

スマート農業化に向けた 3次元復元に基づく 植物の成長推定に関する研究

Research on Estimation of Plant Growth by 3D Reconstruction for Smart Agriculture

近藤 烈司*¹ 福元 伸也*¹ 鹿嶋 雅之*¹ 渡邊 睦*¹ 神田 英司*² 池澤 和広*³

Tsuyoshi Kondo*¹ Shinya Fukumoto*¹ Masayuki Kashima*¹

Mutsumi Watanabe*¹ Eiji Kanda*² Kazuhiro Ikezawa*³

1. はじめに

現在の農産業では、人口減少等による人手不足や省力化、技術の継承などが重要な課題となっている。農林水産省は上記の課題を解決するため、日本の農業の強みと先端技術を組み合わせたスマート農業政策を打ち出しており、本研究はその政策に向けたものとなっている。

また、本研究はそおピーマン農業実証コンソーシアムに関連したものであり、鹿児島大学及び鹿児島県農業開発総合センターでは、RGB-D カメラによる生育計測を担当した。図 1 にコンソーシアムの概要を示す。

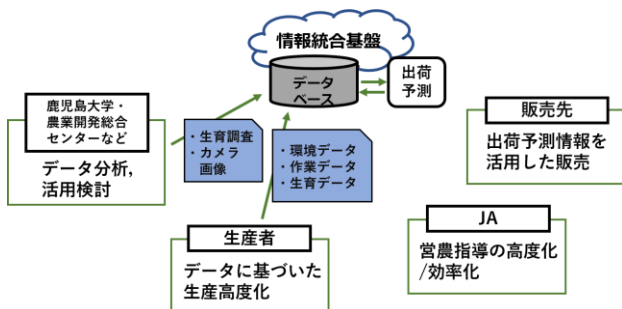


図 1 そおピーマン農業実証コンソーシアム

本研究の目的は、RGB-D カメラによる栽培野菜の生育予測及び生産者の栽培管理支援を行うシステムの構築である。提案するシステムでは、RGB-D カメラを用いた草高推定及び 3次元復元を用いた葉面積指数 (LAI: Leaf Area Index) の推定を行い、より効率的で有効な作物成長度の取得を目指す。それによって、生産者の視覚的・感覚的な判断による作業を排除し、栽培管理の安定化を図る。

ここで、草高及び LAI について説明する。まず、草高とは植物の自然な高さのことであり、植物の地表面から最上部までの高さのことを指す。栽培現場では、草勢の強弱に応じて灌水や追肥を加減しており、草勢の強弱を判断する指標の 1 つとして草高の経時変化量を用いている。

次に LAI とは、ある植物群落中に存在する総葉面積をその土地面積で除した値である。LAI の推定によって植物群落が行う光合成の能率を推測できるため、適切な栽培管理を行う上で重要な値であることがわかっている。また LAI

は、品種によっては果実収量との相関関係があることがわかっており、LAI やビニールハウス内の日射量及び二酸化炭素濃度等による果実収量の予測に関する研究が進められている^[1]。

しかし現在、両値の計測は栽培管理者の視覚的・感覚的な判断による推測や携帯葉面積計等を用いた手動計測に基づいている。そのため、より簡便に両値を計測及び推定する方法が必要である。

2. 関連研究

2.1 RGB-D カメラによる栽培野菜の草高推定

RGB-D カメラを用いた栽培野菜の草高推定に関する研究として黒崎ら^[2]の研究がある。これは栽培野菜の真上から RGB-D カメラによる撮影を行い、取得した距離データから 4 つのアルゴリズム ([a]全ピクセルの平均化, [b]RGB-D カメラに最も近い 1 点をサンプリング点とみなす, [c]上位 5%平均化, [d]上位 10%平均化) を用いて草高推定を行っている。また、上記アルゴリズム中の d によって得られる点の重心を用いた植物個体の茎頂部の自動追尾アルゴリズムを試用している。

