

# 植物成長解析のための多視点連続撮影システム

長原 稔樹<sup>1,a)</sup> 大倉 史生<sup>1,2</sup> 八木 康史<sup>1</sup> 松下 康之<sup>1</sup>

**概要:** 植物の3次元形状推定は、栽培の自動化や育種の評価に重要である。現在、コンピュータビジョンの分野では特定の時間における植物の形状解析手法は数多く考案されている。特に、多視点から撮影した植物の3次元形状を推定する問題は近年注目を集めている。しかし、その応用面での重要性に反して、植物の3次元形状の経時変化を推定・解析する研究はほとんど行われていない。その原因の一つとして、従来の3次元復元手法が利用可能で、かつ経時変化を捉えた撮影環境が構築されておらず、かつデータセットが公開されていないことが考えられる。そこで本稿では、多視点かつ時系列の植物画像データを撮影できるシステムを提案する。このシステムにより、内部で植物が生育するように光源をコントロールした上で、鉛直方向と水平方向を含む7視点から撮影した多視点画像、RGBD画像を10分おきに撮影し続けることが可能となる。エンドウ豆を対象とした実験より、本システムによる各時刻での多視点画像の撮影および、撮影に用いたカメラパラメータの復元が可能であることを確認した。

## 1. はじめに

近年、次世代DNAシーケンサの登場やバイオインフォマティクス技術の発達などにより、ゲノム情報の解析を高速、かつ高精度に行うことが可能になった。その結果、一部の解析に適したモデル植物しか対象にすることができなかったゲノム解析を多様な農業植物種に対しても行えるようになった。また、従来の育種法では解明できなかった複数の染色体上の遺伝子型が関与する複雑な量的形質について研究することもできるようになった。一方、遺伝子型がどのように植物体に現れるかを評価するには、多くの植物種の形態的・生理的な形質の定量評価（植物フェノタイピング）をハイスループットで行える技術が必要である [1], [2], [3]。

現在、コンピュータビジョン (CV) の分野では植物フェノタイピングやコンピュータグラフィックス (CG) のための植物の画像解析手法が数多く考案されており、これらの手法を用いることで植物が持ついくつかの形質を評価することができる。例えば、鉛直方向から撮影した植物の平面画像上の葉の領域の検出 [4] や3Dスキャンや多視点画像を用いた3次元樹木構造のモデリング [5], [6]、葉の病変領域の検出 [7] などがある。一方、枝の分岐や結実の時期などの成長過程で発生する事象に関する形質を評価するためには、これらの時間軸上のある一点だけではなく、経時

的に植物の形質を抽出する必要がある。農業植物種の多くは他の種に比べて成長が早く、成長過程で茎が蛇行しながら成長することも多いため、天候などの自然環境に影響されない屋内でさえ数日で姿が大きく変化する。従って、経時変化の定量評価技術の開発には、植物の動きを十分連続的に撮影できるような時間間隔で撮影されたタイムラプス画像が必要である。現在、植物の研究用に数多くのデータセットが公開されているが、単一視点あるいは少数視点での撮影であるため三次元形状復元に利用することが難しいことや、データが時間的連続性を持たないために成長を捉えることができないなどの要因で、植物の経時変化の定量評価技術の開発には不十分である。

そこで本研究では、植物の成長における経時解析を実現するために、植物を成長させながら時間的かつ空間的に密な画像を撮影できるシステムを開発する。本システムではRGB画像に加えてアクティブステレオ方式で深度画像を撮影できるカメラを採用し、鉛直方向と水平方向を含む多視点から1つの植物を撮影できるようにカメラを複数台配置する。これにより研究対象の植物種や形質に応じた形状解析手法を選択することができる。さらに、設置した全てのカメラで10分おきに撮影することで、多視点かつ時間的連続性のある画像シーケンスを作成できるため、従来データセットでは困難であった三次元形状等の経時変化の定量評価を行うことができる。比較的成長の早いエンドウ豆の一種を対象とした実験より、10分おきの撮影で実験対象が成長する様子を詳細に記録することが可能であること、および三次元復元に用いるためのカメラパラメータ情報の推定が可能であることを確認した。

<sup>1</sup> 大阪大学  
Osaka University

<sup>2</sup> JST さきがけ  
JST PRESTO

<sup>a)</sup> t-nagahara@am.sanken.osaka-u.ac.jp

## 2. 関連研究

### 2.1 植物画像解析

#### 2.1.1 植物と画像認識

植物分野における画像認識の対象は、細胞や器官といったミクロレベル [8] から群落や植生といったマクロレベル [9] まで幅広い。植物単体に限定しても、全体的な外見や構造を対象にした研究だけではなく、葉・枝茎・花・果実・種などの特定の部位のみを対象にした研究 [4], [10], [11], 特定の部位に顕現した病状を対象にした研究 [7] など様々である。

自然環境における植物は群生していることや、植物自体が類似したテクスチャを持つ複数の葉が密集していることから、単視点画像の色情報のみで個体や葉ごとの個体識別を行うことは、花や果実の個体識別をすることよりも一般的に困難とされている [12]。そのため、植物の画像認識に関する研究では、画像の背景から葉のみを切り抜いたデータ [13] や画像のほとんどの領域を1枚の葉が占めるデータ [14] を利用する手法や、3D センサや多視点画像から推定した深度情報や植物特有の幾何学的情報など色情報以外の情報を加える手法 [14], [15] などが考案されている。

