

# アピランスに基づいた植物の3次元復元結果の補完

三木 啓輔<sup>1,a)</sup> 内海 ゆづ子<sup>1,b)</sup> 岩村 雅一<sup>1,c)</sup> 黄瀬 浩一<sup>1,d)</sup>

概要：近年，植物フェノタイピングの自動化を目的とした，植物の3次元復元に関する研究に注目が集まっている．3次元復元の方法として，カメラで撮影した画像を用いる方法が注目されている．しかし，画像を用いて植物を3次元復元した場合，主に葉の部分などに欠落が生じる．そこで，本研究では，アピランスに基づいて植物の3次元復元結果を補完する手法を提案する．提案手法では，復元されなかった箇所の奥行きを画像の色情報をもとに推定し，補完を行う．実験の結果，欠落箇所を補完することができた．

## 1. はじめに

近年，気候変動による農作物の不作や急激な人口増加による食糧不足が問題となっている．このような中，植物の表現型を遺伝子型と環境の両面から研究し，育種開発や栽培技術の高度化などに活かす植物フェノミクスの研究が注目されている [1][2][3]．植物フェノミクスにおいて，植物の表現型を記録し，解析を行うことをフェノタイピングという．フェノタイピングでは，日照時間，植物に与える水の量，気温などをさまざまに変化させた環境で植物を生育し，生育している植物の形状の記録と計測を行って，環境と表現型の関係を明らかにする．環境の各パラメータの変え方や組み合わせは非常に多く，フェノタイピングでは膨大な数の植物を生育する必要がある．植物の形状の計測では，葉幅，葉身，葉面積，背丈や実の大きさなどを計測対象としており，膨大な数の植物の形状を手動で計測するには人手や時間がかかるため，計測の自動化が必要とされている．しかし，計測の自動化は撮影条件や機器が整った室内環境でのみ可能であり [2]，圃場での計測は手動で行われている [3]．そのため，圃場など野外で大量の個体を生育し計測する場合，時間や人手がかかるのが問題となっている．また，植物のフェノタイピングでは一定の期間ごとに植物の形状の記録，計測を行うため，非破壊の測定が必要である [4]．

以上のように，植物のフェノタイピングでは，植物の形状の記録と野外での非破壊の自動計測ができる方法が求め



(a) 復元に用いた画像 (b) 復元結果  
図 1 欠落のある復元結果

られる．そこで，カメラで撮影した画像から植物の3次元復元を行い，3次元データから植物の形状を自動で計測する方法に注目する．画像から3次元復元を行う場合，三角測量により特徴点の3次元情報を計算する必要がある．しかし，画像中の植物の葉の面は輝度の変化が小さいため，特徴点が得られず，葉の部分が復元されないことがある．図 1 は，画像から3次元形状を復元した際に，復元に失敗した一例である．このように葉の部分に欠落のある復元結果からは葉の大きさを正確に計測できず，形状の記録もできていない．

欠落のある復元結果に対して，Quan らは復元に成功した葉を重ね合わせることで補完している [5]．しかし，Quan らの手法では葉のモデルを用いて補完しているため，環境の変化による影響で葉が枯れていたり変色していても復元に反映されない．そのため，Quan らの手法は実際の植物の形状を記録できず，植物フェノミクスの研究分野では不適である．

そこで，本稿では，欠落のある植物の復元結果に対して，画像中の植物のアピランスをもとにして欠落箇所を補完する手法を提案する．画像中の植物のアピランスに基づくことによって，実際の形状や色を反映した補完ができる．以降 2 章で植物の形状の計測を行う研究を紹介し，植物の形状の自動計測に適した方法を考察する．3 章で欠落のあ

<sup>1</sup> 大阪府立大学大学院工学研究科 〒 599-8531 堺市中区学園町 1-1 Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University 1-1, Gakuencho, Naka, Sakai, Osaka 599-8531, Japan

a) kesuke@m.cs.osakafu-u.ac.jp

b) yuzuko@cs.osakafu-u.ac.jp

c) masa@cs.osakafu-u.ac.jp

d) kise@cs.osakafu-u.ac.jp

る植物の復元結果に対し、撮影した画像の色情報から欠落箇所奥行きを推定することによって補完を行う手法を提案する。提案手法の有効性を検証するために実験を行ったので、4章で実験について説明し、5章で本稿についてまとめる。

## 2. 関連研究

本章では植物の形状の計測を行う研究を紹介し、植物の形状の自動計測に適した方法を考察する。まず2.1節で、カメラで撮影またはフラットベッドスキャナなどでスキャンした画像から葉の面積を計測する植物の2次元計測について述べる。次に2.2節で、植物の3次元位置情報から形状の復元や計測を行う、植物の3次元計測について述べる。

