

学 位 論 文 要 旨

氏 名 崔 永 杰

題 目 イチゴ生産における収穫・選別のシステム化に関する基礎研究
(Study on systematization of harvesting and sorting for strawberry production)

イチゴの収穫と選別作業時間は総作業時間の約60%を占める。特に収穫作業は、連日、長時間にわたって腰を曲げた姿勢であるため、作業負担は特段に大きく、早急な機械化が望まれている。イチゴは小粒で傷つき易く、熟したイチゴを選別しながら収穫することから、高度な機能を備えた機械化が要求される。そこで、本論文はイチゴ生産における収穫と選別のシステム化に関する基礎研究に取組み、果柄付きイチゴ(品種:章姫)を供試して、画像処理による果実および果柄の認識、選別の判定並びに収穫のロボット化のための採果ハンドの開発について検討した。その結果、以下のような知見を得た。

1. 開発したイチゴ収穫・選別システムは、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。

2. 果実の赤色部位の認識は、 $L^*a^*b^*$ 表色系がRGB表色系より高精度な抽出が得られることを明らかにした。採果目標果実と未熟の果実を区別する境界画素数は300画素が最適であることを明らかにした。1果ごとにモデル配置した果実の認識実験から、採果目標果実の個数、位置および採果順序の認識はほぼ完璧であったこと、また採果用カメラは画面中央に採果目標果実の拡大画像を撮影し、果柄の認識および果実の判別用画像を提供できることを明らかにした。

3. 果柄の認識は採果用カメラの拡大画像を用いて、始めに果頂部とヘタ部を選定し、次にヘタ部と果柄との境界部を抽出し、最後に果柄表示線を抽出する処理法を提案した。この方法により果柄の切断位置および方向角は果柄表示線から容易に決定でき、各値は良好な精度が得られることを明らかにした。1果ごとにモデル配置した果柄の認識実験から、果柄の認識率は垂直付近では100%となったが、水平付近では低下し、平均で約80%となった。

4. 果実の選別は画素数と着色率から大きさと熟度を判定する処理法を採用した結果、55%の着色率が目標とした5・6分着色以上の収穫適期果実を100%の確率で判定できることを明らかにした。

5. 採果ハンドは光ファイバセンサで果柄を検出し、フィンガで把持すると同時にハサミで切断する独自の機構を提案した。フィンガの把持力は80gの果実にも対応でき、ハサミによる切断は圧縮空気圧0.1Mpaで直径3.0mm以下の果柄を切断できることを明らかにした。

6. 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における実験の結果、収穫率は約54.1~64.9%、収穫処理時間は平均16.5s/果であった。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。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、満足できる結果であった。

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・切断する独自の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。

学 位 論 文 要 旨

氏 名

Yongjie Cui

題 目

Study on systematization of harvesting and sorting for strawberry production
(イチゴ生産における収穫・選別のシステム化に関する基礎研究)

Harvesting and sorting Working hour of strawberry account for about 60% of a total working hour. Especially the harvesting of strawberry is hard because the operation is done with a bended waist on long hour everyday, therefore early mechanization is constantly being pursued. Because the strawberries are small and prone to damage, and the ripe strawberries are sorted for harvesting, the mechanization requires advanced functionality necessary. Study on systematization of harvesting and sorting for strawberry production was carried out, using strawberry with peduncles (a kind: AKIHIME) for experiments, and examined about the recognition and sorting judgment of fruits and peduncles by image processing, development of picking hand for the realization of harvesting robot. As a result, the following findings were obtained.

