

第4章 内成り栽培における収穫・選別のシステム化の開発

第1節 開発の概念

1. 背景

イチゴは消費者にとっては、健康食品、デザート食品として好まれているが、生産者にとっては、収穫作業は腰を曲げた過酷な姿勢であり、かつ長期間であること、果実が傷つき易いため丁寧に収穫と選別をしなければならないこと等、多大な労力と手間がかかるものである。そのため、収穫と選別調整作業に要する時間は総作業時間の約60%を占め、その機械化が強く望まれている¹⁾²⁾。

一般に、生物生産の対象物は、物性、種類、形状、個体差があるため、収穫・選別のシステム化には知的推論と判断が必要である³⁾。第3章で記述した研究動向において、収穫または選別のシステム化は、品目によって様々な形態が見られるが、マニピュレータは固定または台車に乗せて移動する形式があり、対象物は視覚センサで取得した外部情報からアルゴリズムで認識し、エンドエフェクタ（以下、採果ハンドと称す）は対象物を傷つけないように扱う仕組みになっている。しかし、研究事例にあるようなシステム化では収穫と選別を別々に扱っている場合が多く、対象物との接触回数が多くなるため、品質への影響および作業効率への影響が懸念される。特に、表皮が柔らかく小粒であるイチゴは、他の果菜類に比べて損傷の回避、熟度の判定などの取り扱いがひととき難しく、高度なシステムが要求されることになる。

そこで、筆者らは作業負担を軽減するとともに作業効率を向上させるために、1998年から果実に触れずに収穫と選別を同時に考慮したマシンビジョンによるイチゴの収穫・選別システム化の研究を開始した⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

本章では、内成り栽培における収穫・選別のシステム化のための開発機について述べる⁶⁾。

2. 内成り栽培方式

イチゴの土耕栽培方式には、内成り栽培と外成り栽培がある。内成り栽培はマルチフィルムで被覆された平畝の両端に株を定植し、条間中央で果実を育成する方式で、果実がほ

ば同じ水平面の畝面にあること、赤く着色した果実を上方から容易に認識できること、通路を利用した作業でも果実を傷つけにくいなど機械化による作業上の利点がある。九州地方で広く普及し、その畝形は福岡県筑後市の例では畝幅 120cm、畝肩 80cm、通路幅 15cm、条間 50cm、株間 20cm である。果実が育成する条間には汚れ防止、品質保持のための農業用不織布シート（幅 40cm）が敷設されており、その面は平ら（平坦度は 5~6mm）なために、システム化しやすい栽培様式といえる。なお、外成り栽培はマルチフィルムで被覆された畝の側面（通路側）でイチゴを育成する方式である⁷⁾。

3. 収穫・選別のシステム化

開発する収穫・選別システム（以下、システムと称す）は内成り栽培方式に対応し、果実を傷つけないことを最優先とし、非接触で果実を収穫・選別する機能を有するものとする。図 4-1 に示すシステムの概念図は、畝をまたいで間欠移動しながら果実の選別を行い、果柄を把持・切断して収穫する果実への非接触型のシステムをイメージしたものである。

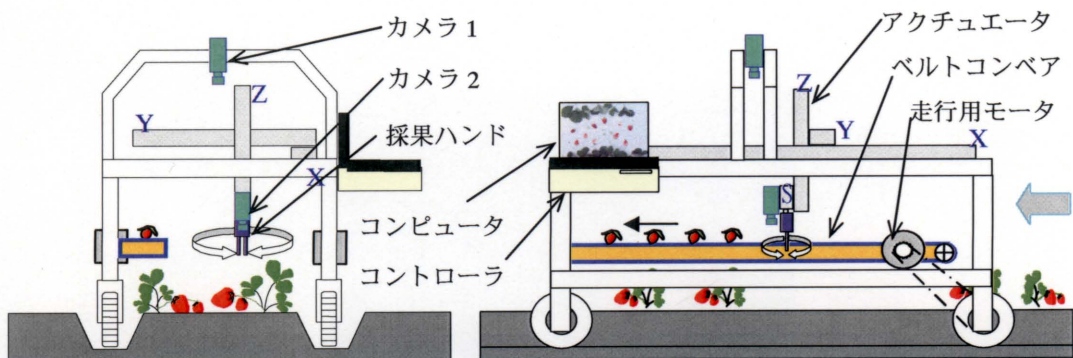


図4-1 システムの概念図

Fig. 4-1 Schematic diagram of system

本システムは、マシンビジョンテクノロジーによる果実の認識、果実の選別、果柄の認識などの機能を有することを条件に、未熟果と成熟果が混在している中から採果すべき果実を判断する位置情報と着色部や果柄などを詳細に判断する果実情報をそれぞれ役割分担するために、2台のカメラを用いることにした。1台目の位置決め用カメラ（以下、カメラ1と称す）は、畝面の収穫エリア（進行方向 610×畝幅方向 460mm）にある複数の果実を撮影し、収穫すべき着色果実の個数の判断、位置の抽出、採果順序を決定する役割を担うものである。2台目の採果用カメラ（以下、カメラ2と称す）は、採果する果実のみを撮影

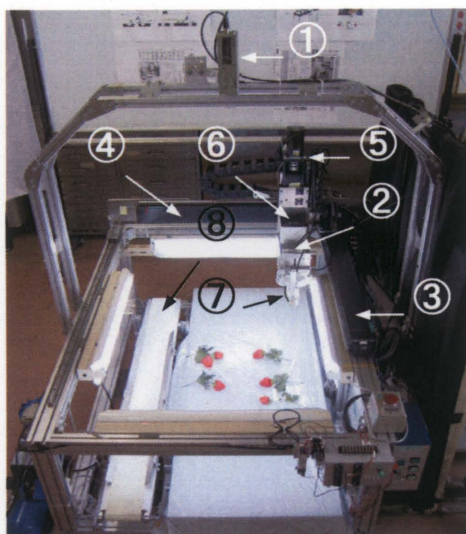
し、その画像から熟度の判断および果柄の位置や向き抽出を行って、採果ハンドを果柄の切断位置へ導く役割を担うものである。

