

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26292133

研究課題名(和文) 収穫ロボットの多機能化による高品質イチゴの生産評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of production method and evaluation technique for high-quality strawberry by multi-functionalizing a harvesting robot

研究代表者

小林 研 (KOBYASHI, Ken)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業技術革新工学研究センター 企画部・部長

研究者番号：90391490

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,800,000円

研究成果の概要(和文)：収穫ロボットの多機能化によるイチゴの高品質生産を目指し3つの基盤技術開発を行った。まず、ロボット収穫した姿勢が不均一な果実を三次元センサで撮影し、近赤外分光器と果実赤道部を定位関係に制御する特徴を有する糖度計測システムを開発した。また、画像情報から花の三次元座標を取得し、その座標に向けて花の固有振動数で変調した集束超音波を照射することで、花を加振し花粉を飛散させ授粉を行なうシステムの構築を行った。さらに、移動栽培装置に備わるベッド循環機能の積極的利用により、果実着果位置における紫外線量のばらつきを小さくし、果肉色が薄い果実が減少するなど果実品質が安定することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A production method and evaluation technique for obtaining high-quality strawberry by multi-functionalizing the harvesting robot was developed. First, a system for measuring the sugar content of fruits was developed. The feature is the positioning control between department of the fruit equator and a far-red spectroscopy using a 3D sensor, because the fruit posture harvested by robot is not same. Second, a non-contact pollination system was constructed. The system obtained three-dimensional coordinates of flowers from image information and uses focused ultrasound, modulated with the natural frequency of flowers, toward the coordinates to vibrate flowers and scatter pollen, thereby facilitating pollination. Finally, the bed circulation function of the moveable bench system was effective in suppressing variations in the amount of ultraviolet rays by fruit position of strawberries. This effect reduced the percentage of flesh-colored pale strawberries, and the fruit quality was stable.

研究分野：農業ロボテックス

キーワード：イチゴ 糖度 三次元センサ 非接触 超音波 紫外線量 品質安定

### 1. 研究開始当初の背景

イチゴ生産の省力化を目指し、定置型イチゴ収穫ロボットが開発された。このロボットは、栽培ベッドを水平方向に循環させる循環式移動栽培装置によって移動してきた果実に対して収穫を行う。現状では収穫のみを行う単機能なロボットであるが、循環式移動栽培装置では全てのイチゴが定点を通過するため、収穫ロボットに代表されるような作業ロボットやセンシング機器を容易に追加することができる。また、栽培ベッドを循環させることで均一な栽培環境を創出することにも期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究は、イチゴの循環式移動栽培装置と定置型収穫ロボットを基幹とした高品質イチゴの安定生産システムの構築を目指し、その基盤技術を開発することを目的とする。具体的には、(1) 収穫ロボットに追加可能な果実の糖度計測技術を開発、(2) 循環式移動栽培装置と連動し超音波放射圧によって授粉を行う機械授粉装置の開発、(3) 循環式移動栽培装置のベッド循環機能に着目し、果実着果位置の紫外線量の変動抑制効果と果実品質に及ぼす影響について明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) 定置型イチゴ収穫ロボットに追加可能な糖度の計測技術を開発し、精度を評価した。  
 ①イチゴ糖度の非接触自動計測に適した計測方式を検討するため、近赤外光を用いた反射方式および透過方式の2方式を比較した。近赤外分光器にはデュナミスト製の小型微分分光システム(ハロゲンランプ 5W, 波長 640~1050 nm)を用い、反射方式は採光部と光照射部を隣り合わせ、透過方式では向かい合わせた。各々採光部に対して果実の赤道部を位置決めして吸光度を計測し、糖度の推定式は吸光度の2次微分値を説明変数にPLS回帰分析によって算出した。未熟果を含めて収穫した品種「もういっこ」(平均質量 14.8±5.9 g)を校正用に167果(7.3±1.1 Brix%), 評価用に166果(7.3±1.1 Brix%)供試した。  
 ②自動計測では赤道部と採光部の位置決めによる一定の誤差の発生が予想されるため、糖度推定精度への影響の無い計測位置の範囲を調べた。両方式に対し各々約80果を供試し、反射方式では赤道部を基準に果長方向に-7~13 mm, 採光部から果実までの距離1~15 mmの位置で計測した。透過方式では果長方向に-5~13 mm, 果径方向に0~10 mmの位置で計測した。  
 ③収穫ロボットで収穫した姿勢が不均一なイチゴの糖度を自動で計測するシステム(自動計測システム)を試作した。  
 ④果柄付きイチゴ果実の果柄を収穫ロボットのエンドエフェクタで把持することでロボット収穫した状態を模し、手動計測と自動計測の糖度推定精度を比較した。品種は「も