2.2 RGB-D カメラによる植物の LAI 推定

RGB-D カメラを用いた植物の LAI 推定に関する研究として浜本ら^[3]や Hu ら^[4]の研究がある。浜本らは、植物の真上から RGB-D カメラによる撮影を行い、カメラの発する近赤外線を受けた部分の葉面積を高さ別に積算することで植物に対する光の浸透具合を分析し、植物の受光態勢を評価している。しかし、その積算値は実際の葉面積とは異なることや経時的撮影によって植物の撮影すべき部分が撮影領域から外れた場合、推定葉面積が実際よりも小さく算出されてしまう等の課題が挙げられる。

また、Hu^[4]や Wang ら^[5]は、ターンテーブルを用いて RGB-D カメラによる植物の撮影を行い、3次元復元を行うことで植物個体全体の情報を取得し、葉面積や草高、体積を推定することを試みている。しかし、植物に対して単に 3次元復元を行う場合、葉同士の重なりによって生じるオクルージョンを考慮できない。したがって、より正確に植物の 3次元復元を行うためには、その部分の補完を行う必要がある。

*1 鹿児島大学工学部

School of Engineering, Kagoshima University

*2 鹿児島大学農学部

School of Agriculture, Kagoshima University

*3 鹿児島県農業開発総合センター

Kagoshima Agricultural Development Center

2.3.3 次元復元後の植物モデルに対する補完手法

3次元復元された植物モデルの補完手法に関する研究として Isokane ら^[6]や Gong ら^[7]の研究がある。Isokane らは、植物の多視点可視画像を深層学習によって画像変換し、枝の存在確率を推定することで、葉で隠れた枝構造の3次元復元を試みている。また Gong らは、LIDAR スキャナで取得した樹木モデルから L-system (Lindenmayer system) のための文字列を抽出し、その文字列に基づいた L-system による枝構造の再構成を試みている。ここで L-system とは、初期条件と規則性を示す文字列の記述によって植物の成長過程や構造を表現できるアルゴリズムのことである。

本研究では、植物を対象として RGB-D カメラによる真上からの撮影に加え、同カメラによる斜め上からの撮影を行い、両カメラから得られる情報を組み合わせることで植物の草高推定及び LAI 推定を行う。さらに、同カメラから得られる情報を使用して3次元復元された植物モデルを含むオクルージョン部分に対して、植物の自己相似性を利用して生成された植物の基本構造モデルの付加による補完手法を提案する。

本研究の目標として、草高推定については関連研究と異なるアルゴリズムを試用することで、より高精度な草高計測手法を目指す。LAI 推定については、東出ら^[4]が提案する果実収量の予測手法の中で葉面積計測のために用いられるレイティング法と比較して、より高精度で簡便なものを目指す。レイティング法とは、葉面積と葉幅及び葉長の関係に基づく回帰式を用いて葉面積を算出する手法である。

3. 提案手法

3.1 手法の概要

提案手法は、RGB-D カメラを用いた栽培野菜の草高推定及び3次元復元による LAI 推定である。本手法の処理の流れを図 2, 3 に示す。RGB-D カメラは、撮影対象植物の真上及び斜め上に設置する。また、各カメラをカメラ A 及びカメラ B と呼ぶ。

草高推定について、まずカメラ A によって対象植物を撮影し、距離データを取得後、草高データマップ及び距離画像を生成する。生成した草高データマップから提案アルゴリズムを用いて上位点を算出し、それらの平均値を算出することで草高推定を行う。

次に、本提案手法中の LAI 推定には 2 つの手法があり、各手法を LAI 推定 α 及び LAI 推定 β と呼ぶ。

LAI 推定 α は、まずカメラ A 及びカメラ B によって対象植物を撮影し、取得した距離データ及び RGB 画像から点群を生成する。それぞれ回転及び平行移動を行った後、ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム^[8]を用いて各点群の位置合わせを行う。位置合わせ後の植物モデルとして、部分的な植物モデルが取得できる。その後、取得した植物モデルに対してメッシュ化を行い、総表面積及び体積を算出する。また、各値が部分的な情報から得られた値であることを考慮して補正を行う。