なお、本研究では果柄の把持・切断を「採果」と称し、果実認識、熟度判定、果柄認識、採果に至る一連の動作を「収穫」と称して区別した。

第2節 開発機

1. 基本構造

図4-2に示すように開発機は、作業部、画像処理・制御部、採果ハンド部などで構成した。開発概念をもとに、開発機の特徴は、カメラ1とカメラ2の2台（いずれもカラーCCDカメラ）を装備し、収穫適期果実を選別して、その果柄を把持・切断する4自由度を持つ直交座標型のシステムとしたことである。



①カメラ1 ②カメラ2 ③X軸 ④Y軸 ⑤Z軸
⑥S軸 ⑦採果ハンド ⑧ベルトコンベア

図4-2 開発機

Fig. 4-2 Prototype

(1) 作業部

マニピュレータは、軽量化、消費電力、位置決め精度の面で直交座標形が多関節型より有利である⁸⁾。そこで、作業部は、図4-3に示すように、アルミ成形部材で枠組した台車（長さ1,340×幅920×高さ490mm）、水平移動のX軸（THK KL4510B-080 精度0.001mm）、Y軸（THK KL4510A-050 精度0.001mm）と垂直移動のZ軸（THK KL4510A-030B 精度0.001mm）のアクチュエータおよび回転するS軸（THK RT-50-29 精度0.001°）およびS軸先端に取付けた採果ハンドから成る直交座標軸型とした。

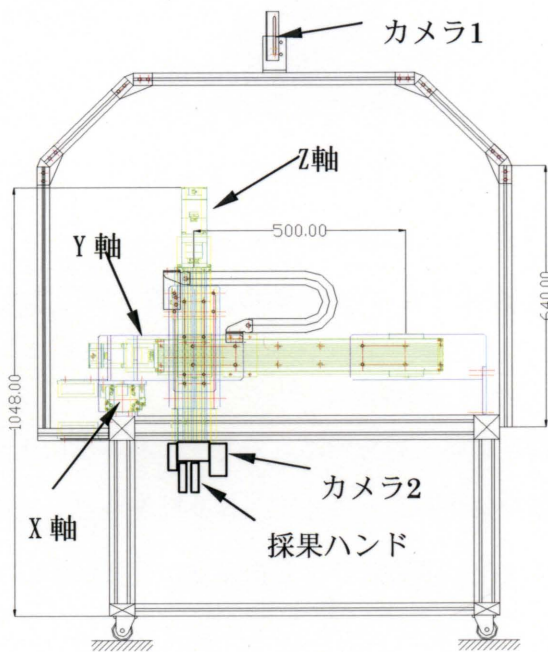


図4-3 システムの設計図

Fig. 4-3 Diagram of system design

X軸、Y軸、Z軸のアクチュエータは、図4-4に示すようにACサーボモータでボールねじ軸を回転させ、スライダを移動させる機構である⁹⁾¹⁰⁾。X軸は台車の進行方向のフレームに固定、Y軸はX軸のスライダに進行方向と直角に固定、Z軸はY軸のスライダに垂直方向に固定、S軸はZ軸のスライダに固定とする4自由度の直交座標型とした。各軸の有効可動範囲はX軸：0～710mm、Y軸：0～510mm、Z軸：0～310mm、S軸：0～360°である。これらの組み合わせにより、S軸に取付けた採果ハンドは果実の真上へ移動し、果柄の向きに回転角を一致させて採果することが可能である。走行にはゴムタイヤとモータ(MITSUBISHI

GM-HY2-RL) を使用した。

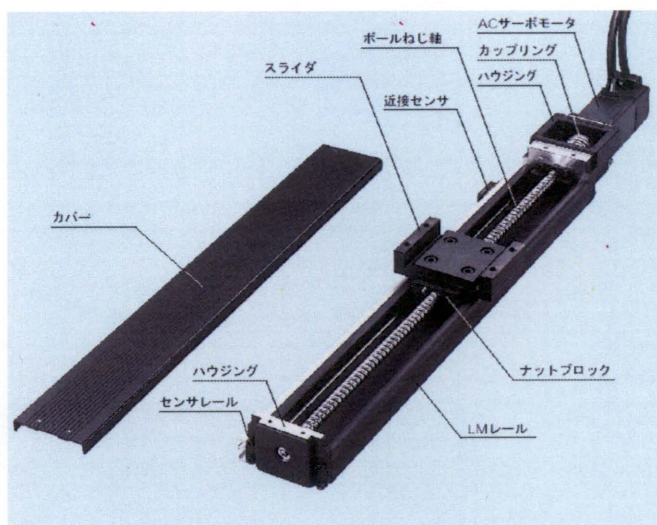


図 4-4 アクチュエータ

Fig. 4-4 Actuator

※「THK 社のカタログ」より引用

また、生産効率の向上のために、アクチュエータは、設定加速度と設定速度を適切に組み合わせて高速に移動させる必要がある。アクチュエータの位置決め時間は、図 4-5 に示すように、移動距離、設定加速度、設定速度より台形パターン、三角形パターンを選択して決めた¹¹⁾。

