

植物に対する熱画像と RGB 画像の 3D モデル構築及び

3D モデルレジストレーション手法の提案

3D model reconstruction and registration with thermal and RGB images for Plant

林篤司[†] 高地伸夫^{†*} 七夕高也[‡]、宇賀優作[†]、徳田献一[†]

Atsushi Hayashi Nobuo Kochi Takanari Tanabata Yusaku Uga Kenichi Tokuda

1. はじめに

本稿では、写真測量法を用い、植物に対し熱画像および RGB 画像から 3D モデルを再構築する手法と、熱と RGB の 3D モデルのレジストレーション手法を提案する。植物は温度変化が乏しいため熱画像を利用した SfM/MVS による 3D モデル構築やレジストレーションを行うことが困難である。本論文では画像マッチングのためにランダムパターンとなる熱源を植物周辺に配置し特徴点を人為的に作成することで 3D モデル構築を試みる。また、熱画像と RGB 画像の両方でマーカーとして認識できる物体を配置し、これを利用してレジストレーションを行う。提案手法を用いることで、形質と温度の情報を持つ植物の 3D モデルを構築することができ、新しい知見を得ることが期待できる。

2. 背景

熱画像カメラと RGB(可視)カメラの画像は、例えばビルや構造物のメンテナンス、人抽出、病気診断、植物の植生など多様な分野で診断・計測に使われている^[1]。例えば、ビルや構造物などの RGB 画像と熱画像から、劣化具合や劣化している詳細な位置を知ることによってメンテナンスや維持管理が行える^[2]。植生の場合は、ドローン等で空撮時に熱画像と RGB 画像を同時取得して、生育状況や病害の状況を知りたい、という要望がある^[3]。我々の目的は、熱画像と可視画像を重ね合わせ、植物の苗や群落の計測に適用し、植物の状況を観測し、診断や生育のコントロールをすることである。

これらの観測において、熱画像と RGB 画像を重ね合わせられれば、計測、確認したい場所の位置がわかりその部分の認識、計測が可能となる。しかしながら、熱画像、RGB 画像の位置合わせ、統合が困難という問題がある。すなわち、熱画像カメラと RGB カメラの光学系が異なることやセンサーや分解能等が異なることが原因で、得られる画像の形状や性質が異なり単純に重ね合わせる事ができない。

カメラの内部光学系やセンサーは、通常カメラの内部パラメータとして扱い処理する。カメラ内部パラメータとは、レンズの画面(焦点)距離、レンズの中心位置、レンズの歪み係数、センサーのサイズ等のことである^[4]。これら内部パラメータを求める手法は、物理的手法と計算的手法の二つがある。さらに両画像のレジストレーション(マッピング)を行う場合、幾何学的に精度よく重ね合わせるためには、カメラの外部パラメータ(カメラの 3 次元的位置と姿勢)を求める必要がある。近年では、深層学習等を用

いて、幾何学的手法を用いずにレジストレーションする手法も提案されている。しかしながらそれらは総じて、幾何学的方法と比較すると精度が悪いことや、内部の動作や処理がわからないため扱いが困難という課題がある。

ここでは、主に高精度に位置合わせが可能な幾何学的位置合わせ方法について新たな手法を検討したので報告する。

3. 従来技術

熱画像と可視(RGB)画像のマッピング、位置合わせ手法は、物理的手法と計算的手法の 2 つにわかれ、さらに、計算的手法には 3 つの手法がある。

3.1 物理的手法

カメラの内部パラメータをカメラの設計値を利用するか計測して求め、その値に基づきカメラの補正を行う方法である。しかしながら、カメラの設計値は公表していない場合が多く入手可能性が低い。設計値が入手できた場合でも実際のカメラが設計値通りできているかはわからない。カメラパラメータを計測するには精密機器が必要であり、それら装置を入手しても計測自体が困難であり、手間と時間がかかる、という問題もあり、誰でも容易に行うことができない。

