

第4節 結果および考察

本実験では、52本のサンプルについて、上記のアルゴリズムによる形状認識を試みた。Close 画像における1ピクセルは0.148 mm に相当し、Far 画像における1ピクセルは0.297 mm に相当した。その結果を以下に示す。

第1項 主茎の傾きの検出

主茎の傾きの検出を、苗の二値画像の左右のエッジ検出と、そのハフ変換によって行った結果を表 1に示す。回転前の画像の苗の中心線を、アドビ社のフォトショップ 7.0 を用いて手動で求め、コンピュータによる計算値と比較した。ほとんどの苗においてその主茎の角度は適切に検出されていた(図 5(f))。

表 1 主茎の Y 軸に対する傾きの検出結果

標準誤差	1.5°
最大誤差	8.3°

主茎の傾きの検出は、主茎の境界が直線的であるという仮定に基づいている。また、実際サンプルとして使用したサトウキビ苗は、そのほとんどが、主茎が直線的なものだった。その為、誤差の最大値は、図 17のように茎が途中で折れ曲がっている場合に生じた。このアルゴリズムでは、最も確からしい直線のみを検出するため、茎の上半分については、正しい中心線を検出することが出来た。この実験では一つの画像から一本の直線のみを検出してそれを境界線としたが、今回使用した Duda and Hart (1972)のアルゴリズムでは、複数の直線を検出することも可能である。もし、曲がっている苗が多い場合は、複数の直線から、適切な直線を選び出すアルゴリズムが必要となるだろう。標準誤差の値は、ロボットによる苗の把持という本研究の目的からすると許容可能であると考えることが出来る。



図 17 主茎の傾きの検出誤差

第2項 茎の最下端点の検出

表 2に主茎の下端点の検出の結果を示す. 回転, 移動後の Close 画像から, 傾きの検出と同じように, 手動で主茎の下端点と思われる点を決め, 計算値との比較を行った. Y 軸方向の主茎の下端点の検出は, 多少の誤差はあったもののほとんどの苗において成功した(図 18). これは, テンプレートの幅を苗の太さに応じて変化させた結果だと考えられる. 図中矢印で示した箇所が, 検出された茎の最下端点である. Y 軸方向の標準誤差は, 2 mm と小さい値となった. 茎の太さが 1~3 mm であることを考えると, この標準誤差は十分に許容できる値であると考えられる.

表 2 茎の最下端点の検出結果

	X 軸方向 [mm]	Y 軸方向 [mm]	距離 [mm]
標準誤差	0.6	1.9	2.0
最大誤差	2.4	6.8	6.8

X 軸方向の誤差は, 前項で述べた主茎の傾きの検出に起因するものである. 事実, X 軸方向の最大誤差を得た苗は, 主茎の傾きの検出で最大誤差を得た苗と同じであ

った. Y 軸方向の大きな誤差は, 垂直下方に伸びた太い根が重なり合い, それが茎と誤って認識された事(図 19(a))と, 枯れた葉が垂直下方に折れ曲がって付着していた事が原因であった(図 19(b)).

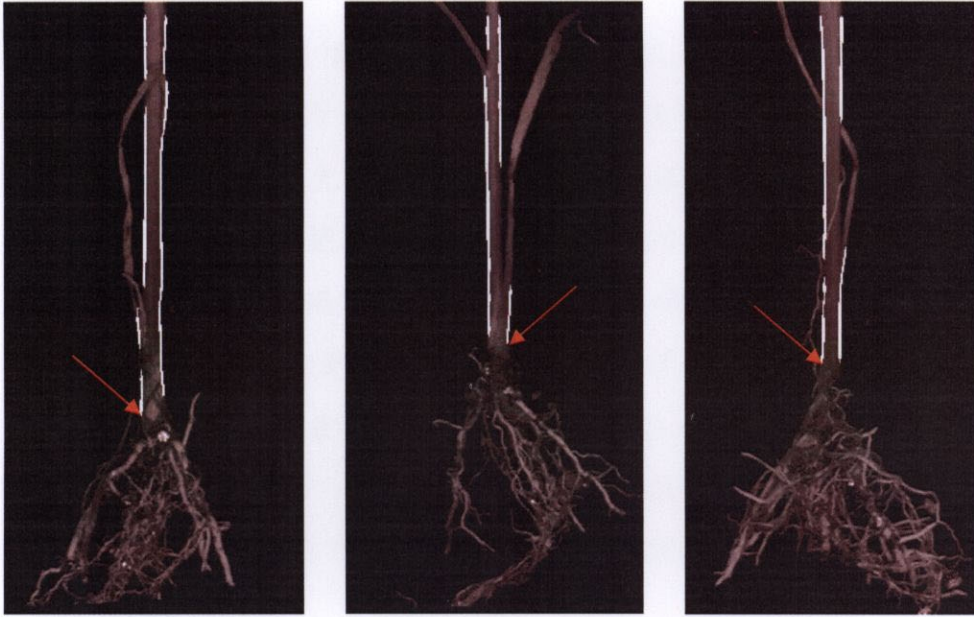


図 18 茎の最下端点の検出例

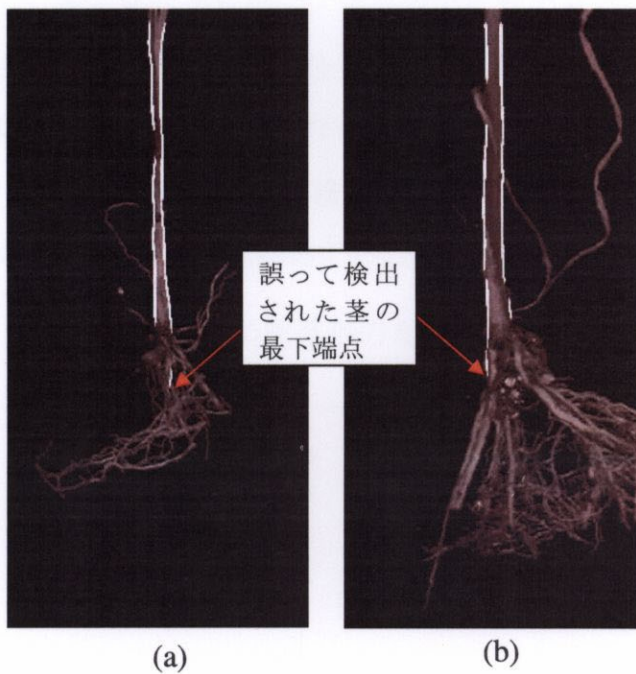


図 19 茎の最下端点の検出誤り

第3項 +1 葉の肥厚帯検出

表 3に前述のケース別の数と, +1葉の肥厚帯が苗の左右どちら側にあるかを検出した結果を示す. この結果は, アルゴリズムが, 苗の基本構造をどれだけ正しく認識できたかを示している. ケース 1 は移植不可能な苗と判断し, 処理の対象からはずしたため, 合計には加えていない. ケース 2 と 3, ケース 4 と 5 そしてケース 6 と 7 は左右対称のため, それぞれを合計した数を示した. この表を見ると, ケース 2, 3, 4, 5 においては, 高い確率で, +1 葉の肥厚帯の側がどちらにあるかを検出できていることがわかる. 失敗した原因は, 枯れて褐変した葉が茎のように Y 軸と平行になっていたため, 消去できなかったこと, +1 葉の肥厚帯の部分が細く, 肥厚帯探索領域の抽出処理の過程で, +1 葉が消去されてしまったことなどが挙げられる. ケース 6, 7 では, 検出の成功率が低くなった. これは, ケース 6, 7 の場合, 0 葉が展開しかかっており, +1 葉に移行する途中のものがあつた為である(図 20). この様な苗は人間の目で見ても, すぐに判断するのは困難である.

この実験では, 葉腋と肥厚帯の位置を主に境界線の角度変化によって推定している. 一方人間の場合, ケース6, 7のように, 境界線の形状のみで+1 葉の肥厚帯を見つける事が困難な場合は, 葉鞘が重なり合う順番に着目し, 最も外側を包む葉鞘と葉身の接合部を+1 葉の肥厚帯としている. 今後, アルゴリズムをさらに改良し, 葉鞘の重なり具合が検出できれば, 肥厚帯の位置検出精度がより向上すると考えられる. そのためには, 画像の解像度を現在よりも高めていく必要性があろう.