#### 2.1.2 植物と3次元形状解析

植物を対象とした3次元形状解析の研究は古くから行われている [5], [16]。特に、多視点から撮影された画像を入力として樹木の3次元形状を推定する研究がCG分野で行われている [6], [17], [18] ほか、半自動的に小型の植物の3次元形状を復元しようという取り組みも行われている [19]。また近年は、植物フェノタイピングを応用の一つとして、不可視領域の復元を行いながら植物の枝の3次元構造を推定する研究が行われている [20] ほか、植物の葉の3次元復元などを応用として、インスタンスセグメンテーションの多視点拡張 [12] が試みられている。

#### 2.1.3 4次元形状解析

従来の3次元解析手法だけでは詳細な解析が困難な特徴に対して、3次元モデルの経時変化を利用して高精度の復元を行う4次元形状解析手法に関する研究は、特に人体形状の復元などを対象として [21] 行われている。また、CGを主応用として、多視点かつ時間的連続性のある植物画像データを用いて、植物の成長過程で発生する枝の分岐や葉の枯死といった事象の検出精度を向上させる研究も行われている [22]。

### 2.2 植物画像撮影システムおよびデータセット

本項では、植物の画像認識や形状解析に関する研究用に開発された植物画像撮影システムや公開されているデータセットについて説明する。さらに、それらのデータセットについて時間的連続性と視点数の観点から図1の4つのグループに分類して議論する。

		視点数	
		単視点・少数視点	多視点
時間的連続性	疎	グループ1 ・ Dense-Leaves [23] ・ Plant Phenotyping Datasets (CVPPP) [24]	グループ2 ・ かずさDNA研究所 [25]
	密	グループ3 ・ KOMATSUNA dataset [26] ・ RIPPS [1]	グループ4 ・ 本撮影システム

図1 植物画像データセット・撮影環境の分類表

#### 2.2.1 グループ1 (少数視点・時間的に疎)

グループ1は、単視点、あるいは少数視点で撮影され、かつ時間的連続性のない植物画像撮影システム、あるいはデータセットである。このグループに属するデータの主な使用例は、物体検知やセグメンテーションによる植物本体や葉・果実などのサイズを計測することや、個数をカウントすることなどが考えられる。物体検知やセグメンテーションには機械学習が用いられることが多いため、データセットも機械学習向けにアノテーションされたデータとセットになっていることが多い。葉が重なり合う自生した木を撮影した画像データの提供とセグメンテーション手法の研究を目的とした Dense-Leaves [23] や、葉のセグメンテーション用の鉛直方向から撮影した複数種類の植物の画像データセットである CVPPP [24] などが代表的である。

#### 2.2.2 グループ2 (多視点・時間的に疎)

グループ2は、時間的連続性は密ではないが植物を多視点から撮影した植物画像データセットである。このグループに属する画像群は、3次元形状解析や植物の3次元モデリングを含むアプリケーションの開発などを目的として撮影される。これまでに、多視点ステレオ (MVS) 向け画像の撮影システム ([25] など) が提案されている。例えば、かずさDNA研究所による半自動3次元モデリングシステム [26] では、複数カメラを回転台に組み込んだステージに植物の鉢を設置し撮影を行う。植物の複数の視点からの撮影を数日おきに行うことが現実的であるが、成長の早い植物種は1日、2日で大きく変化する。本研究の動機である成長過程の解析に用いるCV技術の確立には、より密な時間間隔で撮影されたデータセットが必要となる。

#### 2.2.3 グループ3 (少数視点・時間的に密)

グループ3に属する植物画像データセットは、視点数が少ないが時間的連続性を持つものであり、グループ1と同様に物体検知やセグメンテーションの研究に同様に利用可能である。加えて、物体の動きを追跡するインスタンスラッキングなどが利用可能であり、植物の成長解析に用いることができる。経時的な環境情報の記録と画像撮影が可能で自動撮影プラットフォームの開発は広く行われており [1], [27], [28], 商用化されて多くの研究機関等で活かし

れている\*1。一方、これらの撮影時においては鉛直上方の少数視点 [28] や複数個体の上方視点 [1] を対象とすることが一般的であり、本研究で扱うような3次元復元を含む解析用途においては、水平や斜めなども含む多視点での観測が必要となる。

本研究の貢献：本研究では、植物を内部で成長させながら、時間的に連続性がありかつ多視点から撮影された植物画像群 (図1のグループ4) を取得できるシステムを開発する。取得できたデータを使用することで、植物の3次元復元手法 [20] などに応用し、3次元モデルの経時的変化を利用して精度の高い復元を行うような4次元形状解析への活用が想定される。

### 3. 撮影システム

本研究で構築する撮影システムの目的は、植物の成長時における形状の変化からわかる形質の定量評価技術の開発に利用可能な植物画像を撮影することである。植物の成長には光と水が必要であり、かつ撮影期間は数ヶ月単位の長期間におよぶ。また、本研究においては成長過程における植物の形状解析手法は限定せず、多様な手法に利用可能なデータの獲得を目指す。これらの目的のためには、以下の要件を満たすシステムの開発が必要である：

- 撮影システム内で植物が成長するのに適した気温や光、水が供給できること
- 多視点画像のほか、従来の植物形状解析手法で多く用いられる鉛直上方からの画像が撮影できること
- 全自動で植物の育成と撮影が可能 (水タンクの交換や機器エラー等のメンテナンスを除く)