3.2 計算的手法

3.2.1 2D(熱)-2D(RGB) 画像マッピング

2次元の熱画像と RGB 画像間で両画像の対応点をとり画像を変形して合成する手法である。この手法は、対象が平面的な場合はよいが、3次元の場合は、合成するとき高さ補正ができないため合成精度が劣化するか、合成することができない。深層学習により対応点を取らずに変形させてマッピングする手法もある。

3.2.2 2D(熱)-3D(RGB) 画像マッピング

2枚以上の RGB 画像で 3次元再構築された 3次元情報から、2次元の熱画像をマッピングする手法である。この手法は、対象がビルの壁や上空からの撮影で地形などの平面的なものはよいが複雑な形状のものには適さない。

3.2.3 3D(熱)-3D(RGB) 画像マッピング

熱画像による 3D 再構築像と RGB 画像による 3D 再構築像間でレジストレーション、マッピングを行う手法である。この手法は、熱と可視画像が 3次元化されているため、形状と温度分布が立体的にあらゆる方向から俯瞰して見ることが可能である。しかし、熱画像カメラは解像度が低くノイズが多いため、正確な 3次元再構築ができない。それらのことから UAV では GPS や IMU 等の機

[†] 農研機構 National Agriculture and Food Research Organization

[‡] かずさ DNA 研究所 Kazusa DNA Research Institute

器から得られたカメラ位置情報を利用することで、両画像のマッピング、統合が試みられている^{[5],[6]}。

サーモフュージョン^[7] と称した熱画像をマッピングするサービスは、対象の CAD データが必要との記載があるが詳細が記述されていない。

Maseta らは^[8]、概略位置合わせに GPS で対象を計測した点を利用し、詳細位置合わせに ICP 法を利用している。

Truong らは^[9]、我々と同様に画像のみから SfM 法を使い 3D 再構築を行っているが、レジストレーションは、キャリブレーションデータと SfM の出力を利用するグローバルレジストレーションから Sparse ICP^[10]をベースにした詳細レジストレーションを行う方法を報告している。我々の手法はこれらとは異なり、熱基準点や熱パターンを利用する方法である。すなわち、ハードウェアで熱勾配を作り出し、それを熱と RGB で同時に画像化することで両者の 3D 再構築像を作成し、レジストレーションを行う。

4. 提案手法

熱画像と RGB 画像のレジストレーションを行うためには、カメラの内部パラメータの算出と外部パラメータの算出を行い、両者からの 3D 再構築像を取得後に位置合わせ統合(レジストレーション)する必要がある。

今回は実験に、撮影部の RGB カメラと熱画像カメラが一体となり、本体と分離したコンパクトなアビオニクス製 InfReC Thermo FLEX F50 を利用した。

このカメラの外観と仕様を図 1 に示す。熱画像カメラの測定波長は、8~14 μ m、画素数は 240 \times 240 画素で、RGB カメラの画素数は 780 \times 780 画素である。画像のフレームレートは 7.5Hz で、準リアルタイムで画像記録が可能である。

	検出器	2次元非冷却センサ (マイクロボロメータ)
	測定波長	8~14 μ m
	記録画素数	240 \times 240画素
	フレームレート	7.5Hz
	測定温度範囲	-20 $^{\circ}$ C~350 $^{\circ}$ C
	温度分解能	0.05 $^{\circ}$ C at 30 $^{\circ}$ C
	温度精度	$\pm 2^{\circ}$ C or $\pm 2\%$ (指示値)
	可視画像	CMOS 51万画素 (720 \times 720)
	カメラヘッド外形寸法重量	約30mm \times 40mm \times 130mm,約100g
	コントローラ外形寸法重量	約169mm(H) \times 92mm(W) \times 24.5mm(D),約400g

図 1 熱画像/RGB カメラ
左:外観 右:仕様

4.1.1 カメラ内部パラメータ算出

我々は、カメラ内部パラメータを算出するために、熱及び RGB 画像を同時にキャリブレーションする方法とジグを考案した。図 2 に示すように、チェッカーボードをペルチェ素子で作成した高温と低温が隣り合わせの熱ブロック構成とし、その表面は白黒のパターンとすることで、両カメラを同時にキャリブレーションする。図 3 に RGB 画像と熱画像で得られたチェッカーボード画像を示す。RGB 画像の黒い部分は、熱画像では高温部分となり、パターンが反転しているのがわかる。図 4 にキャリブレーション結果を示す。

