

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

Research on Estimation of Leaf Area Index and 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 上之園 健一*³

Tsuyoshi Kondo*¹ Fukumoto Shinya*¹ Masayuki Kashima*¹ Mutsumi Watanabe*¹
Eiji Kanda*² Kazuhiro Ikezawa*³ Kenichi Kaminosono*³

1. はじめに

現在の農林水産業では、人手に頼る作業や熟練農業者の技術が必要な場面が多く、人口減少や若者の農業離れ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、大学及び鹿児島県農業開発総合センター側では、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。

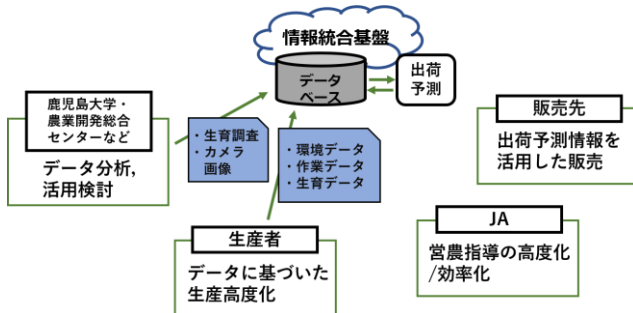


図 1 そおピーマン農業実証コンソーシアム

本研究の目的は、RGB-D カメラによる栽培野菜の収穫量予測及び生産者の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計測及び 3次元復元を用いた葉面積指数 (LAI : Leaf Area Index) の推定を行い、より効率的に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、葉面積指数 (LAI : Leaf Area Index) について説明する。LAI とは、ある植物群落中に存在する葉の総面積をその土地面積で除した値である。この値を推定することでその植物群落が行う光合成の能率を推測することができるため、栽培野菜の管理において適切な LAI の管理を行うことが重要であることがわかっている。現在、LAI を計測する方法として、携帯葉面積計による計測方法が挙げられ

る。これは、スキャンヘッドに葉を挟むことで葉面積を計測するものである。しかし、計測器が高価であることや 1 枚ずつ測定するため手間がかかるなどの欠点が挙げられる。そのため、非破壊的に手早く LAI を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計測

RGB-D カメラを用いた栽培野菜の草高計測に関する研究として黒崎らの研究がある[1]。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) を用いて草高計測を行っている。また、植物個体の茎頂部の自動追尾を行う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や Hu らの研究がある[2],[3]。浜本らは、植物の真上から RGB-D カメラによる撮影を行い、カメラの発する赤外線を植物の葉が実際に受けている直達光とみなすことで植物の受光態勢の評価を試みている。しかし、植物が受ける光は真上からのみではなく、多数の方向から入射するものであるため、植物全体の情報から受光状態や葉面積値を推測するシステムが必要である。また、Hu や Wang らは、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[3],[4]。

本研究では、上記のアルゴリズムと異なる草高計測を行い、さらに LAI の推定を行うことで両値を用いたより有用な成長度の評価システムの構築を目指す。また、Hu や Wang らの研究[3],[4]を参考に LAI を推定後、その精度を確認し、本研究に反映させることにした。

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計測及び 3次元復元による LAI 推定である。本手法の処理の

*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

流れを図 2 に示す。草高計測については、RGB-D カメラをビニールハウス内の作物群落の真上に設置し距離データを取得後、距離画像及び草高データマップを生成し、作物群落の状態によって異なるアルゴリズムを用いて平均値を算出することで草高を計測する。LAI 推定については、RGB-D カメラによって取得した距離データ及び RGB 画像から点群を生成し、それぞれ回転及び平行移動を行った後、ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムを用いて位置合わせを行うことで、3 次元復元を行う。その後、メッシュ化を行いその総表面積値を算出することで、LAI を推定する。

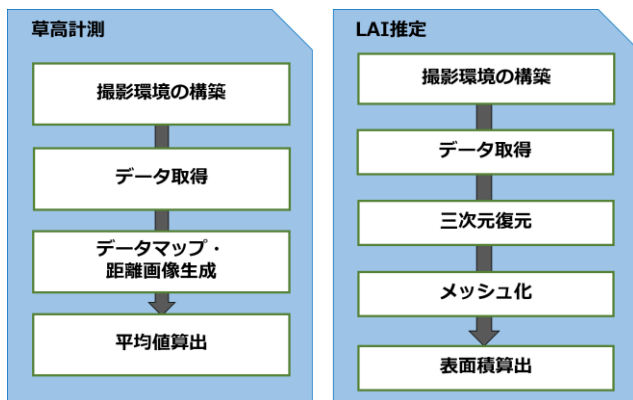


図 2 本手法の処理の流れ

3.2 草高計測

本手法による草高計測について図 3 を用いて説明する。RGB-D カメラをビニールハウス内の作物群落の真上に設置し距離データを取得する。次に、畝上部からの RGB-D カメラ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 RGB-D カメラの高さを用いて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。

