

第2章 ラン実生無菌培養苗の 形状認識および自動移植

第1節 本章の目的

本章の目的は、ロボットを用いた新しい育苗システムの提案、ラン幼苗の移植作業を自動化するために必要な基礎的な技術の開発、及びモデル実験及び実際の苗を用いた実験による性能評価の3つである。

基礎的な技術とは1)画像処理技術、2)ソフトハンドリング技術の2つである。画像処理技術には、色を用いた苗の抽出、投影面積による選別、ロボットで把持する際の苗の葉の展開方向、茎の座標の検出などが含まれる。また、ソフトハンドリング技術には、マニピュレータの制御や形状記憶合金のフィードバック制御などが含まれている。

第2節 実験試料および試作システム

本節では実験に用いた試料、実験装置の構成、各部の詳細、実験方法などについて説明する。

第1項 ラン実生苗

実験試料として、堂ヶ島ランの里から購入したラン(*Paph. (Spotglen x Mahakusa) x Paph. Arapaho* および *Paph. Phillinense x Paph. Esquirolei*) (図 1, 図 2)を用いた。前者は、投影面積を用いた選別実験に用い、後者は移植実験に用いた。前者の苗はあらかじめ生産者によって大、中、小、不良に分けられており、後者の苗はほぼ同じ大きさの苗であった。また、モデル実験にパーソナルコンピュータで作成した苗の絵を用いた。



図 1 Paph. (Spotglen x Mahakusa) x Paph. Arapaho



図 2 Paph. Phillinense x Paph. Esquirolei

第2項 試作システムの構成

実験装置の概略図を図 3に示す. 実験装置は大きく分けて3つの部分から成り立っている. まず, ビデオカメラと画像処理ボードからなる画像処理部, そしてマニピュレー

タとコントローラからなるロボット部, それから苗把持エンドエフェクタと形状記憶合金ドライバ, 歪みゲージなどからなるエンドエフェクタ部である. そしてこれら3つの部分をパーソナルコンピュータによって制御する.

各部の性能を評価する場合, 各部分を取り外すか, または組み合わせて行う. 総合性能を評価する場合は, 全ての部分を組み合わせて行う. まず, ビデオカメラによって撮影された画像を画像処理ボードとコンピュータにより画像処理する. 苗の位置や葉の方向, 等級を計算した後, マニピュレータの姿勢を計算して所定の位置にエンドエフェクタを移動させる. 次に苗把持エンドエフェクタによって苗を把持し等級別に移植を行う. このような処理を連続して行う(図 4).

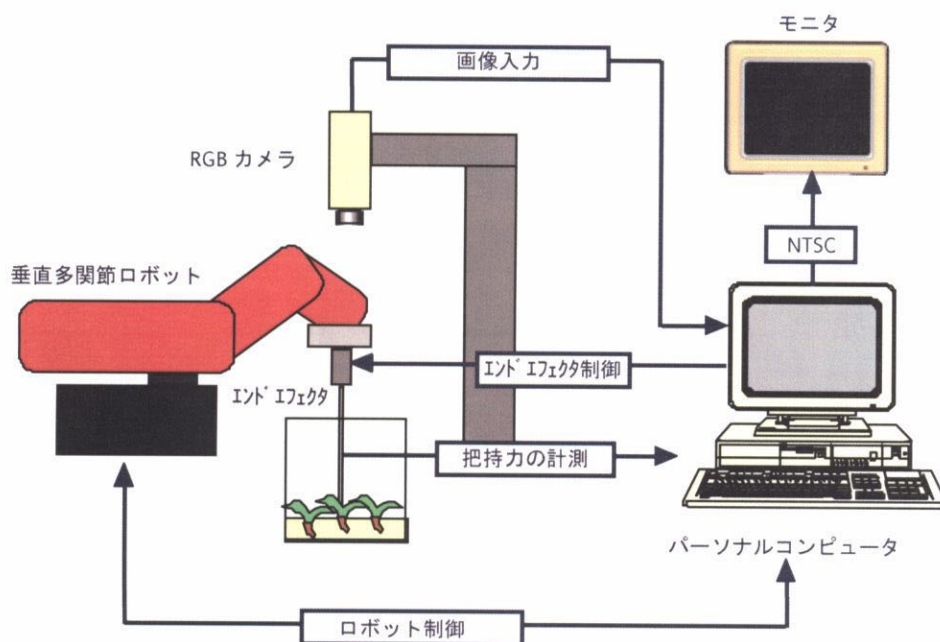


図 3 実験装置の外略図

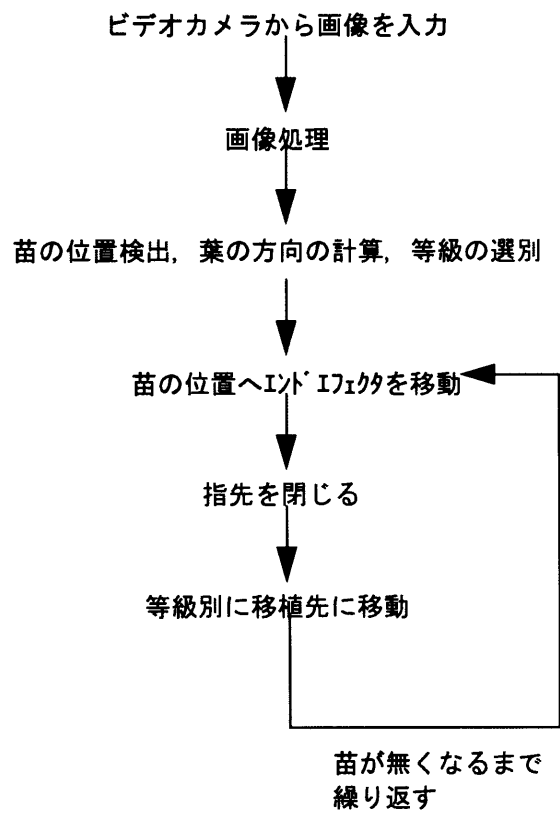


図 4 連続自動移植の流れ

第3項 画像処理装置

1. コンピュータ

画像処理のプログラムを実行させるために日本電気製 PC9801RA を使用した. このコンピュータは, また, ロボットの制御や, エンドエフェクタの制御にも用いられる. CPU は Cyrix 社製 CX586-100MHz を使用している. 拡張スロットには, 把持力測定のために A/D 変換ボードとしてマイクロサイエンス(株)社製 DAS-1898XPC, 形状記憶合金駆動のためにデジタル出力ボードとしてマイクロサイエンス(株)社製 DIO-3098BPC, 画像処理のために画像処理ボードとしてフォトロン社製 FCM2RGB が装着されている. プリンターポートにはマニピュレータを駆動するためのケーブルが接続されている.

上記のボードやマニピュレータをコントロールするためにマイクロソフト社製 MS-C 7.0 を使用した.

2. 画像入力装置

画像入力装置としてソニー社製 CCD TRV-30 を用いた. この機種は単板式のカラー CCD を使用しており, NTSC 出力端子を備えている. 画像処理ボードとはピンジャックで接続される. またズームレンズを備えているため, システムの構築に際して自由度が広がる. 実際に画像処理のために撮影を行うときは, 水平器を用いてカメラが鉛直方向を向くようにした.

3. 画像処理装置

画像処理装置としてフォトロン社製 FCM2RGB を使用した. このボードは A/D 変換部と D/A 変換部, 画像メモリから成り立っている. ビデオカメラから入力された NTSC 信号を A/D 変換して画像メモリに記録する. また, 画像メモリの内容を D/A 変換部で NTSC 信号に変換してモニタに表示する. 画素数は 640x480, 24bit カラーで2画面分のメモリを持っている. ボード上には画像処理チップの類が無いので, コンピュータ側から I/O アクセスして画素の情報を読みとる. 画像処理ボードのコントロールは MS-C を使って, フォトロン社から別途購入した C ライブラリをインクルードすることにより行った((株)フォトロン, 1995).

2値化やラベリングなど基本的な画像処理はライブラリを使って行うことができるが, I/O アクセスのためどうしても時間がかかってしまう. そこで, 画像処理プログラム中で, 2値化の際に画像の一部分, 480x480 ピクセルの部分を 240x240 ピクセルに縮小してコンピュータ内のメモリに読み込み処理を行った. これにより, ライブラリを用いたときよりも高速に処理を行うことができるようになった.

第4項 移植装置

1. ロボットマニピュレータ

マニピュレータとして三菱電機製, Move master II, 5自由度垂直多関節型ロボットを用いた(三菱電機株式会社, 1983)(図 5). 実際の作業の時はエンドエフェクタが加わるので合わせて6自由度となる. マニピュレータの仕様は表 1 に示したとおりである. 危険防止のため, 非常停止スイッチを取り付けた.