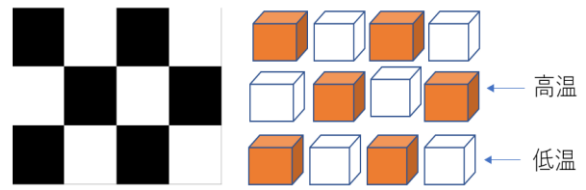
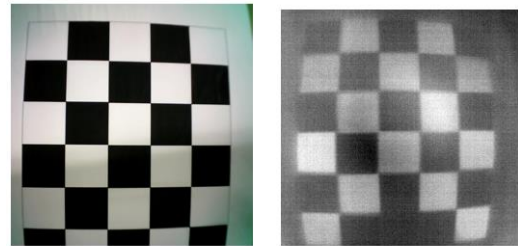


図 2 チェッカーボード



RGB画像 熱画像
図 3 取得画像 左:RGB 画像、右:熱画像

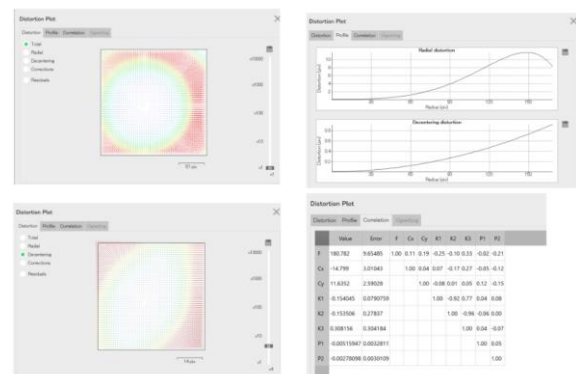


図 4 キャリブレーション結果
左上: レンズ歪み、左下 Decentering
右上: ディストーションカーブ、右下: 相関値

4.2 カメラ外部パラメータ算出(3D 再構築)

熱画像を SfM/MVS 法で三次元再構築する手法を検討した。課題は、熱画像でカメラ外部パラメータ(カメラ位置推定)が行えるかである。カメラ位置推定が行えれば三次元再構築が可能になる。

SfM/MVS 法では、対象に特徴点が豊富にある場合、セルフキャリブレーション付きバンドル調整法により、カメラ内部パラメータと外部パラメータ及び対象物の 3 次元座標が同時に推定可能である^{[4],[11]}。しかしながら、我々が対象とする植物の熱画像は特徴点が不足することが予想されたため、4.1 に示すチェッカーボードでカメラキャリブレーションを事前に行い、内部パラメータを取得してバンドル調整法により外部パラメータと対象の 3 次元座標を同時に求める手法とした。

熱画像で特徴点を付与するためには、ランダムに高低差のある温度特徴点が必要である。この課題に対し、我々は、熱画像用に熱の粒子をランダムにばらまくことによって特

微点を得ることとした。実験では、安価に購入可能なホットカイロの熱粒子を利用した。

熱画像と RGB 画像が同時に特徴点を取得可能とするために、ランダムドットパターンを印刷したシート上に熱粒子をばらまいた。図 5 に実験の様子を示す。また評価用に温度と形状の高低差を付けた熱画像ブロックを配置した。