表 3 +1 葉の肥厚帯の左右の検出精度

	成功	失敗	小計	成功率
ケース 1	-	-	(1)	-
ケース 2, 3	11	1	12	91.6%
ケース 4, 5	26	2	28	92.9%
ケース 6, 7	8	3	11	72.7%
合計	45	6	51	88.2%



図 20 +1 葉の肥厚帯を間違った側に検出してしまった例

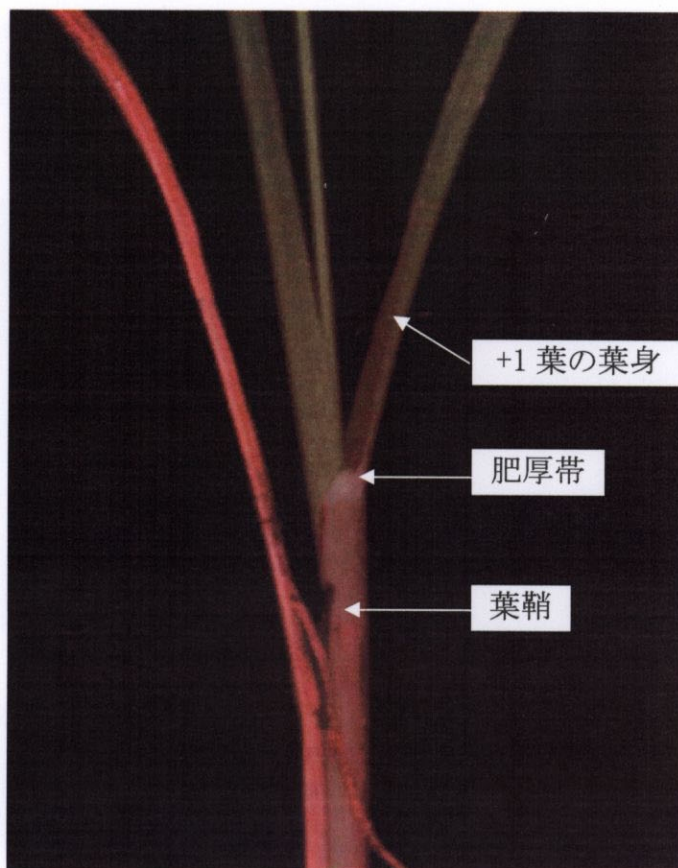


図 21 葉鞘の重なりに注目した肥厚帯の位置検出

表 4に検出された位置と目視により検出された位置の誤差を示す. 形状認識が正しく行われた苗については, その位置の誤差は標準誤差に近いものとなった. しかし, 大きな誤差のものはいずれも形状認識に失敗したものであった. また, 茶色の葉が, 苗の形状認識を阻害した例もあったため, 実際のシステムにおいてこの画像処理アルゴリズムを用いるためには, あらかじめ茶色の葉を物理的に取り去る処理が必要である.

表 4 +1 葉の位置検出精度

	X 軸方向[mm]	Y 軸方向[mm]	距離[mm]
標準誤差	0.6	2.3	2.4
最大誤差	2.7	12.5	12.5

図 22に, +1 葉の肥厚帯が正しく検出された例を示す. 図中では, 検出された葉腋と肥厚帯の位置, 茎の下端点の位置を示している. (a)と(b)は, 最も高い位置にある葉

腋と、二番目に高い位置にある葉腋の位置関係が同じである。しかし、苗に対する肥厚帯の左右の位置検出が正しく行われているため、(a)はケース 4 に、(b)はケース6に分類されている。

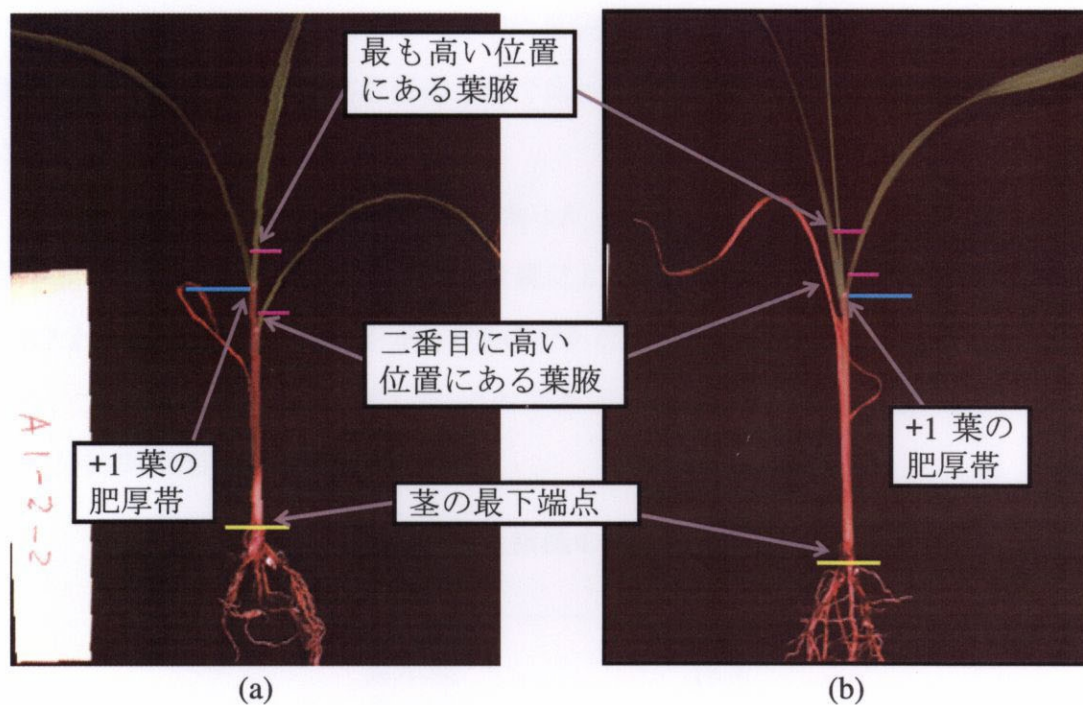


図 22 +1 葉の肥厚帯の検出成功例 (a)ケース 4, (b)ケース 6

第4項 生長指標の算出

第2項と第3項で求めた、肥厚帯の位置と、茎の下端点の位置のY座標の差を苗の生長度の指標として算出した。表5に目視で求めた生長指標の主要統計量を示す。最も大きな苗は最も小さな苗の7倍であった。目視で求めた生長指標とプログラムによって求めたその誤差を

表6に示す。標準誤差は2.7 mmであった。また、生長指標に対する誤差の割合の標準誤差は6.4%となった。図19は、目視による生長指標の測定結果と、プログラムによるその算出結果の関係を示したものである。誤差と比較して、生長指標が大きい場合、このような線形相関を示した。この結果は、大きさ別に苗を分ける目的においては十分に実用的であると判断できる。