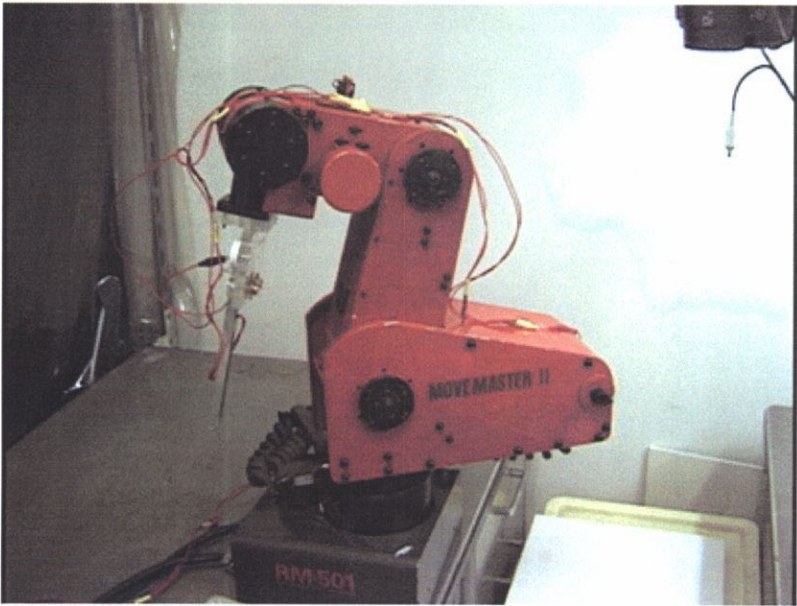


図 5 マニピュレータ

表 1 マニピュレータの仕様

	項目	仕様
	構造	5 自由度 垂直多関節型
動作範囲	ウエイスト回転	300°(0.025°/pulse)
	ショルダ回転	130° (0.025°/pulse)
	エルボ回転	90° (0.025°/pulse)
	リストピッチ	±90° (0.075°/pulse)
	リストロール	±180° (0.075°/pulse)
	可搬重量	max. 1.2Kg (ハンド重量を含む)
	最大合成速度	400mm/sec (リストツール面)
	位置繰り返し精度	±0.5mm
	駆動方式	DC サーボモータによる電気サーボ駆動
	本体重量	約 27kg

注) 可搬重量 (1.2kg) は, リストツール面から 100mm の点における値を示す.

2. エンドエフェクタ

苗を把持するエンドエフェクタとして、ピンセット状のものを作成した。これは、底が深い培養容器や、口の細いフラスコに対応させるためである。駆動力は形状記憶合金 (SMA, Shape Memory Alloy) であり、フィードバック制御を用いて把持力の制御を行う。構造や制御方法については後で詳しく述べる。

形状記憶合金(以下, SMA)は, 発生応力が 100MPa 以上と大きく, ひずみ量も 2~5%と固体アクチュエータの中では大きい。また, 線状やコイル状の SMA をロボットのアームや脚の長手方向に配置して動物の筋肉のように利用できるように, コンパクトでスペース効率の良いロボット機構が構成できる。このことから, SMA アクチュエータはロボット用アクチュエータとして古くから注目されてきたが, 通常の大サイズのロボットに適用すると, SMA の加熱/冷却に伴う応答性の悪さとエネルギー効率の悪さが大きな欠点になっていた。しかし, 本研究でも用いられているように, SMA アクチュエータを小さな機構に用いると, SMA の熱容量が小さくなるため応答性が向上し, また, 工藤に必要な熱エネルギーも少なくて済む。このため, 特にマイクロロボット用のアクチュエータとして見直されている(鈴森ら, 1998)。

古屋ら(1988)は, 本研究でも用いられたような Ti-Ni 形状記憶合金ワイヤの繰返し変形動作特性と劣化について調べ, 初期トレーニングを行うことが, 変位幅及び形状回復位置の低下(ワイヤーの伸び)を抑えることができ, 実用上重要であることを報告している。広瀬ら(1987)は, 内視鏡を能動的に制御するために, SMA コイルをアクチュエータとして用いた。また, 福田ら(1994)は, 血管内に挿入するカテーテルの能動制御を SMA ワイヤを用いて行った。

第3節 画像認識アルゴリズム

第1項 画像処理の流れ

画像処理の流れを図 6に示す。まず、ビデオカメラによって苗が移植されているケースの垂直上方から画像を取り込む。寒天培地に植えられている苗を上から見ると、白い寒天の部分と緑の苗の葉の部分、茶色の根の部分の3種類に分けられる。そこで、RGB 画像を HSI 変換する(川村, 1997)。H(色相)は色合いを表すパラメータで 0 ~ 360 度までの角度で表される。Hの値を使って葉と根を区別することができる。また、Gの値を使って背景と葉+根を区別することができる。そして、H(色相)とG(緑)の輝度から、葉を抽出する。HIS 変換は、ピクセルの RGB 輝度を、色彩情報と輝度情報に分離できるため、画像の色が問題になる場合しばしば使用される(山崎ら, 1996)。特に、農業においては、屋外の作業が多く、光源の条件が変わりやすいためこの変換が用いられた研究が複数報告されている(草野ら, 1995)(鳥居ら, 1995, 1997)(鹿沼ら, 1997)。これら一連の研究では、屋外の畑作圃場で小松菜などの葉菜類の作物列を検出するために、画像の HIS 変換を行った。色相を用いることで、RGB の輝度を用いたときよりも高い判別精度を得ることができたことが報告されている。一般的に画像処理による対象物体抽出の精度は、照明条件が変わると変化することが知られている。しかし、実用上、常に同じ照明条件を再現することは大変困難である。本章においては、画像処理の照明条件に対するロバスト性を高めることを目的としてこの方法を用いた。

ここで得られる画像は2値化画像である。まず、この画像にメディアンフィルタ処理を行ってノイズの除去を行う(井上, 1999)。そしてラベリング処理を行い(長谷川, 1990a)、葉の部分の投影面積の算出を行う。投影面積は苗の等級選別に使用する。

ロボットで把持するためには上から見た、画像中のX軸と葉の展開方向のなす角度(以下葉の展開方向とする)と茎の位置(以下把持位置とする)を知る必要がある。そこで、それらの算出を行った。

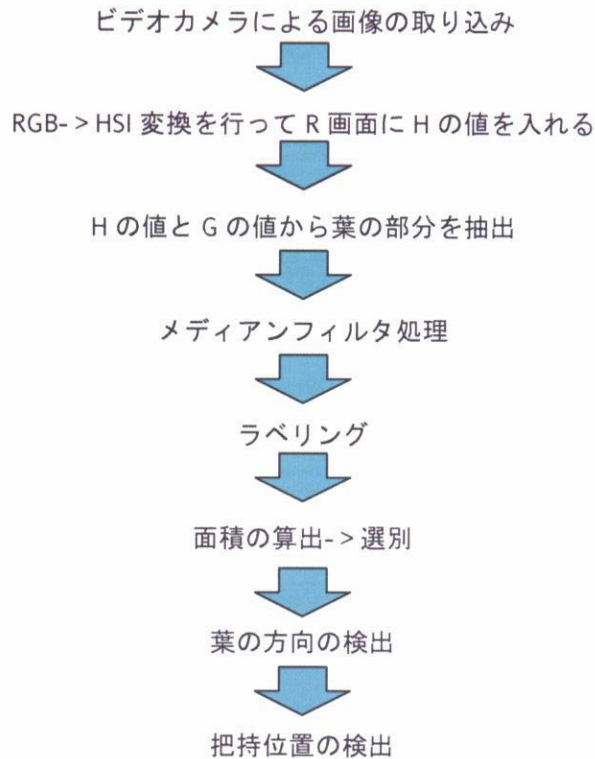


図 6 画像処理の流れ

第2項 苗の抽出

前項でも書いた通り、培地上に均等に照明が当たっていれば、画像上には培地と葉と根の3種類の別の色をした対象物が存在する(図 7)。そこでこの画像に対して HSI 変換を行って、H(色相)の値を求める。Hの値と元の画像のG(緑)値を用いることによって葉の部分だけを抽出することができる。H-Gの散布図を図 8に示す。

判別分析法をもちいてこれらを分離する(高木ら, 1991)。判別分析法の式は以下のようにになっている。

$$\sigma_B^2(k) = \omega_0(\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu_T)^2 \quad (1)$$

ただし,

n_i : レベル i の画素数, N : 全画素数

$$p_i = n_i / N \quad (2)$$

$$\omega_0 = \sum_{i=1}^k p_i \quad (3)$$

$$\omega_1 = \sum_{i=k+1}^L p_i \quad (4)$$

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^k ip_i / \omega_0 \quad (5)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=k+1}^L ip_i / \omega_1 \quad (6)$$

$$\mu_T = \sum_{i=1}^L ip_i \quad (7)$$

これは、画像の濃度ヒストグラムから統計的な意味での最適な閾値を決定する方法である。ある閾値によってヒストグラムを2クラスに分割した場合のクラス間分散 $\sigma_b^2(k)$ が最大になる閾値 k を選ぶという原理である。

まず始めにGのヒストグラムに対して判別分析を行い、閾値1を求める。この閾値によって背景と葉+根を区別することができる。背景をのぞいた後、Hのヒストグラムを新たに計算しそれに対して判別分析を行い、閾値2を求める。

Gの値が閾値1よりも小さく、Hの値が閾値2よりも大きなピクセルの値を255にして、それ以外のピクセルをすべて0にするという2値化処理を行う。

ヒストグラムの計算に時間がかかるため、実験の条件が変わらなければ、一度求めた閾値を使うことによって処理時間を短縮することができる。

また、上記の方法の他にニューラルネットワークを用いて苗の抽出を試みた (Demuth and Beale, 1994)。ニューラルネットワークは、動物の脳神経網をモデル化して考え出されたもので (中野ら, 1989)、パターン認識の分野で、線形判別不可能な対象に対して用いられる (石井ら, 1998)。画像中の背景、葉、根の各部分から50ピクセルずつサンプリングして、それらの RGB の値をニューラルネットワークの教師データとする。R と G の値をプロットした散布図を図 9 に示す。ネットワークの構造は、中間層と出力層がともに1層で3個のニューロンからなっている。伝達関数としてシグモイド関数を用い、バックプロパゲーションアルゴリズムを用いてトレーニングを行った。トレーニングによって得られた各ニューロンのシグモイド関数の重みと偏差を用いて画像中の他のピクセルを3種類に分類した。この方法は、どのようなデータ列に対しても適用が可

能なので、RGB にこだわらず、先に述べた HSI の値を用いても分類を行うことができる。ただし、実験条件が変化する度にネットワークを訓練し直さなければならない。

