

# 第7節 実験方法

## 第1項 茎の圧縮実験

ロボットによって苗をハンドリングするためには、苗をつぶさないようにしなければならない。そこで、どれぐらいの力を苗に加えたときに苗が破壊されるか調べた。

力を加える方向は、図 27に示したように通常、指先が把持する方向①と、それに垂直な方向②の2種類である。

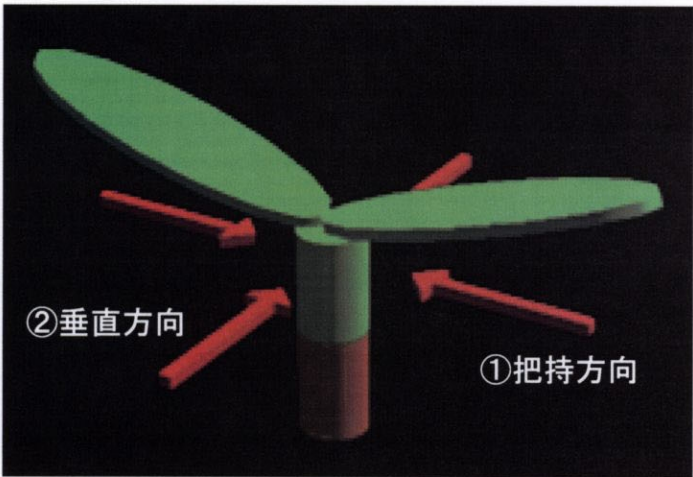


図 27 苗の圧縮方向

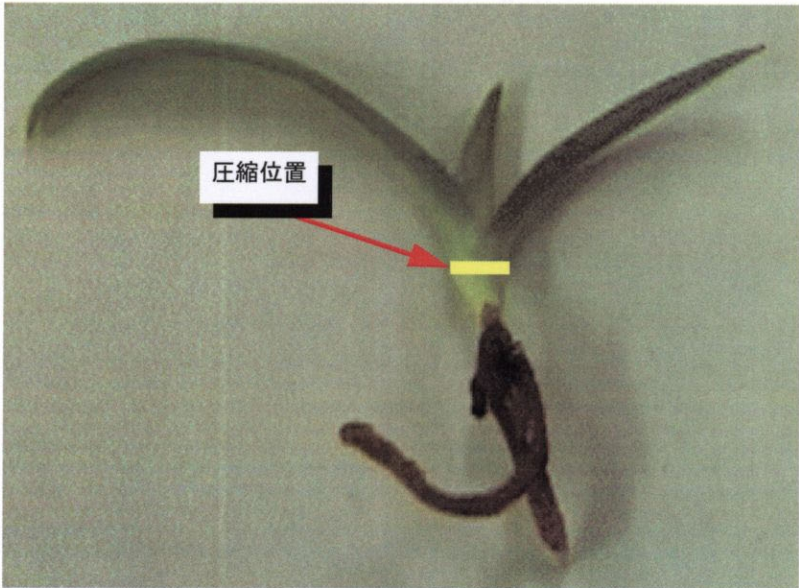


図 28 苗の圧縮位置

テンシロン(東洋ボールドウィン社製 RTM-1T)に 9.8N(1kgf)のロードセルを装着して使用した. 上下に厚さ 2.25mm の鉄板をセットして, 苗が回転しないように工作用の油粘土で押さえて 1mm/min の速度で圧縮し荷重を計測した(図 29). テンシロンの出力を A/D 変換ボードでコンピュータに取り込み記録した.

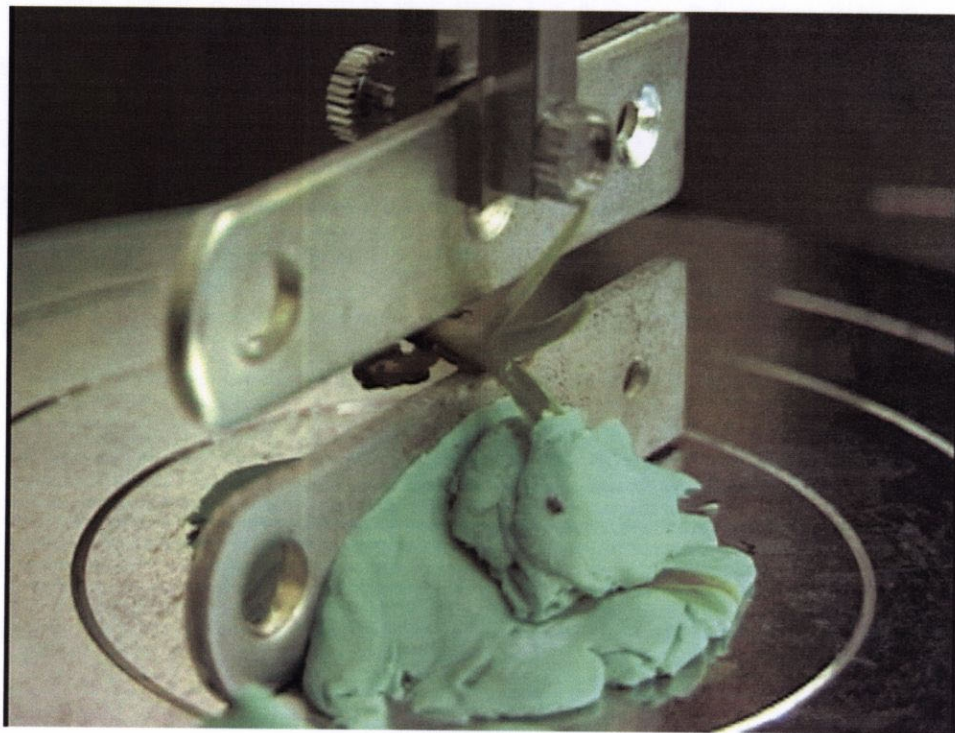


図 29 苗のセッティング

## 第2項 画像処理の評価

### 1. 投影面積による苗の選別

投影面積による苗の選別の妥当性を検証するために、あらかじめ生産者によって、大、中、小、不良の4種類に分けられた苗を用いて実験を行った。選別にはマハラノビスの距離を用いた。苗は *Paph. (Spotglen x Mahakusa) x Paph. Arapaho* を用いた。苗を間隔を空けて寒天培地に移植し、垂直上方から画像を取り込み、ニューラルネットワークによって葉の部分だけを抽出し投影面積を計測した。