続いて、LAI 推定 β はカメラ A 及びカメラ B によってターンテーブル上の対象植物を撮影する。LAI 推定 α と同様に各点群の位置合わせを行い、対象植物の全周の3次元復元モデルを生成する。その後、取得したモデルに対して、

事前に植物の成長性質を参考に生成した植物の基本構造モデルを付加し、オクルージョン部の補完を行う。補完後の植物モデルに対してメッシュ化を行い、総表面積及び体積を算出する。

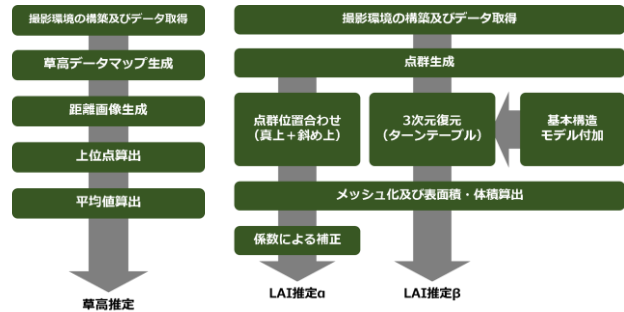


図 2 草高推定の処理の流れ (左)

図 3 LAI 推定の処理の流れ (右)

3.2 草高推定

本手法による草高推定について図 4 を用いて説明する。カメラ A によって対象植物を撮影し、距離データを取得する。次に、畝上部からのカメラ A の高さから距離データを減ずることで草高データマップを生成する。さらに、草高データマップを畝上部からのカメラ A の高さで正規化することで距離画像を生成する。距離画像を解析する際に株同士の見分けがつかない場合、草高データマップを用いて各株で最高点を算出し、それらの平均値を撮影領域の草高とする。また、株同士が重なっている場合、草高データマップから上位 12 点を算出し、その平均値を撮影領域の草高とする。ただし、上位点の探索は探索点の画像上 40cm 四方の範囲を除外しながら行う。これは図 6, 7 に示す通り、主枝先端の認識が狙いであり、1本の主枝から2点以上の上位点を探索しないようにするためである。

