

農業機械化研究所研究報告

第 42 号

Technical Report of the Institute of Agricultural Machinery

Number 42, November 2012

平成 24 年 11 月

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構
生物系特定産業技術研究支援センター
農 業 機 械 化 研 究 所

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構
生物系特定産業技術研究支援センター
農業機械化研究所

Institute of Agricultural Machinery
Bio-oriented Technology Research Advancement Institution
National Agriculture and Food Research Organization

編集委員会
Editorial Committee

西村 洋 (委員長)	Yoh NISHIMURA (Chief)
栗原 眞	Makoto KURIHARA
小林 研	Ken KOBAYASHI
宮原 佳彦	Sumihiko MIYAHARA
宮崎 昌宏	Masahiro MIYAZAKI
大森 定夫	Sadao OMORI
高橋 弘行	Hiroyuki TAKAHASHI
松尾 陽介	Yosuke MATSUO

農業機械化研究所研究報告 第42号 (平成24年11月)

下側接近を特徴とする定置型イチゴ収穫ロボットの開発

山本聡史

目次

緒言	1
第1章 序論	3
1.1 果菜類生産のロボット化・システム化の研究開発動向	3
1.1.1 果実・果菜類収穫ロボット	3
1.1.2 果菜類の水平循環型移動栽培装置	6
1.1.3 課題の整理	6
1.2 本研究の目的と構成	7
1.2.1 本研究の目的	7
1.2.2 本研究の構成	8
第2章 自動収穫に関する基礎調査	9
2.1 高設栽培されたイチゴの着果状態	9
2.2 果実と果柄をつなぐ離層の離脱特性	12
2.3 マシンビジョンとエンドエフェクタに関する考察	13
2.4 摘要	13
第3章 収穫試験システムの概要	14
3.1 主要構成要素	14
3.2 自動収穫作業の流れ	15
3.3 マニピュレータ	16
3.4 横移送装置	17
3.5 摘要	17
第4章 マシンビジョンの構築	18
4.1 マシンビジョンの構成	18
4.1.1 位置検出ユニット	19
4.1.2 着色率測定ユニット	19
4.2 位置検出方法	20

4. 2. 1	位置検出アルゴリズム	20
4. 2. 2	基礎試験方法	22
4. 2. 3	基礎試験の結果と考察	23
4. 3	着色率測定方法	25
4. 3. 1	着色率測定アルゴリズム	25
4. 3. 2	基礎試験方法	26
4. 3. 3	基礎試験の結果と考察	27
4. 4	位置検出と着色率測定における同一果実のマッチング	28
4. 4. 1	マッチングのアルゴリズム	28
4. 4. 2	基礎試験方法	29
4. 4. 3	基礎試験の結果と考察	30
4. 5	摘要	30
第5章	エンドエフェクタの開発	32
5. 1	エンドエフェクタの概要	33
5. 1. 1	構成	33
5. 1. 2	位置変化抑制機能	34
5. 1. 3	誤採果防止機能	34
5. 1. 4	果柄除去機能	35
5. 1. 5	採果動作プログラム	35
5. 2	採果基礎試験	36
5. 2. 1	試験方法	36
5. 2. 2	試験結果	36
5. 3	摘要	38
第6章	定置型収穫ロボットの収穫性能試験	39
6. 1	試験方法	39
6. 1. 1	供試材料と測定項目	39
6. 1. 2	評価項目の定義	41
6. 2	試験結果	41
6. 2. 1	収穫成功率	42
6. 2. 2	未熟果収穫率	42
6. 2. 3	収穫した果実状態	43
6. 2. 4	作業能率	44
6. 3	考察	44
6. 3. 1	位置検出	44
6. 3. 2	着色率測定	44
6. 3. 3	採果動作	45
6. 3. 4	移動栽培装置との組み合わせ	45
6. 4	摘要	45

第7章 総括	47
7.1 まとめ	47
7.2 今後の展望	48
謝辞	49
引用文献	49
Summary	53

Development of a Stationary Robotic Strawberry Harvester with Picking Mechanism that Approaches Target Fruit from Below

Satoshi YAMAMOTO

Contents

Preface	-----	1
1. Introduction	-----	3
2. Basic Investigation of Robotic Harvesting	-----	9
3. Outline of the Stationary Robotic Harvester	-----	14
4. Construction of a Machine Vision	-----	18
5. Development of an End-effector	-----	32
6. Performance Test of the Stationary Robotic Harvester	-----	39
7. Conclusion	-----	47
Acknowledgement	-----	49
References	-----	49
Summary	-----	53

下側接近を特徴とする定置型イチゴ収穫ロボットの開発

山本聡史

2012-8-19 受理

特別研究チーム (ロボット)

抄 録

本研究は、植物工場におけるイチゴのライン生産方式の開発の一環として、作業対象がロボットの設置場所まで移動する移動栽培装置と定置型収穫ロボットを組み合わせた自動収穫システムを想定し、高精度なロボット収穫の可能性を追求したものである。まず、生産者の高設栽培イチゴの着果状態を多方向から観察し、自動収穫時に着果状態の影響を受けにくい検出・接近方向を考察した。次に、果柄と果実の離層における離脱特性を明らかにした。続いて、定置型収穫ロボットの特徴を活かせるよう、下側から果実位置を認識するステレオカメラ及び移動栽培ベッド側から横方向に果実を撮影する着色率測定カメラとで構成されるマシンビジョンシステムを提案した。さらに、対象果実の位置ずれを振動機構で抑制する機能、圧縮空気により隣接果実を引き離して対象果実のみを採果する機能、マニピュレータ制御により離層から果実を離脱する機能を装備した多機能エンドエフェクタを製作した。最後に、定置型収穫ロボットシステムを用いて性能試験を行い、収穫成功率、誤採果率、果実損傷率等を分析することによって、定置型イチゴ収穫ロボットの有効性を示した。

緒 言

近年、我が国の農業は、高齢化、人口減少、放射能汚染、異常気象や地震による災害、国際競争の激化といった大きな問題に直面している。今後、我が国の農業が衰退することなく、産業として維持、発展していくためには、ロボット技術による飛躍的な省力化が欠かせないと考えられる。こうした中、食の安全・安心への国民的関心が益々高まり、消費者の健康志向も強まる一方である。生産者の無農薬、新鮮、清潔などのイメージ戦略が高付加価値を生み出し、消費者に受け入れられている。このような消費者ニーズに対応し、安全・安心な食料の安定供給を実現する有力な方法として、高度な環境制御と生育予測を行うことにより農産物を周年・計画生産する植物工場に注目が集まっている。2009年4月時点で、人工光型植物工場が34ヵ所、太陽光・人工光併用型植物工場が16ヵ所存在している¹⁾。しかし、工場とは言いながら、植物工場における農産物の工業的生産は未だに実現していない。例えば果菜類の太陽光利用型植物工場では、定

植、誘引、摘葉、収穫作業を全て人力に頼っているのが現状である。今後、経営安定の観点から植物工場の規模拡大が望まれるが、大規模な植物工場では雇用の確保が足かせとなることが危惧される。太陽光利用型植物工場が広く普及しているオランダにおいても、今後の展望として、①さらなる収量増加、②化石燃料使用量の削減、③労働力投入量の削減(自動化、機械化)への取り組みが重要と認識されている²⁾。我が国でも植物工場の大規模化に応じ、労働力投入量の削減のため、自動化、機械化の要望が大きくなることは容易に予測できる。

現在、施設で栽培される果菜類の主要品目としてイチゴ、トマト、キュウリが挙げられ³⁾、養液栽培施設(野菜)の設置面積の7割以上をトマト、イチゴが占める⁴⁾。これらの果菜類の生産に必要な10a当たりの年間労働時間はイチゴ、トマト、キュウリでそれぞれ2,092 h/10a、947 h/10a、1,095 h/10aであり、機械化が進んだ水稻(27 h/10a)と比較して極めて長時間である⁵⁾。この労働時間の中で大きな割合を占めるのが収穫作業であり、イチゴでは491 h/10a(23%)が収穫作業に費やされる⁶⁾。こ

れまで果菜類の収穫作業の省力化を目指し、収穫ロボットに関する研究開発が数多く行われてきたが、実際の栽培での複雑な着果状態に対応できず、いずれも普及に至っていない。

生物系特定産業技術研究支援センターでは、2006年度から5年間の研究期間で「次世代農業機械等緊急開発事業」及び「第4次農業機械等緊急開発事業」(緊プロ事業と呼ぶ。)により「イチゴ収穫ロボットの開発」が実施された。収穫精度をある程度犠牲にしつつ、生産現場で安定した動作を実現する頑強かつ低コストなロボットの開発が進む一方で、将来的な収穫精度の向上のニーズに対し、複雑な着果状態への対応が課題として挙げられた。

また、同年度から3年間の研究期間で「先端技術を活

用した農林水産研究高度化事業」により「冷蔵苗のモジュール化によるイチゴの高密植移動栽培システム」の研究課題が実施され、2009年度から3年間の研究期間で「イチゴの高密植移動栽培装置の利用性向上に関する研究」が行われた。こうした研究開発状況の下、イチゴ収穫ロボットの収穫精度の向上を図る過程において、定置型収穫ロボットと移動栽培装置との組み合わせという着想が得られた。

本研究は、従来の収穫ロボットの課題を考察し、主要果菜類の中で最も労働時間が長く、省力化が求められているイチゴを対象品目とし、従来の収穫ロボットよりも高い収穫精度を実現する自動収穫システムの開発を目指すものである。

第1章 序 論

1. 1 果菜類生産のロボット化・システム化の研究開発動向

農業ロボットは「農業及び生物生産にかかわるもので、アームのように複数の自由度の機構をもつ機械システム、高度な感覚機能、判断機能などをもつ自動機械、及び従来形の農業機械でも自律移動できるもの⁷⁾」という枠組みでとらえられ、従来の農業機械と一線を画すものである。すなわち、植物等の複雑多様な作業対象を相手に、その都度適切に判断し、作業するという一連の工程を自動で行う必要がある。本研究はイチゴの自動収穫技術に関するものであるが、果菜類収穫ロボットは典型的な農業ロボットと言える。1980年代から今日まで数多くの果菜類収穫ロボットが研究開発されてきたが、いずれも実用化されていない。ここでは、まず、果実も含めた果菜類収穫ロボットの研究開発を概観する。続いて、果菜類の植物工場におけるライン生産方式として、工場のラインのように作業対象が作業場所まで移動する移動栽培装置の研究開発を概観する。これらの技術の現状と特徴を明らかにすると共に、本研究で目的とする機能を実現するための課題を明らかにする。

1. 1. 1 果実・果菜類収穫ロボット

果実の機械的な選択収穫方法についての基礎的な考察が1968年 Schertz and Brown によりなされ、特定波長の反射特性の比較により果実と葉を識別する手法と吸引式エンドエフェクタなどが提案された⁸⁾。

1977年 Parrish and Goksel により果実収穫ロボットの原型が提案された⁹⁾。すなわち、カメラで果実を撮影し、画像中の果実重心位置から果実が存在する可能性のある直線を算出し、その軌跡に沿って、接近センサが果実を検出するまでマニピュレータの先端を移動させ、採果するものである。この果実認識方法を line-of-sight と定義している。また、マニピュレータは、2つの回転ジョイントと直動シリンダを直列に接続した3自由度極座標系マニピュレータ（回転-回転-直動 (Revolute-Revolute-Prismatic: R-R-P)）を用いている。

この基本構想は d'Esnon に継承され、1984年、3自由

度円筒座標系マニピュレータ (P-R-P)、回転する直動軸に取り付けられた円状開閉機構と光電センサを備えるエンドエフェクタ、ラインスキャンカメラから構成されるリンゴ収穫ロボットが開発され、室内試験が行われた¹⁰⁾。このロボットをベースとして、1986年、d'Esnon et al. により超音波センサを航法センサとする自律走行車両に搭載されたリンゴ収穫ロボット MAGALI が開発された¹¹⁾。3自由度極座標系マニピュレータ (R-R-P) と吸着カップのエンドエフェクタ、line-of-sight のマシンビジョンで構成され、光環境を整えば50%以上の収穫成功率で1果当たり4sで収穫した。問題点として日光の影響を受けること、収穫果実の25%の果柄が外れたこと、採果時に他の果実を落とす場合があることを挙げている。

1985年、Harrel et al. は、line-of-sight の欠点に着目し、マニピュレータの先端にマシンビジョンを装備する「ハンドアイカメラ」による果実接近手法を提案した¹²⁾。すなわち、line-of-sight ではデッドレコニングで果実に接近するため、軌跡計算後の果実の位置変化に対応できないが、ハンドアイカメラでは逐次果実を認識して位置情報を60Hzで更新しながら接近し、接近センサ（この場合は超音波センサ）の反応によりマニピュレータを停止し、採果動作に移行できる。

1990年、Harrel et al. によりけん引車に搭載されたオレンジ収穫ロボット FLORIDA ROBOTIC GROVE-LAB が報告された¹³⁾。リングカッター、超音波センサ、ハンドアイカメラ、白熱照明からなるエンドエフェクタと3自由度極座標系マニピュレータ (R-R-P) から構成され、1987年6月から1988年5月まで150h試験を行い、条件が良ければ75%の収穫成功率で1果当たり3~7sで収穫した。果柄が長い果実では問題なく収穫できたが、果柄が短い果実ではリングカッターにより果実が押されて採果できないことがあった。また、エンドエフェクタの性能評価のため、154回の収穫動作を解析した結果、106回(69%)が成功と判断されたが、67回(44%)の収穫動作で果実または樹木が損傷したと報告されている¹⁴⁾。

Hannan and Burks によれば、資金面及び技術的な限界により2000年時点で経営的に実現可能性のある収穫ロ

ボットは存在せず、最も見込みがあった事例として、1997年にフランスとスペインの EUREKA プロジェクトで開発されたオレンジ収穫ロボット CITRUS が紹介されている¹⁵⁾。CITRUS は自動収穫に適した樹形であれば80%の収穫成功率、一般的な樹形で60~65%の収穫成功率であった。Hannan and Burks はさらに果実収穫ロボットで主流であった3自由度極座標系マニピュレータの欠点として、エンドエフェクタの向きを制御できない点を挙げ、マニピュレータに冗長性を持たせることにより障害物回避も可能であることに言及している。また、グリップ及び吸着ハンドによる採果では、果実損傷を注意すべきとしている。

2003年に van Henten et al. によりキュウリ収穫ロボットが開発された¹⁶⁾。この収穫ロボットは、直動軸に6自由度の多関節ロボットアームを搭載した7自由度のマニピュレータ、電熱線で果柄を切断して開閉フィンガで把持するエンドエフェクタ、カメラを移動するステレオ画像法によるマシンビジョンで構成され、74.4%の収穫成功率で1果当たり65.2 sで収穫した¹⁷⁾。なお、茎葉と同系色のキュウリ果実を検出するため、マシンビジョンでは850 nm及び970 nmの2波長の反射光を検出している。リンゴ、オレンジ用の収穫ロボットと比較し、隣接果実、葉などの障害物がなく、格段に収穫が容易な環境であったが、主な失敗要因としてマシンビジョンのレンズ歪みによりステレオ画像法の精度が低下したことを挙げていた。

以上、海外の主な果実・果菜類収穫ロボットを概観したが、マシンビジョン、マニピュレータ、エンドエフェクタを主な構成要素とする収穫ロボットの基本形が確立され、光環境、着果状態の条件を整えば確実に収穫できる技術が実現したと言える。しかし、実際の栽培環境では、①果実認識時のノイズ(日光の正反射光、順光、逆光、影、色温度変化)及び遮蔽物・重なり(葉、枝、隣接果実)、②接近時の障害物(葉、枝、隣接果実)、③採果時の果実特性(果柄の長さ、離層の離脱力、隣接果実との接触)などが収穫精度に影響を与えている。また、収穫精度の向上とともに、収穫した果実品質の観点から、果実損傷をはじめ、果柄の欠落、他果実の落果、樹体損傷を考慮したエンドエフェクタが求められている。

次に、国内での開発に視点を移すと、1984年、川村ら

により世界で初めてマシンビジョン、マニピュレータ、エンドエフェクタの基本要素を備えた収穫ロボットが開発された^{18), 19)}。マシンビジョンは単眼カメラの横移動によるステレオ画像法、マニピュレータは人間腕型5自由度のロボットアームという画期的なものであった。

このトマト収穫ロボットをベースとして、近藤らによりトマトの栽培様式に基づくマニピュレータの基本機構が検討され²⁰⁾、直動アクチュエータと多関節ロボットアームからなる7自由度マニピュレータ(P-P-R-R-R-R)が提案される²¹⁾とともに、トマトの物理的特性に基づく吸着パッドを利用した収穫用2指ハンドが開発され²²⁾、さらに門田らにより開発されたフレキシブル4指ハンドを搭載したトマト収穫ロボット²³⁾へと進化した。

1985年、近藤らによりマニピュレータ装着用カメラによる位置検出法が提案され²⁴⁾⁻²⁶⁾、前述のトマト収穫ロボットだけではなく、柑橘類²⁷⁾、ブドウ²⁸⁾、ナス²⁹⁾、イチゴ^{30), 31)}の各収穫ロボットに適用された。

1987年、近藤らにより果実認識用視覚センサが研究され、分光反射特性を考慮することによりキュウリなどの葉と同系統の色の果実を検出する手法が確立された³²⁾⁻³⁴⁾。この手法は、後にキュウリ収穫ロボット^{35), 36)}だけではなく、ブドウ収穫ロボット²⁸⁾にも応用された。

1988年、林らによりミカン収穫ロボットが開発された³⁷⁾。海外のオレンジ収穫ロボットと同様に、3自由度極座標系マニピュレータによりハンドアイカメラの視線方向にアプローチし、果実を吸着後、近接スイッチで果実を検出できた時点でマニピュレータを停止する。くし状カバーを繰り出し、対象果実のみをくし状カバー内に取り込んだ後、バリカン状カッタとベーンにより果柄を切断し、収穫する機構であり、密着する隣接果実への対策がなされた。

1994年、有馬らにより、収穫ロボットをいかに複雑な作業対象に適応させるかという従来のアプローチではなく、いかに収穫ロボットが作業しやすい環境を構築するかという点に着目した試みがなされた³⁸⁾。すなわち、キュウリを従来のつる下げ栽培ではなく、傾斜棚栽培にすることにより、果実と茎葉が分離され、自動収穫が容易になることを明らかにし、キュウリ収穫ロボットが開発された^{39), 40)}。

1995年、藤浦らにより2波長式3次元視覚センサが開

発され⁴¹⁾、1996年、Subrata et al.によりミニトマト収穫ロボットに適用された⁴²⁾、⁴³⁾。このロボットは4自由度円筒座標系マニピュレータ(R-P-R-P)を備え、障害物回避用のため、エンドエフェクタを左右旋回させる軸を追加したものである。韓ら及び藤浦らにより改良が進められ⁴⁴⁾–⁴⁷⁾、最終的に、収穫成功率80%、1果当たり12s前後で収穫し、がく付き率99%で果実損傷なしと報告されている。

2000年、林らによりナスを認識するための画像処理手法とファジー制御を適用したビジュアルフィードバック制御が提案され、ナス収穫ロボットが開発された²⁹⁾。ここでビジュアルフィードバック制御とは、マシンビジョンにより取得した情報に基づき、ロボットの動作を逐次修正しながら制御する方法である。このロボットをベースに改良を進め、V字型整枝されたナスを3段階の高さ別にブロック分けし、各ブロックをマシンビジョンにより順に走査する自動収穫システムを確立した。長さ4mの作物列で果実検出率は平均69.3%、収穫成功率は29.1%であり、1果当たり43.2sで収穫した⁴⁸⁾、⁴⁹⁾。

本研究の対象作物であるイチゴの自動収穫では、適用する栽培方式により土耕栽培用と高設栽培用に大別できる。土耕栽培とは、地面に畝を立てて苗を定植し、栽培する方法である。土耕栽培には、畝の外側に果実を垂らす外成栽培と、畝の内側に果実を置いて着色を向上させる内成栽培がある。また、高設栽培とは、作業者が立位の姿勢で作業できるように、約1mの高さに栽培槽を設けたものである。

土耕栽培イチゴを対象とした収穫ロボットは、1996年、佐藤らにより、8本指の摘み取りフィンガ、単眼カメラ、直交座標系マニピュレータから構成されるイチゴ収穫ロボットが開発され、栃木県にて収穫試験が行われた⁵⁰⁾。続いて、2000年、近藤らにより内成栽培用イチゴ収穫ロボットが開発された。直交座標系マニピュレータに搭載されたエンドエフェクタにより果実を吸引する方式が採用された⁵¹⁾、⁵²⁾。さらに、2004年、有馬らにより、土耕栽培イチゴの果柄をフックで引っかけて持ち上げ、果柄と果実が分離したところを果実受けバケットで受け止める構造の収穫ロボットが報告された⁵³⁾。2006年、崔らも内成栽培用イチゴ収穫ロボットを開発したが、こちらは把持切断フィンガであった⁵⁴⁾、⁵⁵⁾。

一方、高設栽培イチゴを対象とするロボットでは、2003年、有馬らにより高設栽培イチゴを対象とし、つり下げ型マニピュレータを有する収穫ロボットが提案された³¹⁾。この収穫ロボットは、高設栽培イチゴの着果状態を考慮し、栽培ベッドの真下から果実を検出、採果するものであり、高設栽培ベッド直下につり下げられ、ラック・ピニオン機構により移動する。マニピュレータは直交2自由度の簡素なものとし、吸引式のエンドエフェクタ、ビジュアルフィードバックのマシンビジョンを備え、収穫成功率100%、1果当たり7~10sと報告されている。吸引式のエンドエフェクタでは隣接果実も同時に採果してしまったため、門田らにより、フックを繰り出すエンドエフェクタが開発され、同時採果が解消されたと報告されている⁵⁶⁾。

2003年から農林水産省の農業機械等緊急開発事業によりイチゴ収穫ロボットの開発が開始された。この収穫ロボットは3自由度円筒座標系マニピュレータ(R-P-P)、果柄の傾き角度に応じて左右15°傾斜する把持切断フィンガ、ステレオ画像法により果実の大まかな位置を算出し、センターカメラで果柄の位置の把持切断位置を検出するマシンビジョンから構成され、レール上を走行する電動台車に搭載された⁵⁷⁾。林らにより、2007年12月から2008年5月まで高設栽培イチゴ用の収穫ロボットを生産者の施設に導入し、長さ39mの栽培ベッドで往復作業を行う性能試験が実施され、収穫成功率は平均41.3%、栽培ベッド1m当たりの作業時間は平均32.3sであった⁵⁸⁾。また、重松らにより、果実重なりと採果成功率の関係について、果房の入れ替わり時期に採果成功率が低下することが報告されている⁵⁹⁾。

2006年、尾崎により、3自由度直交座標系マニピュレータ、ハンドアイカメラ、把持切断フィンガからなるイチゴ摘み取りロボットが開発された⁶⁰⁾。その後の改良を経て、果実が密になっている状況を認識してスキップする判別機能を備え、1果当たり15sで収穫したと報告されている⁶¹⁾。

2008年、高嶺らにより4自由度垂直多関節マニピュレータ、ステレオ画像、把持切断フィンガからなり、高設栽培イチゴの内外両側からアプローチできる収穫ロボットが報告された⁶²⁾、⁶³⁾。続いて、中尾らによりこの収穫ロボットの収穫アプローチ方向が検討され、収穫適期果

実の内側正面からアプローチ可能である割合が 89%であった⁶⁴⁾。

以上、国内の主な果実・果菜類収穫ロボットを概観したが、種々の作物を対象にした収穫ロボットの中でも、着果状態（隣接果実、障害物、遮蔽物）、果実の空間的な分散度合、果実のハンドリングしやすさ、果柄の長さ、離層の離脱力、ロボットのインフラストラクチャ（動力源や移動手段、遮光・防塵・防水環境等）などの目安を考えると、ミニトマト及び高設栽培イチゴを対象とした収穫ロボットが実用化に最も近いと言える。しかし、高設栽培イチゴはミニトマトと異なり、果実の表皮が損傷しやすい、果実形状にばらつきが大きい、隣接果実との重なり状態もミニトマトのような規則性がほとんどないという特徴がある。このことから、ミニトマトよりも自動収穫の点で技術的なハードルが高いと推察される。その他の果実・果菜類は、現状の栽培様式では茎葉と果実が混在し、果実の認識及びエンドエフェクタの接近が困難な場合があるため、生産量に影響を与えず、なおかつ、自動収穫に適した栽培方法の確立が必要と考えられる。

1. 1. 2 果菜類の水平循環型移動栽培装置

果菜類生産の省力化を図るもう一つのアプローチとして、工場のラインのように作業対象が作業者の場所まで移動する工業的な生産システムが考えられる。果菜類の水平循環型移動栽培装置は、温室の空間利用効率を高めつつ、前述の工業的な生産システムを実現し、軽労化を図るものである。

1984年、温室内作業の省力化及び温室内の不良労働環境の改善を目的として倉田により温室内の作物可動式栽培装置が開発された⁶⁵⁾⁻⁶⁸⁾。全自動防除装置と全自動灌水装置により防除作業とかん水作業を無人化するとともに、作業スペースの環境改善のための局部的冷房装置が提案された。トマトを促成栽培し、収穫してから作業スペースに設置した選果機に果実を供給する収穫選果作業の能率を計測した結果、100個の収穫と選果の実測時間が12.8分と報告されている。

1986年、McAvoy and Giacomelliにより、高圧ナトリウムランプを用いて光環境を改善し、トマトの通年生産を行う一段取りトマト栽培 (STTPS: Single Truss Tomato Production System) の循環型移動栽培装置による養液栽

培が提案され⁶⁹⁾、Kabala and Giacomelliにより、ベンチの移動・持ち上げ機構も開発された⁷⁰⁾。また、門田らにより STTPS における収穫作業の自動化を目指した定置型トマト収穫ロボットが提案された²³⁾。

1993年、van Os et al.によりトマトとパプリカの移動栽培装置が開発された⁷¹⁾。施設内の通路が不要であるため栽植密度が増加し、これに伴い面積当たりの収量も増加し、さらに、労働時間を13%軽減できたと報告されている。

2004年、崎山らにより、移動栽培装置を用いたトマトの管理作業の快適化と周年安定生産技術が提案された⁷²⁾。1作当たりの作業時間を計測した結果、慣行栽培とほぼ同等であったが、全作業時間の33%をコンテナの移動待ち時間が占めるため、この待ち時間を減らす改良により作業時間の短縮が可能と報告されている。

2008年、吉田らによりイチゴの高密植栽培のための移動栽培装置が開発された⁷⁴⁾。長さ2.2mの栽培ベンチを水平循環させるための縦移送ユニットと横移送ユニットを備える。横移送時に作業者が定植、栽培管理、収穫作業を行い、かん水と防除は自動で行う。

2010年、藤浦らにより移動栽培施設のミニトマト収穫ロボットが開発された^{46), 47)}が、自動収穫に連動した移動栽培装置の制御については報告されていない。

以上、果菜類の水平循環型移動栽培装置を概観した。現在、導入コスト等の課題により広く普及していないが、栽培ベッドが移動することによりかん水と防除を容易に無人化でき、その他の作業の大幅な軽労化が実現できていることから、今後、植物工場の自動化を図るには、移動栽培装置の導入が必要と言える。一方、移動栽培装置と組み合わせた自動収穫に関する研究も実施されたが、収穫ロボットの走行部の省略とマニピュレータの簡易化の点以外は従来の移動型収穫ロボットを踏襲し、定置型ロボットの利点を積極的に活かす試みはなされていない状況にある。

1. 1. 3 課題の整理

これまで開発された果実・果菜類収穫ロボットを概観すると、収穫精度向上のため、自動収穫が容易な環境を構築する必要があると考えられる。しかし、農作物が相手である以上、環境の構築にも限界がある。この場合、

最大限に整えられた環境の中で、最も確実になおかつ技術的にシンプルな選択肢を選ぶべきである。

本研究では、収穫ロボットを移動栽培装置と組み合わせた定置型とすることにより、ライン生産方式で使われている定置型ロボットと同様に、移動に伴う不安定要素（ロボット本体の揺動、障害物との衝突、作業経路からの逸脱、動力源の確保など）が解消されるとともに、マシンビジョンの配置を柔軟に設定できる環境が整えられた。さらに、電源、圧縮空気等の所要動力も確保され、可搬質量 10 kg の市販の 7 自由度多関節マニピュレータが供試され、小型軽量に制限されず多機能なエンドエフェクタを搭載できる環境が整備された。

しかし、イチゴの着果状態は高設栽培によって茎葉と果実が混在せず、ほぼ確実に分離しているとはいえ、収穫適期果実の周囲には未熟果及び他の果柄などの障害物が隣接している場合が多い。そこで、多方向から見た着果状態の傾向を把握し、収穫が容易と判断される着果状態の割合が高い方向を明らかにし、着果状態に影響を受けにくいマシンビジョンの配置を選択する必要がある。また、果実と果柄をつなぐ離層の離脱特性を把握し、採果方法及びマシンビジョンによる検出ターゲット（果柄又は果実）を選択する必要がある。すなわち、選択肢は、果柄把持切断方式のエンドエフェクタと把持切断位置をピンポイントで検出するマシンビジョンの組み合わせか、果実を把持してもぎ取るエンドエフェクタと果実の重心位置を検出するマシンビジョンの組み合わせのいずれかである。