苗の数は大が 40 本、中が 36 本、小が 37 本、不良が 100 本であった。実験方法を図 30に示す。まず、全サンプルの中からランダムに 75%をサンプリングし、大、中、小、不良のそれぞれのグループの投影面積の平均値と標準偏差を計算する。残りの 25%を未知の苗として一致率の判定用にとっておく。未知の苗のそれぞれのグループに対するマハラノビスの距離を計算し、一番小さい値をとるグループに分類する。最後に一致率を計算する。そしてこの作業を20回繰り返した平均値を結果として出した。

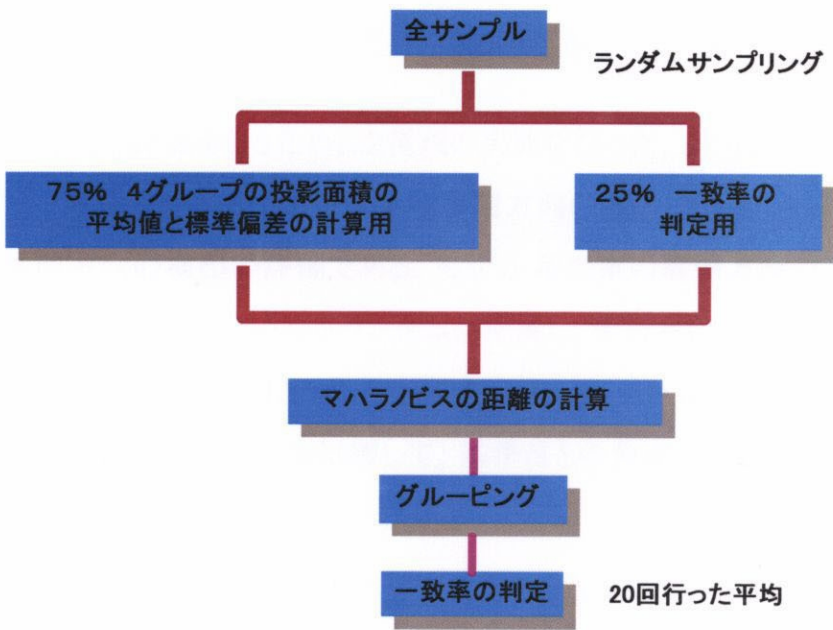


図 30 投影面積による苗の選別

## 2. 画像処理の評価

画像処理の評価として、1. 葉の抽出、2. 葉の展開方向の検出、3. 苗の把持位置の検出、に注目して実験を行った。以下に実験の方法を述べる。3つの実験はモデル実験をのぞいて、それぞれ同時に行った。10cm×10cm×6cmのアクリルの箱にゲランガムで固めた栄養分の無い培地を入れ、2cm おきに 16 本の苗をランダムな方向で植える。画像処理の結果は照明条件によって変化すると考えられるので、照明条件の影響をなくすため、1つの箱に対して 90 度ずつ4回向きを変えて画像を取り込み各種の実験計測を行った。

## 3. 葉の抽出

葉の抽出は前述したとおり、色相Hと緑の輝度Gを使った、判別分析法による抽出と、RGBそれぞれの輝度を用いたニューラルネットワークによる抽出を行った。この結果は、定量的に調べるのが困難だが、苗の展開方向の検出や、苗の中心の検出に反映される。そこで、葉の抽出の評価は目視での評価にとどめ、他の実験結果から考察する。

## 4. 葉の展開方向の測定

葉の展開方向の評価を行うために2種類の実験を行った。1つはコンピュータのドローソフトによって作成したモデル苗の葉の展開方向の検出、もう1つは実際の苗を用いた葉の展開方向の検出の評価である。モデル苗の葉の展開方向の実験では、図31のように1つの画面に4つの苗をランダムに配置し、その内の1つを基準として展開方向を  $0^\circ$  にした。そして他の3つの苗の葉の展開方向  $\theta$  を  $0^\circ$  から  $180^\circ$  まで  $10^\circ$  おきに变化させる。この絵を画像処理して、基準苗との角度のずれを計算し、もともと設定してある角度と比較した。



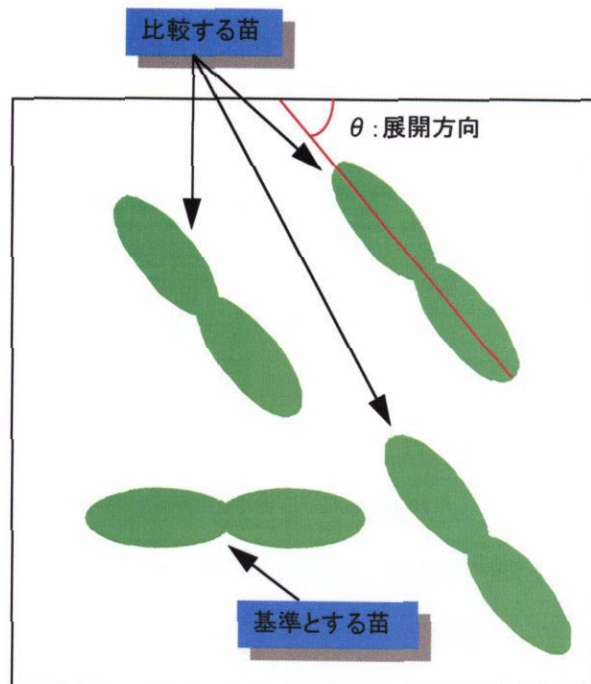


図 31 モデル苗による苗の展開方向の検出実験

次に実際の苗を用いた実験について述べる. この品種の苗は左右の葉が  $180^\circ$  に展開しているため, 画像処理によって, 正しく葉全体が抽出される時はエンドエフェクタで把持するために必要十分な葉の展開方向を検出することができると考えられる. しかし, 画像処理の際に葉が2つに分かれてしまったりすると展開方向の検出を正しく行うことができない. 目視によって「葉の正しい方向を検出していると思われる苗」を検出できたと数え, 「葉の正しい方向を検出していない苗」を検出できなかったと数える.