1. The system of harvesting and sorting the strawberry developed for this study, judges the location and the ripeness of fruits with two color-CCD cameras (for positioning and picking respectively) fixed on the Cartesian-type prototype and harvests the fruit without damage through cutting and holding the peduncles of strawberries grown on annual hill tops.
2. Experiments of strawberry recognition in which each is arranged as a model showed that the quantity and the location of actual fruits for picking as well as the order for picking were near to perfection and that the camera for picking by capturing an enlarged image of actual fruits in the middle of screen can offer image for recognition of peduncles and fruits.
3. Peduncles recognition processing method was developed in which, top of a fruit and stem was selected firstly, then boundary standard between stem and peduncle was extracted, and lastly the display line of peduncles were extracted. Authors demonstrated that it is easy to decide cutting position of peduncle and direction angle using that method, and with accuracy in each value. In the experiments in which each strawberry is arranged as a model, the result showed that though the rate of peduncles recognition is 100% in vertical direction, the rate of peduncles recognition falls in horizontal direction, about 80% in average.
4. For sorting of fruits, as a result of adopting the method to judge the size and the ripeness based on pixels and rate of coloring, with 100% accuracy in judgment of actual fruits for picking, or the fruits with the 50-60% coloring or above by using rate of coloring (55% standard for harvest).
5. Authors proposed picking hand with original mechanism with optical fiber sensor for the reorganization of the peduncles, which holds them with the finger and cuts them with scissors at the same time. Authors demonstrated that the finger is capable of holding up to 80g in weight, with scissors are able to cut peduncles below 3.0mm with compressed air pressure 0.1Mpa.
6. To compare the result of the basic experiments in which each strawberry is arranged as a model, experiments were carried out for which strawberries were laid out in a complicated manner, close to the field. As a result, the rate of harvest was about 54.1~64.9% and the harvest processing time for each strawberry is 14.4~19.8s. The rate fell in approximate. 20% compared to that of the basic experiments. The degree of ripeness of all the harvest fruits is above 50-60%, the length of the peduncle is 17.2mm on average, and the capability was satisfactory.

As described above, this study presented the method to recognize fruits, peduncles and ripeness automatically by image processing, developed picking hand with original mechanism that is capable of cutting and holding the peduncles for strawberries and proposed the possibility of the strawberry systematization for harvesting and sorting.

学位論文審査結果の要旨

学位申請者 氏名	崔 永 杰
審査委員	主査 宮崎 大学 教授 永 田 雅 輝
	副査 宮崎 大学 教授 御 手 洗 正 文
	副査 琉球 大学 教授 上 野 正 実
	副査 鹿児島大学 教授 守 田 和 夫
	副査 佐賀 大学 教授 松 尾 隆 明
審査協力者	
題 目	イチゴ生産における収穫・選別のシステム化に関する基礎研究 (Study on systematization of harvesting and sorting for strawberry production)

イチゴの収穫作業は、連日、長時間にわたって腰を曲げた姿勢で行われることから、その作業負担は特段に大きく、早急な機械化の確立が望まれている。しかし、イチゴは小粒で傷つき易く、熟したイチゴのみを選別しながら収穫しなければならないことから、その機械化には高度な機能を備えた機械の開発が求められる。そこで、本研究は人とロボットによる共同作業を目標に、収穫と選別を同時に行う機械化システム、すなわち、収穫・選別のロボット化の基礎資料を得るために、画像処理による果実および果柄の認識、熟度の判定と選別、並びに採果ハンドについて検討したものである。主要な研究成果は以下のように要約される。

- イチゴの収穫・選別のシステムは、2台のカラーCCDカメラ（位置決め用カメラと採果用カメラ）を用いて、果実の位置と熟度の判別を行い、着色した果実のみを傷つけないように果柄を把持・切断して摘み取る直交座標型の内成り栽培用ロボットとして開発した。
- 果実の認識においては、赤色部位の認識ではL*a*b*表色系がRGB表色系より高精度な抽出が得られること、採果目標果実と未熟果実の認識では境界画素数として300画素が最適であることを明らかにした。モデル配置した1果ごとの果実の認識実験から、採果目標

果実の個数、位置および採果順序の認識はほぼ完璧であったこと、また採果用カメラは画面中央に採果目標果実の拡大画像を撮影し、果柄の認識および果実の判別用画像を提供できることを明らかにした。