最も確実にシンプルなマシンビジョン及びエンドエフェクタの組み合わせを選択した後、より高精度な採果を実現するため、採果時の着果状態を改善するエンドエフェクタの機能の検討が必要と推察される。同時に、エンドエフェクタの採果動作に必要な位置情報を得るため、着果状態の影響をできるだけ低減するマシンビジョンの構築が必要と考えられる。

1. 2 本研究の目的と構成

1. 2. 1 本研究の目的

本研究は、植物工場におけるイチゴのライン生産方式の開発の一環として、工場のラインのように作業対象がロボットの設置場所まで移動する移動栽培装置と定置型

収穫ロボットを組み合わせた自動収穫システムにより、高い収穫精度を実現する可能性を追求するものであり、定置型収穫ロボットで最も重要な技術要素である採果技術及び果実認識・収穫適期判別技術について、下記のようなマシンビジョン及びエンドエフェクタを開発・提案することを目的とする。

1) 定置型収穫ロボットのためのマシンビジョン

緊プロ事業で開発されたイチゴ収穫ロボットは、1 方向からのマシンビジョンで構成されるため、未熟果の陰に隠れた収穫適期の果実を認識できないことがある。また、図 1-1 のような実際の栽培における複雑に密集する果柄から収穫対象果実の果柄を検出することは極めて困難と推測される。

本研究では、複数の果実が重なっているような着果状態でも個々の果実を認識し、3 次元位置を測定する手法を開発し、シミュレーションにより有効性を示す。さらに、認識した果実の収穫適期を判定するための高精度な着色率測定手法を開発し、目視による熟度判別との比較試験により、提案する手法の有効性を示す。これらの手法をベースとし、定置型収穫ロボットの特徴を活かしたカメラ配置のマシンビジョンを構築する。



図 1-1 実際の栽培における複雑多様な着果状態の例

2) 定置型収穫ロボットのためのエンドエフェクタ

緊プロ事業で開発されたイチゴ収穫ロボットは、果柄を把持切断する方式のエンドエフェクタで構成されるた

め、図1-1のような複雑多様な着果状態の果実に対し、作業者との協調作業の観点から、収穫を諦める戦略を採っている。

本研究では、実際の栽培における複雑多様な着果状態の影響を排除するため、なるべく難易度の低い方向から確実に接近・吸着した後、隣接果実を巻き込まずに対象果実のみを損傷なく採果する定置型収穫ロボットの特徴を活かした多機能エンドエフェクタを開発する。対象果実の3次元位置を教示した後、自動で採果動作を行う採果基礎実験を行い、提案するエンドエフェクタの有効性を示す。

なお、本研究は自動収穫に関する個別要素技術の開発に留まることなく、開発したマシンビジョン及びエンドエフェクタを構成要素とする定置型収穫ロボットを構築するとともに実際の栽培ベッドを移送する移送装置を試作する。これらを組み合わせた収穫試験システムにより収穫性能試験を行い、定置型収穫ロボットによる収穫精度の向上を追求する。

1. 2. 2 本研究の構成

第2章では、自動収穫に関するイチゴの特性について基礎調査を行う。まず、高設栽培イチゴの着果状態を多方向から観察し、自動収穫時に着果状態の影響を受けにくいと判断される検出・接近方向を明らかにする。続いて、果柄と果実をつなぐ離層の離脱特性を明らかにする。

第3章では、栽培ベッドを横方向に移送する横移送装置と定置型収穫ロボットから構成される収穫試験システムの概要を示す。まず、収穫試験システムの主要構成要素と自動収穫の流れを示す。続いて、構成要素のうちマニピュレータの仕様と設置条件を示し、さらに、横移送装置の仕様を示す。

第4章では、定置型収穫ロボットのためのマシンビジョンの概要を示す。まず、複数果実が重なって検出された場合に個別認識を行う機能に対応し、円形収縮、境界線の平滑化、ラベリング、円形膨張を行う粒子解析手法を示し、シミュレーション等による評価を議論する。続いて、高精度に熟度を判別する機能に対応し、白、赤、緑色の照明を用いた画像処理手法を示し、目視による判定結果との比較により手法の妥当性を議論する。また、複数果実が重なった着果状態において着色率測定精度の低下を防ぐ手法を示し、その有効性を議論する。

第5章では、第4章で構築したマシンビジョンの特徴を踏まえ、定置型収穫ロボットのための多機能なエンドエフェクタの構成を示す。まず、隣接果実が対象果実に重なっている状態で対象果実を採果するため、果実を吸着する吸着管を振動させるとともに、隣接果実を対象果実から離間させるように圧縮空気を吐出することにより、隣接果実の影響を低減する機能を示す。続いて、採果時に果柄を果実に残さないため、マニピュレータでエンドエフェクタを傾斜させて果実を引っ張る機能を示す。最後に、果実の3次元位置を教示して採果試験を行い、提案したエンドエフェクタの有効性を議論する。

第6章では、第4章と第5章で述べたマシンビジョンとエンドエフェクタを組み込んだ収穫試験システムにおいて、イチゴが実際に栽培された栽培ベッドを移送装置に積載し、移動させて定置型収穫ロボットの性能試験を行い、収穫成功率、誤採果率、果実損傷率等について着果状態別に分析する。さらに、収穫成功率の内訳として、位置検出率、収穫適期判定率、採果率についても着果状態別に算出して考察し、収穫試験システムの有効性を議論する。

第7章では、本論文を総括して結論を示し、また、今後の展望をまとめる。

第2章 自動収穫に関する基礎調査

前章で概観したように、収穫ロボットの環境を整備し、不安定要素をできるだけ解消することが収穫精度の向上につながる。そして、環境整備に限界がある場合、残された不安定要素の影響を最も軽減する選択肢を選ぶことが重要である。本研究における最大の不安定要素は、収穫対象果実の周囲に存在する他の果実、果柄などの障害物である。そこで、最初に、実際の生産者のほ場にて高設栽培されたイチゴの着果状態を観察・分類して、着果状態の影響を軽減する方策を議論する。続いて、果実と果柄をつなぐ離層の離脱特性を把握し、ロボットにより果実を把持し、もぎ取る動作の実現可能性を議論する。

2.1 高設栽培されたイチゴの着果状態

着果状態は収穫対象果実とその周辺の隣接果実・果柄を見る方向により異なる。観察方向は、栽培ベッド側、下側、通路側に大別され(図2-1)、収穫対象果実が手前にある方がより収穫難易度が低いと推察される。

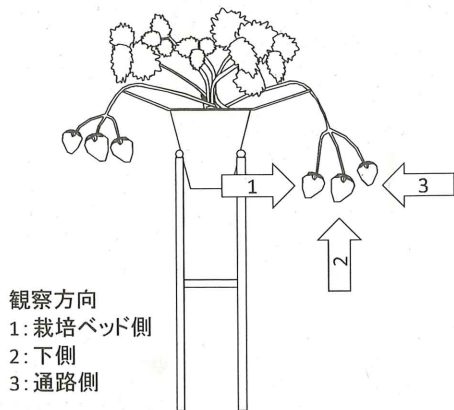


図2-1 高設栽培イチゴの着果状態を観察する方向

重松らにより高設栽培イチゴを通路側から観察した着果状態の分類と定義が示されている^{58), 59)}(図2-2)。「重なりaは、収穫対象果実が独立して着果し、果実全体が見える。重なりbは、対象果実の後ろに緑白色の未熟果と重なりがあり、果実全体が見える。重なりcは、対象果実の後ろに赤熟果と重なりがあり、果実全体が見える。重なりdは、対象果実の前方に果実があり、対象果実の50%以上が見える。重なりeは、対象果実の前方に果実があり、対象果実の50%未満しか見えない。」とされている。

次世代農業機械等緊急開発事業での「イチゴ収穫ロボットの開発」において、2004年12月から2005年5月に、生産者のほ場にて200~300果前後の通路側及び栽培ベッド側から見た着果状態が調査された(表2-1)。

表2-1 高設栽培イチゴの着果状態の調査対象果数

農家	品種	観察方向	2004年		2005年			
			12月	1月	2月	3月	4月	5月
生産者1 (愛媛県)	紅ほっぺ	通路側	309	—	227	265	—	217
		栽培 ベッド側	—	—	227	—	—	217
生産者2 (愛媛県)	紅ほっぺ	通路側	231	—	209	329	—	305
生産者3 (愛媛県)	紅ほっぺ	通路側	221	—	236	303	—	307
生産者4 (宮城県)	とちおとめ	通路側	206	215	194	196	211	—

図2-3に生産者1~4のハウスで調査した通路側から見た着果状態の割合を示す。通路側から見た着果状態は、各生産者に共通して12月でdとeの割合が高く、つまり、果実全体の見える割合が低い時期と考えられた。その後、生産者により傾向が異なるが、収穫シーズンを通じて果



a: 対象果実が独立して着果し、果実全体が見える。

b: 対象果実の後ろに緑白色の未熟果と重なりがあり、果実全体が見える。

c: 対象果実の後ろに赤熟果と重なりがあり、果実全体が見える。

d: 対象果実の前方に果実があり、対象果実の50%以上が見える。

e: 対象果実の前方に果実があり、対象果実の50%未満しか見えない。

図2-2 通路側から見た着果状態の分類^{58), 59)}

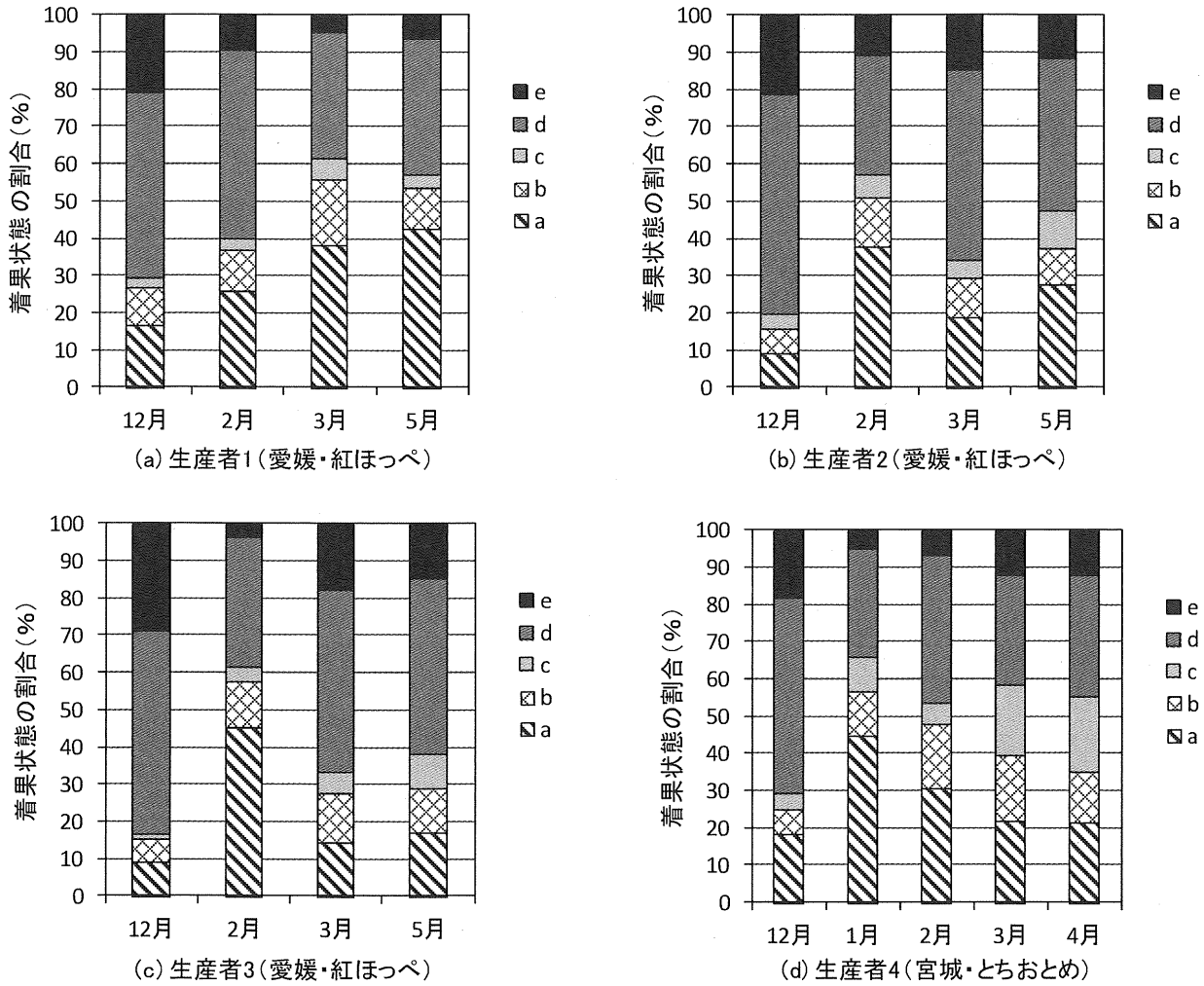


図 2-3 通路側から見た着果状態の割合
(着果状態の分類 a~e は図 2-2 参照)

実全体が見える割合は 4~6 割程度であった。a~c の割合が高い時期は対象果実の周囲に障害物がなく、自動収穫が容易と推察されるが、いずれの生産者ほ場でも 7 割を越えることがなく、4 割未満の場合もあったことから、隣接果実に対する対策をせずに自動収穫精度を安定的に向上させるのは難しいと推察された。

生産者 1 のほ場で 2 月、5 月の調査時に栽培ベッド側から見た着果状態と、通路側から見た着果状態を比較した (図 2-4)。栽培ベッド側から見た着果状態は 2 月、5 月の両方で a, c の割合はほぼ同じであったが、通路側で d の割合が高いのに対し、栽培ベッド側で b の割合が高かった。栽培ベッド側で e の割合は 1% 未満であり、ほとんどの果実で果実全体が見えたことから、栽培ベッド側から検出・接近する場合、自動収穫の難易度が低いと推定された。

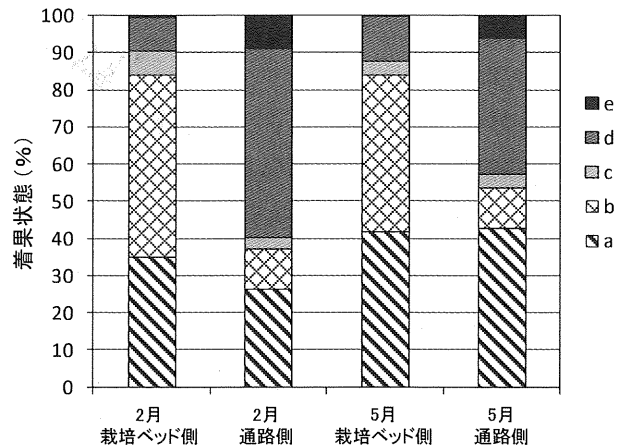


図 2-4 栽培ベッド側・通路側から見た着果状態の比較
(着果状態の分類 a~e は図 2-2 参照)

次に、2007年3月に、生産者1のほ場にて305個の果実（‘紅ほっぺ’）の下側から見た着果状態を調査した。通路側から見た着果状態の分類と同様に、隣接果実との重なり状態を4段階に分類した。すなわち、着果状態A：隣接果実なし，着果状態B：通路側に隣接果実あり，着果状態C：栽培ベッド側に隣接果実あり，着果状態D：下側に障害物あり，とした（図2-5）。

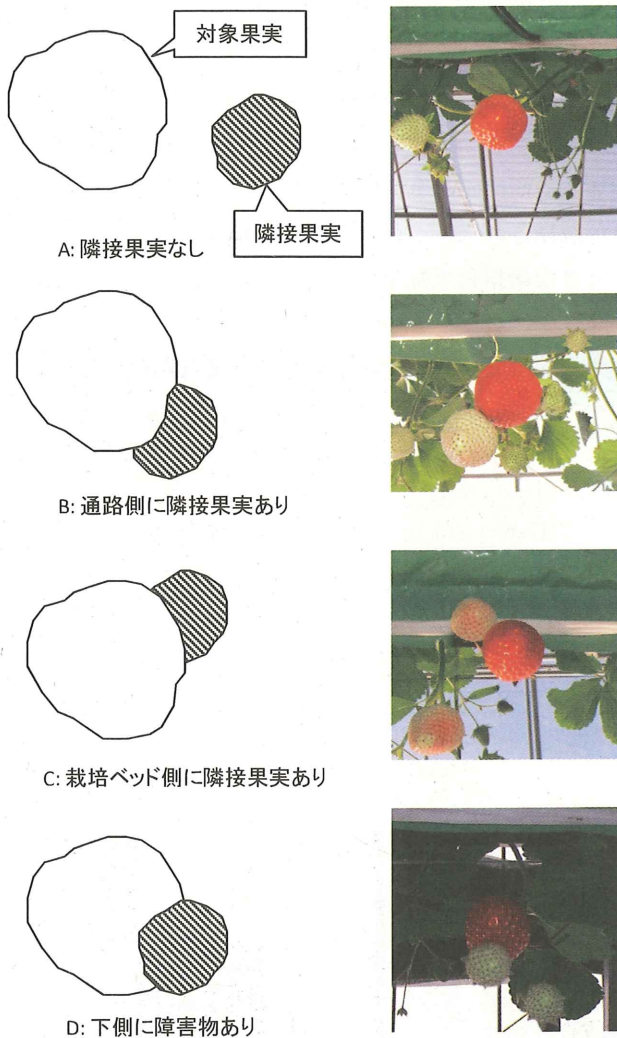


図 2-5 下側から見た着果状態の分類

なお、隣接果実が通路側と栽培ベッド側の両方にある場合、栽培ベッド側に隣接果実がある着果状態Cに分類した。

図2-6に下側から見た着果状態の割合を示す。着果状態Dは25%であり、7割以上の果実が障害物に遮られることなく果実全体を視認できた。調査時期により着果状

態が異なると考えられたが、調査対象果実（‘紅ほっぺ’）の月別の果実収量及び個数が3月にピークを迎える⁷⁵⁾ことから、他の収穫時期では隣接果実と重なっている割合が今回の調査結果と同等以下と推察された。

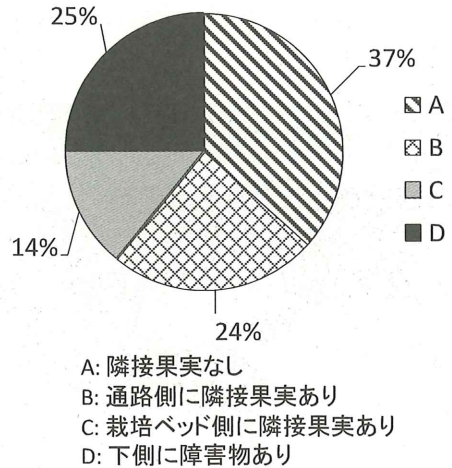


図 2-6 下側から見た着果状態の割合

図2-7に生産者1のほ場で2月に調査した通路側、栽培ベッド側及び3月に調査した下側の各方向から観察した果実の露出割合及び隣接果実がない着果状態の割合を比較する。隣接果実がない着果状態の割合は見る方向により大きな差はないが、果実の露出割合は明らかに栽培ベッド側及び下側から見た場合に大きくなることがわかった。

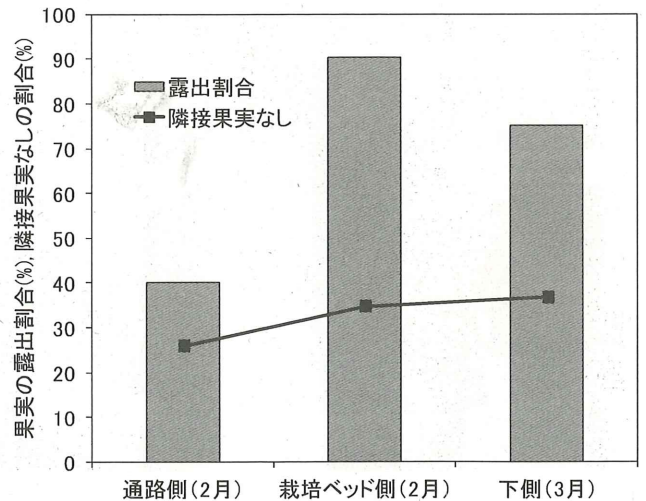


図 2-7 果実の露出割合及び着果状態 A の割合の比較

以上、高設栽培イチゴの着果状態を通路側・栽培ベッド側・下側の3方向から調査した結果、栽培ベッド側及び下側で果実の露出割合が高く、着果状態の影響を受けにくいことが明らかになった。また、下側から果実を見た場合、正常果であれば果実の大小にかかわらず、円形に近い形状で認識されることが観察された(図2-8)。



図2-8 下側から見た高設栽培イチゴ果実の例

2.2 果実と果柄をつなぐ離層の離脱特性

多くの作業者は、果底部を把持し、果実を果柄に対して傾けて引っ張るもぎ取り動作により採果する。これは、イチゴ果実と果柄をつなぐ節に離層があるためである。そこで、果実と果柄の傾斜角と最大引張荷重との関係を調査した。

実験方法は、図2-9のように果実を90°又は45°傾

斜させて緩衝材を備えた固定フレームにより固定し、小型卓上試験機(株島津製作所:EZ-Test)により果柄をクリップで把持して一定速度50mm/minで上方に引っ張り、果実と果柄が分離するまでの最大引張荷重を計測した。また、果実を傾斜させずに固定して引っ張った場合を0°傾斜とし、同様に最大引張荷重を計測し、比較検討した。各試験区で‘紅ほっぺ’を50個ずつ供試した。

供試果実の性状と最大引張荷重の測定結果を表2-2と図2-10に示す。90°傾斜時で最も小さな引張荷重3.2±1.0Nで分離し、45°傾斜時には、ばらつきが若干多いものの、0°傾斜時よりも小さな引張荷重6.8±3.0Nで離脱した。0°傾斜時には果柄径に比例して引張荷重が増加する傾向があり、離層ではなく、果柄が破断する現象が散見された。この結果から、採果時には、できるだけ大きな傾斜角で採果することが望ましいと考えられた。

表2-2 供試果実の性状と分離に必要な引張荷重*

傾斜	果重 (g)	果長 (mm)	長果径 (mm)	果柄径 (mm)	最大引張荷重 (N)
0°	15.8 (7.6)	38.4 (5.8)	31.9 (5.5)	1.7 (0.4)	12.6 (3.8)
45°	12.3 (5.8)	35.1 (5.9)	29.8 (5.0)	1.6 (0.3)	6.8 (3.0)
90°	11.0 (3.2)	34.9 (3.7)	28.7 (3.1)	1.5 (0.3)	3.2 (1.0)

*数値は平均値。括弧内は標準偏差。

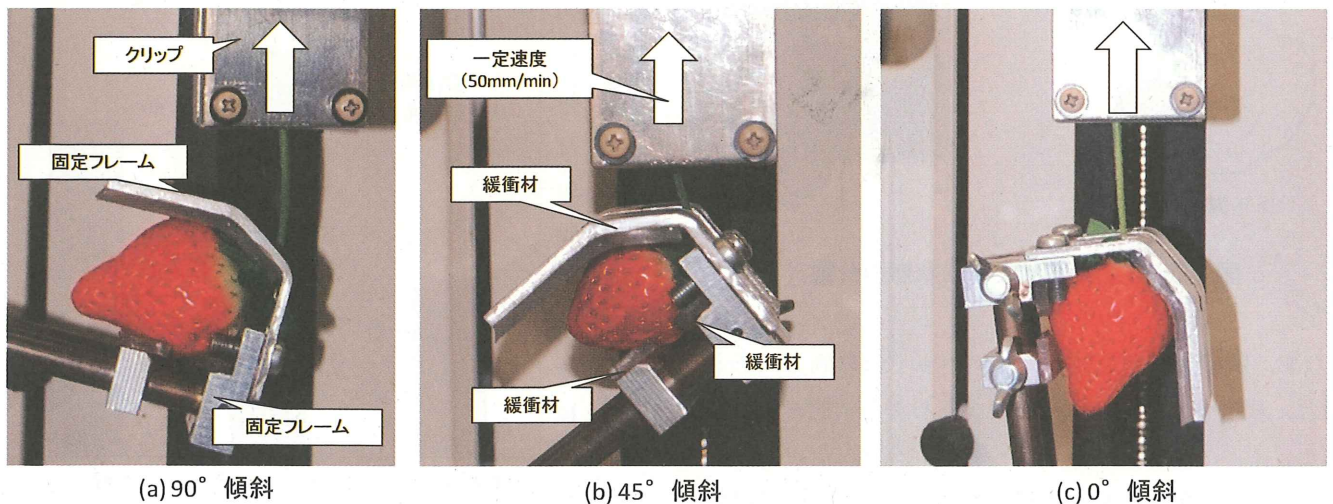


図2-9 傾斜角別の最大引張荷重を計測した様子

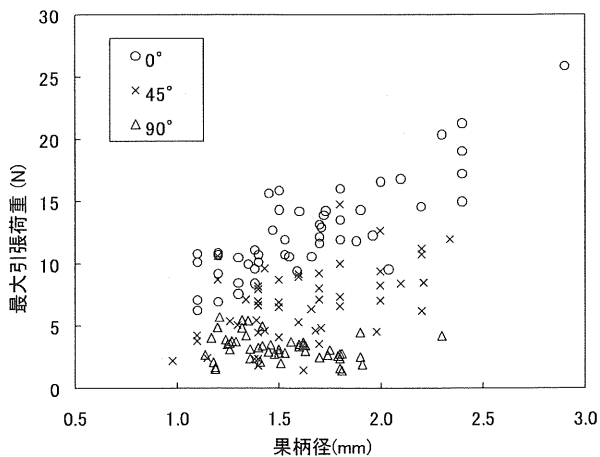


図 2-10 傾斜角別の最大引張荷重と果柄径の関係

2.3 マシンビジョンとエンドエフェクタに関する考察

果実と果柄をつなぐ離層の離脱特性を踏まえ、果柄に対し果実を大きく傾斜させることにより、果実を把持してもぎ取る採果が可能であると考えられた。この採果方式では果実を検出するだけでなく、果柄を検出する必要がない。このため、果柄の誤認識などの不安定要素を取り除き、マシンビジョンのシンプル化、安定化を図ることができる。さらに、把持の前に果実を吸着することにより、多少の検出位置の誤差も解消できる。また、着果状態の調査結果から、栽培ベッド側及び下側から果実を認識、接近、採果することで収穫難易度が低くなると推

察された。円筒形の吸着管により果実を吸着する場合、正常果であれば赤道部よりも果頂部の方が吸着しやすいと推測された。これらの点を踏まえ、自動収穫に関する不安定要素の影響を最も軽減するためには、果柄ではなく果実を検出するマシンビジョンと下側から果実を吸着、把持してもぎ取るエンドエフェクタを用いることが妥当と判断された。

2.4 摘要

- 1) 高設栽培されたイチゴを通路側、栽培ベッド側、下側の3方向から観察し、着果状態別に分類した。通路側から見た場合、収穫シーズンを通じて果実全体が見える割合は4~6割程度であったが、栽培ベッド側及び下側から見た方が、果実が露出している割合が7割以上と高いことが明らかになった。また、高設栽培イチゴの果実を下側から見た場合、正常果であれば果実の大小にかかわらず、円形に近い形状で認識されることが観察された。
- 2) 果実と果柄をつなぐ離層の離脱特性を解明するため、果実と果柄の傾斜角と最大引張荷重との関係を調査した。その結果、傾斜角90°で最大引張荷重が平均で約1/4まで低減することが明らかになった。
- 3) マシンビジョンとエンドエフェクタに関する考察を行い、果実を検出するマシンビジョンと下側から果実を吸着、把持してもぎ取るエンドエフェクタが妥当と判断された。

第3章 収穫試験システムの概要

本研究の主な研究対象であるマシンビジョンとエンドエフェクタを議論する前に、本章ではこれらが組み込まれた収穫試験システムの全体構成を示す。まず、定置型イチゴ収穫ロボットの主要構成要素と自動収穫作業の流れを示し、続いて、エンドエフェクタを搭載するマニピュレータと栽培ベッドを移送する横移送装置を概観する。さらに、マニピュレータと横移送装置の配置を示す。

3.1 主要構成要素

収穫試験システムの主要構成要素を図3-1に示す。エンドエフェクタを搭載したマニピュレータ正面に位置検出ユニットと着色率測定ユニットから構成されるマシンビジョンを設置し、マシンビジョンからの情報に基づき採果動作を行う定置型イチゴ収穫ロボットを構築した。ロボット正面に長さ5 mのレールを敷設し、横移送装置を走行させた。