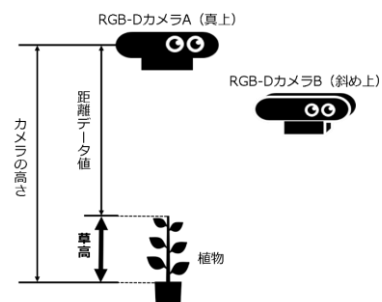


図 4 草高推定及び LAI 推定 α の模式図

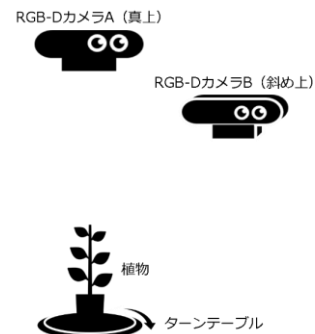


図 5 LAI 推定 β の模式図

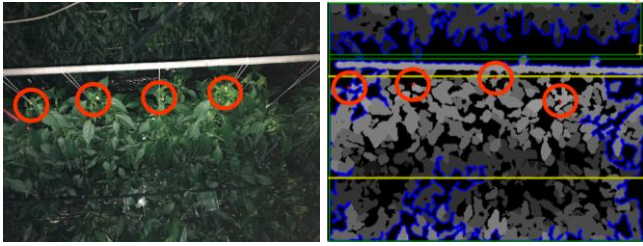


図 6 上方から撮影した主枝（可視画像）（左）

図 7 上方から撮影した主枝（距離画像）（右）

3.3 LAI 推定 α

本手法による LAI 推定 α について図 4 を用いて説明する。まず、カメラ A 及びカメラ B によって対象植物を撮影し、距離データ及び RGB 画像を取得する。次に、RGB 画像と距離画像のキャリブレーション後、点群を生成する¹⁹⁾。各点群の初期位置合わせには AR マーカーを使用し、マーカーに対する各カメラの位置を参照することで、各点群に必要な回転量及び平行移動量を算出する。初期位置合わせ後、ICP アルゴリズムを用いて位置合わせを行う。続いて、位置合わせ後の植物モデルに対してメッシュ化を行う。メッシュ化のアルゴリズムは、ボールピボット、凸包、アルファシェイプ、ボクセル化の 4 種類から選択する。メッシュ化後の植物モデルの総表面積及び体積を算出する。さらに、得られた総表面積及び体積が部分的な情報から得られた値であることを考慮して係数を乗ずる補正を行う。

3.4 総表面積及び体積の係数による補正について

LAI 推定 α において生成される植物モデルは、部分的な情報由来のものであり、算出される総表面積や体積は実際の値と比較して低くなることが予想される。したがって、LAI 推定 α において算出される各値に対して係数を乗ずる補正を行う必要がある。本手法では 2 種類の係数から選択する。1 つ目は、カメラ B で撮影できる範囲における葉面積が、撮影できない対象植物の裏側における葉面積と同値であると考え、係数を 2 とする補正手法である。2 つ目は、LAI 推定 α において算出される各値と真値との関係式を求め、係数を算出する補正手法である。

3.5 LAI 推定 β

本手法による LAI 推定 β の模式図を図 5 に示す。まず、カメラ A 及びカメラ B によってターンテーブル上の対象植物を撮影し、距離データ及び RGB 画像を取得する。ここで、カメラ B においては、ターンテーブルを 15° 回転させる度に撮影を行う。次に、LAI 推定 α と同様に各点群の生成及び位置合わせを行い、対象植物の全周の 3 次元復元を行う。本手法による LAI 推定 β では、ここまでの操作を行う前に対象植物の成長性質を参考に生成した植物の基本構造モデルを生成しておく。基本構造モデルは L-system によって表現される。3 次元復元後の植物モデルに対して、対象植物の基本構造モデルを付加し、オクルージョン部分の補完を行う。最後に、補完後の植物モデルに対してメッシュ化を行い、総表面積及び体積を算出する。メッシュ化

については LAI 推定 α と同様、4 種類のアルゴリズムから選択する。

3.6 植物の基本構造モデルについて

植物の基本構造モデルは、植物が有する自己相似性を利用して対象植物の葉や枝を再現したモデルである。植物には主枝や葉序といった概念があり、それらを再現することで基本構造モデルを生成する。主枝とは樹形の骨格となり、側枝を支える枝のことを指す。また、葉の付き方には規則性があり、これを葉序と呼ぶ。その中でも互生葉序は、葉が主枝及び側枝の周りを螺旋状に概ね一定の角度で付くというものであり、その角度は植物によって異なる。例えばピーマンは 144° 、ミニトマトは 90° となっている。本手法では、対象植物の主枝や葉序を L-system を用いて再現することで基本構造モデルを生成する。L-system では、図形の再帰的な繰り返しによる形状生成が可能であり、成長度を設定することでその成長過程を可視化することができる。

4. 評価実験

4.1 草高推定に関する実験

鹿児島県農業開発総合センターのガラス温室で草高推定に関する実験を行った。使用機器として RGB-D カメラ (Orbbec 社: Astra, Persee) を使用した。用意した区域を表 1 に示す。上記の RGB-D カメラをガラス温室内の各区域のピーマン群落の真上に設置し、約 1 週間毎に撮影及び実測値計測を行った。さらに、黒崎らのアルゴリズムの中で特に有効であった c 及び d アルゴリズムを試用し、得られた草高推定値を元に予想精度の比較を行った。

表 1: 実験で用意した区域

	収穫時期の実の大きさ
試験 1	M (27~40g 未満)
試験 2	L (41g 以上)

