

高解像度マルチスペクトル画像による水稻の生育状況の分析

Analysis of Paddy Rice Growth Using High-resolution Multispectral Image

国内の水稻栽培では生産性を向上するため水田の大区画化が進められている。しかし、収穫量や品質にばらつきが発生するため、その原因である生育ムラの低減が課題となっている。その解決には、圃場内の詳細な生育状況のマップが必要となる。本研究では、このマップを作成するため、ドローンで撮影した地上解像度 5cm 程度の高解像度のマルチスペクトル画像から、圃場内の撮影地点ごとに水稻の植生指数を算出し、それを圃場全体に補間することで圃場全体の植生指数を推定するマッピング手法を考案した。北海道士別市で 2016 年の 7 月と 8 月に撮影された水田のマルチスペクトル画像に本手法を適用し、撮影角度による見かけ上のムラの発生を回避しつつ、植生指数による生育マップを作成できることを確認した。

飯塚 新司	Iizuka Shinji
宗形 聡	Munakata Satoshi
齋藤 邦夫	Saito Kunio
妹尾 裕之	Seo Hiroyuki
三枝 昌弘	Saegusa Atsuhiko
高田 哲哉	Takada Tetsuya

1. はじめに

大区画化された水田では、整備前の元の区画ごとに土壌成分に違いがあったり、土地の高低差により水はけに違いがあったりする。そのため、圃場内の稲が均一に育たずに生育ムラが発生することがある。生育が早まった稲や遅れた稲では、収穫した米に被害粒や未熟粒が多く含まれ、品質が低くなる。これにより、圃場全体で米の収穫量と品質が低下し、生産者の収入減少につながっている。このため、水田の大区画化では生育ムラの低減が課題となっている。この課題に対応するための農業管理手法として、精密農業がある¹⁾。精密農業ではリモートセンシングなどを利用して圃場内の農作物の詳細な生育状況を把握し、生育マップを作成する。生育マップをもとに圃場内の場所ごとに施肥量を設計し、可変施肥機を使用して施肥を行う。このような一連の管理により圃場内の生育ムラを低減する。

リモートセンシングで取得したマルチスペクトル画像で農作物の生育状況を精度よく定量化するには、植生部分と土壌部分の画像を分離し、植生部分の画像データから生育状況を数値化することが望ましい。水稻の場合、株間や条間は数十 cm 程度のため、植生部分の分離には地上解像度 5cm 程度の高解像度画像が必要となる。

本研究では、北海道士別市の国営農地再編整備事業における ICT 農業推進事業の一環として、既存のマッピング手法の問題点を検討し、それらを解決するマッピング手法を考案した。ドローンで撮影した地上解像度 5cm 程度の高解像度のマルチスペクトル画像から、水稻の生育マップを作成する実証実験を行った。

2. 既存のマッピング手法とその課題

2.1 既存手法

リモートセンシングによる植物の生育状態の測定では NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)²⁾ という植生指数がよく用いられる。NDVI は近赤外線と可視光のバンドを含むマルチスペクトル画像から以下の計算式でピクセルごとに算出される。ここで $\rho_{\text{NIR}}(p)$ と $\rho_{\text{R}}(p)$ はそれぞれピクセル p における近赤外線と可視光赤のバンドの反射率である。

$$\text{NDVI}(p) = \frac{\rho_{\text{NIR}}(p) - \rho_{\text{R}}(p)}{\rho_{\text{NIR}}(p) + \rho_{\text{R}}(p)}$$

リモートセンシングによる生育マッピングでは、NDVI をピクセルごとに算出し、適切な色付けで画像化して生育マップを作成する。国内では衛星リモートセンシングを用いる方法が実用化されている。(株)日立ソリューションズの GeoMation 農業支援アプリケーション³⁾

