274.pdf



直播テンサイ用自動間引き・除草機の開発に関する研究*

寺 脇 正 樹

(北海道大学大学院農学研究所生物資源生産学専攻生物生産工学講座作物生産システム工学分野)

Study on Development of Automatic Weeding Thinner for Direct Sowing of Sugar Beet

Masaki TERAWAKI

(Laboratory of Crop Production System Engineering, Research Group of
Bioproduction Engineering, Division of Bioresources and Product Science,
Graduate School of Agriculture, Hokkaido University)

目 次

記号一覧	255	定条件	281
I. 緒 論	257	C. 間引き・除草シミュレーションの 法	283
A. 研究背景	257	D. 結果および考察	283
B. 本研究の目的と範囲	259	E. 本章のまとめ	286
C. 既往の研究例	260	IV. 自動間引き・除草機の開発	287
II. 画像処理によるテンサイと雑草の識別	261	A. 本章の目的	287
A. 本章の目的	261	B. 間引き・除草作業部	287
B. 静画像の取得および画像の前処理	261	C. 間引き・除草機の制御システム	290
C. 形状特徴量	264	D. 本章のまとめ	294
D. 判別分析法	265	V. 自動間引き・除草機の性能試験	294
E. 結果および考察	267	A. 本章の目的	294
F. 走行しながらの画像取得	272	B. 自動間引き・除草機の基本的性能	294
G. 色情報による識別	273	C. 模擬テンサイによる作動精度確認 験	298
H. 形状特徴量と色情報を組み合わせた 識別	273	D. 自動間引き・除草作業のほ場実験	303
I. 結果および考察	275	E. 本章のまとめ	306
J. 本章のまとめ	280	VI. 総 括	306
III. シミュレーションによる識別正答率の 評価	280	謝 辞	309
A. 本章の目的	280	参 考 文 献	309
B. 間引き・除草シミュレーションの設 定	280	Summary	313
		付録 間引き・除草作業部の設計図面	316

記号一覧

*北海道大学博士論文 (2004)

Doctorial thesis submitted to the Graduate School
of Agriculture, Hokkaido University (2004)

A : 面積
B : 画像輝度値の青成分

C	: 円形度係数				成分
$Close_p$: 模擬テンサイ実験での閉位置	[pulse]	nG	: 正規化された画像の輝度値の緑成分	
C_{posi}	: カメラ位置決定実験での閉位置	[pulse]	nK	: K 群の標本数	
Ct	: 間引き・除草刃の閉時間	[ms]	nR	: 正規化された画像の輝度値の赤成分	
D_{ce}	: 画像中心から間引き・除草刃までの距離	[mm]	n_k	: 濃度値 k をもつ画素数	
D_{gc}	: テンサイの図心位置と画像中心の距離	[mm]	Of	: 基準テンサイ株との y 軸方向の距離	[mm]
d	: 間引き・除草機構の開き幅	[mm]	$Open_p$: 模擬テンサイ実験での開位置	
Ed	: 間引き・除草刃が後方に移動する距離	[mm]	O_{posi}	: カメラ位置決定実験での開位置	
F	: LB 回転方向に作用する力	[N]	Ot	: 間引き・除草刃の開時間	[ms]
F_a	: LA 回転方向に作用する力	[N]	$P8$: 1~8 pixel 間の葉先角度の傾き	
F_b	: LB から LD 方向に作用する力	[N]	$P20$: 10~20 pixel 間の葉先角度の傾き	
Fd	: 強制間引き距離	[mm]	PN_{01}	: PC が取得したパルス数	
Flg	: 基準テンサイ株発見のためのフラグ		PN_0	: PC が取得したパルス数	
F_p	: 油圧シリンダが押す力	[N]	P_k	: 濃度値 k をもつ画素数の全画素数に対する割合	[%]
Fr	: フェレ径比		P_{of}	: 油圧シリンダロッドの移動距離	[mm]
G	: 画像輝度値の緑成分		p	: 面積割合	[%]
G_1	: 識別対象植物の図心		Q	: YIQ 表色系の Q 値	
G_2	: 識別対象植物の図心		q	: ロータリエンコード出力 1 パルス当たりの走行距離	[mm]
g	: 総群数		R	: 画像輝度値の赤成分	
H	: 穴の数		Rt	: 反応時間	[ms]
h	: LC から LD の垂直距離	[mm]	r	: 周囲長	
$Idis$: 推定された株間距離	[mm]	S_{B1}	: テンサイの分類スコア	
K	: 画像の濃度値		S_{B2}	: テンサイの分類スコア	
L	: 最大径		S_{beet}	: テンサイの分類スコア	
LA	: 間引き・除草機構の対偶素		Scr	: テンサイの識別正答率	[%]
LB	: 間引き・除草機構の対偶素		S_{cv}	: 標本分散共分散行列	
LC	: 間引き・除草機構の対偶素		Sd	: マーカ中心から開閉位置の距離	[mm]
LD	: 間引き・除草機構の対偶素		SG_1	: アオビユの分類スコア	
LP	: 葉先得点		SG_2	: アオビユの分類スコア	
l	: テンサイ株の x 軸原点からの位置	[mm]	S_{H1}	: スギナの分類スコア	
l_{AB}	: LA から LB の距離	[mm]	S_{H2}	: スギナの分類スコア	
l_{BC}	: LB から LC の距離	[mm]	$S_k(X)$: 線形判別関数ベクトル	
l_{BD}	: LB から LD の距離	[mm]	Sl	: トラクタの設定走行距離	[mm]
M	: 最大径円面積比		StP	: 基準株の x 軸原点からの位置	[mm]
MpD	: 画像縦方向 1 ピクセル当たりの長さ	[mm]	Sw_1	: ソバカズラの分類スコア	
N	: 全画素数		Sw_2	: ソバカズラの分類スコア	
nB	: 正規化された画像の輝度値の青成分		S_{weed}	: 雑草の分類スコア	

T	: 面積/周囲長	
v	: トラクタ走行速度	[m/s]
W_{Cr}	: 雑草の識別正答率	[%]
W_L	: 長軸 2 次モーメント	
W_S	: 短軸 2 次モーメント	
w_x	: 重心から x 軸方向の 2 次モーメント	
w_{xy}	: 慣性相乗モーメント	
w_y	: 重心から y 軸方向の 2 次モーメント	
x_1	: 図心の x 座標	
x_2	: 図心の x 座標	
$\bar{x}^{(nK)}$: K 群の標本平均値ベクトル	
$x_i^{(nK)}$: K 群の i 番目の標本ベクトル	
y_1	: 図心の y 座標	
y_2	: 図心の y 座標	
Z	: テンサイ株数比	[%]
Z_2	: 植物及び土壌輝度値の座標変換後の副軸	
θ	: LD 周りの回転角度	[°]
θ'	: LC 周りの回転角度	[°]
μ_T	: 全画素の平均濃度値	
$\mu(k)$: 濃度値 k までの濃度分布における 0 次モーメント	
σ_B^2	: クラス間分散	
σ_T^2	: 全分散	
σ_W^2	: クラス内分散	
$\omega(k)$: 濃度値 k までの濃度分布における 0 次モーメント	

I. 緒 論

A. 研究背景

1950 年以降, 第 1 次産業の就労人口は減少の一途をたどっている。新規就労者不足による労働力不足や就労者の高齢化問題は, 日本経済における深刻な問題として一向に解決しておらず, その中の代表的な産業の一つである農業もまた例外ではない。農業においては, 労働力不足の他に, ガット・ウルグアイラウンドで締結された農産物の輸入自由化促進に対して, 農業の多面的機能に留意しながら生産流通体制の整備, 農業の体質強化, 地域活性化等の対策を講じる必要に迫られている。

北海道の農業においては, 米作の減反政策や, 麦その他の主要作物の安定生産・安定供給のための作付け指標設定によって, これらの作物の作付けが抑制される傾向にある。そのため, より収益性の高い野菜作に対する意欲が高まりつつあるが, 野菜栽培は, 穀類, 飼料作物, テンサイ等に比べて機械の開発・導入が難しく, 特に苗の移植と収穫には未だに多くの労働力を必要としている。このような作付け体系の変化に対応するために, 野菜栽培等に対する更なる機械化・省力化が求められるとともに, テンサイやパレイショなどの主要畑作物の省力化による労力の再配分も望まれている。

ここで, 北海道の主要農作物の 1 つであるテンサイについて考える。テンサイは北海道の代表的な農作物の一つであり, 平成 15 年現在, 北海道では約 70,000 ha の製糖用テンサイが作付けされている¹⁾²⁾。図 1.1 にテンサイの作付け面積の推移を示す。

テンサイの作付け面積は, 農業関係団体等によって, 計画生産が指導されており, 昭和 60 年以降, ほぼ 70,000 ha の水準を保っている。収量は年によって若干変動があるが, ここ数年は 50~55 t/ha³⁾⁴⁾ で推移している。ただし, 昭和 61 年以降は, 糖分取引となっているため, 収量のみならず根中糖分の向上が栽培技術上重要な要素となっている。

テンサイの栽培方法には, 移植栽培と直播栽培の 2 つの方法がある。移植栽培はペーパーポットと呼ばれる移植用の紙筒を用いて育苗を行い, チェーンポット方式自動移植機^{5)~11)}などの専用の機械によってほ場に移植を行う方法で

