



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ブルーベリー栽培高度化のためのマシンビジョンによるモニタリング自動化に関する研究 [全文の要約]
Author(s)	松岡, 和輝
Description	この博士論文全文の閲覧方法については、以下のサイトをご参照ください。 https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	甲第15759号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/92035
Type	doctoral thesis
File Information	MATSUOKA_Kazuki_summary.pdf



学 位 論 文 内 容 の 要 約

博士の専攻分野の名称： 博 士（農学）

氏名 松岡 和輝

学 位 論 文 題 名

ブルーベリー栽培高度化のためのマシンビジョンによる モニタリング自動化に関する研究

ブルーベリーは秋頃から花芽を形成し、翌年の春頃に花芽から複数の花を咲かせる低木果樹作物である。開花後は昆虫を介して受粉が進行し、受粉に成功した花のみ結実する。ブルーベリーは環境の変化に対する感受性が高いことから、栽培する際には花芽の形成や、果実の結実および熟成について圃場の細かなモニタリングと管理が重要である。花芽や果実のモニタリングは花芽数による早期収量予測、成熟果実数による収穫時期や収穫順序の決定など幅広い営農管理への利用が期待される。一方で、現状圃場モニタリングは人手によって行われているが、ブルーベリーは果樹 1 本あたり数百から数千もの花芽や果実をつけるため、データの取得には限界がある。そこで、花芽と果実を自動で認識・計数する技術の確立による、圃場モニタリングの自動化が求められている。こうした圃場モニタリングの自動化には、物体検出と呼ばれる画像認識技術が有効だと考えられる。物体検出とは画像中に映る物体のクラス分類と位置を特定する技術である。近年、学習により自動でデータの特徴抽出を可能とする人工知能（AI）の一種である深層学習を用いた物体検出 AI が著しく進歩し、広く普及し始めている。物体検出 AI を用いた花芽や果実の計数および分類によって、ブルーベリー圃場のモニタリング効率が大幅に上昇することが期待される。そこでブルーベリー圃場のモニタリングの自動化を目的として、物体検出 AI を用いた果樹ごとの花芽数と果実数の推定を実現するための研究を行った。

物体検出 AI による花芽と果実の分類と計数

物体検出 AI を使って花芽数と果実数の自動計数を実現するには、解像度に関する課題が考えられる。実際のブルーベリー圃場での実装を考慮すると果樹ごとに花芽と果実を計数する必要があるが、一本の果樹が一枚の画像に収まるように撮影するためには、カメラを果樹から遠ざけなくてはならない。これにより花芽と果実の解像度が相対的に低下し、物体検出 AI の検出精度に悪影響を与える可能性が考えられる。しかし、一本の果樹が収まる画像からブルーベリーの花芽と果実を計数および分類するための最適な解像度についてはまだ十分に検討されていない。

そこで本研究では物体検出 AI の学習を行い、花芽検出モデルと果実検出モデルを作成し、果樹ごとの花芽数と果実数の推定可能性についての検討を行うとともに、正常芽および凍害芽の検出と分類および未成熟果と成熟果の検出と分類を様々な解像度で検証した。その後、単回帰式を用いて画像中の花芽数と果実数を推定した。その結果、画像中の正常芽、成熟果、未成熟果の自動計数の精度は高い値を示したが、凍害芽については低い値を示した。花芽検出では精度指標 AP が最大で 0.755、回帰誤差指標 $MAPE$ が最小で 10.79%、果実検出では AP が最大で 0.815、 $MAPE$ が最小で 23.84%であった。正常芽や果実の検出・分類には 640×640 ピクセルの低解像度の画像を用いた場合においても有用であることが明らかになった。そのため、計算能力の低いコンピュータを用いた場合においても、これらの検出・分類が実現可能であることが示唆された。一方で、凍害の検出精度を向上させるためには、高解像度画像の使用が有用であることが示唆されたため、今後凍害芽の高解像度画像を用意し、データ数を増やしてモデルの学習を行うことで、凍害芽の高精度な検出が実現すると考えられる。また、本研究で作成した花芽検出モデルを用いて、実際のブルーベリー農家における高いニーズがあったもののコストや人手不足の観点から、その実現が困難であった花芽の計数による早期収量予測、花芽の計数による受粉度合いの把握に利用可能な花芽数に対する果実数の比である結実率の可視化、収穫適期や収穫順序の判断に利用可能な総