64 本の苗に対して4回ずつ行い, 全体に対する検出できた苗の確率を求める.

## 5. 把持位置検出の評価

苗の把持位置の検出の実験について述べる. まず, 前述の方法によって各苗の把持位置  $(gx_i, gy_i)$  を検出する. その後, 画像上でカーソルを動かし, 人間の目で見えた, 真の把持位置と考えられる場所  $(tx_i, ty_i)$  まで移動する. その時の誤差を  $e_c = \alpha \sqrt{(gx_i - tx_i)^2 + (gy_i - ty_i)^2}$  とする. もし, 葉の抽出の時に葉が2つに分かれ

てしまった場合にはそれぞれの把持位置から真の把持位置までの誤差の平均を誤差として記録する.

## 第3項 移植装置の評価

### 1. 指先の位置合わせ精度の結果

テレビカメラによって取り込まれた画像が完全に平面を投影していると仮定し, ロボットのキャリブレーションが正確に行われているとすると, 誤差はカタログデータの通りになるはずである. カatalogデータではロボットの繰り返し精度は $\pm 0.5\text{mm}$ となっているが, 自作のエンドエフェクタを取り付けている上, 画像の情報から位置制御を行っているため指先での誤差がカタログデータと一致するとは考えられない. 実際はキャリブレーションの際の誤差によって, 指先は多少ずれるはずである. そこで, 以下のような方法で指先の位置合わせ誤差を計測した.

1. 画像中で任意の点 $(p, q)$ をランダムに指定する.
2. リストの回転角度 $\theta$ を指定し, 各関節の角度を計算し, 指先を $(p, q)$ まで動かす.
3. 指先の真下にマークを持って行き, ロボットをカメラに映らない場所まで移動させ, 画像中のマークの位置 $(x, y)$ を記録する.
4. 誤差 $e_f = \alpha \sqrt{(p-x)^2 + (q-y)^2}$ を計算する.
5.  $\theta$ を $0^\circ$  から  $180^\circ$  まで  $15^\circ$  おきに変化させて, 1~4までの手順をそれぞれ3回ずつ合計 39 回行う.

### 2. 把持力制御の評価

PID 制御による把持力制御の性能を調べるため, 以下に述べるような実験を行った.

まず, PID 制御式の3つのパラメータ  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  を適当な値に設定する. ここで言う適当な値とは, 行き過ぎ量と, 20 秒間での絶対偏差積分を最小にする値のことである. PID のパラメータの決定法には様々な方法が提案されているが, 今回の制御には参考にならなかった.

次に何も把持していない状態で、目標把持力を 0.05, 0.1, 0.15, 0.2N の4種類に設定して行き過ぎ量と最初に目標値に達する立ち上がり時間、そして 20 秒間の絶対偏差積分を求めた(図 32). 計測は各3回ずつ行って平均値を求めた. 目標値を  $r$ , その時の把持力を  $L_i$  とすると絶対偏差積分  $D$  は  $D = \sum_{i=0}^n |L_i - R|$  と表すことができる.

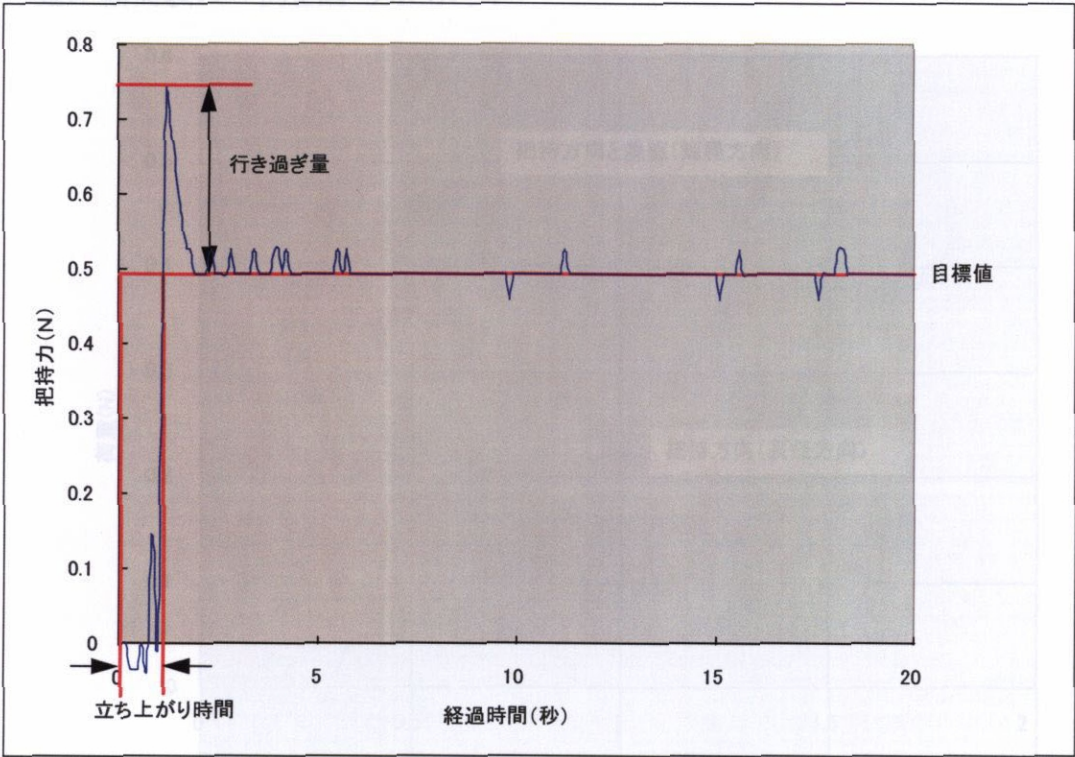


図 32 把持力制御の評価

図 33 葉圧縮実験の結果

第4項 総合性能

総合性能を調べるために、連続処理実験を行った. 画像処理の性能を評価するとき、1つの箱に苗を16本ずつ入れたが、ここでは1箱に5本ずつ入れる. 5本入っている箱を10セット移植し、その成功率、処理時間を計測した.