ういっこ」102果を供試した。供試果実の糖度は平均 8.0±1.0 Brix%, 平均質量は 14.5±4.2 g, 着色度は八分以上であった。

(2) 循環式移動栽培装置と超音波授粉装置が連動して授粉を行う機械授粉装置を開発し精度を調べた。

①イチゴ花の授粉に適した固有振動数の調査を行った。イチゴ花の固有振動数は、図1に示すように振動発生装置のコアを植物の茎に接触させ加振し、そのときの花の振幅をレーザー変位計で測定した。供試品種はプリシラ(タキイ種苗), 15[Hz]から50[Hz]の範囲で加振した。

②雌しべへの花粉の付着状況について、超音波授粉と手動による筆授粉を実施し、授粉前、授粉直後、授粉後1週間後、3週間後の雌しべの状態を顕微鏡で観察した。

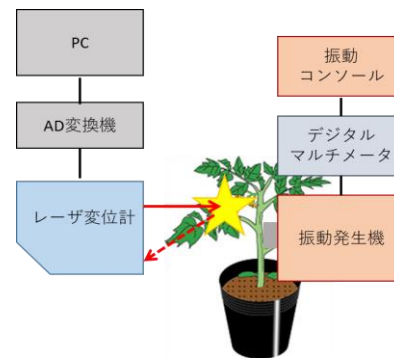


図1. 固有振動数の測定方法

③循環式移動栽培装置でイチゴを栽培中の温室(愛媛県松山市)において機械授粉装置による授粉試験を行った。変調周波数は10[Hz]から100[Hz]まで10[Hz]ごと、照射時間は2秒間とし、超音波授粉処理した花数は平均15花であった。また、対照区として筆授粉区(11花)、無処理区(10花)を設けて可販果と不受精果数を比較した。

(3) 栽培ベッドの循環機能を活用し7つの異なる条件でベッドを稼働させ果実着果位置の紫外線量を調査し変動の小さい最適なベッド稼働条件を抽出した。あわせて最適稼働条件下で栽培された果実の着色程度など品質を調査した。

### 4. 研究成果

(1) 定置型イチゴ収穫ロボットに追加可能な糖度計測技術を開発し、以下の知見を得た。  
 ①反射方式と透過方式の糖度推定精度を調べた結果、反射方式では平均 7.3±1.1 Brix%, 透過方式では平均 7.3±1.0 Brix%であり、両者の糖度推定精度に差がないことが明らかとなった。  
 ②計測位置と糖度推定精度の関係を調べた結果、反射方式では計測位置が果長方向7 mm以上、採光部から果実までの距離では5 mm以上離れると糖度推定結果に有意な差が認

められた。透過方式では各方向 7 mm 以上赤道部から離れると推定結果に差が生じた。両者にほぼ差が無かったため、一方向からのアプローチによる計測が可能で自動計測に有利な反射方式で試作を行うこととした。

③試作した自動計測システム(図 2)は、3次元センサ(RealSense, Intel), 白色 LED, 近赤外分光器, 収穫ロボットのエンドエフェクタを有するロボットアーム(PA10, 三菱重工)および制御用 PC から構成される。本システムは計測スタートボタンを押すと次の手順で計測動作が行われる。エンドエフェクタに果柄を把持された果実の側面画像(距離, カラー)を撮影し, 画像情報から果実の Pitch, Yaw 角を推定する。角度の推定結果に基づき赤道部が 3次元センサと平行になるようロボットアームが動作する。再度画像を撮影し, 果実の 3次元センサに対する最凸部を赤道部として検出する。そして, 赤道部と採光部の Y 方向距離が 5 mm となるようロボットアームが動作し, 分光計測を行い, 糖度の計算結果を操作画面に表示し保存する。自動計測に要する時間はおよそ 12 s/果であった。

