

第9章 試作機による収穫・選別の室内実験

第1節 緒言

本研究が目標とするイチゴの収穫・選別システムは、生産者の労働負担の軽減、生産性の向上、品質の確保を目指している。システムの開発は、性能を落とさず生産者のニーズに合わせた低コストが必要であることから、生産者とシステムの共同作業を考慮した。そこで、収穫し易い状態で果実が存在するように、球出し作業、初期収穫を行った後、システムによる収穫を行うことができれば、規模拡大、コスト削減などにつながる。また、システムの構築は、一定の機能を満たす各要素を機能的に組み合わせる必要がある¹⁾²⁾³⁾。

イチゴを収穫・選別するシステムの基本要素として、第5章では位置決め用カメラによる果実認識の画像処理法を、第6章では採果用カメラによる果柄認識の画像処理法を、第7章では果実選別の画像処理法を、第8章では果柄を検出して把持・切断する採果ハンドを提案し、開発機を用いた実験でそれぞれの有用性を確認した。

本章では、前章までに確認できた各要素を機能的に組み合わせたイチゴの収穫・選別システムの試作機を用いて、現場を再現した内成り栽培モデル畝で収穫実験を行い、システム動作を確認するとともに、収穫率、収穫処理速度、イチゴの収穫動作、収穫したイチゴの物理特性などを用いてシステムの有用性を検討した⁴⁾。

第2節 実験装置および方法

1. 供試イチゴおよびモデル畝

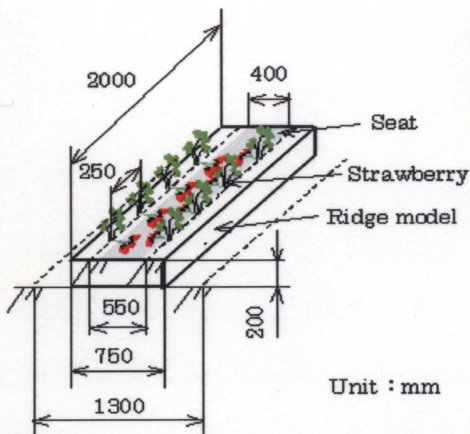
モデル畝の再現に用いた供試イチゴは、図9-1に示すように、着色果、未熟果を有する品種‘章姫’の株を1個のプランタ（長さ600×幅200mm）に2株移植したものである。培養土は生産農家を使う杉の切り粉に水を加えて一定の水分を保つようにした。株間は300mm、ランナは同じ方向とした。



図 9-1 イチゴを移植したプランタ

Fig. 9-1 Planter used for transplanting strawberry

図 9-2 (a)に示すように、モデル畝の長さは 2000mm、高さは 200mm、幅は 750mm とした。図 9-2 (b)に示すのは、内成り栽培の現場を再現したモデル畝である。1セットのモデル畝は、プランタ 3個を 2列に並べた(計 6個)上に発泡スチロール板を置き、その上に黒色の不織布(旭化成)を敷いたものである。果実はモデル畝面で中央に向かうように並べ、球出し作業を事前に行った。システムは、玉出し作業を行ったモデル畝をまたいで移動しながら、1セットのモデル畝において 3回の収穫実験が行えるものである。