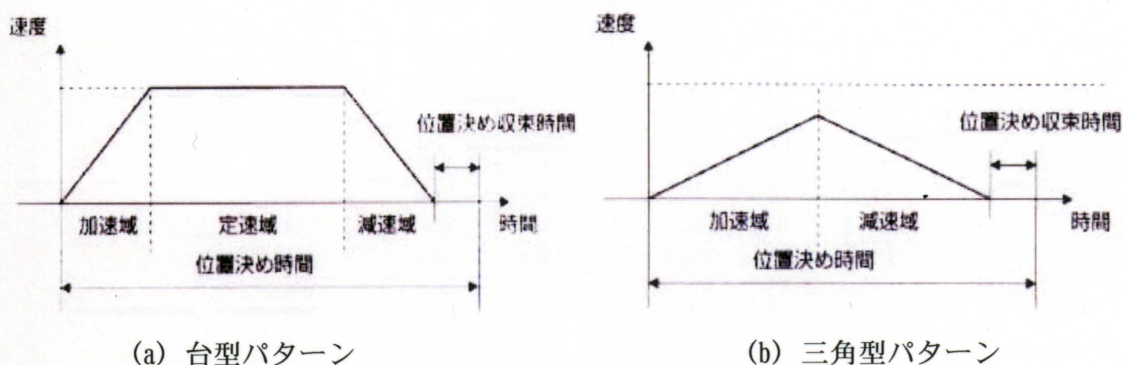


図 4-5 移動パターン

Fig. 4-5 Movement pattern

※「THK 社のコントローラ取扱説明書」より引用

その特徴は、図4-6に示すように、上向きの放物線の最低点における設定加速度と設定速度の場合、位置決め時間が最も短くなることである。採果ハンドをはずした場合、収穫

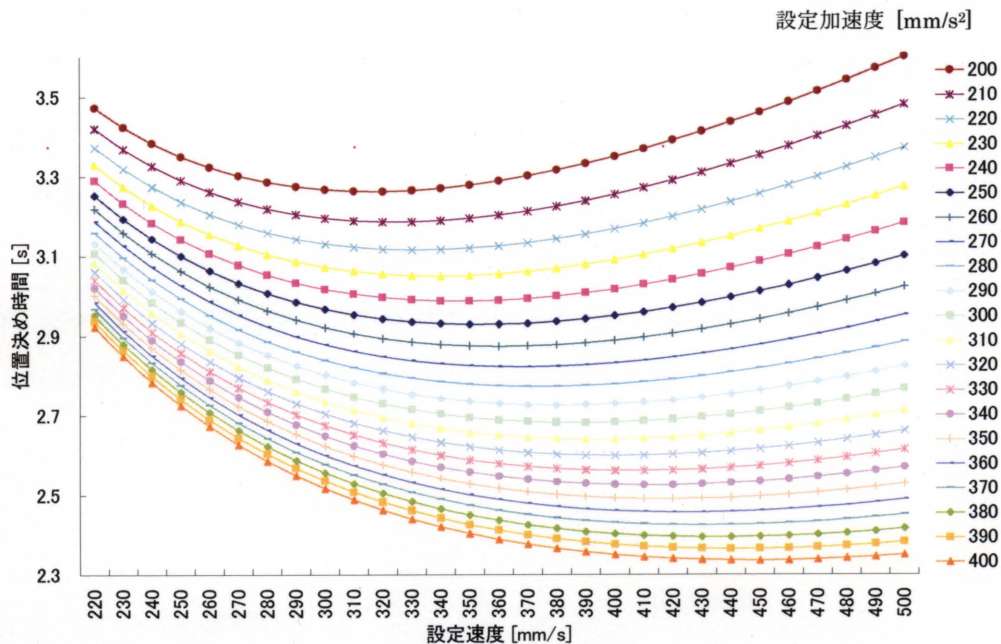


図4-6 位置決め時間

Fig. 4-6 Time to decide position

表4-1 適切な設定加速度と設定速度

Table 4-1 Advisable set acceleration and set speed

設定加速度 [mm/s ²]	設定速度 [mm/s]	収穫時間 [s]				
		1	2	3	4	平均
260	360	5.30	×	6.36	6.21	×
270	367	5.41	5.78	6.25	6.13	5.89
280	374	5.17	5.80	6.27	×	×
290	380	5.07	5.62	6.10	6.09	5.72
300	387	5.13	5.76	6.19	5.99	5.77
310	393	5.01	5.74	6.09	6.15	5.75
320	400	4.99	5.68	5.97	5.92	5.64
330	406	4.92	5.53	5.93	5.98	5.59
340	412	4.80	5.43	6.00	5.91	5.54
350	418	4.77	5.47	6.00	5.93	5.54
360	424	4.66	5.23	5.82	5.63	5.34
370	430	4.57	5.19	5.79	5.57	5.28
380	435	4.52	5.28	5.81	5.66	5.32
390	441	4.96	5.13	6.69	5.54	5.58
400	447	4.59	5.22	5.75	5.45	5.25
410	452	4.69	5.28	5.60	5.47	5.26
420	458	4.50	5.19	5.78	5.55	5.26

エリアを4区分した各矩形中心を用いた移動実験において、位置決め時間が短い速度・加速度の設定は表4-1に示すように、 400mm/s^2 、 447mm/s であった。設定加速度と設定速度が大きくなるほど振動が大きくなり、途中で止まるエラーも多くなった。実際のアクチュエータの移動は、取り付けた採果ハンド、カメラの重さの影響も考えられる。イチゴを採果した場合は、負荷も大きくなるし、傷つけないことを優先するため、アクチュエータの速度・加速度は 150mm/s^2 、 150mm/s の設定を用いた。

(2) 画像処理・制御部

カメラ1およびカメラ2で撮影した画像の処理およびシステムの制御部は、図4-7に示すようなパーソナルコンピュータ (SHARP PC-SJ145) および開発プログラム (Microsoft Visual C++6.0)、画像処理ボード (PHOTRON FDM-PCI MULTI)、コントローラ (THK CX-3) で構成した。

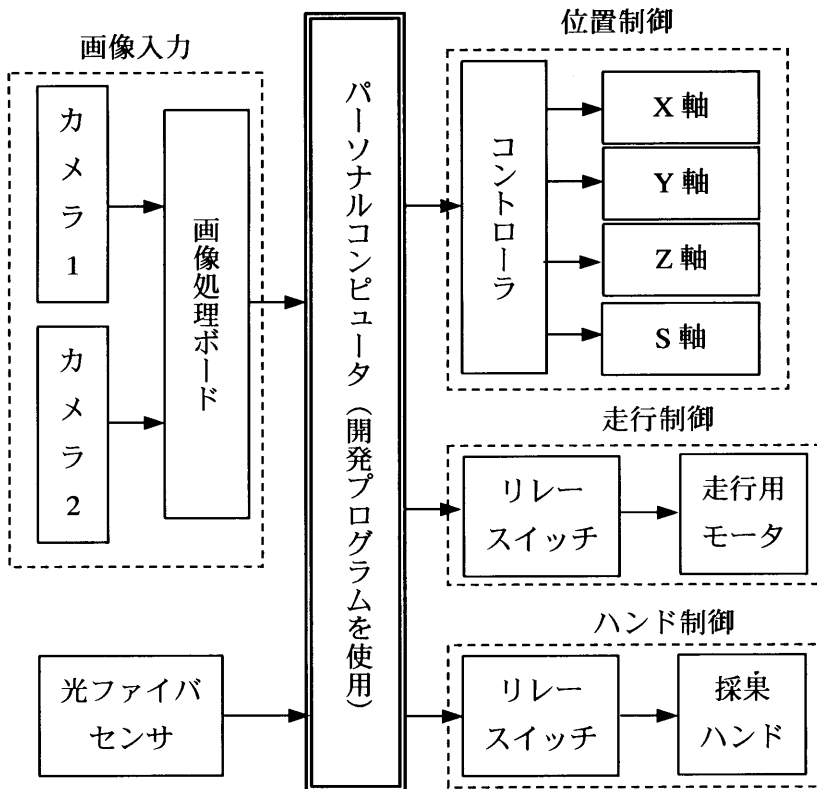
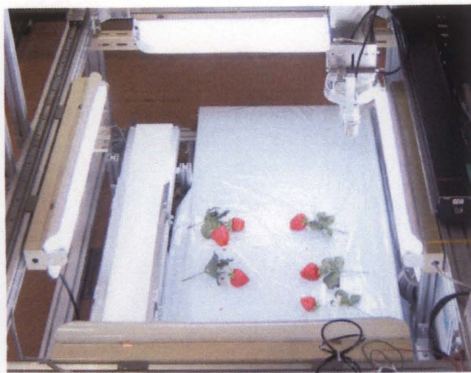