では、衛星リモートセンシングで得られたマルチスペクトル画像から算出した NDVI を可視化することで、小麦の圃場内の生育ムラや倒伏状況の分析を行うことができる。しかし、衛星リモートセンシングで取得できるマルチスペクトル画像の地上解像度は数メートル程度であり、稲の株と条間の土壌が同じピクセルに混在する。そのため、生育ムラが株の粗密によるものか、個々の稲の生育状態の違いによるものか、区別できない⁴⁾。近接リモートセンシングでは地上解像度 5cm 程度のマルチスペクトル画像が得られるため、植生部分と土壌部分のピクセルを分離できる。そのため、稲の生育状態に基づいた生育ムラの判断や生育マッピングが可能となる。可変量施肥では稲の生育状態を圃場内で均一にすることを目的に施肥量を設計するため、精密農業には近接リモートセンシングがより適しているといえる。

ドローンによる近接リモートセンシングを用いる生育マッピング⁵⁾では、まず SfM (Structure from Motion) という技術で複数の撮影画像からカメラの撮影位置を推定して、対象圃場の三次元モデルを生成する。次に三次元モデルをもとに撮影画像を合成し、それを平面に射影する。これにより対象圃場全体のオルソモザイク画像を作成する。最後にオルソモザイク画像の各ピクセルに対して NDVI を算出して生育マッピングを作成する。国外ではこの技術を用いたソフトウェアやサービスが、麦、トウモロコシ、ワイン用ブドウなど様々な農作物の生育マッピングに用いられている。

2.2 既存手法の課題

本研究では、ドローンによる近接リモートセンシングで取得した地上解像度 5cm 程度のマルチスペクトル画像を用いて、オルソモザイク画像を合成して NDVI を算出する既存手法による生育マッピングを検証した。これにより明らかになった既存手法の課題を以下に述べる。作成した生育マップを図 1 に示す。分析対象としたのは、図中に示す圃場 1 と圃場 2 である (4.1 節参照)。

既存手法による生育マップの一部を拡大したものを図 2 に示す。植生部分と土壌部分が数ピクセル間隔で混在しており、図 2 左の撮影地点付近よりも、図 2 右の撮影地点から離れた場所の方が、黄緑色の植生部分がより多くなっている。生育マップを縮小すると、この違いは図 1 に見られるような撮影地点を中心とした斑点状のムラとなって見える。

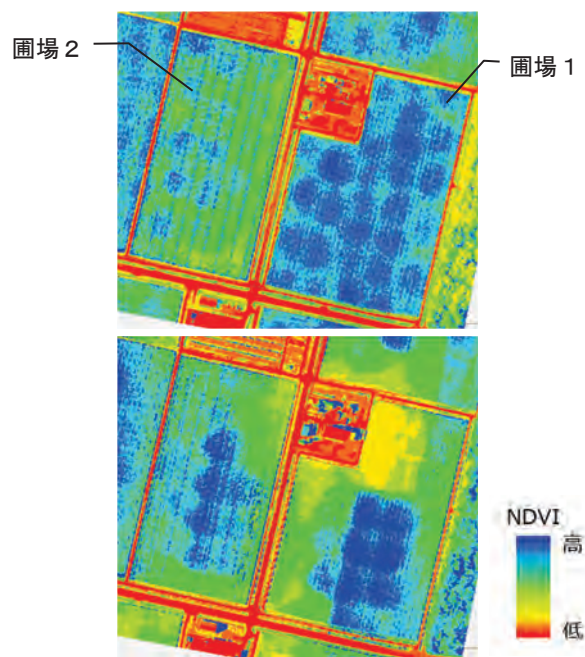


図1 既存手法による生育マップ
(上：7月26日，下：8月24日)

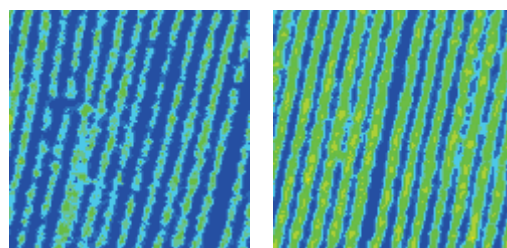


図2 既存手法による生育マップの一部
(左：撮影地点付近，右：撮影地点から離れた場所)