開発したシステムのブロック図を図3-2に示す。PCは、1394インターフェースボード、シリアルポート、運動制御ボード及びデジタル入出力ボードを備え、2.4 GHzのCPU (Intel Core 2 Quad Q6600) と3.5GBのRAMを搭載した。1394インターフェースボードによりカメラからデジタルビデオ信号を入力し、シリアルポートから電動スライダの制御信号を出力する。また、運動制御ボードからコントローラを介してマニピュレータを制御する。この他、デジタル入出力ボードにより各照明のON/OFF、エンドエフェクタ、横移送装置のモータユニットに制御信号を出力し、エンドエフェクタの圧力センサと横移送装置の左右移動範囲を規制するリミットSWからの入力信号をモニタする。制御ソフトウェアはMicrosoft Visual C++ .NETにより開発し、画像処理ライブラリ (MVTec: HALCON 8.0) 及びマニピュレータ用運動制御ライブラリ (三菱重工業㈱: PAライブラリ) を組み込んだ。

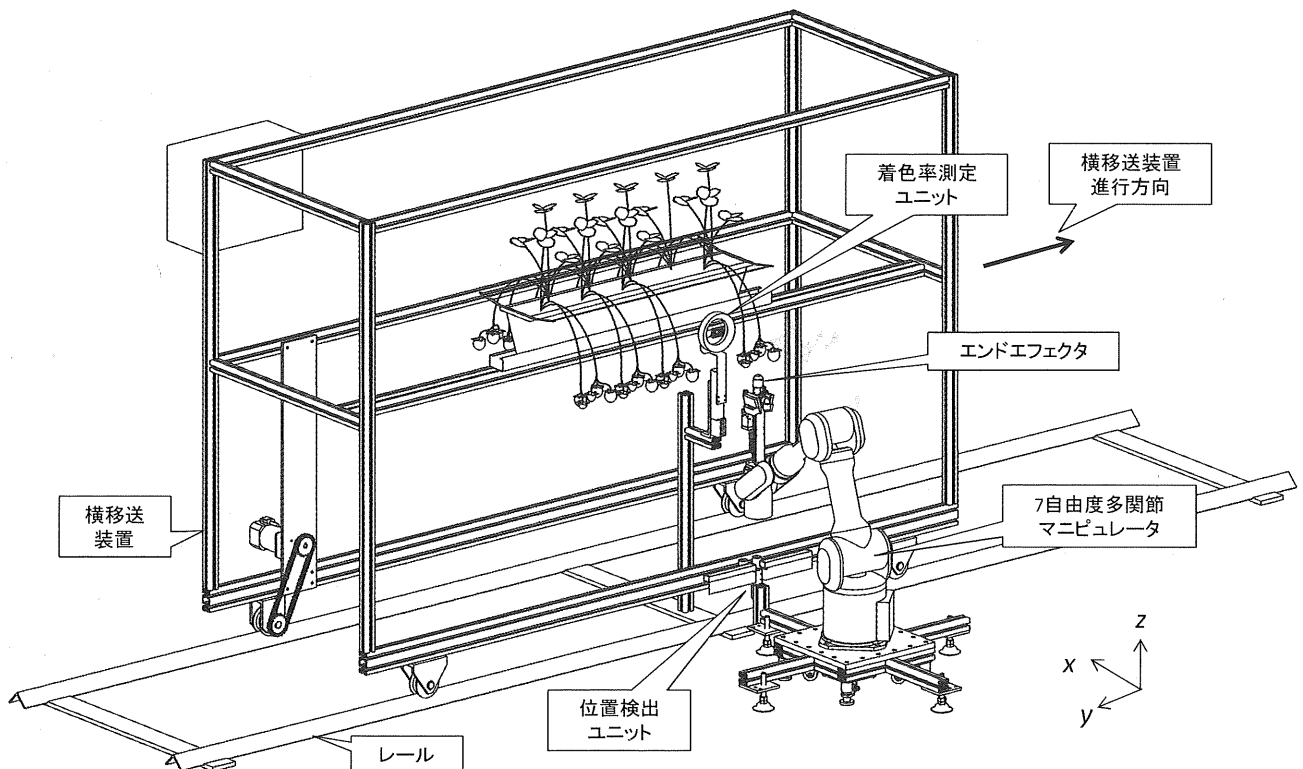


図3-1 収穫試験システムの主要構成要素

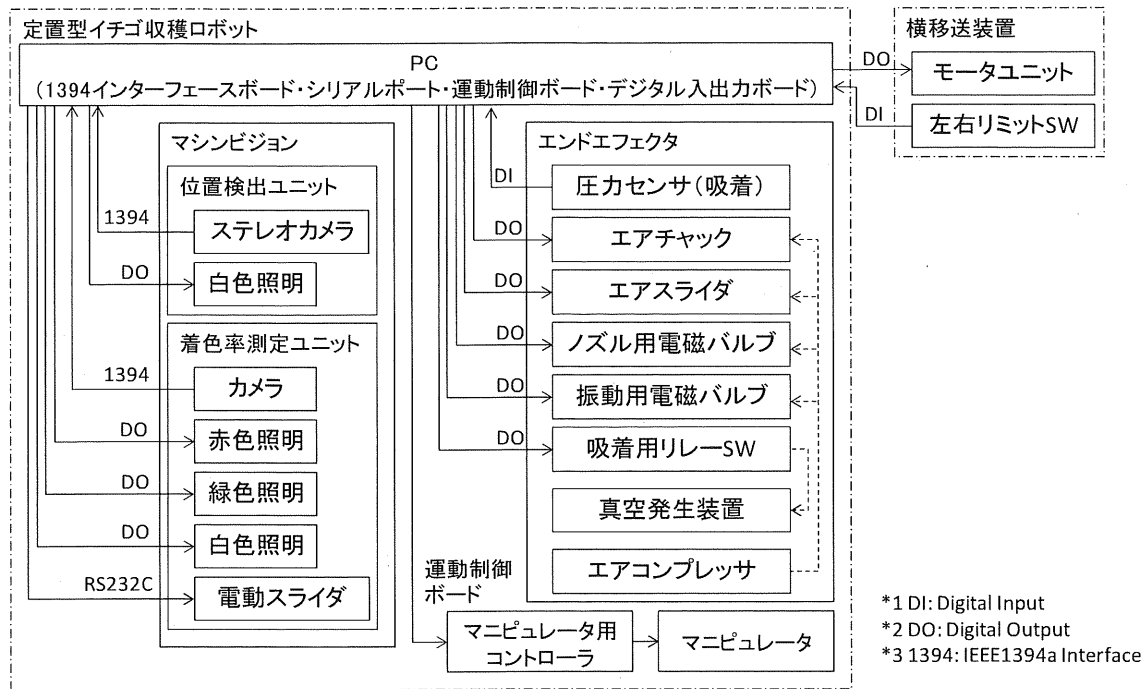


図 3-2 収穫試験システムのブロック図

3. 2 自動収穫作業の流れ

収穫試験システムにおける自動収穫作業の流れを図 3-3 に示す。収穫ロボットと横移送装置を連動して制御するので、試験開始から終了まで全て自動で収穫作業を行うという特徴がある。

- ① 自動収穫を開始するとレール左端に停止した横移送装置が図 3-1 中の y 軸マイナス方向に走行を開始する。横移送装置の走行中は常時リミット SW をモニタし、横移送装置がレール右端に達し、リミット SW が ON になった時点で横移送装置が停止し、自動収穫は終了する。
- ② 横移送装置の走行中に位置検出ユニットにより下側（果頂部）から果実を検出し、果実領域の重心が収穫範囲内に入った時点で横移送装置が停止する。
- ③ 横移送装置の停止時に慣性力により果実が揺れるが、揺れの振幅が大きいと果実の正確な位置を検出できない。そこで、横移送装置停止後の果実位置の経時変化から揺れを最大 5 s 観測し、揺れの振幅が 10 mm 未満であれば、果実位置が安定したと判断する。5 s 経過して振幅が 10 mm 以上の場合、収穫が困難と判断し、横移送装置を走行させて次の果実

を探す。

- ④ 果実位置が安定したことを確認した後、位置検出ユニットにより位置を検出した果実と着色率測定ユニットにより着色率を測定する果実とを一致させるため、同一果実のマッチングを行い、その後、着色率測定を行う。
- ⑤ 着色率測定では、栽培ベッド側から通路側に向かって果実を横方向（赤道部）から撮影して着色率測定ユニットの赤色・緑色・白色の照明を ON/OFF させ、各照明による画像を取得する。
- ⑥ 着色率 80% 以上で収穫適期と判定した場合、採果動作に移行し、未熟果と判定した場合、横移送装置の走行を再開する。
- ⑦ 収穫適期と判定した果実に対しエンドエフェクタが接近して果実の吸着を検知した場合、採果動作を行い、収容箱に果実を収容後、マニピュレータが基本姿勢に移行し、横移送装置の走行を再開する。果実の吸着を検知しなかった場合、採果動作を行わず、マニピュレータが基本姿勢に移行した後、横移送装置の走行を再開する。

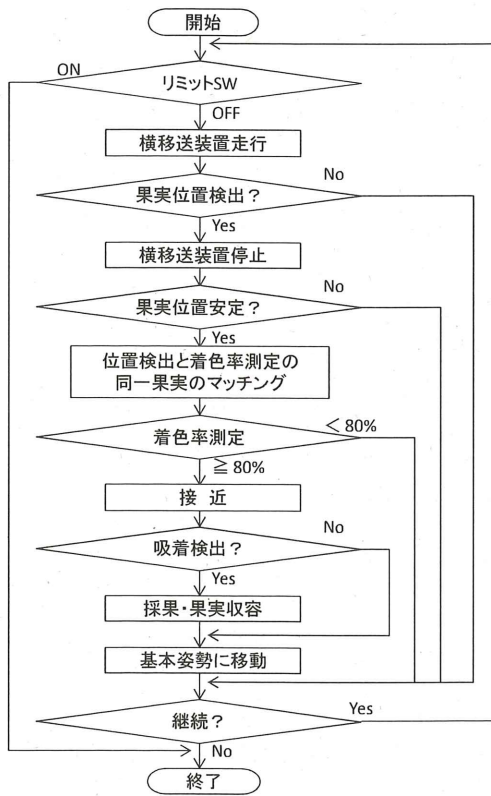


図 3-3 自動収穫作業のフローチャート

3.3 マニピュレータ

本研究では収穫精度向上のためのメカニズム解明に重点的に取り組むため、マニピュレータに市販の7自由度多関節マニピュレータ（三菱重工業㈱：PA10-7C）を用いて、エンドエフェクタを任意の位置姿勢に維持できるように制御した（図 3-4、表 3-1）。

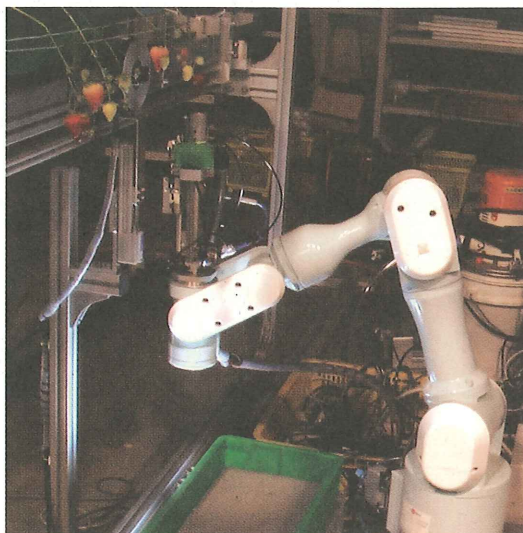


図 3-4 マニピュレータ

表 3-1 マニピュレータの概要

形式・関節数	垂直多関節形・7			
関節構成	ロボット取付け面より r-p-r-r-p-r-p-r (r は回転関節, p は旋回関節。)			
関節名称	ロボット取付け面より S1-S2-S3-E1-E2-W1-W2 (S は肩関節, E は肘関節, W は手首関節。)			
アーム長	全長: 1317 mm, 肩リーチ: 317 mm (ベース面~S2 間), 上腕: 450 mm (S2~E1 軸間), 下腕: 480 mm (E1~W1 軸間), 手首リーチ: 70 mm (W1~メカニカルインタフェース面間)			
軸名称	メカ リミット (°)	サーボ リミット (°)	ソフトウェア リミット (°)	最高動作 速度 (rad/s)
S1 (回転)	±180	±178	±177	±1
S2 (旋回)	±97	±95	±94	±1
S3 (回転)	±180	±175	±174	±2
E1 (旋回)	±143	±138	±137	±2
E2 (回転)	±270	±256	±255	±2π
W1 (旋回)	±180	±166	±165	±2π
W2 (回転)	±270	±256	±255	±2π
可搬質量	10 kg			
本体質量	40 kg			

栽培ベッドとの位置関係を図 3-5 に示す。マニピュレータの先端を上向きにしてエンドエフェクタを搭載し、下側から果実に接近できるようにした。また、栽培ベッド及びマシンビジョンの配置に応じて可動範囲を設定し、周辺機器とエンドエフェクタ及びマニピュレータとの干渉防止を図った。

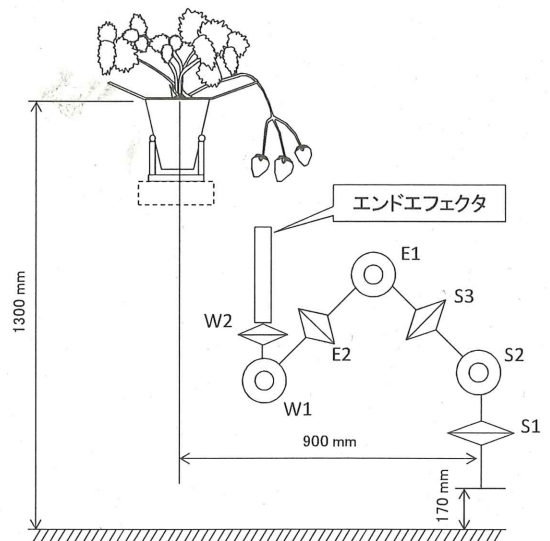


図 3-5 マニピュレータと栽培ベッドとの位置関係

3. 4 横移送装置

横移送装置は長さ 2650 mm, 幅 1120 mm, 高さ 1800 mm で, 長さ 1 m の高設栽培ベッドを 1 台積載し, 走行速度 0.03 m/s で幅 880 mm, 長さ 5 m のレール上を走行する。PC からデジタル入出力ボードを介して速度可変のインダクションモータ (60 W) の正逆転停止を切り替える。瞬時正逆転切替を防止するため, 制御信号が入力されてから 0.8 s 後に走行開始するようタイマを組み込んだ。また, レール両端にドグを設け, 移送部の両端にリミットスイッチを設置し, オーバーランを防止した。

3. 5 摘要

1) 栽培ベッドを移送する横移送装置及び定置型イチゴ収穫ロボットから構成される収穫試験システムの概要を

示した。収穫試験システムは, 1 台の PC により制御され, 自動で栽培ベッドを移動させながら自動収穫を行う。

2) 上記のシステムにおける自動収穫作業の流れを示した。自動収穫作業は, 栽培ベッドを移送する横移送装置の発進・停止, マシンビジョンによる果実検出・収穫適期判定, マニピュレータ及びエンドエフェクタによる採果・果実収容に大別され, 連続収穫作業を行うプログラムが構築された。

3) 本研究に適用した 7 自由度多関節マニピュレータの仕様及び設置条件を示した。マニピュレータは横移送装置に積載された栽培ベッドのイチゴの着果範囲を全てカバーすると同時に, 周辺機器との干渉を考慮して可動範囲を設定した。また, 走行速度 0.03 m/s で長さ 1 m の栽培ベッドを移送する横移送装置の概要を示した。

第4章 マシンビジョンの構築

本章では定置型ロボット用のマシンビジョンの構成、果実の個別認識・位置検出方法、着色率の測定方法及び位置検出と着色率を測定した同一果実のマッチング方法について報告する。定置型ロボットにおける果実の検出が容易なカメラ配置方法として、下側から上方に向かって果実を果頂部から撮影する方法を提案する。移動栽培装置も含め、高設栽培のイチゴ果実は、果房がベッドから垂れ下がっているため、土耕栽培と異なり、果実を下側（果頂部）から見る事が可能である。イチゴ果実を横方向（赤道部）から見る場合、多様な形状があり、さらに、ヘタの形状にも影響を受けることから、果実の形状特徴により個々の果実を認識することが難しい状況もあり得る。果実を果頂部の方向から見る場合、ヘタも見えず、果実画像の形状が円形に近い果実が多いことから、一般的な粒子解析の手法を用いることにより、果実が多少重なった場合でも個々の果実を認識することが比較的容易と考えられた。

イチゴ果実の赤道部の短果径と長果径の比で表される扁平指数は、Sサイズから3Lを越える階級における各平均値が‘紅ほっぺ’で0.93~0.98、‘章姫’で0.93~0.94、‘女峰’で0.85~0.96と報告されている⁷⁵⁾。すなわち、奇形果や乱形果を除き、正常なイチゴ果実を果頂部から見た場合、ほぼ円形に近いと推察される。検出する対象が円形に近い場合、果実が多少重なった状態でも一般的な粒子解析の手法を用いることにより個々の果実を認識することが比較的容易と見込まれた。第2章の基礎調査の結果、下側から見て障害物がある着果状態が3割未満であったことから、7割以上の果実が障害物に遮られることなくほぼ円形に近い形状として粒子解析手法を適用可能と考えられた。一方、下側から見て障害物の遮蔽度合が高い着果状態ほど果実領域の円形度が低く、粒子解析の過程で除外され、認識されないと推測された。

これまで果菜類の自動収穫のための位置検出方法として、ステレオ画像法¹⁹⁾、ビジュアルフィードバック法²⁴⁾が開発された。また、波長670nmの赤色光と波長830nmの近赤外線の種類2種類の光を投射し、赤色の反射率が高い作物表面で反射した光を変調光方式で受光する光センサ(PSD: Position Sensitive Device)を利用した三次元

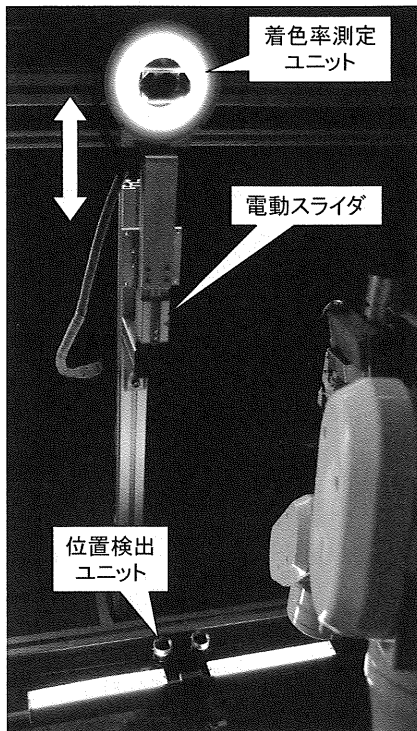
視覚センサ⁴¹⁾による位置検出方法が開発された。果実の個別認識と位置検出にはいずれの方法も適用可能と考えられたが、マニピュレータの動作とマシンビジョンの処理が独立し、簡素な構成である利点を持つステレオ画像法を採用した。

また、果菜類の自動収穫では、収穫適期の判別を行う必要がある。これまでイチゴの収穫適期を自動判別するため、果実を横方向から撮影し、果実領域内部の赤色領域の割合を着色率として評価する手法が提案された⁵⁵⁾、⁵⁸⁾。果頂部から果実を見た状態での着色率の測定は困難であるため、横方向から赤道部に向かって果実を撮影する必要があるが、第2章の基礎調査により、高設栽培では通路側よりも栽培ベッド側から見た方が、障害物が少ないことがわかっている。そこで、移動栽培装置の栽培ベッドの側面に沿ってカメラと照明を設置し、着色率を測定する方法を採用した。位置検出と着色率測定で撮影した同一果実のマッチングのため、ステレオカメラと着色率測定カメラの座標系を変換する同次変換行列を算出し、着色率測定時に、位置検出した果実近傍以外の領域をマスク処理することにより、マッチング精度の向上を図った。

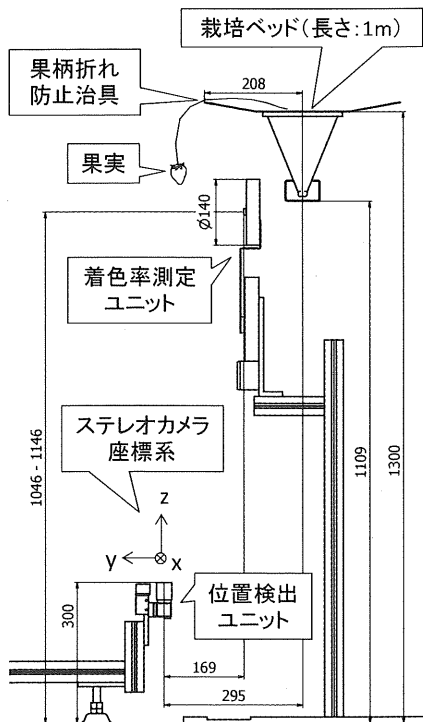
着色率測定のため、従来、白色照明のみが用いられてきた。しかし、未熟であっても果実全体が薄いピンク色に着色することがあり、従来の着色率測定方法では、このような中間的な着色領域における収穫適期の判別に必要な閾値の決定が困難と考えられた。そこで、イチゴ果実の分光反射特性を考慮し、白色照明に加え、赤色（ピーク波長：660nm）及び緑色（ピーク波長：525nm）の照明を用いて各照明による画像を取得し、各画像を画像処理して着色率を算出することにより、測定精度の向上を試みた。

4.1 マシンビジョンの構成

マシンビジョンの概要を図4-1に示す。マシンビジョンは果実の個別認識及び位置検出を行う位置検出ユニットと、着色率を測定する着色率測定ユニットから構成される。以下に各ユニットの構成を示す。



(a) 構成



(b) 配置

図 4-1 マシンビジョンの概要

4. 1. 1 位置検出ユニット

2 台の IEEE1394a デジタルカラーカメラ (本体: Point Gray Research Flea, 有効画素数: 1024×768; レンズ: SPACECOM JHF12MK, 焦点距離: 12 mm, 絞り: F1.4-16) をステレオカメラとし, コンパクト化を図るため, 60 mm の間隔で上方に向けて配置した。マニピュレータ等との干渉を避けるため, レンズ上面を床から高さ 300 mm 以下とした。照明は, 画像処理用 LED 照明 (日進電子工業㈱: WDL-20027, 消費電力 8.4 W) 2 台を用い, ステレオカメラ近傍に配置した。カメラと照明に偏光フィルタを取り付け, 正面反射光を除去した。画像処理ソフトウェア (MVTec: HALCON 8.0) によりステレオカメラの校正を行うとともに, ステレオカメラ座標系からロボット座標系への同次変換行列 ${}^{Stereo-Cam}H_{Robot}$ を求めた。変換行列式を以下に示す。

$$\begin{aligned}
 & {}^{Stereo-Cam}H_{Robot} \\
 &= \begin{pmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} -0.698028 & -0.71607 & -0.0010821 & -0.00916291 \\ 0.715995 & -0.697975 & 0.0135259 & 0.559059 \\ -0.0104408 & 0.00866666 & 0.999908 & -0.103017 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4-1)
 \end{aligned}$$

ここで第 1 列ベクトル n はロボット座標系での x 軸方向の単位ベクトルをステレオカメラ座標系で表したものである。同様に s , a は y 軸方向, z 軸方向の単位ベクトルをステレオカメラ座標系で表したものである。第 4 列ベクトル p はステレオカメラ座標系からロボット座標系への平行移動成分である。

なお, カメラを上方に向けることにより, 継続的に使用した場合に落下した茎葉の一部, 水滴, 粉塵がカメラレンズに付着し, 計測精度が極端に低下することが危惧された。これに対し, 天井が傾斜した透明なカバーで位置検出ユニット全体を覆い, 作業開始前に作業者がカバーを清掃するという手段により影響が軽減されると推察された。

4. 1. 2 着色率測定ユニット

移動栽培装置の栽培ベッド側から通路側に向かって果実を撮影するため, 着色率測定ユニットの省スペース化

を図る必要があり、小型カメラ（本体：Point Gray Research FireMV，有効画素数：640×480；レンズ：(有)ユニエル電子 LNS-B2.45，焦点距離：2.45 mm)を採用した。複色色の照明を使用するため、RGBWの4色LED照明（日進電子工業(株)：RGBWDR-140，消費電力14.4 W）を用いたが、ピーク波長470 nmの青色LEDは使用しなかった。白色LEDの波長は複数のピークがあり、赤色LEDのピーク波長は660 nm，緑色LEDのピーク波長は525 nmであった。カメラと照明に偏光板を取り付け、正面反射光を除去した。各照明のON/OFFはPCからデジタル入出力ボード（CONTEC：PIO-32/32L(PCI)H）を介して制御した。なお、イチゴの高設栽培では、果房の重みで株元近傍から伸びる果柄が折れるのを防止するため、果柄折れ防止治具で果柄を支えるのが一般的である。着色率測定ユニットは栽培ベッドの果柄折れ防止治具の下に位置しており、栽培ベッド移動時の果実との干渉はほとんど生じない。

栽培ベッド側にカメラと照明を設置した場合、カメラと果実の距離が短く、視野に入る果実の3次元位置の範囲が狭く限られた。そこで、電動スライダ（SUS：XA-35L-100，最大速度：50 mm/s，ストローク100 mm）にカメラと照明を取り付け、果実の位置検出情報に基づき、10 mm刻みで上下動するようPCから電動スライダのコントローラにRS232Cにより制御信号を出力した。これにより、視野が上下方向に100 mm拡がると同時に、電動スライダの動作範囲内の果実は赤道部のほぼ正面から撮影できた。

着色率測定カメラの校正をステレオカメラと同様に画像処理ソフトウェアにより行い、後述する位置検出と着色率を測定した同一果実のマッチングのため、ロボット座標系から着果率測定カメラ座標系への同次変換行列 ${}^{Robot}H_{Color-Cam}$ を算出した。変換行列式を以下に示す。

$$\begin{aligned}
 & {}^{Robot}H_{Color-Cam} \\
 &= \begin{pmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} -0.734117 & -0.678706 & -0.020733 & -0.0900703 \\ 0.010214 & 0.0194926 & -0.999758 & 0.919457 \\ 0.678946 & -0.734151 & -0.0073776 & 0.673893 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4-2)
 \end{aligned}$$

ここで第1列ベクトル n は着果率測定カメラ座標系での

x軸方向の単位ベクトルをロボット座標系で表したものである。同様に s 、 a はy軸方向、z軸方向の単位ベクトルをロボット座標系で表したものである。第4列ベクトル p はロボット座標系から着果率測定カメラ座標系への平行移動成分である。同次変換行列 ${}^{Robot}H_{Color-Cam}$ の第4列ベクトル成分 p_z は電動スライダの移動量に基づき逐次更新する。

4. 2 位置検出方法

4. 2. 1 位置検出アルゴリズム

ステレオ画像法による位置検出の模式図を図4-2に示す。エピポーラ線とは、複数の視点に置かれたカメラから得られる複数の画像において、ある画像上に投影された点に対応する他の画像上の投影点の候補がなす直線である⁷⁶⁾。キャリブレーションにより校正されたステレオカメラの3次元空間の点 $P(X, Y, Z)$ が左右の画像上の点 $p_l(x_l, y_l)$ 、 $p_r(x_r, y_r)$ に像を結ぶ場合、座標は次式で表される⁷⁷⁾。

$$X = \frac{b(x_l + x_r)}{2d} \quad (4-3)$$

$$Y = \frac{by}{d} \quad (4-4)$$

$$Z = \frac{bf}{d} \quad (4-5)$$

b は光学中心間の距離、 $y = y_l = y_r$ ，視差 $d = x_l - x_r$ ， f はカメラの焦点距離である。

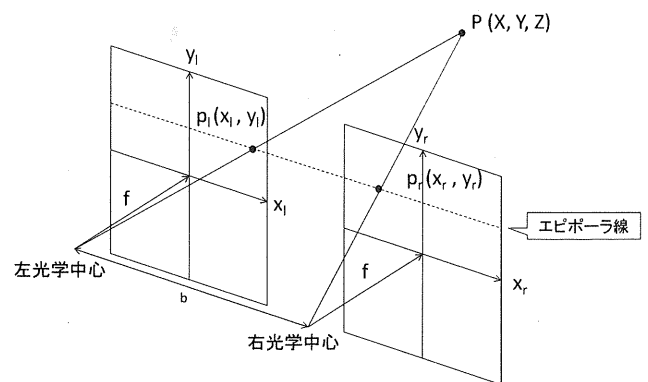
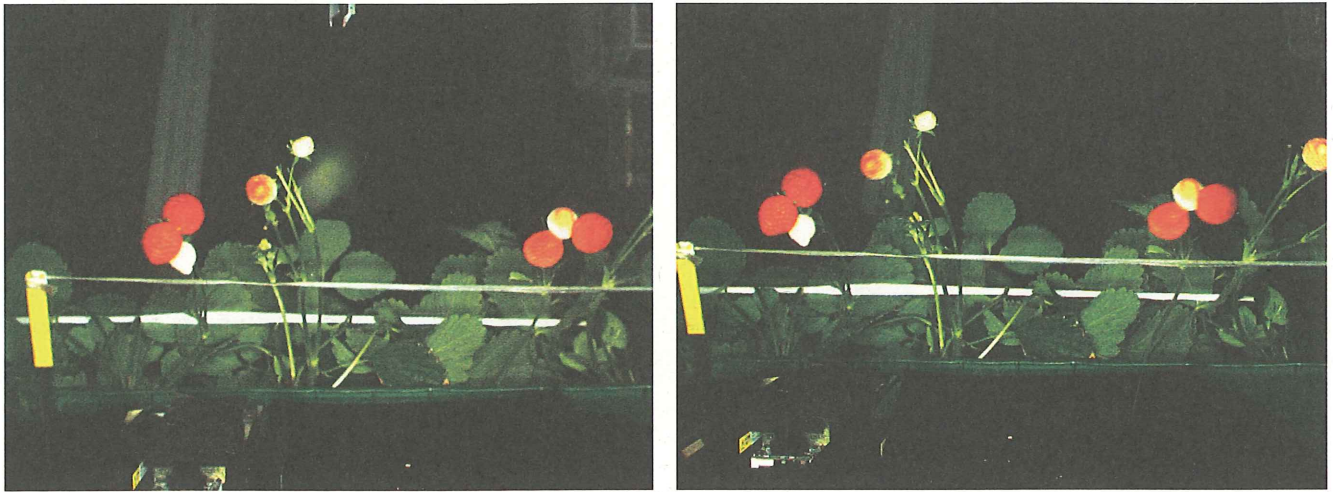