### 2.1 植物の2次元計測

Baisongらは撮影した画像から葉の面積を計測する手法を提案した[6]。この手法では、面積が既知の紙片とその上に置いた葉を撮影し、紙片の領域のうち葉が占める割合を求めることで葉の面積を算出する。また、若原らは様々な植物の葉をフラットベッドスキャナでスキャンし、得られた画像から画像解析ソフトを利用して葉の面積を算出した[7]。これらの研究のように、画像から植物の形状を計測する場合、植物を各部位に分割する破壊測定が一般的である。破壊測定では植物の成長過程での形状の計測ができないためフェノタイピングには不適である。

### 2.2 植物の3次元計測

植物を3次元データとして扱うことによって、ユーザーは任意の方向から植物の形状を閲覧することができるため、フェノタイピングに必要な形状の記録が容易になる。植物を3次元計測する方法は、センサを直接計測対象に当てて位置情報を取得する接触型の計測、レーザーやカメラを利用する非接触型の計測がある。2.2.1節で接触型の方法で植物を計測する研究について紹介し、2.2.2節で非接触型の方法で植物を計測する研究を紹介する。

#### 2.2.1 接触型

本條らは磁気式のデジタイザを使用して植物の形状を復元した[8]。磁気式デジタイザは空間上の位置の基準点となる磁力線を発生させるソースと座標測定を行うセンサに分かれている。センサはペン状になっており、このペンを復元したい対象のある一点にあて、ソースから発生する低周波磁力線をセンサで感知することにより、センサの3次元座標を取得することができる。また、Sinoquetらは超音波式デジタイザを使用してトウモロコシの葉の形状を得た[9]。超音波式デジタイザは磁気式デジタイザと同様にソースとセンサからなり、対象にペンを当てて計測する。具体的に、ソースから超音波を発生させ、音速が一定であることを利用し、センサの位置に超音波が到達する時間か

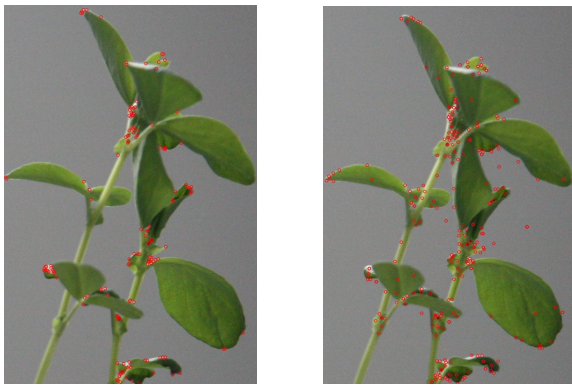
ら3次元座標を取得する。これらのデジタイザを使用する場合、センサを植物に当てた時に対象を動かしてしまうと、正確な3次元座標の取得ができない。また、磁気式デジタイザは周囲の金属による磁場への影響がノイズになり、超音波式デジタイザでは風や気温が音速に影響を与え、ノイズになる。そのため、デジタイザによる植物の計測作業は専門的な知識と計測技術が必要である。また、Rakocevicらは磁気式デジタイザを用いてクローバーの形状の計測を行ったが、 $100[\text{cm}^2]$ のクローバーの群生からすべてのクローバーの3次元形状を取得するのに最高で7時間かかっている[10]。接触型の計測では計測デバイスを手動で対象に当てる必要があり、計測にも時間がかかるため、フェノタイピングの人手、時間がかかるといった問題を解決できない。

#### 2.2.2 非接触型

非接触型の植物の3次元計測には、受動計測と能動計測がある。能動型計測は対象に光などのエネルギーを照射し、反射して返ってくるエネルギーを解析することで3次元形状を計測する方法で、対象に能動的な働きかけが必要な方法である。受動型計測は対象が通常状態で反射している光のみを用いる3次元形状の計測方法で、対象からの光を受動的に得る方法である。次に能動計測と受動計測による植物の計測について紹介する。

能動計測には光速を利用した計測と三角測量による計測がある。光速を利用するTime of Flight (ToF)では、光の速度が一定であることを利用し、対象にレーザーを照射して返ってくるまでの時間から対象までの距離を測ることで3次元位置情報を得る。三角測量に基づいた能動計測である光切断法では、計測対象に光を投影し、投光器、カメラ、光の切断面の位置関係から3次元位置情報を計算する。また、光のパターンを計測対象に投影し、複数の位置からカメラで撮影しパターンに関してマッチングを行う能動ステレオ法がある。このように、能動計測では光を物体に投影するため、太陽など他の光源の影響を受けやすい。ToFによる計測を行うToFカメラやレーザーレンジファインダーを用いて植物を3次元計測する研究[11][12][13]や能動ステレオ法によって植物の3次元計測を行う研究[14]では、他の光源による影響が少ない環境を設定している。このようにレーザーを用いた計測の場合、太陽光による影響で正確な計測ができない可能性があるため、野外でのフェノタイピングに利用するのは難しい。