以下、上記要件を満たす提案システムについて、ハードウェアおよびソフトウェアの観点から詳述する。

#### 3.1 撮影対象の選定

本研究では撮影システムの開発にあたり実環境で複数回動作確認する必要があったことや、成長の早い植物種で経時的変化の十分に少ない画像シーケンスを撮影できれば成長の遅い種でも同様の条件で撮影ができることを示すために、比較的成長の早いスナップエンドウを撮影対象に選んだ。スナップエンドウは種植えから約1週間で発芽し、1ヵ月で15cm程の高さまで成長する (図2)\*2。また、本システムには現時点でシステム内の気温を管理する設備がなく、システム外の気温次第では内温は30°Cに達することもある。気温が高い環境でも成長が可能であることもスナップエンドウを選定した理由である。

本節の以降で説明されるシステム環境はスナップエンドウ

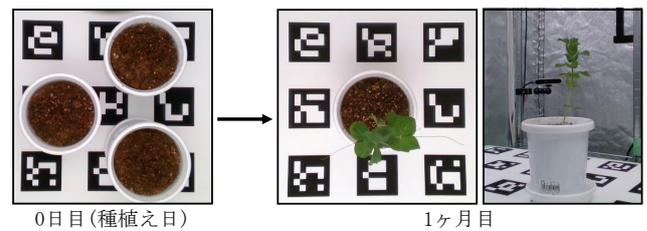


図2 スナップエンドウの成長の様子

ウに適した環境になるように調整されたものであるが、同程度の大きさの多くの植物は、空調の導入や機材の調整などを行うことで、同様の撮影を実現できると考えられる。

#### 3.2 ハードウェア構成

本項では、撮影システムのハードウェア環境について説明する。撮影システムの全体の外観は図3の通りである。図中の番号が示す機器は以下の通りである。

- ① RGBD カメラ (7台)
- ② 撮影用照明
- ③ 栽培用 LED 照明
- ④ 自動水やり器
- ⑤ 撮影対象
- ⑥ PC と Wi-Fi ルータ
- ⑦ 電源操作プラグ

##### 3.2.1 システム基部

温室内にメタルラックを設置し、照明とカメラを固定する。メタルラックの棚板は可動式であるため、撮影対象の背丈に合わせて高さの調整が可能である。本研究の撮影対象であるスナップエンドウの背丈は1m以内であるため、同時に2個体分のデータを取得できるようにメタルラックは2段にする\*3。撮影環境が室内にあるため、自然光が差し込むことがなく一定の明るさの下で撮影でき、テクスチャの色情報を利用した形状解析手法を選択することが可能である。水やりは、ZLULの自動散水装置 (SW-C03-KA) を使用し自動で行う。散水間隔は半日おきに10秒間で、1回の散水で約80mlの水を供給する。

##### 3.2.2 照明

本撮影システムでは、hipargero社の植物育成用のLEDライト (HG1200 LED Grow Light) とOSRAM社の高周波インバータ付き蛍光灯 (DULUX L 55W/954 2G11) の2種類の照明を使用する。LEDライトは植物の光合成に必要な波長帯である400~500nmと600~700nmの光を供給できる。しかし、本撮影システムで採用しているカメラを用いてLEDライト下で撮影した場合、画像中にフリッカが顕著に発生する。そこで、LEDライトは植物の栽培用とし、別に撮影用の照明としてフリッカの発生を抑制する

\*1 <https://www.lemnatec.com/>

\*2 撮影効率をあげるために、発芽までは3個体を同時に育て、その後成長の早い1個体のみを選び以降の撮影対象とした。

\*3 本稿で紹介する実験においては上段のみで撮影を行い、下段では撮影対象が成長途中で枯れるなどの問題が生じた際に撮影結果を取るためのバックアップとして複数の個体を栽培した。

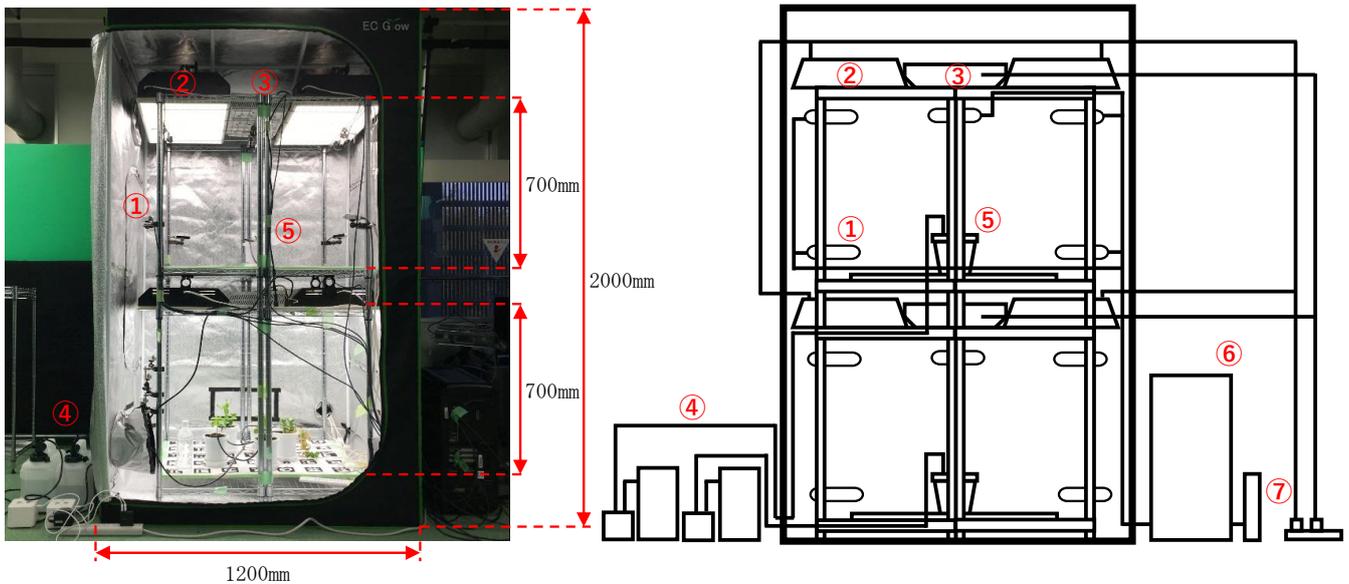


図 3 撮影システムの全体図 (左: 正面写真, 右: 模式図)