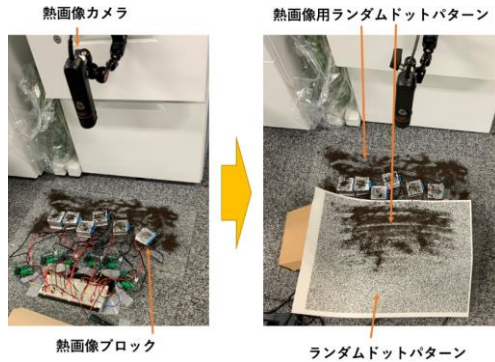


図 5 実験

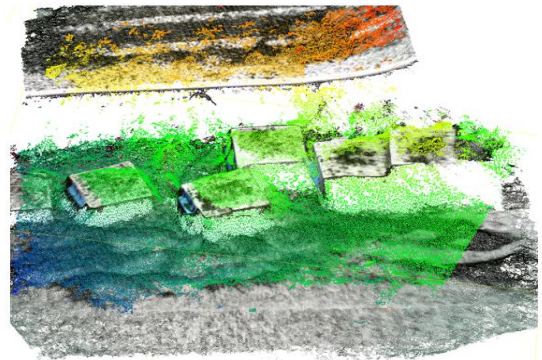


図 7 レジストレーション統合結果

さらに、この結果を元に、我々の目的である植物に対し実験を試みた。図 8 にイチゴの苗を撮影した RGB 画像と熱画像を示す。そして図 9 にそれらを統合した結果を示す。図 10 には、葉の部分拡大した図を示す。位置合わせ統合ができたことが確認された。

4.3 熱画像と RGB 画像による 3D 再構築像の統合

再構築された熱と RGB の 3D 像の統合に対し、写真測量法による統合手法を検討した。Truong ら⁹⁾は、熱及び RGB 画像から再構築された 3D 点群同士で ICP 法によりレジストレーションする方法を提案しているが、この手法だとレジストレーションに時間がかかる、失敗する場合がある、位置合わせ精度が保証されない、等といった問題がある。そこで、我々は精密かつ確実に位置合わせ統合が可能であり、自動化が可能な写真測量法による基準点法を検討した。基準点には、あらかじめ 3 次元座標もしくは、各基準点の距離を入力することで、3 次元像を正確なスケールに変換して三次元再構築を行い統合することが可能である。基準点は熱ブロックにより作成することができる。本実験では、表示される熱画像と RGB 画像上で同一点を 3 点以上計測指示することで統合を行った。