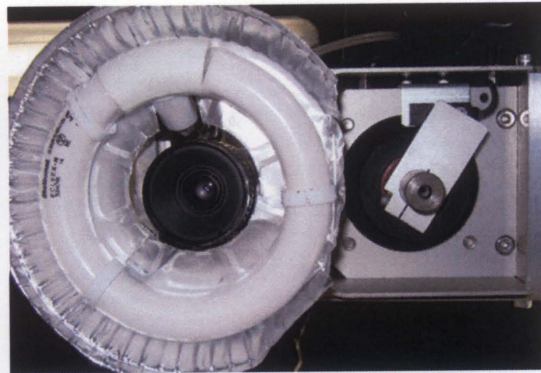
図4-7 システムの制御

Fig. 4-7 Control of system

カメラ1 (本体: SONY DXC-151A, 制御器: CMA-D2, レンズ: NIKON, 焦点距離: 16mm, 有効画素数: 640×480 画素) は台車上部 (畝面から高さ 1,220mm) に設置し, カメラ2 (本体: ELMO, 制御器: EC-202 II, レンズ: NIKON, 焦点距離: 16mm, 有効画素数: 640×480 画素) は採果ハンドと共に移動する小型カメラであり, S 軸の軸心から進行方向へ 84mm 離れた位置 (畝面から高さ 400mm) になるように Z 軸スライダに設置した。カメラ1 は固定位置から収穫エリアを撮影するが, カメラ2 は採果する果実の位置へ移動して撮影する。図4-8 に示す撮影用の照明は, 対象物に均一に照明をあてるために¹²⁾, カメラ1 用として色彩検査用直管蛍光灯 (TOSHIBA FL20S・D-EDL-D65, 4 本), カメラ2 用として円形蛍光灯 (NATIONAL FCL9EX-N, 1 本) を用いた。



(a) 直管蛍光灯の取り付け



(b) 円形蛍光灯の取り付け

図4-8 照明

Fig. 4-8 Lighting

ここで, 画像処理においてノイズが少なく安定した画像を取得するために, 照明は重要な要素のひとつである。システムにおける照明は, 照度計 (LI-COR LI-250) を用いて, 撮影エリアにおける照度分布を計測した。図4-9 に示す収穫エリアにおける照度分布は, AM10:00, PM1:00, PM10:00 に関係なく 1300~1700Lux 範囲であった。収穫エリアの端の部分ではムラが懸念されるが, 室内において周辺の影響が少なく, ほぼ均一な照明になっていることから, 果実認識の画像処理における収穫エリア画像の取得に適していると言える。図4-10 に示すカメラ2 の撮影エリアにおける照度分布は, 2200~2300Lux の範囲であり, カメラ1 より照度がやや高く, ムラが少なく均一であった。