表 1 各照明の詳細情報

LED ライト	LED 数 ビーム角 動作周波数	6*cob + 24*3w LED 105° 50-60Hz
高周波インバータ 付き蛍光灯	ワット数 光束 色温度 輝度値 動作周波数	55.00W 4000lm 5400K 3.2cd/cm <sup>2</sup> 数十 kHz

高周波インバータ付きの蛍光灯を設置する。植物に必要な日照時間を確保するため、日中は LED ライトを点灯させ、夜間は消灯させる。一方、昼夜とも撮影時のみ蛍光灯を点灯、LED ライトを消灯し、同一光源下で撮影を行う。各照明の詳細情報を表 1 に示す。

各照明のオン/オフをスケジューリングするために、tp-link 社のスマート Wi-Fi プラグを使用する。スマート Wi-Fi プラグは Wi-Fi を通して遠隔から電源のオン/オフを切り替える装置で、各照明に 1 台ずつ使用し、パソコンから専用 API を用いて照明操作をスケジューリングする。

### 3.2.3 カメラ

本撮影システムでは、RGB センサとアクティブ IR (赤外線) ステレオ方式の深度センサを搭載した intel 社の Realsense Depth Camera D415 (以下、Realsense と呼ぶ) を使用する。アクティブステレオ方式は、カメラに搭載されたプロジェクタを使って光を撮影対象に照射し、その反射光をセンサで観測することで深度を計測するため、植物の葉のような類似したテクスチャが密集した被写体でも深度を取得できる。また、深度計測に 850nm 程度の波長の赤外線を使用しているため、照明から発生する光の波長帯と干渉せず、頑健に深度計測が可能である。

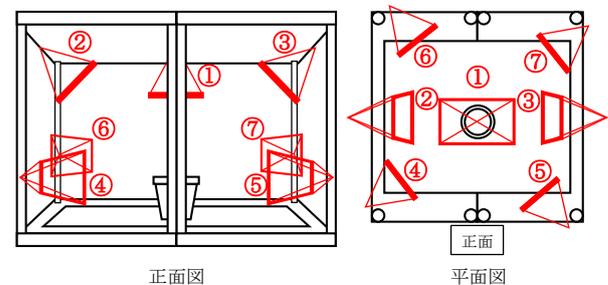


図 4 カメラ配置模式図

本撮影システムでは 7 台の Realsense を図 4 の模式図のように配置する。植物の画像認識の分野において鉛直方向から撮影した植物の平面画像を用いたセグメンテーションや形状解析 [4] が広く試みられているため、これらの目的にも活用可能な画像を取得するために植物の真上の位置にカメラを設置し、さらに植物の高さを推定する補助のために斜め上方向の位置に 2 台の Realsense を設置した。また、本研究で主要な応用とする多視点ステレオを用いた 3 次元モデリングを対象とした場合、様々な方向にカメラを設置することが重要である。多視点ステレオを用いる場合は、対象の表面を十分に覆うだけの視点数が必要なことと、視点数を増やすことによる解析手法の複雑化やコスト面を考慮して、植物を上方・斜め上方から観測する 3 台に加えて、側面方向から対象を捉えられる位置に 4 台設置する。側面に配置された 4 台は、互いが撮影する画像に重複する領域ができるように対象を中心約 90° ずつずらして配置する。

### 3.2.4 マーカ

植物の成長方向に関する形質の評価や異なる個体の実サイズの比較が必要な研究を考慮して、本撮影システムでは複数の ArUco マーカ [29] を印刷したボードを鉢の下に

敷く。マーカはカメラ位置・姿勢の推定の補助として活用できる。特に、植物の成長解析に重要であるが structure from motion (SfM) 等の 3 次元復元手法によって推定できない、実世界における座標系との対応やスケール情報を計測することができる。

### 3.3 ソフトウェアアルゴリズム

本撮影システムのアルゴリズムは、以下の 3 つの機能に分けることができる。これらの機能は自動化されており、水やりに必要な水タンクの交換や機器エラー時のメンテナンス等を除き、自動で植物の育成と撮影が可能である。

- (1) 2 台のスマート Wi-Fi プラグを用いた照明のオンオフの操作する機能（照明制御）
- (2) 7 台の Realsense による撮影する機能（撮影）
- (3) 上記の 2 つの機能を指定した撮影間隔に合わせてスケジューリングする機能（スケジューリング）

#### 3.3.1 照明制御

PC に接続された Wi-Fi ルータを通じ、スマート Wi-Fi プラグに割り当てられたプライベート IP アドレスを参照して照明電源を制御する。プライベート IP アドレスが変更されコマンドの送信に失敗するのを防ぐため、各スマート Wi-Fi プラグには異なるプライベート IP アドレスを固定しておく。本システムにおいては、以下 3 種類の照明パターンを用意した。