## 第8節 結果および考察

### 第1項 茎圧縮実験の結果

茎圧縮実験の一例を図 33に示す。

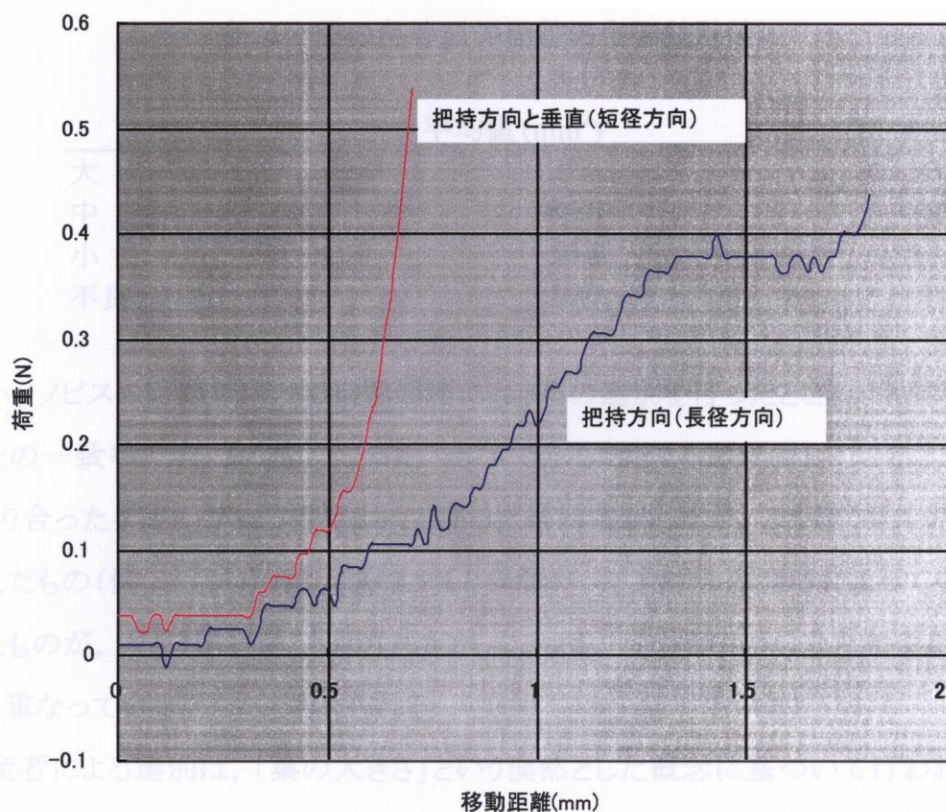


図 33 茎圧縮実験の結果

苗の茎の断面は長径と短径が約2:1の楕円形をしている。長径方向が把持方向で、短径方向が把持方向と垂直な方向である。計測結果を見ると、短径方向の荷重がより短い移動距離で増加しているのがわかる。

今回、移植を行う時に把持しようとしている長径方向は約0.4Nで完全に弾性を失い破壊される。そこで、それよりも十分少ない値である0.1Nで苗を把持すれば苗の破壊を防ぐことができると考えられる。



第2項 画像処理の評価

1. 投影面積による苗の選別

ニューラルネットワークによって葉を抽出し、葉の面積を計測したところ平均値と標準偏差は表 4の様になった。

表 4 苗の各等級の面積の主要統計値

	平均値 (mm <sup>2</sup> )	標準偏差
大	129.8	39.0
中	80.8	25.7
小	50.1	18.8
不良	10.7	7.6

マハラノビスの距離を用いて投影面積による苗の選別を行ったところ、生産者による選別との一致率は表 5の様になった。赤字で示したところが一致しているところである。隣り合ったグループに選別されてしまった苗は多かったが、2つ違うグループに選別されたもの(例、大->小)は大変 2.5%と少なかった。また、生産者によって中と選別されたものが、大や小に多く選別されたが、これは、もともと中の分布と大や小の分布が多く重なっているためだと考えられる。

生産者による選別は、「葉の大きさ」という漠然とした概念に基づいて行われているため不確かさをのぞくことができない。一方マシンビジョンによって得られた投影面積というパラメータは常に、投影面積という観点からいえば正確な選別を行うことができる。そこで、マシンビジョンは人間に代わって選別を行うことが可能だと考えられる。しかしながら、人間が選別を行うときには、葉の長さや、左右の葉のバランス、その他の形状を総合的に判断している。そのため、投影面積だけではない他のパラメータも取り入れて選別を行うことが選別の精度を向上させることになると思われる。

表 5 マハラノビスの距離による選別結果

		投影面積による選別結果				
		大	中	小	不良	合計
選別結果 生産者による	大	80.5%	17%	2.5%	0%	100%
	中	24.3%	54.5%	21.2%	0%	100%
	小	0%	13.1%	83.4%	3.5%	100%
	不良	0%	0%	8.8%	91.2%	100%

2. 葉の抽出結果

RGB 輝度とニューラルネットワークによる葉の抽出の結果の例と(図 34), 色相と G 輝度と判別分析法を用いた葉の抽出の結果の例を示す(図 35).

