



HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---------------------|---|
| Title | Estimation of root crop yield: Integration of computer vision for quantity counting, quality assessment, and geospatial data mapping in Chinese Yam harvesting [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review] |
| Author(s) | 曹, 天智 |
| Degree Grantor | 北海道大学 |
| Degree Name | 博士(農学) |
| Dissertation Number | 甲第15753号 |
| Issue Date | 2024-03-25 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/91921 |
| Rights(URL) | https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/ |
| Type | doctoral thesis |
| File Information | CAO_Tianzhi_review.pdf, 審査の要旨 |



学位論文審査の要旨

| | | | |
|------------|---------|-----|-----------|
| 博士の専攻分野の名称 | 博士 (農学) | 氏名 | 曹 天智 |
| 審査担当者 | 主査 | 准教授 | 岡本 博史 |
| | 副査 | 教授 | 野口 伸 |
| | 副査 | 教授 | 小関 成樹 |
| | 副査 | 助教 | オスピナ・リカルド |

学位論文題名

Estimation of root crop yield: Integration of computer vision for quantity counting, quality assessment, and geospatial data mapping in Chinese Yam harvesting

(根菜類の収量推定：ナガイモの収穫における数量カウント、品質評価、および地理空間データマッピングのためのコンピュータビジョンの統合)

本論文は英文 122 頁, 図 31, 表 8, 5 章からなり, 参考論文 2 編が付されている。

本研究は根菜類, 特にナガイモの収穫時における数量や品質の自動推定を目的とした手法を開発したものである。生産者は広大な圃場区画を多数保有・管理しながら作物生産を行うにあたって, 日々行われる作業内容やその際の圃場状態など多数のデータを把握・分析することによって収益性の向上を図っている。そうしたデータの中でもとりわけ, 生産の成果と言える収穫物の数量や品質の把握が重要である。小麦や水稻であれば収量センサを備えた収穫機械が実用化されており容易であるが, ナガイモなど根菜類の収量・品質把握を高精度かつ自動的に行う技術はまだ確立されていない。本研究はこの課題を解決するため深層学習モデルなどをベースとした画像処理技術を開発したものである。

第 2 章では, 画像処理によりナガイモの収量 (本数) を自動計測するための技術開発について述べている。地中から掘り上げられ圃場土壌上に並べられたナガイモを撮影した画像には複数本のナガイモが写り込んでいるが, それらを個別に認識し, この処理を圃場を走行しながら撮影した動画データに適用することによって圃場全体あるいは圃場内の局所的な収穫本数を計数することができる。ナガイモ個体の認識には深層学習による最先端の物体検出モデルである YOLOv5s をベースとし, 高い認識精度を達成するため独自の最適化手法を適用したことが述べられている。この最適化手法では, ネットワークの特徴抽出能力を強化し, バウンディングボックス回帰の GIoU Loss を CIoU Loss に置き換えることで, 位置決め精度の向上および回帰速度の高速化を狙っている。また, 圃場土壌上に並べられたナガイモは走行しながら動画データとして撮影されるため, 全ての動画フレームにおいてナガイモ認識処理を行うと同一個体を複数回計数してしまうため, 同一個体の動きを追跡し

て1個のものと判断する処理（トラッキング）も必要となる。そのため本研究では複数のターゲットの動きを同時に追跡しリアルタイムの多オブジェクト追跡に有効なアルゴリズムである Deep-sort をベースとしてビデオフレーム内に定義した仮想検出ラインを利用する手法を確立している。ここでは、Deep-SORT アルゴリズムを改良し、その外観特徴抽出ネットワークの構造を調整し、ナガイモの再同定データセットで再トレーニングすることで、ターゲットの重複によって引き起こされる ID スイッチングの問題を大幅に低減することに成功している。最適化された YOLOv5s 検出器と Deep-SORT を組み合わせることで、ナガイモ計数処理の高精度化を実現している。厳密な実験的検証と統計分析の結果、本研究で提案した手法によりナガイモの計数精度が大きく向上したことを明らかにしている。

第3章では、ナガイモの品質やサイズについて画像処理により自動判定・分類するための技術開発について述べられている。まず始めに、掘り上げられたナガイモが正常品（出荷可能）であるか欠陥品（出荷不可能）であるかどうかを2クラス判別するための画像処理アルゴリズムを開発している。つぎに、欠陥品と判断されたものをさらに詳細な4クラス（曲がり・二股・破談・平坦）に分類するアルゴリズムを開発している。これらの判別・分類では深層学習モデルである CDDNet をベースとしナガイモ表面のテクスチャや欠陥の微妙な変化の検出するための独自の工夫を加えて最適化している。加えて、正常品と判断されたナガイモ個体の長辺方向距離を推定しサイズ分類（S, M, L, 2L）するための画像処理アルゴリズムを開発している。ここでは、最小境界矩形（MBR）フィッティングと凸多角形近似技術を用いることで高い分類精度を達成できたことを明らかにしている。また、出荷可能な正常品であってもより良い形状であるか否かによって商品価値が異なってくるため、ナガイモ形状の自然さと均一性に着目した2クラス判定アルゴリズムも開発している。ここでは、形状の規則性尺度 R_s を計算することにより、実際の長芋の面積と外部の凸多角形の面積を比較し、形状の規則性を客観的に評価することに成功したと述べている。

第4章では、第2章および第3章で提案されたナガイモ計数・品質推定手法を栽培現場での活用に応用するためのマッピング技術について述べられている。ナガイモ生産者は収穫物の数量や品質について圃場間の差異や圃場内局所的な差異を知りたいと考えている。掘り上げられ圃場土壌上に並べられたナガイモを走行しながら撮影した動画データには GNSS による位置情報が埋め込まれているおり、この位置情報と推定された数量・品質データを同期して GIS によるマッピングを行うことで収量マップおよび品質マップの自動生成を実現できたと述べている。

以上、本研究の成果により、ナガイモ栽培の営農管理・計画での分析において特に重要である収穫物数量・品質を簡便かつ高精度に推定することが可能となり、生産現場への応用・普及が期待される。よって審査員一同は、CAO Tianzhi が博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。