受動計測において、対象が反射する光を取得する機材として一般的であるのがカメラである。カメラを用いた3次元計測では、複数の視点から計測対象を撮影し、得られた画像から対応点を求めて三角測量の原理で3次元位置情報を計算する。カメラで撮影した画像から3次元計測する場合、カメラを固定して計測対象を撮影する方法と自由に移動して計測対象を撮影する方法がある。固定カメラで撮影



(a) Harris のコーナー検出 (b) SIFT 特徴

図 2 植物から特徴点を抽出した例

した画像から 3 次元計測する場合、複数の固定カメラに写るように計測対象を置く必要がある。この手法ではカメラを設置する場所を確保する必要があり、野外でそのような場所が確保できない場合は利用できない。また、固定カメラでは撮影できる範囲に限られるため、圃場の広さだけ機材を用意する必要があり、費用がかかる。さらに雨天など天候による影響を受けないように機材を雨風に強いものにする必要がある。そのため、野外でのフェノタイピングには不適である。カメラを自由に移動させて撮影した画像から 3 次元計測を行う方法として、計測対象と一緒にキャリブレーションパターンを写す方法がある。この場合、計測対象とキャリブレーションパターンが一緒に写る任意の位置から撮影することができる。Baumberg らはキャリブレーションパターンが印刷されたマットの上に復元対象を置いて撮影し、3 次元復元する手法を提案した [15]。また、Paprocki らは Baumberg らの提案した復元方法を利用して綿花を 3 次元復元し、葉幅や葉身を自動で計測する手法を提案した [16]。Paprocki らは鉢で育成している植物を計測したため、キャリブレーションパターンが印刷されたマットの上に植物を移動させることができた。しかし、野外で生育している植物は動かせない場合が多いため、マットの使用は不向きである。このようなキャリブレーションパターンを用いずに任意の位置から撮影した画像から 3 次元計測を行う方法として、Structure from Motion(SfM)[17]がある。SfM では画像から得られる特徴点を利用してカメラ位置と姿勢を推定し、計測対象の 3 次元復元を行う。

受動計測のメリットとデメリットをまとめる。受動計測ではカメラで複数の視点から撮影した画像を利用するため、植物を破壊する必要がない。また、デジタイザでの計測と違ってユーザーに特別な技術を必要としない。SfM を利用すればカメラを固定したり計測対象を移動させる必要がなく、野外での利用も可能である。以上のような利点から本研究では SfM を用いて植物の 3 次元計測を行う。



(a) セグメンテーション画像 (b) 距離画像

図 3 欠落箇所の検出で作成する画像

### 3. 提案手法

本研究では Structure from Motion(SfM) を用いて植物の形状を 3 次元復元し、得られた 3 次元データから形状の計測を行う。しかし、SfM によって植物の形状を復元すると図 1(b) のように欠落のある復元結果になる。そこで、本稿では図 1(b) のように欠落のある植物の復元結果を補完する手法を提案する。提案手法では、まず欠落箇所の検出を行い、続いて、検出した箇所に対して、補完を行う。以降、3.1 節で Structure from Motion の問題点について詳しく述べた後、3.2 節で欠落箇所の検出、3.3 節で検出した箇所の補完について詳しく説明する。

#### 3.1 Structure from Motion の問題点

SfM では計測対象を任意の位置から撮影した画像から特徴点を抽出し、画像間に対応が得られた特徴点の空間の 3 次元位置情報を計算する。特徴点は輝度の変化が大きい箇所から得られやすい。しかし、画像中の植物の葉の面は輝度の変化が小さいため、特徴点が得られないことがある。SfM で使用することが多い特徴点検出である Harris のコーナー検出 [18] と Scale-invariant feature transform (SIFT)[19] を用いて植物の画像から特徴点を抽出した画像を図 2 に示す。図 2 より、葉の面から特徴点が得られていないことがわかる。このように特徴点が得られない箇所は復元されず、結果、図 1(b) のように欠落のある復元になる。この欠落を補完することが出来れば、フェノタイピングに必要な植物の形状を得られ、3 次元データから自動で形状の計測ができる。

#### 3.2 欠落箇所の検出

復元する対象の 3 次元形状はわからないため、3 次元空間上で情報の欠落箇所を見つけ出すことは困難である。そこで、復元結果を画像に投影し、画像中で欠落箇所を検出する。復元結果を画像に投影した際、復元されなかった箇所は画像には投影されない。ここで、撮影した画像の植物の領域のうち、復元結果が投影されなかった部分が復元に失敗している箇所だと分かる。本節では植物の領域の判断方法と復元結果を画像に投影する方法を説明し、具体的にどのように欠落箇所を検出するか説明する。