表 5 生長指標の主要統計量

	[mm]
最小値	18.4
最大値	135.8
平均値	60.0
標準偏差	27.6

表 6 生長指標の誤差精度

	[mm]	[%]
標準誤差	2.7	6.4
最大誤差	6.8	22.6

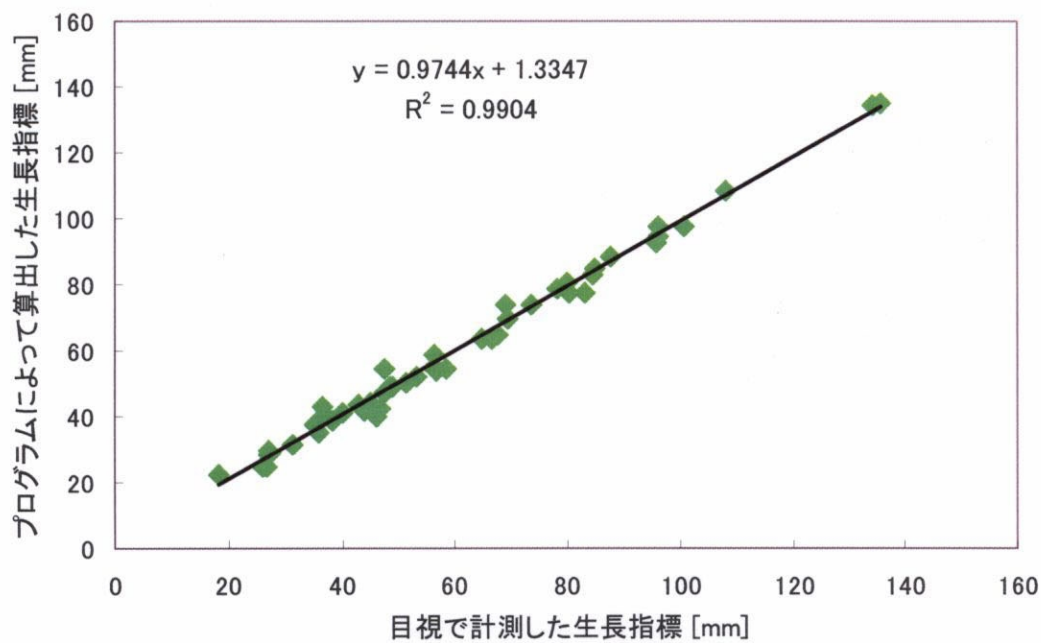


図 23 目視により計測した生長指標と、プログラムにより算出したものの比較

第5節 まとめ

ロボットにより、サトウキビ組織培養苗の選別移植作業を行うため、画像処理を用いて苗の形状認識を試みた。新しく開発した画像処理アルゴリズムによって数種類の特徴量を抽出した。その結果を以下に示す。

1. 主茎の中心軸の傾き、及び画像原点から軸までの距離を求めるため、苗の左右のエッジを抽出し、それらを通る最も確からしい直線をハフ変換によって求めた。求めた2つの直線の中心を通る直線を主茎の中心軸として採用した。その精度は、標準誤差が 1.5° 、最大誤差は 8.3° だった。最大誤差は、茎が途中で曲がっていることにより生じた。これにより、ハフ変換による直線検出法が、サトウキビの苗の様に直線的な主茎を持つ植物の傾きおよび位置を求めるのに有効であることが明らかとなった。
2. ロボットが把持する位置を決定するため、茎の主軸上における茎と根の境界:茎の下端点を検出するアルゴリズムを開発した。茎と根は、色彩情報で完全に区別することは非常に困難であるが、その境界線の傾斜や太さ、縦方向の連続性が異なっている。それらの特徴の違いに着目し、二値化画像とテンプレートとの残差の平均を計算することで、茎の領域のみを検出した。テンプレートの幅を茎の太さに合わせて動的に変化させることで、苗の大きさによらない正確な検出を行えることが明らかとなった。その結果、標準誤差は 2.0mm 、最大誤差は 6.8mm となり、本アルゴリズムは、実用上問題にならない精度で茎の下端点の検出が可能であることが示された。大きな誤差は、根の部分が残ってしまうことにより生じることが判明した。
3. 組織培養苗は、各個体によってその生長の度合いが大きく異なる。同じ時期に培養を行ったものでもその比率は最大でおよそ7倍にもなることがわかった。その生長の度合いを知るため、+1葉の肥厚帯の位置を検出した。肥厚帯の検出は苗の境界の曲率と色彩情報を用いて行った。苗をその形状から7つのケースに分類することで+1葉の肥厚帯の位置が推定できることが明らかとなった。位置検出の標準誤差は 2.4mm 、最大誤差は 12.5mm となった。最大誤差を生じた原因は、苗を

間違っただけに分類してしまったことや茶色い葉が正しい形状の認識を妨げたこと、処理の途中で+1葉が切断されてしまったことであった。

4. 茎の下端点の Y 軸方向の位置と、肥厚帯の Y 軸方向の位置の差を生長の度合いを表す指標として、算出した。標準誤差は 2.7mm, 正しい生長指標に対する誤差の割合の標準誤差は 6.4%だった。最大誤差は 6.8 mm, 誤差の割合の最大誤差は 22.6%となった。相関係数の二乗値は 0.99 となった。茎の下端点と、+1 葉の肥厚帯の位置を独立して検出することで、小さい苗から大きな苗まで、誤差に範囲に変動が無いことが明らかとなった。
5. 苗はその大きさ、色、茎の太さ、葉の角度、成長の度合いが異なり、一つとして同じものはない。本研究においては苗に合わせてパラメータを変化させるアルゴリズムを開発することで、バリエーションに富む苗の形状認識を行うことが出来た。しかしながら、本研究で用いたさまざまな定数や閾値は試行錯誤の結果であり、全ての苗に適用できるとは限らない。今後実用化していくために、より多くの未知の苗の形状認識を行っていく必要があることが示された。

第6章 終章

第1節 各章のまとめ

本研究は、組織培養技術を用いて栽培された植物の幼苗をハンドリングするために、画像による形状認識、およびロボットを用いたハンドリング技術に関する基礎的な実験を行ったものである。第1章では、本研究が、いかにして既存の研究を補完し、一貫したシステムを作り上げる基礎となるかについて述べた。第2章では、無菌播種法によって培養されたラン実生苗を、移植する際に必要となる、位置及び姿勢認識アルゴリズムと、ロボット・エンドエフェクタについて述べた。第3章では、同じく無菌播種法を用いて培養されたラン実生苗の画像処理による形状認識について述べた。第4章では、対象をサトウキビ組織培養苗とし、その株分けを自動化するロボットシステムについて述べた。第5章では、株分けされた苗の形状を認識し、その生長度を自動的に計測するアルゴリズムについて述べた。以下に第2章から第5章の結果および結論を述べる

<第2章 ラン実生無菌培養苗の形状認識および自動移植>

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。

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予想される。

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る事がわかった。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言う欠点があった。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わかった。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° 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。

＜第3章 ラン実生無菌培養苗の画像処理による形状認識＞

ランの実生苗をモノクロカメラで撮影し、その形状を用いて、等級選別を行った。

1. ランの実生苗の形状特徴量を得る方法として、境界線の座標を、図形の図心からの距離と角度で近似した。その結果、図形の画面上での位置に関係のない特徴量を抽出した。この方法は、今回対象としたランの幼苗のように放射状かつ等角度間隔に展開した形状を持つ物体の特徴の表現に優れていることが明らかになった。しかしながら、苗が大きくなるにつれ葉が長くなり、凹な部分が増える。今回採用したサンプリングの方法では、凹な部分はサンプリングできず、凹な部分の前後ではサンプル値が不連続になり、正しい形状の近似が困難であった。より長い葉を持った苗については、第 5 章で述べるような境界線の曲率を用いた方法が有効であると考えられた。
2. 図心からの距離を周期 2π の周期関数と見なし、離散フーリエ級数展開することで、図形の回転および、大きさに左右されない形状特徴量を得た。その結果苗の形状によって、図心からの距離のパターンが変化し、また同時にフーリエ係数のパターンも変化する事がわかった。そして、葉の枚数と、フーリエ係数との関係を明らかにした。
3. 大きさのパラメータを用いなくても、2 次、3 次、4 次のフーリエ係数と、1 次から6次までのフーリエ係数の平均値をパラメータとして用いてマハラノビス距離により、未発達な苗と正常な苗の選別を行えることを示した。これは、苗の葉の枚数が同じな