図4-2 ステレオ画像法による位置検出の模式図⁷⁷⁾



(a) 左カメラ

(b) 右カメラ

図 4-3 ステレオカメラにより果実の下側から撮影した画像例

図 4-3 に示すように、実際の高設栽培のイチゴでは複数の果実が重なり合う着果状態が珍しくないが、こうした状況においても果実を個別に認識し、個々の果実の位置を求める必要がある。そこで、円形収縮、境界線の平滑化、ラベリング、円形膨張という粒子解析手法を導入し、ノイズを除去するとともに、連結した円形領域を分

割し、果実の個別認識を行う。図 4-4 は、図 4-3 (a) の赤色領域を二値化、ラベリングし、各領域の円形度を算出したものである。

1/円形度が 1.2 以上の領域は複数の果実が重複していると考えられたため、図 4-5 に示す粒子解析手法により分離した。

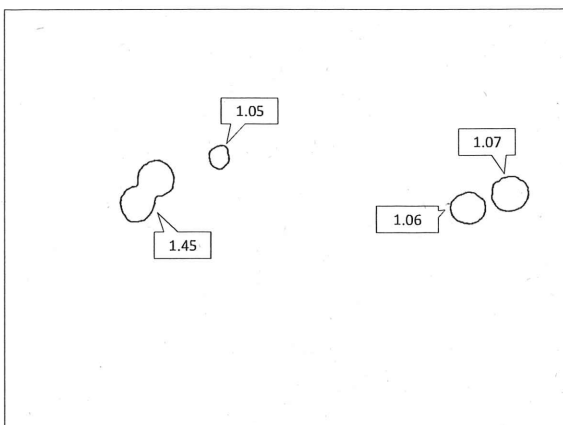


図 4-4 赤色領域の抽出及び円形度の評価
(数値は 1/円形度)

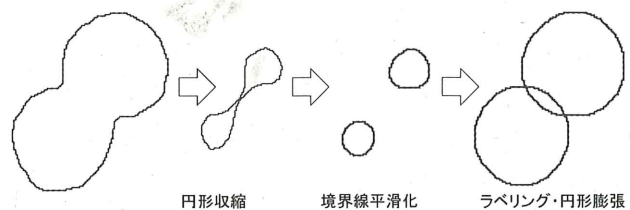


図 4-5 粒子解析手法による重複領域の分離

複数の果実が重なり合う着果状態の果実の位置検出アルゴリズムを図 4-6 に示す。

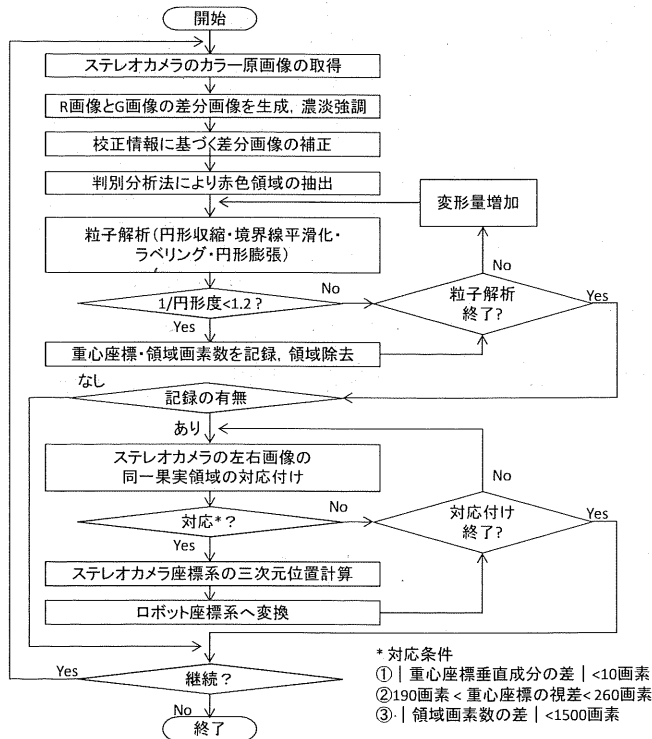


図 4-6 位置検出のフローチャート

- ① ステレオカメラでカラー原画像を得た後、赤色が強調された画像を得るため、R 画像と G 画像の差分画像を生成し、濃淡強調する。
- ② 差分画像を画像処理ソフトウェアにより得られた校正情報に基づき補正した後、判別分析法により二値化の閾値を決定し、画像中の赤色領域を抽出する。
- ③ 赤色領域において、円形収縮、境界線の平滑化、ラベリング、円形膨張という粒子解析手法を導入し、ノイズを除去するとともに、連結した円形領域を分割し、果実の個別認識を行う。まず、ラベリングした各領域の円形度（領域面積 A 、周囲長 L として $4\pi A / L^2$ ）を算出し、その逆数が 1.2 未満の領域を果実領域として認識する。
- ④ 果実領域の重心座標及び領域画素数を記録し、記録済の果実領域を元の赤色領域から一時的に除去する。領域の変形量を大きく設定すると、小さな果実が重なって見えた場合に円形収縮の過程でこれらの領域を消去してしまい、逆に小さく設定すると、大きな

果実が重なって見えた場合に分割できないことが懸念された。そこで、最初は小さな変形量を設定して円形に近い領域や比較的小さな果実領域を抽出し、円形度の条件を満たさない領域が存在する間、変形量を順次増加し、比較的大きな果実領域同士が連結している場合でも対応可能とした。変形量を増加する回数は最大 10 回とし、それでも円形度の条件を満たさない領域は無視する。

- ⑤ 記録済の果実領域を順次一時的に除去していき、赤色領域がなくなった時点又は変形量が増加した回数が 10 回を越えた時点で粒子解析を終了する。
- ⑥ 粒子解析終了後、円形度の条件を満たす領域の重心座標と領域画素数の記録が存在する場合、ステレオカメラの左右画像の同一果実領域の対応付けを開始する。
- ⑦ ステレオカメラの左右画像の同一果実領域の対応付けは、左右画像でそれぞれ記録した重心座標と領域画素数を比較し、左右画像の果実領域の全ての組み合わせを検証し終わった時点で対応付けを終了する。対応条件は、重心座標の垂直成分の差が ±10 画素以内にあり、水平成分の視差が高設栽培において果実が分布すると考えられるステレオカメラからの距離 (0.7~1.0 m) から算出される視差の範囲 (190~260 画素) にあり、領域画素数の差が 1500 以内である場合、同一果実として対応したと見なす。
- ⑧ 対応条件を満たした組み合わせにおいて、左右画像の同一果実領域の各重心座標からステレオカメラ座標系における三次元の重心位置を計算し、(4-1) 式の同次変換行列 ${}^{Stereo-Cam}H_{Robot}$ によりロボット座標系へ変換する。位置検出アルゴリズムの所要時間は、2.4 GHz の CPU (Intel Core 2 Quad Q6600) を搭載した PC で約 0.05 s であった。

4. 2. 2 基礎試験方法

1) 粒子解析手法のシミュレーション

位置検出アルゴリズムのうち粒子解析手法による果実の個別認識の性能を検証するため、以下のシミュレーションを行った。

大きさが異なる複数の円を 1024×768 画素の画像中にランダムに配置し、フレームから一部はみ出している円

を画像中央寄りに再配置した後、重なっている領域を連結した。連結した領域を前述の位置検出アルゴリズムにおける赤色領域とし、粒子解析手法により分割し、円の個別認識を試みた。個別認識の成否は、連結前の円の重心座標及び領域画素数と、粒子解析により抽出した円形領域の重心座標及び領域画素数を比較し、重心座標の垂直成分及び水平成分の差が ± 25 画素未満、領域画素数の差が元の円の領域画素数の10%未満である場合、成功と判断した。次式により個別認識率を求めた。

$$P_r = n_r / n_t \times 100 \quad (4-6)$$

ここで P_r ：個別認識率， n_r ：認識された円の数， n_t ：配置された円の数とした。

ランダムに配置した円の重なりが大きいほど粒子解析による円形領域の分割が困難となり、元の円の個別認識率が低下することが推察されたことから、円の重なりの評価のため、次の式を用いて重なり率を算出した。

$$P_o = \frac{N_c - N_r}{N_c} \times 100 \quad (4-7)$$

ここで P_o ：重なり率， N_c ：連結前の円の合計領域画素数， N_r ：連結後の領域の合計画素数とした。

配置した円の大きさは、果径 20~50 mm 程度の果実を想定し、直径 50~180 画素とし、円の数 は 5 個、10 個、15 個、20 個の試験区を設定した。各試験区で 100 回のシミュレーションを試行した。

2) ステレオカメラの同一果実領域の対応付けのシミュレーション

位置検出アルゴリズムのうちステレオカメラの左右画像の同一果実領域の対応付けのステップにおいて別の果実同士を対応付けする可能性をシミュレーションにより検証した。

ステレオ画像で同じ大きさの果実領域が同一エピソード線近傍に複数個並んでいる場合、画像中の果実領域の重心間距離が視差の範囲よりも小さければ、誤って別の果実領域と対応付けすることが危惧された。そこで、高設栽培において果実が分布すると考えられるステレオカ

メラからの距離 (0.7~1.0 m) から算出される視差の範囲 (190~260 画素) が 70 画素であることから、誤って対応付けする果径の範囲を明らかにするため、果径の大きさ別に、ステレオカメラからの距離と画像中の果径 (画素) をプロットした。

3) 果頂部からイチゴ果実を見た場合の位置検出精度
果頂部から果実を見た場合の位置検出精度を検証するため、最初にステレオカメラの基本性能を把握し、次に模型果実を果頂部から撮影し、基準点からの移動距離の測定精度を検討した。

ステレオカメラの基本性能を把握するため、7 自由度多関節マニピュレータに直径 30 mm の赤色の円が印刷されたプレートを設置し、ステレオカメラ正面で距離 0.5 m の地点からマニピュレータにより 100 mm ずつ離していき、各地点で 20 回位置を測定し、ロボット座標を基準として次式のように二乗平均平方根誤差 (RMS) を算出した。

$$e_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P - p_i)^2} \quad (4-8)$$

P はロボットによる設定位置， p_i はステレオカメラで推定した位置である。

模型果実の移動距離の検出精度を評価するため、大きさが異なる 4 個の模型果実 (果長: 25.8~52.1 mm, 長果径: 21.5~43.2 mm) をマニピュレータに設置し、果頂部から撮影した。ステレオカメラ正面で距離 0.5 m の地点を基準点として、模型果実をマニピュレータにより 0.1 m ずつ離していき、基準点からのマニピュレータの移動距離とステレオカメラで計測した基準点からの移動距離を各地点で 20 回測定し、比較した。

4. 2. 3 基礎試験の結果と考察

1) 粒子解析手法のシミュレーション

ランダムに生成した円、連結後の領域、粒子解析により分割した円形領域の例を図 4-7 に示す。円の重なり率 P_o と個別認識率 P_r のプロットを図 4-8 に示す。重なり率 P_o に比例して個別認識率 P_r が低下し、ばらつきがあるものの、重なり率 P_o が 20% 程度で個別認識率 P_r が半減した。

同程度の大きさの円が重なっている場合、円形度の条件が合えば円の大小にかかわらず分離できた。しかし、

小さい円と大きな円が重なっている場合、大きな円のみを認識する傾向が観察された。

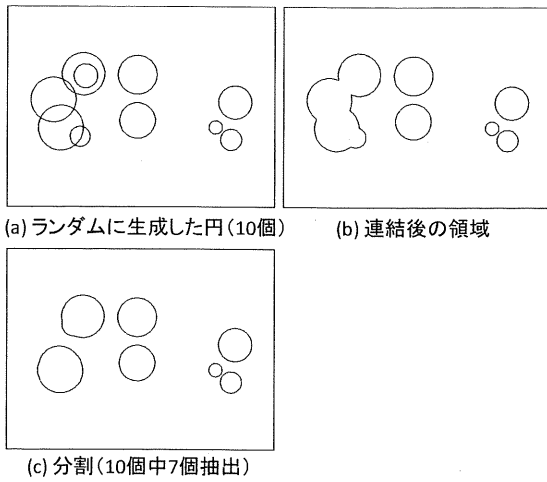


図 4-7 円の個別認識のシミュレーション結果例

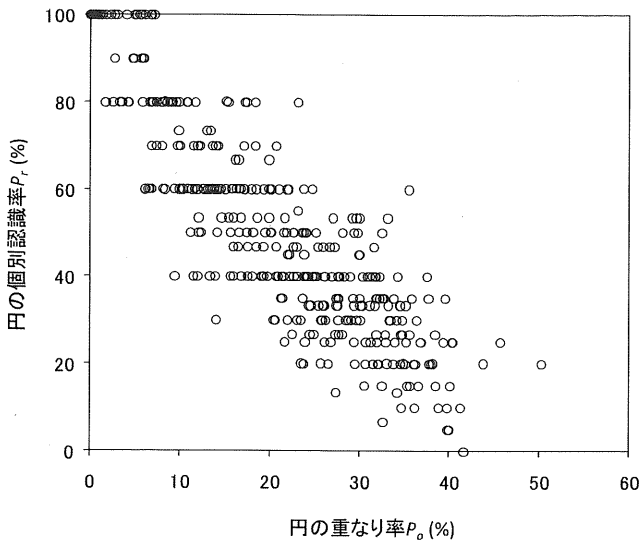


図 4-8 円の重なり率と個別認識率

2) ステレオカメラの同一果実領域の対応付けのシミュレーション

18~30 mm までの果径の大きさ別にステレオカメラからの距離と画像中の果径 (画素) を図 4-9 のようにプロットした。その結果、果径 26 mm 以下になると、果実同士が重なっていない場合でも、カメラからの距離の増加及び果径の減少とともに、誤って対応付けする可能性が徐々に増加し、果径 18 mm 以下の果実が同一エピポーラ線上に隣接して並んでいる場合、誤って対応付けする可能性が極めて高いことが示唆された。

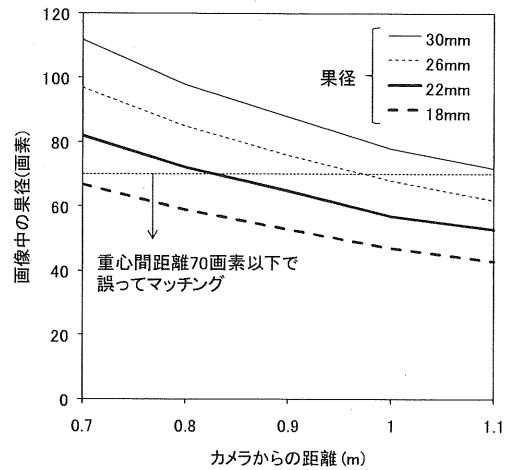


図 4-9 カメラからの距離と画像中の果径

3) 果頂部からイチゴ果実を見た場合の位置検出精度

ステレオカメラの基本性能の測定結果を図 4-10 に示す。カメラ光軸方向 (ロボット座標 z 軸方向) の誤差がカメラからの距離とともに増加した。各距離における測定値の標準偏差は x, y 軸方向でそれぞれ最大 0.1 mm, z 軸で最大 1.6 mm であった。

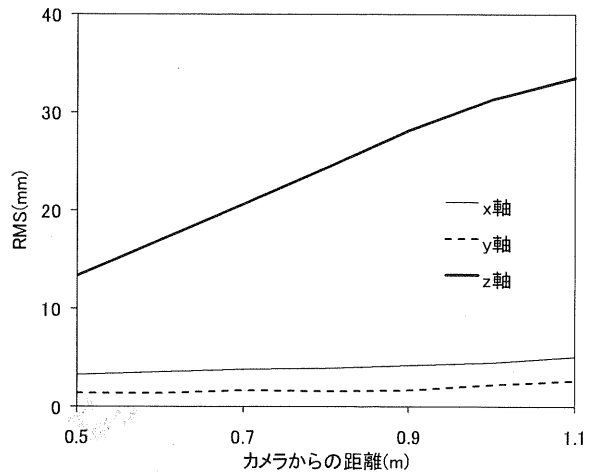


図 4-10 ステレオカメラの位置測定誤差 (RMS)

模型果実の移動距離の測定精度を測定した結果、x, y 軸方向誤差の RMS は最大 3 mm であったが、基本性能の測定時と同様に、z 軸方向の誤差が大きくなった。図 4-11 に模型果実の移動距離の z 軸方向誤差の RMS を示す。果径が小さい模型果実から順に果実番号を割り当てた。各移動距離における測定値の標準偏差は x 軸方向で最大 0.7 mm, y 軸方向で最大 0.4 mm, z 軸で最大 10.3 mm であった。

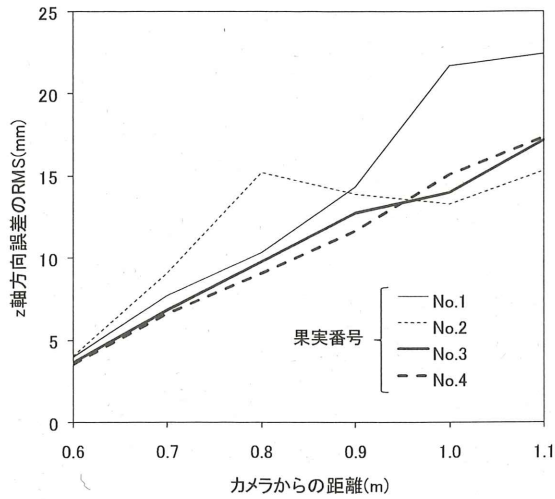


図 4-11 模型果実を用いて測定したカメラからの距離と移動距離検出誤差 (RMS)

基礎試験の結果、このマシンビジョンシステムに適用可能なエンドエフェクタを設計するためには、果頂部からイチゴ果実を見た場合の z 軸方向の位置検出誤差を補う必要があると推察された。すなわち、エンドエフェクタが果実に接近する際、z 軸方向に手前 30 mm 付近に移動した後、上昇しながら果実の有無をセンサにより確認し、検出した時点でエンドエフェクタを停止することにより、エンドエフェクタの適正な位置決めが可能と考えられた。

4. 3 着色率測定方法

4. 3. 1 着色率測定アルゴリズム

図 4-12 に分光測色計 (ミノルタ: CM-2002) により計測したイチゴの果実赤道部の分光反射特性及び LED 照明の相対発光強度を示す。赤色 LED 照明のピーク波長 650 nm では、葉の反射率が低く、着色の有無にかかわらず果実部分の反射率が高かった。緑色 LED 照明のピーク波長 525 nm では、着色部分の反射率が低く、葉及び未着色部分の反射率が高かった。そこで、これらの波長をピークとする照明を複数使用することにより、着色領域、未着色領域の他、完全に着色していない中間着色領域を抽出した。この中間着色領域の影響を低減することにより、着色率を正確に測定するアルゴリズムを考案した。

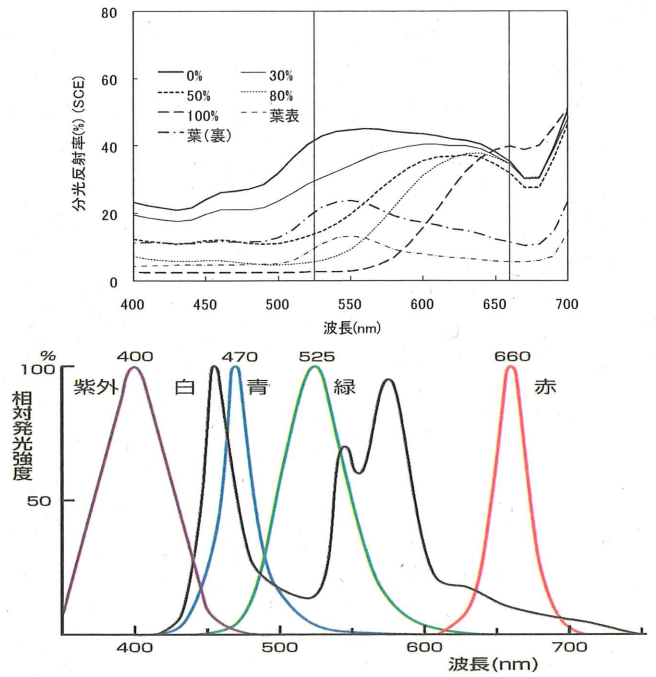


図 4-12 イチゴの果実赤道部及び葉の分光反射特性 (上) 並びに各 LED 照明の相対発光強度⁷⁸⁾ (下)

図 4-13 に着色率測定のプロチャートを、図 4-14 に各グレイ画像及び抽出領域を示す。赤色照明で撮影したカラー原画像から R 画像 (R_r) を読み込む。次に赤色照明を緑色照明に切り替え、撮影したカラー原画像から G 画像 (G_g) を読み込む。さらに緑色照明を白色照明に切り替え、撮影したカラー原画像から R 画像 (R_w) と G 画像 (G_w) を読み込む。各照明の設定照射時間は 200 ms で、撮影後、50 ms で照明を切り替える。最終的に 3 つの画像を入力し終わるまでの時間は約 1 s であった。画像 R_r を判別分析法により得られた閾値により二値化し、ノイズ除去及び境界線の円滑化を行い、ヘタを除く果実全体領域 1 を抽出する。次に画像 G_g を判別分析法により二値化した後、その領域と領域 1 との論理積から未着色領域 2 を算出する。さらに画像 R_w と画像 G_w の差分画像 $R_w - G_w$ を生成し、濃淡強調した後、差分画像 $R_w - G_w$ を判別分析法により二値化し、その領域と領域 1 との論理積から着色領域 3 を求める。その後、未着色領域 2 と着色領域 3 の共通領域を中間着色領域 4 として抽出する。複数色照明による着色率は、次式を用いて算出する。

$$P_{rgw} = \frac{N_3 - N_4}{N_2 + N_3 - N_4} \times 100 \quad (4-9)$$

ここで P_{rgw} : 複数色照明による着色率, N_2 : 未着色領域 2 の画素数, N_3 : 着色領域 3 の画素数, N_4 : 中間着色領域 4 の画素数とした。

中間着色領域 4 の面積割合は, (4-9)式から

$$P_4 = \frac{N_4}{N_2 + N_3 - N_4} \times 100 \quad (4-10)$$

と表すことができる。ここで P_4 : 中間着色領域 4 の面積割合とした。

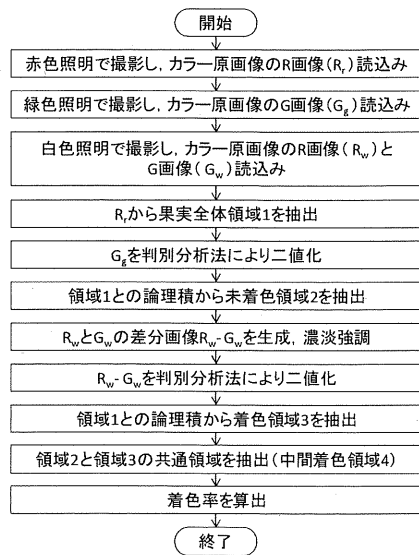


図 4-13 着色率測定のプロフローチャート

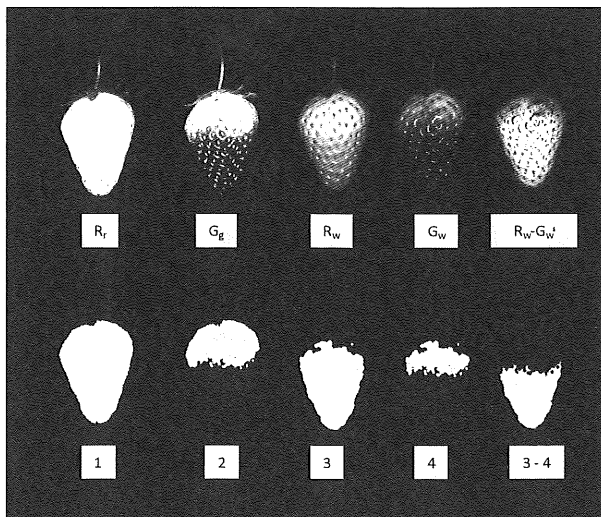


図 4-14 着色率測定のプロセス画像及び抽出領域

なお, 複数色照明の効果を検証するため, 白色照明のみを使用した場合と比較する必要があると考えられた。このため, 画像 R_w から判別分析法により果実全体領域を抽出し, 白色照明のみによる着色率を次式により求める。

$$P_w = N_3 / N_1 \times 100 \quad (4-11)$$

ここで P_w : 白色照明のみによる着色率, N_3 : 着色領域 3 の画素数, N_1 : 画像 R_w から判別分析法により抽出した果実全体領域の画素数とした。また, 画像処理ソフトウェアにより R_w, G_w, B_w を用いて HSI, $L^*a^*b^*$ の色変換を行い, Hue 及び a^* から着色領域 3 を抽出し, (4-11)式により着色率を算出する。

4. 3. 2 基礎試験方法

複数色の照明を用いる着色率の測定方法のアルゴリズムを検証するため, 着色率測定ユニットに採用した小型カメラではなく, ステレオカメラで使用した 80 万画素のカメラを用いた。'紅ほっぺ' (質量 4.0~35.4 g, 平均 12.7 g) を 118 個供試し, カメラから距離 25 cm の地点に果実を設置して撮影し, 画像処理により算出した着色率を目視による着色率と比較した。各照明の明るさは, 果実を設置した地点で赤 40~41 lx, 緑 467~512 lx, 白 484~671 lx であった。

作業者が収穫適期を判定する際, 着色率 80%未満の果実を未熟果と判断するが, こうした収穫適期を判定する精度を評価するため, 次の式を用いた。

$$r_m = c_m / h_m \times 100 \quad (4-12)$$

$$r_{im} = c_{im} / h_{im} \times 100 \quad (4-13)$$

- r_m : 収穫適期果実の適正判定率
- r_{im} : 未熟果の収穫適期誤判定率
- c_m : 画像処理により収穫適期と正しく判定した収穫適期果実数
- h_m : 目視判定で着色率 80%以上であった収穫適期果実数

c_{in} ：画像処理により収穫適期と誤判定した未熟果数

h_{in} ：目視判定で着色率 80%未満であった未熟果数

収穫適期の適正判定率 r_m により収穫適期果実を見落とさなく判定できるかを評価でき、収穫適期誤判定率 r_{in} により未熟果を収穫適期と誤判定しないかを評価できると見込まれた。

4. 3. 3 基礎試験の結果と考察

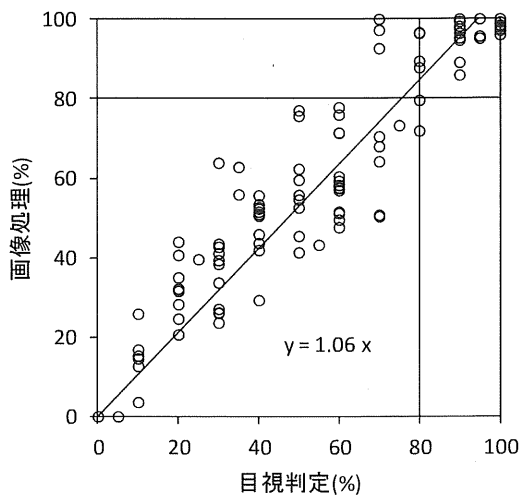
図 4-15 及び表 4-1 に着色率の測定結果を示す。目視判定による着色率と複数色照明による着色率 P_{rgv} の相関係数は 0.93，測定誤差は平均 5.4%，標準偏差 10.8%であった。測定誤差の平均値は HSI で最も大きく，標準偏差は

$L^*a^*b^*$ で最大となった。

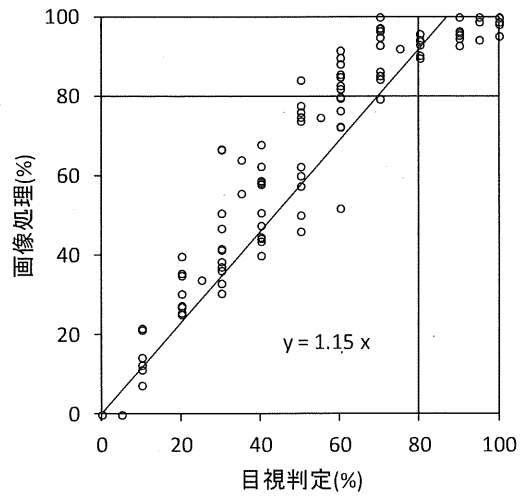
表 4-1 着色率の相関係数及び測定誤差の平均値

測定方法	相関係数	測定誤差の平均値 (%)
複数色照明	0.93	5.4 (10.8)
白色照明	0.94	11.6 (10.4)
HSI	0.92	14.8 (11.9)
$L^*a^*b^*$	0.93	3.2 (12.2)