植物の領域の判断には、植物を前景として出力したセグメンテーション画像を利用する．図 3(a) に植物をセグメンテーションした例を示す．図 3(a) では、セグメンテーション画像は前景の画素を白として出力した．復元結果を画像に投影するとき、距離画像を作成する．ここで、距離画像とはカメラ中心から被写体までの距離（奥行き）を画素の値に反映させた画像である．3次元復元結果から距離画像を作成した際、3次元空間上に復元で生成された3次元点が無い箇所は、カメラからの距離が存在しないため無限遠方として扱われる．図 3(b) に復元結果を投影した距離画像の例を示す．図 3(b) では、距離画像はカメラから被写体までの距離が近いほど画素の色が白に近く、無限遠方ならば画素の色を黒とした．以上で説明した植物をセグメンテーションした画像と距離画像の各画素を比較し、セグメンテーション結果では前景となっているが距離画像では無限遠方になっている箇所を欠落箇所として検出する．次に、欠落箇所の探索に必要な画像のセグメンテーション、距離画像の作成方法について詳しく述べる．

### 3.2.1 画像のセグメンテーション

欠落箇所の探索に必要な画像である植物を前景としたセグメンテーション画像の作成方法について述べる．植物が緑色であると仮定して、HSV 色空間で緑に近い色相、彩度、明度を設定する．画像中の画素値が設定した HSV の値以内なら、前景として出力する．以上のような方法で画像をセグメンテーションすると、図 3(a) に示すような画像が得られる．

### 3.2.2 距離画像の作成方法

3次元復元で生成された各3次元点は計測物体の位置情報を表す世界座標系の  $(X, Y, Z)$  の値をもっている．世界座標系から画像座標系への変換を行うカメラパラメータ行列を

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{pmatrix} \quad (1)$$

とすると、世界座標系の座標  $(X, Y, Z)$  を画像座標系に投影した時の座標  $(x, y)$  は以下のように求められる．

$$z \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $z$  は奥行きの値を表す．式 (2) で得られた画像座標  $(x, y)$  に奥行きの値を反映させた画素値を設定することで、距離画像を作成する．作成する距離画像は8ビットグレースケール画像とし、カメラから被写体までの距離が近いほど画素の色が白に近く、無限遠方ならば画素の色を黒とする．奥行き  $z$  を反映させた画素値は、画素値を  $I(x, y)$  とし、奥行きの最大値  $z_{max}$  と最小値  $z_{min}$  とすると、

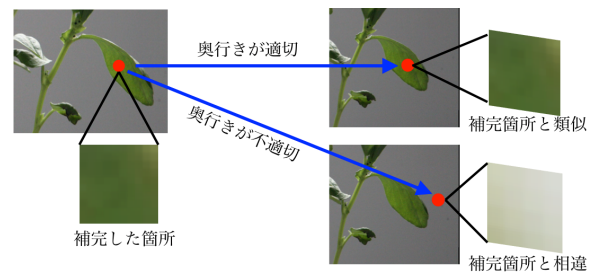


図 4 任意の奥行きを与えた点の他視点画像への投影結果

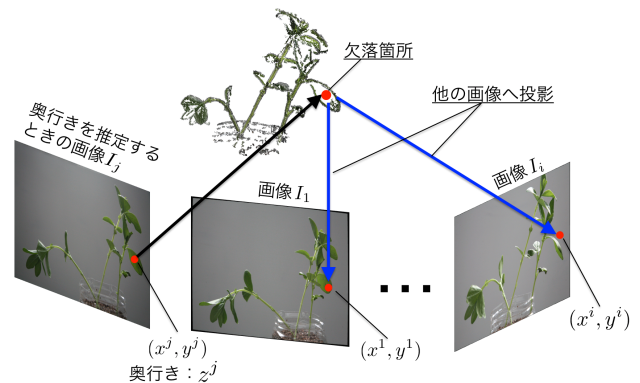


図 5 欠落箇所の補完の概要

$$I(x, y) = \frac{z - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} \times 255 \quad (3)$$