らば、苗全体の大きさに関わらず、フーリエ係数のパターンが類似するであろうという予想に合致していた。

4. 面積と最大サンプル値を掛け合わせた値が、苗の大きさを表す指標としては最も適していることが判明した。

<第4章 サトウキビ組織培養苗の自動株分けロボットシステム>

サトウキビ培養苗の育苗工程における株分けを自動化するため、ロボットシステムの設計、試作、評価を行った。

1. 人間の指先がサトウキビの苗の様な細長い物体を 1 本ずつ連続的に複数本同時に把持する方法を模して、エンドエフェクタ **CSPM**(連続苗把持機構)を設計した。このエンドエフェクタは、互いに向かい合わせたスポンジ付のゴムベルトをステッピングモータによって同時に駆動させることで苗の取り込み、繰り出しを行う。エンドエフェクタ **CSPM**は **SCARA** 型ロボットに取り付けられ、**CSPM**全体をロボットによって移動させながら、ゴムベルトを駆動することで、密生したサトウキビのセル苗を、連続的に重ならないように、傷つけずにしっかりと把持し、ハンドリングすることができると明らかとなった。また、苗を 1 本ずつ繰り出すことができることが判明した。セルトレイからの苗取り出しの成功率は 86.8%であった。失敗の原因は、隣接するセルの苗の葉を **CSPM** が巻き込むことであった。
2. 苗の根鉢は軟らかいが、根が絡み合っているため、切り難いという特性を持っている。しかし、本研究においては、刃が一定の方向に走っているバンドソーを用いて切断を行った。その結果バンドソーの中を直線的に通過させるだけで切断が可能であることが示された。さらに、切断中の根鉢をエアシリンダによって保持することでより確実に任意の高さで切断を行えることが明らかとなった。また、ポンプによって加圧された水流によって根部の洗浄を行った。根部に付着している培養土及び、不必要な根が完全に除去されない場合、その後の株分けの精度が落ちることが予備実験より判明した。この問題を解決するためには、水圧よりも水量を高めることが重要であることが明らかとなった。

3. CSPMによって把持されている複数の苗の間隔をさらにひろげ、株分けを確実にするため、「根鉢の処理」と「株分け」を並行して行うため、ロボット1とロボット2の間に中間コンベアを設けた。中間コンベアは、CSPMと同様に、ステッピングモータによって駆動される1対のスポンジベルトを向かい合わせにした構造となっている。また、苗を1本だけ吸着、把持する構造のエンドエフェクタSSP(個別苗分離機構)を設計、試作した。このエンドエフェクタは垂直多間接型ロボットに取り付けられ、中間コンベアから順に繰り出される苗を1本だけ吸着、検知、把持し、中間コンベアを同期して制御することで個別分離を行う。その結果、画像処理等の光学的なセンサを用いることなく、複数の苗の塊から1本の苗を分離することができる性能を有していることが明らかとなった。しかしながら、1本の株分けに要する時間は最低30秒と、実用化に向けて課題が多いことが示された。
4. 評価試験の結果、77.1%の苗が適切に1本に分けられた。1本に分けられなかった原因としては、苗同士の固着、苗の大きさが不揃いなこと、中間コンベアの把持力不足などが挙げられた。また、1セルあたりの苗の本数が、株分けの成功率に影響を与えることが明らかとなった。これにより、もともとの1セルあたりの苗の本数を減らすことで、株分けの成功率が高まることがわかった。
5. 本システムで株分けした苗の一ヵ月後の活着率は66.7%と、人手によるものの72.1%と比較して低くなった。この結果より、ロボットによる株分けが、苗に対してダメージを与えていることが推測できた。今後はより、苗にダメージの少ない株分け方法を検討していく必要がある。
6. 本研究で開発した新しい株分けの方法は、室内順化中のサトウキビ培養苗の株分けを自動化する有力な方法であることが明らかとなった。このシステムを実用化するためには、エンドエフェクタの改善や、株分けの方法の改良、オペレーションタイムの短縮、信頼性の向上など様々な点について今後多くの改良を加えて行く必要性が示された。

<第5章 サトウキビ組織培養苗の画像処理による形状認識>

ロボットにより、サトウキビ組織培養苗の選別移植作業を行うため、画像処理を用いて苗の形状認識を試みた。新しく開発した画像処理アルゴリズムによって数種類の特徴量を抽出した。

1. 主茎の中心軸の傾き、及び画像原点から軸までの距離を求めるため、苗の左右のエッジを抽出し、それらを通る最も確からしい直線をハフ変換によって求めた。求めた2つの直線の中心を通る直線を主茎の中心軸として採用した。その精度は、標準誤差が 1.5° 、最大誤差は 8.3° だった。最大誤差は、茎が途中で曲がっていることにより生じた。これにより、ハフ変換による直線検出法が、サトウキビの苗の様に直線的な主茎を持つ植物の傾きおよび位置を求めるのに有効であることが明らかとなった。
2. ロボットが把持する位置を決定するため、茎の主軸上における茎と根の境界:茎の下端点を検出するアルゴリズムを開発した。茎と根は、色彩情報で完全に区別することは非常に困難であるが、その境界線の傾斜や太さ、縦方向の連続性が異なっている。それらの特徴の違いに着目し、二値化画像とテンプレートとの残差の平均を計算することで、茎の領域のみを検出した。テンプレートの幅を茎の太さに合わせて動的に変化させることで、苗の大きさによらない正確な検出を行えることが明らかとなった。その結果、標準誤差は2.0mm、最大誤差は6.8mmとなり、本アルゴリズムは、実用上問題にならない精度で茎の下端点の検出が可能であることが示された。大きな誤差は、根の部分が残ってしまうことにより生じることが判明した。
3. 組織培養苗は、各個体によってその生長の度合いが大きく異なる。同じ時期に培養を行ったものでもその比率は最大でおよそ7倍にもなることがわかった。その生長の度合いを知るため、+1葉の肥厚帯の位置を検出した。肥厚帯の検出は苗の境界の曲率と色彩情報を用いて行った。苗をその形状から7つのケースに分類することで+1葉の肥厚帯の位置が推定できることが明らかとなった。位置検出の標準誤差は2.4mm、最大誤差は12.5mmとなった。最大誤差を生じた原因は、苗を間違ったケースに分類してしまったことや茶色い葉が正しい形状の認識を妨げたこと、処理の途中で+1葉が切断されてしまったことであった。

4. 茎の下端点の Y 軸方向の位置と、肥厚帯の Y 軸方向の位置の差を生長の度合いを表す指標として、算出した。標準誤差は 2.7mm, 正しい生長指標に対する誤差の割合の標準誤差は 6.4%だった。最大誤差は 6.8 mm, 誤差の割合の最大誤差は 22.6%となった。相関係数の二乗値は 0.99 となった。茎の下端点と、+1 葉の肥厚帯の位置を独立して検出することで、小さい苗から大きな苗まで、誤差に範囲に変動が無いことが明らかとなった。
5. 苗はその大きさ、色、茎の太さ、葉の角度、成長の度合いが異なり、一つとして同じものはない。本研究においては苗に合わせてパラメータを変化させるアルゴリズムを開発することで、バリエーションに富む苗の形状認識を行うことが出来た。しかしながら、本研究で用いたさまざまな定数や閾値は試行錯誤の結果であり、全ての苗に適用できるとは限らない。今後実用化していくために、より多くの未知の苗の形状認識を行っていく必要があることが示された。

第2節 今後の課題

第1項 培養苗生産の自動化について

現在まで約 15 年間にわたって、培養苗生産、特に本研究で対象とするような、移植や株分けなどのハンドリングに関する研究が多数行われてきた。しかしながら、実用化され、一般的に用いられているものは皆無といっても良い。これは、技術的な問題だけではなく、消費者のニーズに合わせて品種を次々に変化させていかなければならないという市場の体質によるものとも考えられる。この点から言えば、サトウキビのような工芸作物の組織培養を自動化するシステムはより実現性が高いことが推測されよう。しかしながら、技術的な問題についても解決しなければならない点が多い。その最も大きな点は、やはり不定形な植物体の形状認識と、ハンドリングについてである。以下にそれぞれの今後の課題について述べる。

1. 画像処理について

本研究では、幼植物体の形状認識に、2次元の画像処理を用い、良好な結果を得た。これは、対象とした植物が平面的な形状をしていたためである。しかしながら、一般的に植物の葉や根、茎などは3次元的な分布をしている。人間は植物の複雑な3次元形状を、過去の知識と経験に基づいて認識、理解している。本研究の結果をより汎用的に活用するためには、今後、植物表面の3次元座標を取得し、そのデータから各部位の立体形状を抽出するアルゴリズムを開発する必要がある。あらかじめ対象となる植物の種類がわかっているならば、2次元の画像処理と同様に、形状をモデル化することで、生長の度合い、葉の角度、葉面積など、目に見える部分については全ての情報を取得する事が可能となる。また、葉の一部が隠れている場合でもその他の葉の形状から、補完することも可能だと考えられる。このような3次元的なデータ処理を行う事が今後の課題である。