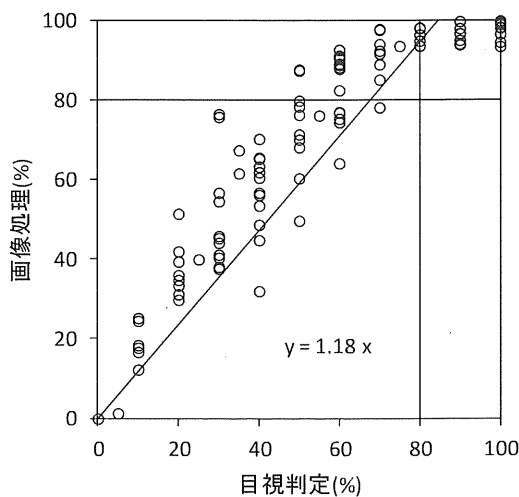
目視により判定した着色率別に平均した中間着色領域 4 の面積割合を図 4-16 に示す。着色率 50~70%の果実において中間着色領域 4 の平均面積割合が高くなった。



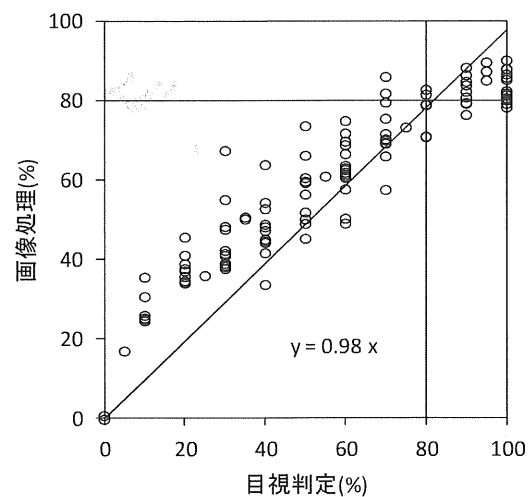
(a) 複数色照明



(b) 白色照明



(c) HSI



(d) $L^*a^*b^*$

図 4-15 着色率の測定結果

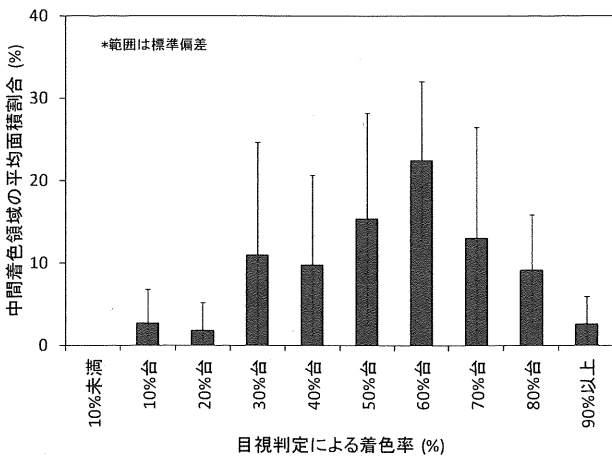


図4-16 中間着色領域4の平均面積割合

表4-2に収穫適期の判定精度を複数色照明と白色照明と比較した結果を示す。収穫適期の適正判定率 r_m は $L^*a^*b^*$ で大幅に低下し、複数色照明でも若干低下した。未熟果を収穫適期と誤判定する収穫適期誤判定率 r_{im} は白色照明及びHSIで高くなった。収穫適期果実を見落とした場合、作業者の補完作業が可能であるが、未熟果を収穫した場合、収穫した未熟果を出荷できないことを考慮し、複数色照明の方が自動収穫に適すると判断された。

表4-2 収穫適期の判定性能

測定方法	収穫適期の 適正判定率	収穫適期誤判定率
	r_m (%)	r_{im} (%)
複数色照明	94.1	7.1
白色照明	100.0	23.8
HSI	100.0	27.4
$L^*a^*b^*$	73.5	2.4

4.4 位置検出と着色率測定における同一果実のマッチング

4.4.1 マッチングのアルゴリズム

本マシンビジョンでは位置検出と着色率測定でそれぞれ別の角度から果実を撮影しているため、同一果実のマッチングが不完全である場合、収穫適期果実を見逃すことや未熟果に対し採果すべきと誤判定することが危惧される。そこで、着色率測定カメラの画像において、位置検出した果実以外の領域をマスク処理することにより、同一果実のマッチング精度の向上を図った。図4-17にマ

スク処理のフローチャート、図4-18にマスク処理の模式図を示す。

- ① 最初に、位置検出ユニットにより果実の重心位置を測定する。果実が複数ある場合、できるだけ着色率測定ユニットに対して露出した果実を選択するため、重心位置が最も栽培ベッドに近い果実を選定する。ステレオカメラの画像中で、選定した果実の重心 p_c 上の水平直線と選定した果実領域との共通領域 L を抽出し、その端点 p_1, p_2 を求める。各点を同次変換行列 ${}^{Stereo-Cam}H_{Robot}$ によりロボット座標系に変換する。

$$\begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{pmatrix} = {}^{Stereo-Cam}H_{Robot} \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4-14)$$

ここで、 (q_x, q_y, q_z) は各点のステレオ座標系の位置、 (r_x, r_y, r_z) は各点のステレオ座標系の位置を表す。

- ② 重心 p_c の三次元位置の z 座標に基づき、着色率測定ユニットのカメラと照明の位置が果実正面になるように電動スライダを上下動した後、撮影する。電動スライダの上下動によりロボット座標系における着色率測定カメラの位置が変化するので、ロボット座標系から着果率測定カメラ座標系への同次変換行列 ${}^{Robot}H_{Color-Cam}$ を更新する。端点 p_1, p_2 を同次変換行列 ${}^{Robot}H_{Color-Cam}$ により着果率測定カメラ座標系に変換する。

$$\begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \\ 1 \end{pmatrix} = {}^{Robot}H_{Color-Cam} \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4-15)$$

ここで、 (b_x, b_y, b_z) は各点の着果率測定カメラ座標系の位置を表す。

- ③ 校正により得られた着果率測定カメラの焦点距離 f (1.58416 mm)、放射歪み係数 κ (-162194)、画像の主点 (c_x, c_y) = (319.51 画素, 210.509 画素)、CCD セル間距離 (s_x, s_y) = (3.50628 μ m, 3.5 μ m) を用いて、(4-15)式により算出した3次元位置 (b_x, b_y, b_z) を着

果率測定カメラの画像に投影する⁷⁹⁾。まず、カメラの画像平面座標系 (u, v) への投影を次式により行う。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{f}{b_z} \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \end{pmatrix} \quad (4-16)$$

レンズ歪みにより発生する画像の歪みを次式により補正する。

$$\begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{pmatrix} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - 4\kappa(u^2 + v^2)}} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (4-17)$$

算出した座標 (\tilde{u}, \tilde{v}) から画像座標系 (r, c) は

$$\begin{pmatrix} r \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\tilde{v}}{s_y} + c_y \\ \frac{\tilde{u}}{s_x} + c_x \end{pmatrix} \quad (4-18)$$

と求められる。

- ④ 着色率測定カメラの画像に投影された端点 p_1, p_2 を通る垂直方向の直線を引き、その2本の垂直直線と画像の上下フレームで構成される長方形を求める

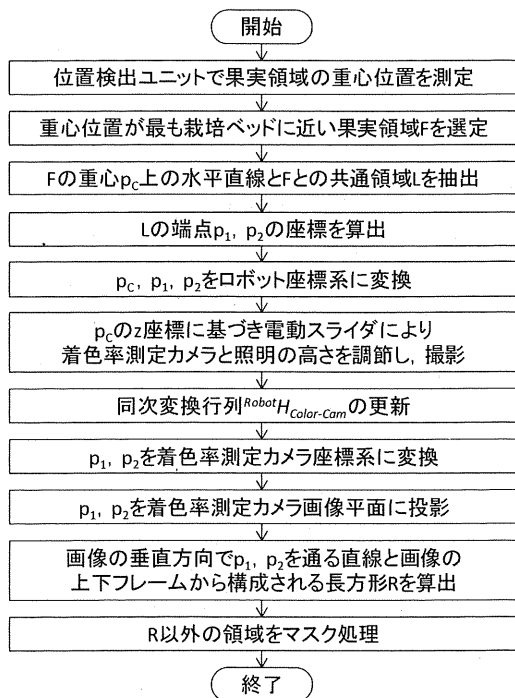


図 4-17 マスク処理のフローチャート

(図 4-18)。この長方形内に位置検出した果実が存在すると考えられたことから、長方形以外の領域をマスク処理し、画像上の他の果実をできるだけ除去する。この方法により、複数の果実がある状況でマッチングを行う場合、少なくとも画像上で水平方向に並んだ果実の影響を低減可能と推察された。

上記マッチングを含む着色率測定の所用時間は、2.4 GHz の CPU (Intel Core 2 Quad Q6600) を搭載した PC で約 0.04 s (位置検出時間及び電動スライダの動作時間は含まない) であった。

4. 4. 2 基礎試験方法

15 個の模型果実 (果長: 42.0~54.0 mm; 長果径: 34.3~43.8 mm; 着色率: 20%, 60%, 100%) を供試し、最初に、模型果実 1 個を位置検出ユニット上方に設置し、上述のプログラムを実行し、位置検出と着色率を測定した同一果実のマッチングの成否を記録した。次に、模型果実 2 個又は 3 個を並べて配置し、上述のプログラムを実行してマッチングの成否の他、マスク処理の有無と着色率の測定精度の関係を検討した。

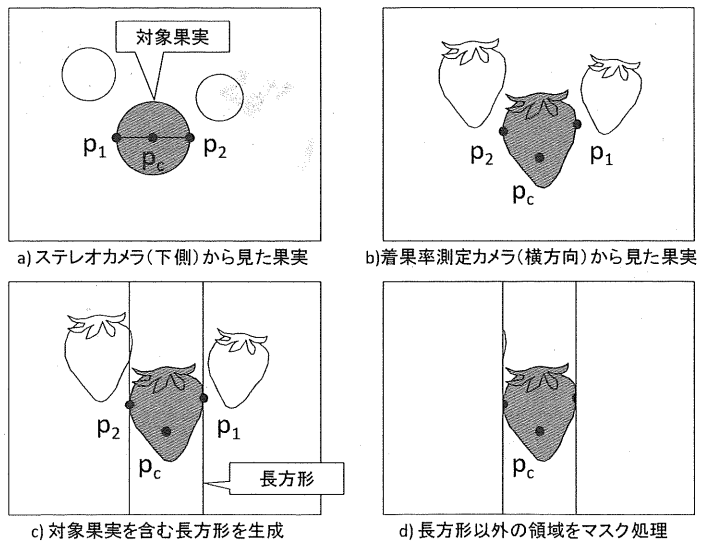


図 4-18 マスク処理の模式図

各照明の明るさは、果実を設置した地点で位置検出ユニットの照明が 150 lx, 着色率測定ユニットの照明が赤 90 lx, 緑 880 lx, 白 1840 lx であった。

4. 4. 3 基礎試験の結果と考察

供試したすべての模型果実で位置検出と着色率を測定した同一果実のマッチングに成功した。赤道部が着色している場合、ほぼ果実の両端を境界にマスク処理を行うことができた。

模型果実を複数個並べた場合、マスク処理がない場合の着色率の測定精度への影響が観察された。図 4-19 に模型果実を 3 個並べて撮影した着色率の測定結果を示す。

マスク処理がない場合、隣接果実の影響により測定値のばらつきが大きくなった。

図 4-20 では、着色率 100%の模型果実が、マスク処理がある場合は着色率 95%と測定され、マスク処理がない場合は隣接する未熟果との個別分離ができず着色率 58%と測定された。この結果、マスク処理により着色率測定時に隣接果実の影響を低減可能であることが示唆された。

4. 5 摘要

果実の位置検出及び着色率の測定を行う定置型イチゴ収穫ロボット用のマシンビジョンを構築し、以下の知見が得られた。

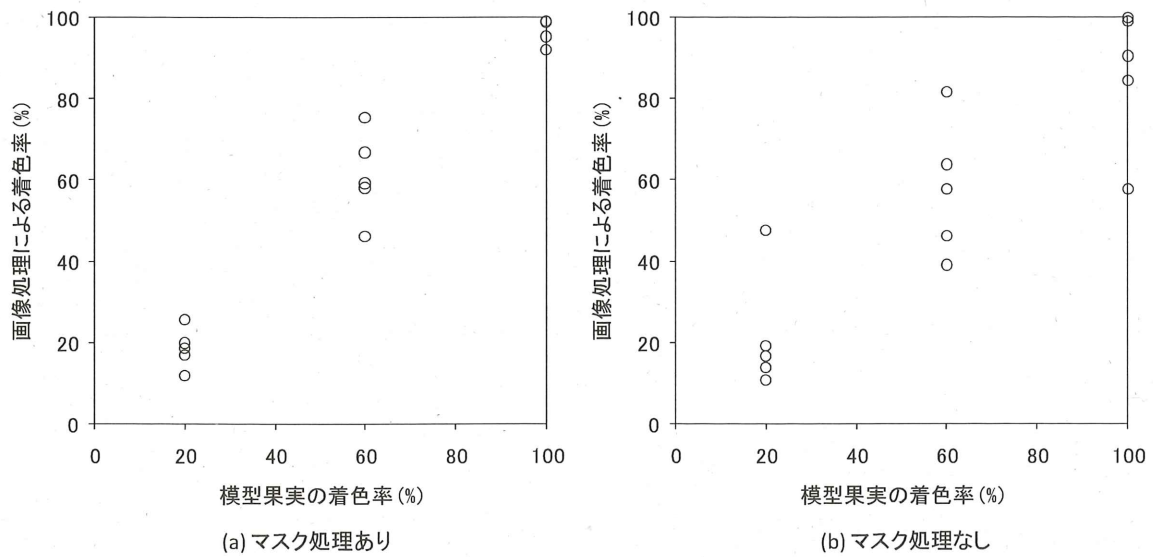
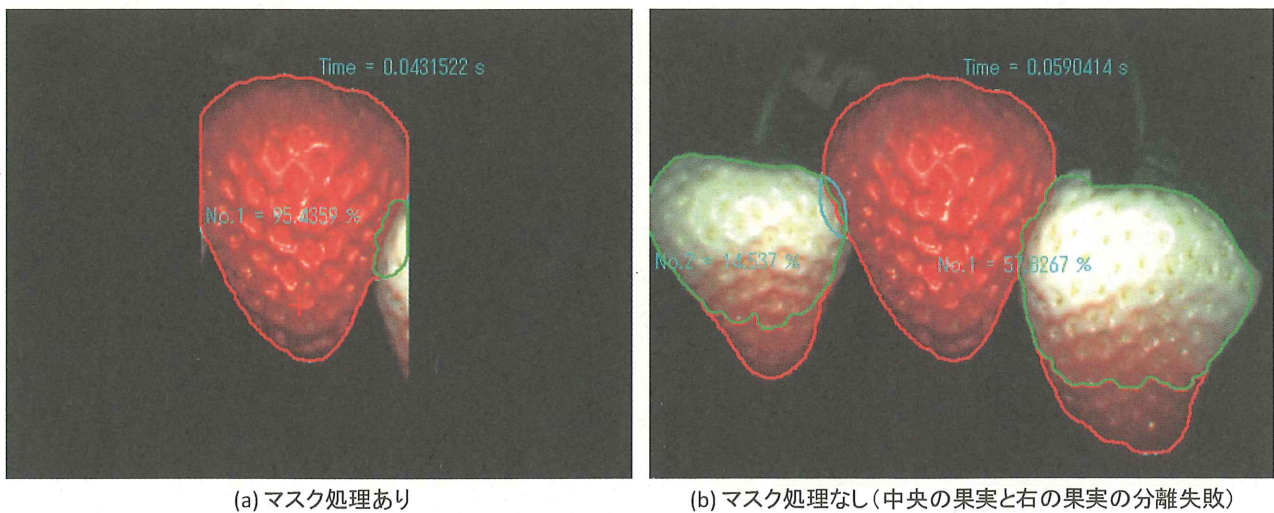


図 4-19 複数果実がある場合の着色率の測定結果



(a) マスク処理あり (b) マスク処理なし (中央の果実と右の果実の分離失敗)

図 4-20 マスク処理の有無による着色率測定例

1) 移動栽培のイチゴ果実を下側から撮影する位置検出ユニットと栽培ベッド側から撮影する着色率測定ユニットから構成されるマシンビジョンを構築した。着色率測定ユニットは電動スライダを有し、位置検出ユニットにより算出した果実の位置情報に基づき着色率測定カメラと照明を上下動し、電動スライダの動作範囲内にある果実を概ね赤道部正面から撮影できた。

2) 果実の個別認識のため、粒子解析手法を用いた位置検出アルゴリズムを開発した。個別認識のシミュレーションの結果、円の重なり率が20%程度で個別認識率が半減した。また、ステレオカメラの同一果実領域の対応付けのシミュレーションを行い、比較的小さな果実では異なる果実同士を対応付けする危険性があることが判明した。

3) ステレオカメラの位置検出精度を測定した結果、カメラ光軸方向の精度が不足していることが判明し、エンドエフェクタにより果実に接近する際、この誤差を考慮する必要があることがわかった。

4) 着色率測定は、イチゴ果実の分光反射特性を考慮し、白色照明に加え、赤色及び緑色の照明を用いて各照明による画像を取得し、画像処理により着色率を算出した。白色照明のみを使用して求めた着色率と比較し、着色率80%未満の未熟果を収穫適期と誤判定する割合が低減された。

5) マスク処理による位置検出と着色率を測定した同一果実のマッチング手法を考案し、供試した全ての模型果実でマッチングが成功し、着色率測定時の隣接果実の影響が低減可能であることが示唆された。

第5章 エンドエフェクタの開発

本章では、定置型ロボットにおけるエンドエフェクタの高機能化のため、果実・果菜類を対象としてこれまでに開発された移動型収穫ロボットのエンドエフェクタの問題点を動作段階別に検討し、各動作に必要な機能を提案する。まず、対象果実への接近動作では、エンドエフェクタが対象果実へ到達する前に未熟果や他の果柄等の障害物に接触する可能性がある。その場合、障害物が玉突き的に対象果実へ接触し、対象果実の位置が事前に検出した位置からずれてしまうと、エンドエフェクタが対象果実へ到達できない。そこで、こうした玉突き的な対象果実の位置変化を最小限に抑制する機能（位置変化抑制機能と呼ぶ）を提案する。次に、採果動作では、対象果実へ未熟果が隣接している場合、隣接果実を同時に採果する誤採果の発生が考えられる。そこで、隣接果実があっても、採果時に対象果実から隣接果実を引き離す機能（誤採果防止機能と呼ぶ）を提案する。また、従来のエンドエフェクタにおける採果した果実の収容動作では、果柄把持切断により採果された果実に果柄が残っているため、果実を個別に隔離する収容方法を採用しない場合、この果柄が他の果実を損傷することが危惧される。このため、作業者と同様に果実を果柄に対し傾斜させて引っ張り、果実と果柄の離層で分離し、果実に果柄を残さない機能（果柄除去機能と呼ぶ）を提案する。

さらに、採果精度と収穫時の果実損傷の危険性の関係に基づき、エンドエフェクタにおける有利な接近方法について考察する。果実損傷は、収穫時に果柄を把持し、果実に触れないことにより、作業者による慣行の収穫作業と比較して大幅に軽減できることが明らかになっており⁸⁰⁾、果実に触れずに果柄を把持・切断するロボットも開発された⁵⁷⁾⁻⁶⁴⁾。しかし、実際の栽培では複数の果柄が密集し、対象果実の果柄を正確に判別するのが困難な場合もあり、採果精度の低下が危惧される。一方、果実を負圧により吸着する方式でも損傷なく収穫可能であったという報告もある⁵²⁾。断面形状が円形の吸着管により果実を吸着する場合、一般にイチゴの正常果が円錐形に近いことを踏まえ、吸着管と果実との接触面の形状から、赤道部よりも果頂部を吸着する方が果実の大小に影響されずに安定した吸着が可能であると推察された。また、第4章のマシンビジョンの位置検出精度の基礎試験の結果、z軸方向の誤差を補うエンドエフェクタの設計が必要であることが分かった。そこで、果実の下側（果頂部）から接近し、確実に吸着してから採果するという方法により、大きな損傷を発生させることなく、果柄を把持する採果方法よりも高い採果精度が期待できると考えられた。

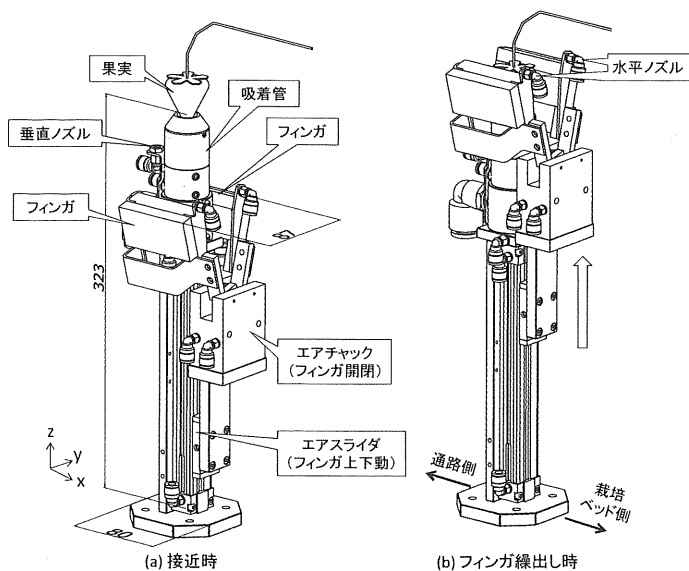


図 5-1 エンドエフェクタの概要

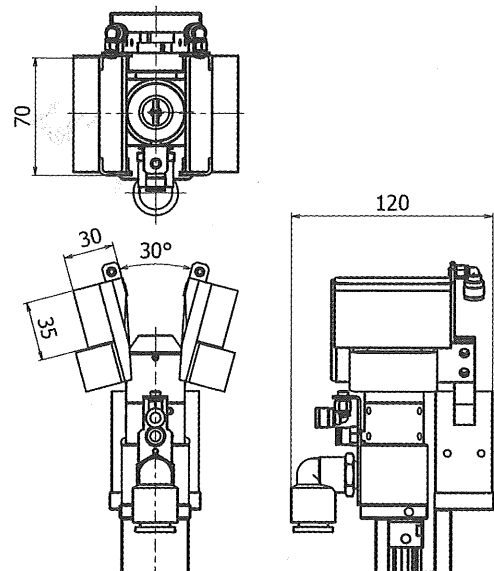


図 5-2 フィンガの主要寸法

5. 1 エンドエフェクタの概要

5. 1. 1 構成

図 5-1 にエンドエフェクタの概要を示す。また、図 5-2 にフィンガの主要寸法を示す。模型果実を吸着エンドエフェクタは、2 台のアクチュエータ、吸着管、フィンガ、水平・垂直ノズルから構成される。アクチュエータとして、フィンガを上下動させるエアスライダ（ストローク：100 mm）と、フィンガを開閉させるエアチャック（把持モーメント：1.36 Nm，開閉角度： $-10\sim 30^\circ$ ）の 2 台を備える。損傷しやすい果実表面に接触する部分には緩衝材を用いることとし、吸着口の緩衝材は市販の高機能発泡体（日東電工㈱：エプトシーラ No. 686，厚さ 15 mm）を選定した。吸着時の負圧は $5\sim 10\text{kPa}$ 程度であり、吸着状態を確認するため圧力センサ（㈱キーエンス：AP31-A）を設置した。フィンガの緩衝材は市販のイチゴ選果機（誠和：SX-747）の緩衝材で使用された軟質ウレタンフォーム（㈱アキレス：RJS，硬さ： $38\pm 14\text{N}$ （JIS K6400-3），厚さ 30 mm）を選定した。水平・垂直ノズルは、圧縮空気により隣接果実を対象果実から遠ざけることを目的として設置した。垂直ノズルは下側から圧縮空気を吐出し、水平ノズルは栽培ベッド側から通路側に向かって吐出する。

図 5-3 に模型果実を吸着・把持した様子を示す。最初に、対象果実以外になるべく接触しないようにフィンガを降ろした状態（図 5-1(a)）で接近し、吸着管により果実を吸着する（図 5-3(a)）。次に、ノズルから圧縮空気を吐出しながらフィンガを繰り出す（図 5-1(b)）。その後、フィンガを閉じて果実を把持し（図 5-3(b)），採果する。果実を収容する際、収穫箱の上でエンドエフェクタを横向きにし、フィンガを開いて果実を収穫箱の緩衝材の傾斜面上に落とす。

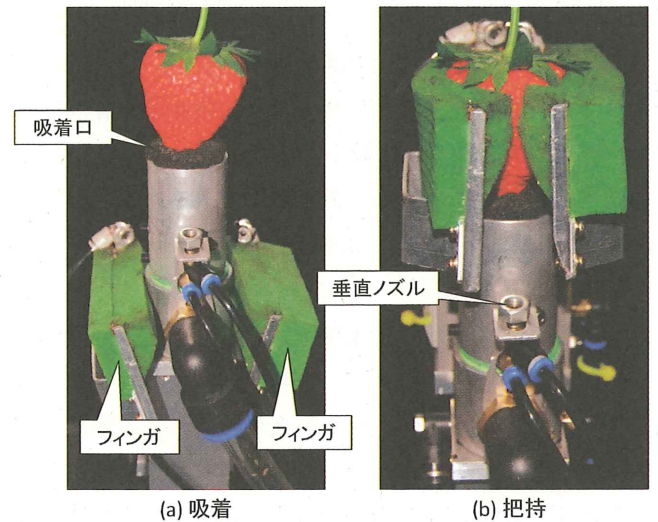


図 5-3 吸着・把持の様子

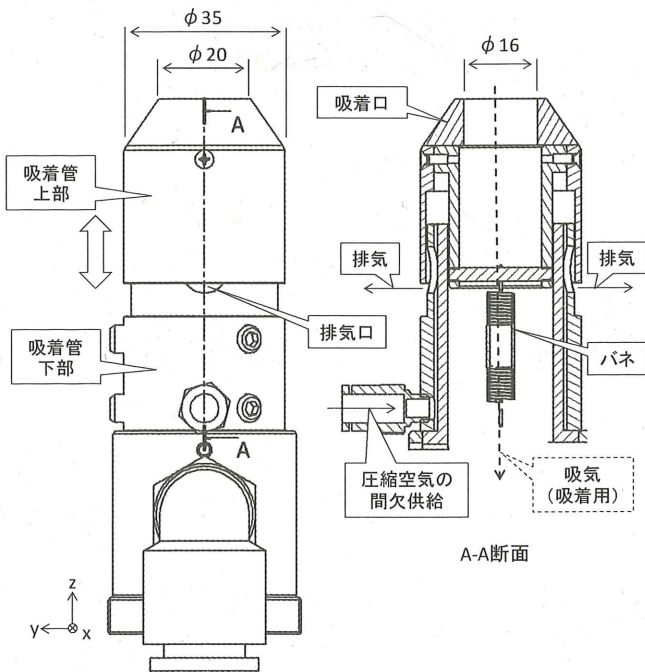


図 5-4 吸着口の上下振動機構

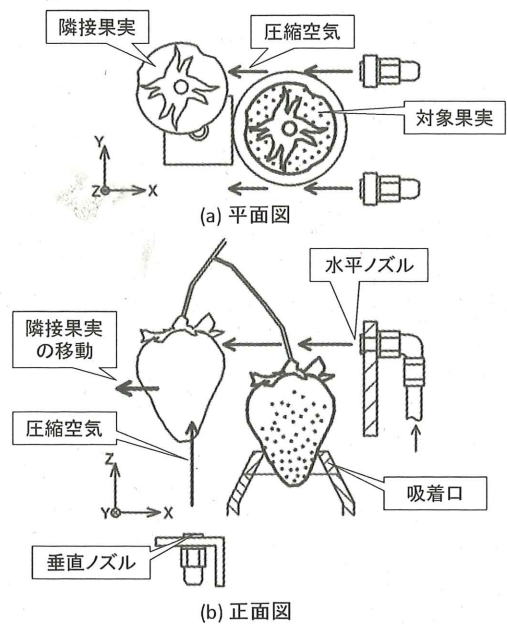


図 5-5 誤採果防止機能

5. 1. 2 位置変化抑制機能

果頂部が扁平な果実でも安定して吸着するため、吸着管の外径をある程度大きくする必要があったが、予備試験では、外径が大きくなると玉突き現象による対象果実の位置変化が発生し、接近成功率の低下が確認された。そこで、‘紅ほっぺ’の階級 2L サイズ (18~25 g) の平均的な長果径 (35±1 mm)⁷⁵⁾を考慮し、吸着管の外径を 35 mm として、図 5-4 のような吸着口の上下動機構を考案した。すなわち、吸着管を上部と下部に二分し、上部をバネで引っ張りながら、吸着管下部から圧縮空気を供給し、空気圧で吸着管上部を持ち上げる。この圧縮空気の供給を間欠的に行うことにより、吸着管上部が振動し、斜め上方にある障害物が吸着管に引っかかることを抑制する。これにより、玉突き現象による対象果実の位置変化を抑制する機構を追加した。

