

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

濱 侃¹⁾ 早崎 有香²⁾ 望月 篤³⁾
鶴岡 康夫³⁾ 田中 圭⁴⁾ 近藤 昭彦⁵⁾

¹⁾ 千葉大学 理学研究科
(〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33)

²⁾ 千葉大学 理学部 (現在 株式会社 メイテツコム)
(〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33)

³⁾ 千葉県農林総合研究センター
(〒266-0006 千葉県千葉市大膳野町 808)

⁴⁾ 一般財団法人 日本地図センター
(〒153-8522 東京都目黒区青葉台 4-9-6)

⁵⁾ 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター
(〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33)

ラジコン電動マルチコプターは、カメラやセンサーを搭載し、小型UAVとして近接リモートセンシングにおけるプラットフォームとして利用可能で、環境研究や実利用に関するさまざまな応用が考えられるようになった。近接リモートセンシングの課題の中で、農作物の生産管理は重要な課題の1つである。これまで日本の基幹作物である米においては、広域リモートセンシング（衛星、航空機）を活用し、生育量、収量、食味判定などの推定、予測が行われているが、雲量による観測確実性の低下、運用コストが課題である。そこで本研究では、水稻の生育モニタリングについて小型UAV、SfM-MVSの併用による、高い時間および空間分解能の空撮画像の取得に基づく詳細な生育状況モニタリングを試みた。NDVIの観測結果から、栽培条件を変えた区画ごとの生育状況の差が詳細かつ明瞭に観測され、追肥量の調整などの生育管理の可能性を示すことができた。また、SfM-MVS技術で作成可能な3次元地表面モデルを用いた群落高計測、NDVIを用いた生育量推定および倒伏予測モデルでは、生育状況の実測にUAVを用いた本研究の手法を代用できる可能性が示唆された。

キーワード：小型UAV、近接リモートセンシング、生育管理、SfM-MVS、CSMs

I. はじめに

ラジコン電動マルチコプターは、GPS、ジャイロセンサーなどの姿勢制御技術の向上、小型化・低価格化が進展し、小型UAV (Unmanned Aerial Vehicle) としてカメラやセンサーを搭載することにより、近接リモートセンシングのプラットフォームとして利用できるようになった。環境研究や実利用に関する様々な応用が考えられるが、その可能性を追求するとともに、安全性に配慮した運用が求められているところである。

環境や水資源・水管理に関する問題の解決は地域

性の理解がその前提としてある。地域性が地域の水循環のあり方を決定し、それに適応した手法によってのみ地域における水資源の開発や適切な管理を行うことが可能になる (近藤, 2003)。一方、人の暮らしや生業に直接関わる範囲までダウンスケールすると、その場の特性に応じたパラメータとそれらの計測手法の必要性が高まる。低空から地表面を計測する技術であるUAVをプラットフォームとした近接リモートセンシングは地域に対応できるオンデマンド型リモートセンシングとして重要性が高まっていくと考えられる。

UAVによる近接リモートセンシングが対応可能な課題の中で、農作物のモニタリングは産業セクターにおける重要な課題の一つであるとともに、農業の多面的機能（日本学術会議, 2001）、農業の環境への影響評価（例えば、地表面フラックス、施肥による窒素汚染）などの環境セクターにおける重要な課題でもある。そこで、本研究ではUAVによる近接リモートセンシングの適用対象として農業を取り上げ、その適用のフィージビリティを検討するとともに、その他の計測に対する技術基盤の構築を試みる。

リモートセンシングによる農作物観測は、圃場における計測に比べて広範囲を非破壊かつ短時間で実施することができるため、農業リモートセンシングに関する多くの研究事例が蓄積されてきた。特に日本の基幹作物である水稻においては、収量・収穫適期予測や食味判定（タンパク含有率）の課題に対して、航空機や衛星リモートセンシングを活用した広大な圃場を対象とした観測・予測が行われてきた（例えば、脇山ら, 2003；秋山ら, 2006；井上ら, 2008）。