3.3 LAI 推定

本手法による LAI 推定について図 4 を用いて説明する。まず、RGB-D カメラによって距離データ及び RGB 画像を取得する。その際、ターンテーブルを 15° 回転させる度に撮影を行う。また、今回使用した RGB-D カメラの RGB センサと Depth センサの位置がずれていたため、後述する手法で RGB 画像と距離画像のキャリブレーションを行った。取得した距離データ及び RGB 画像から点群を生成し回転及び平行移動を行った後、ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムを用いて位置合わせを行うことで 3 次元復元を行う。さらに、メッシュ化を行いその総表面積値を算出することで LAI 推定を行う。

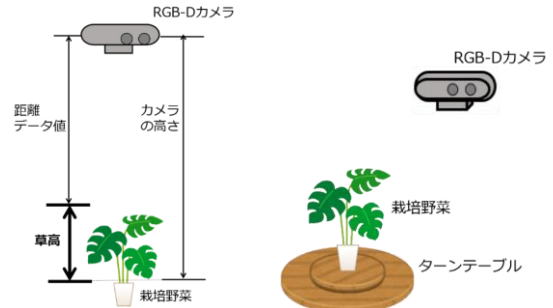


図 3 草高計測の模式図 (左)

図 4 LAI 推定の模式図 (右)

3.3.1 キャリブレーション

アクリル板で作成したチェッカーボードを用いて RGB センサと Depth センサのキャリブレーションを行った。その手順として RGB-D カメラでチェッカーボードを撮影後、取得した RGB 画像及び距離画像の格子点を検出し、2つの画像間から算出されるホモグラフィ行列を用いて RGB 画像の射影変換を行った。

3.3.2 ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム

ICP アルゴリズムは複数の点群間で対応点を取り、その誤差が最小になるように繰り返し計算を行う手法である。点群 M と点群 S を対象とした場合、点群 S の中の各点に対して点群 M の中で最も近い点を対応点とする。次に、各対応点間の距離の 2 乗和 E が最小となる変換パラメータ (回転行列、並進ベクトル) を求め、点群 S を変換する。これを繰り返し行い、2つの点群を収束させる[5]。

4. 評価実験

4.1 草高計測に関する実験

先に述べたそおピーマン農業実証コンソーシアムに参加する実証農家のビニールハウスで草高計測に関する実験 1 を行った。また、鹿児島県農業開発総合センターのビニールハウスで草高計測に関する実験 2 を行った。使用機器として RGB-D カメラ (Orbbec 社: Persee, Astra) を使用した。

4.1.1 草高計測に関する実験 1

草高計測に関する実験 1 では、上記の RGB-D カメラをビニールハウス内のピーマン群落の真上に設置し、毎日 0 時に撮影を行った。

4.1.2 草高計測に関する実験 2

草高計測に関する実験 2 で用意した区域を表 1 に示す。上記の RGB-D カメラをビニールハウス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。

表 1: 実験 2 で用意した区域

	かん水量	収穫時期の実の大きさ
試験 1	標準	M
試験 2	標準	L

4.2 LAI 推定に関する実験

観葉植物を用いて本手法による LAI 推定を行い、実測値と比較した。実験には上記の RGB-D カメラに加えてターンテーブル及び観葉植物を使用した。実際に実験に使用したターンテーブル及び観葉植物を図 5 に示す。また、実測値の算出にはレイティング法と呼ばれる葉面積の算出方法を用いた。レイティング法とは、十数枚の葉幅（または葉長）と葉面積の関係式を算出後、全ての葉幅（または葉長）を測定し、関係式を用いて総葉面積を算出する方法である。

4.1 実験結果

4.1.1 草高計測に関する実験 1 の結果

本手法による草高計測で得られた距離画像を図 6 に示す。また、図 7、8 は株同士の重なり具合で異なるアルゴリズムを使用して草高計測を行っている例である。

図 9 は、ある農家で得られた本手法による草高計測の推移グラフである。設置した RGB-D カメラから取得した距離データによって得られた草高計測の推移グラフは、全て緩やかな上昇傾向を示した。