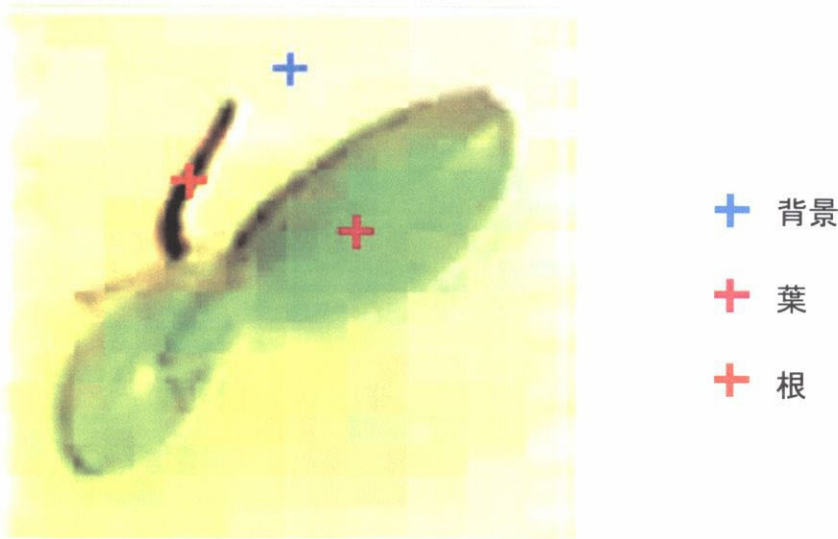


図 7 苗を上部から見た画像

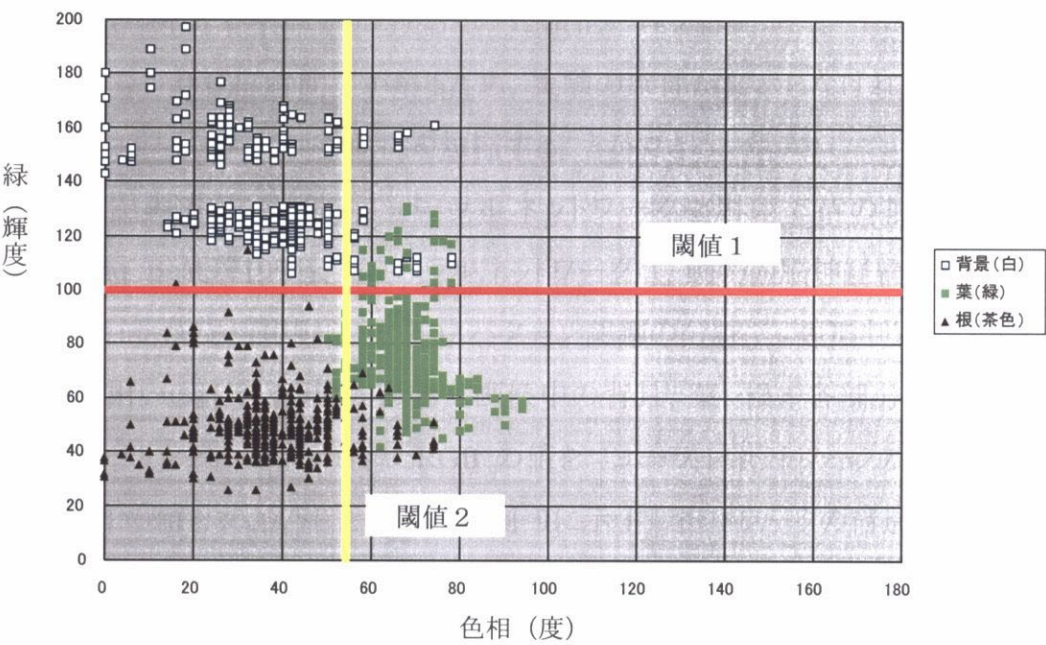


図 8 H(色相)-G(緑)の散布図

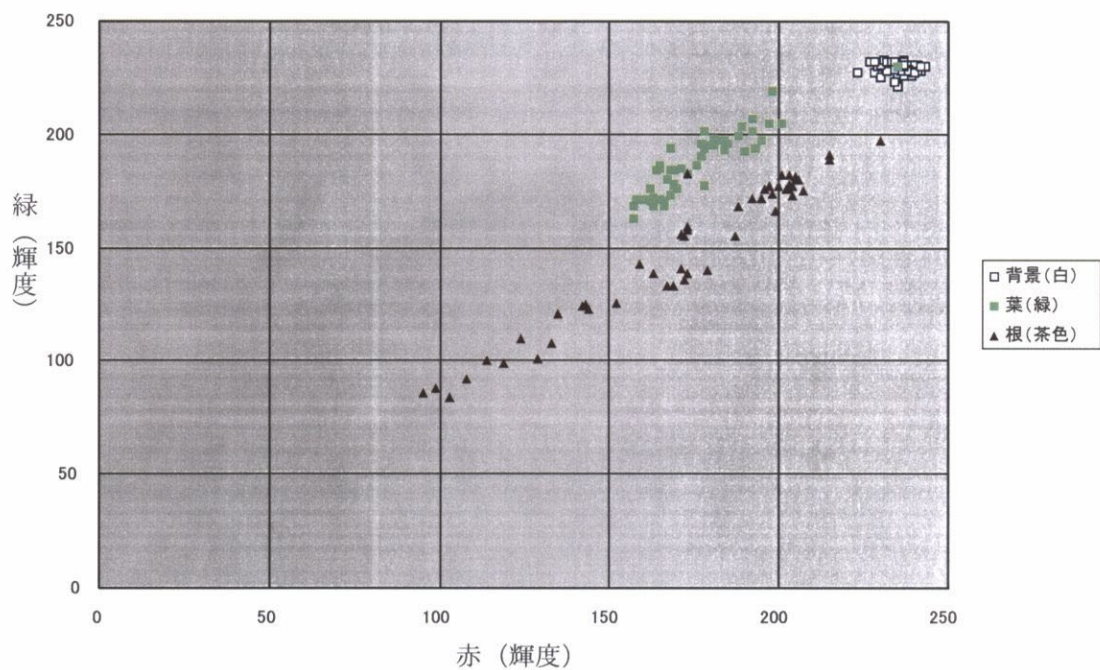


図 9 R-G 散布図

第3項 メディアンフィルタ

メディアンフィルタは通常グレースケール画像のノイズ除去に用いるが、ここでは2値化画像に対してメディアンフィルタを適用した。対象とするピクセルと8近傍のピクセルに注目して、9ピクセルのうち1の値を持つピクセルが5個以上ある場合は対象とするピクセルを1とし、5個未満の場合は0とする。このフィルタによって細かいノイズを消去することができる。

第4項 投影面積の計測

投影面積を求めるため、2値化画像に対してラベリング処理を行う。画像中の連結成分に1, 2, 3・・・と番号をつけて、それぞれの面積、重心位置を求める。この時、算出される面積は画素数のことである。

第5項 等級の選別

現在、苗の大きさは熟練者による判断に任されている。その場合、葉の大きさを基準にするというが、葉の長さや幅を正確に計っているわけではない。画像処理によって等級選別をする場合、何らかの数値的な指標が必要となる。その指標として上から見た投影面積を用いることとした。熟練者による選別結果を投影面積によってそれぞれの等級のヒストグラムを作ると図 10の様になる。

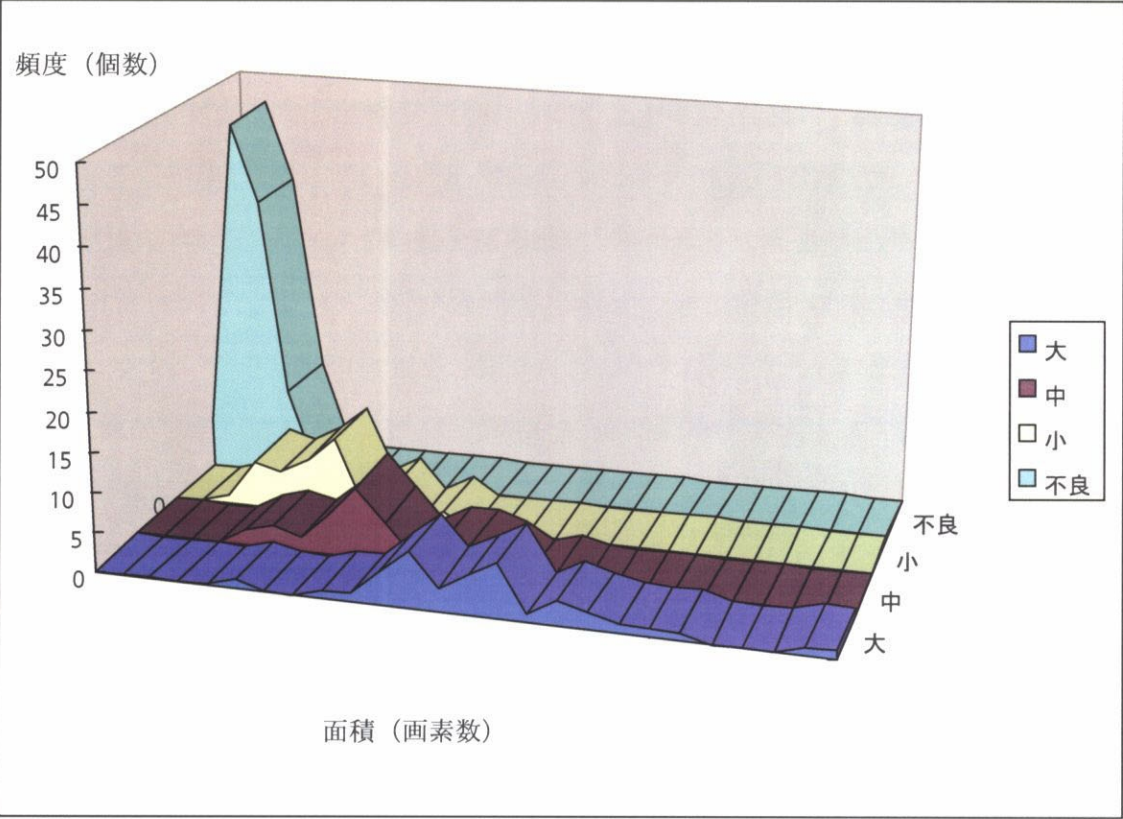


図 10 等級別の投影面積のヒストグラム

実際に自動移植を行うときは、マハラノビスの距離という統計手法を用いて苗の選別を行う(有馬ら, 1992)。マハラノビスの距離を用いると X という面積を持つ未知の苗がどのグループに属するかを調べることができる。それぞれのグループに対するマハラノビスの距離 D_i は、それぞれのグループの平均値と分散を A_i, V_i とすると、

$$D_i = \frac{(X - A_i)}{\sqrt{V_i}} \tag{8}$$

となる。未知の苗は D_i を最も小さくするグループ i に属すると判断する。ここでは1変量の場合のマハラノビスの距離について述べたが、多変量の場合にも共分散行列を用いて拡張することができる。