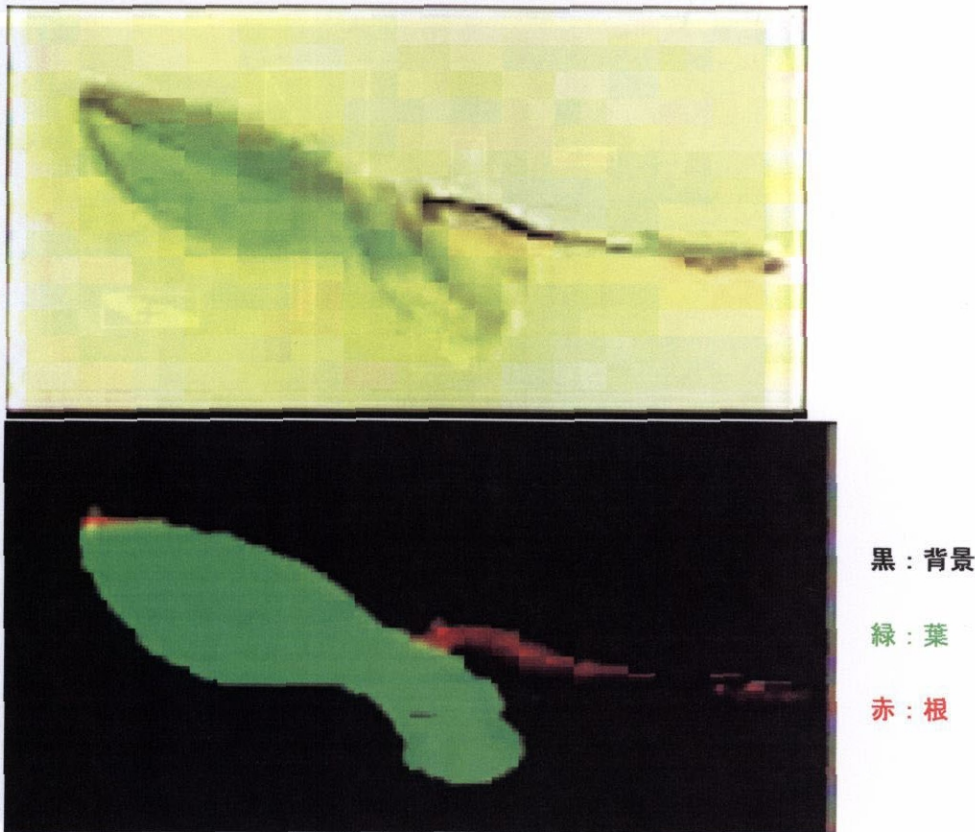


図 34 ニューラルネットワークによる葉の抽出

図 35 判別分析法を用いた葉の抽出結果

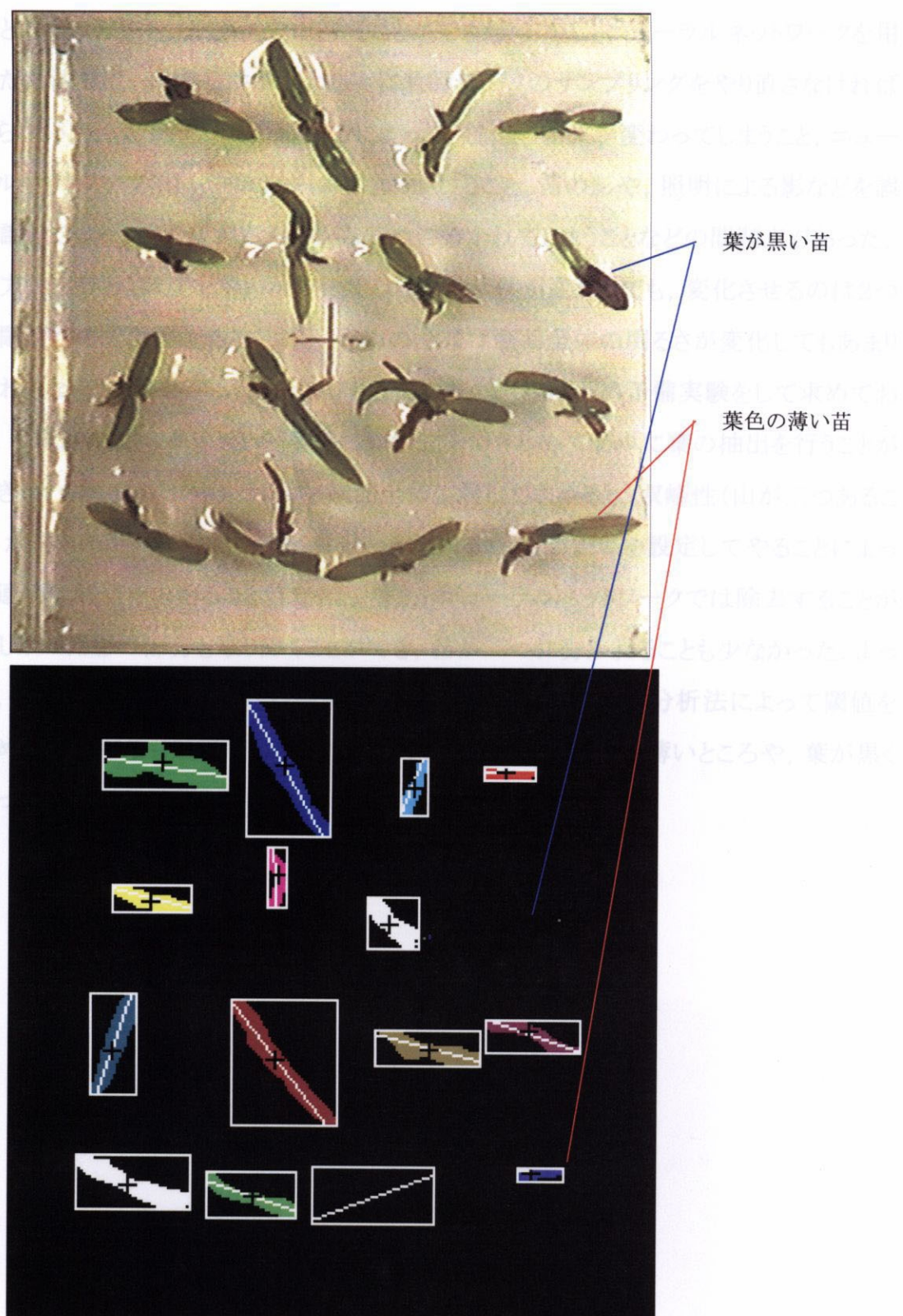


図 35 判別分析法を用いた葉の抽出結果

どちらの方法も、よく葉を抽出することができた。しかし、ニューラルネットワークを用いた方法では、実験条件が替わる度に教師データのサンプリングをやり直さなければならないこと、教師データの選び方によって、抽出の結果が変わってしまうこと、ニューラルネットワークのトレーニングに時間がかかること、苗の影や、照明による影などを誤認識してしまうこと、苗が真ん中から二つに分かれてしまうことなどの問題点があった。一方、色相とG輝度を用いた方法では、実験条件が変わっても、変化させるのは2つの閾値なので簡便である。また、色相の分布は画面全体の明るさが変化してもあまり変わらないことがわかった。そこで、色相の方の閾値は予め予備実験をして求めておき、G輝度のヒストグラムから閾値を求めることできわめて簡単に葉の抽出を行うことができた。G輝度のヒストグラムは、画面全体に対して求めると、双峰性(山が二つあること)が薄れるが、画像上でうまく背景と苗が入るような小領域を設定してやることによって適切な閾値を求めることができた。また、ニューラルネットワークでは除去することが難しかった影の部分も取り除くことができ、苗が二つに分かれることも少なかった。よって、今回の対象には色相とG輝度のヒストグラムを用いて判別分析法によって閾値を求める方法が最も適当であった。ただし、図 35の様に葉色の薄いところや、葉が黒くなっているところは葉として抽出されなかった。



3. 葉の展開方向の測定

モデル苗を使った葉の展開方向の計測実験の結果を表 6に示す.