5. 1. 3 誤採果防止機能

図 5-5 に、果実を吸着した状態でノズルから圧縮空気を吐出して、隣接果実を対象果実から遠ざける誤採果防止機能を示す。高設栽培では、着色が進んだ質量が大きな果実ほど栽培ベッド側 (x 軸正方向) に寄る傾向がある。このため、栽培ベッド側から通路側に向かって圧縮空気を吐出する水平ノズル 2 個と、吸着した果実の陰に入った隣接果実を移動させるための垂直ノズル 1 個を設けた。

フィンガを繰り出す際、水平ノズルはフィンガに設置

されているので、フィンガの繰り出し動作に併せて下から上に走査するように圧縮空気を吐出し、広い範囲で隣接果実を遠ざけることが見込まれた。圧縮空気は、設定圧力 0.6 MPa のエアコンプレッサから約 270 L/min の流量で吐出され、採果動作 1 回当たりの積算流量は約 10 L である。

圧縮空気の吐出範囲・圧力を測定するため、図 5-6 のように電動スライダ (SUS: XA-35L-100, 最大速度: 50 mm/s, ストローク 100 mm) にエンドエフェクタに設置したものと同一ノズル (SMC: KJH04-M5) を取り付け、面圧力分布測定システム (ニッタ, I-SCAN) を用いてセンサとノズル間の距離 10 mm~110 mm の吐出範囲・圧力を測定した。

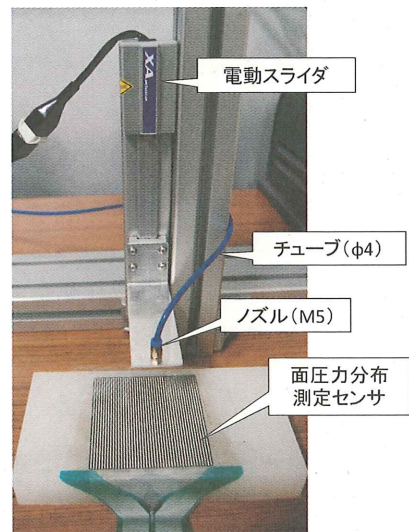


図 5-6 圧縮空気の吐出範囲・面圧力の測定の様子

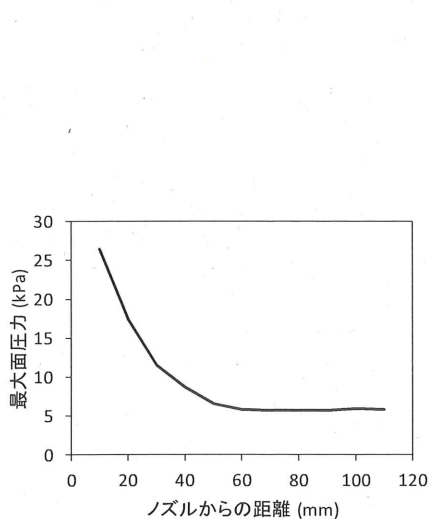


図 5-7 ノズルからの距離と最大面圧力の関係

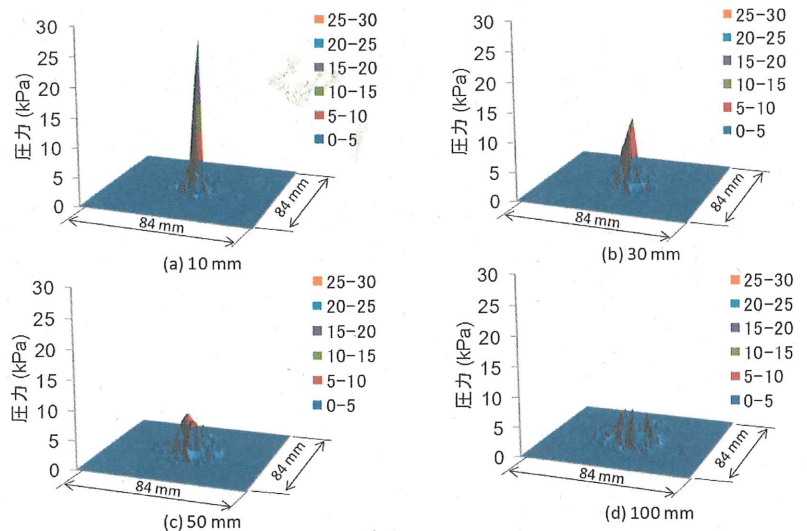


図 5-8 距離別の圧力分布の平均値

供給空気の設定圧力は 0.6 MPa，流量はエンドエフェクタのノズル数が 3 個であることを考慮して 90 L/min に設定し，5 Hz で 20 s 間計測し，圧力の平均値，最大値を求めた。

図 5-7 にノズルからの距離と最大面圧力を示す。60 mm 以上離れると最大圧力がほぼ一定になった。また，図 5-8 に圧力分布の平均値を示す。50 mm 以上離れると吐出範囲が 30 mm 程度に広がった。エンドエフェクタは，フィンガを開いた状態で 2 個の水平ノズル間距離が 60 mm，各水平ノズルから吸着口中心まで 30 mm，水平ノズル先端からフィンガの緩衝材の端まで 70 mm であるので，吸着した果実を吹き飛ばすことなく，隣接果実を引き離すことができると考えられた。また，垂直ノズルと吸着口先端まで 40 mm であり，吸着した果実の陰に入った隣接果実を動かすのに十分な力が作用すると推察された。

5. 1. 4 果柄除去機能

果実と果柄を離層で分離するため，果柄に対し果実を傾斜させた際，果柄にフィンガができるだけ触れないようにフィンガで果実赤道部を把持する。その後，スナッチ動作として，後述するマニピュレータと栽培ベッドの干渉を考慮し，エンドエフェクタを図 5-9 のように垂線に対し 70° 傾斜させ，かつ斜め下方向に引っ張るようにし，果実と果柄にできるだけ大きな傾斜角が生じるようにした。

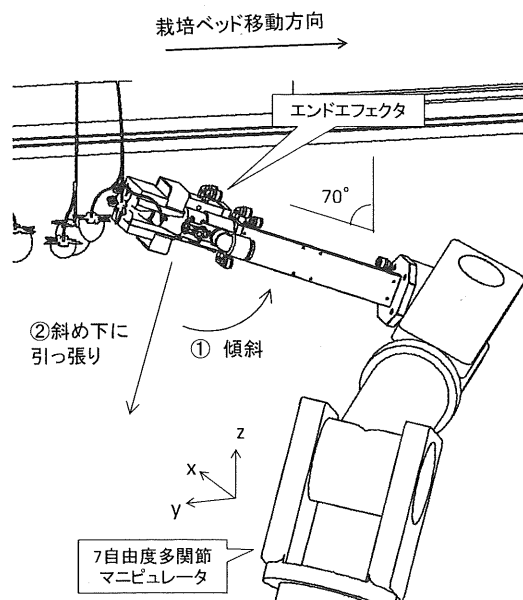


図 5-9 マニピュレータによるエンドエフェクタの傾斜

傾斜させる速度は 20° /s であり，斜め下に引っ張る速度は 200 mm/s，距離は 150 mm である。エンドエフェクタを傾斜させる際，果実との干渉が危惧されたが，栽培ベッドを積載した横移送装置が図 5-9 の y 軸マイナス方向に移動すること，エンドエフェクタを左側に傾斜させることから，未熟果や収穫できなかった果実に触れることはあるが，これから収穫する収穫適期果実に触れることは少ないと推察された。

5. 1. 5 採果動作プログラム

試作したエンドエフェクタをマニピュレータに取り付け，予め教示した果実の位置情報に基づき，採果動作を自動で行うプログラムを作成した。教示位置にあるイチゴの採果動作手順をフローチャートに示す (図 5-10)。

- ① まず果頂部の位置を教示するため，人手により PC からマニピュレータを操作し，果頂部とエンドエフェクタの吸着口の位置合わせを行い，果頂部が吸着口に収まるマニピュレータの位置姿勢を PC に記録する。
- ② その後，自動採果プログラムを開始すると，マニピュレータが一度基本姿勢に戻った後，吸着口が果頂部の約 1~2 cm 下の位置姿勢に移動する。
- ③ 真空発生装置により負圧が発生し，位置変化抑制機能により吸着口を振動させながら，マニピュレータによりエンドエフェクタが一定速度 15 mm/s で果実の真下から上昇する。
- ④ 圧力センサにより吸着が感知された時点で吸着口の振動とエンドエフェクタの上昇が停止し，水平ノズル及び垂直ノズルの両方から圧縮空気が吐出されると同時にフィンガが繰り出される。
- ⑤ エンドエフェクタが一定速度で上昇中，50 mm 移動して吸着を感知しなかった場合，45 mm 下降し，再度一定速度で接近する。
- ⑥ 2 回目の接近でも吸着が感知されなかった場合，接近失敗と判断し，教示した果実に対する採果動作を中止する。
- ⑦ フィンガで果実を把持した後，負圧発生と圧縮空気の吐出を停止し，エンドエフェクタを傾斜し，斜め下方向に引っ張って採果する。

⑧ 最後に、エンドエフェクタを横倒しにしてフィンガを開き、果実を収穫箱に収容し、基本姿勢に移動する。

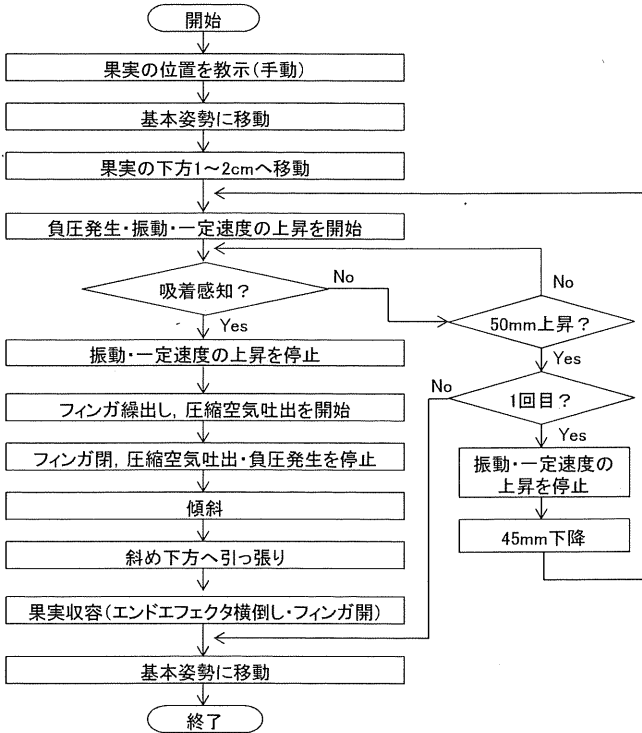


図 5-10 採果動作のフローチャート

1 個当たりの採果時間は、採果動作を開始してから採果・果実収容後に元の姿勢に復帰するまで約 30 s であった。

5. 2 採果基礎試験

5. 2. 1 試験方法

イチゴ（‘紅ほっぺ’）が定植された高設栽培の栽培ベッドをマニピュレータの正面上方に設置し、対象果実がマニピュレータの可動範囲内に位置するようにベッドの位置を調整し、試験を行った。163 個の果実を供試し、採果前に下側から見た着果状態を図 2-5 の A, B, C, D の 4 つに区分して記録した後、上述のプログラムを実行した。そして、対象果実が吸着管の穴に入るかどうかではなく、果実を吸着した場合を「接近成功」とし、さらに採果した場合を「採果成功」とした。採果直後に対象果実の損傷の有無を観察し、他の果実に対する誤採果や損傷の有無を記録した。また、果柄が離層で分離できず

対象果実に残る割合を「果柄残存果割合」として算出した。採果精度を評価するため、以下の式により接近成功率、採果成功率、損傷率、誤採果率、他果実損傷率、果柄残存果割合を算出した。

$$r_a = f_a/n \times 100 \quad (5-1)$$

$$r_p = f_p/n \times 100 \quad (5-2)$$

$$r_b = f_b/f_p \times 100 \quad (5-3)$$

$$r_{ep} = n_{ep}/n \times 100 \quad (5-4)$$

$$r_{eb} = n_{eb}/n \times 100 \quad (5-5)$$

r_a : 接近成功率

r_p : 採果成功率

r_b : 損傷率

r_{ep} : 誤採果率

r_{eb} : 他果実損傷率

r_s : 果柄残存果割合

n : 試験回数

f_a : 接近成功した対象果実数

f_p : 採果成功した対象果実数

f_b : 損傷した対象果実数

n_{ep} : 他果実を誤採果した回数

n_{eb} : 他果実を損傷した回数

5. 2. 2 試験結果

1) 接近・採果

表 5-1 に供試果実の性状と実験結果を示す。図 5-11 には採果後の果実例を示す。供試果実のうち着果状態 D でも、障害物により果頂部まで遮蔽された果実はなかった。

果頂部が扁平な形状の果実でも吸着時に吸着口の緩衝材が果実の形状に合わせて変形して、吸着した結果、接近成功率は 100%であった。障害物との玉突き現象による対象果実の位置変化が懸念される着果状態であっても、吸着口の振動により障害物が引っかかることなく、確実に接近・吸着した。この結果から、位置変化抑制機能は

有効であると判断された。

採果成功率は、着果状態 A で最も高く、着果状態 B, C で 90%以上、下側に障害物がある着果状態 D で 67.7%であった。隣接果実がない場合や誤採果防止機能が働いた場合、概ね採果可能であった。逆に、対象果実から隣接果実を引き離すことができなかつた場合、フィンガ繰出し時にフィンガが隣接果実に接触し、フィンガに押された隣接果実が吸着した対象果実を玉突き的に押して吸着口から対象果実が離れる現象が観察された。このことから、隣接果実を引き離す誤採果防止機能の強化が直接的に採果成功率の向上に繋がると考えられた。この他、果実を傾斜させて引っ張る果柄除去動作の際に把持した緩衝材間から果実がすり抜けることがあった。

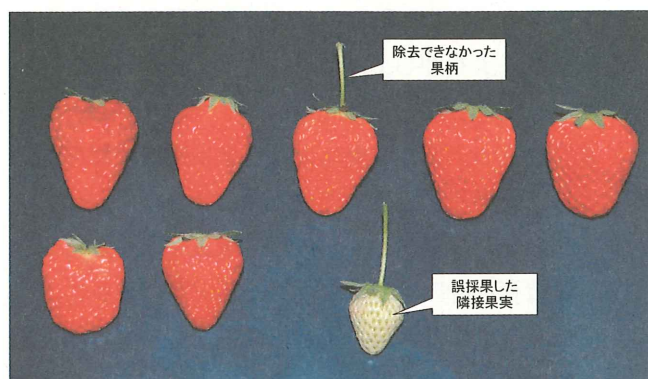


図 5-11 採果後の果実例

2) 採果果実の損傷

緩衝材で果実を把持することにより、過熟に近い果実では緩衝材との接触により表面に擦り傷や小さな圧痕が発生することもあったが、その他の果実では目視で確認できない程度であった。実際の生産現場では、カビなど衛生上の観点から、過熟の果実を発生させないように努

めているが、果実の重なりなどにより収穫適期に収穫できない場合がある。自動収穫でも、過熟の果実を発生させないような対策が必要と考えられた。収穫適期の果実では、吸着口やフィンガに適切な緩衝材を適用し、果実表面に作用する力を分散することにより、損傷なくハンドリングが可能であると推察された。また、圧縮空気により果実が揺れて果実同士が接触したが、この接触による損傷は確認されなかつた。この原因として、未熟果は赤熟果よりも硬くて傷つきにくいこと、赤熟果になった時点で収穫されるので、赤熟果の状態でも何度も圧縮空気にさらされることがないこと、が考えられた。

損傷率は着果状態別で大きく異なり、着果状態 A, B, C, D の順で増加し、着果状態 D では半分以上の果実が損傷した。採果時に他の果実を誤採果した場合、複数の果実を同時に把持し、果実同士が押しつけられて損傷が発生する現象が散見された。果汁が緩衝材に付着するような損傷が発生した場合、カビの発生等の衛生面の問題や果汁の乾燥による緩衝材の硬化等を防ぐことが今後の課題として残った。採果した果実を収容する際の損傷は目視では確認されなかつた。

3) 誤採果・他果実の損傷

通路側に隣接果実がある着果状態 B の誤採果率は 25.0%であり、つまり 7 割以上の割合で隣接果実を誤採果することなく採果できた。通路側から果実に接近する従来のロボットでは誤採果が懸念されるような着果状態であっても誤採果防止機能により隣接果実を圧縮空気により引き離すことができた。この結果から、誤採果防止機能の一定の効果が確認された。しかし、着果状態 A でもフィンガ繰出し時に他果実を巻き込む現象が観察された他、着果状態 B で隣接果実が圧縮空気の吐出により一度は対象果実から離れるものの、振り子のように戻ってき

表 5-1 供試果実の性状と実験結果

着果状態 ^{*1}	試験回数 (回)	果重 ^{*2} (g)	果長 ^{*2} (mm)	長果径 ^{*2} (mm)	果柄径 ^{*2} (mm)	接近成功率 (%)	採果成功率 (%)	損傷率 (%)	誤採果率 (%)	他果実損傷率 (%)	果柄残存果割合 (%)
A	72	12.7	38.1	29.4	1.4	100.0	95.8	7.2	5.8	0.0	27.5
B	39	15.6	40.9	31.3	1.4	100.0	92.3	11.1	25.0	2.8	13.9
C	21	12.7	38.0	29.7	1.3	100.0	90.5	26.3	84.2	5.3	21.1
D	31	18.4	45.7	33.2	1.5	100.0	67.7	52.4	81.0	9.5	9.5
計	163	14.5	40.2	30.6	1.4	100.0	89.0	17.2	31.7	2.8	20.7

*1 図 2-5 参照

*2 平均値

たところを把持することがあった。着果状態 C, D で誤採果率は 80%以上であった。この原因として、圧縮空気の吐出により隣接果実を対象果実から引き離そうとするものの、対象果実に引っかかり、隣接果実を引き離せなかったことが原因と考えられた。

他果実の損傷は、誤採果時にフィンガのフレームで挟む他、エンドエフェクタを傾斜した際、エンドエフェクタの側面が他の果実に押しつけられることも散見された。

4) 果柄除去

果柄残存果割合は 20.7%で、残った果柄の平均長さは 37.5 mm、標準偏差は 18.3 mm であり、その多くは、果実と果柄の離層ではなく、果柄間の節で分離していた。果柄が残存した果実の平均果重は 8.4 g、平均果柄径は 1.2 mm であり、供試果実の平均果重 14.5 g を大きく下回った。このことから、果柄が残存した原因として、採果時に小さな果実が果柄ごと把持され、フィンガの緩衝材と果柄が干渉し、大きな傾斜角が生じなかったことが考えられた。果柄残存果割合を低減するため、つまり果柄をフィンガで挟まないようにするため、果実のサイズに合わせてフィンガ繰り出し量を可変とするような機構が考えられ、今後の検討課題と思われた。

5.3 摘要

移動栽培されたイチゴ果実に対して下側から接近して収穫する定置型ロボットの開発を目指し、位置変化抑制機能、誤採果防止機能、果柄除去機能を備え、下側から果実に接近するエンドエフェクタを開発した。採果基礎

実験の結果、以下の知見が得られた。

1) 接近成功率は 100%、採果成功率は 89.0%、対象果実の損傷率は 17.2%、他の果実の誤採果は 31.7%、果柄残存果割合は 20.7%であった。着果状態別では、隣接果実がない場合や通路側に隣接果実がある場合、採果成功率が高く、損傷率、誤採果率が低い。栽培ベッド側に隣接果実がある場合や果実の下側に障害物がある場合、採果成功率が低下し、損傷率、誤採果率が高くなることがわかった。誤採果率の低減が採果成功率の向上や損傷率の低減に直結すると考えられた。損傷率、誤採果率の低減のため、対象果実以外の果実をフィンガで同時に把持しないようにフィンガの小型化が必要と推察された。具体的には、フィンガの厚みを低減するとともに、フィンガ上端を鋭角にして隣接果実に極力接触しないこと、さらに、フィンガ繰り出し時にフィンガを振動させることにより、隣接果実を押し上げにくくすることが必要と考えられた。

2) 障害物との玉突き現象による対象果実の位置変化が懸念される着果状態であっても、障害物が吸着管に引っかかることなく、対象果実に確実に接近・吸着したことから、位置変化抑制機能は有効であると判断された。

3) 圧縮空気により隣接果実を対象果実から引き離す誤採果防止機能により、通路側に隣接果実がある着果状態で誤採果率が 25.0%まで抑制されることが確認された。

4) 果柄除去機能により、79.3%の割合で果柄を除去できた。小さい果実において果柄が残る割合が高くなることがわかった。

第6章 定置型収穫ロボットの収穫性能試験

第4章では、位置検出ユニットと着色率測定ユニットから構成されるマシンビジョンの構築について報告した。第5章では、下側から接近することを特徴とし、対象果実の位置変化抑制機能、隣接果実の誤採果防止機能及び果柄除去機能を有するエンドエフェクタの開発について報告した。本章では、イチゴの移動栽培と収穫ロボットの組み合わせによる自動収穫作業の高精度化の可能性を検討する。このため、第3章で報告した収穫試験システムを構築し、栽培ベッドの移送、果実の位置検出、着色率の測定結果に基づく収穫適期の判定、採果動作という一連の動作を連続的に行った。図6-1に収穫試験システムの様子を示す。

本研究では、収穫適期果実の収穫成功率を求め、果実損傷、誤採果等の収穫した果実状態を記録した。さらに、これらのデータだけでは自動収穫の各動作要素及び着果状態が収穫成功率に与えた影響を詳細に把握することができないと考えられたため、収穫成功率の内訳として位

置検出、収穫適期判定、採果の各動作要素の精度を算出し、各動作精度が収穫成功率に与える影響を分析した。また、収穫成功率及び各動作精度を着果状態別に分類することにより、各着果状態が収穫成功率及び各動作精度に与える影響を比較検討した。

一方、収穫適期の誤判定による着色率80%未満の未熟果の収穫にも着目し、未熟果収穫率を求めた。収穫成功率と同様に、未熟果収穫率の内訳として未熟果の位置検出率、収穫適期誤判定率、採果率を算出し、各動作精度が未熟果収穫率に与える影響を分析した。さらに、これらの精度を着果状態別に分類し、着果状態の影響を比較検討した。

6.1 試験方法

6.1.1 供試材料と測定項目

長さ1mの高設栽培用ベッドに‘紅ほっぺ’10株を2列の千鳥状に定植し、施設内で栽培した高設栽培イチゴ

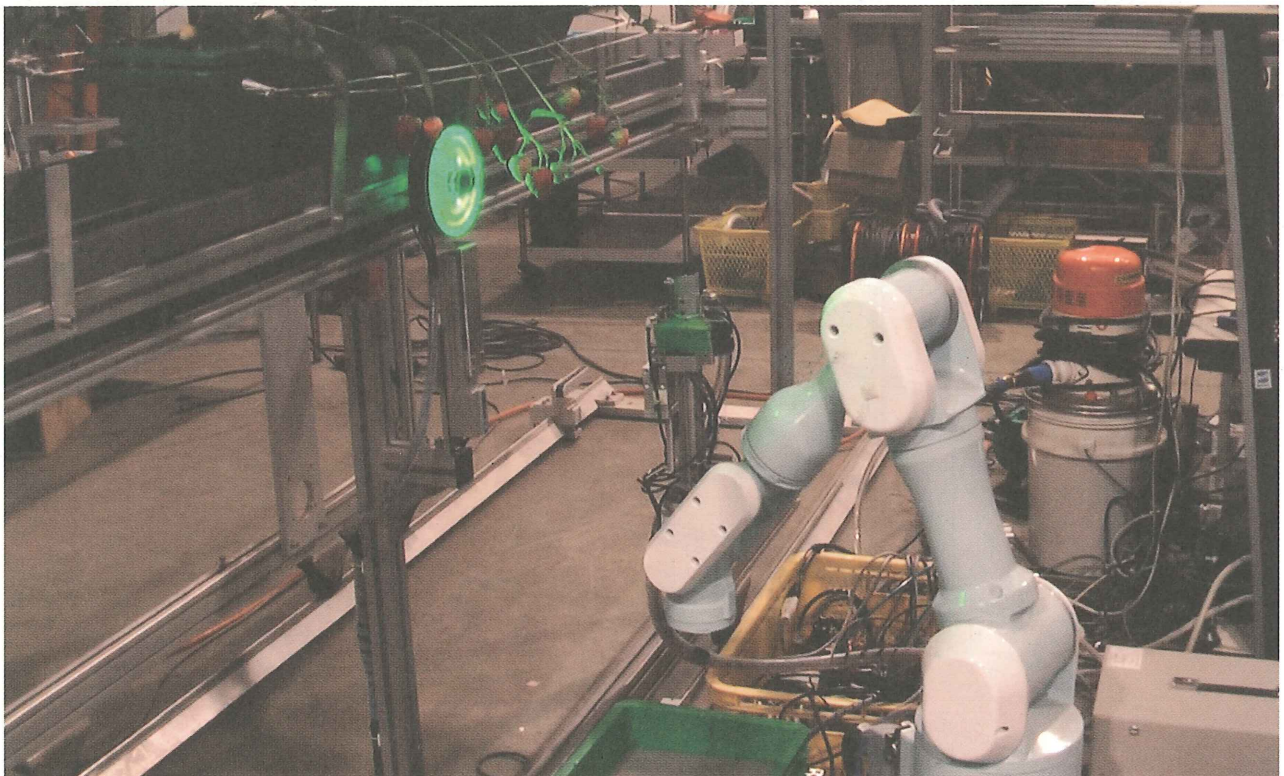


図6-1 収穫試験システムの様子

をそのままの状態に栽培ベッドごと実験室に持ち込み、供試した。1回の実験で片側5株の自動収穫作業を行った。2008年4月4日～5月1日にベッド50台を供試し、100回の実験を行った。目視判定で着色率5%以上の果実を対象果実とし、合計536個であった。

採果可能な果実の位置条件は、図6-2のx軸方向では着色率測定ユニットとエンドエフェクタが干渉しない範囲であり、y軸方向が着色率測定カメラの正面近傍、z軸方向がマニピュレータの可動範囲内である。具体的には、果実の重心位置がx軸方向では着色率測定ユニットから60mm以上マニピュレータ側に離れており、y軸方向では着色率測定カメラの光軸から±30mm未満の範囲内、z軸方向ではロボット座標原点（マニピュレータのベース中心）から700～1020mmの範囲内とした。

対象果実のうち収穫範囲内の果実は467個（87.1%）であった。着果状態は、図2-5で示したように、隣接果実なし（着果状態A）、通路側に隣接果実あり（着果状態B）、栽培ベッド側に隣接果実あり（着果状態C）、下側に障害物あり（着果状態D）の4種類に区分した。収穫範囲内にある果実の着果状態別、着色率別の内訳を表6-1に示す。なお、着果状態の分類において、隣接果実が通路側

と栽培ベッド側の両方にある場合は栽培ベッド側に隣接果実がある着果状態Cとして分類した。

表6-1 収穫範囲内果実の着果状態別・着色率別の内訳*

着果状態	全体	着色率80%以上	着色率80%未満
A	170 (36.4)	75 (31.6)	95 (41.3)
B	131 (28.1)	74 (31.2)	57 (24.8)
C	61 (13.1)	29 (12.2)	32 (13.9)
D	105 (22.5)	59 (24.9)	46 (20.0)
計	467	237	230

* 数値は個数。括弧内の数値は構成割合 (%)。

各供試果実について着果状態と目視判定による着色率を記録するとともに、位置検出の成否、着色率の測定結果に基づく収穫適期の判定結果、接近・採果動作の成否を記録した。また、収穫した果実の状態として収穫果実の損傷、他果実の損傷、採果時に他果実を同時に採果する誤採果、果柄が離層で分離できずに果実に残る果柄残存果を観察し、記録した。さらに、栽培ベッド1台当たりの所要時間を計測した。