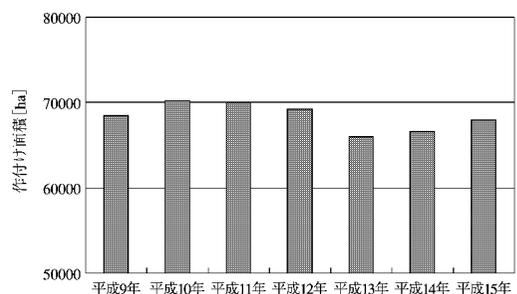


図 1.1 テンサイの作付け面積の推移

ある。ペーパーポットは、昭和31年に日本甜菜製糖株式会社農務技術部によって研究開発された¹²⁾。テンサイの移植栽培の流れは次の通りである。3月中旬から下旬に温室内でペーパーポットに播種し、育苗および間引きを行う。播種後5週間経った5月上旬に移植機によって移植される。適期に防除や追肥、中耕除草を行った後、10月中旬から11月上旬にかけてビートハーベスタによって収穫される。一方、直播栽培は文字通り種子をほ場に直接播種し、栽培を行う方法である。4月中旬から下旬にかけて精密播種機で播種することと発芽後適期に間引きを行う以外は移植栽培と同様に栽培される。

現在、テンサイの栽培は、約97%がペーパーポットを用いた移植栽培により行なわれている¹³⁾。昭和30年代後半以降、直播栽培から移植栽培へと徐々に移行してきた。そして、昭和40年代前半には、テンサイ栽培面積の半分が移植栽培により行なわれ、昭和50年前半に、ほぼ現在の栽培体系となった¹⁴⁾。昭和30年代には約20 t/haであった収量が、現在では約50 t/haに増加している¹⁵⁾¹⁶⁾。

移植栽培の長所は、①北海道のような寒冷地における生育期間の確保に伴う収量の安定、②間引き労力の節減、③土壤病虫害被害の軽減、④除草労力の節減、⑤播種量の節約等とされている¹⁷⁾。移植栽培において、育苗作業は、規模拡大による管理時間の短縮化、共同播種作業、育苗センターの利用等によって効率化されてきた。また、移植作業に関しては、ホルダー方式からゴム円盤植付方式への移植機構の改良および自動苗選別装置等が開発され、省力化が図られてきた¹⁸⁾。

移植栽培のテンサイの労働時間は、およそ20 h/10 aである¹⁹⁾。これには、人力によるペーパーポットの運搬等も含まれている。北海道における他の基幹作物の場合、小麦3.1 h/10 a、原料用馬鈴薯9.1 h/10 a、大豆14.8 h/10 a、小豆12.7 h/10 aである²⁰⁾。このように、他の作物と比較してテンサイの労働時間は長く、より一層の省力化が求められている。しかしながら、移植栽培では、作業の機械化がほぼ達成されているため、労働時間短縮の余地はほとんど残され

ていないと言わざるを得ない。そこで、近年、省力化および労働時間の短縮の可能性がある直播栽培が見直されてきている²¹⁾。直播栽培が見直されてきている理由には、①前述のように移植体系が苗床への播種作業と移植栽培の際に4～6名の労力を要し、人材確保が困難となっていること、②昭和61年以降テンサイは糖分取引となり、テンサイ根部の含糖率を高めるためにうね間・株間を縮めた移植法が要請され、直播体系の方が適応し易いことなどが挙げられる。直播栽培では育苗作業がないため、その労働時間は移植栽培と比較して平均で約20%少ない約17.7 h/10 aと報告されている²²⁾。移植栽培と直播栽培の収量を比較すると、直播栽培の方が統計上15%少ないとされている。しかしながら、テンサイの場合、年次、場所による変動が大きく、移植栽培と同等の収量を達成している事例も報告されている²³⁾ので、直播栽培における収量の低下はそんなに大きな問題にはならないであろう。直播栽培の作業上の大きな問題点は、間引き作業が必要であり、除草作業の回数が増えるということである。直播栽培の場合、10～15 cm 間隔で播種されるので、本葉が4枚となった時期（通常6月上旬）に間引き作業が必ず必要となる。また、テンサイの発芽時期が雑草の成長と競合する時期であるため、ほ場にはテンサイと大きさがあまり変わらない雑草が多くなる。このため、直播栽培の除草作業は移植栽培と比較して、作業負荷が大きくなる。これらの作業は、まだ主としてホーを使用した人力作業により行われており、これらの作業は総労働投下時間の約60%を占める程になっている²⁴⁾。表1.1に直播栽培と移植栽培の労働時間比較を示す。

直播栽培の省力化の一策として、無間引き栽培の可能性の検討がされている。男沢ら²⁵⁾は、粒径の揃った種子を精密播種機で15～20 cm 間隔に播種し、2粒播種があっても欠株を極力少なくして、さらに出芽率を80%程度確保することができれば無間引き栽培は可能であると述べている。しかし、80%の出芽率を確保するには播種床の入念な準備が不可欠であるが、わが国のテンサイ栽培面積のすべてを占めている北

表 1.1 移植栽培と直播栽培の労働時間比較

作業名	移植	直播
育苗	5.5	—
施肥散布	0.4	0.4
耕起・砕土	1.5	1.9
施肥・播種	—	0.6
移植	4.2	—
間引き	—	4.1
中耕除草	4.7	6.0
追肥	—	0.1
防除	0.7	0.7
収穫	3.7	3.7
その他	0.2	0.2
計	20.9	17.7

北海道では、積雪および土壌凍結のため播種床を早期に準備することは難しく、この発芽率を達成することは容易ではない。そのため、現状では種子を多めに播種し、株立本数を確保した上で、間引きを行うのが実栽培面から考慮して好ましい方法と考えられている。実際、北海道十勝地方においては株間 10 cm の 1 粒点播、あるいは、株間 20 cm の 2 粒播を行い、その後間引きを行うという方法が一般的にとられている。

また同時に、除草作業の機械化を望む声も多い。除草剤の出現は労働力不足を解消し、農業生産の基盤技術として定着したかに見えたが、農産物の安全性、自然生態系の維持、労働者の健康に関する問題を誘発した。最近では BSE（牛海綿状脳症）問題以降、消費者側の農作物に対する要求はますます厳しくなっている。消費者に食の安全を保障する目的で農林水産省は産地、品種および使用農薬等の基礎的な生産・流通情報を消費者に提供するトレーサビリティ（生産履歴を追跡する仕組み）の導入を検討し始めている。このような理由により、無農薬もしくは低農薬栽培ではない野菜の商品価値は相対的に低下しつつあり、除草剤に依存する体系は変更を迫られている。

以上の観点から、省力的直播テンサイ栽培体系の確立には、間引きおよび除草作業の機械化を欠くことができないと考えられる。

B. 本研究の目的と範囲

人がホーなどを用いて間引き・除草作業を行う場合、歩きながらテンサイと雑草を見分け、

雑草なら除草作業を行い、テンサイなら株間を判断し、適切な株間より狭い場合には間引き作業を行うことになる。本研究の目的は、省力的直播テンサイ栽培体系の確立のため、現状では手作業で行われている間引きおよび除草作業を自動的に行うことができる機械およびシステムの開発である。この目的を達成するには、間引き時期におけるほ場内でのテンサイと雑草の識別、間引き・除草が可能なアクチュエータおよびアクチュエータの制御システムを開発する必要がある。本研究では直播テンサイのための間引き・除草作業に特化して研究を行ったが、本研究で開発したシステムは他の農作物の自動株間除草機としての応用も可能である。

本論文は、I. 緒論、VI. 総括を含めて全 6 章で構成されており、本論（II～V）は次のような内容になっている。

第 II 章では間引き時期におけるほ場内でのテンサイと雑草の識別手法について述べる。初めに、土と植物の輝度値の違いを利用した分離、自動しきい値決定法による 2 値化手法を検討した。ついで、2 値化画像から取得した形状特徴量と原画像から取得した色情報をパラメータとして、線形判別関数を用いたテンサイと雑草の識別手法を考案した。直播栽培のテンサイは、移植栽培と比較して間引き時期における生育のばらつきが大きい。そこで、考案した識別手法が間引き時期の生育のばらつきに対する有効性についても考察した。

第 III 章では、ほ場内でのテンサイと雑草の識別において、目標とすべき（間引かずに残す）テンサイおよび雑草の認識性能を導くための間引き・除草ミュレーションについて述べる。間引き作業では設定した株間になるようにテンサイを間引くため、間引かれるべきテンサイを雑草と認識して除草したとしても間引き作業の精度には影響しない。しかしながら、雑草をテンサイと誤認識した場合、雑草でありながらテンサイとして残されるので欠株の原因となる。このように、テンサイの認識だけではなく、雑草の正確な認識も間引き・除草作業に大きな影響を与えるため、テンサイ固有の間引きアルゴリズムが必要とされる。そこで、ほ場内でのテン

サイと雑草の識別において、目標とすべきテンサイおよび雑草の認識性能を導くため間引き・除草シミュレーションを行った。そして、テンサイ、雑草の認識性能を識別正答率として評価し、それらの識別正答率とテンサイの損失の関係、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などについて明らかにした。

第Ⅳ章では、自動間引き・除草機の設計および開発について述べる。自動間引き・除草を行うためのアクチュエータとして、油圧シリンダにより開閉可能な間引き・除草機構を設計開発した。さらに、CCDビデオカメラ、PC、ワンチップコンピュータ、油圧ソレノイドバルブ、ロータリエンコーダおよび間引き・除草機構から構成される自動間引き・除草機を構築し、本システムを制御することにより自動間引き・除草作業を行うアルゴリズムを考案した。

第Ⅴ章では試作した自動間引き・除草機の性能試験について述べる。基本的な性能として間引き・除草機構の開閉時間を測定し、この結果から間引き・除草刃の軌跡を推定した。また、自動間引き・除草システムおよび間引きアルゴリズムの有効性を確認し、間引き・除草刃の開閉精度を検証するために、模擬テンサイを使用して室内実験を行った。さらに、実際のほ場における適応性を確認するために、間引き時期にほ場実験を行った。