表 6 モデル苗を使った測定結果

	平均値 (° )	標準誤差 (° )
誤差	-0.186	0.421

この結果から、モーメントを用いた展開方向の検出は、モデル実験においては十分な精度を示していると言える.

続いて実際の苗を使った検出率の実験の結果を表 7に示す.

表 7 実際の苗を使った展開方向の検出

	検出できた	検出できなかった	合計
本数	246 本	10 本	256 本
確率	96.1%	3.9%	100%

検出できなかった苗があった理由は、葉の抽出の際に、葉色が薄かったり、葉の一部が茶色になっていたことで、葉全体を認識できない場合が生じたためである. しかし、それ以外の苗に関しては正確に展開方向を検出することができた. 図 36中で苗の中に引かれている線が検出した展開方向を表している.



図 36 葉の展開方向の検出結果

4. 把持位置検出の結果

画像処理によって検出された把持位置と、目視による把持位置とのずれを計測したところ表 8のような結果となった。

表 8 把持位置の検出結果

	平均値 (mm)	標準誤差 (mm)
把持位置のずれ	1.76	0.94



左右の指先の隙間が 10mm なので、茎の太さが 2mm とすると最大で 4mm のずれまでは許容できる。しかし、次で述べる様に指先の位置制御にも誤差が生じるのでここでの誤差は限りなく 0 に近いことが望ましい。

誤差が生じた原因としては、展開方向の検出の結果でも述べたように、葉の抽出の際に左右の葉が真ん中で分かれてしまった事や、片方の葉が茶色くなっているために、もう片方の葉の中心を把持位置としてしまったことなどが挙げられる。図 37 中で苗の中に描いてある赤い十字が検出された把持位置である。一番上の列の右から 3 番目の苗に 2 つ十字が描いてあるが、これは、2 値化処理の際に離れてしまったためである。



図 37 把持位置の検出結果

第3項 移植装置の評価

1. 指先の位置合わせ精度の結果

ロボットの指先の位置合わせ精度を測定した. その結果を表 9に示す.

表 9 位置合わせ精度の計測結果

	平均値 (mm)	標準誤差 (mm)
位置合わせ誤差	0.80	0.49

左右の指先の隙間が 10mm なので, この結果は今回の実験にはきわめて十分な精度だと考えられる. しかし, 最終的な誤差は把持位置の検出の誤差との和になるので把持位置の検出精度をより高めることが重要である.

2. 把持力制御の結果

予備実験として,  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  を調節したところ, 0.9, 0.2, 0.2 という値の時に, 行き過ぎ量と絶対偏差積分が最小となった. 指先に何も把持せずに, 目標値を 0.5, 1.0, 1.5, 2.0N の4種類に変化させたときの結果をに示す. また, その時の把持力とデューティ比の変化を図 38に示す. また, 比較として ON-OFF 制御を行った時の行き過ぎ量と絶対偏差積分を表 11に, 把持力とデューティ比の変化を図 39に示す. PID 制御を行った時の行き過ぎ量は0.5Nの時をのぞいて A/D 変換ボードの誤差範囲内に収まっている. また, 立ち上がり時間は0.1Nの時に 1.1 秒と実用的に決して遅くないと思われる.



表 10 PID 制御による把持力制御の制御成績

目標値(N)	絶対偏差積分	行き過ぎ量(N)	行き過ぎ量(%)	立ち上がり時間(S)
0.2	25.8	0.000258	0.129	2.4
0.15	17.9	0.00107	0.71	2.2
0.1	12.8	0.000189	0.19	1.1
0.05	10.7	0.0366	73.3	1.3