**基準照明** 現在時刻が指定した日照時間内の場合、LED ライトを点灯し、蛍光灯を消灯する。時間外の場合は、両方の照明を消灯する。

**撮影照明** LED ライトを消灯し、蛍光灯を点灯する。

**消灯** 両方の照明を消灯する。

#### 3.3.2 撮影

植物を撮影対象にするに上で問題となるのが夜間の撮影である。夜間に照明を植物に当てると成長が遅れ、成熟しない可能性がある [30] ため、夜間の撮影時はできる限り照明が点いている時間を短くする必要がある。また、複数台の Realsense のストリームを同時に開始するとバッファが溢れて接続が切れる可能性があるため、撮影は 1 台ずつ行うことが望ましい。そこで、本研究では蛍光灯の電源制御と撮影タイミングを連携させ、事前に設定した露光量・ホワイトバランスを用いて一台ずつ Realsense による撮影を行う。撮影に使用する高周波インバータ付き蛍光灯は、電源を入れてから点灯するまでに時差が生じ、その長さが一定ではないため、カメラのストリーム開始後に蛍光灯の電源を投入し、取得した画像データの平均輝度値が事前に指定した値以上に達した後に撮影を行い、その後すぐに蛍光灯の電源を切る。これをカメラ台数分繰り返すことで、蛍光灯の点灯時間を短くしながら撮影を行う。

#### 3.3.3 スケジューリング

上記照明制御および撮影機能を用い、以下のような撮影

表 2 実験条件の詳細

撮影期間	2020/03/27 ~ 2020/04/02
撮影間隔	10 分
総撮影数	約 1000 枚
撮影対象	スナップエンドウ
日照時間	午前 7 時～午後 9 時の計 14 時間
温室内温度	約 30°C
カメラ配置	図 4 を参照
RGB 解像度	1280×720
深度解像度	1280×720

システム全体の動作フローを設計した。本研究の実験においては、撮影間隔を 10 分とした。

- (1) 基準照明に設定
- (2) 撮影時間まで待機
- (3) 消灯
- (4) 接続中の Realsense 1 台ずつ以下を実行：
  - (a) 撮影照明に設定
  - (b) 撮影開始後、設定した明るさになるまで待機
  - (c) 消灯・撮影終了
- (5) (1) に戻る

## 4. 実験

開発した撮影システム内で実際の植物を育成・撮影し、得られた撮影結果からシステム環境や実験条件の正当性と撮影システムの有用性を検証する。

### 4.1 実験条件

実験条件を表 2 に示す。撮影対象とカメラ配置については前節で述べた通りで、Realsense の解像度とフレームレートについては撮影時にバッファを溢れさせずに安定して動作できるように定めた。日照時間については、温室内温度が 30°C になることと、日本の夏の平均日長（日の出から日の入りまでの時間）が約 14 時間であることから、午前 7 時から午後 9 時までを日中、それ以外の時間を夜間とした。

### 4.2 撮影結果

本項では、前節で示した条件下で行った撮影システムの撮影結果を示し、そこから以下の項目について検証する。

- (1) 定めた撮影間隔が妥当であること
- (2) 撮影システム内で植物が成長していること
- (3) 撮影した多視点画像からカメラパラメータの復元が可能であること

#### 4.2.1 差分画像

図 5 中の左図は、10 分おきの画像列と連続する 2 枚の画像から作成した差分画像であり、図 5 中の右図は、1 日おきの画像列と連続する 2 枚の画像から作成した差分画像である。図 5 中の差分画像の画素値は、差を見やすくする