第6項 苗の葉の展開方向の検出

今回対象としたランの苗は図 11の様に左右に180度に展開している。この図中で画像中のX軸に対する苗の葉の長軸方向の角度を葉の展開方向とする。また、ロボットは苗の茎を把持して移植を行うため、上から見て、くびれた部分の中心を把持位置とする。葉の展開方向は、反時計回りの方向を正とする。これは、画像中ではY軸の方向が通常と逆向きになっているためである。エンドエフェクタの先はピンセット状になっているため、エンドエフェクタの先を苗の傾きと平行にした状態で把持することが望ましい(図 12)。そこで、モーメントを用いて苗の傾きの検出を行った(長谷川ら, 1990b)。

モーメントについて説明をする。図形が図 13のように与えられたとき、図形の各画素が質量1の重さを持つものとして、次の (p, q) の組み合わせにより重心の座標や、図形の傾きなどが求められる。

$$M(p, q) = \sum_{(x, y) \in S} x^p y^q \quad (9)$$

$M(0, 0)$ はこの図形の面積、 $M(1, 0)$ 、 $M(0, 1)$ はX軸Y軸に対するモーメントを表すので、この図形の重心の座標 (cx, cy) は次のようになる。

$$cx = M(1, 0) / M(0, 0), \quad cy = M(0, 1) / M(0, 0)$$

傾きを求める際には上で求めた重心の座標を中心として $M(2, 0)$ 、 $M(0, 2)$ を求め、以下の式から $\tan \theta$ を求める。

$$\tan^2 \theta + \frac{M(2, 0) - M(0, 2)}{M(1, 1)} \tan \theta = 1 \quad (10)$$

しかし、この式は2次式なので $\tan \theta$ の値が2つ出てしまう。そこで、重心を通る2つの傾きの直線を引き、図形の幅を調べて長い方を図形の傾きとした。図 13の場合だと L_1 の方が L_2 よりも長いので θ_1 を苗の傾きとする。

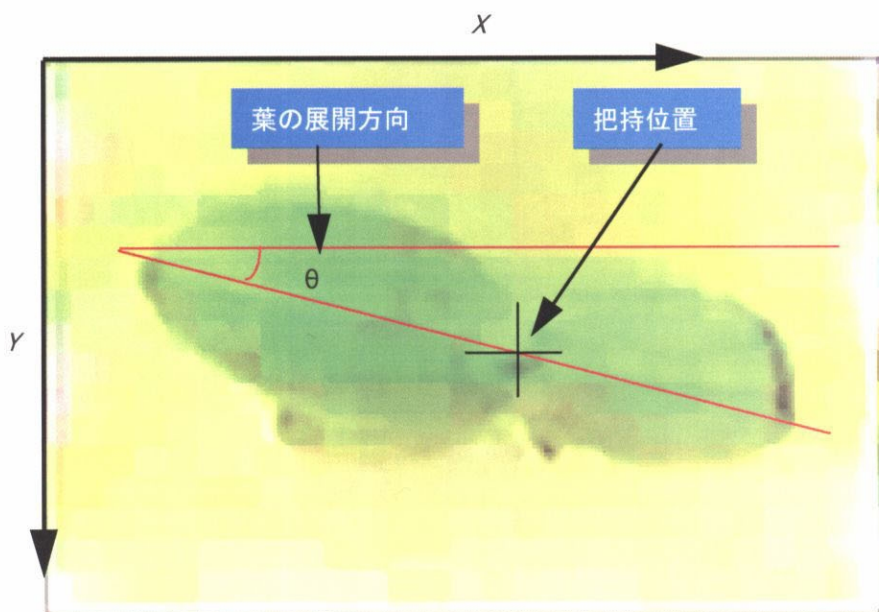


図 11 葉の展開方向と把持位置の定義

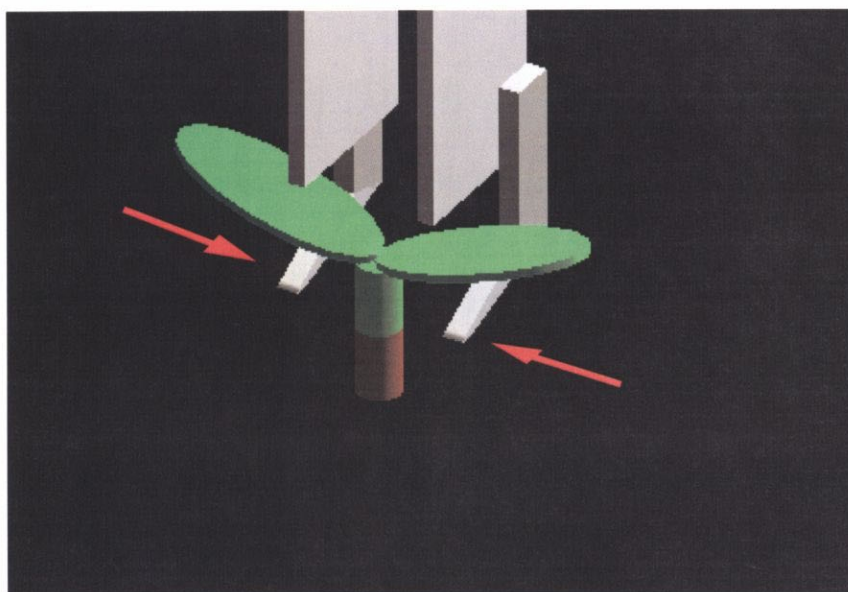


図 12 エンドエフェクターによる苗の把持

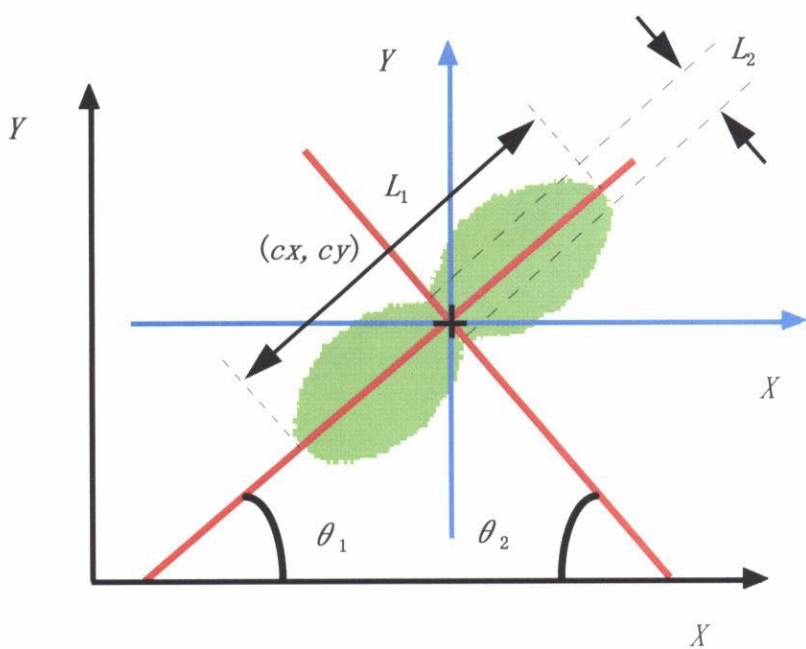


図 13 モーメントを用いた苗の傾きの検出

第7項 苗の把持位置の検出

苗の葉の展開方向を求めた後、苗の把持位置を検出する必要がある。苗の左右の葉は大抵長さが違うので、上から見た茎の位置を検出する必要がある。上から見て、葉の両側のくびれた所の中心が茎の位置であると推測される。そこで、図 14のような方法を用いた。

まず、先ほど求めた傾きに垂直に走査を行い、苗の葉の幅を調べる。次に幅を縦軸、苗の端からの長さを横軸にとる。そして、両側が真ん中に比べて大きい所を候補線とする。続いて、候補線を閾値として前述した判別分析法を使って、右と左のクラス間分散が最大となる線を苗の中心を通る線と決定した。そしてこの線上の中心の座標を把持位置とする。もし、両側が高くなっている候補線が無い場合には、便宜上、左右の葉の端の中心を中心線として把持位置を求めた。

単にくびれている場所を求めたのでは、局所的な凹凸を拾ってしまう可能性があるが、判別分析法と組み合わせることによって、最も左右の葉を良く分けることができる点を選定できる。