C. 既往の研究例

研究背景の節で述べたように、テンサイ栽培の省力化の観点から直播栽培が見直されており、テンサイの直播栽培体系に関連した研究例が報告されている。稲野ら²⁶⁾は碎土率と鎮圧力が直播テンサイの出芽率に及ぼす影響を調査し、粗めの碎土においても鎮圧力を大きくすることにより、播種直後の毛管現象による土壤水分の上昇およびその後の土壤水分の保持、種子と土粒子との密着性が改善され、出芽率が向上することを明らかにした。登坂ら²⁷⁾は間引き作業の自動化を目的とし、ほ場実験を行い自動間引きに適した目標株間および間引き方法を検討した。その結果、株間はテンサイの初期生育に影響を与えるが、最終的な糖収量には影響が及ばないと推定された。間引き方法については、

残す株の大小を考慮するか否かは、根重および根周にわずかに影響を与えたが、糖収量にまでは影響が及ばないことを明らかにし、自動化のための間引き方法は、株間200~250 mmの範囲で株の大小を考慮せずに間引く方法が適当と結論付けている。

自動間引き・除草機の開発には、画像処理技術に基づくテンサイと雑草の識別が必要不可欠となる。近年、コンピュータ技術の急激な発展により、CPUなどの演算装置は高速かつ低価格になってきたことから、視覚センサを用いた作物と雑草の識別に関する研究例が数多く報告されている。Burksら²⁸⁾はカラーテクスチャを変数とし、判別分析法を用いほ場内の雑草種の判別を行っている。柴田ら^{29)~31)}は、物理除草のための作物検出手法として、ハクサイ、キャベツと雑草を大きさによる識別手法、さらに、ハクサイ、キャベツが定植されていることから、作物の配列の規則性を利用し、ファジイ推論を利用した識別手法を考案した。張ら³²⁾は、大根の間引き作業を目的として、間引く幼苗の良否を自動的に判定する画像処理手法を考案した。登坂ら³³⁾はカラー画像の色情報のみによる植物と土壤、テンサイと雑草の識別の可能性についても検討した。これらの研究は、全てRGB3次元データを用いた研究例である。屋外ほ場を対象とした場合には、より多くのスペクトル情報を必要とすることが多いため、近年、マルチスペクトル画像(2~数次元)、ハイパースペクトル画像(数百次元)を用いた研究例も報告され始めている。岡本ら³⁴⁾は、取得した大根、ネギ、カブ、雑草および土壤のハイパースペクトルデータから自己組織化マップ作成し、ハイパースペクトルデータにより作物と雑草を識別することが可能であると報告している。これら上記の研究例は識別のみに留まったものであり、識別結果を用いて除草、間引き等を行うには至っていない。農作物と雑草の識別結果から除草、間引き等の制御に結びつけた研究については、Leeら³⁵⁾によるトマトを対象とし、ロボットによる選択除草を行った報告例がある。Leeらは取得したトマトと雑草画像を2値化し、膨張・縮退を行うことにより、葉を分離した。離れた

葉の形状特徴量を算出し、ベイジアン識別法によりトマトと雑草の葉に識別した。雑草の葉と判断されたものにはスプレーヤからの除草剤により除草を行うシステムを開発した。スプレーヤの位置認識精度は高かったものの、トマトと非常に似ている雑草が存在したため、識別の精度が低いという問題点を残した。Leeらの例は化学的除草を対象としているが、物理除草の自動化については、わが国では、石田ら³⁶⁾³⁷⁾による研究例が報告されている。諸外国における研究例は少ない。石田らは、植物の葉緑体による光の反射率は、600 nm から 700 nm の可視波長帯域では土壌のそれよりも小さいが、近赤外域では土壌のそれよりも大きいという Hooperら³⁸⁾により明らかにされた性質を利用し、大豆畑の株間除草を試みた。ここで、開発された機構は、可視光線と近赤外線の反射率比を測定し、設定値を超えると作物体の識別信号が出され、除草刃爪の動きを制御するものである。この手法は、土壌と植物とを識別することには優れているが、雑草と作物とを識別することはできないので、適用できる条件は雑草量が少ない場合に限られるという問題点を残した。

II. 画像処理によるテンサイと雑草の識別

A. 本章の目的

自動間引きと除草のためには、テンサイと雑草を識別する必要がある。本章では、実際のほ場環境下での実用的識別法を確立することを目的として、画像処理を使った形状による雑草とテンサイの識別法を中心に検討した。識別に必要な形状要因と識別性能の上限を明らかにする

ために、精細な静画像を取得できるデジタルカメラで間引き時期のテンサイおよび雑草を撮影し、作物と土壌の分離手法、識別に有効な形状特徴量を検討した。次に、トラクタに装着した CCD ビデオカメラからの画像においては形状特徴量のみでの識別には限界があることが明らかとなったので、形状特徴量と色情報を組み合わせた識別手法を考案した。リアルタイムで画像処理を行う場合、処理時間が大きな問題となりうる。そこで、識別正答率だけではなく、処理時間の適応性についても検討した。

B. 静画像の取得および画像の前処理

a. テンサイおよび雑草画像の取得

直播テンサイの間引き作業時期は、播種後 30~40 日である。この時期に当たる 6 月下旬に、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において、テンサイとそこに生育している雑草のカラー画像を撮影した。画像撮影には、デジタルカメラ(フジフィルム社製, FinePix)を用いた。画像サイズは、640×480 pixel とした。供試したデジタルカメラの仕様を表 2.1 に示す。

デジタルカメラは焦点距離 6.6 mm~19.8 mm のズームレンズを装備し、露出およびフォーカスに自動調節機能を有している。焦点距離は 6.6 mm で使用した。カメラの高さは、間引き時期のテンサイが画像内に収まるように、画像の横方向の 640 pixel が地表面上 400 mm となる 510 mm に設定した。

撮影対象は、テンサイと、同ほ場における典型的な 3 種類の雑草、アオビユ、ソバカズラおよびスギナの計 4 種類とした。直射日光が当た

表 2.1 デジタルカメラの仕様

製造会社	富士写真フィルム
型番	FinePix 1700 Z
記録方式	DCF 準拠/DPO 対応
撮影素子	1/2.2 インチ正方形画素インターライン CCD: 150 万画素
撮影感度	ISO 125 相当
記録画素数	640×480 pixel
レンズ	スーパー EBC フジノン光学式 3 倍ズームレンズ
ホワイトバランス	自動
焦点距離	6.6 mm~19.8 mm
絞り	F 3.2~F 5.0

る条件下で撮影された画像については、2値化するための適切なしきい値を算出するのが困難であることが予備実験により明らかとされたので、直射日光による影が現れないように段ボール紙により遮光して撮影を行った。テンサイおよび雑草の画像例を、図2.1に示す。撮影枚数はテンサイ290枚、アオビユ210枚、ソバカズラ281枚、スギナ145枚の合計926枚であった。以下に、各雑草種について述べる³⁹⁾⁴⁰⁾。

アオビユはアメリカ熱帯原産の帰化植物で1年草である。幼植物の葉は広卵形でまばらに毛がある。生育すると茎は直立し、時に赤みを帯びて、葉は菱状卵形で先は鋭くとがってくる。

ソバカズラはヨーロッパ、西部アジア原産の帰化植物で畑地に生える1年草。発生はおもに関東以北に分布し、北海道では畑地の強害草になっている。暖地でもかなりの発生が見られる。

スギナは多年草であり、荒地や田のあぜ、土手などに群生し、畑地や樹園地にも多く生える防除の困難な強害草である。酸性土壌を好み、地下茎を伸長させながら各節から出芽し、繁殖していく。

b. 画像の2値化

撮影したカラー画像をそのまま用いると計算量も増え、処理コストも高くなりがちである。2値化画像を用いた方が幾何学的概念を適用しやすく、理論的にも扱いやすいという利点がある。本研究では形状を用いて識別することを想定しているため、識別の前処理として画像の2値化を行った。

これまでに様々な2値化理論が報告されているが、本研究では登坂ら⁴¹⁾が報告している方法を用いた。この方法はRGB輝度空間における植物体と土壌の分布の相違を利用したものである。図2.2は植物および土壌のRGB輝度値を示したものである。図中には植物と土壌の輝度を用いて算出した植物および土壌の回帰曲線も示してある。この図を見ると植物と土壌の輝度は、輝度が極端に大きいかあるいは小さい場合を除いて、ほぼ平行に分布していることがわかる。これより、植物と土壌との分離を最大にするような平面を設定し、輝度をその平面上へ投影することによって、単一平面上での識別が可

能になる。分離を最大にする平面は、植物および土壌の輝度がほぼ平行な直線で回帰できる中央部の輝度データから主成分分析により求めた。このようにして求めた最大分離平面への変換行列を式(2.1)に示す。また、式(2.1)に基づいて座標変換を行った結果を図2.3に示す。変換後の平面の主軸を Z_1 、副軸を Z_2 とした。植物体の抽出には、図2.3に示されるように Z_2 値を利用すれば良い。登坂らは Z_2 値がほぼ4を境に植物と土壌が分離していることから、 Z_2 のしきい値を4することにより、植物と土壌の識別が可能になると報告している。しかし、土壌が比較的白い場合は Z_2 値のヒストグラムの谷が4より小さくなり、しきい値を4に固定して2値化することは困難である。

$$\begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.583 & 0.585 & 0.564 \\ 0.441 & -0.811 & 0.385 \\ -0.683 & -0.025 & 0.730 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R-145.5 \\ G-145.1 \\ B-90.19 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