システム構築の際、エンドエフェクタのフィンガの繰出し速度を低減するため、フィンガ繰出し時にエアスラ

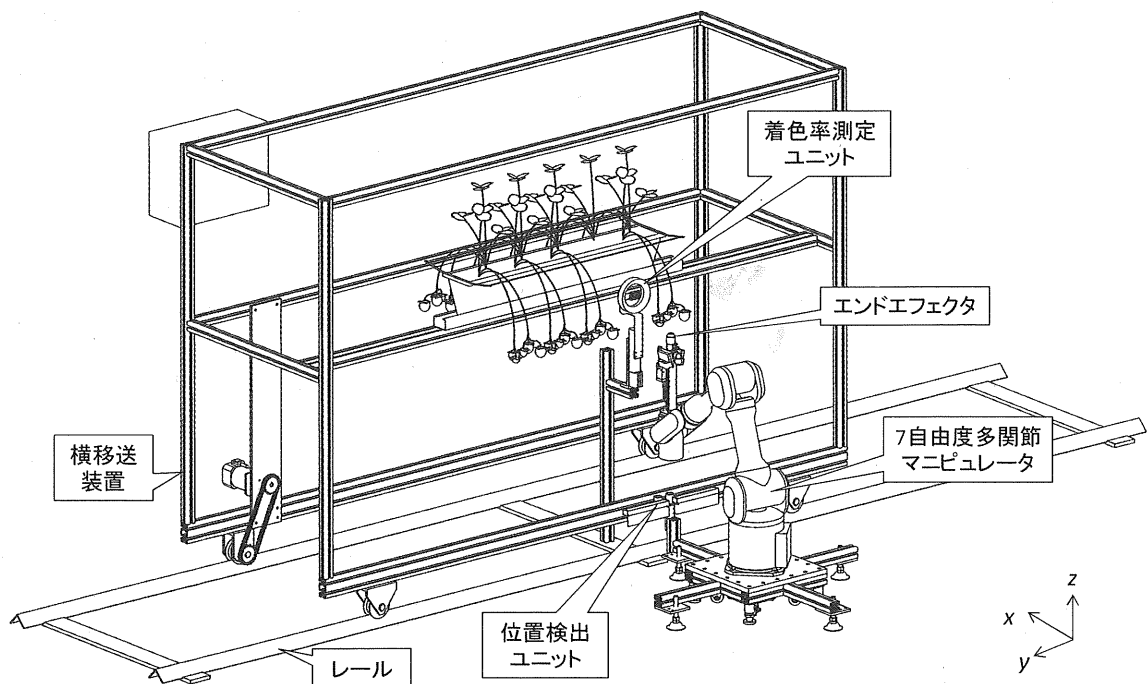


図6-2 収穫試験システムの概要 (同図3-1)

イダへの圧縮空気の供給を間欠的に行う動作を追加した。また、採果時にフィンガの可動範囲内に隣接果実が入り込む現象を低減するため、エンドエフェクタの栽培ベッド側に通路側と同様の垂直方向のノズルを設置した。

6. 1. 2 評価項目の定義

1) 収穫成功率

目視判定で着色率 80%以上の収穫適期果実の収穫精度を評価するため、以下の式により収穫成功率、位置検出率、収穫適期判定率及び採果率を算出した。

$$r_{md} = d_m/t_m \times 100 \quad (6-1)$$

$$r_{mc} = c_m/d_m \times 100 \quad (6-2)$$

$$r_{mp} = p_m/c_m \times 100 \quad (6-3)$$

$$\begin{aligned} r_{mh} &= p_m/t_m \times 100 \\ &= r_{md} \times r_{mc} \times r_{mp} \times 10^{-4} \end{aligned} \quad (6-4)$$

r_{md} : 収穫適期果実の位置検出率

r_{mc} : 収穫適期果実の収穫適期判定率

r_{mp} : 収穫適期果実の採果率

r_{mh} : 収穫成功率

t_m : 収穫適期果実数

d_m : 位置検出した収穫適期果実数

c_m : 収穫適期と判定した収穫適期果実数

p_m : 採果に成功した収穫適期果実数

収穫成功率 r_{mh} は、(6-4) 式に示すように、位置検出率 r_{md} 、収穫適期判定率 r_{mc} 、採果率 r_{mp} の積で表すことができ、各項が収穫成功率 r_{mh} に与える影響を解析することが可能であると考えられた。

2) 未熟果収穫率

目視判定で着色率 80%未満の未熟果を収穫適期と誤判定して収穫した場合、収穫した未熟果は出荷できない。システムの収穫性能を評価するため、収穫成功率だけではなく、供試した着色率 80%未満の未熟果の収穫率を求めることが必要と考え、以下の式により未熟果収穫率、位置検出率、収穫適期誤判定率、採果率を算出した。

$$r_{imd} = d_{im}/t_{im} \times 100 \quad (6-5)$$

$$r_{imc} = c_{im}/d_{im} \times 100 \quad (6-6)$$

$$r_{imp} = p_{im}/c_{im} \times 100 \quad (6-7)$$

$$\begin{aligned} r_{imh} &= p_{im}/t_{im} \times 100 \\ &= r_{imd} \times r_{imc} \times r_{imp} \times 10^{-4} \end{aligned} \quad (6-8)$$

r_{imd} : 未熟果の位置検出率

r_{imc} : 未熟果の収穫適期誤判定率

r_{imp} : 未熟果の採果率

r_{imh} : 未熟果収穫率

t_{im} : 未熟果数

d_{im} : 位置検出した未熟果数

c_{im} : 収穫適期と誤判定した未熟果数

p_{im} : 採果に成功した未熟果数

未熟果収穫率 r_{imh} も、(6-8) 式に示すように、収穫成功率 r_{mh} と同様に位置検出率 r_{imd} 、収穫適期誤判定率 r_{imc} 、採果率 r_{imp} の積で表すことができ、各項が未熟果収穫率 r_{imh} に与える影響を解析可能と推察された。

6. 2 試験結果

収穫試験の様子を図 6-3 に、収穫試験システムにより収穫した果実 208 個の性状を表 6-2 に示す。

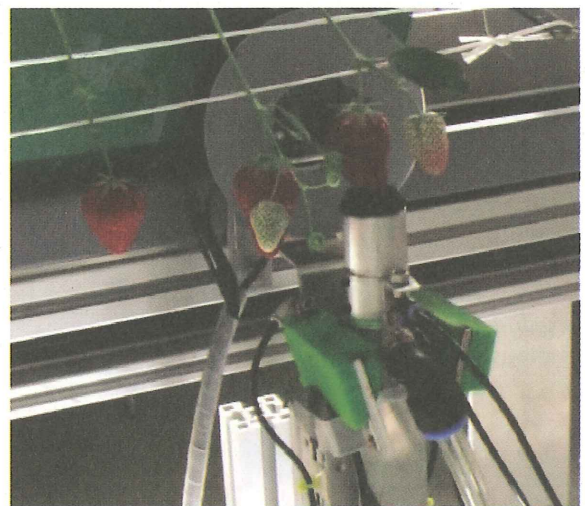


図 6-3 収穫試験の様子 (果実接近・吸着時)

表 6-2 収穫果実の性状*

果重 (g)	果長 (mm)	果径 (mm)
2.7~35.5 (14.8)	21.3~58.7 (39.6)	17.5 ~45.4 (31.3)

* 括弧内の数値は平均

収穫果実と収穫されずに残った果実の着色率別の構成割合を図 6-4 に示す。収穫果実 208 個のうち収穫適期果実は 159 個、未熟果は 49 個であった。この他、採果時に誤採果された果実は 35 個であり、うち 69%が着色率 5%未満の未熟果であった。

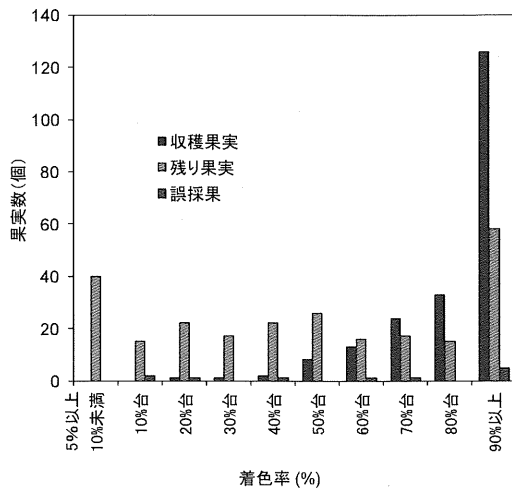


図 6-4 着色率別の収穫果実のヒストグラム

6. 2. 1 収穫成功率

表 6-3 に収穫適期果実に対する解析結果を示す。収穫成功率 r_{mh} (67.1%)は、(6-4) 式から、その決定因子となる位置検出率 r_{md} (89.0%)と収穫適期判定率 r_{mc} (83.4%)及び採果率 r_{mp} (90.3%)の積であるから、収穫成功率を改善するには、最も率の低い収穫適期判定率 r_{mc} の向上が効果的と考えられた。

表 6-3 収穫適期果実の解析結果

収穫成功率	r_{mh} (%)	67.1
位置検出率	r_{md} (%)	89.0
収穫適期判定率	r_{mc} (%)	83.4
採果率	r_{mp} (%)	90.3
収穫適期果実数	t_m (個)	237
位置検出果実数	d_m (個)	211
収穫適期判定果実数	c_m (個)	176
採果果実数	p_m (個)	159

図 6-5 に着果状態別に分類した収穫適期果実 t_m の構成割合、位置検出率 r_{md} 、収穫適期判定率 r_{mc} 、採果率 r_{mp} 、収穫成功率 r_{mh} を示す。

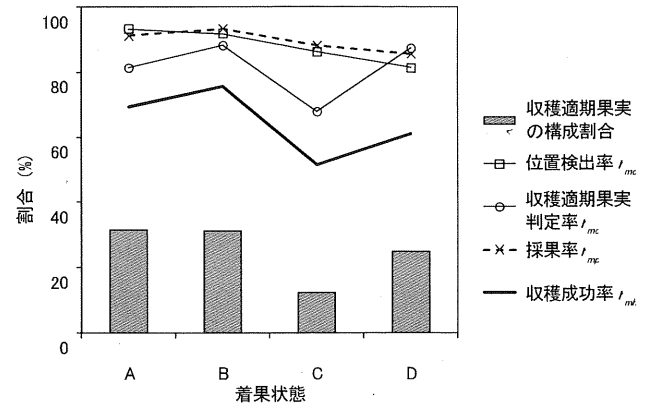


図 6-5 収穫適期果実の構成割合と位置検出率、収穫適期果実判定率、採果率及び収穫成功率

位置検出率 r_{md} は着果状態が A, B, C, D の順で徐々に低下したが、下側に障害物がある着果状態 D でも比較的高かった。下側に障害物がなければ隣接果実がある着果状態でも高精度に複数果実の個別認識及び位置検出が可能であることが確認された。

収穫適期判定率 r_{mc} は着果状態別で大きく異なった。着果状態 B, D で比較的高く、隣接果実がない着果状態 A で低下し、栽培ベッド側に隣接果実がある着果状態 C で大幅に低くなった。

採果率 r_{mp} は着果状態が B, A, C, D の順で低下したが、最も低い着果状態 D でも比較的高い割合であり、位置検出、収穫適期判定、採果の各動作のうち最も着果状態の影響を受けず安定していた。

収穫成功率 r_{mh} は着果状態が B, A, D, C の順で低下し、 r_{mh} が最も高い着果状態 B では 75.7%、最も低い着果状態 C では 51.7%であった。すなわち、着果状態 C では収穫適期果実 t_m の約半分しか収穫できないことがわかった。しかし、収穫に失敗した果実 ($t_m - p_m$) の着果状態別の構成割合は着果状態 A, B, C, D でそれぞれ 29.5%, 23.1%, 17.9%, 29.5%であり、着果状態 C が最も低かった。

6. 2. 2 未熟果収穫率

表 6-4 に未熟果に対する解析結果を示す。未熟果収穫

率 r_{imh} は 21.3% であり、すなわち 2 割以上の未熟果が誤収穫された。収穫適期誤判定率 r_{imc} が 36.1% と高く、収穫適期判定率 r_{mc} と比較し、収穫適期果実の見落としよりも未熟果の誤判定の割合が高いことがわかった。位置検出率 r_{imd} は収穫適期果実の位置検出率 r_{md} よりも 25% 程度低下したが、採果率 r_{imp} は収穫適期果実の採果率 r_{mp} とほぼ同等であった。

表 6-4 誤収穫した未熟果の解析結果

未熟果収穫率	r_{imh} (%)	21.3
位置検出率	r_{imd} (%)	63.9
収穫適期誤判定率	r_{imc} (%)	36.1
採果率	r_{imp} (%)	92.5
未熟果数	t_{im} (個)	230
位置検出果実数	d_{im} (個)	147
収穫適期誤判定果実数	c_{im} (個)	53
採果果実数	p_{im} (個)	49

図 6-6 に着果状態別に分類した未熟果 t_{im} の構成割合、位置検出率 r_{imd} 、収穫適期誤判定率 r_{imc} 、採果率 r_{imp} 、未熟果収穫率 r_{imh} を示す。

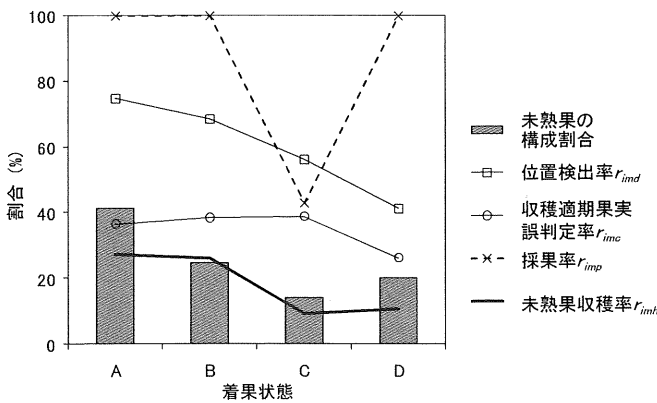


図 6-6 未熟果の構成割合と位置検出率、収穫適期果実誤判定率、採果率及び未熟果収穫率

位置検出率 r_{imd} は着果状態が A, B, C, D の順で収穫適期果実の位置検出率 r_{md} よりも顕著に低下した。収穫適期誤判定率 r_{imc} は下側に障害物がある着果状態 D で若干低かったものの、他の着果状態でほぼ同程度の高い割合となった。この結果、未熟果収穫率 r_{imh} は着果状態 A, B で高く、着果状態 C, D で低かった。実際に誤収穫した未熟

果の着果状態別の構成割合は着果状態 A が半分以上を占めた。

6. 2. 3 収穫した果実状態

表 6-5 に収穫果実の損傷率、誤採果率、他果実の損傷率、果柄残存果割合を示す。図 6-7 に着果状態別に分類した収穫果実の構成割合、収穫果実の損傷率、誤採果率、他果実の損傷率を示す。

表 6-5 収穫果実の損傷率、誤採果率、他果実損傷率、果柄残存果割合

損傷率 (%)	誤採果率 (%)	他果実損傷率 (%)	果柄残存果割合 (%)
12.5	13.9	3.4	12.0

損傷率は着果状態により大きく異なり、隣接果実がない着果状態 A で最も低く、栽培ベッド側に隣接果実がある着果状態 C で最も高かった。誤採果率は下側に障害物がある着果状態 D で最も高く、その他の着果状態では損傷率とほぼ同様の傾向が観察された。他果実の損傷率は着果状態 A では全く発生せず、着果状態 D で最も高かった。

果柄残存果割合は 12.0% で、果柄が残った果実の平均果重は 7.8 g であり、収穫した果実の平均果重 14.8 g を大きく下回ったことから、比較的小さな果実で果柄が残る傾向が認められた。

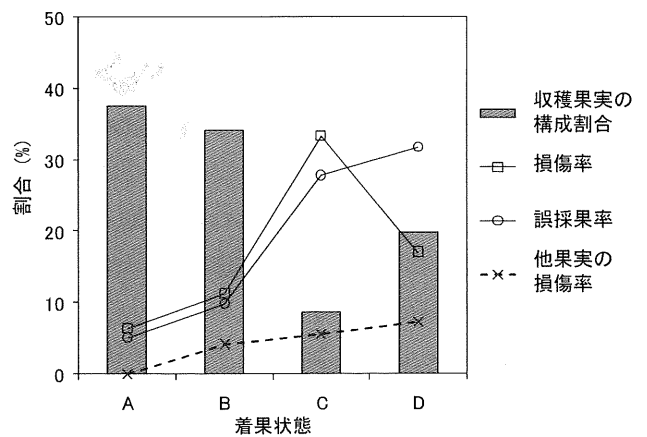


図 6-7 収穫果実の構成割合、損傷率、誤採果率、他果実の損傷率

6. 2. 4 作業能率

表 6-6 に長さ 1 m の栽培ベッド 1 台当たりの果実数と作業時間を示す。収穫適期果実は平均 2.3 個であり、平均処理時間は 126.7 s であった。横移送装置が停止中の果実 1 個当たりの収穫時間は平均 31.5 s (標準偏差 1.0 s) であった。果実 1 個当たりの採果動作数は全体で平均 1.11 回であり、下側に障害物がある着果状態 D で平均 1.23 回と最も多かった。長さ 1 m の栽培ベッド 1 台当たりを使用した圧縮空気の積算流量は平均 27.6 L であり、最大 97.0 L を消費した。

表 6-6 栽培ベッド 1 台当たりの果実数と作業時間

果実数 (個)	収穫適期果実数 (個)	作業時間 (s)
4.6±2.4	2.3±1.7	126.7±59.0

6. 3 考察

施設の高設栽培イチゴを栽培ベッドごと実験室に持ち込んで供試し、移動栽培と定置型ロボットの組み合わせを想定した収穫試験システムにより収穫性能試験を行った。その結果に基づき、以下の考察をした。

6. 3. 1 位置検出

横移送装置により移送された栽培ベッドのイチゴ果実に対し、下側から果頂部に向かって撮影し、粒子解析手法を適用して個々の果実を認識し、ステレオ画像法により位置検出を行った。これにより収穫適期果実の約 9 割の位置検出に成功したことから、下側からの位置検出手法の有効性が確認された。ステレオ画像法の問題点として左右画像の同一果実の対応付けが失敗する危険性が危惧されたが、今回はこうした対応付けの失敗は観察されなかった。

位置検出に原因があったと考えられた収穫失敗事例がいくつか観察された。まず、果実の揺れの影響により z 軸方向の検出位置に誤差が発生し、エンドエフェクタが果実に到達できないことがあった。また、果頂部が真下に向かず傾いている果実に対して位置を検出する際、下側から見た果実重心位置と果頂部の位置がずれる現象が観察された。果頂部の検出位置が多少ずれていても、ほとんどの場合、圧縮空気を間欠供給して吸着管を振動さ

せる位置変化抑制機能により果頂部が吸着口に誘導されたが、稀に吸着できないこともあった。さらに、位置検出アルゴリズムにより栽培ベッドに近い隣接果実の方が優先的に検出されたため、栽培ベッド側に隣接果実がある着果状態では収穫適期果実が位置検出されないことがあった。

収穫失敗の直接的な原因ではないが、着色率 80%未満の未熟果が収穫範囲にある間、横移送装置が発進した直後に前回停止時と同一果実が位置検出され、走行と停止を短い周期で繰り返す不具合が観察された。さらに横移送装置の発進・停止を交互に繰り返して揺れを増幅し、揺れが収まるまでの待機時間が長くなる傾向があった。

こうした位置検出の課題を解決するため、横移送装置の加減速を滑らかに制御するとともに、予め移動栽培ベッドにおける収穫適期果実の 3 次元位置をモニタし、収穫時、収穫適期果実が順次収穫ロボットの正面に来るように横移送装置を停止させることにより、大幅な精度及び能率の向上が可能と考えられた。

6. 3. 2 着色率測定

位置検出ユニットにより得られた果実重心の位置情報に基づき、着色率測定ユニットにより果実の横方向正面から赤・緑・白色の照明を用いて画像を撮影して着色率を測定し、収穫適期の判定を行った。これにより収穫適期判定率は 83.4%であった。しかし、2 割弱の収穫適期の果実を見落とし、収穫成功率の低下に最も大きな影響を与えた。さらに、着色率 5%以上 80%未満の未熟果に対する収穫適期誤判定率が 36.1%であり、未熟果の 21.3%を誤収穫する原因となった。第 4 章では果実が静止した状態で赤道部正面から撮影した場合、収穫適期判定率が 94.1%であり、収穫適期誤判定率が 7.1%に抑制されたことから、着果状態やシステム化に起因する着色率測定における誤差要因が発生し、収穫適期の判定精度が低下したと考えられた。

着果状態別では、栽培ベッド側に隣接果実がある着果状態 C で隣接する未熟果がカメラの手前に重なって撮影されたことが、収穫適期果実の見落としに繋がったと考えられた。

また、システム化したことにより横移送装置の発進・停止時の果実の揺れが収穫適期の判定精度に影響したと

推察された。具体的には、着色率測定ユニットにより赤、緑、白色の照明を切り替えて画像を撮影する際のタイムラグにより、各画像で抽出した果実全体領域、未着色領域及び着色領域にずれが生じ、着色率測定精度が低下したと考えられた。また、z 軸方向の検出位置の誤差により果実を横方向正面から上下に若干ずれた位置で撮影し、着色領域及び未着色領域が実際とは異なる大きさで測定されたことも原因の一つに挙げられた。この揺れの影響が着果状態 A で最も顕著に現れ、着果状態 B, D よりも収穫適期判定率 r_{mc} が低下したと推察された。

従って、複数色の照明の切替えの高速化を図るとともに、位置検出ユニットと着色率測定ユニットの画像取得タイミングの同期を行うことにより、果実の揺れに影響されない着色率測定手法を確立し、システム全体の着色率の測定精度を向上させることが必要と推察された。

6. 3. 3 採果動作

着色率 80%以上の果実で収穫適期と判定された果実の約 9 割を採果し、下側に障害物がある着果状態でも高い割合で採果に成功したことから、下側から接近する採果手法の有効性が示唆された。エンドエフェクタの接近・吸着性能も高い水準で安定していた。また、通路側に隣接果実がある着果状態で誤採果率が約 1 割であったことから、採果時に対象果実から他の果実を引き離すエンドエフェクタの誤採果防止機能の一定の効果を確認できた。さらに、9 割弱の果実を果柄との離層で分離でき、果柄除去機能の有効性が認められた。システム構築の際、フィンガ繰出し時にエアスライダへの圧縮空気の供給を間欠的に行う動作を追加したが、隣接果実がフィンガ上から円滑に移動する現象が確認された。また、エンドエフェクタの栽培ベッド側に通路側と同様の垂直方向のノズルを設置したが、栽培ベッド側にある隣接果実が誤採果されないように遠ざけられる現象も確認された。

収穫した果実状態は着果状態に依存し、栽培ベッド側に隣接果実がある着果状態及び下側に障害物がある着果状態では収穫した果実の損傷率及び誤採果率が高かった。しかし、マシンビジョンとの組み合わせにより、未熟果等の障害物の遮蔽度合が高い着果状態の果実を検出せず採果しなかった結果、第 5 章の採果基礎実験と比較して損傷率と誤採果率の低減が確認された。障害物の遮蔽度

合が低く、マシンビジョンにより検出可能な果実に対する誤採果防止機能の強化を図ることにより、誤採果率をさらに低減し、誤採果に起因する損傷も併せて低減可能と考えられた。

イチゴ果実は損傷しやすく、損傷するまで繰り返し採果を試みることは避けるべきであるが、1 回の採果動作失敗後、着果状態が変化して採果の難易度が低くなる場合があることも観察された。損傷しない採果試行回数と果実 1 個に費やす時間のバランスを検討する余地があることが示唆された。

より高精度な採果を実現するため、隣接果実を巻き込まないためのフィンガの小型化及び隣接果実を対象果実から確実に引き離すノズルの配置の最適化が必要と考えられた。また、採果動作を高速化するためには、本研究で用いた 7 自由度多関節マニピュレータを、3 自由度直交座標系マニピュレータ及び果実を傾斜させる回転ジョイントを組み合わせた 4 自由度直交座標マニピュレータに簡素化することが必要と推察された。

6. 3. 4 移動栽培装置との組み合わせ

移動栽培装置と定置型ロボットを組み合わせることにより、フレキシブルなカメラ配置、複数色の照明の適用、エンドエフェクタの高機能化が実現した。これにより、栽培ベッドごと実験室に持ち込まれた高設栽培イチゴにおいて、収穫適期果実の約 7 割を収穫可能であることがわかった。さらに、各着果状態での収穫成功率に基づき、実際の移動栽培の現場における大凡の収穫量が推測可能になるとともに、作業能率の測定結果に基づき、適用可能な移動栽培の規模を試算可能な見込みを得た。

作業能率の点では、ロボット全体を遮光することにより、日中でも稼働可能であり、移動栽培装置への適用可能性があることが示唆された。今後、作業能率の向上を図るとともに、メンテナンス等の取扱性を改善して稼働時間を延長することにより、適用面積の拡大が見込まれた。

6. 4 摘要

移動栽培と定置型ロボットを組み合わせた収穫試験システムにより性能試験を行い、以下の知見が得られた。

1) 収穫試験システムを構築し、収穫性能試験を行った。収穫適期果実の収穫成功率は67.1%であった。その内訳として、収穫適期果実の位置検出率が89.0%、その果実の収穫適期判定率が83.4%、さらにその果実の採果率が90.3%であった。収穫に失敗した収穫適期果実の着果状態別の構成割合から、隣接果実がない着果状態での収穫適期判定率の向上が収穫成功率の改善に効果的であることが示唆された。

2) 着色率80%未満の未熟果を誤収穫した未熟果収穫率は21.3%であった。システム化したことにより横移送装置の発進・停止時の果実の揺れが発生し、収穫適期の判定精度に影響した結果、隣接果実がない着果状態及び通路側に隣接果実がある着果状態で未熟果収穫率が比較的高くなった。

3) 収穫した果実の損傷率は12.5%であり、栽培ベッド側に隣接果実がある着果状態で最も多く発生した。誤採果率は13.9%であり、下側に障害物がある着果状態で最も多く発生した。果柄残存果割合は12.0%であった。

4) 長さ1 mの栽培ベッド1台当たりにおいて収穫適期の果実個数が平均2.3個の場合、平均処理時間は126.7 sであった。横移送装置が停止中の果実1個当たりの収穫時間は平均31.5 sであった。

5) 栽培ベッドごと実験室に持ち込まれた高設栽培イチゴにおいて、収穫適期果実の約7割を収穫可能であったことから、移動栽培と定置型ロボットの組み合わせによる自動収穫性能の向上が認められた。

第7章 総括

7.1 まとめ

本研究は、移動栽培装置との組み合わせを前提とした定置型収穫ロボットを開発し、従来の収穫ロボットよりも高精度な自動収穫システムを実現するマシンビジョンとメカニズムを明らかにしたものである。以下に各章の概要を示す。

第1章では、研究の背景として、近年の日本における植物工場の普及動向及び労働力確保などの諸問題を概観し、この対策として収穫作業の自動化が求められている状況を述べた。このような収穫作業の自動化技術の一環として、イチゴを対象とし、定置型収穫ロボットと移動栽培装置を組み合わせたイチゴの自動収穫システムの有用性を述べ、本研究の重要性を示した。また、本研究で開発する機能と目標性能を明確にし、研究の目的を明らかにした。さらに、これまで開発された国内外の主な果実・果菜類収穫ロボット及び果菜類の移動栽培装置を概観した。果菜類収穫ロボットの収穫精度向上のため、自動収穫が容易な環境を構築する必要があることが明らかとなった。このため、ロボットの移動に伴う不安定要素が解消され、さらに、自動収穫に適した作業環境を整備できる移動栽培装置と組み合わせた定置型収穫ロボットにおいて、定置型の特徴を活かした機能の開発が必要であることがわかった。

第2章では、自動収穫に関するイチゴの特性として、高設栽培イチゴの着果状態を分類、解析するとともに、果実と果柄をつなぐ離層の離脱特性を明らかにした。まず、高設栽培されたイチゴを通路側、栽培ベッド側、下側の3方向から観察し、着果状態別に分類した。通路側から見た場合、収穫シーズンを通じて果実全体が見える割合は4~6割程度であったが、栽培ベッド側及び下側から見た方が、果実が露出している割合が7割以上と高いことが示された。また、果実と果柄をつなぐ離層の離脱特性として、果実と果柄の傾斜角を大きくすることにより、最大引張荷重が1/4程度まで小さくなることを明らかにした。これらの結果に基づき、マシンビジョンとエンドエフェクタに関して考察し、果実を検出するマシンビジョンと下側から果実を吸着、把持してもぎ取るエンドエフェクタが妥当と考えられた。

第3章では、栽培ベッドを移送する移送装置と定置型収穫ロボットから構成される収穫試験システムを提案した。収穫試験システムの主要構成要素、自動収穫の流れ、定置型収穫ロボットのマニピュレータの仕様と設置条件及び横移送装置の仕様を示した。

第4章では、多方向から果実を撮影するカメラ配置が容易に実現できる定置型の特徴を活かし、下側から果実位置を認識するステレオカメラと移動栽培ベッド側から横方向に果実を撮影する着色率測定カメラから構成されるマシンビジョンを構築した。果実の認識手法として、抽出画像に対して円形収縮、境界線の平滑化、ラベリング、円形膨張という粒子解析手法により重なった複数果実の個別認識手法を開発した。続いて白色、赤色、緑色照明を用いた画像処理と目視判定の関係を調査し、着色率測定手法を開発した。本手法により、目視判定結果との相関係数0.93、収穫適期判定成功率は94%に達した。さらに、下側から個別認識した果実の3次元位置情報を利用して測定対象外の隣接果実をマスク処理する手法を開発し、複数果実が重なった着果状態での着色率測定精度の向上が示唆された。