3. 果柄の認識では、採果用カメラの拡大画像を用いて、始めに果頂部とヘタ部を選定し、次にヘタ部と果柄との境界部を抽出し、最後に果柄表示線を抽出する処理法を提案した。この方法により果柄の切断位置および方向角は果柄表示線から容易に決定でき、精度の高い値が得られた。モデル配置した1果ごとの果柄の認識実験の結果において、果柄の認識率は垂直付近では100%、水平付近では多少低下したものの平均で約80%が得られた。

4. 果実の選別では、画素数と着色率から大きさと熟度を判定する方法を用いて、着色率55%の場合において、目標とした5・6分着色以上の収穫適期果実を100%の確率で判定できることを示唆した。

5. 採果ハンドは、果柄を光ファイバセンサによって検出してフィンガで把持すると同時にハサミで切断する独創的な機構とした。フィンガの把持力は重さ80gの果実まで対応でき、ハサミの切断力は0.1Mpaの圧縮空気圧を使用して直径3.0mmまでの果柄を切断可能であることを明らかにした。

6. 現場の状況を再現した複雑な果実配置における実験の結果、収穫率は約54.1～64.9%、収穫処理時間は平均16.6s/果であった。これはモデル配置による基礎実験と比較して約20%の低下であった。このように、現状の栽培状況下では果柄や葉が混在していることが原因であるから、果柄認識の画像処理法の向上並びに栽培法の改善が必要であることを示唆した。一方、果実の熟度判定では5・6分着色以上をすべて収穫できたこと、果柄の切断長さは平均17.2mmであったことからほぼ満足できる結果を得た。

以上のように、本研究は果実、果柄、熟度を自動認識する画像処理法の提案、また果柄を把持・切断する独創的機構の採果ハンドの開発を行い、イチゴの収穫作業をロボット化するための基礎資料の提供、また安全・安心のニーズに応えられるような熟度判別要素の究明をしたことから、農業機械学的に意義があるものと評価できる。

したがって、審査委員一同は、本論文が博士（農学）の学位論文として十分な価値があるものと判定した。

最終試験結果の要旨	
学位申請者 氏名	崔 永 杰
審査委員	主査 宮崎 大学 教授 永 田 雅 輝
	副査 宮崎 大学 教授 御 手 洗 正 文
	副査 琉球 大学 教授 上 野 正 実
	副査 鹿児島大学 教授 守 田 和 夫
	副査 佐賀 大学 教授 松 尾 隆 明
審査協力者	
実施年月日	平成19年7月16日
試験方法 (該当のものを○で囲むこと。) <input checked="" type="radio"/> 口答 <input type="radio"/> 筆答	
<p>主査及び副査は、平成19年7月16日の公開審査会において学位申請者に対して、学位申請論文の内容について説明を求め、関連事項について試問を行った。具体的には別紙のような質疑応答がなされ、いずれも満足できる回答を得ることができた。</p> <p>以上の結果から、審査委員会は申請者が博士（農学）の学位を受けるに必要な十分の学力ならびに識見を有すると認めた。</p>	