最適なしきい値を自動的に決める問題はしきい値選択と呼ばれ、これまで様々な手法が考案されている。以下に主なしきい値選択法を示す⁴²⁾⁴³⁾。

- ①モード法：その濃度分布が双峰的な場合、谷の底にあたる濃度をしきい値とする方法である。
- ② p タイル法：対象物の画面上で占める面積割合 p が既知で、かつ、背景と対象の濃度値の大小関係が単純な場合、2値化画像中の1の画素(白色、0は黒色)の割合が p となるようにしきい値を決める方法である。
- ③微分ヒストグラム法：微分ヒストグラム法は、対象物と背景の境界部分の濃度差に着目した方法であり、中心画素と周囲8画素との濃度差の総和(微分ヒストグラム)を求め、この和が最大となる画素の濃度値をしきい値とする。
- ④判別分析法：統計的な手法によりしきい値を求める。濃度値の集合を2つのクラスに分けたときのクラス間の分離が最もよくなるようにしてしきい値を求めるものである⁴⁴⁾。

本研究では、上記の4つの中から④判別分析法を用いることにした。画面上の画素が持つ濃

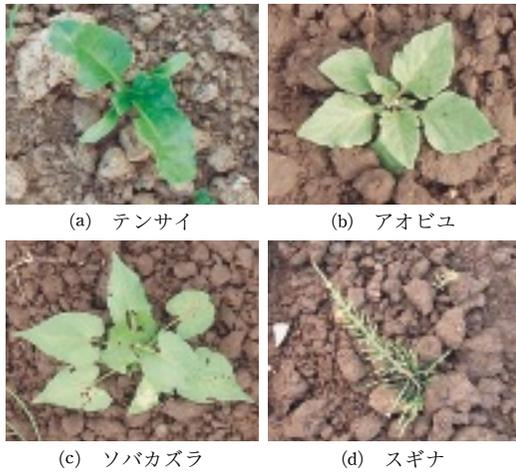


図 2.1 テンサイおよび雑草の撮影画像

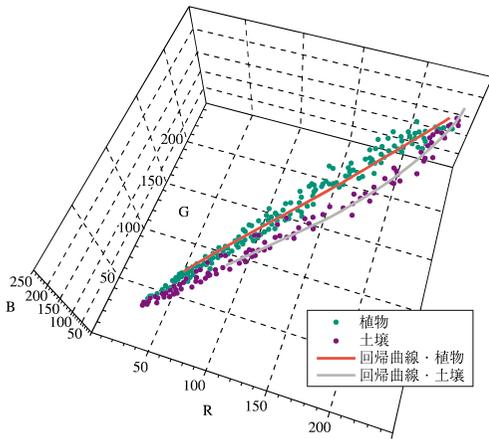


図 2.2 植物および土壌輝度値の分布

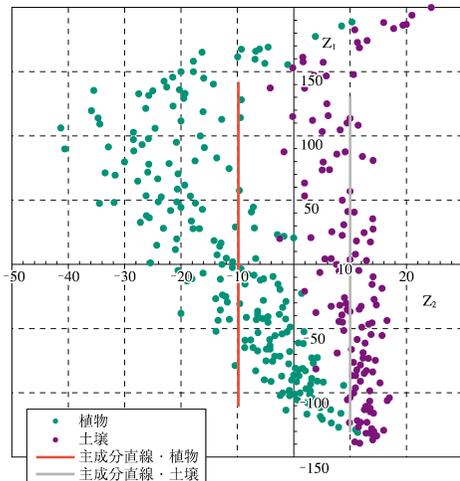


図 2.3 座標変換後の輝度値の分布

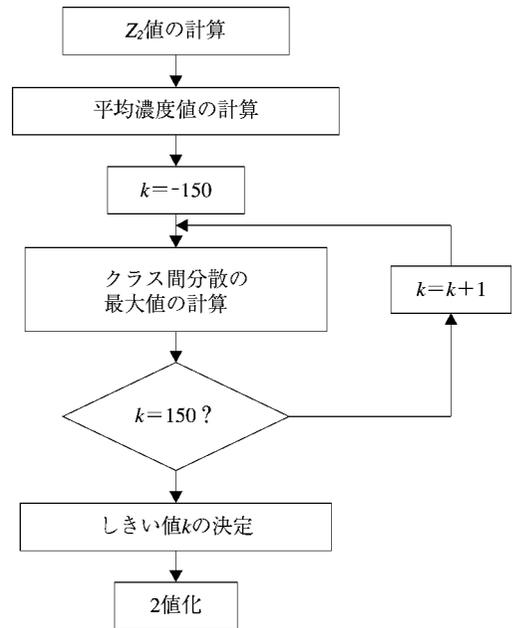


図 2.4 2 値化処理のフローチャート



(a) 原画像



(b) 2 値化画像

図 2.5 テンサイの 2 値化例

度値のクラス間分散 σ_B^2 , クラス内分散 σ_W^2 および全分散 σ_T^2 との間には, 常に式 (2.2) の関係が成り立つ。

$$\sigma_B^2 + \sigma_W^2 = \sigma_T^2 \quad (2.2)$$

1画面内においては σ_T^2 はしきい値とは無関係に一定となる。判別分析法は, クラス間分散が最大となるように濃度分布を2分割する方法である。 σ_B^2 は濃度値 k の関数として式 (2.3) のように表され, Z_2 値の最小値-150から最大値150の範囲内で最大値 $\sigma_B^2(k)_{\max}$ を与える k をしきい値とした。処理の流れを図2.4に示す。

$$\sigma_B^2(k) = [\mu_T \cdot \omega(k) - \mu(k)]^2 / \omega(k) [1 - \omega(k)] \quad (2.3)$$

ここで,

μ_T : 全画素の平均濃度値

$\omega(k)$: 濃度値 k までの濃度分布における
0次モーメント

$\mu(k)$: 濃度値 k までの濃度分布における
1次モーメント

$\omega(k)$ および $\mu(k)$ は, 式 (2.4), 式 (2.5) の漸化式で求められる。

$$\omega(k) = \omega(k-1) + P_k, \quad \omega(1) = P_1 \quad (2.4)$$

$$\mu(k) = \mu(k-1) + kP_k, \quad \mu(1) = P_1 \quad (2.5)$$

ここで,

$P_k = n_k / N$: 濃度値 k をもつ画素数の全画素数に対する割合

n_k : 濃度値 k をもつ画素数

N : 全画素数

デジタルカメラで撮影した画像ファイルはjpg形式で保存されるため, Windows用汎用画像処理ソフト JascSoft社製 PaintShop Pro Ver 6.00を用いてMicrosoft Windowsビットマップ形式に変換した後に, 前述した手法を用いて原画像の2値化を行った。テンサイの2値化例を図2.5に示す。

C. 形状特徴量

a. 植物体全体の形状特徴量の取得

人間の外部世界に対する認識は, 多くを観察した対象の形状に負っており, 形状特徴量の抽出はパターン認識において最も多用されている⁴⁵⁾。つまり, 人間が植物体の形状からその種類を識別する場合, 丸い, 細長い等の全体的な形の特徴と, 葉の縁がギザギザしている, 葉の先

が尖っている等の局所的な特徴を総合的に判断していると言える。そこで, まず, テンサイと雑草の2値化画像の植物体全体の形状特徴量を算出し, 識別に供することを考えた。

全体的な形状を表す量として, 面積 A , 穴の数 H , 周囲長 r , 面積/周囲長 T , 最大径円面積比 M , 長軸2次モーメント Wl , 短軸2次モーメント Ws , フェレ径比 Fr , 円形度係数 C をアイスペック社製の画像処理オブジェクト (IoObject) を用いて開発した測定ソフトにより測定した。

面積 A は連結成分に属する1画素 (黒色) の個数を数え上げたものである。

周囲長 r とは2値化画像の境界画素数のことである。(ただし, 斜め連結の場合は $\sqrt{2}$ 倍にする必要がある。) 周囲長/面積 T は面積を周囲長で除した値である。

穴の数 H は, 抽出物体内にある穴の数で, 群生している植物 (主にソバカズラ) を識別するために測定した。図2.6に穴のあるソバカズラの2値化画像を示す。

最大径円面積比 M とは, 抽出された物体の最大径を直径とする円の面積を抽出物体の面積で除した値である。葉の大きさが揃っていて, 植物体全体の形が円に近いほど1に近い値となり, 葉の大きさに差があって, 全体の形が細長いものほど大きな値となる。つまり, M の取り得る値の範囲は, $1 \leq M < \infty$ である。作物の面積を A , その最大径を L とすると, 式 (2.6) で表すことができる⁴⁶⁾。

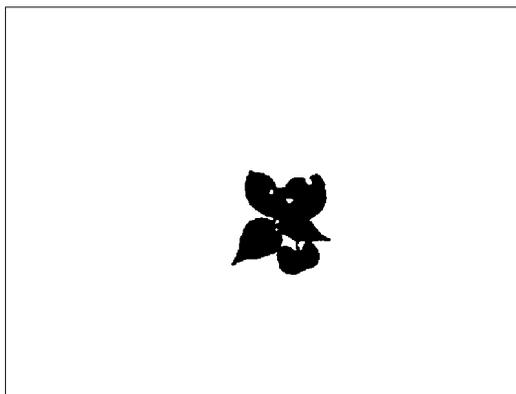


図2.6 穴のあるソバカズラ2値化画像

$$M = \pi L^2 / 4A \quad (2.6)$$

2次モーメントは、慣性モーメントとも言われ、抽出された物体の面積を A とし、その微小面積 dA に対して重心からの x 軸方向あるいは y 軸方向の距離の2乗を乗じ、 A について積分した量である。また、慣性相乗モーメントは重心からの x 軸方向と y 軸方向の距離を積算し、 A について積分した量と定義される。長軸2次モーメント Wl は、抽出物体の重心を通る軸を平面上で回転させて、逐次、その2次モーメントを求めた時の最大値、短軸2次モーメント Ws は最小値である。長軸2次モーメントは、抽出された物体の重心への集まり方を反映しているため、ソバカズラのように葉が群生し、大きく広がっている場合は大きな値となり、逆に、テンサイのように重心付近に葉が集まっている場合は小さな値となる。 w_x を重心から x 軸方向の2次モーメント、 w_y を重心から y 軸方向の2次モーメント、 w_{xy} を慣性相乗モーメントとすると、長軸2次モーメント、短軸2次モーメントはそれぞれ式 (2.7) および式 (2.8) で表すことができる⁴⁷⁾。

$$Wl = \frac{1}{2}(w_y + w_x) + \frac{1}{2}\sqrt{(w_y - w_x)^2 + 4w_{xy}^2} \quad (2.7)$$

$$Ws = \frac{1}{2}(w_x + w_y) - \frac{1}{2}\sqrt{(w_y - w_x)^2 + 4w_{xy}^2} \quad (2.8)$$