2. ロボットハンドリングについて

本研究の第2章では、苗を把持するのにピンセットを用い、力制御によりソフトハンドリングを試みた。ピンセットを用いたのは、移植作業を無菌状態で行い、エンドエフェクタの先端を加熱処理することを想定しているためである。人間であれば、把持してから移植し、苗を離す瞬間まで、苗の把持状態をチェックしているが、第2章で開発したシステムには、そのような機能は存在しない。今後、ピンセットを用いてより高精度なハンドリングを行うためには、苗の姿勢を常にチェックする視覚システムの開発が必要となる。

また、第4章では、第2章とは対照的に、把持するエンドエフェクタ自体をスポンジという柔らかい素材で作製し、苗を傷つけないように把持した。これは、株分け作業は有菌状態で行われるので、加熱殺菌する必要が無かったためである。セルトレイから複数の苗を連続的に把持し、取り出すエンドエフェクタは、3次元的に伸長している苗を強制的に平面上に揃えるため、苗の本数や曲げ強さによって、重なりを生じてしまう。重ならない機構を開発するのはもちろんだが、ピンセットで把持するのと同様に、把持された苗の姿勢をチェックするセンサーが必要であろう。複数の苗の立体的な姿勢を認識するためには、画像処理の課題で述べたような、3次元視覚システム、または、人間

の指の触覚細胞のように, 2 次元的に応力の分布をモニターできるセンサの開発が必要である.

謝辞

まず、本研究をまとめるにあたってご指導いただいた、木谷収先生、岡本嗣男先生、鳥居徹先生、芋生憲司先生に心から感謝いたします。また、ご審査いただき、貴重なご意見を頂いた、蔵田憲次先生、大下誠一先生に感謝いたします。岡本先生には公私に渡り大変お世話になりました。一旦は民間企業に就職した私を、再び大学に助手として呼び寄せてくださり、博士論文を書くチャンスを下さった事への御恩は一生忘れることはできません。なかなか論文をまとめられず、心配をおかけして本当に申し訳ありませんでした。鳥居先生には、たくさんの他大学の研究者をご紹介いただき、私の視野を広げる事ができたことを感謝しております。芋生先生には、学生実験やその他様々の私がやらなければいけないような雑務を何も言わずにお引き受けして下さったことに感謝します。これからは、何でもお申し付け下さい。

次に、本研究の後半部であるサトウキビの株分け、形状認識に関して、サンプルの供与、培養施設の見学、製糖工場の見学、資料の提供、徳之島の観光案内まで大変お世話になった、南西糖業株式会社の、澤田謙三様、田場佑英様に感謝いたします。サトウキビという東京には全く見たこともない植物について知識を得る事ができたのは、徳之島や、沖縄の皆様のおかげです。

続いて、本研究を手伝ってくれた、大学生、大学院生の方々に心から感謝します。特に第4章の株分けロボットでは、合田智宏君に制御のプログラムを手伝ってもらいました。また、第5章の形状認識では、林竜大君に画像処理のプログラムを手伝ってもらいました。一緒にやることで一人では思いつかなかったようなアイデアが出たことが何度もありました。

最後に、いつも私を支えてくれた家族に感謝します。

平成15年4月17日 海津 裕

参考文献

英文

- Aitken-Christie, J. 1991 Automation, In Micropropagation Technology and Application. ed. P. C. Deberg and R. H. Zimmerman, 363-388. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Alper, Y., J. W. Adelberg, R. E. Young, B. B. Rhodes. 1994. Unitized, nonselective cutting of in vitro watermelon, Transactions of the ASAE 37(4): 1331-1336.
- Alper, Y., R. E. Young, J. W. Adelberg, B. B. Rhodes. 1994. Mass handling of watermelon microcuttings. Transactions of the ASAE 37(4): 1337-1343.
- Brown F. R. 1992. Robotics and image analysis applied to micropropagation, In Transplant Production Systems. ed. K. Kurata and T. Kozai, 297-311. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Chu I. 1994. Economics analysis of automated micropropagation. In Automation and environmental control in plant tissue culture. ed. Aitken-Christie J., Kozai T. and Smith M.A.L. 19-27. Kluwer academic publishers, Netherlands.
- Davis, P. F. 1991. Orientation-independent recognition of chrysanthemum nodes by an artificial neural network. Computer and Electronics in Agriculture 5:305-314.
- Debergh, P. C. and R.H. Zimmerman. 1991. Micropropagation, In Micropropagation Technology and Application. ed. P. C. Deberg and R. H. Zimmerman, 1-13. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Dublin, P., F. Enjalric, L. Lardet, M. P. Carron, N. Trolinder, C. Pannetier. 1991 Commercial micropropagation in North America, In Micropropagation Technology and Application. ed. P. C. Deberg and R. H. Zimmerman, 173-179. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

- Dubois, S.R. and F.H. Glanz. 1986. An autoregressive model approach to two-dimensional shape classification. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* PAMI-8(1):55-66.
- Duda, R. O. and P. E. Hart. 1972. Use of the Hough transform to detect lines and curves in pictures. *Communications of the ACM* 15(1): 11-15.
- FAOSTAT Agriculture Data. 2002. Sugarcane production in 2001. <http://apps.fao.org>. Accessed 11 July 2002.
- Fujita, N., A. Kinase. 1991. The Use of Robotics in Automated Plant Propagation. *Cell Culture and Somatic Cell Genetics of Plants* 8: 231-244.
- Harrell, R.C., C.F. Hood, E. Molto, R. Munilla, M. Bieniek and D.J. Cantliffe. 1992. Automatic identification and separation of somatic embryos in vitro. *Acta Horticulturae* 319:595-600.
- Hamalainen, J.J., U. Kurten, V. Kauppinen and J. Heilala. 1992. Automated classification of somatic plant embryos. *Acta Horticulturae* 319:601-606.
- Holdgate, D. P., E. A. Zandvoort. 1992. Automated micropropagation and the application on a laser beam for cutting, In *Transplant Production Systems*. ed. K. Kurata and T. Kozai, 297-311. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Honami, N., T. Taira, H. Murase, Y. Nishiura and Y. Yasukuri. 1992. Robotization in the production of grafted seedlings. *Acta Horticulturae* 319:579-584.
- Ibaraki, Y., K. Kurata. 2001. Application of image analysis to plant cell suspension cultures. *Computers and Electronics in Agriculture* 30(1-3): 193-203
- Kacira, M., P. P. Ling. 2001. Design and development of an automated and non-contact sensing system for continuous monitoring of plant health and growth. *Trans. ASAE* 44(4): 989-996.
- Kaizu, Y., T. Okamoto and K. Imou. 2001. System for Automatic Separation of Ex Vitro Micropropagated Sugarcane. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development* Vol. III, December: 1-17.
- Kondo, N., T. Fujiwara, K. C. Ting, T. Okamoto and M. Monta. 1998. Robots in bioproduction within controlled environments. *Robotics for bioproduction systems*. 173-182. St Joseph, Michigan: The society for engineering in agricultural, food, and biological systems.