学位申請者 氏名	崔永杰
<p>[質問1] 本研究を遂行するにあたって苦勞したところは何ですか。</p> <p>[回答1] 本研究のコアとなる部分は、果実や果柄の認識をするための画像処理法、把持と切断を同時に行う機構を持つ採果ハンドの開発でした。特に、自動的に果柄を認識させるアルゴリズムおよびプログラムの開発が難しく時間を要しました。</p> <p>[質問2] 本システムの実用化における今後の見通しはどうなっていますか。</p> <p>[回答2] イチゴ農家の多くは高齢化を迎えており、作業技術の革新が急がれております。そこで、農家の希望に答えるには、機械化の精度を落とさず、安価なコストで製作できる機械が必要と思います。本研究では、作業負担を軽減して効率的な作業が実行できることを目標としていることから、完全自動の機械化ではなく、人との共同作業が可能となる補助的な機械化を目指します。そして、生産コストが低減出来るような機械化の確立ができれば普及につながると思われます。</p> <p>[質問3] システムの照度はどんな方法で測定しましたか。</p> <p>[回答3] 照度は、LI-COR社製LI-250型デジタル照度計で測定しました。モデル畝を用いた室内実験における照度分布は、位置決め用カメラの撮影エリアでは1300-1700Lux、採果用カメラの撮影エリアでは2200-2300Luxでした。</p> <p>[質問4] 現場での画像処理の問題として、照明はどのように考えますか。</p> <p>[回答4] 日中のハウス内の太陽光にはムラがありますので、外乱光の影響を除く必要があります。そこで、照明装置部をシートでカバーして外乱光を遮断することで対応できると思われます。もし、夜間作業の場合、現在の照明をそのまま使用することで対応できると思われます。</p> <p>[質問5] 人とシステムの共同作業のために必要な今後の課題は何ですか。</p> <p>[回答5] 現状では、本研究のシステムにおける収穫作業の時間は人手の約4倍かかっています。性能向上には、マニピュレータおよびプログラム処理の速度を改善してスピードアップを図る必要があります。また、作業精度の向上では、慣行栽培方法をマシンビジョンシステムに適した育成管理に改善するなど、栽培技術と機械技術の双方からアプローチすることが必要と思われます。</p> <p>[質問6] イチゴの位置認識は、二次元画像より三次元画像の利用ではどうですか。</p> <p>[回答6] 本研究のシステムでは、2台のカラーCCDカメラを装備していますので、2台のカメラの画像から果実の垂直位置の計測を試みてみましたが、垂直距離の誤差が約10mmもあって、不適であることが判明しました。そこで、水平位置は二次元画像で求め、垂直位置は光ファイバセンサで計測する方法が、本システムでの果柄の検出には簡便で確実に判断されました。</p>	

[質問7] 本システムでのイチゴの収穫時間は一個当たり約16.6s かったとのことですが、何が一番時間がかかっているのですか。

[回答7] イチゴの収穫時間は、システムの移動時間、収穫エリアでの採果目標果実の認識時間、採果用カメラの移動と果実の選別・果柄認識の画像処理時間および採果ハンドを降して果柄を把持・切断しベルトコンベアへ搬送・排出する時間を含めて計算しました。一個当たりに換算すると、システム移動に約1.0s、採果目標果実の認識に約0.4s、採果用カメラの移動からベルトコンベアへの搬送・排出までに約15.2s となりました。最も時間がかかったのは、採果動作に関わるアクチュエータの制御でした。

[質問8] 果実の大きさと熟度の判定において、今後に解決すべき課題は何ですか。

[回答8] 収穫・選別システムでは、収穫時に大きさと熟度を判定する選別工程を付加しているため、その判定基準を明らかにしなければなりません。判定は生産地のJA等が定める標準出荷規格に添って厳格に実施されねばなりません。そこで、生産農家や選果施設の検査員の判定結果と一致するように、システムの判別基準のしきい値の決定が精査されねばならないと思います。

[質問9] JAなどでのイチゴの選別においては24種類ぐらいに区分することもあって大変ですが、本システムでは収穫と同時に選別の区分ができますか。

[回答9] 例えば、JA宮崎県経済連合共同組合による宮崎イチゴ標準出荷規格表は、色沢基準が5段階、等級区分がA, B, Cの3段階、大きさが3L, 2L, L, M, Sの5段階になっております。このような細分化は難しいと思います。本システムでは、収穫適期果実の色沢基準を5・6分着色以上と以下の2段階で行いました。今後、選別が簡素化になれば、対応は可能と思われま。

[質問10] システムの間欠移動にはどのような制御法を検討しましたか。

[回答10] 本システムの特徴は、600mmずつ間欠移動しながら収穫エリアごとに収穫作業を繰り返します。間欠移動の制御法は、タイマーによる制御法と駆動輪の回転角度による制御法を検討しました。前者は、駆動輪の回転速度と移動時間から制御しました。後者は、駆動輪軸に取付けた円盤面に反射シールを8等分の位置に貼付け、光ファイバセンサで反射パルスを検知して制御しました。