

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K12016

研究課題名（和文）植物の3次元形状モデリングのための基盤技術の開発

研究課題名（英文）Development of basic technology for 3D shape modeling of plants

研究代表者

清水 郁子（SHIMIZU, Ikuko）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：70312915

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本申請では、植物の3次元形状モデリング手法を確立することを目的として研究をおこなった。3次元形状の計測には非接触で高精度に対象の3次元形状が得られる能動的3次元センサのほか、可搬性に優れたカメラによる3次元モデリングについても検討を行った。植物のような、繰り返しパターンが多く形状が細かく変化する対象の場合にも適用可能な手法を開発するために、パラメタ空間でのセンサの位置姿勢の整合性を評価することで精度を向上させる手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

植物のような、繰り返しパターンが多く形状も細かく変化するような対象において、類似した3次元的な形状や2次元画像特徴がある場合にも高精度にセンサの位置姿勢が推定できる手法を実現するために、本研究では、パラメタ空間での整合性に着目し、複数の仮説からカメラの位置姿勢を推定して投票に基づき頑健に推定する手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to establish a method for modeling the 3D shape of plants. 3D shape measurement was performed using an active 3D sensor that can obtain the 3D shape of the target with high accuracy and without contact, and 3D modeling with a portable camera was also investigated.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：3次元モデリング 3次元スキャナ 3次元形状推定 カメラ位置姿勢推定

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

植物の成長をモデル化することは、農作物の収量予測など様々な分野で重要である。植物の形状を3次的に捉え、同時に生物学的指標を得ることができれば、形状を考慮した精密な成長モデルを構築することに役立つほか、日照などを含めた詳細な植物の成長シミュレーションなど、様々な分野に活用が期待できることから、近年、植物の3次元モデリング手法が提案されるようになってきた。

2. 研究の目的

本申請では、植物の3次元形状モデリング手法を確立することを目的とする。本申請で用いるセンサは、能動的3次元センサ（以下、3D スキャナと呼ぶ）に加え、可搬性に優れたカメラも用いる。

3D スキャナやカメラを用いて対象の3D 形状を得るためには、対象となる植物の周囲に3D スキャナやカメラを配置してデータを得て全周3次元形状モデルを構築することが行われる。このとき、それぞれのセンサから得られるデータはセンサの位置・姿勢に依存する相対的な座標系で表現されたデータであるため、それぞれのセンサで得られたデータの中で対象の同じ場所を計測したデータを対応づけることでセンサの位置・姿勢を推定することが不可欠となる。特に植物を対象とする場合には、類似した3次元形状がある場合にも高精度に位置・姿勢が推定できる手法が必要となる。本研究では、センサの位置・姿勢変化を表す剛体変換を精度よく推定するために、パラメタ空間での整合性に着目し、複数の仮説からカメラの位置姿勢を推定して投票に基づき頑健に推定する手法を開発することを目的とする。

また、能動的3次元センサに比べて可搬性に優れたカメラにより得られる画像により3次元モデリングする手法に関して検討を行う。カメラにより得られる画像 Structure from Motion (SfM) と呼ばれる手法では、対象となる物体の複数のカメラ画像から、画像を撮影したカメラの相対的な位置姿勢とカメラで撮影された対象の3次元形状を同時に推定可能である。SfM では、画像間で対象の同じ位置を撮影している場所を対応付けることでカメラの位置姿勢と対象の3次元形状の推定を行う。このとき、誤った対応づけを排除するために、エピポーラ線と呼ばれる対応し得る点の集合である直線を用いるが、エピポーラ線上にある誤対応は本質的に除去することはできない。本研究では、カメラ運動の仮定に基づく誤対応除去のための手法を提案する。植物は繰り返しパターンも多く、形状も細かく変化するため、カメラで得られる2次元画像における特徴も、区別することが難しいような類似したものが多い。そのような場合にも高精度な形状が得られる手法を確立するために、カメラで得られた画像から推定した3次元形状の妥当性を評価することにより誤推定された3次元形状を排除する手法を開発することを目的とする。