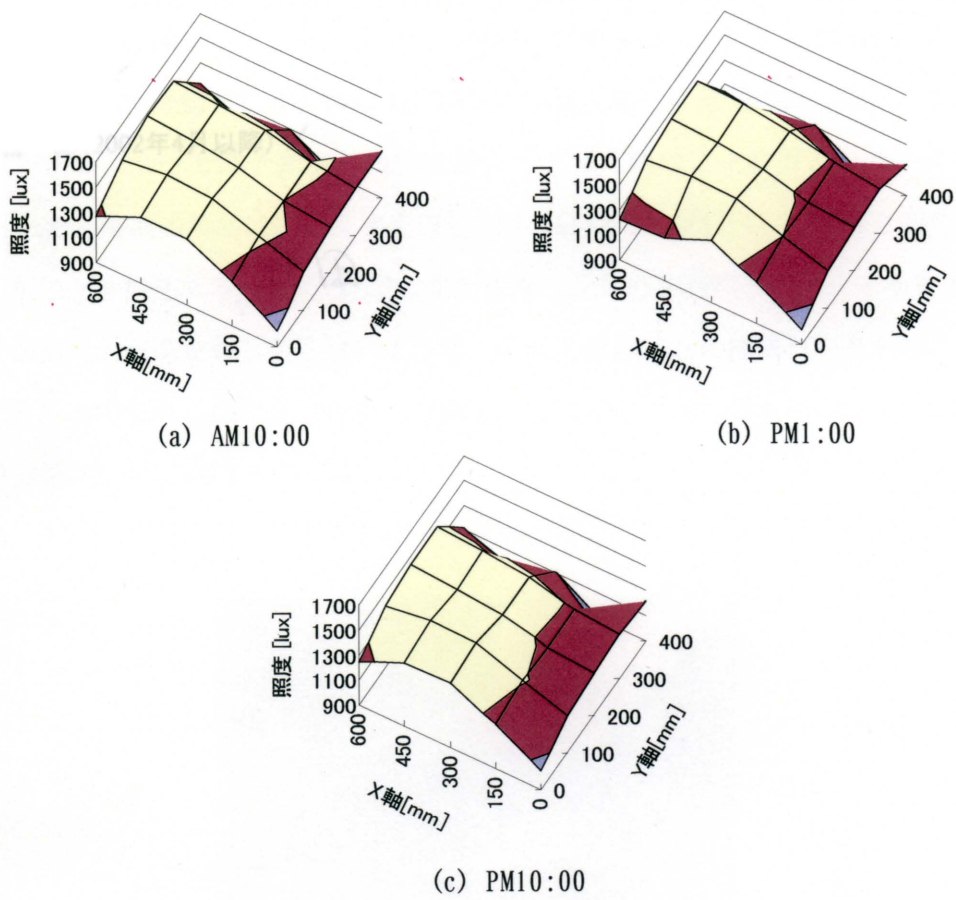


図 4-9 収穫エリアの照度分布

Fig. 4-9 Luminance distribution of harvest area

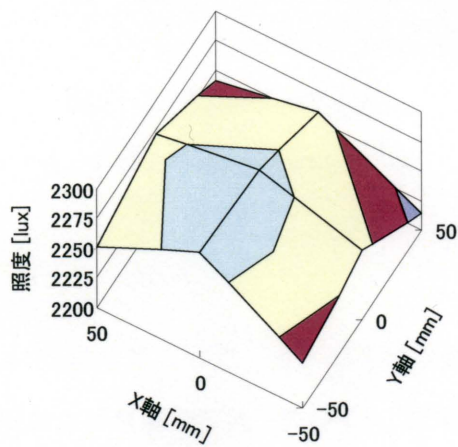


図 4-10 カメラ 2 の撮影エリアでの照度分布

Fig. 4-10 Luminance distribution in picture area of camera 2

(3) 採果ハンド

採果ハンドは、図 4-11 に示すように、果柄を把持するフィンガと果柄を切断するハサミが一体となった機構とし、S 軸のエアハンド (ERACON) に組付けた。採果ハンドの開閉は、コンプレッサーと電子エアバルブを用いて、開く時のフィンガとハサミの開き幅は 10mm とした。果柄の検知は、光ファイバセンサ (KEYENCE FSV11) で Z 軸方向から果柄が挿入したことを検知する方法で行った。また採果ハンドの過剰降下を防止する安全装置は、内成り栽培用の畝面を刺し破らないように、畝面を検知すると採果ハンドが停止する役割をはたすものである。採果された果実の搬送にはベルトコンベアを用いた。なお、採果ハンドの詳細については第 8 章で述べる。

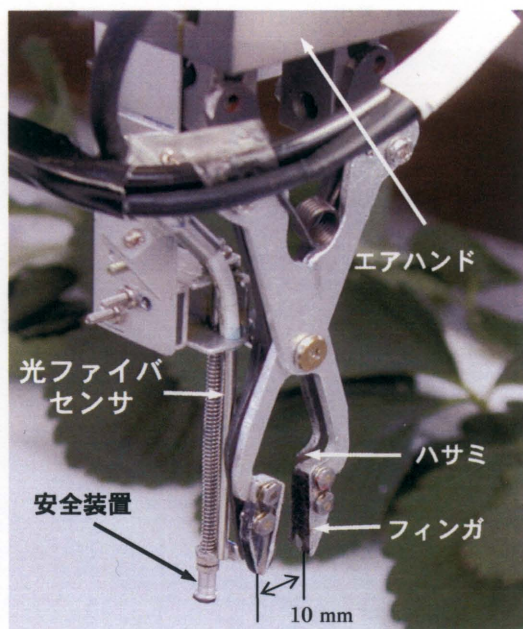


図 4-11 採果ハンドの例

Fig. 4-11 Example picking hand

2. 動作

システムの動作は、図 4-12 に示すように、カメラ 1 による果実の認識 (動作 I)、カメラ 2 による果実の熟度判断および果柄の認識 (動作 II)、採果ハンドによる果柄の把持・切断および果実の搬送 (動作 III)、台車の間欠移動 (動作 IV) の 4 工程である。