4.2 LAI 推定に関する実験

ミニトマトを対象として本手法による LAI 推定 α 及び LAI 推定 β を行い、実測値と比較する予定である。実験には上記の RGB-D カメラに加えてターンテーブルを使用する。また、実測値の計測は以下のようにして行う。1cm 角の方眼紙に葉を重ねた可視画像を撮影後、葉の領域と 1cm 角のマスに含まれるピクセル数の割合を求め、実際のスケールに合わせることで葉面積を計測する。

4.3 実験結果

4.3.1 草高推定に関する実験の結果

草高推定に関する実験で得られた距離データ解析後の画像を図 8, 9 に示す。図 8, 9 に示す通り、株同士の重なり具合で異なるアルゴリズムを使用し、草高推定を行った。

図 10, 11 は、試験 1 及び試験 2 で得られた本手法による草高推定値と実測値の推移グラフである。両グラフの縦軸は草高、横軸は時間を表している。両グラフから本手法

による草高推定値が実測値と同様の推移を示していることが読み取れ、その予想精度は 94~100%であることがわかった。さらに、一時低下している部分は誘引作業によるものであり、実際に作業が行われた時期と一致した。また、c 及び d アルゴリズムによる草高推定の予想精度は、それぞれ 84~100%及び 45~100%であった。また予想精度 A は、推定値 E 及び実測値 M より、以下の式で算出される。

$$A = 100 - \left(\frac{|E - M|}{M} \times 100 \right)$$

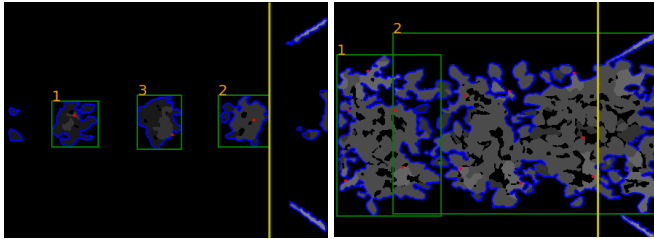


図8 株の見分けがつかない場合 (左, 9月27日)

図9 株同士が重なっている場合 (右, 10月21日)

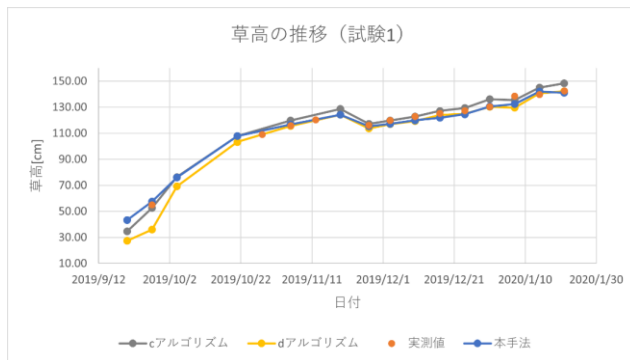


図10 試験1における草高推移

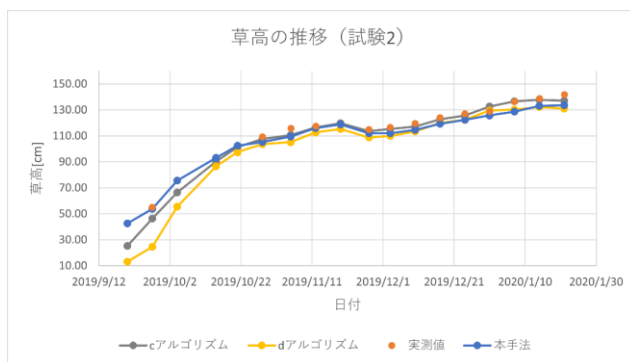


図11 試験2における草高推移

4.3.2 LAI 推定に関する実験の結果

本実験の結果については発表時に示す予定である。

5. 考察

本手法による草高推定値が実測値と同様の推移を示し、予想精度が 94~100%であったことから、草高の自動計測システムとしての有用性が示された。また、本手法による草高推定値と c 及び d アルゴリズムによる草高推定値の推移を比較すると、撮影前期を除いて同等の精度であることがわかった。撮影前期において c 及び d アルゴリズムによ