さらに、植物を生育している圃場で効率よく画像収集をするためのロボット開発、得られた3次元モデルのわずかな欠損を補間する手法や画像中での植物の重要な特徴を抽出する手法の開発も本研究の目的に含まれる。

3. 研究の方法

(1) センサの位置・姿勢の頑健な推定手法

センサの位置・姿勢の推定は、対象の同一の点を計測している点の対応づけに基づき推定するが、3次元形状が類似した部分が多く含まれる植物では誤った対応づけが完全には排除できない。提案手法では、複数の仮説を整合するかを確認するため、類似した3次元形状を誤って対応づけてしまっている場合であって高精度な推定が可能な手法を提案する。

センサの位置・姿勢は、回転と並進から成る剛体変換として記述することが可能であり、自由度

6である。センサの位置・姿勢は、3D スキャナで得られた対象の計測点の3組の対応により推定できる。本研究では、計測点の3組の対応から推定した6次元のセンサの位置・姿勢の、6次元のパラメタ空間での分布に着目する。対応が正しい場合、すなわち、対象の全く同じ点に対応づけられている場合、計測点の測定誤差が正規分布に従うと仮定すると、推定されたセンサの位置・姿勢の6次元パラメタ空間での分布も正規分布で近似されることが知られているが、植物のような繰り返しパターンが多い対象の場合には誤った対応を排除することが極めて困難である。本手法では、誤った対応が含まれていない場合には、計測点の3組の対応により推定された剛体変換パラメタの分布が正規分布になることに着目し、誤った対応は完全に排除することはできないものの正しい対応の組の数の方が多いことを仮定して、推定された剛体変換のピークの周辺対称な部分の対応のみを抽出して剛体変換を推定し直すことで、頑健な推定を実現する。図1のパラメタ空間で青い点で示されているのが正しい対応から推定された剛体変換パラメタであり、赤い点で示されているのが誤った対応から推定された剛体変換パラメタである。提案手法では、図1の青い点を生成した対応のみを利用し、剛体変換を推定する。これにより、誤った対応を排除すると同時に、正しい対応をできるだけ多く用いて推定することで精度向上が見込まれる。

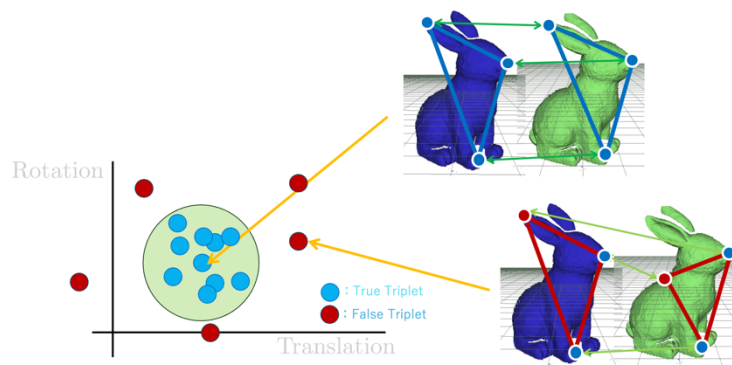


図1 パラメタ空間での分布に基づくセンサの位置・姿勢の頑健な推定

(2) カメラからの3次元形状推定におけるカメラ運動の仮定を利用した頑健性の向上

植物は屋外にあることが多く、また形状が複雑で多くの計測が必要になるため、3D スキャナでの計測が難しい場合が多い。そこでより可搬性が高いカメラによる3次元モデリング手法に関して頑健性を向上させる手法を提案する。