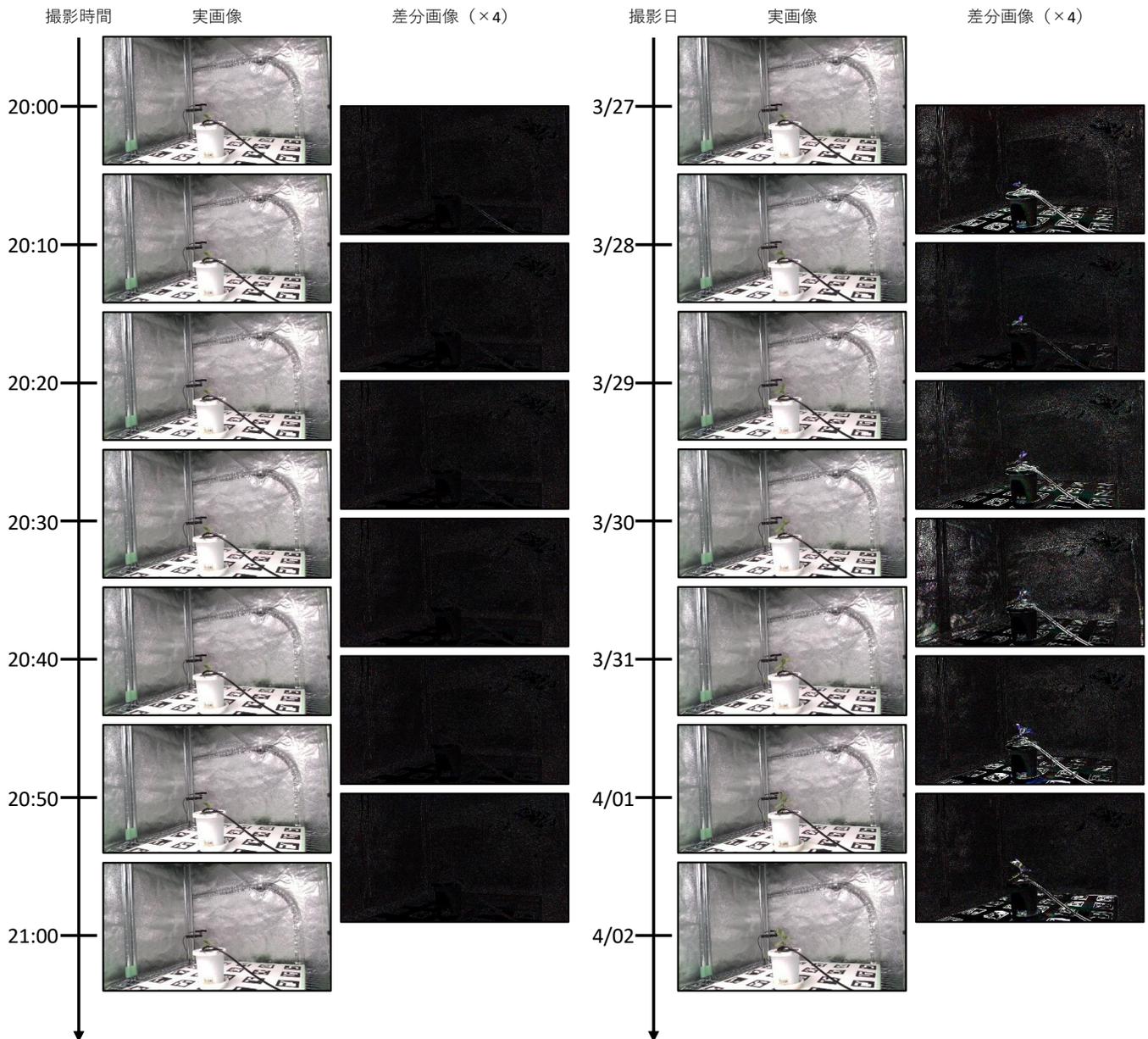


図 5 左：10 分おきの取得画像および差分画像，右：1 日ごとの取得画像（午後 8 時撮影）および差分画像

ために 4 倍にしてある。10 分おきの差分画像（図 5 左）中にほとんど差分が見られないことから，撮影間隔を 10 分にすることで植物のわずかな成長を十分に捉えられることが確認できる。一方，1 日おきの差分画像では撮影対象の植物付近に差が生じていることから，撮影システム内で少しずつ植物が成長している様子がわかる。植物だけではなくマーカにも大きな差分が見られるが，水が供給されることで鉢が重くなり，マーカボードがたわんだことなどが原因であると考えられ，今後システムの設計を改良する必要がある。

10 分おきの画像列からフレームを間引くなどの操作を行い，様々な撮影間隔をシミュレーションすることができるため，実栽培・育種現場に有用な植物の成長解析（オブ

ティカルフローを用いた植物のトラッキング [31], [32] など）への利用が期待できる。

#### 4.2.2 多視点画像とカメラキャリブレーション

図 6 の上図は，撮影システム内の 7 台の Realsense で撮影された多視点画像の例である。これらの多視点画像を用いてカメラキャリブレーションを行うために，COLMAP を使用した。COLMAP はユーザインタフェースを備えた SfM および MVS のパイプラインで，1 つの対象を捉えた多視点画像を入力することでカメラパラメータの復元と 3 次元モデリングを自動で行う。本システムで撮影した 7 視点画像のみを使用して COLMAP でカメラキャリブレーションを行うには，植物と温室内の反射フィルムだけでは特徴点が不足するため，撮影システムの 7 視点画像に 145