- Kozai T., Ting K.C. and Aitken-Christie J. 1991. Consideration for automation of micropropagation system. In *Automated agriculture for the 21st century*. ed. American Society of Agricultural Engineers pp 503-517. St. Joseph, Mich.
- Kurata, K. and H. Shono. 1992. An application of fourier descriptor for selecting somatic embryos. *Acta Horticulturae* 319:591-594.
- Kurata K. 1994. Image analysis for embryogenesis. In *Automation and environmental control in plant tissue culture*. ed. Aitken-Christie J., Kozai T. and Smith M.A.L. 165-186. Kluwer academic publishers, Netherlands.
- Kurtz S.L., Hartman R.D. and Chu I.Y.E. 1991. Current method of commercial micropropagation. *Cell Culture and Somatic Cell Genetics of Plants* 8: 7-34.
- Kutz, L.J., G.E. Miles, P.A. Hammer and G.W. Krutz. 1987. Robotic transplanting of bedding plants. *Transactions of the ASAE* 30(3):586-590.
- Kutz, L.J., J.B. Craven, Jr. 1994. Evaluation of photoelectric sensors for robotic transplanting. *Applied engineering in agriculture* 10(1):295-301.
- Ling, P. P. and V. N. Ruzhitsky. 1992. Transplant uniformity inspection using machine vision. *Acta Horticulturae* 319: 607-612.
- Ling, P. P., Z. Cheng, D. J. Musacchio. 1996. Quantification of somatic coffee embryo growth using machine vision. *Transactions of the ASAE* 38(6): 1911-1917
- Litz, R.E., V. S. Jaiswal. 1991 Micropropagation of tropical and subtropical fruits, In *Micropropagation Technology and Application*. ed. P. C. Deberg and R. H. Zimmerman, 247-263. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- McFarlane, N. J. B. 1991. A computer-vision algorithm for automatic guidance of microplant harvesting. *Computers and Electronics in Agriculture* 6: 95-106.
- Miyama, D., M. Takai, S. Hata and K. Sakai. 1992. Determination of a partially occluded seedling leaf area in the digital image sensing. *Acta Horticulturae* 319:677-682.
- Morimoto, T., S. Takahashi, K. Matsubara and Y. Matsuoka. 1992. Development of an automatic propagation system of seedling. *Acta Horticulturae* 319:547-550.
- Murashige, T. 1974. Plant propagation through tissue cultures. *Annu Rev Plant Physiol.* 25:135-166.

- Redenbaugh, K. 1991. Applications of micropropagation for agronomic crops. In *Micropropagation Technology and Application*, ed. P. C. Deberg and R. H. Zimmerman, 285-310. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Rigney, M.P. and G.A. Kranzler. 1988. Machine vision for grading southern pine seedlings. *Transactions of the ASAE* 31(2):642-646.
- Rigney, M. P., G. A. Kranzler. 1989. Performance of machine vision based tree seedling grader. ASAE/CSAE paper No. 89-3007 ASAE, St. Joseph, M140985-9659, USA.
- Sase, S., M. Nara, T. Okuya and K. Sueyoshi. 1992. Determining seedling characteristics using computer vision and its application to an expert system for grading seedlings. *Acta Horticulturae* 319:683-688.
- Schaufler, D. H., P. N. Walker. 1994. Micropropagation of Sugarcane Between Parallel Plates. *Transactions of the ASAE* 37(4): 1225-1230.
- Schaufler, D. H., P. N. Walker. 1995. Micropropagated sugarcane shoot identification using machine vision. *Transactions of the ASAE* 38(6): 1919-1225.
- Seckinger, G. R. 1991 Micropropagation of vegetable crop species, In *Micropropagation Technology and Application*. ed. P. C. Deberg and R. H. Zimmerman, 265-284. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Simonton, W. and J. Pease. 1990a. Automatic plant feature identification on geranium cuttings using machine vision. *Transactions of the ASAE* 33(6): 2067-2073.
- Simonton, W. 1990b. Automatic geranium stock processing in a robotic workcell. *Transactions of the ASAE* 33(6):2074-2080.
- Suastawa, I.N., T. Okamoto, T. Torii and O. Kitani. 1999. Dual flat belt threshing mechanism for rice harvester (Part 2) -Rice threshing capability of dual flat belt threshing-. *Journal of JSAM* 61(1):187-194.
- Takayama, S., B. Swedlund, Y. Miwa. 1991. Automated propagation of microbulbs of lilies. *Cell culture and somatic cell genetics of plants* vol. 8:111-131
- Tanaka, M., T. Hirano, M. Goi, T. Higashiura, H. Sasahara and K. Murasaki. 1992. Practical application of a novel disposable film culture vessel in micropropagation. *Acta Horticulturae* 300: 77-84

- Brown F. R. 1992. Robotics and image analysis applied to micropropagation, In Transplant Production Systems. ed. K. Kurata and T. Kozai, 297-311. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Tarbell, K. A., J. F. Reid. 1991. A computer vision system for characterizing corn growth and development. Trans. ASAE 34(5): 2245-2255.
- The MathWorks, Inc. 2000. Using MATLAB Version 6. The MathWorks, Inc.
- Thorpe, T. A., I. S. Harry, P. P. Kumar. 1991. Applications of micropropagation to forestry. In Micropropagation Technology and Application, ed. P. C. Deberg and R. H. Zimmerman, 311-336. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Ting, K. C., G. A. Giacomelli, S. J. Shen. 1990a. Robot workcell for transplanting of seedlings Part I - Layout and materials flow. Transactions of the ASAE 33(3):1005-1010.
- Ting, K. C., G. A. Giacomelli, S. J. Shen, W. P. Kabala. 1990b. Robot workcell for transplanting of seedlings Part II - End-effector development. Transactions of the ASAE 33(3): 1013-1017.
- Vasil, Indra. K.. 1991 Rationale for scale-up and automation of plant propagation. Cell culture and somatic cell genetics of plants vol. 8: 1-6, 1991
- Wang, Z., P. H. Heinemann, H. J. Sommer III, P. N. Walker, C. T. Morrow, C. Heuser. 1998. Identification and separation of micropropagated sugarcane shoots based on the hough transform. Transactions of the ASAE 41(5): 1535-1541.
- Wang, Z., P. H. Heinemann, P. N. Walker, C. Heuser. 1999. Automated micropropagated sugarcane shoot separation by machine vision. Transactions of the ASAE 42(1): 247-254.
- Zandvoort, E. A., D. P. Holdgate. 1991. Mechanisation in tissue culture systems. Acta horticulturae 289:203-212.
- Zimmerman, R.H. 1991 Micropropagation of temperate zone fruits and nut crops, In Micropropagation Technology and Application. ed. P. C. Deberg and R. H. Zimmerman, 173-179. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Zimmerman, R.H. and J. Barnhill Jones. 1991 Commercial micropropagation in North America, In Micropropagation Technology and Application. ed. P. C. Deberg and

R. H. Zimmerman, 173-179. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

和文

安居院猛, 中嶋正之, 木見尻秀子: C 言語による画像処理, 昭晃堂, 144-147, 1994

安居院猛, 長尾智晴: 画像の処理と認識, 昭晃堂, 99-103, 1996a

安居院猛, 長尾智晴: 画像の処理と認識, 昭晃堂, 72-76, 1996b

有馬哲, 石村貞夫: 多変量解析のはなし, 東京図書, 127-166, 1992

石井健一郎, 上田修功, 前田英作, 村瀬洋 : わかりやすいパターン認識, オーム社, 33-48, 1998

市橋正一: 洋ラン栽培の“産業革命”無菌播種法と微細繁殖法, 朝日百科 植物の世界第9巻, 朝日新聞社, 190-192, 1997

井上誠喜, 八木伸行, 林正樹, 中須英輔, 三谷公二, 奥井誠人: C 言語で学ぶ実践画像処理, オーム社, 84-97, 1999

入嵩西正治, 田本信良, 通事安徽, 豊見山孫令: 甘蔗側枝苗の開発(第1報)側枝苗の増殖と実用化, 製糖技術研究会誌, 46:17-22, 1998

岩崎昭良: 植物組織培養ロボットの実用化, 苗生産システム国際シンポジウム実行委員会主催第1回講演会講演要旨, 61-66, 1991

上野正美, 川満芳信, 孫麗亜, 與儀貴子, 清水勇人, 北野滋, 長正連, 泉裕己: 地球温暖化抑制バイオ・エコシステムに関する基礎研究 第1報 システムの基本概念とバガス余剰化の検討, 第60回農業機械学会年次大会講演要旨: 437-438, 2001

大澤勝次: 図集・植物バイオテックの基礎知識, 農山漁村文化協会, 11-13, 1994

岡本嗣男, 木谷収: バイオテクノロジー作業の自動化に関する研究(第1報)ー継代培養における植物組織移植ロボットについてー, 農業機械学会誌, 51(5):37-45, 1989

岡本嗣男, 木谷収: バイオテクノロジー作業の自動化に関する研究(第2報)ーカルス植え継ぎロボットについてー, 農業機械学会誌, 52(5):79-85, 1990