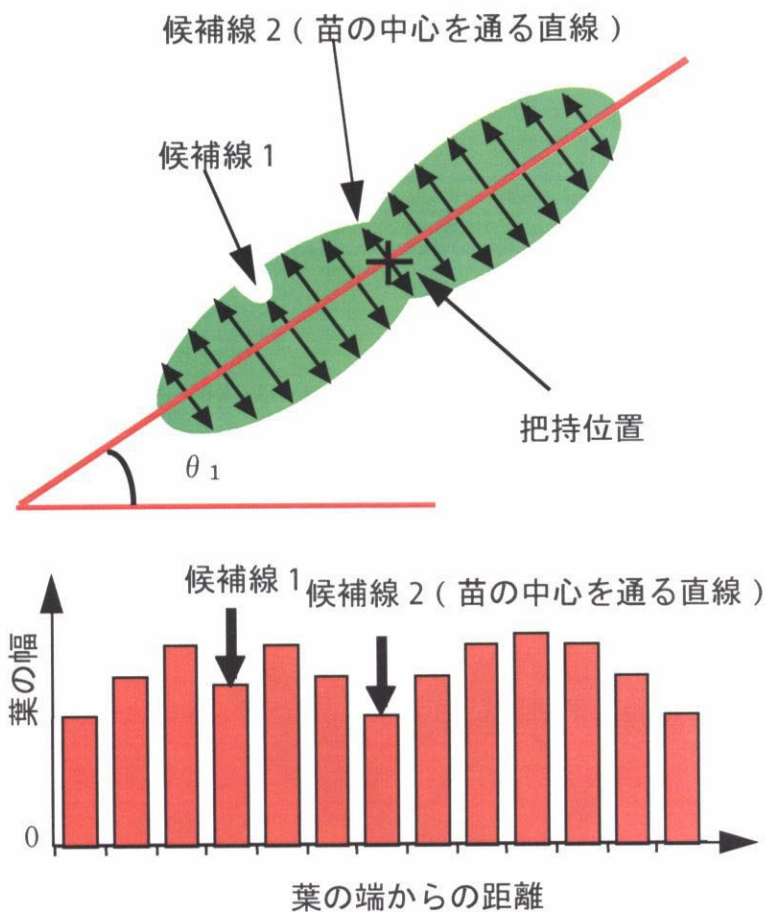


図 14 苗の把持位置の検出

第8項 移植可能判定

実際に苗が培地に植えられている場合、すぐ隣に箱の壁や他の苗があるかもしれない。そのような状態で不用意に指先を挿入すると、エンドエフェクタや箱または苗を壊してしまう可能性がある。そこで、以下の方法を用いて、苗を順番に移植することにする。

1. ラベリングされた順番に苗1の把持位置の両側の 15mm 離れたところ($px1, py1$), ($px2, py2$)に他の苗, あるいは容器の壁がないかチェックする。
2. もし、最初にチェックした点($px1, py1$)が背景だったら、把持位置から 10mm 離れた ($px3, py3$)にリストの回転角度 θ_1 で指先を挿入し、指先を把持位置まで移動して把持する。しかし、図 15の様に($px1, py1$)に苗あるいは容器の壁がある場合は、

- $(px2, py2)$ をチェックして何もなければ $(px4, py4)$ にリストの回転角度 $180^\circ + \theta_1$ で指先を挿入し、指先を把持位置まで移動して把持する。
3. 苗1を移植し終わった後は、画像中から苗1を消去する。
 4. もし、 $(px1, py1)$ と $(px2, py2)$ のどちらにも別の苗あるいは容器の壁がある場合は苗2に行き同じ事を繰り返す。
 5. 最後まで1～4を繰り返した後また苗1にもどって同じ事を繰り返す。どうしても移植できないものに関しては放っておく。そして、移植可能な苗を今までのルールですべて移植する。

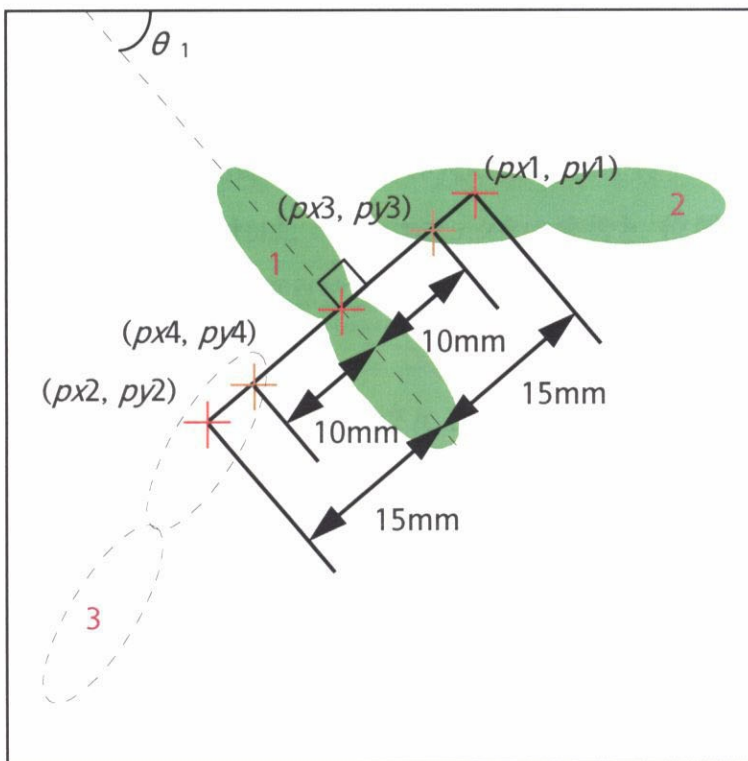


図 15 移植可能判定

第4節 ロボットマニピュレータの制御

第1項 ロボットのコントロール

ロボットのコントロールはコンピュータからドライブユニットにプリンタケーブルでコマンドを送るという方法を採用している。ムーブマスターIIには38種類のインテリジェンスコマンドが用意されており、それを用いてコントロールを行う。コマンドは先述したとおり、C言語によって送られる。

第2項 マニピュレータのキャリブレーション(垂直方向)

ロボットのコントロールは各関節の角度を決めることによって行う。各関節間の長さは決まっているので、角度がわかれば、エンドエフェクタの姿勢と、位置を決定することができる。しかし、ロボットの性質上原点位置を求める必要がある。そこで、以下のような手順によってロボットの原点を求めた。

1. ショルダの回転中心の水平面からの高さ h_w を求める。
2. ショルダ、エルボ、リストを適当に調節し、エルボの回転中心とリストの回転中心が h_w に等しくなるようにして、その時に NEST ポジションから動かした角度を記録する。NESTポジションとは、ロボットの各関節が、最大可動域まで動いた状態の位置で、NESTコマンドを実行することで、その位置までロボットが動くため、今回の実験では、この位置を原点としてそこから相対的に動いた各関節の角度を利用した。
3. リストピッチを適当に調節してエンドエフェクタの部分が水平面と平行になるようにする。そして、そのときに NEST ポジションから動かした角度を記録する。

ここで、垂直方向のロボットのずれを調べることができる(図 16)。それらの角度のずれを表 2に示す。

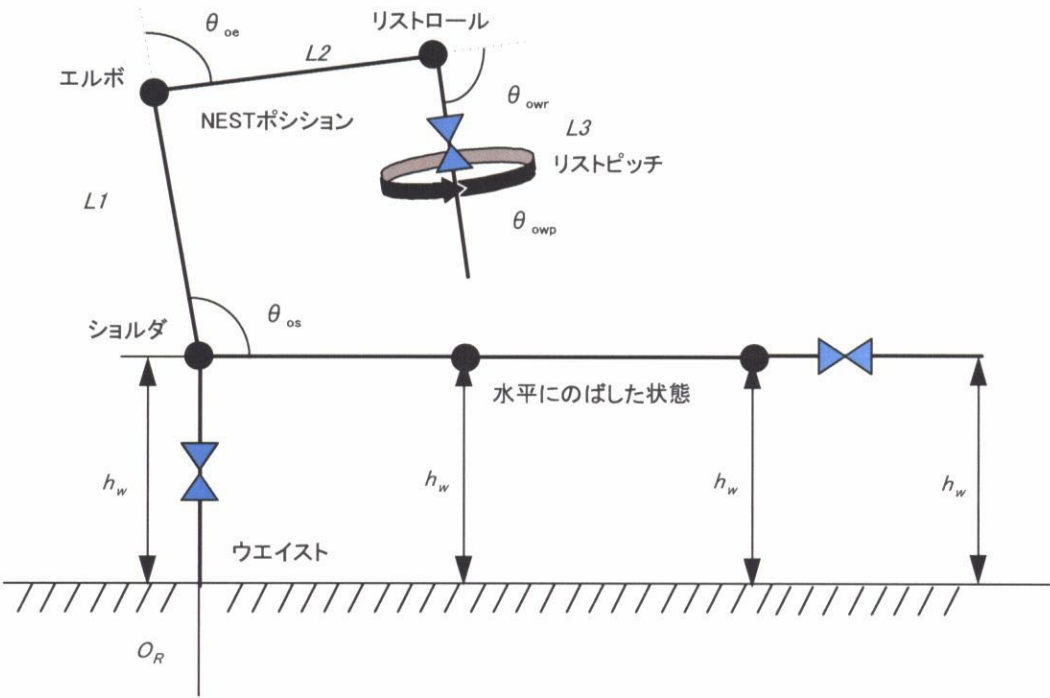


図 16 垂直方向のキャリブレーション

表 2 キャリブレーションの結果

部位	ステップ数 (step)	角度 (°)
ショルダ	-4195	104.875
エルボ	3560	89
リストロー	1205	90.375
リストピッチ	225	16.875

第4項 画像とのキャリブレーション(水平方向)

垂直方向の座標は以上の方法で行うことができるが、水平方向のキャリブレーションは画像と連動して行う。ただし、リストの回転中心と、エンドエフェクタの指先が偏心しているため、修正をしなければならない。今回は、エンドエフェクタが長いため、偏心の影響が多かった。その方法は以下の通りである。座標はすべて画像の座標を用いる。単位はピクセルである(図 18)。