(1) 動作 I

収穫地点でロボットを停止し、畝面上に点在する果実の画像をカメラ 1 で取得して、果

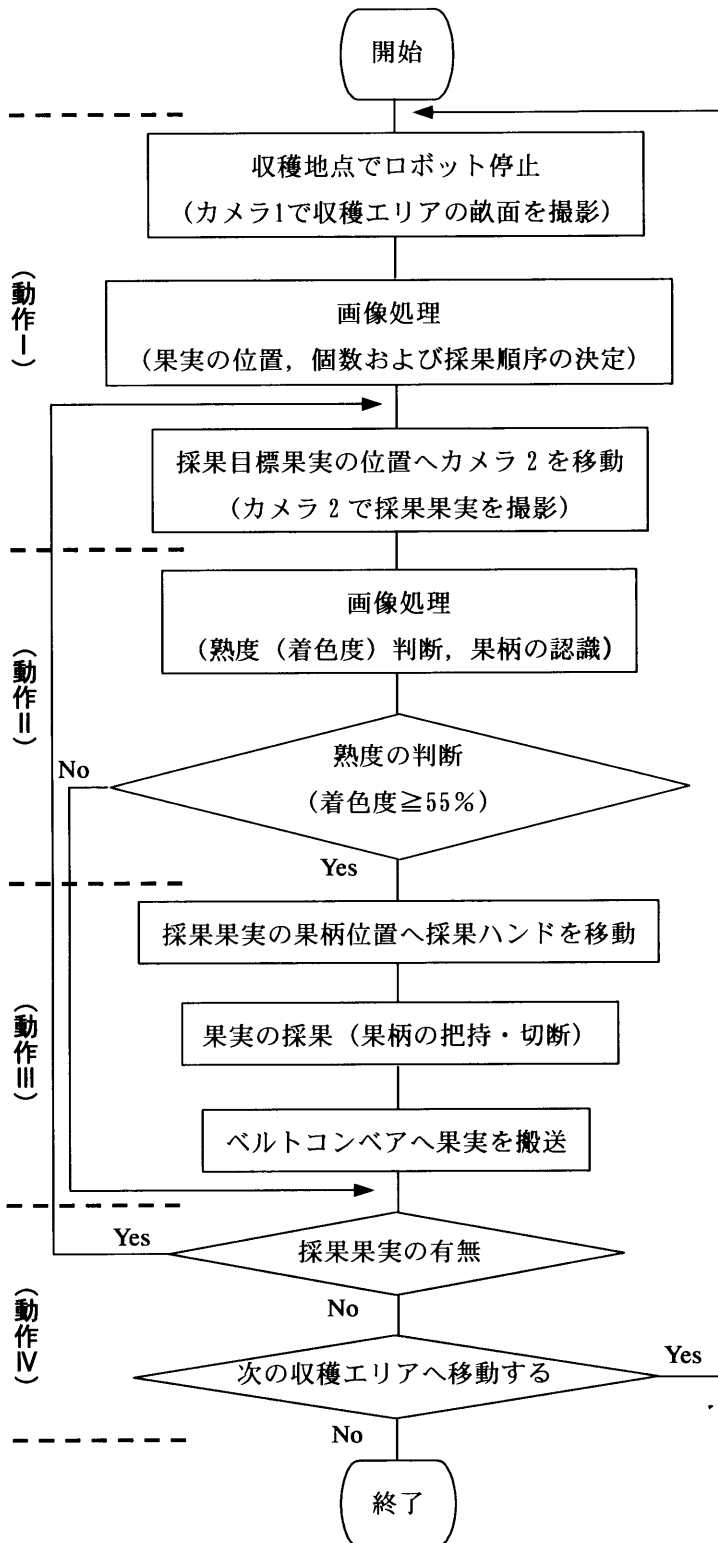


図 4-12 システムの動作のフローチャート

Fig. 4-12 Flowchart of movement of system

実認識の画像処理によって採果すべき赤く着色した果実（以下、採果目標果実と称す）の位置、個数および採果順序を決定する。そして、採果順序に従ってX軸とY軸が作動してカメラ2が採果目標果実の位置へ移動する。

(2) 動作II

採果目標果実の画像をカメラ2で取得し、その画像から果実選別の画像処理によって果実の大きさ、熟度を判定し、果柄認識の画像処理によって果柄の把持・切断の位置（以下、採果位置と称す）と向き（以下、採果角と称す）を求め、採果する果実（以下、収穫適期果実と称す）を決定する。

(3) 動作III

X軸、Y軸、S軸が作動し、採果ハンドを採果位置の真上に移動させると同時に採果角を与える。続いてZ軸が作動して採果ハンドが降下する。降下中に採果ハンドの光ファイバセンサが果柄を検知すると、Z軸は停止し、採果ハンドのフィンガとハサミが可動して果柄を把持・切断する。採果後は、上昇してベルトコンベアの位置へ果実を搬送し、フィンガを開いてベルトコンベア上に搬出する。

(4) 動作IV

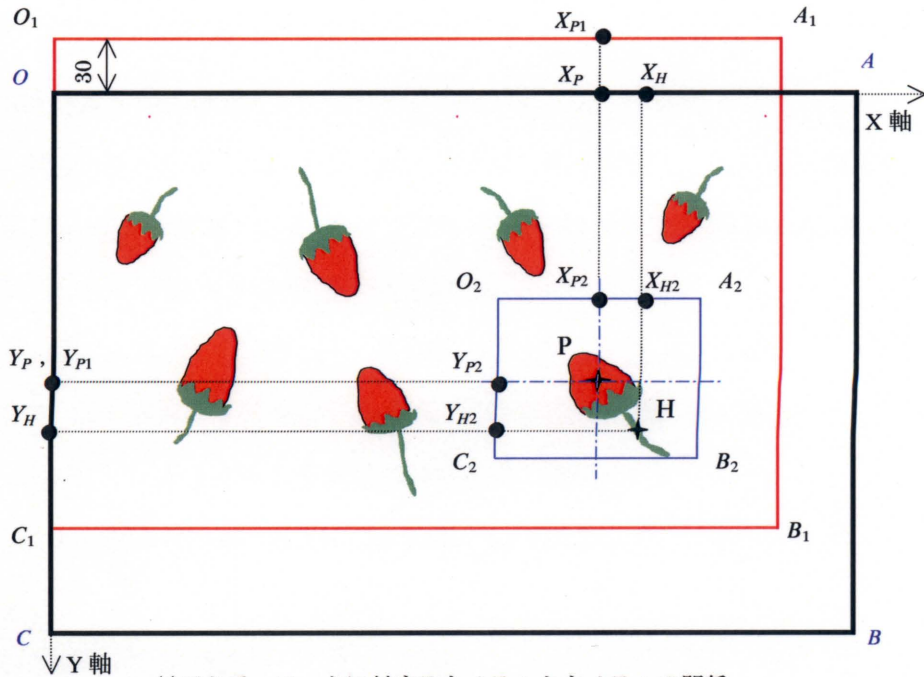
収穫エリアでの収穫が終了すると、走行用モータが作動して台車が次の収穫エリアへ600mm前進して停止し、再び収穫を開始する。このように収穫の流れは間欠移動的に行われる。

第3節 座標変換

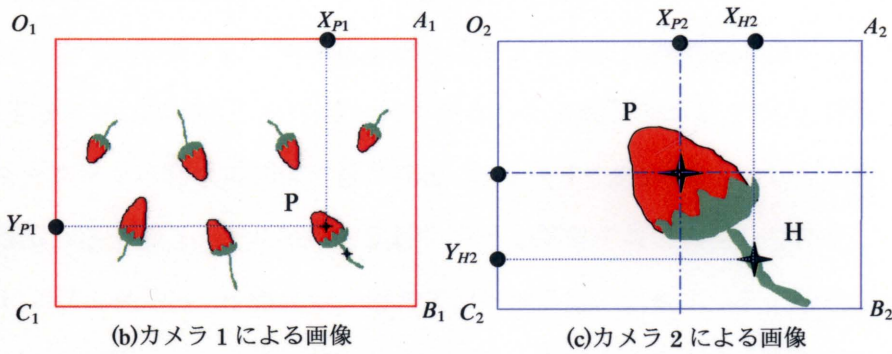
本研究におけるシステムは果実の選別、果柄の認識のためにカメラ2を、果柄の把持・切断のために採果ハンドをそれぞれ目標位置へ正確に移動させる必要があり、マニピュレータの制御は高度な精度が要求される。すなわち、カメラにおける位置座標（画素）をシステムにおける位置座標（mm）に正確に変換することである。