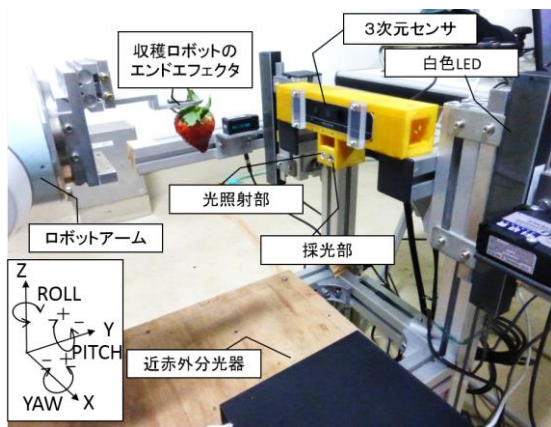


図 2. 糖度の自動計測システム

④自動計測システムによる計測試験の結果, 収穫ロボットに果柄を把持された果実の Yaw 角は $-34 \sim +30^\circ$ であり, 画像処理による推定値と実測値の相関係数は 0.90, RMSE は  $6.7^\circ$ であった。赤道部と採光部の距離は, 目標 5 mm に対して平均  $3.8 \pm 1.3$  mm であった。糖度の推定結果は, 手動計測で平均  $8.3 \pm 0.8$  Brix%, 相関係数 0.72, 自動計測では平均  $8.2 \pm 1.0$  Brix%, 相関係数 0.66 であり(図 3), 5%水準で有意差が無かった。このことから, 試作した糖度の自動計測システムは手動計測と同等の糖度推定精度を有すると推察された。

今後, この自動計測システムを収穫ロボットのエンドエフェクタと一体化することで, 現在着色度のみで判定しているイチゴ収穫ロボットに糖度に基づく収穫適期判断機能を追加することや着果中のイチゴ果実の糖度を生育情報として取得することにも期待できる。

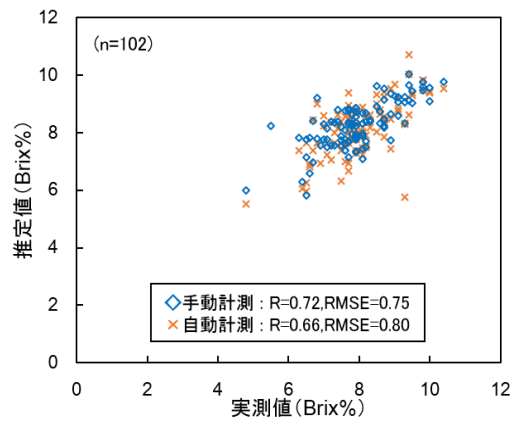


図 3. 自動計測システムの糖度推定精度

(2) 循環式移動栽培装置と超音授粉装置が連動して授粉を行う機械授粉装置を開発し, 以下の知見を得た。

①イチゴ花の固有振動数を調査した結果の一例を図 4 に示す。30 [Hz]において振幅が最大となり, この周波数近傍に固有振動数が存在することが示唆された。

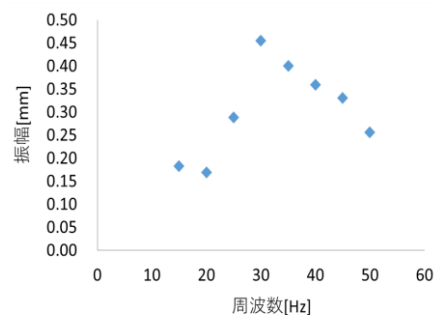


図 4. 加振周波数と花の振幅の関係



図 5. マイクロスコープによる雌しべの授粉状態の観察

②超音波授粉および筆授粉後の雌しべをマ

イクロスコープで観察した結果を図5に示す。超音波授粉においても花粉が雌しべに満遍なく付着していることが観察され、正常な果実が得られることが明らかとなった。

③これらの実験結果を踏まえて、循環式移動栽培装置を設置した温室（愛媛県松山市）において授粉実験を行った（図6）。超音波授粉が可能な範囲は、授粉装置と栽培ベッドとの距離にもよるが約400 mm（縦）×400 mm（横）×400 mm（奥行）の範囲である。栽培ベッドを停止させた状態でこの範囲の画像を撮影し、取込み画像の中からすべてのイチゴ花を検出し、それぞれの花の三次元座標を計測し、順次、超音波を2秒間照射した。すべての花への照射が終了したら、超音波授粉装置を制御するパソコンから移動ベンチ側へ「移動」信号を送り400 mm移動後、「停止」信号を送信しベンチを停止し、同じ動作を繰り返す。