1. 指先を閉じて、水平距離を $R_1=350\text{mm}$ 、垂直距離を $h=-100\text{mm}$ (ステージは水平面よりも低くなっている)、マニピュレータの腕を大体画像の X 軸と平行になるような位置に持ってくる。今回はNESTポジションから $\theta_1 = 152.5^\circ$ (6100step) 動かした。ここでウエイストを動かす角度は指先の先端が画像からはみ出なければ何度にしても良い。リストの角度は 0° とする。
2. ステージ上で指先があるところにマークを持ってくる。
3. ウエイストだけを動かして、ステージ上のマークの画像を取り込む。
4. 画像上のマークの位置の XY 座標(x_1, y_1)を記録する。
5. 水平距離を $R_1=350\text{mm}$ 、垂直距離を $h=-100\text{mm}$ 、リストの角度を 180° とする。
6. 2～4 の手順を繰り返して(x_3, y_3)を記録する。
7. 今度は水平距離を $R_1=300\text{mm}$ にして 1～6 の手順を繰り返し、(x_2, y_2)、(x_5, y_5)を記録する。
8. この時、 $(x_5, y_5) = (\frac{x_1 + x_3}{2}, \frac{y_1 + y_3}{2})$ と $(x_6, y_6) = (\frac{x_2 + x_4}{2}, \frac{y_2 + y_4}{2})$ は、真のリストの回転中心だと考えられる。そこで、(x_5, y_5)、(x_6, y_6)の値から、画像の座標系から見たロボットのウエイストの回転中心(orx, ory)を計算する。また、1ピクセルが何 mm に相当するか計算する(α)。また、画像の X 軸とずれている角度 θ_2 を計算し、ステップ数に換算する($offsetsteps$)。
9. リストの回転中心とエンドエフェクタの指先の偏心の影響をキャンセルするために、図 22 のように、中心と指先の距離のずれ($kyori_zure$)と角度($kakudo_zure$)を求めた。

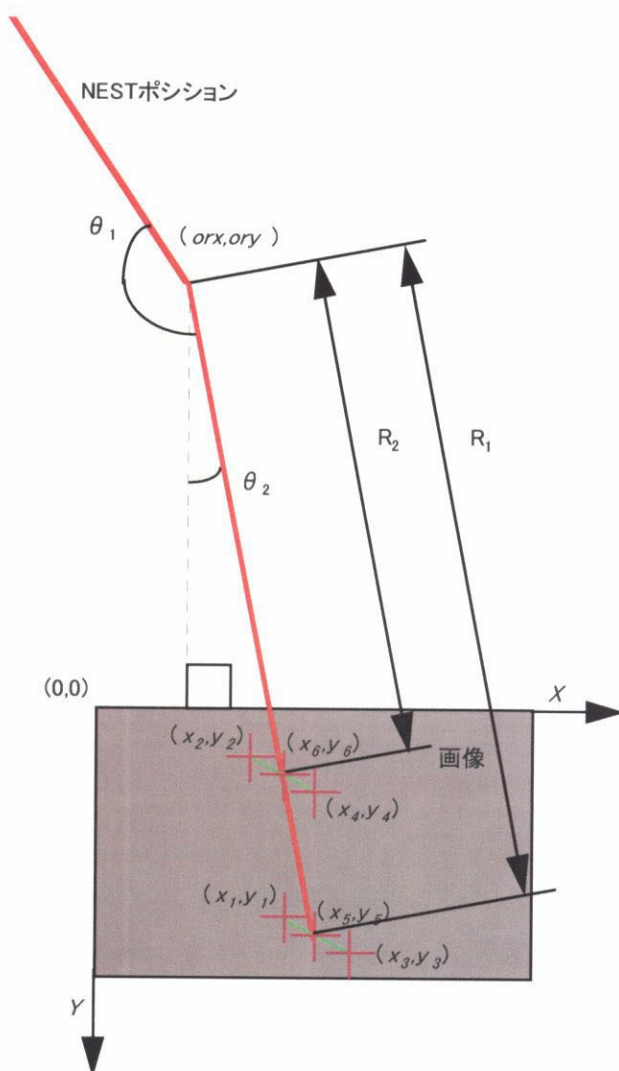


図 18 水平方向のキャリブレーション

$$orx(\text{pixel}) = x1 - R1 / (R1 - R2)(x1 - x2) \quad (11)$$

$$ory(\text{pixel}) = y1 - R1 / (R1 - R2)(y1 - y2) \quad (12)$$

$$alpha(\text{mm/pixel}) = (R1 - R2) / \sqrt{(x1 - x2)^2 + (y1 - y2)^2} \quad (13)$$

$$\theta2 = \arctan(y1 - y2) / (x1 - x2) \quad (14)$$

$$offsetsteps(\text{step}) = \theta2 / 0.025 \quad (15)$$

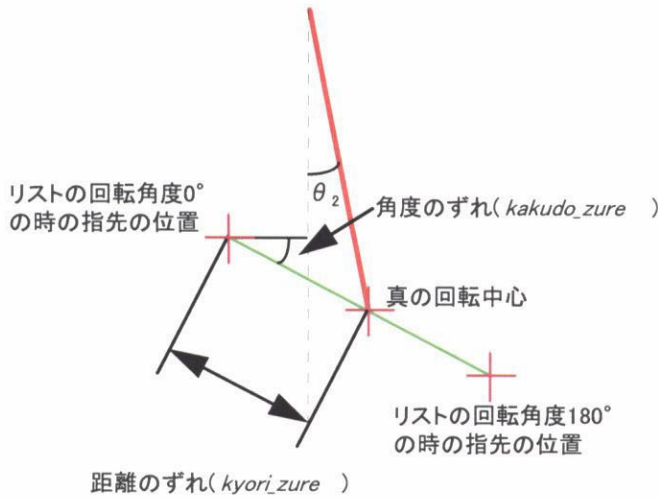


図 19 指先の偏心

$$kakudo_zure = \left(\arctan \frac{y_3 - y_1}{x_3 - x_1} + \arctan \frac{y_4 - y_2}{x_4 - x_2} \right) / 2 \tag{16}$$

$$kyori_zure = \left(\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2} + \sqrt{(x_4 - x_2)^2 + (y_4 - y_2)^2} \right) / 4 \tag{17}$$

このようにして求めた, *orx*, *ory*, *alpha*, *offsetsteps*, *kakudo_zure*, *kyori_zure*を用いることで, エンドエフェクタの先を水平面上の任意の場所に持っていくことができる. ただし, ロボットやカメラを動かした場合, および水平面の高さが変えた場合にはキャリブレーションをやり直さなければならない.

第5項 指先の位置制御

画像上の任意の点(*p*, *q*)に任意の角度 θ_h で指先を移動するためには, 以下の式によって, ウエイストの回転中心からの水平距離 *r*, 原点位置(マニピュレータの腕が画像のY軸と平行になっている状態)からのウエイストの回転角度 θ_w を求める.

$$\alpha = p + kyori_zure \cos(-\theta_h + kaku_zure) \tag{18}$$

$$\beta = q + kyori_zure \sin(-\theta_h + kaku_zure) \tag{19}$$

$$r = alpha \sqrt{(\alpha - orx)^2 + (\beta - ory)^2} \tag{20}$$

$$\theta = \arctan \frac{p - orx}{q - ory} \tag{21}$$

第5節 エンドエフェクタの制御

第1項 エンドエフェクタの概略

エンドエフェクタの概略図を図 20に示す。ピンセット部は厚さ 1mm のSUS316(ステンレス), 本体部はアクリルで作られている。電極に通電することで, SMA(記憶形状合金:Shape memory alloy)ワイヤが縮み指先が閉じる。歯車によって両方の指が同時に動くようになっている。通電を止めると SMA ワイヤは空気によって冷却され, 再び伸び, バネによって指先が開く。エンドエフェクタのアクチュエータ(動力源)として一般的なものは, 空気圧やモータなどがあげられる。また, 近年, マイクロロボットのためのアクチュエータとして, 静電アクチュエータや圧電アクチュエータ, 光アクチュエータ, 超磁歪アクチュエータ, 高分子ゲルアクチュエータなど様々な方式が開発されている(鈴森ら, 1998)。本研究においては, 1)エンドエフェクタの構造をシンプルかつ軽量にすること, 2)容易に変位をコントロールできること, 3)応答性が速いことを目的として, SMA ワイヤを使用した。

指先を横から見ると図 21の様になっている。指先には折れ曲がったステンレス製のカギ状の爪が取り付けられており, 苗を挟んで持ち上げるようになっている。図 21で苗把持位置と書いてあるところを今後は指先という。