図 3 に示すように、空撮した写真では撮影角度により条間の土壌の写り方に違いがある。そのため、撮影地点の近くと撮影地点から離れた場所とでは、植生部分と土壌部分の見かけ上の割合が変化し、撮影地点から離れるほど植生部分の割合が大きくなって見える。

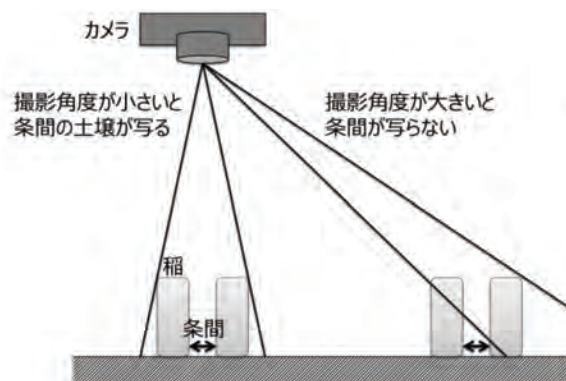


図3 撮影角度による条間の写り方の違い

植生部分の割合は稲の生育状況と関係があり、既存研究では草丈や茎数などの推定に用いられている⁶⁾。しかし、既存手法では図2のような各地点の植生部分の割合の違いが、生育状況の違いによるものか、撮影角度の違いによる見かけ上のものか、を判別することができない。これはオルソモザイク画像を作成するとき、同じ地点を撮影した複数の写真を合成する際に撮影角度の情報が失われるからである。その結果、既存手法では施肥量の設計に必要な稲の生育状況の把握が困難となる。地上解像度 5cm 程度の高解像度で水稻を撮影したため、このような課題が生じたと考える。

3. マッピング手法の提案

2.2 節の課題に対応するため、空撮した写真から撮影地点近くの画像を抽出して植生指数を算出し、圃場全体に補間するマッピング手法を提案する。植生指数を算出する際に植生部分と土壌部分を分離することで、稲の生育状態をより正確に把握できるようにする。提案手法のフローを図4に示す。

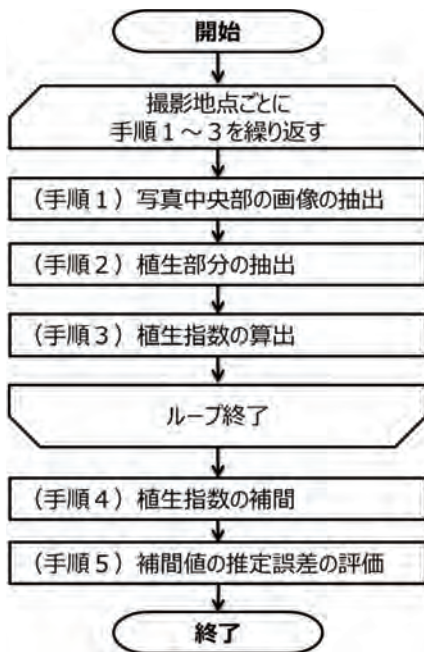


図4 提案手法のフロー

(手順1) 写真中央部の画像を抽出する。抽出画像の形状は、水稻の条の方向に依存しないようにするため、写真の中央を中心点とした円とする。円の半径は、円内のピクセルにおける近赤外線のピクセル値のヒストグラムをもとに決定する。円の半径を小さくしてもヒストグラムの形状が変化しなくなるような半径のうち、十分大き

な半径を選択することで、土壌の写り方が均一な写真中央部の画像を抽出することができる。本研究では、写真の中央を中心とし、写真の縦方向のピクセル数の 1/4 を半径とする円で抽出した。