ランドサットに代表される衛星画像の無償化、空間およびスペクトル分解能の向上を背景に、水田圃場の観測精度・分析手法について多くの検討がなされているが、日本では水稻の生育期間に梅雨があり、光学センサーを用いた衛星リモートセンシングでは撮影時の雲量が大きな制約となり、それに伴う観測の頻度と確実性の低下が課題であった（秋山ら, 2014）。そこで、現在は天候に左右されず観測を行うことのできるマイクロ波を用いたSAR（Synthetic Aperture Radar）によるモニタリング、特に高分解能XバンドSARによる研究で、後方散乱係数から水稻の生育量や収量を推定できる可能性が示唆され、観測事例の蓄積に加え、実用化に向けた技術開発が行われている（木村ら, 2013）。このSARを用いた手法により、天候に左右されずに衛星を使用したモニタリングが可能となるが、光学衛星と比べてデータが高価である。さらに、これまでに蓄積されてきた光学センサーの研究手法の多くは適用することができない。一方、UAVでは低空（雲の下）を飛行するため雲量に左右されずに観測可能で、既存の光学センサーを用いた手法を適用することができる。

この他にも衛星や航空機による広域の水田圃場を対象としたリモートセンシングは多くの研究がある。それらの成果により生育量、収量、収穫適期、タンパク含有率などの推定が可能となり、リモートセンシング技術の実利用を目指し、全国的に技術導

入が試みられている（農業技術協会, 2010）。水稻の生産管理におけるリモートセンシング技術の実利用事例としては、青森県津軽地域の津軽みらい農協で、衛星リモートセンシングを利用したタンパク含有率推定（安積ら, 2003）の手法を使用した“タンパクマップ”を活用し、タンパク含有率が低く食味の良好な圃場の米を選定し、「おいしさキャッチ米」の名前で付加価値をつけブランド米として販売を行っている例がある。また、この事例では付加価値米の収益でリモートセンシング費用を支出している。

このように、北日本を中心に農業リモートセンシングの実利用が進められているが、光学衛星を使用するため、データ撮影時の雲量による観測の頻度と確実性が利用の制約となっている。また、衛星を使用した観測では、広範囲の観測を行うことができるが、収量やタンパク含有率の推定の際に、圃場単位での栽培条件の差、特に田植時期の差にともなう生育ステージの違いによる推定精度の低下が懸念される（境谷ら, 2012）。一方、地域、圃場単位で衛星リモートセンシングの利用を考えた時、日本の農家一戸当たりの平均経営耕地面積（農林水産省, 2014）は、北海道の23.35ヘクタール、東北地方の2.26ヘクタールに対して、その他都府県は1.39ヘクタールと小さく、圃場ごとの栽培条件の差による推定精度低下の問題に加えて、リモートセンシング技術を運用する単位面積当たりのコストも広域な農地を対象としない場合では高くなり、実利用の促進においては課題となる。このことは、地域、圃場単位で適用でき、低価格で運用できるリモートセンシング技術の必要性を示唆している。

上記のような状況の下、地域、圃場単位で運用可能で、低空を飛行するプラットフォームとしてラジコンヘリコプターをはじめとした小型UAVを用いた近接リモートセンシング技術がある。UAVを使用した近接リモートセンシングでは、ガソリンエンジンを装備した産業用無人ヘリコプターにハイパースペクトルイメージセンサーを搭載し、実際に施肥量などの調整、玄米タンパク質含有率の推定に利用されているSPAD値の推定などが行われた事例がある（向山ら, 2011）。その際、低空（飛行高度5 m）での観測では、ヘリコプター特有のダウンウォッシュ（プロペラからの下方向への風）により水稻が攪拌されることによる観測精度の低下が報告されている。これに対して、小型の電動マルチコプター（マルチローターヘリコプター）を用いるとダウンウォッ

シュも少なく精度の高い観測が行える可能性がある。

マルチコプターを利用した研究事例では、コンパクトデジタルカメラを搭載し複数枚の空撮を行い、SfM-MVS (Structure from Motion and Multi-View Stereo) 技術を併用することで作物群落の3Dモデル: CSMs (Crop Surface Models) を作成し、群落高からバイオマスの計測を行った事例 (Bendig *et al.*, 2014) や、マルチコプター搭載用の小型ハイパースペクトルセンサーを開発し、水稻をモニタリングした事例 (Uto *et al.*, 2013) があるが、水稻の生育期間に合わせて多時期かつ可視光以外の波長帯を使用し継続的に観測を行った事例は報告されていない。