(a) 寸法



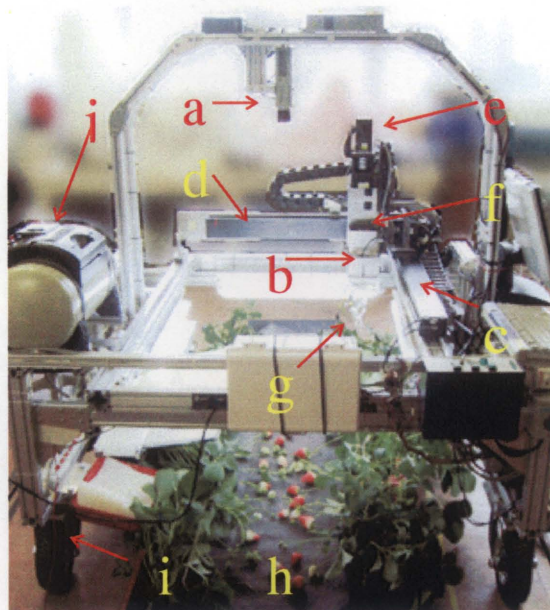
(b) 写真

図 9-2 収穫用モデル畝

Fig. 9-2 Model ridge for harvesting

2. 試作機

図9-3に示す試作機は、実験に用いた開発機にPC、駆動装置（タイヤとモーター）、圧縮空気タンク、モニタを台車に取り付けて、完全に独立して移動しながら、イチゴの収穫・選別を行うシステムである。電源はケーブルで供給した。



(a)カメラ1 (b) カメラ2 (c) X軸 (d) Y軸 (e) Z軸 (f) S軸
(g) 採果ハンド (h) 畝 (i) タイヤ (j) 圧縮空気タンク

図9-3 試作機（システム）

Fig. 9-3 Prototype (system)

システムは開発機の画像処理、マニピュレータ、採果ハンドだけでなく、駆動装置も含むすべての要素の作業順序を制御するもので、自作したプログラム（Visual C++6.0）をもちいて一連の収穫・選別作業を自動化した。

駆動装置は、タイヤの回転角（回数）とタイヤの半径を用いて移動距離を換算し、モーター専用アンプのスイッチの開閉を制御することで、システムがモデル畝をまたいで約600mm ずつ間欠移動できるようにした。タイヤの回転角は光ファイバセンサで計測する方法も検討したが、室内実験ではより簡単な移動時間による計測方法（指定距離まで移動に掛かる時間）を用いた。圧縮空気タンクは、採果ハンドの駆動に必要な動力として、一度

圧縮空気を溜めておくと、外部の支援なしでシステムが移動しながらしばらく使用し続けることが出来る。なお、安全のための緊急停止ボタンを設けた。

モニタは、初期設定、原点復帰などユーザーと PC の情報確認と、常に収穫エリアにおける作業の様子を監視する。

3. 測定項目および方法

(1) 収穫率

システムによるイチゴの収穫は、図 9-4 に示すように、位置決め用カメラによる果実認識の画像処理法、採果用カメラによる果柄認識の画像処理法、果実選別の画像処理法、採果ハンドによる果柄の検出および把持・切断が含まれる。