画像で撮影できるのは3次元形状を2次元に投影したものであるが、撮影した複数のカメラ画像を用いて対象の3次元形状とカメラの位置・姿勢を推定する Structure from Motion (SfM) と呼ばれる手法が知られている。このような手法では、複数の画像で対象の同じ部分を撮影している点を対応づけることで3次元形状とカメラ位置・姿勢の推定を行う。3D スキャナを用いた場合と異なり、対象の3次元形状がわからないため、2つの画像の組を考えた場合、カメラの相対位置・姿勢が決まっても、片方の画像のある点に対応する点はエピポーラ線と呼ばれる直線上に限定されるだけで一意には決まらない。このような場合には特に、対象が植物のような繰り返しパターンが多い対象の場合には誤った対応を排除することが極めて困難である。

本研究では、対象までの距離が局所的にほぼ一定になるような撮影を行った場合に、対応を結ぶ直線の傾きによりカメラ運動の投票を行うことで、誤った対応づけを排除する。図2に示すように、画像間で対応付けられた傾きを計算し、傾きをヒストグラムを作成して、最も度数の高い階級のみを正しい対応とし、それ以外の階級を誤った対応として除外することで、3次元形状とカメラ位置の精度を向上させる。

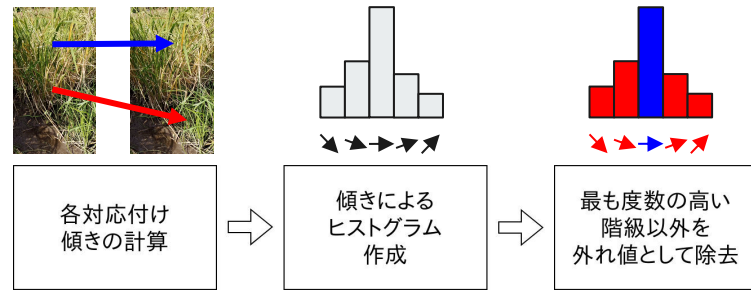


図2 投票に基づく誤った対応の排除

(3) 植物の性質をよく表す特徴の抽出や形状の補間

植物の3次元形状を全体にモデリングするのは隠蔽領域が多く難しい場合が多い。そこで、本研究では、性質をよく表すのに特徴的な成長点と呼ばれる部分の3次元形状を推定し、成長を確認するための手法、部分的な形状を補間する手法についても検討する。

一般に、植物の成長管理では、植物のさまざまな部分をノギスやメジャー等で手動で計測している。本研究では、これをカメラを用いて自動的に計測するための手法を提案する。具体的には、深層学習を用いて植物の特徴となる部分を画像中で抽出し、参照物体との関係を利用して成長を管理する手法である。

また、植物は形状が複雑で隠蔽が起りやすいため、形状の一部が計測できないことがよくある。そのため、本研究では、深層学習により、3次元形状の一部が欠損している場合に補間する手法を提案する。具体的には、敵対的生成ネットワークを用いて植物の形状を学習することで欠損を補間する手法である。

4. 研究成果

(1) センサの位置・姿勢の頑健な推定手法

センサの位置・姿勢の頑健な推定に関して得られた結果を説明する。提案するセンサ位置・姿勢の整合性を評価する手法に加え、4つの従来手法と比較した。図3に実験に用いた物体、図4に推定精度と計算時間を示す。