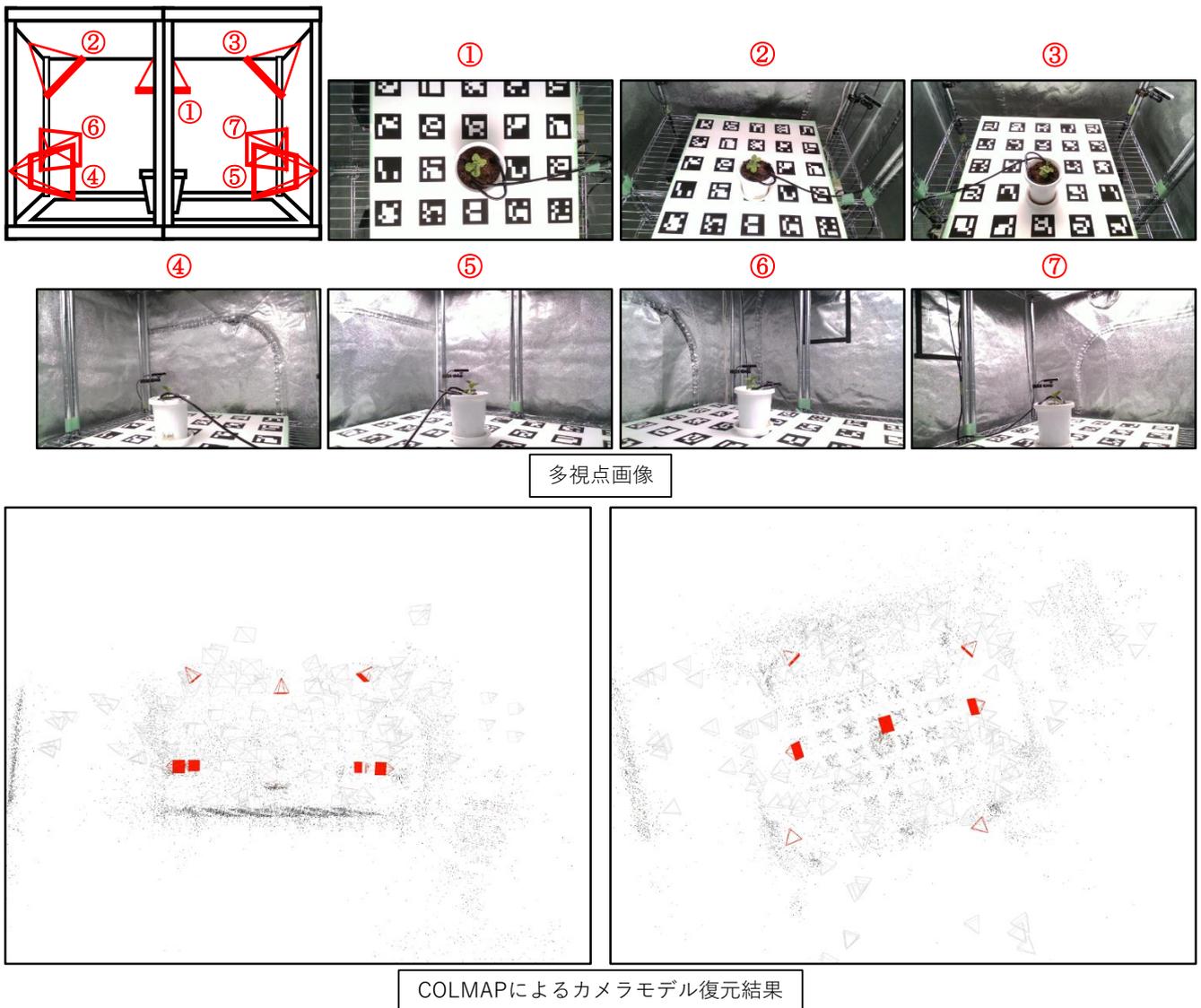


図 6 上：多視点画像，下：復元したカメラ位置姿勢

視点から植物を捉えた画像を加えて入力としカメラキャリブレーションを行った。図 6 の下図は COLMAP でカメラモデルの復元を行った結果である。左図が復元したカメラモデルの側面図で、右図が鉛直方向から見た平面図である。それぞれの図中の赤色のカメラが本撮影システムの 7 台の Realsense のカメラ位置を表す。ここでキャリブレーションされた 7 台のカメラパラメータは、カメラが固定されている限り変化しないため、撮影された多視点画像と合わせて MVS や他の 3 次元復元手法 ([20] など) の入力として活用できる。

## 5. まとめ

本稿では、多視点かつ時間的連続性のある植物画像データを撮影できるシステムを提案した。このシステムにより、システム内部で植物が生育するように光源をコントロールした上で、鉛直方向と水平方向を含む 7 視点から撮影した多視点画像、RGBD 画像を 10 分おきに撮影し続け

ることが可能となる。スナップエンドウを対象とした実験により、本システムによる各時刻での多視点画像の撮影および、撮影に用いたカメラパラメータの復元が可能であることを確認した。本研究で撮影した画像データは、時系列データの活用による 3 次元形状の復元精度の向上などの従来研究の発展や、植物の成長予測など新規の研究への利用が考えられる。また、室温や水量をより緻密にコントロールできるように拡張することで、遺伝形質だけではなく外的要因による成長への影響を研究することも期待できる。

謝辞 本研究の一部は、JST さきがけ JPMJPR1703 の支援を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Fujita, M., Tanabata, T., Urano, K., Kikuchi, S. and Shinozaki, K.: RIPPS: A plant phenotyping system for quantitative evaluation of growth under controlled environmental stress conditions, *Plant and Cell Physiology*, Vol. 59, No. 10, pp. 2030-2038 (2018).