る草高推定値の精度が低い傾向にある理由として、撮影前期における撮影対象植物の葉の密度が、撮影中期及び後期と比較すると低く、探索される上位点が下層の葉に影響を受けるためであると考えられる。しかし、本手法による草高計測値は、撮影前期においてもその影響を受けることはなく、撮影全体を通して高精度であったことから他アルゴリズムと比較して、より安定した草高推定が可能であることが示された。

6. まとめ

本稿では、RGB-D カメラを用いた植物の草高推定及び LAI 推定手法を提案した。評価実験では、本手法による草高推定値が実測値と同様の推移を示し、予想精度は 94~100%であったため、他アルゴリズムと比較して、より安定して草高を推定できることが示された。しかし、本手法における草高推定によって認識した上位点の座標は、実際の主枝位置とズレがある場合があるため、上位点探索手法の改良が必要である。また、撮影領域内で支柱等の障害物が存在する場合、目視でその範囲を除外しているため、可視画像の併用による障害物除去を考えている。今後の展望として、提案した LAI 推定 β をさらに検討し、補完手法及びシステム確立に向けて研究を進める。

謝辞

本研究は、農林水産省「スマート農業技術の開発・実証プロジェクト(課題番号:19190126, 課題名:センシング技術に基づく統合環境制御の高度化によるピーマン栽培体系の実証の実証)」(事業主体:国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構)の支援により実施した。

参考文献

- [1] 東出忠桐, 安東赫, 斎藤岳士, “施設園芸作物の生育・収量予測ツール”, NARO RESEARCH PRIZE 2019, 2019.
- [2] 黒崎秀仁, 梅田大樹, 岩崎泰永, “Kinectを用いたパブリカの草高計測と成長解析への適用”, 植物環境工学, Vol.29, No.4, pp.130~138, 2017.
- [3] 浜本浩, 黒崎秀仁, 岩崎泰永, “Kinect(キネクト)の深度情報を利用した作物個体群の受光態勢の評価”, 植物環境工学, Vol.27, No.2, pp.97~101, 2015.
- [4] Yang Hu, Le Wang, Lirong Xiang, Qian Wu and Huanyu Jiang, “Automatic Non-Destructive Growth Measurement of Leafy Vegetables Based on Kinect”, Sensors(Basel), Vol.18, No.3, 2018.
- [5] Yawei Wang, Yifei Chen, “Non-Destructive Measurement of Three-Dimensional Plants Based on Point Cloud”, plants2020, Vol.9, No.5, 2020.
- [6] Takahiro Isokane, Fumio Okura, Ayaka Ide, Yasuyuki Matsushita, Yasushi Yagi, “Probabilistic Plant Modeling via Multi-View Image-to-Image Translation”, Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'18), 2018.
- [7] Yinxi Gong, Yanqin Yang, Xiaofen Yang, “THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION OF THE VIRTUAL PLANT BRANCHING STRUCTURE BASED ON TERRESTRIAL LIDAR TECHNOLOGIES AND L-SYSTEM”, ISPRS(International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences), Vol.XLII-3, pp.403-410, 2018.
- [8] 山川康平, 岩切浩亮, 鹿嶋雅之, 福元伸也, 佐藤公則, 渡邊睦, “局所選択型物体のモデリングに基づく三次元環境データの自動構造化に関する研究”, 情報処理学会研究報告, pp.1~8, 2017.
- [9] 近藤烈司, 福元伸也, 鹿嶋雅之, 渡邊睦, 神田英司, 池澤和広, 上之園健一, “スマート農業化に向けた葉面積指数の推定及び3次元復元による植物の成長推定に関する研究”, 第19回情報科学技術フォーラム, H-018, 2020.