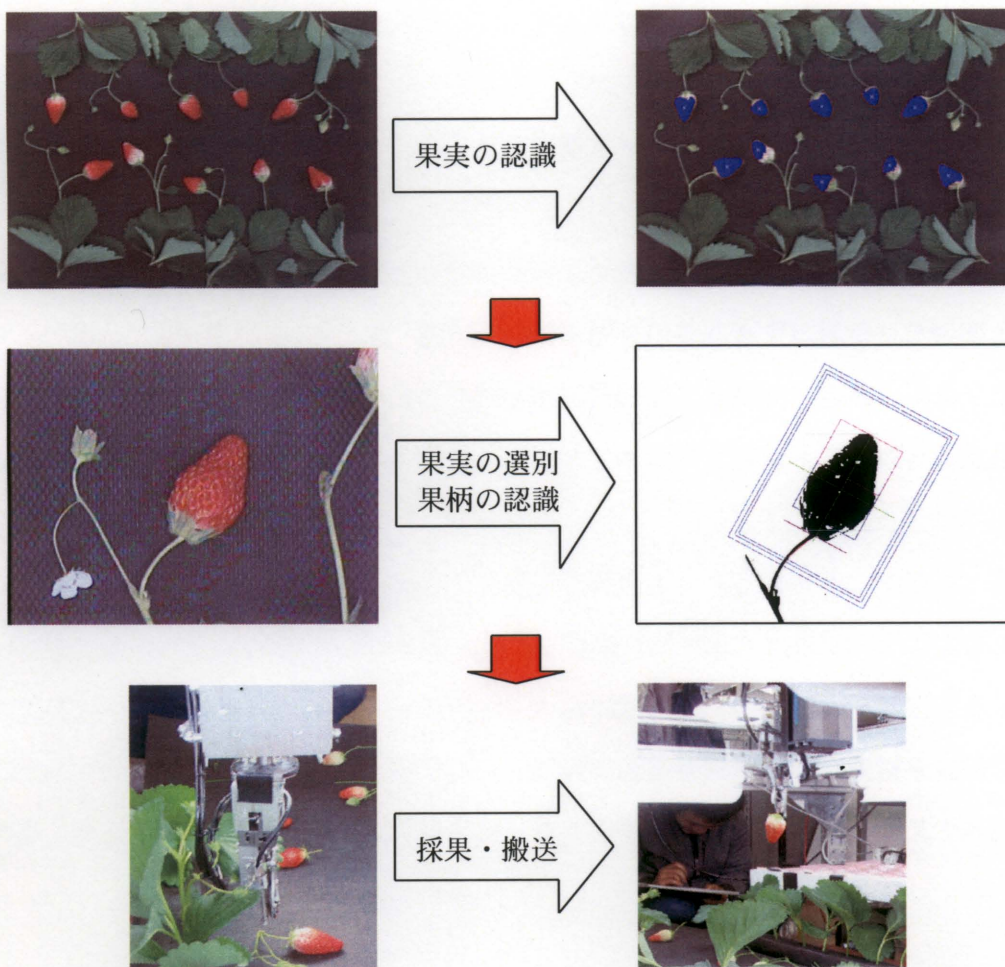


図 9-4 システムの作業流れ

Fig. 9-4 Working flow of system

収穫率は、供試した未熟果と収穫適期果実の中から、最終的に採果してベルトコンベアに運んだ5・6分着色以上の果実と認識しなかった未熟果を含む果実数の割合で求めた。

果実認識率は、供試した未熟果、収穫適期果実の中から、認識できた収穫適期果実数の割合で求めた。

果柄認識率は、認識できた収穫適期果実の中から、果柄表示線の抽出（採果位置Pと方向角 α ）が出来た果実数の割合から求めた。

果柄検出率は、果柄表示線が抽出できた収穫適期果実の中から、センサで収穫適期果実の果柄が検出できた果実数の割合から求めた。

果柄の把持・切断率は、果柄の検出が出来た果実の中から、収穫適期果実の果柄を把持・切断できた果実数の割合から求めた。

(2) 収穫処理速度

収穫エリアにおける収穫処理時間は、システムの移動時間、果実の認識の時間、採果時間が含まれる。

システムの移動時間は、システムが新たな収穫エリアへ移動し始めてから、600mm移動して停止するまでの時間とした。

果実の認識の時間は位置決め用カメラが収穫エリアの画像を撮影してから、果実認識の画像処理法で採果目標果実の位置、個数、採果順序を決めるまでに掛かった時間とした。

採果時間は、収穫エリアで採果用カメラが最初の採果目標果実へ移動し始めてから、最後の採果目標果実をベルトコンベアへ運んで排出するまでに掛かった時間とした。

(3) 熟度判定

システムは5・6分着色以上の果実を収穫適期果実として収穫する。そこで、熟度判定は、収穫できた果実の熟度が5・6分着色以上（生産者が判定した供試イチゴの熟度）であるかを比較した。また、システムは収穫適期果実の果柄を15mmで把持・切断するように設定したので、収穫できた果実の果柄の長さとも果柄の直径を計測して、収穫果実の評価指標とした。果柄の長さは離層部から切断位置（採果位置）までの長さをノギスで計測した。

第3節 結果および考察

1. 収穫率

表 9-1 はモデル畝 3 セットにおける収穫率を示したものである。収穫率は平均 60.77% であり、その内訳は、果実の認識率が平均 93.59%、果柄の認識率が平均 70.81%、果柄の検出率が平均 78.76%、果柄の把持・切断が平均 83.24% であった。この中で果柄の認識率が、最も低かったが、主に果柄認識の画像処理において、採果目標果実の周辺の未熟果、葉などの影響により、果柄付き果実の 2 値画像における果実の向き判定ミスが多かったのが主な原因であると考えられる。果柄検出のミスは、収穫適期果実の真上に他の果柄があったため、センサが先に反応して採果ハンドが止まってしまったことであった。果柄の把持・切断ミスは、垂直方向での果柄の傾きが 45° 以上であった場合、センサとハサミの位置関係から、センサが果柄を検出してもフィンガとハサミの先が果柄に届かなかったことであった。果実の認識率は最も高く、球出し作業がある場合を想定した実験では実用化に最も近い性能を示した。また、果柄を把持・切断できた果実はすべてベルトコンベアに運ばれ、排出できた。