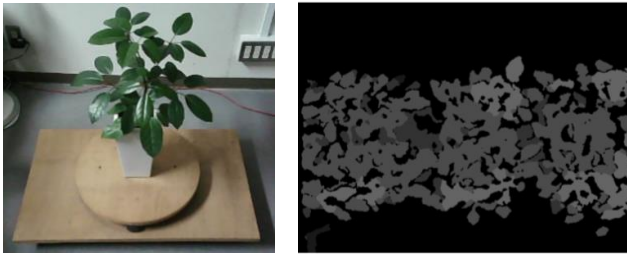


図 5 実験に使用したターンテーブル及び観葉植物（左）

図 6 実験 1 で生成された距離画像（右）

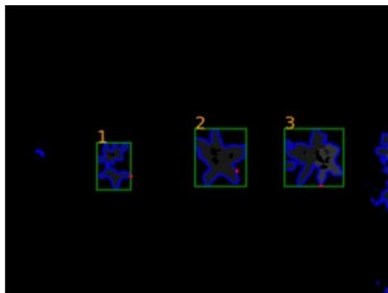


図 7 株の見分けがつかう場合

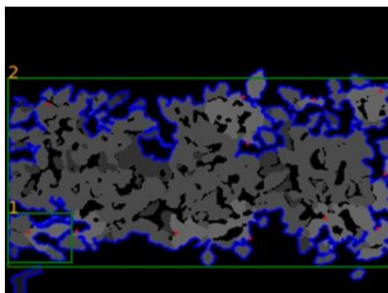


図 8 株同士が重なっている場合

農家Aの草高推移

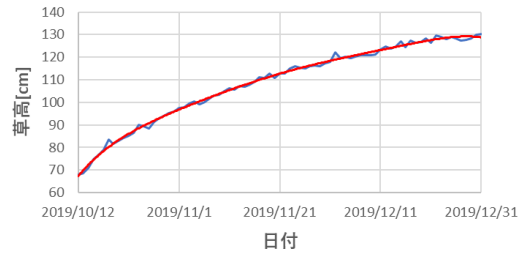


図 9 農家 A の草高推移

4.1.2 草高計測に関する実験 2 の結果

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計測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計測値が実測値と同様の推移を示していることが読み取れる。また、一時低下している部分は誘因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。

試験1

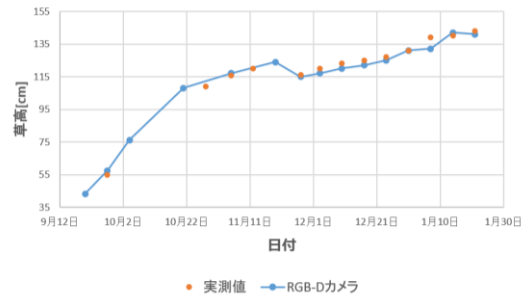


図 10 試験 1 の草高推移

試験2

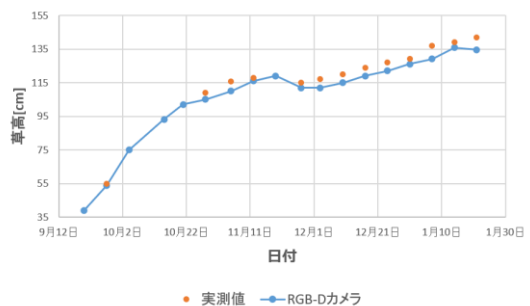


図 11 試験 2 の草高推移

4.1.3 LAI 推定に関する実験の結果

作成したチェッカーボードを用いて、RGB センサと Depth センサのキャリブレーションを行った。図 12 に実際に作成したチェッカーボードを示す。その結果、比較的ズレのない色情報を持った点群が得られた。図 13, 14 にそのキャリブレーション結果を示す。また、本手法による 3 次元復元及びメッシュ化を行い、その総表面積値を用いて得られた LAI 推定値と実測値の比較を行った。図 15, 16 に 3 次元復元及びメッシュ化を行った結果を示す。表 2 は LAI に関する実験の結果である。LAI 推定値は 0.889, LAI 実測値は 0.814 という数値を示し、その誤差率は 0.9% であった。

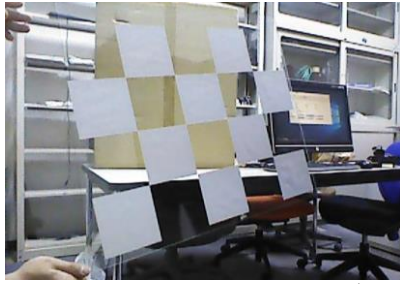


図 12 作成したチェッカーボード



図 13 キャリブレーション前 (左)