により求められる．以上の方法で距離画像を作成すると、図 3(b) に示すような画像が得られる．

### 3.3 欠落箇所の補完

画像中の植物の葉は輝度の変化が小さいため、欠落箇所に対して新しく特徴点を抽出して特徴点の3次元位置情報を求めて補完することは難しい．そこで、検出した欠落箇所に対して、画像の色情報から奥行きを推定することによって補完を行う．任意の奥行きで補完した点を他視点の画像に投影した時の様子を図 4 に示す．図 4 に示すように、補完した点の奥行きが適切なら他視点の画像中の植物領域に投影され、補完した点と投影先の点の周囲の色情報は類似し、補完した点の奥行きが不適切な場合、背景に投影され、補完した点と投影先の点の周囲の色情報は相違する．そこで、ある奥行きで補完した点を複数の画像に投影した時、周囲の色情報の差分の和を求め、差分の和がもっとも小さい時の奥行きを欠落箇所の最適な奥行きとする．具体的には、欠落箇所の周囲から決められたサイズのパッチを求め、各画素を他の画像に投影した時の画素を求め、それぞれ色情報の差分を計算する．この差分を複数の画像から求め、差分の和を計算する．

図 5 に、欠落箇所の補完の概要を示す．まず、計測対象を撮影した画像  $I_i (i = 1, 2, \dots, S)$  が与えられたとする．これらの画像中から、任意の1枚の画像  $I_j$  を用いて、3.2で説明した手法で欠落箇所を推定する．得られた欠落箇所

のある点の、画像  $I_j$  上での座標を  $(x^j, y^j)$ 、画像  $I_j$  のカメラ中心からの奥行きを  $z^j$  とする。画像  $I_j$  の点  $(x^j, y^j)$  の周囲  $n \times n$ [pixel] を複数の画像に投影した時の画素値の差分を求め、差分の和が最小となる奥行き  $z^j$  を推定する。画像  $I_j$  のカメラパラメータ行列を

$$P^j = \begin{pmatrix} p_{11}^j & p_{12}^j & p_{13}^j & p_{14}^j \\ p_{21}^j & p_{22}^j & p_{23}^j & p_{24}^j \\ p_{31}^j & p_{32}^j & p_{33}^j & p_{34}^j \end{pmatrix} \quad (4)$$

とし、画像  $I_i$  のカメラパラメータ行列を  $P^i$  とすると、点  $(x^j, y^j)$  の周囲の点  $(x_s^j, y_t^j)$  ( $1 \leq s \leq n, 1 \leq t \leq n$ ) を奥行き  $z^j$  で画像  $I_i$  に投影した時の座標  $(x_s^i, y_t^i)$  は以下の式で求められる。

$$z^i \begin{pmatrix} x_s^i \\ y_t^i \\ 1 \end{pmatrix} = P^i \begin{pmatrix} p_{11}^j & p_{12}^j & p_{13}^j \\ p_{21}^j & p_{22}^j & p_{23}^j \\ p_{31}^j & p_{32}^j & p_{33}^j \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} z^j \times x_s^j - p_{14}^j \\ z^j \times y_t^j - p_{24}^j \\ z^j - p_{34}^j \end{pmatrix} \quad (5)$$

ここで、 $z^i$  は画像  $I_i$  のカメラ中心からの奥行きを表す。画像  $I_j$  の点  $(x^j, y^j)$  の周囲  $n \times n$ [pixel] を奥行き  $z^j$  で画像  $I_i$  に投影したときの画素値の差分  $d_{i,j}(z^j)$  は、

$$d_{i,j}(z^j) = \sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n |I_j(x_s^j, y_t^j) - I_i(x_s^i, y_t^i)| \quad (6)$$

となる。この差分を  $m$  枚の画像に対して計算して合計した値  $D$  は、

$$D(z^j) = \sum_{i=1}^m d_{i,j}(z^j) \quad (7)$$

となる。 $z^j$  の推定値  $\hat{z}^j$  は、

$$\hat{z}^j = \min_{z^j} D(z^j) \quad (8)$$

により求められる。本稿では、式 (8) を焼きなまし法 [20] により求める。焼きなまし法は大域的最適解を求めるアルゴリズムであり、温度パラメータを設定することによって局所解に陥りにくくする。温度は探索を行うごとに冷ましていき、温度が高いうちは解が悪くなる場合でもその解の周囲を探索の対象にし、温度が低くなるにつれて探索範囲は収束する。