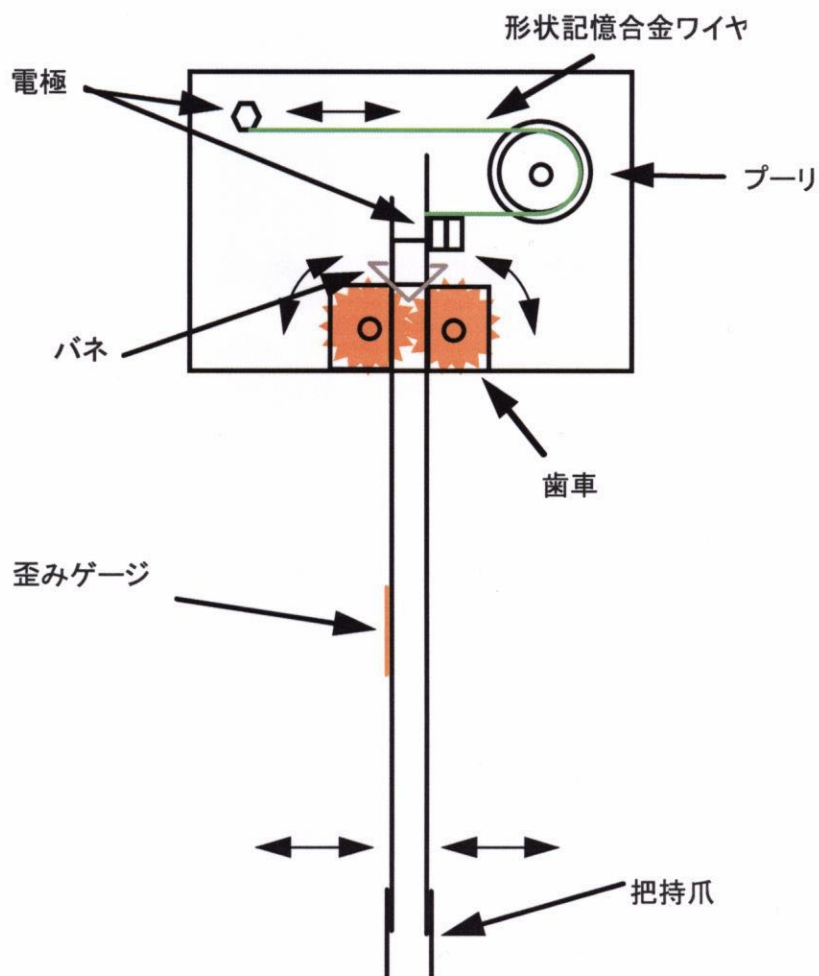


図 20 エンドエフェクタの概略図

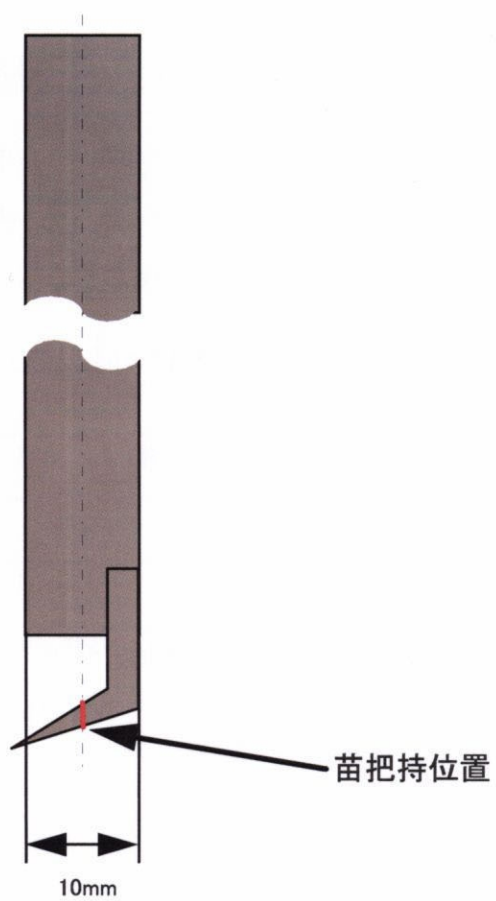


図 21 エンドエフェクタの指先

第2項 形状記憶合金(SMA)

SMA ワイヤとしてトキ・コーポレーション株式会社製のバイオメタルファイバー(φ150μm)を使用した(トキ・コーポレーション, 不明). これは, 通電駆動用に調質処理された Ti - Ni(チタン-ニッケル)系の SMA である. その特性を表 3にまとめる.

表 3 実験に使用した SMA ワイヤ (バイオメタルファイバー) の特性

特性項目	単位	最小値	通常値	最大値	備考
変態点	℃	90	95		～50℃で誤動作しないこと
電気抵抗	Ω/m		40		伸びた状態
熱伝導率	cal/cm℃s		0.05		
引っ張り強さ (応力)	MPa	1250			引っ張り力で 2.2kgf 以上
耐食性 (化学的安定性)					ステンレス以上
最大収縮力 (形状回復力)	N	10			繰り返しは不可
低温時の変形に必要な力	N		0	0.3	
実用最大荷重負荷	N	2.4			引っ張り応力で約 150MPa
実用操作歪み (引っ張り)	%	2.0	3.0		動作回数に依存
繰り返し寿命	cycles		2×10 ⁵		荷重負荷, 加熱状態に依存
動作開始電流	mA	300	350		外気温度に依存
連続通電可能な電流	mA		400		1 時間以上, @20℃
動作に必要な電力	W/m	5	6	6.5	

トキ・コーポレーションの本間(1990,2003)は, SMA ワイヤの応用について, 電磁アクチュエータのような利用や, マイクロロボットなど様々な機構を提案している.

第3項 SMAドライバ

SMAワイヤは比較的大きな電気抵抗を持っているので、通電によりジュール加熱することができる。通電加熱では、放熱を行いながら加熱されるために入熱量(電力)を変えることで形状回復力や回復速度、回復量を変化させることができる。

本研究では、PWM(パルス幅変調)を用いてデューティ比を変化させることで入熱量を変化させた(図 22)。通電サイクルは 5kHz、定電流回路により 400mA を供給した。パソコンの拡張スロットに接続されたデジタル入出力ボードから SMA ドライバに操作量分のパルスを送りデューティ比を変化させた。D は 0～100 までの整数値で表現される。後で説明するフィードバック制御の操作量としてこの値を用いた。このドライバは岡本ら(1993)に用いられたものと同様のものである。

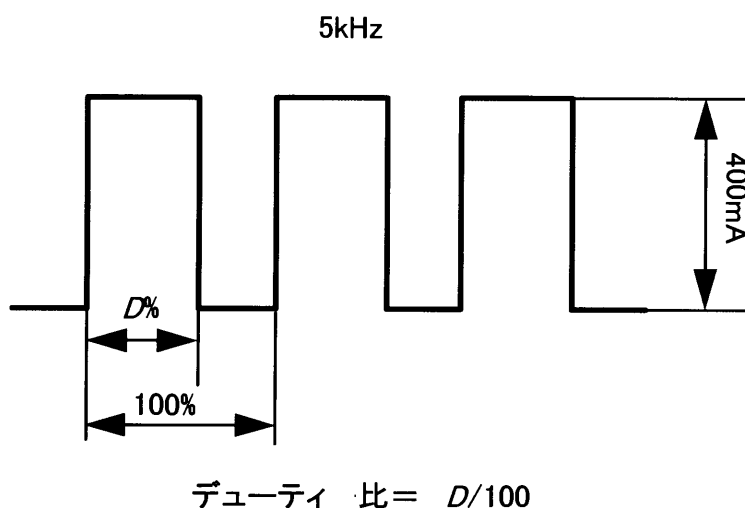


図 22 PWM (パルス幅変調)

第4項 ひずみゲージ

エンドエフェクタによる苗の把持力を測定するため、指の途中の裏と表に1枚ずつ歪みゲージを取り付けた。歪みゲージは共和電業製 KFG-10-120-C1-16 L3M2R である。2アクティブゲージ法(曲げ歪み測定法)を用いてピンセット部の曲げモーメントを計測した(株式会社共和電業, 2001)。

ストレインアンプは共和電業製 DPM-305A を用いた。ストレインアンプからの出力電圧を A/D 変換ボードによってコンピュータに取り込んだ。

電圧を荷重に換算するために図 21で示した苗把持位置に7種類の重りをつるし、キャリブレーションを行った(山本ら, 1986)。その結果を図 23に示す。以後はこの結果を用いて把持力を計算した。

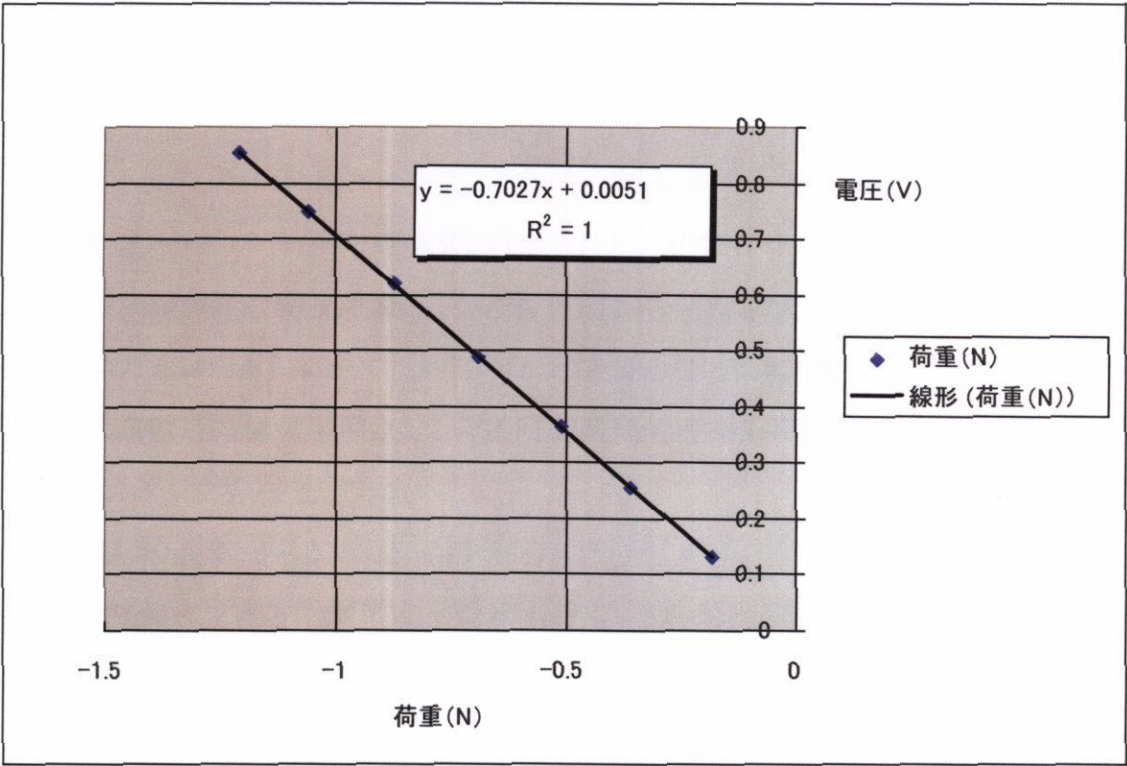


図 23 荷重と電圧のキャリブレーション

第5項 把持力の制御方法

ランの苗は茎の部分の直径が 1.5mm～3.0mm 程度と大変細く、柔らかいため、優しくつかまなければならない。また、個々の苗の太さは異なっている。そこで、力フィードバック制御を行った(高橋, 1968)。フィードバックの制御則としては最も一般的な PID 制御を用いた。PID 制御には操作量の絶対値を出力値とする位置アルゴリズムと、操作量の変化量を出力値とする速度アルゴリズムがある。本研究では後者の速度型アルゴリズムを用いた。以下に制御式を示す。

$$\Delta m_k = K_p(c_{k-1} - c_k) + K_i(r_k - c_k) + K_d(2c_{k-1} - c_{k-2} - c_k) \quad (22)$$