本システムの座標系はアクチュエータの座標系（単位：mm）、カメラ1およびカメラ2の座標系（単位：画素）から成り、図4-13(a)に示すようにアクチュエータの移動エリアを $OABC$ （原点 O 、エリアの大きさ：710×510mm）、カメラ1による画像エリアを $O_1A_1B_1C_1$ （原点 O_1 、エリアの大きさ：640×480画素）、カメラ2による画像エリアを $O_2A_2B_2C_2$ （原点 O_2 、エリアの大きさ：640×480画素）とする。 $O_2A_2B_2C_2$ の画像エリアの中心座標（320, 240）は

採果目標果実の位置とする。そこで、カメラの座標系からアクチュエータの座標系への座標変換は果実 P を例として、次の手順で行った。



(a)アクチュエータに対するカメラ1とカメラ2の関係



(b)カメラ1による画像

(c)カメラ2による画像

図4-13 アクチュエータ、カメラ1およびカメラ2の座標変換

Fig. 4-13 Exchange of coordinate among actuator, camera 1 and camera 2

1. 位置決め用カメラの場合

図4-13(b)の $O_1A_1B_1C_1$ における果実 P の画像重心座標 (X_{p1}, Y_{p1}) は同図 (a) の $OABC$ においては座標 (X_p, Y_p) となる。よって、同図 (a) の相対的位置関係から次式 (1) が成り立つ。

$$X_p = K_1 X_{p1} + \delta_x, \quad Y_p = K_1 Y_{p1} + \delta_y \quad (1)$$

ここで、 K_1 ：カメラ1で撮影した画像の単位画素間距離 [mm/画素]

d_x, d_y ：原点 O_1 と原点 O の相対位置 [mm]

なお、本システムでは δ_x, δ_y は $\overline{O_1C_1}$ と \overline{OC} が一致するように設定したので、 $\delta_x=0, \delta_y=-30$ とした。また、 K_1 はカメラの設置高さであり、画像サイズから $K_1=0.95$ とした。

2. 採果用カメラの場合

図4-13(c)の $O_2A_2B_2C_2$ における画像エリアの中心座標 (X_{P2}, Y_{P2}) および果柄 H の採果位置の座標 (X_{H2}, Y_{H2}) は同図(a)の $OABC$ においてはそれぞれに座標 (X_P, Y_P) および座標 (X_H, Y_H) となる。よって、式(2)の関係が成り立つ。

$$X_H = X_P + K_2(X_{H2} - X_{P2}), \quad Y_H = Y_P + K_2(Y_{H2} - Y_{P2}) \quad (2)$$

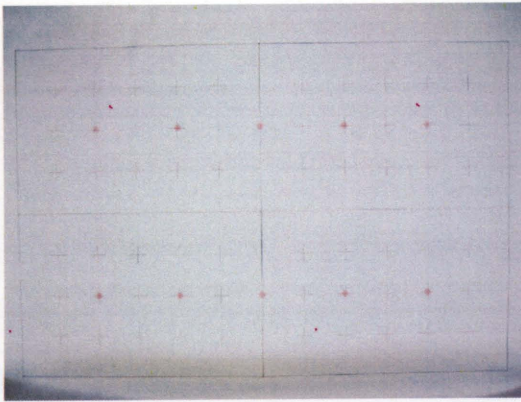
ここで、 K_2 ：カメラ2で撮影した画像の単位画素間距離 [mm/画素]

X_{P2}, Y_{P2} ：カメラ2による画像の中心座標 [画素]

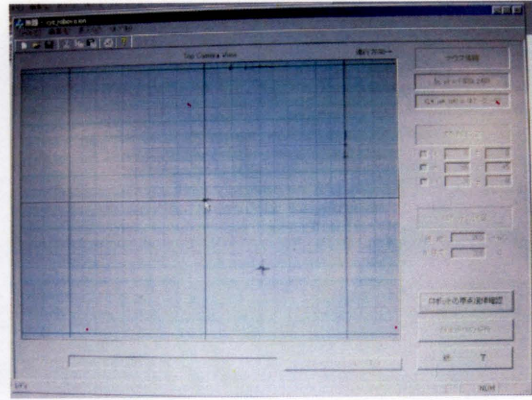
なお、本システムでは $K_2=0.23, X_{P2}=320, Y_{P2}=240$ とした。

3. マニピュレータの制御

開発機におけるマニピュレータの制御は、図4-14に示すように、モデル畝での収穫エリア(カメラ1の真下)に方眼紙を張ってカメラ1の光軸を通る点から左右、上下方向で50mm間隔に測定位置として印を付け、自作した自動制御プログラム(Visual C++6.0)を用いてカメラ1における測定位置の座標 (x, y) [画素]を入力したとき、座標変換を通じて移動したZ軸とモデル畝の方眼紙における測定位置とのズレを測定して検討した。図4-15に示すX軸成分、Y軸成分、相対ズレの分布は、収穫エリアの中央部分ではいずれも1mm以下の範囲であったが、端の周辺では2mm以下と少し大きくなる傾向を示した。これは、レンズの光学的な特徴により、カメラで取得した画像は中心位置から離れるほど画像の歪みが生じ、カメラでの位置がモデル畝での位置を正確に示せないことが主な原因だと考えられる¹³⁾。よって、開発機におけるマニピュレータの制御は、約2mm以下のズレで行われるが、認識した果実の真上にカメラ2が移動して拡大画像を撮影するため、マニピュレータの制御は果実の選別、果柄の認識、採果ハンドによる果柄の把持・切断に適すると言える。詳細な検証実験は第5章、第6章、第7章、第8章で記述する。