第5章では、振動機構により接近時に隣接果実との玉突き現象による対象果実の位置ずれを抑制する位置変化抑制機能、圧縮空気により隣接果実を対象果実から引き離して対象果実のみを採果する誤採果防止機能及びマニピュレータの動作方向を制御することで果実に果柄を残さない果柄除去機能を備えた多機能エンドエフェクタを提案した。接近成功率は100%、採果成功率は89.0%、対象果実の損傷率は17.2%、他の果実の誤採果は31.7%、果柄残存果割合は20.7%であった。障害物との玉突き現象による対象果実の位置変化が懸念される着果状態であっても、障害物が吸着管に引っかかることなく、対象果実に確実に接近・吸着したことから、位置変化抑制機能は有効であると判断された。誤採果防止機能により、通路側に隣接果実がある着果状態で誤採果率が25.0%まで抑制されることが確認された。果柄除去機能により、79.3%の割合で果柄を除去できた。

第6章では、収穫性能試験の結果を解析した。栽培ベッドごと実験室に持ち込まれた高設栽培イチゴにおいて、

収穫適期果実の 67.1%を収穫可能であったことから、従来の移動型イチゴ収穫ロボット⁵⁸⁾の収穫成功率の平均値 41.3%と比較し、移動栽培と定置型ロボットの組み合わせによる自動収穫性能の向上が認められた。しかし、収穫成功率の内訳として位置検出率、収穫適期判定率及び採果率を比較した結果、それぞれ 89.0%、83.4%、90.3%であり、収穫適期判定率がボトルネックとなっていることが判明した。この原因として、システム化したことにより横移送装置の発進・停止時の果実の揺れが発生し、収穫適期の判定精度に影響したと考えられた。また、誤採果率は 13.9%、収穫した果実の損傷率は 12.5%であったことから、エンドエフェクタの誤採果防止機能がある程度機能したことが確認された。

7. 2 今後の展望

今後の展望としては、以下のようなことが挙げられる。

1) 本研究によりイチゴの自動収穫精度の向上に必要な環境整備方法、エンドエフェクタの機能及びマシンビジョンに関する基礎技術が確立された。残された課題としては、マシンビジョンの収穫適期判定率の向上とエンドエフェクタの誤採果率及び損傷率の低減が挙げられる。前者に対しては、複数色の照明の切替えの高速化及び位置検出ユニットと着色率測定ユニットの画像取得タイミングの同期による果実の揺れの影響の低減に取り組み、後者に対しては、隣接果実を巻き込まないためのフィンガの小型化及び隣接果実を対象果実から確実に引き離すノズルの配置の最適化を行う。さらに、本研究で用いた 7 自由度多関節マニピュレータによるエンドエフェクタの動作が、3 自由度直交座標系マニピュレータの手先に 1 自由度の回転軸を追加することにより同様の動作が可能と推察された。このため、今後、マニピュレータを 4 自由度直交座標マニピュレータに簡素化することにより、収穫作業の高速化を図る方向で研究を進めたいと考える。

2) 今回の研究では、実際の栽培ベッドを横移送装置に積載して室内試験を行ったが、近年、イチゴの移動栽培技術に関して、筆者が所属する研究グループにより、冷蔵苗のモジュール化によるイチゴの高密植移動栽培システム⁸¹⁾が確立された。このシステムは、冷蔵苗を利用した周年生産及び慣行の 2 倍の栽植本数 (15,300 本/10a) により 10a 当たり 13.5t と慣行の 4 倍程度の生産が可能

と報告され、普及が期待されている。今後、このような高収益周年生産体系を実現する移動栽培システムに定置型イチゴ収穫ロボットを適用し、移動栽培装置と連動して自動収穫を行うシステムを構築する。この自動収穫システムにより、一層現場に近い収穫条件で試験を行い、実用化に向けた開発を進めたいと考える。

3) イチゴの品種、収穫時期等により果実の形状、着色傾向、果房形態等が異なる。すなわち、正常果の割合が低く、鶏冠果が多い品種では下側からの吸着が機能しないことも考えられる。また、外気温が上昇する収穫時期終盤では八分着色まで待たず、五分～六分着色での収穫が一般的である。さらに、果実が密集する果房形態の品種では隣接果実を引き離すことが困難である。今後、収穫時期及び‘紅ほっぺ’以外の品種への適用性を検討したいと考える。

4) 大規模な太陽光利用型植物工場では、作業台車が走行するレールなど移動型収穫ロボットに適した環境が整備されている。しかし、フレキシブルなカメラ配置、一般的な工業用ロボットで使用される圧縮空気及び AC 電源などを利用した多機能エンドエフェクタの装備など、自動収穫精度を向上させるために必要な環境整備が定置型と比較して困難と推測される。さらに、移動型では収穫した果実を集積所に運搬する時間を要する。また、光環境を整えるにはロボット全体を覆う遮光カバーが必要であり、小型軽量化が難しくなるため、夜間作業が前提になると予想される。一方、定置型では収穫物の運搬は必要なく、ロボットを遮光カバーで覆うことにより光環境を整備して終日作業も比較的容易に実現できる。よって、農産物を工業的に生産する植物工場をより効率よく実現するためには、本研究で提案した定置型収穫ロボットと移動栽培装置の組み合わせが妥当と考えられる。しかし、本システムの実用化に当たっては導入コストの低減が課題であり、高収益周年生産体系による経営の安定化が必要である。また、収穫作業以外の効率化を図るため、定置型収穫ロボットと選果装置のシステム化も効果的と推察される。さらに、収穫時期以外のロボットの活用方法の確立も実用化のため重要な要因である。例えば、マシンビジョンにより苗の生育状況、着花数・着果数のモニタリングにより、栽培管理に必要な情報を得る機能の検討も望まれる。

謝 辞

本論文は、京都大学学位審査論文（平成 23 年 1 月 24 日論農博 2747 号）を基に編集，加筆したものである。本研究は「次世代農業機械等緊急開発事業」及び「第 4 次農業機械等緊急開発事業」により実施された「イチゴ収穫ロボットの開発」の一部で行ったものである。本論文の一部は、Acta Horticulturae, 801: 565-571(2008), 農業機械学会誌, 71(6): 71-78(2009), 農業機械学会誌, 71(6): 106-114(2009), 農業機械学会誌, 72(2): 133-142(2010), Acta Horticulturae, 893: 325-332(2011) において発表したものである。

本論文をまとめるに当たり，終始懇切なご指導とご教示を賜りました京都大学大学院農学研究科の近藤直教授に深甚の謝意を表します。また，本論文の作成に当たり，貴重なご助言とご指摘を賜りました京都大学大学院農学研究科の清水浩教授，飯田訓久准教授に厚く御礼申し上げます。

本研究を実施するに当たり，生物系特定産業技術研究支援センターの行本修理事，宮崎昌宏園芸工学研究部長，金光幹雄前園芸工学研究部長，久保田興太郎元園芸工学研究部長，落合良治前特別研究チーム長，後藤隆志元特別研究チーム長，小倉昭男元特別研究チーム長に，研究の機会を与えて頂くとともに，ご指導，ご助言を賜りましたことに深く感謝いたします。また，イチゴ栽培の知見を頂きました愛媛県イチゴ生産者の渡辺茂氏，イチゴの品質及び収穫適期の知見を頂きました愛媛県農林水産研究所の河野靖氏に深く感謝いたします。移動栽培装置の園芸学的知見を頂きました宮城県農業・園芸総合研究所の岩崎泰永氏，漆山喜信氏に厚く御礼申し上げます。さらに，自動収穫技術の問題点と解決方法を議論し，共に研究を進めてきました吉田啓孝氏，小林研氏，重松健太氏に深く感謝する次第です。最後に，定置型イチゴ収穫ロボットの研究開発中に終始ご指導頂き，共に研究を進めてきました林茂彦氏に心より感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 古在豊樹編著，太陽光型植物工場，オーム社，18，2009
- 2) Heuvelink, E., 施設園芸・植物工場展 2010 基調講演，海外講演，特別セミナーテキスト，日本施設園芸協会，71-96
- 3) 農林水産省大臣官房統計部，第 83 次農林水産省統計表，550-551，2009
- 4) 日本施設園芸協会，園芸用ガラス室・ハウス等の設置状況，23，2007
- 5) 農林水産省大臣官房統計部，ポケット農林水産統計—平成 22 年度版—2010，191 及び 229，2010
- 6) 農林水産省大臣官房統計部，平成 19 年産品目別経営統計，204，2009
- 7) 近藤直，門田充司，野口伸，農業ロボット（I），コロナ社，4，2004
- 8) Shertz, C.E. and Brown, G.K., Basic considerations in mechanizing citrus harvest, Trans. ASAE, 11(2), 343-346, 1968
- 9) Parrish, E. A. and Goksel, A. K., Pictorial pattern recognition applied to fruit harvesting, Trans. ASAE, 20(5), 822-827, 1977
- 10) Grand d'Esnon, A, Robotic harvesting of apples, Proceedings of Agri-Mation 1 Conference and Exposition, , St Joseph, MI: ASAE, 210-214, 1985
- 11) Grand d'Esnon, A, Rabatel, G., Pellenc, R., Journeau, A. and Aldon, M.J., MAGALI: A self-propelled robot to pick apples, ASAE Paper 87-1037, 1987
- 12) Harrel, R.C., Adsit, P.D. and Slaughter, Real-time vision-servoing of a robotic tree fruit harvester, ASAE Paper 85-3550, 1985
- 13) Harrel, R.C., Adsit, P.D., Pool, T.A. and Hoffman, R., The Florida robotic grove-lab, Trans. ASAE, 33(2), 391-399, 1990
- 14) Pool, T.A. and Harrel, R.C., An end-effector for robotic removal of citrus from the tree, ASAE, 34(2), 373-378, 1991
- 15) Hannan, M.W. and Burks, T.F., Current

- developments in automated citrus harvesting, ASAE Paper 043087, 2004
- 16) van Henten, E. J., Hemming, J., van Tuijl, B. A. J., Kornet, J. G., Meuleman, J., Bontsema, J. and van Os, E. A., An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses, *Autonomous Robots*, 13, 241-258, 2002
- 17) van Henten, E. J., van Tuijl, B. A. J., Hemming, J., Kornet, J. G., Bontsema, J. and van Os, E. A., Field test of an autonomous cucumber picking robot, *Biosystem Engineering*, 86(3), 305-313, 2003
- 18) 川村登, 並河清, 藤浦建史, 浦元信, 農業用ロボットの研究(第1報), *農業機械学会誌*, 46(3), 353-358, 1984
- 19) 川村登, 並河清, 藤浦建史, 浦元信, 農業用ロボットの研究(第2報), *農業機械学会誌*, 47(2), 177-182, 1985
- 20) 近藤直, 門田充司, 芝野保徳, 毛利健太郎, トマトの栽培様式に基づくマニピュレータの基本機構の検討, *生物環境調節*, 31(2), 75-80, 1993
- 21) 近藤直, 門田充司, 藤浦建史, 芝野保徳, 毛利健太郎, 芦原慎太郎, 冗長自由度を有するマニピュレータの制御方法, *植物工場学会誌*, 5(1), 44-53, 1993
- 22) 近藤直, 門田充司, 芝野保徳, 毛利健太郎, トマトの物理的特性に基づく吸着パッドを利用した収穫用2指ハンド, *生物環境調節*, 31(2), 87-92, 1993
- 23) 門田充司, 近藤直, Ting, K. C., Giacomelli, G. A., Mears, D. R., Kim, Y., Ling, P. P., 一段逆さ仕立てトマト収穫用エンドエフェクタ, *農業機械学会誌*, 60(6), 97-104, 1998
- 24) 近藤直, 川村登, マニピュレータ装着用カメラによる果実の位置検出法, *農業機械学会誌*, 47(1), 60-65, 1985
- 25) 近藤直, 遠藤俊三, マニピュレータ装着用カメラによる果実の位置検出法(第2報), *農業機械学会誌*, 51(4), 41-48, 1989
- 26) 近藤直, 芝野保徳, マニピュレータ装着用カメラによる果実の位置検出法, *農業機械学会誌*, 52(4), 75-82, 1990
- 27) 川村登, 藤浦建史, 浦元信, 近藤直, 果実収穫用ロボット, *農業機械学会誌*, 47(2), 237-241, 1985
- 28) 近藤直, 芝野保徳, 毛利健太郎, 門田充司, ブドウ管理・収穫用ロボットの基礎的研究(第2報), *農業機械学会誌*, 56(1), 45-53, 1994
- 29) 林茂彦, ナスのロボット収穫システムの開発に関する研究, *野菜・茶業試験場研究報告*, 16, 187-234, 2001
- 30) 有馬誠一, 近藤直, 八木洋介, 門田充司, 吉田裕一, 高設栽培用イチゴ収穫ロボット(第1報), *植物工場学会誌*, 13(3), 159-166, 2001
- 31) 有馬誠一, 門田充司, 難波和彦, 吉田裕一, 近藤直, 高設栽培用イチゴ収穫ロボット(第2報), *植物工場学会誌*, 15(3), 162-168, 2003
- 32) 近藤直, 遠藤俊三, 果実認識用視覚センサの研究(第1報), *農業機械学会誌*, 49(5), 476-482, 1987
- 33) 近藤直, 遠藤俊三, 果実認識用視覚センサの研究(第2報), *農業機械学会誌*, 49(6), 563-570, 1987
- 34) 近藤直, 遠藤俊三, 果実認識用視覚センサの研究(第3報), *農業機械学会誌*, 50(6), 83-89, 1988
- 35) 近藤直, 芝野保徳, 毛利健太郎, 門田充司, 中村博, 有馬誠一, キュウリ果実検出用視覚センサの研究(第1報), *生物環境調節*, 31(2), 93-100, 1993
- 36) 近藤直, 中村博, 芝野保徳, 門田充司, 有馬誠一, キュウリ果実検出用視覚センサの研究(第2報), *生物環境調節*, 33(4), 237-244, 1995
- 37) 林正彦, 上田吉宏, 鈴木弘, 農用ロボットの開発, 第6回日本ロボット学会学術講演会講演要旨, 579-580, 1988
- 38) 有馬誠一, 近藤直, 芝野保徳, 山下淳, 藤浦建史, 秋好広明, キュウリ収穫ロボットの研究(第1報), *農業機械学会誌*, 56(1), 55-64, 1994
- 39) 有馬誠一, 近藤直, 芝野保徳, 藤浦建史, 山下淳, 中村博, キュウリ収穫ロボットの研究(第2報), *農業機械学会誌*, 56(6), 69-76, 1994
- 40) 有馬誠一, 藤浦建史, 近藤直, 芝野保徳, 山下淳, キュウリ収穫ロボットの研究(第3報), *農業機械学会誌*, 57(1), 51-58, 1995
- 41) 藤浦建史, 中尾清治, 近藤直, 土肥誠, 山下淳, 農作業ロボットのための2波長式三次元視覚センサ, *農業生産技術管理学会誌*, 2(1), 59-64, 1995

- 42) Subrata, I. D. M., 藤浦建史, 山田久也, 檜田賢, 湯川琢至, 中尾清治, 三次元視覚センサを用いたミニトマト収穫ロボット (第1報), 農業機械学会誌, 58(4), 45-52, 1996
- 43) Subrata, I. D. M., 藤浦建史, 山田久也, 石原幸信, 湯川琢至, 檜田賢, 三次元視覚センサを用いたミニトマト収穫ロボット (第2報), 農業機械学会誌, 60(1), 59-68, 1998
- 44) 韓麗婭, 藤浦建史, 山田久也, 石東宣明, 北村豊, エンドエフェクタに三次元視覚センサをもつミニトマト収穫ロボット (第1報), 農業機械学会誌, 62(2), 118-126, 2000
- 45) 韓麗婭, 藤浦建史, 山田久也, 石東宣明, 土肥誠, エンドエフェクタに三次元視覚センサをもつミニトマト収穫ロボット (第2報), 農業機械学会誌, 62(2), 127-136, 2000
- 46) 藤浦建史, 和光光生, 西浦芳史, 池田英男, 林挺希, 馬場康裕, 土肥誠, 移動型栽培施設のミニトマト収穫ロボット (第1報), 農業機械学会誌, 72(2), 143-151, 2010
- 47) 藤浦建史, 和光光生, 西浦芳史, 池田英男, 林挺希, 馬場康裕, 土肥誠, 移動型栽培施設のミニトマト収穫ロボット (第2報), 農業機械学会誌, 72(2), 152-159, 2010
- 48) 林茂彦, 雁野勝宣, 黒崎秀仁, 有馬誠一, 門田充司, V字型整枝されたナスを対象としたロボット収穫システム (第1報), 植物工場学会誌, 15(4), 205-210, 2003
- 49) 林茂彦, 雁野勝宣, 黒崎秀仁, 有馬誠一, 門田充司, V字型整枝されたナスを対象としたロボット収穫システム (第2報), 植物工場学会誌, 15(4), 211-216, 2003
- 50) 佐藤経明, 竹永博, 芋生憲司, イチゴ収穫ロボットの開発, 農業機械学会第55回大会講演要旨, 243-244, 1996
- 51) 近藤直, 久枝和昇, 羽藤堅治, 山下淳, 門田充司, 内成り栽培用イチゴ収穫ロボットの研究 (第1報), 植物工場学会誌, 12(1), 23-29, 2000
- 52) 近藤直, 門田充司, 久枝和昇, 内成り栽培用イチゴ収穫ロボット (第2報), 植物工場学会誌, 13(4), 231-236, 2001
- 53) 有馬誠一, 湯木正一, 山下淳, 加藤岳史, イチゴ栽培におけるマルチオペレーションロボット, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演要旨集, 2P2-L2-14, 1-2, 2004
- 54) 崔永杰, 永田雅輝, 槐島芳徳, 曹其新, マシンビジョンによる内成り栽培用イチゴ収穫ロボットの研究 (第1報), 農業機械学会誌, 68(6), 59-67, 2006
- 55) 崔永杰, 永田雅輝, 郭峰, 日吉健二, 木下統, 御手洗正文, マシンビジョンによる内成り栽培用イチゴ収穫ロボットの研究 (第2報), 農業機械学会誌, 69(2), 60-68, 2007
- 56) 門田充司, 山下福海, 難波和彦, 毛利健太郎, 吉田裕一, 高設栽培イチゴ収穫ロボットの研究, 農業機械学会関西支部報, 92, 70-71, 2002
- 57) Rajendra, P., Kondo, N., Ninomiya, K., Kamata, J., Kurita, M., Shiigi, T., Hayashi, S., Yoshida, H. and Kohno, Y., Machine Vision Algorithm for Robots to Harvest Strawberries in Tabletop Culture Greenhouses, EAEF 2(1), 24-30, 2009
- 58) Hayashi, S., Shigematsu, K., Yamamoto, S., Kobayashi, K., Kohno, Y., Kamata, J. and Kurita, M., Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test, Biosystems Engineering, 105, 160-171, 2010
- 59) 重松健太, 林茂彦, 山本聡史, 小林研, 河野靖, 鎌田順三, 栗田充隆, イチゴ促成栽培における収穫ロボットの周年利用に関する研究, 農業機械学会誌, 72(2), 133-142, 2010
- 60) 尾崎功一, イチゴ摘みロボットの研究開発と実用化, 今月の農業, 50(10), 40-45, 2006
- 61) 尾崎功一, 原紳, 鹿内佳人, 大山貴史, 出射聡明, イチゴ摘みロボットの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演要旨集, 1A1-21, 1-4, 2010
- 62) 高嶺秀人, 長谷川浩章, 岩田浩康, 菅野重樹, 山下智輝, 熊沢四郎, 柏原直哉, 重松健太, 小林研, 高設栽培いちごの夜間自動収穫システムの提案, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演要旨集, 2A1-B04, 1-2, 2008

- 63) 中尾真梨子, 高嶺秀人, 山下智輝, 熊沢四郎, 柏原直哉, 小林研, 石綿陽子, 菅野重樹, 内外両側アプローチ可能ないちご収穫ロボットにおける果柄接触取込型エンドエフェクタの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演要旨集, 1A2-C08, 1-2, 2009
- 64) 中尾真梨子, 堀内大介, 菅原英剛, 菅野重樹, 熊沢四郎, 柏原直哉, 山本聡史, 齋藤貞文, 高設栽培いちご収穫ロボットにおける収穫アプローチ方向の検討, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演要旨集, 1A1-20, 1-2, 2010
- 65) 倉田 勇, 温室内の作物可動式栽培装置に関する研究(第1報), 農業機械学会誌, 46(1), 639-644, 1984
- 66) 倉田 勇, 温室内の作物可動式栽培装置に関する研究(第2報), 農業機械学会誌, 46(2), 205-210, 1984
- 67) 倉田 勇, 温室内の作物可動式栽培装置に関する研究(第3報), 農業機械学会誌, 46(3), 297-302, 1984
- 68) 倉田 勇, 温室内の作物可動式栽培装置に関する研究(第4報), 農業機械学会誌, 46(4), 443-450, 1985
- 69) McAvoy, R. J. and Giacomelli, G. A., Greenhouse tomato production in a transportable, potted plant cropping system, *Acta Horticulture*, 187, 107-113, 1986
- 70) Kabala, W. P. and Giacomelli, G. A., Transportation and elevation system for greenhouse crops, *Applied Engineering in Agriculture*, 8(2), 133-139, 1992
- 71) van Os, E. A., van Zuijdam, R. P., Hendrix, A. T. M. and Koch, V. J. M., A moving fruit vegetable crop, *Acta Horticulture*, 342, 69-76, 1993
- 72) 崎山一, 土屋和, 宇田川雄二, 移動栽培装置を用いたトマトの管理作業の快適化と周年安定生産技術の開発(第1報), 千葉県農業総合研究センター研究報告, 3, 13-23, 2004
- 73) 崎山一, 土屋和, 宇田川雄二, 移動栽培装置を用いたトマトの管理作業の快適化と周年安定生産技術の開発(第2報), 千葉県農業総合研究センター研究報告, 3, 25-35, 2004
- 74) 吉田啓孝, 山本聡史, 林茂彦, 岩崎泰永, 漆山喜信, イチゴの高密度植栽培のための移動栽培装置の開発, 農業機械学会誌, 70(4), 98-106, 2008
- 75) 竹内隆, 藤浪裕幸, 河田智明, 松村雅彦, イチゴ新品種‘紅ほっぺ(仮称)’の育成経過と主特性, 静岡県農業試験場研究報告, 44, 13-24, 1999
- 76) 画像電子学会3次元画像調査専門委員会3次元画像用語事典編集委員会編, 2000, 3次元画像用語事典, 新技術コミュニケーションズ, 東京, 18
- 77) 出口光一郎, ロボットビジョンの基礎, 2000, コロナ社, 東京, 34-35
- 78) 日進電子工業株式会社技術資料, 発光波長・スペクトル分布, www.nissin-ele.co.jp, 2011
- 79) MVTec Software GmbH, 2008, 画像処理アルゴリズムと実践アプリケーション, (株)リンクス, 神奈川, 182-185
- 80) 紺屋朋子, 大森定夫, 林茂彦, イチゴの品質保持技術に関する研究(第1報), 農業機械学会誌, 69(3), 67-74, 2007
- 81) 農林水産省農林水産技術会議事務局, 新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業研究紹介 2009, 7, 2009

Summary

Development of a Stationary Robotic Strawberry Harvester with Picking Mechanism that Approaches Target Fruit from Below

Satoshi YAMAMOTO

The aim of this study is to develop a stationary robotic harvester that is combined with a transportable bench system for strawberries, and to reveal its superiority over conventional robotic harvesters from a perspective of high precision harvesting operation.

1. Introduction

Plant factories have been drawing widespread attention from views of safety and reliability of food production and consumption. For plant factories, many sensing devices to obtain precise plant information and controllers to maintain appropriate environment for plant-growth have been developed. In vegetable production at such plant factories, however, much labor force has still been required for operations of harvesting, sorting and packing. Considering labor shortage in the foreseeable future, automation technology will be necessary for a stabilization of vegetable production in a plant factory. Thus, we decided to develop robotic harvester for strawberries. A number of conventional robotic harvesters for fruits and vegetables are discussed, and transportable bench systems for vegetable fruits such as tomato, paprika and strawberry for industrial bioproduction system are also explained. For an improvement of precise operation of a robotic harvester in industrial strawberry production, it was considered that a combination of a stationary robotic harvester and a transportable bench system would be more effective solution than conventional robotic harvesters which have to travel all around the greenhouse to pick matured fruits.

2. Basic Investigation of Robotic Harvesting

We investigated the features of strawberry fruits in terms of robotic harvesting. At first the difficulty to approach a target fruit from three directions; front, back and below, was classified and analyzed using table-top plants cultured in greenhouses. Throughout the harvest season of strawberries, percentages of whole-visible-fruit were in range of 40 - 60 % from front side. On the other hand, the percentages were 70 % and higher when seen from back side or below. Thus, it was revealed that it is easier for a robotic harvester to detect and approach the target fruit from back side or below than from front side. Next, the maximum force to separate a strawberry fruit from the peduncle was measured. It was observed that the force of separation could

be reduced to about 1/4 by tilting the fruit against the peduncle when pulling the fruit. Based on these results, we designed a machine vision and an end-effector of the stationary robotic harvester.

3. Outline of the Stationary Robotic Harvester

We constructed an experimental system for a performance test of the stationary robotic harvester. It consists of the robotic harvester and a transporting unit for a bench of strawberry plants. Main components of the experimental system, a flow of the automatic harvesting operation, the specification and the layout of the manipulator of the robotic harvester and the specification of the transporting unit are described.

4. Construction of a Machine Vision

An optical system was constructed to equip the stationary robotic harvester with an ability to detect and determine three dimensional position and coloration of a strawberry fruit. Positions of fruits were detected from below with a stereo-camera. We developed an image processing algorithm to separately recognize fruits occluding and disturbing each other. Then, a coloration measurement unit was set near-by the transporting unit for a bench of strawberry plants at the fruit level to capture images of the target fruits. Considering the spectral reflectance characteristics of a strawberry fruit, the illumination was equipped with red, green, and white LEDs. To evaluate the accuracy of the coloration measurement, we compared the coloration by human-eye with that by the unit. The correlation coefficient was 0.93 and the rate of proper judgment of the maturity achieved to be 94.1 %. Furthermore, we improved the accuracy of the coloration measurement of fruits overlapping each other by masking obstacles using the position information of the target fruit.

5. Development of an End-effector

For the accuracy enhancement of picking motion of the robotic harvester, we developed an end-effector with three unique functions; (1) vibration of the suction cup to minimize the influence of the adjoining fruits at the time of approach; (2) discharge of compressed air blown toward the adjoining fruits to force them away from the target fruit; (3) removal of peduncles by tilting and pulling motion of the target fruit. The end-effector was set on the manipulator and a program of picking motion was installed. As a result of basic performance test in which actual strawberry plants were provided, the success rate of approach motion and picking motion were 100 % and 89.0 % respectively. Even when the target fruit was blocked partly by the adjoining fruits, the end-effector approached and picked the target fruit successfully, and the vibration function of the end-effector seemed to work effectively. The separation function by compressed air also reduced the rate of miss-picking adjoining fruits to 31.7 %. The rate of remaining peduncle on the picked fruits was 20.7 %, therefore the tilting motion seemed to have worked properly. The rate of damaged fruits, however, was 17.2 %. It was observed that the adjoining fruits picked simultaneously with the target fruit caused the damage of the target fruit.

6. Performance Test of the Stationary Robotic Harvester

The stationary robotic harvester was tested with an experimental harvesting system in which the robotic harvester was combined with the transporting unit for a bench of strawberry plants. We examined the performance in 50 beds, each of which contained 10 strawberry plants. The success rate of harvesting matured fruits was 67.1%, of which the success rate of detecting fruit position was 89.0%, the rate of correct judgment of fruit coloration was 83.4%, and the rate of picking detected fruit was 90.3%. On the other hand, the rate of harvesting immatured fruits mainly caused by the misjudgement of fruit coloration was 21.3%. The rate of damaging harvested fruit was 12.5% and the rate of picking other fruits simultaneously was 13.9%. The average processing time per bed was 126.7 s when the average number of matured fruit in the bed was 2.3.

7. Conclusion

It was confirmed that the stationary robotic harvester was superior to a conventional robotic harvester in that high success rate of harvesting was stabilized with both the unique end-effector and machine vision. Reduction of the damage of picked fruits and improvement of working speed, however, remained unsolved. Based on the results of this study, we expect that an industrial strawberry production system, not only with a stationary robotic harvester but also with a monitoring and control system for the plant growth, unmanned plant protection system and automatic sorting-and-packing system, will be realized in near future.

本報告の取扱いについて

本報告の全部又は一部を無断で転載・複製
(コピー) することを禁じます。

転載・複製に当たっては必ず原著者の許諾
を得て下さい。

農業機械化研究所研究報告 第42号

平成24年11月 印刷・発行
頒価525円(本体価格500円)

Technical Report of the Institute
of Agricultural Machinery No.42

〒331-8537

埼玉県さいたま市北区日進町1丁目40番地2

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構
生物系特定産業技術研究支援センター
農業機械化研究所
Institute of Agricultural Machinery
Bio-oriented Technology Research Advancement Institution
National Agriculture and Food Research Organization

URL: <http://www.naro.affrc.go.jp/brain/iam/>

印刷・製本 / 文進堂印刷株式会社