## 4. 実験

提案手法の有効性を検証するために植物の復元結果に対して補完を行った。

### 4.1 実験条件

本実験では大阪府立大学の生命環境科学研究科の実験室で育成しているダイズを復元し、補完を行った。ダイズの撮影には Canon の EOS 5D MarkII を使用した。ダイズを机の上に置き、周囲を少し移動しては撮影することを繰り返すことにより、合計 16 枚の画像を撮影した。人が移動しながら撮影したため、カメラから復元対象までの距離は一定ではない。撮影した画像の一例を図 6 に示す。カメラ位置と 3 次元復元結果を真上から見た時の位置関係を図 7 に示す。これらの画像のサイズは  $1664 \times 2496$ [pixel] であった。SfM を実行するソフトとして Bundler[21] を用いた。また、特徴点の対応を増加させるために PMVS2[22] を利用した。図 6 に示す画像を入力として Bundler と PMVS2 で 3 次元復元した結果、図 8 に示すような復元結果が得られた。得られた復元結果に対して提案した手法を用いて補完を行った。セグメンテーション画像を作成する際、画像を HSV 色空間で読み込み、色相 H の値は  $30 \leq H \leq 80$ 、彩度 S の値は  $40 \leq S \leq 100$ 、明度 V の値は  $40 \leq V \leq 100$  の範囲内であれば前景とした。セグメンテーション画像は前景を白、背景を黒として出力した。検出した欠落箇所の補完では、パッチのサイズは  $5 \times 5$ [pixel] とし、6 枚の異なる視点の画像に投影した時の画素の差分の和を計算した。補完に用いた画像のカメラ位置を図 7 に示す。焼きなまし法において、最適な奥行きを推定可能なパラメータを求め求めた。焼きなまし法のパラメータは次のように設定した。初期温度を 200 とし、0.995 を乗算することによって冷ましていき、温度が 1 を下回った時点での最適解を解とした。また、奥行きの値は 0.0001 ずつ変化させた。



図 6 復元に用いた画像例

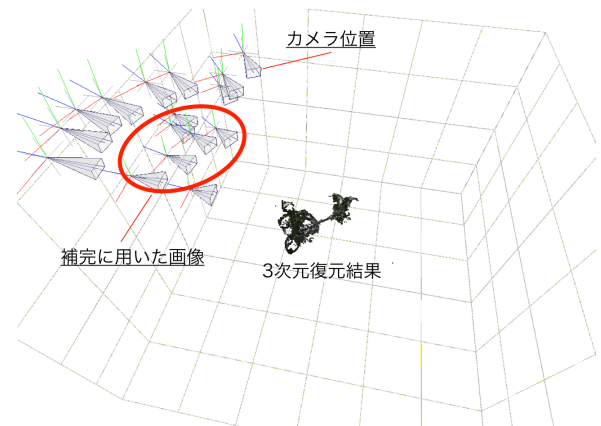


図 7 撮影した画像のカメラ位置と植物の 3 次元復元結果の位置関係

返すことにより、合計 16 枚の画像を撮影した。人が移動しながら撮影したため、カメラから復元対象までの距離は一定ではない。撮影した画像の一例を図 6 に示す。カメラ位置と 3 次元復元結果を真上から見た時の位置関係を図 7 に示す。これらの画像のサイズは  $1664 \times 2496$ [pixel] であった。SfM を実行するソフトとして Bundler[21] を用いた。また、特徴点の対応を増加させるために PMVS2[22] を利用した。図 6 に示す画像を入力として Bundler と PMVS2 で 3 次元復元した結果、図 8 に示すような復元結果が得られた。得られた復元結果に対して提案した手法を用いて補完を行った。セグメンテーション画像を作成する際、画像を HSV 色空間で読み込み、色相 H の値は  $30 \leq H \leq 80$ 、彩度 S の値は  $40 \leq S \leq 100$ 、明度 V の値は  $40 \leq V \leq 100$  の範囲内であれば前景とした。セグメンテーション画像は前景を白、背景を黒として出力した。検出した欠落箇所の補完では、パッチのサイズは  $5 \times 5$ [pixel] とし、6 枚の異なる視点の画像に投影した時の画素の差分の和を計算した。補完に用いた画像のカメラ位置を図 7 に示す。焼きなまし法において、最適な奥行きを推定可能なパラメータを求め求めた。焼きなまし法のパラメータは次のように設定した。初期温度を 200 とし、0.995 を乗算することによって冷ましていき、温度が 1 を下回った時点での最適解を解とした。また、奥行きの値は 0.0001 ずつ変化させた。



図 8 PMVS2 で植物を 3 次元復元した結果



図 9 提案手法を用いて補完した結果

#### 4.2 結果と考察

補完した結果を図 9 に、視点を変えて見た補完結果を図 10 に示す．図 9 から欠落箇所が補完できていることがわかる．しかし、図 10 のように奥行きが不適切な箇所が生じていた．この理由を検討するため、適切な奥行きが推定できた時と、奥行き推定に失敗した時について、画素値の差分の和  $D(z^j)$  と奥行き  $z^j$  のグラフを図 11、図 12 にそれぞれ示す．図 11 のように奥行きが推定可能な場合、最適解が明確で、焼きなまし法で解の推定が可能であると考えられる．つまり、奥行き推定に用いる画像の枚数が十分であることがいえる．一方で、図 12 のように最適な奥行きが推定できない場合は、局所解が多く存在し、焼きなまし法での奥行き推定に失敗した可能性がある．図 12 に示す欠落箇所について、焼きなまし法で得た解を補完に用いなかった視点の画像に投影した結果を図 13 に示す．図 13(b) に示すように、 $D(z^j)$  の計算に用いた領域は背景に投影された．図 7 に示すように、奥行き推定に用いた画像の視点は隣接しており、偏った視点のアピランスに基づいて補完していた．奥行き推定に用いなかった画像から、推定した奥行きが適切でないことが容易に推定できるため、今回、奥行き推定に失敗している箇所は、推定に用いる画像の視点が偏っていたことが原因であると考えられる．奥行き推定に用いる画像を複数の視点の画像にすることで、推定精度を向上させることができると思われる．