最小フェレ径、最大フェレ径は抽出物体の重心を通る線の最大値と最小値であり、フェレ径比 Fr は最大フェレ径を最小フェレ径で除した値である。

円形度係数 C は周囲長を r 、面積を A とすると、式(2.9)で示され、完全な円の場合は $C = 1$ となる。また、 C の逆数は複雑度とも呼ばれる。

$$C = 4\pi A / r^2 \quad (2.9)$$

b. 局所的な形状特徴量

詳細は後述するが、判別分析のみではテンサイと雑草のソバカズラを高精度に識別することは困難であった。一般に、テンサイの葉は葉先が丸い形状をしているが、ソバカズラの葉先は尖っている。この葉先形状の違いを、“葉先角度”

として数値化することを試みた。

葉先からの角度を算出するためには、まず、起点となる葉先点を決定しなければならない。このために、2値化画像の図心を求め、さらに輪郭線を検出した(図2.7)。

次いで、1 pixel ずつ輪郭線を走査し、その都度図心から輪郭線までの距離を計算した。これを図2.8に示す。ただし、得られた曲線を滑らかにするために、5個の移動平均により平滑化してある。この曲線のピーク位置が葉先点であり、図2.7の場合、図2.8からそれが4つ検出されたことを示している。

間引き時期のテンサイは、本葉2枚と小さな子葉2枚の計4枚の葉で構成されている場合が多い。一方、ソバカズラは、同時期において葉の枚数にばらつきが多いが4~6枚である。そこで、テンサイに合わせて大きい方から4枚の葉の葉先先端部(葉先点と呼ぶ)を検出ことにした。検出した4枚の葉の葉先点から葉縁両側方向に輪郭線走査⁴⁸⁾を行い、ベクトルの内積を利用してそれぞれの位置で葉先角 θ の余弦値を求めた(図2.8)。この余弦値を“葉先角度”と定義した。

D. 判別分析法

テンサイと雑草の識別は、判別分析法により行なった。判別分析法とは、2つ以上の群(母集団)から取り出された多変量データに基づい

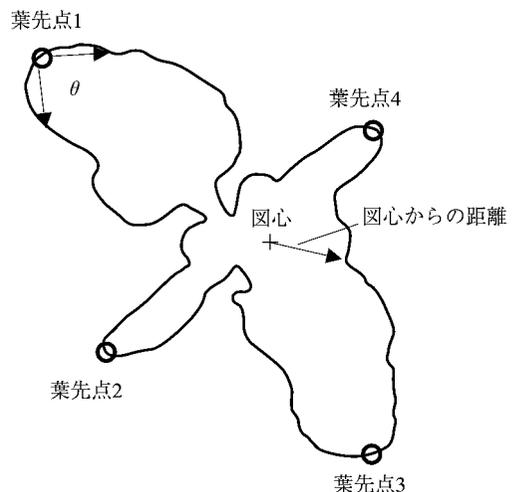


図2.7 輪郭線の検出と葉先角度の定義

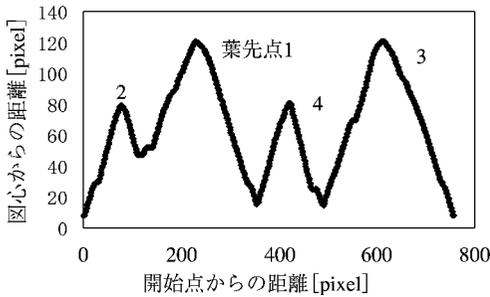


図 2.8 図心からの距離

て、所属不明の新しいサンプルが、それらのいずれの群に所属するのかを判別するための手法である⁴⁹⁾。判別分析には、Stat Soft JAPAN 社製統計処理ソフト「STATISTICA」を用いた。

本研究ではテンサイと3種類の雑草を判別の対象としているので、3群以上の線形判別関数を使用されることになる。 $x_i^{(k)}$ をk群のi番目の標本ベクトル、 nk をk群の標本数、 g を総群数とし、各群の分散共分散行列は等しいと仮定すると、k群の標本平均値ベクトル $\bar{x}^{(k)}$ は式(2.10)となる。

$$\bar{x}^{(k)} = \frac{1}{nk} \sum_{i=1}^{nk} x_i^{(k)} \quad (2.10)$$

また、標本分散共分散行列 S_{cv} は式 (2.11) となる。

$$S_{cv} = \frac{1}{n-g} \sum_{k=1}^g \sum_{i=1}^{nk} (x_i^{(k)} - \bar{x}^{(k)}) (x_i^{(k)} - \bar{x}^{(k)})' \quad (2.11)$$

ここで、'は転置を表す。従って、線形判別関数ベクトル $S_k(x)$ は式 (2.12) のように定義することができる。

$$S_k(x) = x' S_{cv}^{-1} \bar{x}^{(k)} - \frac{1}{2} \bar{x}^{(k)'} S_{cv}^{-1} \bar{x}^{(k)} \quad (2.12)$$

線形判別関数導出用の419枚の画像(テンサイ136枚、アオビユ83枚、ソバカズラ131枚、スギナ69枚)から抽出された6つの形状特徴量を変数として、判別分析のための線形判別関数を導いた。得られたテンサイ、アオビユ、ソバカズラおよびスギナの線形判別関数を式(2.13)に示す。また、この時の識別結果を表2.2に示す。この結果からテンサイおよび雑草の識別正答率はそれぞれ77.2%、94.0%が期待できる。

$$\begin{bmatrix} S_{B_1} \\ S_{C_1} \\ S_{W_1} \\ S_{H_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.00166 & 1.087649 & 12.611702 & -0.00134 \\ -0.00161 & 1.431421 & 1.899174 & -0.00239 \\ -0.00107 & 1.380735 & 2.666618 & -0.00339 \\ -0.00058 & 2.006501 & 5.660271 & -0.00504 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ H \\ M \\ Wl \\ T \\ Er \\ l \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

この線形判別関数を検証するために、テンサイおよび雑草の検証用画像から算出された上記6つの各形状特徴量 A, H, M, Wl, T, Fr を式 (2.13) 代入する。その結果、各画像に対して $S_{B_1} \sim S_{H_1}$ までの4つの値が求められる。これらの値は、一般に分類スコアと呼ばれ、それぞれテンサイ、アオビユ、ソバカズラ、スギナに対応する。分類スコア $S_{B_1} \sim S_{H_1}$ の内で、最も高い値を示したものに、その画像が属するということになる⁵⁰⁾。例えば、ある画像において、分類スコアが $S_{B_1}=10, S_{C_1}=5, S_{W_1}=12, S_{H_1}=8$ と求められた時、その画像はソバカズラの画像で

表 2.2 線形判別関数導出用画像による識別結果

	サンプル数 (個)	識別結果 (%)			
		テンサイ	アオビユ	ソバカズラ	スギナ
テンサイ	136	77.2	16.9	5.9	0.0
アオビユ	83	2.4	85.5	12.0	0.0
ソバカズラ	131	11.5	21.4	67.2	0.0
スギナ	69	0.0	8.7	0.0	91.3

あるということになる。

E. 結果および考察

a. 線形判別関数①の検証

前節で導出した線形判別関数を線形判別関数①とし、その検証結果を、表 2.3 に示す。線形判別関数に対する検証用画像は、テンサイ 133 枚、アオビユ 75 枚、ソバカズラ 132 枚、スギナ 59 枚の計 399 枚であった。テンサイをテンサイと正しく識別したものは 85.7%であった。テンサイを雑草と誤識別した中で、アオビユと誤識別された場合が最も多く、11.3%であった。ソバカズラとして誤識別されたものもわずかながら存在した。この誤識別は、除草の際にテンサイを取り除くことを意味するので大きな問題となる。テンサイをアオビユと誤識別したものの大部分は、生育初期の面積の小さなテンサイに対してであった。形状の傾向としては、テンサイの本葉と子葉の大きさの差が小さい、子葉が十分に生育していない等の特徴が見られた。

雑草をテンサイと誤識別されたものは、ソバカズラが最も多く 13.6%であった。この場合のソバカズラは、面積が大きい、つまり、横長でフェレ径比が大きいものであった。アオビユをソバカズラ、ソバカズラをアオビユと誤識別された割合も高いが、これらは雑草間の誤識別なので除草等の実作業上の問題はない。

b. 線形判別関数②による再識別

線形判別関数①による識別では、テンサイがアオビユと誤識別され、テンサイの識別正答率を下げる原因となった。この誤識別を低減させるため、線形判別関数①による識別においてアオビユと識別されたものについて、同じ形状特徴量を用いて、再度、識別を行なった。この時、判別分析の対象は線形判別関数①導出時にアオビユと判断された画像のみであるので、1回目