(a) 収穫エリアにおける測定位置



(b) カメラにおける測定位置

図4-14 測定位置

Fig. 4-14 Measurement position

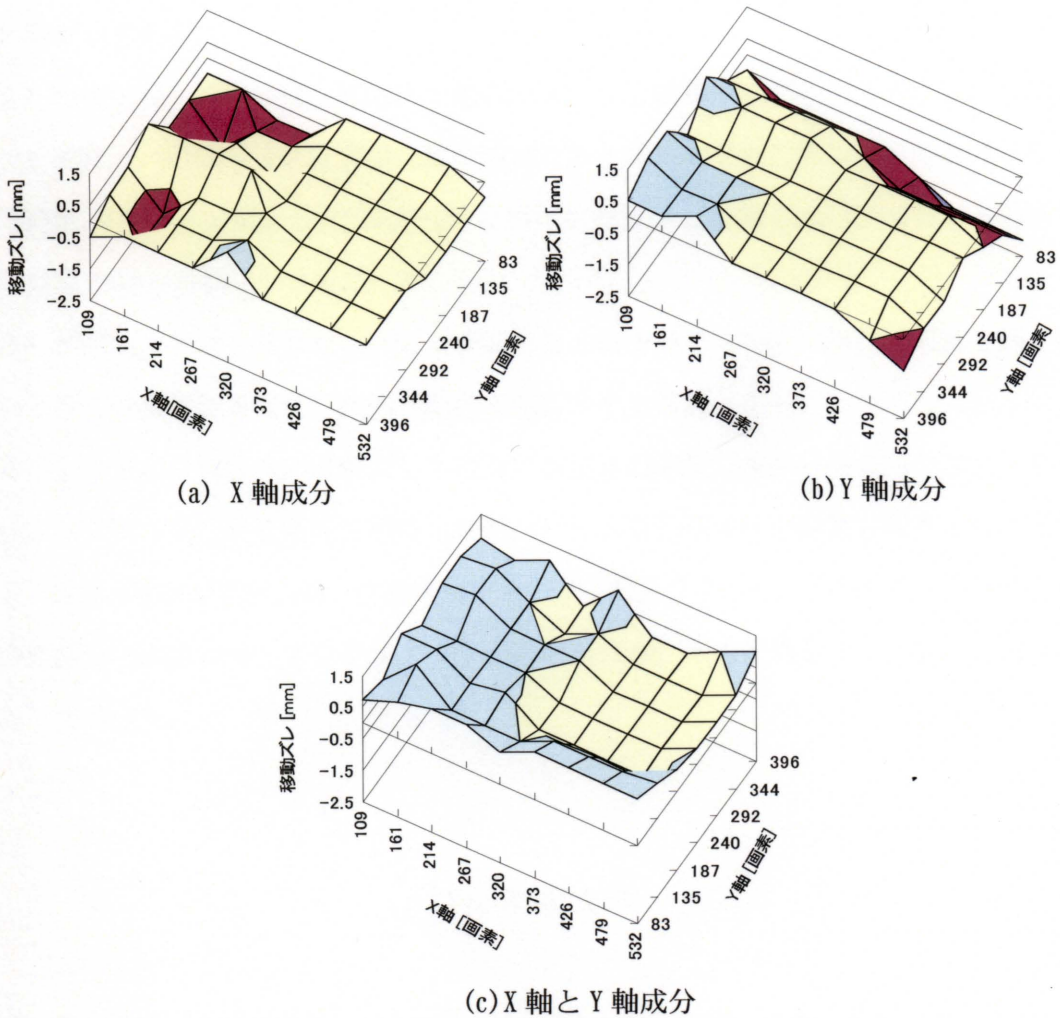


図4-15 マニピュレータの制御における位置ズレ

Fig. 4-15 Positional excursion in control of manipulator

第4節 摘要

本論文は、イチゴの生産における機械化のために、熟した果実を選択し、果実を傷つけないように果柄を認識して把持・切断する収穫・選別を行うシステムの基礎研究である。開発したイチゴ収穫・選別システムは、畝をまたいで間欠移動しながら2台のカラーCCDカメラ（位置決め用と採果用）を用いて果実の位置と熟度を判断し、着色した果実のみを選別し、傷つけないように果柄を把持・切断して採果する直交座標型の内成り栽培用システムである。

1) 作業部は、X軸、Y軸、Z軸、S軸のアクチュエータを用いた4自由度の直交座標型であり、位置決め時間が最も短くなるアクチュエータの設定加速度と設定速度は 400mm/s^2 、 447mm/s である。

2) 画像処理・制御部は、位置決め用のカメラ1と採果用のカメラ2の2台のカラーカメラを装備し、色彩検査用直管蛍光灯を用いたカメラ1の撮影収穫エリアにおけるの照度分布範囲は $1300\sim 1700\text{Lux}$ 、円形蛍光灯を用いたカメラ2の撮影エリアにおけるの照度分布範囲は $2200\sim 2300\text{Lux}$ である。

3) 採果ハンドは、光ファイバセンサによるZ軸方向での果柄の検知、畝面を刺し破らないように安全装置を備え、果柄を把持・切断できる機構とする。

4) システムの動作は、収穫エリアにおける果実の認識、採果目標果実の選別、果柄の認識、採果ハンドによる果柄の把持・切断、ベルトコンベアへの搬送を行うものである。

5) 収穫・選別システムは、位置決め用カメラ（カメラ1）または採果用カメラ（カメラ2）の座標系（画素）からアクチュエータの座標系（mm）への変換を行った場合の精度が 2mm 以下であった。

引用文献

- 1) 植松徳雄：イチゴの栽培の理論と実際，誠文堂新光社，東京，285～288，1998
- 2) 林茂彦，太田智彦，久保田興太郎，安食恵治：イチゴの収穫・選果ロボットに関する調査，生物系特定産業技術研究支援センター，埼玉，1～22，2004

- 3) 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
- 4) 永田雅輝：イチゴ栽培の自動化に関する研究（平成10年度共同研究成果報告書），宮崎大学，宮崎，57～66，1999
- 5) 永田雅輝：イチゴ栽培の自動化に関する研究，（平成12年度共同研究成果報告書），宮崎大学，宮崎，1～21，2001
- 6) 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
- 7) 松田照男，森下昌三：イチゴ Q&A 栽培技術早わかり，全国農業改良普及支援協会，東京，88～89，2003
- 8) 梅田幹雄：農業ロボット開発の課題と展望（3）マニピュレータの開発，農業機械学会誌，58(1)，149～154，1996
- 9) THK社：KL形メカ取扱説明書，THK社，東京，5，2000
- 10) THK社：オペレーティングボックス取扱説明書，THK社，東京，16～17，2000
- 11) THK社：コントローラ取扱説明書，THK社，東京，15，22～23，30～32，2000
- 12) 谷口慶治：画像処理工学（基礎編），共立出版株式会社，東京，1～14，2000
- 13) 出口光一郎：ロボットビジョンの基礎，コロナ社，東京，5～9，2000