(手順2) 手順1で抽出した画像から、植生部分と土壌部分のピクセルを分離する。近赤外線バンドのピクセル値のヒストグラムにおいて、植生部分と土壌部分は別々のピークを持つ。そこで、ヒストグラムの高さが極小となるときの近赤外線のピクセル値を閾値として、植生部分と土壌部分の画像を分離する。このような閾値の選定法をモード法⁷⁾という。モード法による閾値の例を図5に示す。閾値を示す縦線の右側が植生部分、左側が土壌部分として分離される。

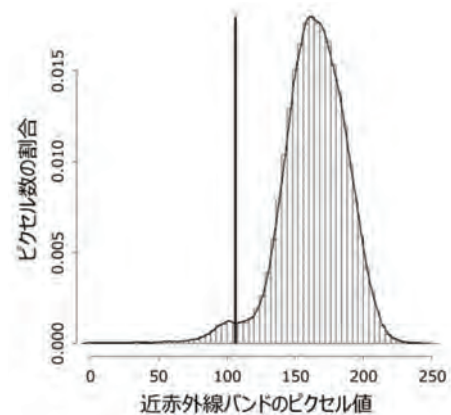


図5 モード法による植生部分と土壌部分の閾値

(手順3) 植生指数 NDVI を以下で算出する。ここで、 N_{veg} は手順2で抽出した植生部分のピクセル数である。

$$NDVI = \frac{1}{N_{veg}} \sum_{p: \text{植生部分のピクセル}} NDVI(p)$$

(手順4) 手順3で算出した撮影地点ごとの NDVI を補間して、圃場内の各地点における NDVI の値を推定することで、圃場全体の生育マップを作成する。本研究では Akima の補間法⁸⁾を用いた。NDVI の値を推定する地点は、圃場内の 1m 間隔のメッシュ上にある各点とした。

(手順5) 手順4で算出した補間値の推定誤差を評価するため、leave-one-out クロスバリデーションを行う。まず評価用の撮影地点を 1 箇所選び、評価用の撮影地点における NDVI の値と、残りの撮影地点のデータから計算した補間値との差を、その地点の推定誤差とする。これ

を評価用の撮影地点を変えながら繰り返し、推定誤差の分布と、その分散の推定値 $\hat{\sigma}$ を得る（図 6）。

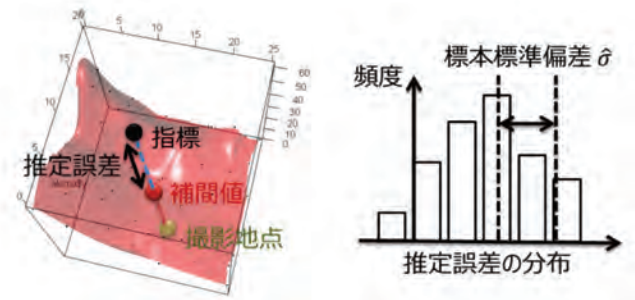


図6 クロスバリデーションによる推定誤差の評価

推定誤差が撮影地点によらず独立に分散 $\hat{\sigma}^2$ の同一の正規分布に従うと仮定し、異なる 2 地点の補間値 X, Y に対して $|X - Y| > 1.96\sqrt{2}\hat{\sigma}$ が成り立つとき、この 2 地点の生育状況に違いがあると判断する。

4. 提案手法の評価

4.1 対象圃場とドローンによる空撮

撮影対象とした圃場は北海道士別市上士別町の水田約 24ha である。このうち分析対象としたのは、図 1 に示す、育苗した苗を定植した水田 3.8ha（圃場 1）と、直接播種した直播の水田 3.4ha（圃場 2）である。いずれも圃場整備により大区画化された水田で、圃場 1 では 21a 前後の 18 区画が 1 区画に整備されていた。

使用したドローンは固定翼型の senseFly eBee RTK、使用したカメラは近赤外線と可視光赤のバンドを含むマルチスペクトルカメラ Canon S110 NIR である。画素数

は 4,048×3,048 ピクセル、撮影時の焦点距離は 35mm フィルム換算で 24mm であり、広角で撮影した。飛行高度は約 130m、地上解像度は約 4.6cm である。