の判別分析に用いられた線形判別関数①とは異なる、新たな線形判別関数が導かれることになる。2 回目の判別分析用の線形判別関数②は式 (2.14) のように求められた。

$$\begin{bmatrix} S_{B_2} \\ S_{G_2} \\ S_{W_2} \\ S_{H_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.009076 & 0.264438 & 35.91326 & -0.04698 \\ 0.011063 & 0.456871 & 34.99637 & -0.06072 \\ 0.011554 & 0.380776 & 37.36404 & -0.05631 \\ 0.016876 & 0.440813 & 45.98292 & -0.08387 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ H \\ M \\ W \\ T \\ F \\ I \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

検証用画像のうち線形判別関数①でアオビユと識別されたものは、テンサイ 15 個、アオビユ 61 個、ソバカズラ 24 個、スギナ 8 個の合計 108 個であった。2 回の識別を総合した結果を、表 2.4 に示す。テンサイをアオビユと誤識別された内の 33.3%が、正しくテンサイとして識別された。しかしながら、アオビユの 6.6%、ソバカズラの 25.0%がテンサイと誤識別された。判別分析を 2 度行なうことにより、テンサイをアオビユと誤識別するものが 6.8%減り、テンサイの識別正答率は 85.7%から 89.5%に上昇した。しかしながら、アオビユをテンサイと誤識別したものは 5.3%から 10.7%に、ソバカズラをテンサイと誤識別したのも 13.6%から 18.2%にそれぞれ上昇した⁵¹⁾。

c. 判別分析と葉先角度による識別

1) 葉先角度による識別

ソバカズラをテンサイと誤識別するのを減らすため、ソバカズラの葉の特徴、すなわち葉先が鋭角に尖っている事を利用して識別することを試みた。

表 2.3 線形判別関数①による識別結果

	サンプル数 (個)	識別結果 (%)			
		テンサイ	アオビユ	ソバカズラ	スギナ
テンサイ	133	85.7	11.3	3.0	0.0
アオビユ	75	5.3	81.3	13.3	0.0
ソバカズラ	132	13.6	18.2	68.2	0.0
スギナ	59	0.0	13.6	0.0	86.4

表 2.4 2回の識別を総合した識別結果

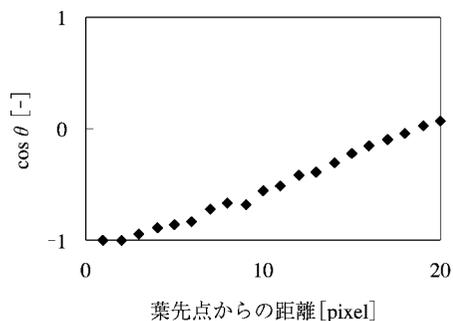
	サンプル数 (個)	識別結果 (%)			
		テンサイ	アオビユ	ソバカズラ	スギナ
テンサイ	133	89.5	4.5	6.0	0.0
アオビユ	75	10.7	74.7	14.7	0.0
ソバカズラ	132	18.2	8.3	73.5	0.0
スギナ	59	0.0	1.7	0.0	98.3

a) 葉先角度の算出

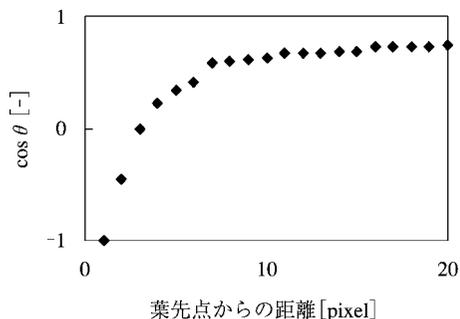
葉先点から 20 pixel まで輪郭線走査した時のテンサイ、ソバカズラの葉先角度の推移を図 2.9 に示す。テンサイの場合、葉先角度は 20 pixel まで直線的に増加したが、ソバカズラの場合は、8 pixel 付近まで直線的に上昇した後、収束する飽和曲線のような傾向を示した。これは、テンサイの葉先は一様に丸みを帯びているのに対し、ソバカズラの葉先は突起状になっているためである。

b) 境界値の決定

テンサイとソバカズラの任意の葉 50 枚をサ



(a) テンサイ



(b) ソバカズラ

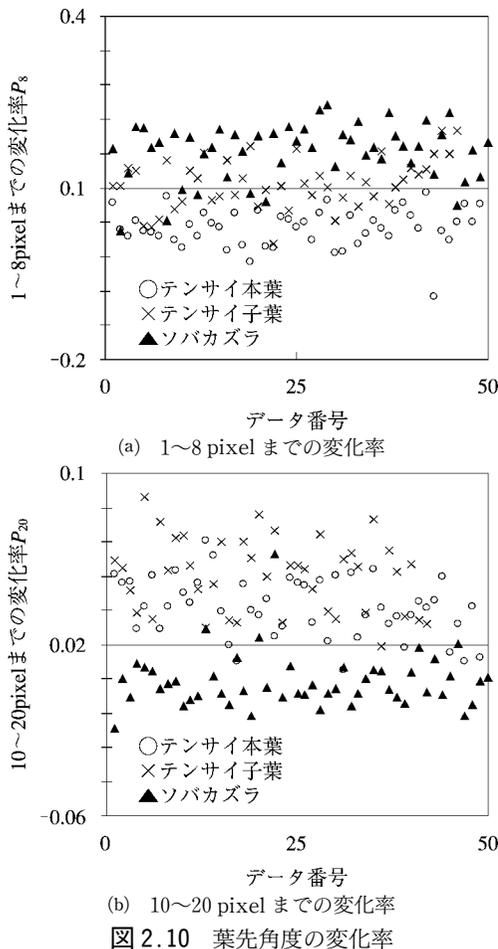
図 2.9 葉先角度の推移

ンプルとして、葉先角度による識別のための境界値を求めた。ただし、テンサイでは、本葉と子葉を比較すると本葉の方が子葉より葉先の角度が大きいため、区別して考えることにした。1 pixel から 8 pixel までの傾きを P_8 、10 pixel から 20 pixel までの傾きを P_{20} と定義した。図 2.10 に、供試した葉における P_8 と P_{20} の値を示す。 P_8 については、テンサイの本葉は -0.09 から 0.09 、テンサイの子葉は 0.002 から 0.20 、ソバカズラは 0.04 から 0.25 の範囲にあり、それぞれ平均は 0.03 、 0.10 、 0.17 、標準偏差は 0.033 、 0.042 、 0.046 であった。テンサイの本葉、子葉とソバカズラを、 0.1 を境界としてほぼ分けられた。 P_{20} については、テンサイの本葉は 0.01 から 0.07 、テンサイの子葉は 0.02 から 0.09 、ソバカズラは -0.02 から 0.06 の範囲にあり、それぞれ平均は 0.04 、 0.05 、 0.002 、標準偏差は 0.014 、 0.017 、 0.0123 であった。テンサイの本葉、子葉とソバカズラを、 0.02 を境界としてほぼ分けられた。

これより、 P_8 が 0.1 以上で P_{20} が 0.02 以下の時、ソバカズラの葉である可能性が高いと判断される。よって、葉先の形状から P_8 、 P_{20} を算出し、ソバカズラの条件を満たした時に、その葉に得点 1 を与え、満たしていなければ得点 0 を与えることにした。この試行を検出した 4 枚の葉の葉先点について行い、得点の和を求めた。この得点の和を“葉先識別得点”と定義した。

c) 葉先角度の識別結果

葉先識別得点の算出結果を、表 2.5 に示す。供試した画像数は、テンサイ 227 個、ソバカズラ 153 個であった。テンサイは、葉先識別得点が 0 となるものが全体の 80.6% を占め、逆にソバカズラは葉先識別得点が 1 以上になるものが全体の 92.2% であった。つまり、葉先識別得点



の境界値を 1 とすることでテンサイとソバカズラを識別することが可能であることが分かった。

ソバカズラでありながら、葉先識別得点が 0 となりテンサイと誤識別されたものは、生育初期段階の葉先が丸くてテンサイの葉の形に近い場合であった。逆に、テンサイでありながら識別得点が 1 以上になり、ソバカズラと誤識別する場合の原因は、大きく以下の 3 つの場合であ

表 2.5 葉先識別得点の算出結果

	葉先識別得点				
	0	1	2	3	4
テンサイ	183	41	2	1	0
ソバカズラ	12	57	29	22	3

ることが観察された。

① 葉先ではない場所を検出

子葉が未展開のテンサイの場合、葉先でない場所を葉先点として検出した。

② 小さな雑草の重なり

小さな雑草あるいは小さな葉同士が互いに重なっている場合、葉先の角度が鋭角になり、ソバカズラの葉に似た特徴を持った。

③ 風の影響による形状の変化

風の影響により、葉が鉛直方向に立つ、葉が裏返る等、葉先形状が変化することが観察された。これによりテンサイの葉先が鋭角になった。

d) 条件付き葉先検出

ソバカズラをテンサイとする誤識別は、ソバカズラの葉がテンサイの葉に似た特徴を示すために起こることなので、アルゴリズムの改良での誤識別の解消は困難である。一方、「風によるテンサイの葉の形状変化」による誤識別は、風除等の工夫をして画像撮影すれば、ある程度回避できると考えられる。そこで、テンサイにおいて「葉先ではない場所を検出する」と「小さな雑草の重なり」による誤識別を防ぐために葉先検出に条件を付けて識別することを試みた。その条件とは、図心から葉先までの距離と 2 つの葉先点間の距離である。まず、テンサイについて、図心から葉先までの距離を調べた。子葉の場合、図心から葉先までの距離は、図心から最も離れた葉先までの距離の 60% 以上であった。よって、葉先点を検出する時、図心から最も離れた葉先までの距離と比較して、その距離が 50% 以下のものは葉先ではないとした。次に、葉の周囲長を考慮すると、2 つの葉先間の距離が 50 pixel 以下であれば、1 つの葉に葉先が 2 つ存在することになる。そこで、4 つの葉先間のそれぞれの距離を計算し、その距離が 50 pixel 以下であれば 1 つ葉に 2 つ葉先点が存在したものとして、共に葉先ではないとした。