10 Hz から 100 Hz の周波数において傾向ははっきりしなかったが、すべての周波数の平均値としては、可販果が8.7個、不受精果が2.9個となり、手動による筆授粉（可販果：5.5個、不受精果：1.5個）と比較すると不受精果の割合（超音波：33%、筆授粉：27%）が多くなったが、無授粉では可販果：5個、不受精果：8.5個であったので、超音波による授粉効果があることが明らかとなった。



図6. イチゴハウスでの実験の様子

(3) 栽培ベッド循環機能を利用し灌水時に1.5周稼働させる条件は、果実着果位置における紫外線量の変動係数が0.15から0.07まで低下する効果がみられた（n=38）。このベッド稼働条件下で栽培された果実の品質を環境条件が近似する試験圃場の収穫物と比較すると、淡い果肉色の果実数が少ないなどの傾向がみられ、イチゴ移動栽培装置から収穫した果実のほうが品質は安定していた。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕（計5件）

- ① 坪田将吾・手島司，定置型イチゴ収穫ロボットによる糖度計測技術の開発—反射方式と透過方式の比較—，農業食料工学会関東支部，2016年8月1日，筑波大学（茨城県つくば市）

- ② 坪田将吾・手島司，定置型イチゴ収穫ロボットによる糖度計測技術の開発—反射型糖時計による計測手法の検討—，農業環境工学関連5学会2015年合同大会，2015年9月14日～18日，岩手大学（岩手県盛岡市）

- ③ 清水浩・佐藤泰斗・中原高伸・中村謙治・超音波授粉装置の開発，日本生物環境工学会2015宮崎大会，2015年9月8日～2015年9月11日，シーガイアコンベンションセンター（宮崎県宮崎市）

- ④ Hiroshi Shimizu, Takayuki Hoshi, Kenji Nakamura, Development of Ultrasonic Pollination System, XXX VI CIOSTA & CIGR Section V Conference 2015, 2015.5.26～2015.5.28, Hotspring Grand Hotel, St. Petersburg, Russia.

- ⑤ Hiroshi Shimizu, Development of Ultrasonic Pollination System, 2015 High-level International Forum on Protected Horticulture, 2015.4.19～2015.4.22, Park Inn by Radisson Pulkovskaya, Shouguang, China.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小林 研 (KOBAYASHI, Ken)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業技術革新工学研究センター  
企画部・部長

研究者番号：90391490

### (2) 研究分担者

山本 聡史 (SATOSHI, Yamamoto)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業技術革新工学研究センター  
総合機械化研究領域・上級研究員

研究者番号：20391526

（平成27年度より研究分担者）

清水 浩 (SHIMIZU, Hiroshi)

京都大学・農学研究科・教授

研究者番号：50206207

伊藤 史朗 (ITOU, Fumiaki)

愛媛県農林水産研究所・企画環境部・環境安全室・主任研究員

研究者番号：50504130

林 茂彦 (HAYASHI, Shigehiko)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業技術革新工学研究センター  
高度作業支援システム研究領域・主席研究員

研究者番号：80391530

手島 司 (TESHIMA, Tsukasa)  
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合  
研究機構・農業技術革新工学研究センター  
労働・環境工学研究領域・主任研究員  
研究者番号：10391509

内藤 裕貴 (NAITOH, Hiroki)  
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合  
研究機構・農業技術革新工学研究センター  
高度作業支援システム研究領域・研究員  
研究者番号：20794118  
(平成28年度より研究分担者)

(3)連携研究者

坪田 将吾 (TSUBOTA, Shogo)  
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合  
研究機構・農業技術革新工学研究センター  
総合機械化研究領域・研究員  
研究者番号：90643388

山本 和博 (YAMAMOTO, Kazuhiro)  
愛媛県農林水産研究所・企画環境部・企画  
調整室・主任研究員  
研究者番号：70504124

大西 亮樹 (OHNISHI, Ryoki)  
愛媛県農林水産研究所・農業研究部・栽培  
開発室・研究員  
研究者番号：20715841