果実数に対する成熟果実数の比である成熟果実率の分布や推移の可視化への応用可能性を示した。

画像を用いた総果実数の推定に関する検証

結実期の葉によって一部の果実が隠れてしまうことが果実数推定に悪影響を及ぼす可能性が懸念されるため、こうした問題に対処するため本研究では果樹の葉の繁茂度合いや撮影方角が推定精度に与える影響を検討した。まず、撮影画像に映り込んだ果実数から葉に隠れた実を含む実際の総果実数を推定可能か検証した結果、画像中果実数と総果実数には正の相関が見られ ($R=0.96$ 、 $p<0.001$)、単回帰誤差は MAPE で 21.2%となった。これにより、画像を用いて果実数の推定を行う妥当性が示唆された。また、葉の被覆率が推定精度に与える影響について検証した。画像から葉部分と果樹部分をポリゴンで囲い果樹ごとの被覆率を算出し、被覆率の高い群と低い群で単回帰誤差（残差とその絶対値）を分類し、Mann-Whitney の U 検定を用いて統計解析を行った。その結果、二つの群に有意差が認められた。これにより、果実数推定の精度を向上させるためには葉の被覆率の考慮が有用であることが明らかになった。同様の検証を撮影方角および、撮影枚数（樹列の片面と両面）についても実施した結果、本研究の実験条件においては撮影方角や撮影面数は果実数推定の精度に影響しないことが明らかになった。これにより、果樹ごとの果実数を推定する際は任意の樹列から 1 回のみ撮影すれば良いことが明らかとなったため、効率的な圃場モニタリングの実現が可能であることが示唆された。ただし、本研究で対象とした圃場は平面かつ周囲に遮蔽物がない環境であり、方角による日射条件の偏りがなかったため撮影方角や両面撮影の影響が生じなかったことが考えられる。今後、傾斜地における果樹園など日射条件が非対称である環境において、撮影方角や両面撮影の影響についての検証が求められる。

圃場マッピングシステムの開発

物体検出 AI を用いて花芽や果実の自動計数を行うためには、果樹ごとの画像を自動取得することが求められる。ブルーベリー圃場では果樹を列状に植えるのが一般的であり、果樹同士が隣接して重なり合う場合が多く存在する。そのため、1 枚の画像には複数の果樹が映り込むことがあり、画像から 1 本の果樹を認識し切り抜く必要がある。また、人手で静止画の撮影・解析を行うのは作業量の観点で困難であるため、圃場モニタリングの自動化は作業車などで樹列間を走行し、取り付けたカメラで撮影された動画を解析することで実現されることが考えられる。果樹の認識には物体検出 AI の利用が有用であると考えられるが、動画に物体検出を適用するためには、検出した果樹を追跡しフレームごとに紐づける必要がある。さらに、現場利用のために果樹ごとの解析結果と位置データを紐づけることで解析結果のマップ化が求められる。そこで本研究では圃場の動画撮影と位置データを取得し、撮影された動画から果樹ごとの画像の自動取得を行い、果樹検出モデルを適用することで解析結果のマップ化を行う圃場マッピングシステムを開発した。まず、小型電動運搬台車にカメラ、PC、RTK-GNSS を取り付けデータ取得システムを作成した。そして果樹検出 AI モデルとカルマンフィルタなどを用いた果樹追跡アルゴリズムを作成し、果樹検出モデルを組み込んだ圃場マッピングソフトウェアを開発した。これらを用いて樹列間を走行させて動画の取得とデータの解析およびマップの作成を行った。果樹検出モデルによる検出精度を AP や検出領域の精度指標平均 *IoU* で評価したところ、高精度な値を示した。また、果樹画像の自動取得の結果、最も精度が高い場合で 98 本の果樹のうち見落とした果樹が 1 本、重複した果樹が 1 本となり現場運用に十分な精度を達成した。検出した果樹画像に対して果実検出モデルを適用し、位置情報と組み合わせることで果樹ごとの総果実数のマップや成熟果実率のマップ化を実現した。

総括

本研究では物体検出 AI を用いた圃場のモニタリングの自動化を目的として、果樹ごとの花芽数と果実数の推定を実現するための研究を行った。まず、物体検出 AI による花芽の分類と計数および果実の分類と計数に関する検証を行い、正常芽、未成熟果、成熟果については分類・計数が実現可能であるとともに低解像度画像の有用性を示唆した。また、結実期の葉が果実数推定に与える悪影響について検証を行った。その結果、画像を用いた果実数推定は実現可能であることを明らかにした。また、葉の被覆率は推定精度に影響することに加え、本研究の実験条件においては撮影方角・面数については影響しないことを明らかにした。さらに、データの取得からマップ化を自動化する圃場マッピングシステムを開発した。このシステムを用いて実際の圃場のデータ

を取得し解析した結果、果樹画像の高精度な取得を可能にした。また、果樹画像に対して果実検出モデルを適用した結果と位置データを組み合わせることで果樹ごとの果実数と成熟果実率に関するマップ化を実現した。以上の研究内容によって、物体検出を用いた圃場モニタリングの実現可能であることを示した。今後、本研究の内容をさらに発展させることで、物体検出による自動圃場モニタリングを実際のブルーベリー圃場で実装し、推定された花芽数からの実際の果実数の予測、推定された花芽数と果実数の組み合わせによる結実率算出、推定された成熟と未熟の果実数の組み合わせによる成熟果実率算出を行い、早期（花芽期）での収量予測、蜂による受粉効果の空間的変動の把握、果実の収穫適期・収穫順序の判断などへの応用が期待される。