また、実験に用いた画像は、撮影時、光の反射を考慮していなかった．本実験で用いた画像の中で、同じ葉を写しているが光の反射によって色情報が異なる例を図 14 に示す．このような場合、奥行きが適切で植物の領域に投影されても画素値の差分が大きくなり、適切な奥行きが補完の値として選ばれない場合がある．

#### 5. おわりに

本稿では、植物を 3 次元復元した際に生じる欠落を画像上でのアピランスに基づいて補完する方法を提案した．補完した結果、欠落箇所を補完することができた．しかし、用いた画像が偏った視点から撮影した画像であったため、

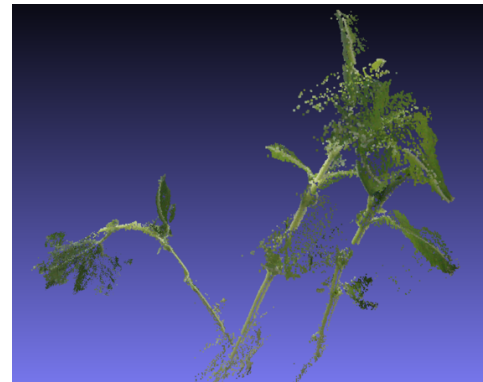


図 10 視点を変えて見た補完結果

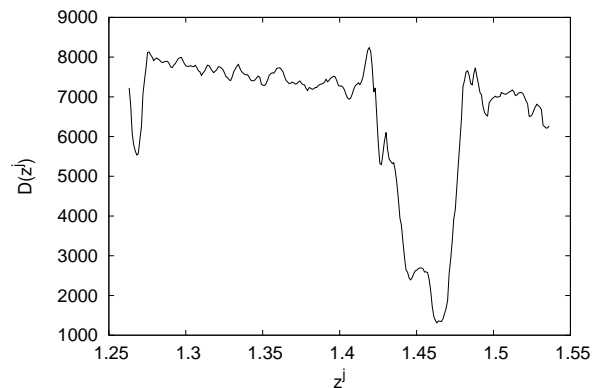


図 11 適切な奥行きが推定できた時の差分の和  $D(z^j)$  の推移例

奥行き推定に失敗した点が生じた．

今後は補完で用いる画像の視点を増やすことによって、複数の視点のアピランスに基づいて奥行きを推定する．

#### 参考文献

- [1] 大政謙次：植物機能リモートセンシング-植物診断，フェノミクス研究への応用，*Eco-Engineering*, Vol. 26, No. 2, pp. 51–61 (2014).
- [2] 郭 威：Studies on high-throughput phenotyping by use of time series crop images taken under natural environments, 博士論文，東京大学 (2014).



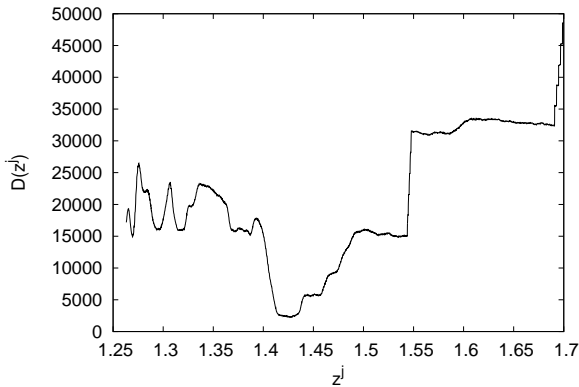
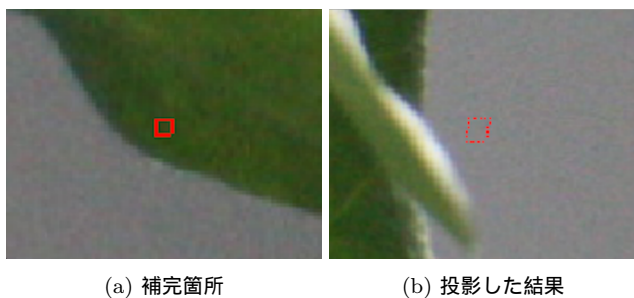


図 12 奥行き推定に失敗した時の差分の和  $D(z^j)$  の推移例



(a) 補完箇所 (b) 投影した結果

図 13 補完失敗部分を他視点へ投影した様子。(a)の赤い矩形は、奥行き推定に用いたパッチを表す。



(a) ある視点の画像 (b) 別視点の画像

図 14 視点の違いによる葉の見え方の違い

[3] 亀岡孝治：農業の現在と未来を考える中での IT・センシングの有効利用，情報処理学会研究報告. コンピュータビジョンとイメージメディア研究会，Vol. 2014, No. 11, pp. 1–14 (2014).