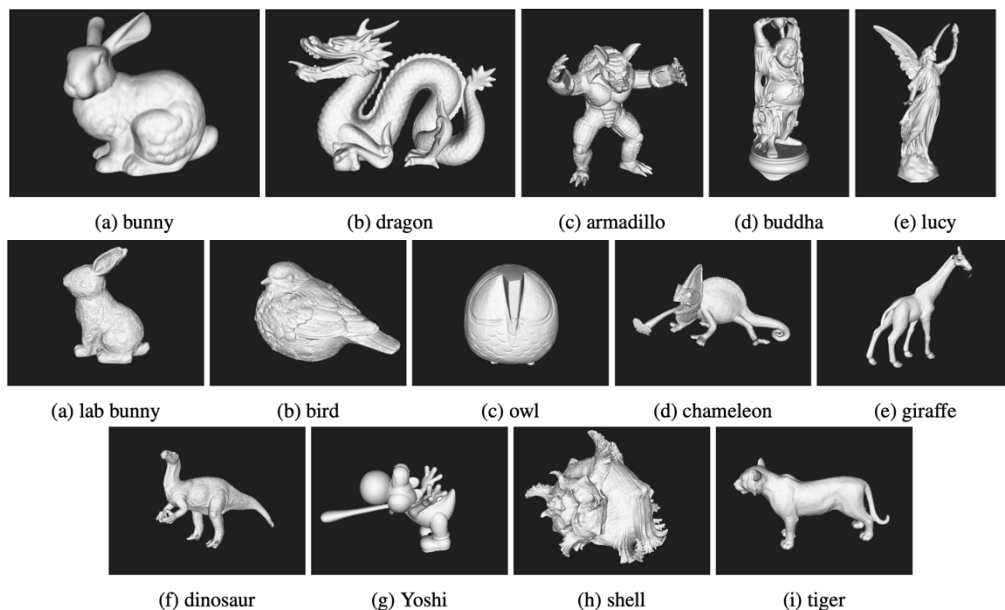


図3 実験に用いた物体

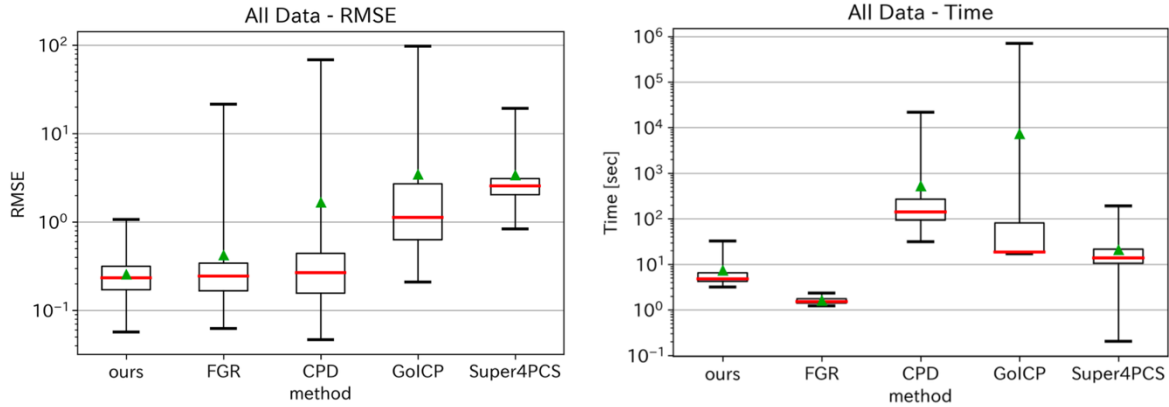


図4 推定誤差と実行時間

図3, 4に示すように, 提案手法 (ours) は比較手法に比べて最も高い推定精度を達成している一方で, 計算時間も比較的少ない. 特に, 類似した形状が多く含まれるデータにおいて, 提案手法の精度が高いことを確認している. これにより, 植物のような対象でも提案手法が適用可能であることが示唆される.

(2) カメラからの3次元形状推定におけるカメラ運動の仮定を利用した頑健性の向上

カメラからの3次元形状推定におけるカメラ運動の仮定を利用した頑健性の向上の結果について説明する. 図5に稲の画像を用いた場合の提案手法の結果と従来手法(カメラ運動の仮定による誤った対応付の排除を行わない場合の結果)を示す. 2つの例を示しており, それぞれ左が従来手法, 右が提案手法による結果である.