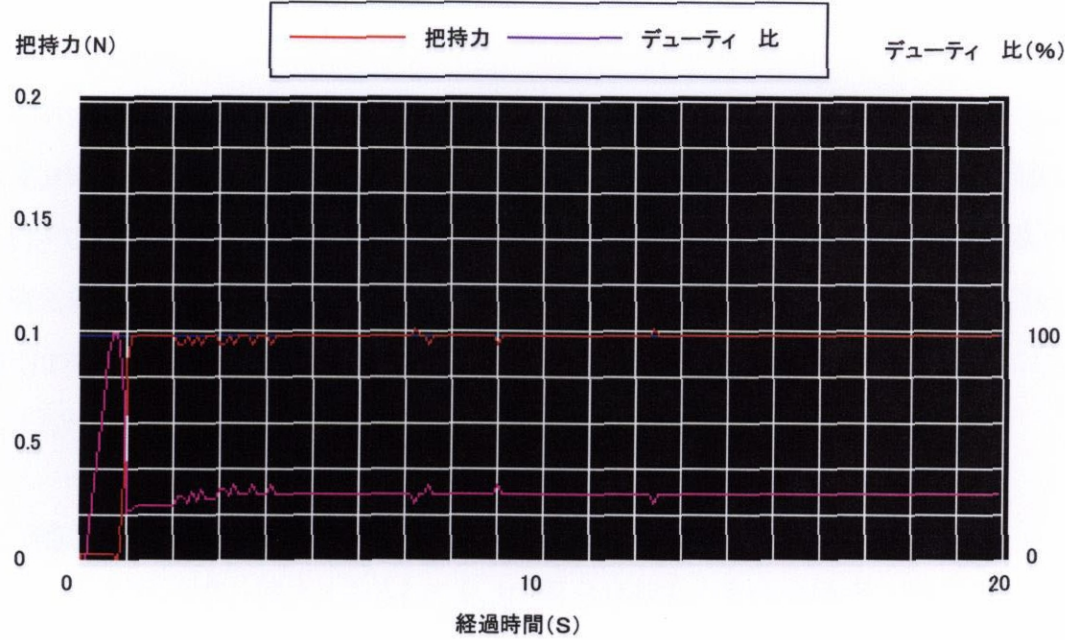


図 38 PID 制御を行ったときの把持力とデューティ比の変化

表 11 ON - OFF 制御による把持力制御の制御成績

目標値(N)	絶対偏差積分	行き過ぎ量(N)	行き過ぎ量(%)	立ち上がり時間(S)
0.2	29.9	0.0315	15.75	1.1
0.15	27.6	0.0283	18.89	1.0
0.1	34.6	0.0383	38.33	0.9
0.05	26.1	0.07	140	0.8

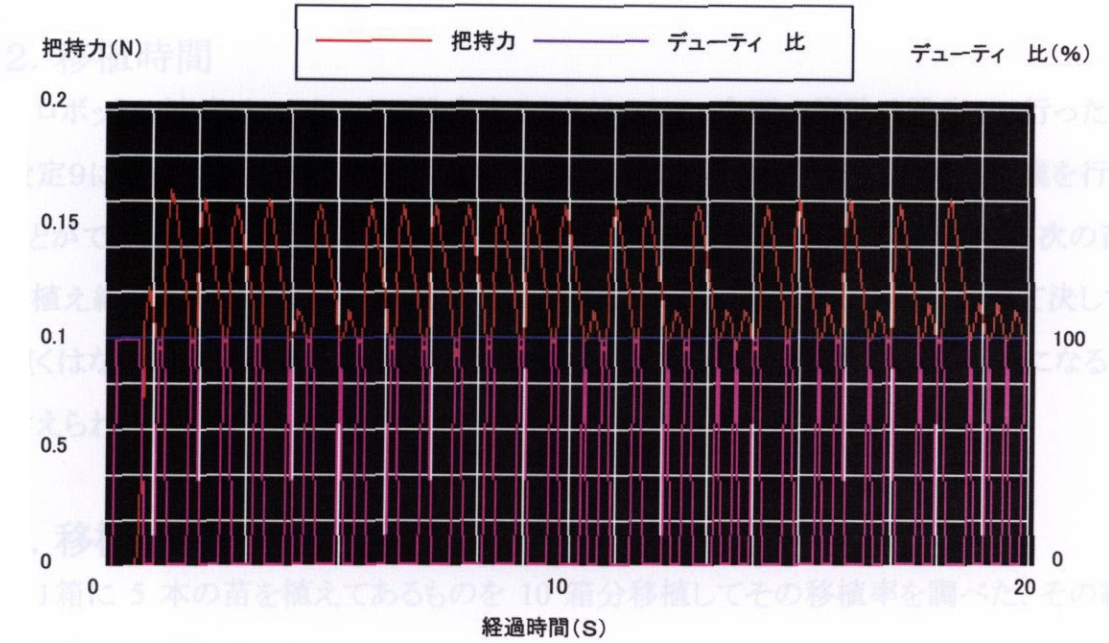


図 39 ON - OFF 制御を行った時の把持力とデューティ比の変化

移植できた	移植できなかった	合計
40本	10本	50本
80%	20%	100%

指先の広さが 10mm あるため、苗は必ず、指先の間に入った。しかし、指先が苗に接近する際に、苗を倒してしまい移植できない例があった。また、増地の固さによっては指先が閉じない事もあった。

第4項 総合性能

1. 画像処理の時間

葉の抽出とラベリングに時間がかかったため、一画面を処理するのに 10 秒かかった。しかし、一度処理を行ってしまえば、後はロボットを動かすだけなので、実用的に十分な速度であると考えられる。

2. 移植時間

ロボットの速度は0から9まで設定することができる。今回の実験は設定1で行った。設定9にすると早すぎて、移植の途中で苗を落としてしまうことがあり、移植作業を行うことができなかった。設定1で移植を行った場合、1つの苗を植え終わってから次の苗を植え終わるまで約20秒かかった。この速度は、人間が移植する場合に比べて決して速くはない。しかし、把持部分の形状を工夫することでより高速な移植が可能になると考えられる。

3. 移植成功率

1箱に 5 本の苗を植えてあるものを 10 箱分移植してその移植率を調べた。その結果、表 12の様になった。

表 12 移植成功率

移植できた	移植できなかった	合計
40 本	10 本	50 本
80%	20%	100%

指先の広さが 10mm あるため、苗は必ず、指先の間に入った。しかし、指先が苗に接近する際に、苗を倒してしまい移植できない例があった。また、培地の固さによっては指先が閉じない事もあった。



#### 4. エンドエフェクタの力制御の結果

指先を把持位置まで動かしてから、苗を移植し終わって離すまでに指先にかかった力を図 40に示す. この図から、移植中も均一な力で苗が把持されていることがわかる. 一度しっかりと把持されれば移植中に苗が落ちたり、つぶれたりすることはなかった.