5. 実験結果

図 6 左に本手法で RGB 画像により 3D 再構築した結果を、図右に熱画像により 3D 再構築した結果を示す。評価用に熱ブロックを複数個いれて撮影してある。

図 6 から本手法により 3D 再構築が行えたことがわかる。さらに図 7 に熱と RGB の 3D 再構築像をレジストレーションし統合した結果を示す。

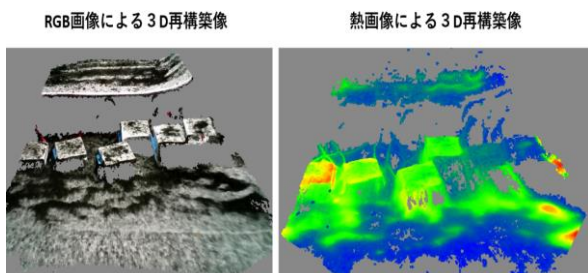


図 6 3D 再構築結果

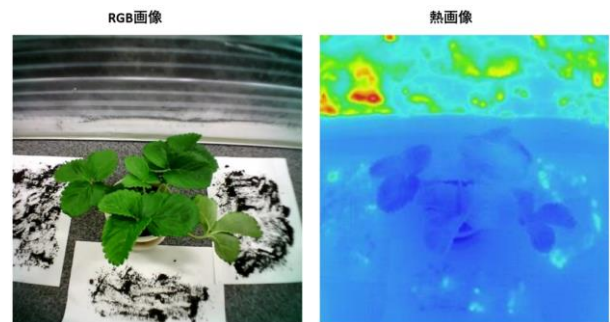


図 8 イチゴ苗撮影画像



図 9 熱画像・RGB 画像統合結果

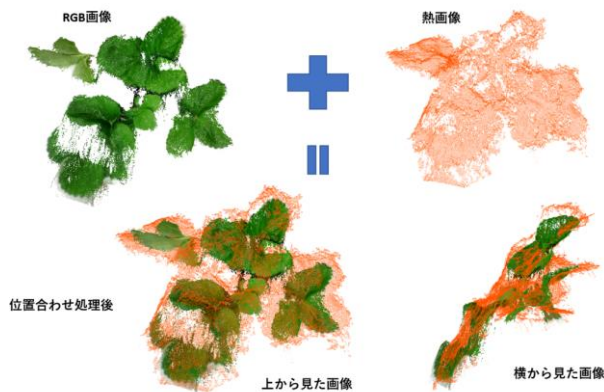


図 10 葉の熱画像・RGB 画像統合結果

- [4] 日本写真測量学会編, “解析写真測量” (1989)
- [5] Wouter H. Maes, Alfredo R. Huete and Kathy Steppe, “Optimizing the Processing of UAV-Based Thermal Imagery”, *Remote Sens.* 2017, 9, 476; doi:10.3390/rs9050476
- [6] A. Sledz, J. Unger, C. Heipke, “Thermal IR imaging: Image quality and orthophoto generation”, *ISPRS Archives, Volume XLII-1*, 2018
- [7] http://www.tctec.co.jp/solution/img_pro/thermo/
- [8] E. Masetta, A. Fusiello, F. Crosilla, R. Toldob and D. Zorzetto, “Photogrammetric 3D building reconstruction from thermal images”, *ISPRS Annals, Volume IV-2/W3*, 2017
- [9] Trong Phuc Truong¹, Masahiro Yamaguchi¹, Shohei Mori¹, Vincent Nozick², Hideo Saito, “Registration of RGB and thermal point clouds generated by structure from motion”, 2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)
- [10] S. Bouaziz, A. Tagliasacchi, and M. Pauly. Sparse iterative closest point. In *Computer graphics forum*, volume 32, pages 113–123. Wiley Online Library, 2013
- [11] Nobuo Kochi, Atsushi Hayashi, Yota Shinohara, Takamari Tanabata, Kunihiko Kodama and Sachiko Isobe, *Breeding Science* 72: 75–84 (2022), doi: 10.1270/jsbbs.21068

6. おわりに

我々は、熱画像ブロックにより温度の高低差を付けたチェックボードを考案し、熱画像カメラと RGB カメラの内部キャリブレーションを同時に行った。そして、熱画像用に熱粒子を利用したランダムパターンを考案することで、カメラの外部位置推定ならびに対象物の 3 次元座標を同時に推定可能とした。

本手法によれば、熱の 3 次元再構築像を作成できることから、温度分布を 3 次的にあらゆる角度から俯瞰することが可能となり、植物を対象とした場合、植物の水分の状態や各部位の温度状況を観察、計測することが可能となる。これにより育種による干ばつに強い種の検討や、病害等の診断、さらには植物工場等の制御や監視に利用できることが期待される。また本手法は、植物に限らず他の対象物にも応用可能と考えられる。

今後は、熱 3 次元再構築像やその作成方法に対する詳細な確認や自動化のためのジグ検討、作成を行う。そしてこの技術を人工気象器等への導入を図り、計測の自動化を図り、植物の播種から成長までを記録し、干ばつに強い種の検討等を行う。

謝辞

本研究はムーンショット型農林水産研究事業「サイバーフィジカルシステムを利用した作物強韌化による食料リスクゼロの実現」課題 2: デジタル作物デザインの助成を受けたものである。

参考文献

- [1] M. Vollmer, M. Klaus-Peter, et al. “*Infrared thermal imaging: fundamentals*”, research and applications. JohnWiley & Sons, 2010
- [2] 川上幸一, 小西真治, 藤原秀明, 久保昌史, 黒須英明, 赤城寛一, “赤外線熱計測による地下鉄覆工コンクリートの浮き検出方法の検討とその応用”, *土木学会論文集 F1(トンネル工学)*, Vol74, No.1, 25-39(2018)
- [3] Sugiura, R., Tsuda, S., Tamiya, S., Itoh, A., Nishiwaki, K., Murakami, N., et al. (2016). Field phenotyping system for the assessment of potato late blight resistance using RGB imagery from an unmanned aerial vehicle. *Biosystems Engineering* 148, 1-10. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.04.010>.