- 岡本嗣男, 木谷収, 鳥居徹: バイオテクノロジー作業の自動化に関する研究(第3報)
ー形状記憶合金アクチュエータを用いたソフトハンドリングハンドのファジイ制御ー, 農業機械学会誌, 53(5):85-91, 1991
- 岡本嗣男, 白井良明, 藤原健司, 近藤直: 生物に優しい知能ロボット工学, 実教出版株式会社, 176-195, 1992
- 岡本嗣男, 木谷収, 鳥居徹: ラン科植物プロトコーム移植ロボットに関する研究, 農業機械学会誌, 55(5), 103-110, 1993
- 岡本嗣男, 趙春山, 實山安英, 鳥居徹, 芋生憲司: サトウキビ培養苗増殖ロボットに関する研究, 農業機械学会誌, 60(6):71-77, 1998
- 岡本嗣男 : ロボットによるサトウキビ培養苗の自動成苗化システムの試作研究, (課題番号:11556044)平成 11 年度～平成 13 年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2))研究成果報告書, 2002
- 沖縄県農業試験所 経営研究室: 側枝苗利用によるサトウキビ植付け技術の経営評価, <http://www.pref.okinawa.jp/arc/keiei/gaiyo.info/sokusi.htm>, 2000
- 海津裕, 岡本嗣男, 木谷収, 鳥居徹: ラン幼苗のマシンビジョンによる等級選別について, 農業機械学会誌, 58(2):49-56, 1996
- 画像処理標準テキストブック編集委員会 : イメージプロセッシング <画像処理標準テキストブック>, 財団法人画像情報教育振興協会, 26-31, 1997a
- 画像処理標準テキストブック編集委員会 : イメージプロセッシング <画像処理標準テキストブック>, 財団法人画像情報教育振興協会, 253-254, 1997b
- 鹿沼隆宏, 岡本嗣男, 鳥居徹 : 画像処理による作物列検出および自己位置同定(第1報), 農業機械学会誌, 59(2)57-63, 1997
- 株式会社共和電業: What's strain gages ひずみゲージ入門, 2-15, 2001
- 株式会社フोटロン: FCM2-RGB C ライブラリ ユーザーズ・リファレンスマニュアル, 1995
- 川村恒夫 : 色彩の表示法と計測(計測手法アラカルト(10)色彩の計測とその応用), 農業機械学会誌, 59(6)127-141, 1997

木谷収:人工知能による生物生産機械・装置の制御システムの研究, 平成元年・2年・3年・4年度 文部省科学研究費補助金(一般研究(A))研究成果報告書, 1993

木谷収 :生物生産機械学, コロナ社, , 99-100, 1993

木下統, 永田雅輝:画像処理によるイチゴ形状の判別(第1報)ー果実方向の測定手法一, 農業機械学会誌, 61(5), 41-48, 1999a

木下統, 永田雅輝:画像処理によるイチゴ形状の判別(第2報)ー特徴量の提案一, 農業機械学会誌, 61(6), 43-49, 1999b

木下統, 永田雅輝:画像処理によるイチゴ形状の判別(第3報)ー特徴量の選択一, 農業機械学会誌, 61(6), 51-56, 1999c

草野信之, 伊能憲英, 木谷収, 岡本嗣男, 鳥居徹 :自律走行のための作物列の画像処理に関する研究ー1ー色解析による2値化, 農業機械学会誌, 57(4)37-44, 1995

楠田喜宏, 八木喬 :図解 産業用ロボット導入実践ガイド, 日刊工業新聞, 1999

楠本守:メリクロン苗とその生産技術ーシンビジウムを例にー, 農業技術体系 花卉編 第5巻, 353-360, 1997

楠本守:デンドロビウム, 農業技術体系 花卉編 第5巻, 369-374, 1997

古在豊樹:植物組織培養の新段階 培養器環境から地球環境へ, 農文協, 1998

古在豊樹編著:閉鎖型苗生産システムの開発と利用 ー食料・環境・エネルギー問題の解決を目指してー, 養賢堂, 1999

小林研, 鈴木正肚 :ウリ科野菜用接ぎ木装置の開発(第3報)実験用接ぎ木装置による連続接ぎ木作業, 農業機械学会誌, 58(2), 83-93, 1996a

小林研, 小野田明彦, 鈴木正肚 :ウリ科野菜用接ぎ木装置の開発 (第4報) 実証実験と装置の実用化, 農業機械学会誌, 58(3), 59-68, 1996b

小林美盛:ウイルス・フリー等のクローン苗及び加工種子の普及に関する実態調査の結果について, 種苗界, 6月号:5-13, 1992

駒嶺穆, 小島邦彦, 三川潮, 庄野邦彦, 原田宏, 日向康吉, 藤村達人, 山口彦之 :植物バイオテクノロジー事典, 株式会社朝倉書店, 284. 1990

- 近藤直, 小川雄一, 門田充司:キクの挿し木作業の自動化に関する基礎的研究(第 1 報) —色画像およびチェインコードを用いた挿し穂認識アルゴリズムの開発—, 農業機械学会誌, 60(2), 67-74, 1998
- 近藤直, 八木洋介, 門田充司 :キクの挿し木ロボットのための挿し穂分離・供給システムの開発, 農業機械学会誌, 61(5), 109-116, 1999
- 坂上修 : 苗生産ロボットシステムの開発—1—ロボット本体と横移動装置, 農業機械学会誌, 56(5)81-88, 1994a
- 坂上修 : 苗生産ロボットシステムの開発—2—播種装置及び土詰め・覆土装置, 農業機械学会誌, 56(6)87-93, 1994b
- 坂上修 : 苗生産ロボットシステムの開発—3—高品質苗生産関連装置, 農業機械学会誌, 57(1)59-66, 1995a
- 坂上修 : 苗生産ロボットシステムの開発—4—肥培管理装置, 農業機械学会誌, 57(2)77-83, 1995b
- 坂上修 : 自動苗生産システムの開発——ハンドリング装置及びシステムの評価, 農業機械学会誌, 57(3)111-119, 1995c
- 佐藤義治 : 組み立てロボットの選び方・使い方, 日刊工業新聞社, 1998
- 清水浩, 大下誠一 : 植物3次元形状の非接触計測システムの開発, 農業機械学会誌, 55(2), 93-100, 1993
- 清水浩, 山崎稔 : 植物伸長生長制御における昼夜間温度差と日長の相互作用, 農業機械学会誌, 57(2), 43-50, 1995
- スアスタワ イ ネンガ, 岡本嗣男, 鳥居徹 : フラットベルトによる脱穀機構に関する研究(第 1 報) — 籾とフラットベルトの摩擦特性について —, 農業機械学会誌, 60(6), 115-122, 1998
- 鈴木正肚, 小林研, 猪之奥康治, 三浦恭志郎, 平田孝三:ウリ科野菜用接ぎ木装置の開発(第 1 報) —要素技術の検討—, 農業機械学会誌 57(2), 67-76, 1995a
- 鈴木正肚, 小林研, 猪之奥康治, 三浦恭志郎, 平田孝三 :ウリ科野菜用接ぎ木装置の開発—2—機械接ぎ木の可能性の検討, 農業機械学会誌, 57(3), 103-110, 1995b