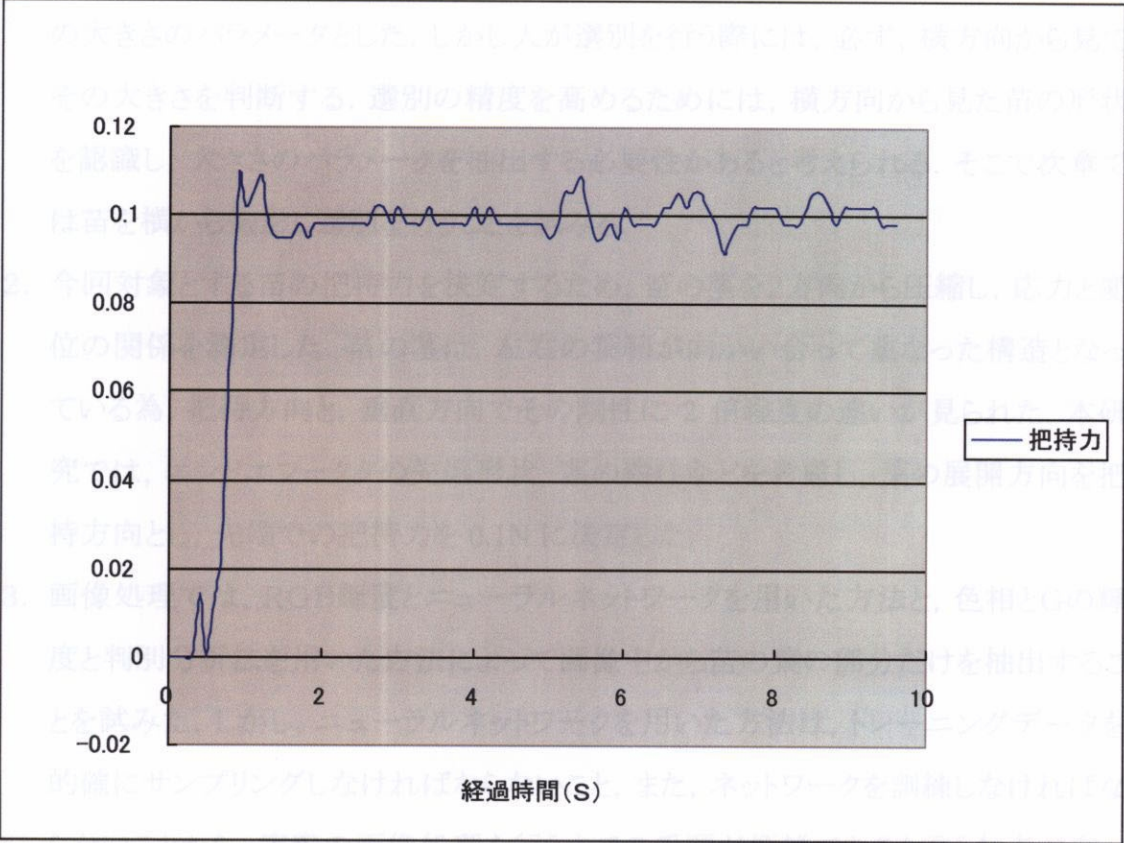


図 40 移植中に指先にかかる力

#### 5. 全体のシステムの評価

画像処理と、ロボットの位置制御および指先の把持力の制御は満足な結果が得られた. また、各部分を組み合わせても、それぞれの部分がお互いに妨害し合うことなく連続的に処理を行うことができた. しかし、実際の移植に当たっては、苗の高さや培地の固さによって、移植に失敗する例があった. 今後の課題としては、エンドエフェクタの高さを適当な値に設定することと培地の堅さについてのデータを集めることが必要であろう.

## 第9節 まとめ

洋ランの実生幼苗の自動移植を行うロボットシステムを提案、作成し、その各部分の性能および総合性能を調べた。以下に本章のまとめを述べる。

1. 投影面積による苗の選別では平均して生産者による選別と比較して 77.4% の一致率を得た。本章のシステムでは撮影を上からのみ行ったため、投影面積だけを苗の大きさのパラメータとした。しかし人が選別を行う際には、必ず、横方向から見てその大きさを判断する。選別の精度を高めるためには、横方向から見た苗の形状を認識し、大きさのパラメータを抽出する必要があると考えられる。そこで次章では苗を横から撮影し選別を行うことを試みる。
2. 今回対象とする苗の把持力を決定するため、苗の茎を2方向から圧縮し、応力と変位の関係を測定した。苗の茎は、左右の葉鞘が向かい合って重なった構造となっている為、把持方向と、垂直方向でその剛性に 2 倍程度の違いが見られた。本研究では、エンドエフェクタの先端形状、茎の剛性などを考慮し、葉の展開方向を把持方向とし、先端での把持力を 0.1N に決定した。
3. 画像処理では、RGB輝度とニューラルネットワークを用いた方法と、色相とGの輝度と判別分析法を用いた方法によって画像中から苗の葉の部分だけを抽出することを試みた。しかし、ニューラルネットワークを用いた方法は、トレーニングデータを的確にサンプリングしなければならないこと、また、ネットワークを訓練しなければならないことから、実際の画像処理を行うまでの手順が煩雑であるという欠点があった。一方、判別分析法は、苗と背景が同時に入っている画像領域を指定すれば閾値を自動的に決定できるため、より環境変化に対してロバスト性が高いことが証明された。そこで、今回の対象には、判別分析法を採用した。
4. モーメントを用いた苗の葉の展開方向の測定を行った結果、モデル苗では  $0.421^{\circ}$  の標準誤差が検出された。また、実際の苗では 96% の苗の方向が正しく検出された。葉の展開方向は、ロボットで把持する為になくてはならない情報であるが、図形のモーメントと言うシンプルなアルゴリズムによって検出できることが明らかとなった。

5. 葉のくびれを検出する方法で茎の位置(把持位置)の検出を実際の苗に対して行った結果、画像処理によって検出された把持位置と、目視による把持位置とは標準誤差で0.94mmのずれが計測された。誤差の原因としては、正しく葉の部分だけを抽出できず、根の部分が混ざってしまったこと、また、同様の理由で一つの苗が2つに分かれてしまったことなどが挙げられる。
6. 画像によって、マニピュレータのキャリブレーションを行い、エンドエフェクタの指先の位置合わせ精度の計測を行った結果、位置合わせ誤差の標準誤差は 0.49mm となった。これは本研究の目的を十分満たすものであった。
7. SMA のワイヤを駆動力とするエンドエフェクタの把持力の制御に PID 制御を用いた。その結果、何も把持していない状態では行き過ぎ量は誤差の範囲内に収まり、移植中、ロボットが動いているときでも把持力に大きな変化がみられないことが明らかとなった。
8. 連続処理を行って、システムの総合性能を調べた結果、画像処理にかかった時間が10秒、移植にかかった時間が1本の苗あたり、20秒であった。また、移植の成功率は 80%となった。画像処理に用いるコンピュータや、マニピュレータは年々高速化しているため、今後はより速い速度で処理や移植を行うことが可能になると予想される。