撮影日は 2016 年 7 月 26 日と 8 月 24 日、撮影時刻は午後 4 時である。写真は JPEG 形式で RGB の 3 バンドとなっており、R と G にはそれぞれ可視光の赤と緑、B には近赤外線の画像が撮影される。オルソモザイク画像の作成には SfM ソフトウェア Pix4Dmapper Pro (Version 2.1.52) を使用した。

4.2 提案手法による生育マップ

士別市のドローン撮影画像に提案手法を適用した結果を示す。手順 4 の補間により推定された生育マップ上の各点における NDVI の統計量を表 1 に記す。最大値と最小値の差が $1.96\sqrt{2}\hat{\sigma}$ より大きければ、圃場内に生育ムラがあったと判定する。圃場 1 では、NDVI について 7 月 26 日と 8 月 24 日ともに生育ムラが認められた。特に NDVI の差が大きかった 8 月 24 日の生育マップをもとに施肥量を設計することで、登熟期の生育ムラを低減し、収穫量や品質を向上できる可能性があると考えられる。圃場 2 については、生育ムラは認められなかった。

提案手法による生育マップを図 7 に示す。図 1 の既存手法による生育マップと比較して、撮影角度の違いによって生じたと見られる斑点状のムラはない。また、既存手法では図 2 のように土壌部分と植生部分が混在しているが、提案手法では手順 2 により土壌部分を除いた植生部分のみから算出した NDVI のマップとなっている。

表1 生育マップにおける植生指数 (NDVI) の統計量 (太字: 差 $> 1.96\sqrt{2}\hat{\sigma}$)

	圃場	圃場 1		圃場 2	
	撮影日 撮影地点数	7 月 26 日 19	8 月 24 日 22	7 月 26 日 15	8 月 24 日 16
植生指数 (NDVI)	最大	0.463	0.375	0.441	0.333
	最小	0.408	0.162	0.318	0.205
	差	0.055	0.213	0.123	0.128
	$1.96\sqrt{2}\hat{\sigma}$	0.049	0.200	0.139	0.128

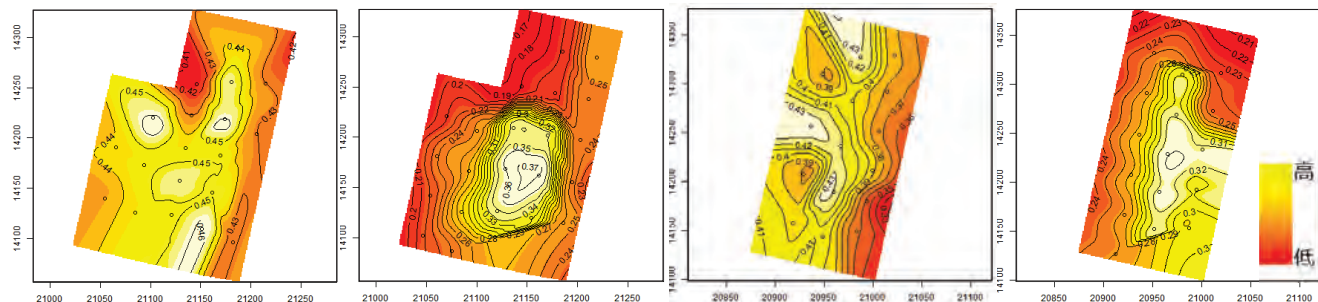


図7 提案手法による生育マップ (左から圃場 1 の 7 月 26 日と 8 月 24 日、圃場 2 の 7 月 26 日と 8 月 24 日の生育マップ)