表 9-1 収穫率

Table 9-1 Harvest rate

セット	No. 供試果実		果実の認識	果柄の認識	果柄の検出	把持・切断	収穫率(%)
	未熟	収穫適期間	個数 (割合%)	個数 (割合%)	個数 (割合%)	個数 (割合%)	
1	11	26	23 (88.46)	16 (69.57)	11 (68.75)	9 (81.82)	54.05
2	11	26	24 (92.31)	18 (75.00)	15 (83.33)	13 (86.67)	64.86
3	13	28	28 (100.00)	19 (67.86)	16 (84.21)	13 (81.25)	63.41
平均			93.59	70.81	78.76	83.24	60.77

よって、本システムは一個ずつ独立した簡単なモデルでは、基本性能を満たしていたが、現在の手作業による収穫状態での栽培現場では収穫適期果実の周辺および上方に未熟果、花、葉、果柄などが存在するため、条件が複雑になり性能が落ちる傾向が確認できた。今後の課題として、果柄の認識の画像処理における果実の方向の判断、果柄の検出におけるセンサとハサミ・フィンガとの位置関係の改良が必要であると考えられる。

2. 収穫処理速度

表9-2は収穫処理速度を示す。システムにおける一個当たりの収穫処理時間は平均16.6sであり、その内訳は、駆動装置による新たな収穫エリアへのシステムの移動時間が平均8.0s、収穫エリアにおける果実の認識時間が平均3.3sであった。さらに採果目標果実の選別、果柄の認識、果柄の検出および果柄の把持・切断を含む一連の採果動作に掛かる時間を加えた場合、一個あたりの収穫時間は14.4~19.8sであり、平均は約16.6sであった。現場調査での作業者の一個当たり平均収穫処理時間は3.5sであり、システムにおける収穫処理時間の約5分の1であるので、収穫処理速度の向上が必要であると考えられる。今回はすべての作業が順番どおり行われたので、今後は画像処理速度、マニピュレータの制御速度の向上とともに、マニピュレータの作業と画像処理を並行して行う必要もあると考えられる。

表9-2 収穫処理速度

Table 9-2 Harvesting speed

Set	収穫エリア	果実の個数(pcs)	システムの移動時間(s)	果実の認識時間(s)	採果累積時間(s)	トータル時間(s)	平均収穫時間(s/果)
1	1	6	8.0	4.5	106.3	118.8	19.8
	2	9	7.9	3.1	141.6	152.5	16.9
	3	7	8.0	2.6	94.2	104.9	15.0
2	1	7	8.0	3.9	105.7	117.6	16.8
	2	8	8.0	2.9	123.8	134.7	16.8
	3	5	8.0	2.6	80.0	90.6	18.1
3	1	9	7.9	3.5	118.5	129.8	14.4
	2	11	8.1	4.0	169.9	182.0	16.5
	3	10	8.3	2.3	155.6	166.2	16.6
平均		8	8.0	3.3	121.7	133.0	16.6

3. 熟度判定

図9-5は収穫したイチゴの写真の一例を示したものである。収穫した果実の熟度は果実の大きさに関係なく、収穫適期果実である5・6分着色以上であり、未熟果は含まれていなかった。果実選別において、着色率 R_i を用いて検討した収穫適期果実の判定は、熟度ごとに判定することまではいたらなかったが、5・6分着色以上を収穫適期果実としたシステムの設定と一致することが確認できた。