ここで

Δm_k : k 番目の操作量の変化量(デューティ比の変化量)

K_p : P 動作係数, K_i : I 動作係数, K_d : D 動作係数

c_k : k 番目の制御量(把持力), r_k : 目標量(目標把持力)

K_p , K_i , K_d を適当に調節することで目的の制御を行う。この場合、デューティ比が 100% を越えるか、0% を下回るような時はそれ以上の操作をしないようにする。

把持力の制御は、苗を把持してから離すまで常に行わなければならない。当然その間にマニピュレータを動かすためにコマンドを送らなければならない。そこでボードが発生する割り込み信号を用いて、一定時間間隔で把持力を測定した。今回は一秒間に 10 回のサンプリングを行った。

PID 制御と比較するため ON-OFF 制御も行った。ON-OFF 制御では、把持力が、目標値を下回っているときはデューティ比 100%, 上回ったときは 0% とした。

第6節 移植方法
第1項 移植ステージ

移植ステージは図 24, 図 25の様になっている. 画像中の(0,0)と(480,480)で囲まれた部分が画像処理の対象となる. 移植先の箱には, 図 24の移植先:小のように左下隅から順番に 45° の傾きで移植していく.

移植先:小

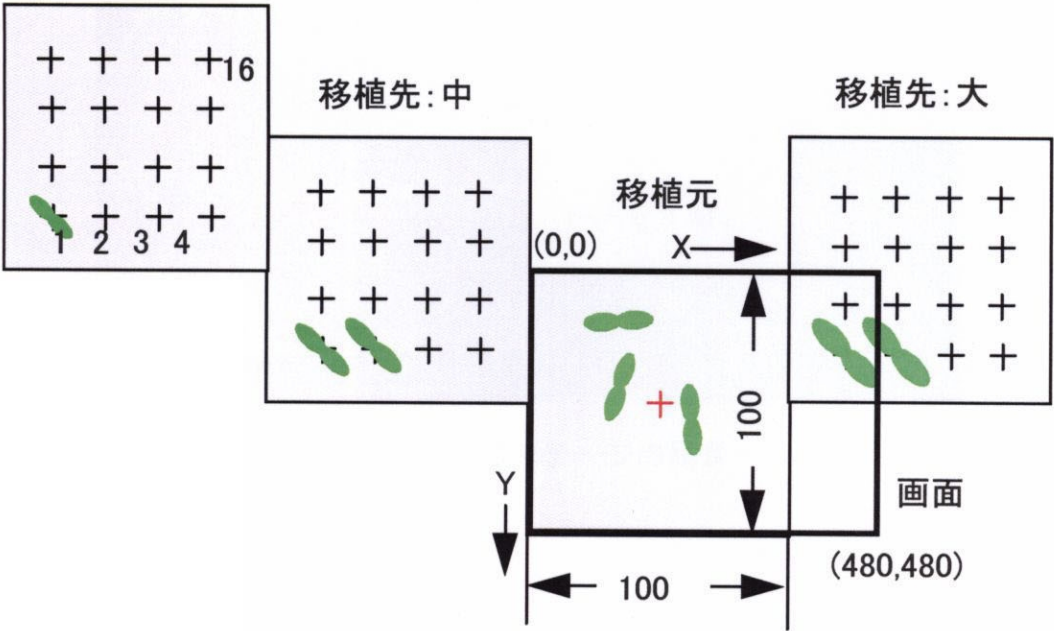


図 24 移植ステージ(上から見た所)

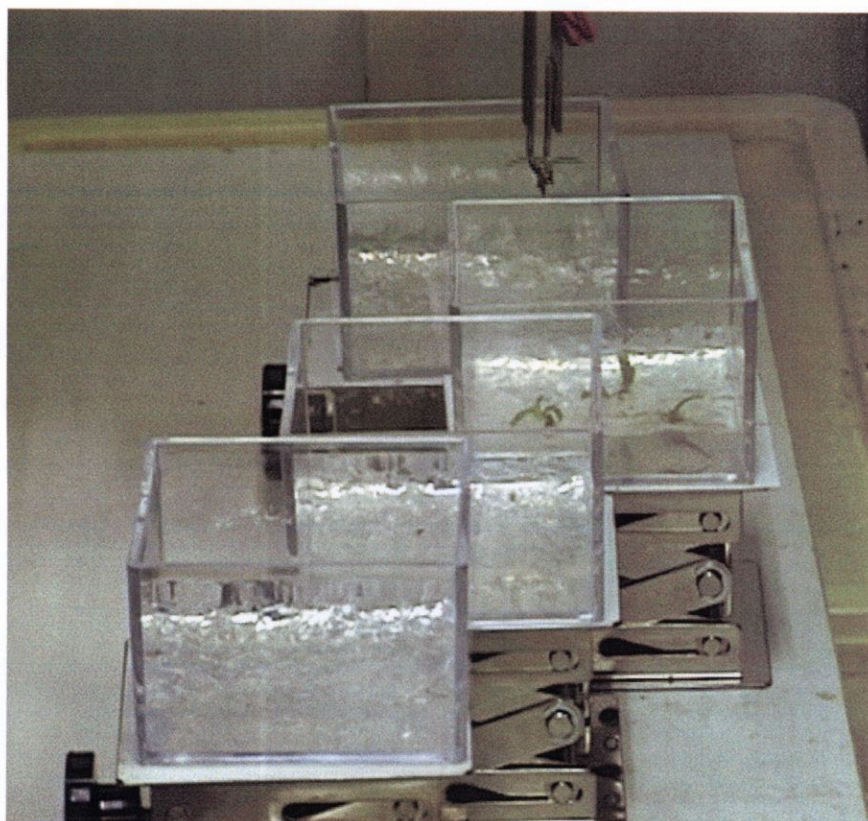


図 25 移植ステージの画像

第2項 指先の動かし方

苗を移植する際の指先の動きを図 26に示す.

1. まず苗の把持位置から 10mm 離れたところに指先を挿入する.
2. 把持位置まで横に指先を動かす.
3. 苗を把持する.
4. 指先を持ち上げる.

苗を移植するときは, この反対の動作を行う.

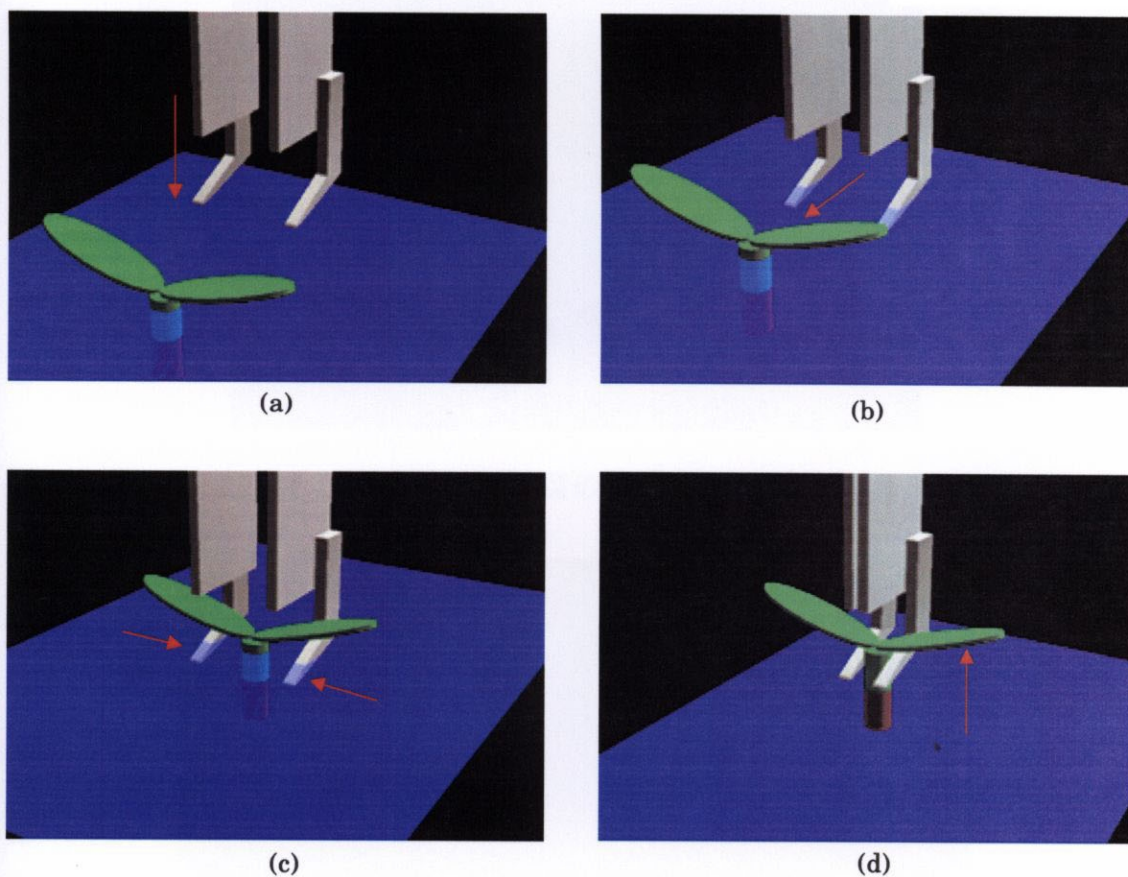


図 26 苗の把持