5. おわりに

本研究では、ドローンで撮影した地上解像度 5cm 程度の高解像度のマルチスペクトル画像から水稻の生育マップを作成する検証を行った。既存手法の場合、撮影角度の違いにより土壌部分の写りに違いがあり、生育状況の把握が困難になるという課題があることが分かった。その課題を解決するため、撮影地点ごとの NDVI を圃場全体に補間する手法を考案した。提案手法により、撮影角度の違いによる見かけ上のムラの発生を回避しつつ、植生部分のみの NDVI で生育マップを作成できることを確認した。提案手法による生育マップが実際の生育状況をどの程度正確に反映しているのか、推定精度の検証が今後の課題である。

国内の農業では、担い手の減少と高齢化に伴い、農地の集約化や生産性の向上を目的とした圃場の大区画化が進んでいる。その中で、高解像度リモートセンシングによる生育マップと可変施肥を組み合わせた精密農業へのニーズが今後増大していくと考える。これまでも(株)日立ソリューションズ東日本では、GeoMation 農業支援アプリケーションを用いた衛星リモートセンシングによる生育マップの可視化を、生育ムラの分析ソリューションとして提供してきた。今後は、本研究の成果である高解像度リモートセンシングによる生育マップ作成技術を活用し、GeoMation の適用領域を精密農業向けソリューションへと拡大することを検討している。ソリューション化に向け、提案手法を実際の生産現場に適用して、生育ムラの低減や生産性・品質の向上が実現できることを検証することが必要である。このような PoC 活動を通して精密農業向けソリューションを確立し、農業分野での事業拡大に貢献していく。

参考文献

- 1) 澁澤：精密農業，朝倉書店，2006 年
- 2) H. G. Jones, 他：植生のリモートセンシング，森北出版，2013 年
- 3) 株式会社日立ソリューションズ：GeoMation 農業支援アプリケーション
http://www.hitachi-solutions.co.jp/geomation_farm/ (2017 年 8 月閲覧)
- 4) 瀬下，他：UAV リモセンの農業への活用研究，写真測量とリモートセンシング，Vol.55, No.1, pp.38-41 (2017.3)
- 5) 濱，他：小型 UAV と SfM-MVS を使用した近接画像からの水稻生育モニタリング，水文・水資源学会誌，Vol.29, No.1, pp.44-54 (2016.4)
- 6) 石井，他：マルチスペクトルイメージングセンサを用いた生育診断システムの構築（第 1 報）画像処理法の確立及び水稻センシング，農業機械学会誌，Vol.68, No.2, pp.33-41 (2006.3)
- 7) P. K. Sahoo, 他：A survey of thresholding techniques, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol.41, Issue 2, pp.233-260 (1988.2)
- 8) H. Akima: Algorithm 761: Scattered-data surface fitting that has the accuracy of a cubic polynomial, ACM Transactions on Mathematical Software, Vol.22, Issue 3, pp.362-371 (1996.9)



飯塚 新司 2008 年入社
ビジネスインキュベーション部
統計, 数理モデル, 機械学習を用いた
データ分析技術の研究開発
shinji.iizuka.zt@hitachi-solutions.c
om



宗形 聡 2003 年入社
ビジネスインキュベーション部
数理モデルや機械学習を用いた意思
決定支援技術, データ分析技術の研究
開発
satoshi.munakata.tu@hitachi-soluti
ons.com



齋藤 邦夫 1992 年入社
ビジネスインキュベーション部
自社パッケージ製品・ツールの研究・
開発
kunio.saito.uh@hitachi-solutions.co
m



妹尾 裕之 1992 年入社
北海道ソリューション部
JA, NOSAI, 自治体などへの圃場管
理地図システムなどのソリューション
提供
hiroyuki.seo.ev@hitachi-solutions.c
om



三枝 昌弘 2008 年入社
北海道ソリューション部
JA, NOSAI, 自治体などへの圃場管
理地図システムなどのソリューション
提供
atsuhiro.saegusa.ra@hitachi-solutio
ns.com



高田 哲哉 1986 年入社
北海道ソリューション営業部
JA, NOSAI, 自治体などへの圃場管
理地図システムなどのソリューション
提供
tetsuya.takada.yw@hitachi-solution
s.com