葉先角度での識別正答率の推移を、図 2.11 に示す。葉先点の検出に条件を付けた識別に用いたサンプル数は、テンサイ 271 個、ソバカズラ 256 個であった。テンサイの葉先識別得点は、230 個が 0 となり葉先検出に条件を付けない場

合と比較して約4.3%識別正答率が上がった。このように、風の影響による誤識別以外はほぼ取り除くことができ、葉先検出に条件を付けることで、テンサイの識別正答率は80.6%から84.9%に上がった。

ソバカズラに対しても葉先点検出に条件を付け、識別を行った。その結果、識別正答率は92.2%から90.2%に低下した。この理由は、ソバカズラの場合、葉先点検出に条件を付けることで、検出された葉先点の数が4つ未満に減少した。これによって、識別得点の値が相対的に小さくなり、葉先識別得点が1未満となる結果を生じた。ソバカズラの検出された葉先点の減少について、2つの条件を詳細に検討した。葉先点までの距離という条件によって検出されない葉先はほとんどなかった。すなわち、ソバカズラにおいて、検出された葉先点は、葉先が互いに50 pixel以内に隣接する葉先点は検出しないという条件に当てはまり、葉先の検出数が低下したと考えられた。

2) 分類スコアの再検証

ソバカズラをテンサイと誤識別されたものを減らすために、判別分析でテンサイと識別されたものについて葉先角度で再識別する必要がある。葉先角度によるテンサイの識別正答率は、84.9%であったので、判別分析でテンサイ、ソバカズラと識別されたものを葉先角度で再識別しても識別正答率の大幅な向上は見込めないと考えられる。そこで、判別分析においてテンサイをソバカズラ、ソバカズラをテンサイと誤識

別されたものについて分類スコアの値に注目し、その差により推定することを試みた。

テンサイとソバカズラが互いに誤識別された場合、それらの分類スコアは、近い値となる傾向があった。そこで、線形判別関数導出用画像において、テンサイをソバカズラとして、ソバカズラをテンサイとしてそれぞれ誤識別された場合の、テンサイとソバカズラの分類スコアの値を綿密に検討した。その結果、ソバカズラをテンサイと誤識別した場合、それらの分類スコアの差は、1未満であった。また、テンサイをソバカズラと誤識別した9個の内の8個が、分類スコアの差は1未満であった。つまり、テンサイとソバカズラ分類スコアの差が1未満の場合、誤識別された可能性が高いと考えられる。

検証用画像でも、テンサイとソバカズラにそれぞれ識別された場合について、分類スコアの差が1未満となったものを調べた。その結果、ソバカズラをテンサイと誤識別したもの全て、テンサイをソバカズラと誤識別したものの4個の内3個が分類スコアの差が1未満であった。これにより、分類スコアの差を考慮することによって、テンサイとソバカズラの間で誤識別しやすいものを抽出できることが示された。

判別分析によりテンサイ、ソバカズラと識別され、かつ、分類スコアの差が1未満となったものについて、葉先角度を用いて再識別を行った。ただし、2回行った判別分析の内、1回目の判別分析の方がソバカズラをテンサイとして誤識別したものが多かったので、1回目の判別分析の結果のみを再識別の対象とした。表2.6に、分類スコアが1未満となったもの内訳と再識別結果を示す。原画像がテンサイでありながら、分類スコアが1未満のものは29個あった。その内訳は、テンサイと正しく識別されたものが26個、ソバカズラと誤識別されたものは3個であった。これらについて葉先角度を用いた再識別の結果、テンサイをテンサイと正しく識別されたものは26個から23個に減少した。また、テンサイをソバカズラとして誤識別したものは6個に増えた。

ソバカズラにおいて、分類スコアが1未満のものは53個であり、その内、テンサイと誤識別

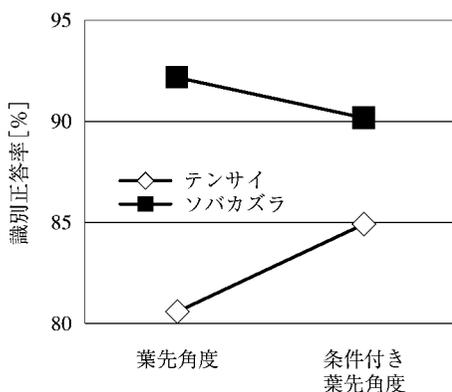


図 2.11 葉先角度での識別正答率の推移

表 2.6 葉先角度で再識別した結果

	分類スコア 1 未満			再識別結果の内訳	
	テンサイ	ソバカズラ	計	テンサイ	ソバカズラ
テンサイ	26	3	29	23	6
ソバカズラ	18	35	53	3	50
アオビユ	3	4	7	1	6

されたものが18個、ソバカズラと正しく識別されたものが35個であった。葉先角度を用いて再識別を行なった結果、テンサイと誤識別したものが18個から3個に減少し、ソバカズラとして正しく識別されたものが35個から50個に増えた。アオビユでありながら、判別分析においてテンサイまたはソバカズラと誤識別され、分類スコアが1未満となったものは7個存在した。従って、この7個のアオビユについても再度識別されなければならない。上記と同様の識別を行なった結果、アオビユをテンサイとして誤識別されたものは3個から1個に減少した。

このように、葉先角度で再識別することにより、テンサイの識別正答率は多少減少したが、雑草をテンサイと誤識別するものを大幅に減少させることができた。

d. 総合評価

2つの線形判別式と判別分析と葉先角度による識別の流れを図2.12に、また最終的な識別結果を表2.7に示す。図2.13には、テンサイの識別正答率および雑草をテンサイと誤識別する率の推移を示す。左の縦軸がテンサイの識別正答率、右の縦軸が雑草をテンサイと誤識別した率を表している。テンサイの識別正答率は葉先角度によって再識別されたことにより最終的に87.2%に下がったが、アオビユをテンサイと誤識別されたものは10.7%から8.0%に、ソバカズラをテンサイと誤識別されたものは18.2%

から6.8%に大幅に減少した。アオビユ、ソバカズラおよびスギナを雑草として識別正答率を算出すると、雑草の識別正答率は94.4%となる。

以上のように、テンサイと雑草の識別を、形状特徴量を2つの線形判別関数による識別に加えて、誤識別可能性の高いものについて葉先角度を使用した識別により実現した。テンサイの約90%の識別正答率を維持しながら、雑草をテンサイとしての誤識別を8%以下に減少させ、高精度なテンサイと雑草の識別を行なうことが

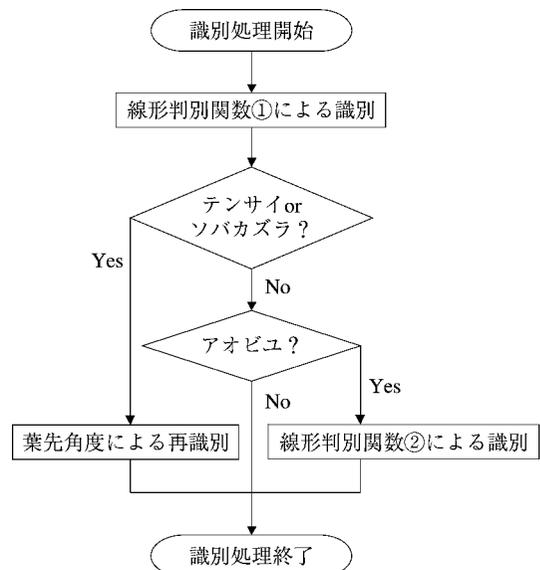


図 2.12 識別の流れ

表 2.7 最終的な識別正答率

	サンプル数 (個)	識別結果 (%)			
		テンサイ	アオビユ	ソバカズラ	スギナ
テンサイ	133	87.2	4.5	8.3	0.0
アオビユ	75	8.0	74.7	17.3	0.0
ソバカズラ	132	6.8	8.3	84.8	0.0
スギナ	59	0.0	1.7	0.0	98.3

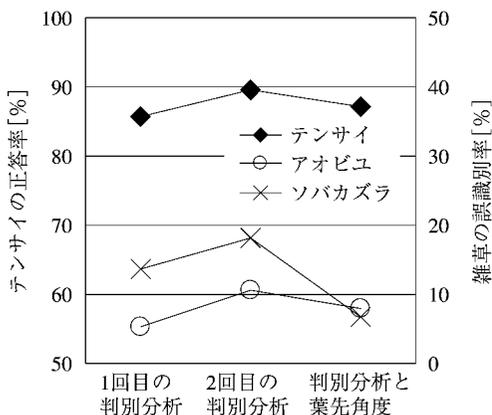


図 2.13 識別正答率の推移

できた^{52)~54)}。

F. 走行しながらの画像取得

前節まではデジタルカメラより取得した静止画を対象として、テンサイと雑草の識別を行い、形状特徴量のみでテンサイの識別正答率 87.3%，雑草の識別正答率 94.4%という結果を得た。自動間引き・除草作業では、当然走行しながらのリアルタイム処理が必要とされる。そこで、トラクタに CCD ビデオカメラを装着し、間引き時期のテンサイおよび雑草の動画を撮影した。撮影は 2002, 2003 年にテンサイの間引き時期である 6 月上旬, 7 月中旬に、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で行った。トラクタの走行速度は 0.1 m/s であった。撮影したのは晴天時および曇天時の昼間である。撮影した雑草はアオビユ, アカザ, ソバカズラ, スギナ, エノコログサである。使用した CCD ビデオカメラおよびマウントレンズの仕様は表 2.8 および 2.9 に示したとおりである。