図 14 キャリブレーション後 (右)

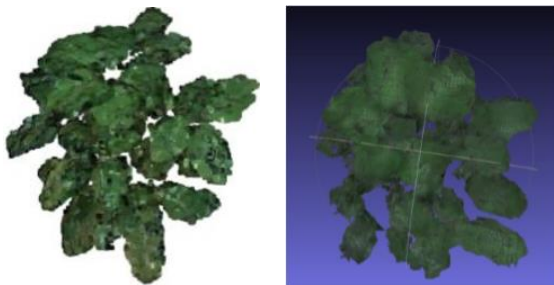


図 15 3次元復元後 (左)

図 16 メッシュ化後 (右)

表 2 : LAI に関する実験結果

LAI 推定値	0.889
LAI 実測値	0.814
誤差率[%]	9.2

5. 考察と今後の課題

本手法による草高計測値は緩やかな上昇傾向を示したことで、RGB-D カメラによる草高計測が可能である見通しが立てられた。さらに、成長による推移だけではなく誘因作業による推移も示したことから、栽培野菜の生育状態の指標としての有用性は高いと言える。

また、LAI 推定値は実測値との誤差率が 9.2%であったが、最も精度よく 3次元復元が可能であると考えたターンテーブルによる撮影によって得られた結果であることを加味すると、この誤差率は大きいものであると考える。このように誤差率が大きくなった原因として、ターンテーブルの回転によって植物が揺れることで点群の部分的な重なりがズレが生じることや位置合わせを行う際、部分的に厚みが生じるなどが挙げられる。

今回の草高計測のアルゴリズムは栽培野菜の成長により茎頂部が RGB-D カメラの画角から外れてしまう場合を考慮していないため、更なるアルゴリズムの改良が必要であ

ると考える。また、LAI 推定において 3次元復元を行う際、点群同士の重なりや部分的なズレや厚みに対して適切なスムージングを行うことで改善されると考えている。さらに、今後はメッシュ化による表面積値を用いた LAI の推定に加えて、体積を用いた推定も行い LAI 実測値との関係を調査していく必要がある。植物の 3次元復元では撮影する際に葉同士が重なり合って隠れた部分が生じる。今回の LAI 推定における 3次元復元では、そのようなオクルージョンについて考慮していないため、撮影対象の植物の部分的な情報を持つデータベースを用いた補完[6]や植物の特性を用いた推測[7]による補完などによる改善を考えている。将来的には、複数の RGB-D カメラで撮影することで得られる点群を用いて 3次元復元された栽培野菜の LAI 推定値をオクルージョンのような上記で挙げた課題を考慮した可能な限り正確に 3次元復元された栽培野菜の LAI 推定値と比較及び検証を行い、今回構築したシステムよりもさらに有用なシステムの構築を目指す。また、ここで言う可能な限り正確に 3次元復元された栽培野菜は、今回行った RGB-D カメラ及びターンテーブルを使用して 3次元復元されたモデルに補完を行う他に RGB 画像を使用した SfM (Structure from Motion) と MVS (Multi-View Stereo) による 3次元復元[8], [9]を行ったモデルに補完を行う方向性も考えている。

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] 黒崎秀仁, 梅田大樹, 岩崎泰永, “Kinect を用いたパプ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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Yawei Wang, Yifei Chen, “Non-Destructive Measurement of Three-Dimensional Plants Based on Point Cloud”, plants2020, Vol.9, No.5, 2020.
- [5] 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.
- [6] Angela Dai, Charles Ruizhongtai Qi, Matthias NieBner, “Shape Completion using 3D-Encoder-Predictor CNNs and Shape Synthesis”, The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), pp. 5868~5877, 2017.
- [7] 梶田達雄, “L-システムによる植物の形態の進化 (Emergence and Open-ended evolution)”, 基研長期研究会「複雑系 2」～物理から生物・進化・ゲームへ～, 研究報告, 物性研究, Vol.61, No.5, pp.429~439, 1994.
- [8] Sylvain Jay, Gilles Rabatel, Xavier Hadoux, Daniel Moura, Nathalie Gorretta, “In-field crop row phenotyping from 3D modeling performed using Structure from Motion”, Computers and Electronics in Agriculture, Vol.110, pp.70~77, 2015.
- [9] Jingwen Wu, Xinyu Xue, Songchao Zhang, Weicai Qin, Chen Chen, Tao Sun, “Plant 3D reconstruction based on LiDAR and multi-view sequence images”, Vol.1, No.1, pp.37~43, 2018.