図 9-5 収穫した果実

Fig. 9-5 Harvested fruits

表 9-3 は、収穫したイチゴの果柄の計測結果を示す。果柄の長さは、平均 17.2mm、標準偏差 4.1mm であり、直径は平均 1.0mm 標準偏差 0.3mm であった。これは、システムにおける果柄認識の画像処理で設定した果柄の長さ 15mm の付近に集中して揃ったことから、実用上問題ないと言える。果柄の長さのバラつきは、果柄認識の画像処理における果柄付き果実の慣性主軸の傾きと果実の向きがずれたこと、果柄が果実に対して曲がっていること、離層部の抽出がずれたことなどが主な原因と考えられる。

表 9-3 収穫後の果柄

Table 9-3 Peduncle after being harvested

セット	果柄					
	長さ (mm)			直径 (mm)		
	範囲	平均値	標準偏差	範囲	平均値	標準偏差
1	9.9 - 23.2	17.3	3.8	0.6 - 1.4	0.9	0.2
2	11.0 - 23.5	16.8	3.8	0.7 - 1.4	1.0	0.2
3	8.5 - 29.2	17.4	4.9	0.5 - 1.9	1.1	0.4
平均	8.5 - 29.2	17.2	4.1	0.5 - 1.9	1.0	0.3

以上の結果により、位置決め用カメラによる果実認識の画像処理法、採果用カメラによる果柄認識の画像処理法、果実選別の画像処理法、果柄を検出して把持・切断する採果ハンド、駆動装置などの要素を導入した試作機は、開発概念どおりにイチゴの収穫・選別の

作業が可能なシステムであるといえる。

第4節 摘 要

1 果ごとにモデル配置した基礎実験と比較するために、現場の状況を再現した複雑な果実配置を用いて、イチゴ収穫・選別システムによる室内収穫実験を行った結果、以下の知見を得た。

1) 収穫率は約 54.1~64.9%であり、その内訳は、果実の認識率が平均約 93.6%、果柄の認識率が平均 70.8%、果柄の検出が平均約 78.8%、果柄の把持・切断が約 83.2%であった。これは基礎実験と比べて約 20%の低下となった。果柄が混在する状況下では画像処理法による果柄の認識は限界があることが明らかになった。

2) 一個当たり収穫処理時間は約 14.4~19.8s/果であり、現場における作業者の一個当たり収穫処理時間である平均 3.5 s の約 5 倍であった。今後は画像処理速度、マニピュレータの制御速度の向上とともに、マニピュレータの作業と画像処理を並行して行う必要もあると考えられる。

3) 収穫した果実の熟度判定は全て 5・6 分着色以上となり、また、果柄の長さは平均 17.2mm となり、設定した長さが 15mm であることから、満足できる結果であった。果柄の長さのバラつきは、果柄認識の画像処理における果柄付き果実の慣性主軸の傾きと果実の向きがずれたこと、果柄が果実に対して曲がっていたこと、離層部の抽出がずれたことなどが主な原因と考えられる。

4) 以上のように、本論文は果実、果柄、熟度を自動認識する画像処理法の提案、果柄を把持・切断する独創的機構の採果ハンドの開発を究明し、イチゴの収穫・選別システムの知見を提供したものである。また、本システムにおける画像処理法、採果ハンド、制御技術はイチゴのみならずキュウリ、トマトなどの果菜類の収穫・選別にも応用できることが期待できる。

引用文献

- 1) 岡本嗣男：農業ロボット開発の課題と展望 (2) 農業ロボット研究の現状と課題, 農業機械学会誌, 58(1), 128~132, 1996
- 2) 行本修：農業ロボット開発の課題と展望 (2) 農業用車両のロボット化の課題と展望, 農業機械学会誌, 58(1), 133~139, 1996
- 3) 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
- 4) Masateru Nagata, Yongjie Cui, Jasper Tallada, Taichi Kobayashi, Cao Qixin : Study on Cartesian-type Harvesting Robot for Strawberry, Bio-Robotics III, Preprints of 3rd IFAC International workshop on Bio-Robotics, Information Technology and Intelligent Control for Bioproduction Systems, Sapporo Japan, 266~270, 2006