- 鈴森康一, 堀光平, 宮川豊美, 古賀章浩 : マイクロロボットのためのアクチュエータ技術, コロナ社, 180-188, 1998
- 高木幹雄, 下田陽久: 画像解析ハンドブック, (財)東京大学出版会, 611-612, 1991
- 高橋安人: システムと制御, 岩波書店, 289-292, 1968
- 竹内正幸・中島哲夫・古谷 力: 植物組織培養の技術, 朝倉書店, 137-142, 1990
- 田場佑英, 實山安英, 池田浩一, 亀沢功一, 澤田謙三: 甘蔗メリクローン培養苗の生産, 精糖技術研究会誌, 46:29-34, 1998
- Demuth, H., M. Beale: ニューラルネットワークツールボックスユーザズガイド, サイバネットシステム株式会社, 225-231, 1994
- Duda, Richard O., Peter E. Hart, David G. Stock: パターン識別, 株式会社新技術コミュニケーションズ, 2001
- 照屋寛由, アルナ・ウィゼスリヤ: サトウキビの組織培養による種苗の増殖 2. 多芽体の効率的な発根法, Vol. 43 Extra issue 2:13-14, 1999a
- 照屋寛由, 徳元正和: サトウキビの組織培養による種苗の増殖 3. 組織培養苗の特性と生産力, Vol. 43 Extra issue 2:15-16, 1999b
- テレビジョン学会 : テレビジョン画像情報工学ハンドブック, オーム社, , 598-599, 1990
- トキ・コーポレーション株式会社: バイオメタルファイバー説明書
- 鳥居徹, 木谷収, 岡本嗣男, 草野信之, 伊能憲英 : 自律走行のための作物列の画像処理に関する研究—2—境界線の検出およびカメラ位置の同定, 農業機械学会誌, 57(6)53-59, 1995
- 鳥居徹, 岡本嗣男, 高見沢暁, 鹿沼隆宏 : 画像処理による作物列検出および自己位置同定(第2報)もう1つの境界線検出法と自己位置同定, 農業機械学会誌, 59(5)37-44, 1997
- 永田雅輝, 木下統, 浅野克典, 曹其新, 日吉健二: イチゴ自動選別システムに関する研究(第1報)—画像処理による果形の幾何学的特長の抽出—, 農業機械学会誌, 58(5), 57-63, 1996a

- 永田雅輝, 木下統, 浅野克典, 曹其新, 日吉健二:イチゴ自動選別システムに関する研究(第2報)ー画像処理による選別のための果形判別法ー, 農業機械学会誌, 58(6), 61-67, 1996b
- 永田雅輝, 木下統, 浅野克典, 曹其新, 日吉健二:イチゴ自動選別システムに関する研究(第2報)ー画像処理による自動選別システムの開発ー, 農業機械学会誌, 59(1), 43-48, 1997
- 中野馨, 飯沼一元, ニューロンネットグループ, 桐谷滋 :入門と学習 ニューロコンピュータ, 技術評論社, 12-27, 1989
- 西卓郎, 近藤直, 毛利建太郎:キュウリの画像認識に関する研究(第1報)ー輪郭画像による幼苗の子葉と本葉の認識ー, 農業機械学会誌, 59(5), 45-53, 1997a
- 西卓郎, 近藤直, 毛利建太郎 :キュウリの画像認識に関する研究(第2報)本葉の葉位と個体の認識, 農業機械学会誌, 59(6), 65-73, 1997b
- 西浦芳史, 穂波信雄, 平知明:接ぎ木苗生産の機械化に関する研究(第1報)ープラグ・イン法の提案ー, 農業機械学会誌 60(6):35-43, 1998
- 西浦芳史, 穂波信雄, 平知明 :接ぎ木苗生産の機械化に関する研究(第2報), 農業機械学会誌, 61(4), 115-124, 1999a
- 西浦芳史, 穂波信雄, 平知明 :接ぎ木苗生産の機械化に関する研究(第3報)活着・順化装置の試作とプラグ・イン接ぎ木苗の特性, 農業機械学会誌, 61(6), 91-101, 1999b
- 西浦芳史, 穂波信雄, 平知明 :接ぎ木苗生産の機械化に関する研究(第4報)接ぎ木操作の自動機械化, 農業機械学会誌, 61(6), 103-112, 1999c
- 農畜産業振興事業団企画情報部:ブラジル砂糖産業における最近の動向, <http://sugar.lin.go.jp/world/imc/0102brz.htm>, 2001
- 農林水産省統計情報部:農林水産統計速報 13ー96 (流通ー30), 1-14, 2001
- 橋本直樹:レクチャーバイオテクノロジー, 培風館, 112-135, 2000
- 長谷川純一他:画像処理の基本技法<技法入門編>, 技術評論社, 44-49, 1990a
- 長谷川純一他:画像処理の基本技法<技法入門編>, 技術評論社, 61-62, 1990b

- 林竜大：東京大学農学部卒業論文，画像処理によるサトウキビ苗の形状測定に関する研究，2001
- 半田洋一：所得 1,000 万円をめざした経営戦略 埼玉県児玉地域 多品目鉢もの産地，農業技術体系 花卉編 第 4 巻，341-355，1996
- 日立製作所：画像処理コマンドドライバ IP5000/CD プログラミングマニュアル，1998
- 平林雅英：C 言語による最新プログラム辞典第 4 巻，技術評論社，，276-315，1995
- 広瀬茂男，生田幸士，塚本雅弘：形状記憶合金アクチュエータの開発（材料特性の計測と能動内視鏡の開発），日本ロボット学会誌，5(2)，87-101，1987
- 福田敏男，郭書祥，新井史人，小菅一弘，根来真：能動カテーテルシステムに関する研究（第 1 報，SMA を使った多ユニット多自由度能動カテーテルの構造，実験結果と動作特性の評価），日本機械学会論文集（C 編），60(573)，1727-1734，1994
- 藤原英幸：ファジィ応用苗選別知能ロボット，苗生産システム国際シンポジウム実行委員会主催第 2 回講演会講演要旨，35-47，1991
- 古屋泰文，島田平八，松本実，本間敏夫：Ti-Ni 形状記憶合金ワイヤーの繰返し変形動作特性と劣化，日本金属学会誌，52(2)，139-143，1988
- 本間大：形状記憶合金を利用したマイクロメカニズム，日本ロボット学会誌，8(4)，483-485，1990
- 本間大：金属系人口筋肉型アクチュエータ：バイオメタル・ファイバーについて，日本ロボット学会誌，21(1)，22-24，2003
- 松田郁生，森嶋博，瀬尾康久，芋生憲司：キュウリの画像処理選別に関する研究－画像サンプリングの誤差について－，農業機械学会誌，54(3)，93-96，1991
- 松元幸男：さとうきび種苗（メリクローン苗）供給安定化対策事業，農畜産産業振興事業団 砂糖類ホームページ国内情報事業団から，
http://sugar.lin.go.jp/japan/fromalic/fa_0009a.htm，2000
- 三代満：自動接ぎ木装置，農業機械学会誌，59(2)，113-114，1997
- 三菱電気株式会社：三菱電気産業用マイクロロボットムーブマスターII 取扱説明書，1983

- 宮里清松:サトウキビとその栽培, 日本分蜜糖工業会, 60-61, 1986a
- 宮里清松:サトウキビとその栽培, 日本分蜜糖工業会, 70-73, 1986b
- 宮里清松:サトウキビとその栽培, 日本分蜜糖工業会, 102-110, 1986c
- 三輪敬之, 山本敏郎, 櫛橋康博, 児玉啓司:植物組織培養の自動化に関する研究
(第1報)ーメクリンロボットによる全自動苗移植システムの開発ー, 精密工学会誌, 54(6), 1107-1112, 1988
- 三輪敬之:ユリ球根増殖用ロボット, 苗生産システム国際シンポジウム実行委員会主催第1回講演会講演要旨, 74-79, 1991
- 實山安英:さとうきび育苗プロジェクト, 1995
- 門田充司, 近藤直, 秋山尚文:キクの挿し木作業の自動化に関する基礎的研究(第3報)ー挿し穂の整形装置の開発ー, 農業機械学会誌, 60(4), 37-44, 1998a
- 門田充司, 近藤直, 秋山尚文:キクの挿し木作業の自動化に関する基礎的研究(第4報)植え付け装置の開発, 農業機械学会誌, 60(5), 37-43, 1998b
- 山崎弘郎, 橋本康, 鳥居徹:インテリジェント農業ー自動化・知能化のすすめー, 工業調査会, 160-171, 1996
- 山田久也:全自動接ぎ木ロボット, 農業機械学会誌, 58(4), 137-138, 1996
- 山本友英:組織培養による植物体再生と増殖技術, 農業技術体系 花卉編 第5巻, 335-344, 1997
- 山本愷, 玉木浩二:実験・計測技術の基礎, 有限会社 学界, 115-128, 1986
- 吉野龍太郎:人間型ロボットのハンド, 日本ロボット学会誌, 18(6):802-804, 2000
- 輪竹宏昭, 木名瀬淳:育苗システム用ロボット, ロボット, 64, 74-79, 1988