- [2] Shirasawa, K., Hirakawa, H. and Isobe, S.: Analytical workflow of double-digest restriction site-associated DNA sequencing based on empirical and in silico optimization in tomato, *DNA Research*, Vol. 23, No. 2, pp. 145–153 (2016).
- [3] Shirasawa, K.: Genomics research and development of genome-based breeding technologies in vegetable crops, *Breeding Research*, Vol. 18, pp. 124–129 (2016).
- [4] Scharr, H., Minervini, M., French, A. P., Klukas, C., Kramer, D. M., Liu, X., Luengo, I., Pape, J.-M., Polder, G., Vukadinovic, D. et al.: Leaf segmentation in plant phenotyping: A collation study, *Machine Vision and Applications*, Vol. 27, No. 4, pp. 585–606 (2016).
- [5] Xu, H., Gossett, N. and Chen, B.: Knowledge and heuristic-based modeling of laser-scanned trees, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 26, No. 4, pp. 19–es (2007).
- [6] Tan, P., Zeng, G., Wang, J., Kang, S. B. and Quan, L.: Image-based tree modeling, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 26, No. 3, p. 87 (2007).
- [7] Zhang, S., Wu, X., You, Z. and Zhang, L.: Leaf image based cucumber disease recognition using sparse representation classification, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 134, pp. 135–141 (2017).
- [8] Shiotani, S., Fukuda, T., Arai, F., Takeuchi, N., Sasaki, K. and Kinoshita, T.: Cell recognition by image processing: Recognition of dead or living plant cells by neural network, *JSME International Journal. Ser. C, Dynamics, Control, Robotics, Design and Manufacturing*, Vol. 37, No. 1, pp. 202–208 (1994).
- [9] Abeyta, A. M. and Franklin, J.: The accuracy of vegetation stand boundaries derived from image segmentation in a desert environment, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 64, No. 1, pp. 59–66 (1998).
- [10] Nilsback, M.-E. and Zisserman, A.: Automated flower classification over a large number of classes, *Proceedings of Indian Conference on Computer Vision, Graphics & Image Processing*, pp. 722–729 (2008).
- [11] Toda, Y., Okura, F., Ito, J., Okada, S., Kinoshita, T., Tsuji, H. and Saisho, D.: Training instance segmentation neural network with synthetic datasets for crop seed phenotyping, *Communications Biology* (2020).
- [12] Doi, T., Okura, F., Matsushita, Y. and Yagi, Y.: Multi-View Instance Matching for Plant Leaf Modeling, *Proceedings of CVPR 2019 Workshop on Computer Vision Problems in Plant Phenotyping (CVPPP)* (2019).
- [13] Elhariri, E., El-Bendary, N. and Hassanien, A. E.: Plant classification system based on leaf features, *Proceedings of the International Conference on Computer Engineering & Systems (ICCES)*, pp. 271–276 (2014).
- [14] Cerutti, G., Tougne, L., Mille, J., Vacavant, A. and Coquin, D.: Understanding leaves in natural images—a model-based approach for tree species identification, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 117, No. 10, pp. 1482–1501 (2013).
- [15] Xia, C., Wang, L., Chung, B.-K. and Lee, J.-M.: In situ 3D segmentation of individual plant leaves using a RGB-D camera for agricultural automation, *Sensors*, Vol. 15, No. 8, pp. 20463–20479 (2015).
- [16] Shlyakhter, I., Teller, S., Rozenoer, M. and Dorsey, J.: Reconstructing 3D tree models from instrumented photographs, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 21, No. 3, pp. 53–61 (2001).
- [17] Reche-Martinez, A., Martin, I. and Drettakis, G.: Volumetric reconstruction and interactive rendering of trees from photographs, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp. 720–727 (2004).
- [18] Neubert, B., Franken, T. and Deussen, O.: Approximate image-based tree-modeling using particle flows, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 26, No. 3, p. 88 (2007).
- [19] Quan, L., Tan, P., Zeng, G., Yuan, L., Wang, J. and Kang, S. B.: Image-based plant modeling, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 25, No. 3, pp. 599–604 (2006).
- [20] Isokane, T., Okura, F., Ide, A., Matsushita, Y. and Yagi, Y.: Probabilistic plant modeling via multi-view image-to-image translation, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 2906–2915 (2018).
- [21] Zhang, C., Pujades, S., Black, M. J. and Pons-Moll, G.: Detailed, Accurate, Human Shape Estimation From Clothed 3D Scan Sequences, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2017).
- [22] Li, Y., Fan, X., Mitra, N. J., Chamovitz, D., Cohen-Or, D. and Chen, B.: Analyzing growing plants from 4D point cloud data, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 32, No. 6, pp. 1–10 (2013).
- [23] Morris, D.: A pyramid CNN for dense-leaves segmentation, *Proceedings of the Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*, pp. 238–245 (2018).
- [24] Minervini, M., Fischbach, A., Scharr, H. and Tsafaris, S. A.: Finely-grained annotated datasets for image-based plant phenotyping, *Pattern Recognition Letters*, Vol. 81, pp. 80–89 (2016).
- [25] Wu, S., Wen, W., Wang, Y., Fan, J., Wang, C., Gou, W., Guo, X. et al.: MVS-Pheno: A Portable and Low-Cost Phenotyping Platform for Maize Shoots Using Multiview Stereo 3D Reconstruction, *Plant Phenomics*, Vol. 2020, p. 1848437 (2020).
- [26] Tanabata, T., Hayashi, A., Kochi, N. and Isobe, S.: Development of a Semi-Automatic 3D Modeling System for Phenotyping Morphological Traits in Plants, *Proceedings of Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp. 5439–5444 (2018).
- [27] Humplík, J. F., Lazár, D., Husíková, A. and Spíchal, L.: Automated phenotyping of plant shoots using imaging methods for analysis of plant stress responses—a review, *Plant methods*, Vol. 11, No. 1, p. 29 (2015).
- [28] Uchiyama, H., Sakurai, S., Mishima, M., Arita, D., Okayasu, T., Shimada, A. and Taniguchi, R.-i.: An easy-to-setup 3D phenotyping platform for KOMATSUNA dataset, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, pp. 2038–2045 (2017).
- [29] Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J. and Marín-Jiménez, M. J.: Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion, *Pattern Recognition*, Vol. 47, No. 6, pp. 2280–2292 (2014).
- [30] 蓑原善和: 植物の照明影響, 照明学会誌, Vol. 80, No. 10, pp. 741–745 (1996).
- [31] Wakamori, K., Mineno, H. et al.: Optical Flow-Based Analysis of the Relationships between Leaf Wilting and Stem Diameter Variations in Tomato Plants, *Plant Phenomics*, Vol. 2019, p. 9136298 (2019).
- [32] Nagano, S., Moriyuki, S., Wakamori, K., Mineno, H. and Fukuda, H.: Leaf-movement-based growth prediction model using optical flow analysis and machine learning in plant factory, *Frontiers in Plant Science*, Vol. 10, p. 227 (2019).