横方向 320 pixel が地表面上 400 mm になるようにキャリブレーションを行い、カメラ高さを 560 mm に決定した。テンサイのうね間は 660 mm であるため、トラクタ中心から 330 mm ずらした位置に CCD ビデオカメラを取り付けた。トラクタ (イセキ社製, TGS33) に装着した CCD ビデオカメラの様子を図 2.14 に示す。また、デジタルカメラでの撮影と同様に、晴天時には、トラクタに遮光板を装着し、画像

表 2.8 CCD ビデオカメラの仕様

製造会社	SONY
型番	XC-777A
画素数	1/3 型 IT Hyper HAD CCD
色フィルター	補色モザイクフィルター
有効画素数	768(H) × 494(V)
レンズマウント	NF マウント
水平解像度	470 TV 本
シャッタースピード	1/1000, 1/4000, FL
感度	2000 lx
ホワイトバランス	ATW, 320

表 2.9 マウントレンズの仕様

製造会社	SONY
型番	VCL-7S12XEA
焦点距離	7 mm
最大口径比	1 : 1.8
絞り	F 1.4 ~ F 1.6
マウント	NF マウント
至近距離	64 mm
包括画角 (水平)	38.35°
包括画角 (垂直)	28.15°

内に全く直射日光が入らないようにするため、遮光を行った。使用した CCD ビデオカメラのホワイトバランスは 5200 K (屋外撮影用), シャッター速度は 1/100 に設定した。この CCD ビデオカメラはオートアイリス機能を装備している。DV レコーダ (SONY 社製, GV-D 900) を用いて、取得した画像を DV テープに記録した。記録した DV テープを研究室に持ち帰り、



図 2.14 トラクタに装着した CCD ビデオカメラ

パーソナルコンピュータ (IBM 社製 Think Pad 240 Type 2609-43 J, CPU 400 MHz, メインメモリ 192 MB) に装着したビデオキャプチャデバイス (Life View 社製 CapView) および自作画像キャプチャーソフトによって、Microsoft Windows 形式のビットマップファイル (320×240 Pixel) に変換し、保存した。画像取得間隔は 1 Hz である。

G. 色情報による識別

走行しながら撮影した画像を用いてテンサイと雑草の識別を行った。識別はデジタルカメラの画像から作成した線形判別関数を用いた。なお、デジタルカメラにより取得した画像のサイズは 640×480 (Pixel) であるが、CCD ビデオカメラから取得した画像のサイズは 320×240 (Pixel) であるので、画像の大きさに依存する形状特徴量に関しては画像のサイズ比を考慮し、形状特徴量を補正し用いた。結果、テンサイの識別正答率は約 60% とデジタルカメラでの画像の識別正答率と比較すると大きく低下した。この原因には、デジタルカメラの画像で作成した線形判別関数は変数として面積をもつことが考えられる。直播栽培されたテンサイは発芽率の関係から同一ほ場、同一時期であっても、テンサイの大きさのばらつきが大きくなる。雑草に関しても、天候、ほ場によって大きさは変化する。デジタルカメラでの撮影では遮光板による遮光を行った。遮光を行うと、遮光板により、風による形状の変化をある程度抑えることが可能であった。しかしながら、トラクタで走行しながら撮影する場合、ダンボール紙により遮光を行うことは可能であったが、風の影響による形状変化を防ぐことは困難であった。風によるテンサイの形状変化例を図 2.15 に示す。

このような理由から、トラクタに装着した CCD ビデオカメラの画像の場合、形状の変化が大きいため、テンサイの誤識別が増加したと考えられる。このような結果から、大きさに依存しない識別手法を開発する必要がある。そこで、色情報を識別に供することを考えた。本研究では、YIQ 表色系を用いた。YIQ 表色系は、NTSC 方式のカラーテレビの標準表色系として用いられている。この表色系は CIE (国際照



図 2.15 風によって形状が変化したテンサイ

明委員会)の XYZ 表色系を基本としており、輝度情報は Y 信号に含まれる。また色相と彩度は R, G, B と Y との差を用いて表現され⁵⁵⁾, I はオレンジからシアン, Q は緑からマゼンダまでの色を含んでいる。正規化した RGB 輝度値を用い YIQ へ変換した。RGB 輝度値の正規化式を式 (2.15) に RGB 輝度値から YIQ への変換式を式 (2.16) に示す。ただし、画像の輝度値の赤成分を R, 緑成分を G, 青成分を B, 正規化された成分を nR, nG, nB とする。

$$\left. \begin{aligned} nR &= \frac{R}{R+G+B} \\ nG &= \frac{G}{R+G+B} \\ nB &= \frac{B}{R+G+B} \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

$$\begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.522 & 0.311 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} nR \\ nG \\ nB \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

H. 形状特徴量と色情報を組み合わせた識別

前節の結果を受け、形状特徴量と Q 値を組み合わせた識別法を考案した。デジタルカメラ画像の識別の際には、雑草間の識別も行っていた。しかしながら、後述するように、本研究の間引き・除草機構の制御アルゴリズムでは、識別結果がテンサイであれば、間引き・除草機構を開閉し、雑草であれば間引き・除草機構を閉じたままにすることになっているので、雑草間の識別が不要である。また、判別分析法で線形判別関数を作成する場合、グループ変数のサンプル数

が一定にしなければならない。走行しながら撮影した雑草には、本研究で想定している5種類の雑草（アオビユ、アカザ、ソバカズラ、エノコログサおよびスギナ）以外にも他の雑草が含まれていた。これらの雑草はサンプル数が十分ではないためロバストな線形判別関数を作成するのが困難であることから、本識別ではテンサイ、雑草の2つクラスに識別することにした。形状特徴量と Q 値を組み合わせる手法として、判別分析による識別のパラメータに形状特徴量と Q 値を使用することにした。ただし、後述するように、 Q 値が -6 以上のテンサイは皆無であったので、 Q 値のしきい値を -6 に設定し、 Q 値が -6 以上のものは雑草とすることができる。よって、 Q 値が -6 より小さいものを線形判別関数による識別の対象とした。また、間引き時期のテンサイの大きさを検討したところ、デジタルカメラ画像の識別においては、パラメータとして面積を使用していたが、面積を使用すると、間引き時期のテンサイの大きさのばらつきに対応できないため、本識別では使用していない。葉先得点はデジタルカメラ画像の識別において、テンサイと識別が困難なソバカズラとの再識別のために用いたが、本識別では線形判別関数のパラメータとして利用した。使用したパラメータは穴の数 H 、最大径円面積比 M 、長軸2次モーメント Wl 、短軸2次モーメント Ws 、フェレ径比 F 、円形度係数 C 、葉先得点 LP 、 Q 値 Q の8つである。

テンサイ 250 個、雑草 250 個の形状特徴量と Q 値を用い、線形判別関数を作成した。ただし、ステップワイズ法を用いて各パラメータが識別に寄与しているか検討した結果、寄与していないとして棄却されたものはなかった。算出した線形判別関数を式 (2.17) に、 Q 値と形状特徴量を用いた識別フローチャートを図 2.16 に示す。画像上には複数個の植物が含まれることがあるので、識別する前に植物数 C_n を取得し、植物数の分だけ識別することになる。

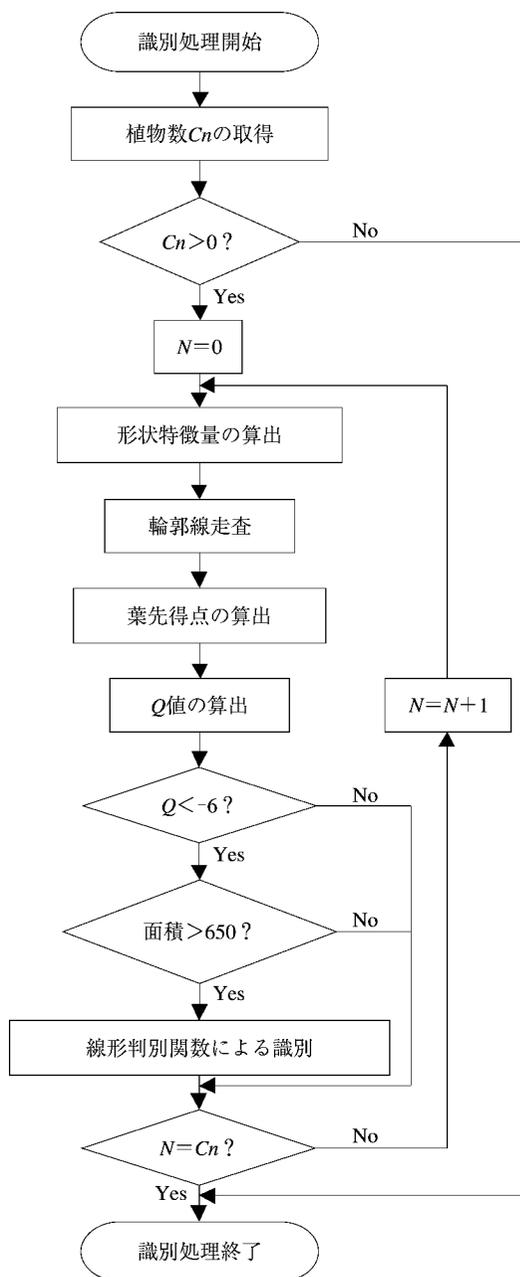


図 2.16 形状特徴量と色情報を組み合わせた識別フローチャート