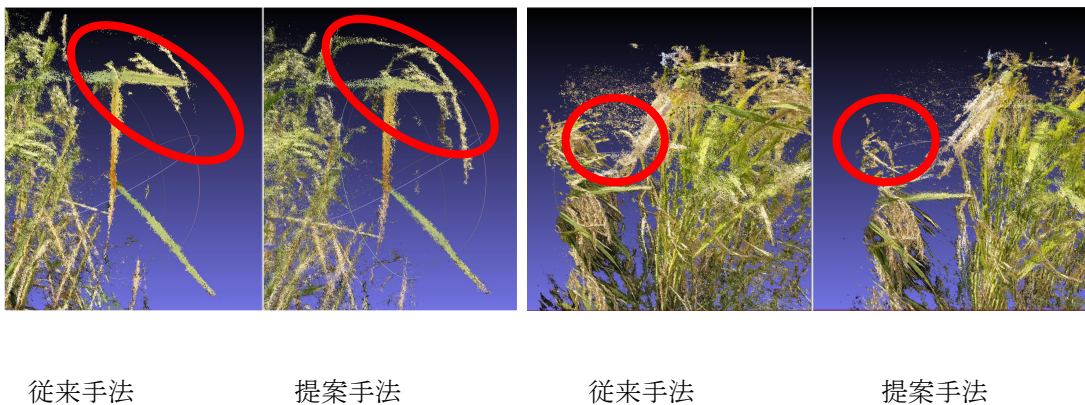


図5 提案手法と従来手法による推定結果の違い

図5の左の例を見ると, 赤く丸で囲んだ部分で提案手法の方が稲の穂がよりよく再現されていることが見て取れる. 図5の右の例では, 赤く囲んだ部分は提案手法ではノイズが減少していることがわかる. これにより, 提案手法ではよりよい3次元形状が得られる可能性が示唆されている.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takaharu Kato, Ikuko Shimizu, Tomas Pajdla,	4. 巻 E105-D
2. 論文標題 "Improving Image Pair Selection for Large Scale Structure from Motion by Introducing Modified Simpson Coefficient"	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transaction on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 1590-1599
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transinf.2021EDP7244	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fukada Keita, Hara Kataru, Cai Jingyong, Teruya Daichi, Shimizu Ikuko, Kuriyama Takatsugu, Koga Katsumi, Sakamoto Kosuke, Nakamura Yoshiyuki, Nakajo Hironori	4. 巻 13
2. 論文標題 An Automatic Tomato Growth Analysis System Using YOLO Transfer Learning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 6880 ~ 6880
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app13126880	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sato Yuka, Shimizu Ikuko	4. 巻 -
2. 論文標題 Shape mixture measure for evaluating 3D point cloud registration	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. GCCE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/GCCE59613.2023.10315455	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshii Masaki, Shimizu Ikuko	4. 巻 -
2. 論文標題 Range image registration based on the consistency of rigid transformation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. IWAIT	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2521596	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 三浦孝理, 清水郁子
2. 発表標題 距離場を用いた敵対的生成ネットワークによる植物の3次元形状補間
3. 学会等名 情報処理学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 諸橋陽王, 小針和也, 横山圭, 清水郁子
2. 発表標題 植物の3次元形状モデリングのためのセンサ条件の検討
3. 学会等名 サマーセミナー2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小針和也, 諸橋陽王, 横山圭, 清水郁子
2. 発表標題 植物の3次元形状モデリングのための敵対的生成モデルによる形状補間
3. 学会等名 サマーセミナー2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤優佳, 清水郁子
2. 発表標題 3次元点群の形状混合度による位置合わせの良さの評価
3. 学会等名 3次元画像コンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齋藤雅史・清水郁子
2. 発表標題 SfMを用いたイネの3次元形状推定におけるカメラ運動に基づく対応付けの外れ値除去
3. 学会等名 SSI12023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三浦孝理, 清水郁子
2. 発表標題 距離場を用いた敵対的生成ネットワークによる植物の3次元形状補間
3. 学会等名 情報処理学会全国大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関