[4] Santos, T. T. and de Oliveira, A. A.: Image-based 3D digitizing for plant architecture analysis and phenotyping, *Proceedings of Workshop on Industry Applications (WGARI) in SIBGRAPI*, Vol. 2012, pp. 21–28 (2012).

[5] Quan, L., Tan, P., Zeng, G., Yuan, L., Wang, J. and Kang, S. B.: Image-based Plant Modeling, *ACM Trans. on Graphics (TOG)*, Vol. 25, No. 3, pp. 599–604 (2006).

[6] Chen, B., Fu, Z., Pan, Y., Wang, J. and Zeng, Z.: Single leaf area measurement using digital camera image, *Computer and Computing Technologies in Agriculture IV*, pp. 525–530 (2011).

[7] 若原浩義，加賀田恒，内藤実加，齊藤大樹，桂 圭佑，中崎鉄也：イネ葉身のデジタル画像を用いた初期生育の診断法の確立，*京大農場報告*，No. 20, pp. 39–41 (2011).

[8] 本條 毅，庄野浩資，高辻正基：植物形状の測定と可視

化，植物工場学会誌，Vol. 4, No. 2, pp. 151–156 (1993).

[9] Sinoquet, H., Moullia, B. and Bonhomme, R.: Estimating the three-dimensional geometry of a maize crop as an input of radiation models: comparison between three-dimensional digitizing and plant profiles, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 55, No. 3, pp. 233–249 (1991).

[10] Rakocevic, M., Sinoquet, H., Christophe, A. and Varlet-Grancher, C.: Assessing the Geometric Structure of a White Clover (*trifolium repens* L.) Canopy using 3-D Digitising, *Annals of Botany*, Vol. 86, No. 3, pp. 519–526 (2000).

[11] Song, Y., Glasbey, C. A., van der Heijden, G. W., Polder, G. and Dieleman, J. A.: Combining stereo and Time-of-Flight images with application to automatic plant phenotyping, *Image Analysis*, pp. 467–478 (2011).

[12] Alenyà, G., Dellen, B. and Torras, C.: 3D modelling of leaves from color and ToF data for robotized plant measuring, *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3408–3414 (2011).

[13] Kaminuma, E., Heida, N., Tsumoto, Y., Yamamoto, N., Goto, N., Okamoto, N., Konagaya, A., Matsui, M. and Toyoda, T.: Automatic quantification of morphological traits via three-dimensional measurement of Arabidopsis, *The Plant Journal*, Vol. 38, No. 2, pp. 358–365 (2004).

[14] Nguyen, T. T., Slaughter, D. C., Max, N., Maloof, J. N. and Sinha, N.: Structured light-based 3D reconstruction system for plants, *Sensors*, Vol. 15, No. 8, pp. 18587–18612 (2015).

[15] Baumberg, A., Lyons, A. and Taylor, R.: 3D SOM A commercial software solution to 3D scanning, *Graphical Models*, Vol. 67, No. 6, pp. 476–495 (2005).

[16] Paproki, A., Fripp, J., Salvado, O., Sirault, X., Berry, S. and Furbank, R.: Automated 3D segmentation and analysis of cotton plants, *Proceedings of 2011 International Conference on Digital Image Computing Techniques and Applications*, pp. 555–560 (2011).

[17] Fitzgibbon, A. W. and Zisserman, A.: Automatic camera recovery for closed or open image sequences, *In Proceedings of European Conference on Computer Vision*, Springer, pp. 311–326 (1998).

[18] Harris, C. and Stephens, M.: A combined corner and edge detector., *Alvey vision conference*, Vol. 15, Cite-seer, p. 50 (1988).

[19] Lowe, D. G.: Object Recognition from Local Scale-Invariant Features, *In Proceedings of The seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol. 2, pp. 1150–1157 (1999).

[20] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. P. V.: Optimization by Simulated Annealing, *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671–680 (1983).

[21] Agarwal, S., Furukawa, Y., Snavely, N., Simon, I., Curless, B., Seitz, S. M. and Szeliski, R.: Building Rome in a Day, *Communications of the ACM*, Vol. 54, No. 10, pp. 105–112 (2011).

[22] Furukawa, Y. and Ponce, J.: Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 32, No. 8, pp. 1362–1376 (2010).