そこで、本研究では小型UAVにより撮影した高時間・空間分解能の可視・近赤外画像を活用して、圃場単位的水稻生育モニタリングを行う手法を開発することを目的とした。小型UAVによる観測は、衛星のような雲による制約が少なく、風雨がなければいつでも撮影可能であり、撮影にかかる費用は航空機などに比べると安価であるため、取得できる情報の品質が良ければ、日本のような湿潤地域での優位性が高まる。また、研究過程で取得できる植生の状態、NDVI, LAI, 草丈といった指標値とその分布は、水循環プロセスを解明するための重要な地表面の属性情報であり、水文・水資源研究における重要な手法ともなり得る。

II. データと手法

1. 観測試験区の概要

千葉県千葉市緑区に位置する千葉県農林総合研究センターの水稻試験圃場を対象に、2014年5月から9月初旬にかけて観測を行い、特に6月初旬(栄養生長期)から8月末(成熟期)に集中的な観測を行った。UAV空撮を行った日と、水稻の生育実測を行った日の一覧を図-1に示す。この圃場では2筆の水田圃場を48区画に細分し、それぞれの区画で播種時期(4期: 3/15, 4/2, 4/23, 5/20), 移植時期(4期: 4/10, 4/23, 5/14, 6/3), 品種(3種: ふさおとめ, ふさこがね, コシヒカリ), 施肥量(基肥量0~6 gN/m², 追肥量1.5~4.5 gN/m²)を変え、異なる条件の元で栽培実験を行っている。これら48区画の試験区の概略を図-2, 表-1に示す。

2. UAVによる空撮

観測には、ラジコン電動マルチコプター (MEDIX

調査日 空撮:□、生育実測:■									
5/9	5/10	5/11	5/12	5/13	5/14	5/15	5/16	5/17	5/18
5/19	5/20	5/21	5/22	5/23	5/24	5/25	5/26	5/27	5/28
5/29	5/30	5/31	6/1	6/2	6/3	6/4	6/5	6/6	6/7
6/8	6/9	6/10	6/11	6/12	6/13	6/14	6/15	6/16	6/17
6/18	6/19	6/20	6/21	6/22	6/23	6/24	6/25	6/26	6/27
6/28	6/29	6/30	7/1	7/2	7/3	7/4	7/5	7/6	7/7
7/8	7/9	7/10	7/11	7/12	7/13	7/14	7/15	7/16	7/17
7/18	7/19	7/20	7/21	7/22	7/23	7/24	7/25	7/26	7/27
7/28	7/29	7/30	7/31	8/1	8/2	8/3	8/4	8/5	8/6
8/7	8/8	8/9	8/10	8/11	8/12	8/13	8/14	8/15	8/16
8/17	8/18	8/19	8/20	8/21	8/22	8/23	8/24	8/25	8/26

図-1 UAV観測日(空撮日)と生育実測日

Fig. 1 Observation day of UAV and actual survey.

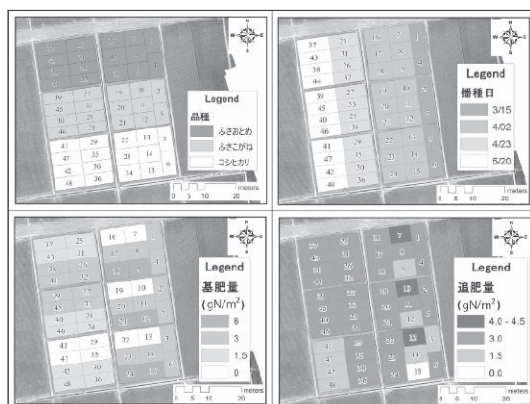


図-2 試験区概略

Fig. 2 Outline of field.

社: JABO H601G - ヘキサコプター, DJI社: Phantom2 - クワッドコプター), デジタルカメラ (可視画像: RICOH社 GR 約1,620万画素, GoPro社: HERO3 約1,200万画素. 近赤外画像: BIZWORKS社 Yubaflex 約1,210万画素) を用いてマニュアル操作により飛行した。撮影時刻は午前10時~11時, 撮影高度は30 m~50 mを基準とし空撮を行った。近赤外画像の撮影に使用したYubaflexは、コンパクトデジタルカメラを、緑, 赤, 近赤外の3つの波長帯を同時に撮影できるように改造することにより、1つのカメラの画像で正規化差植生指数 (NDVI: Normalized Difference Vegetation Index) の計算を可能にしている。Yubaflexはサイズ (幅9.9×高さ6×奥2.7 cm)・重さ

表-1 栽培条件一覧

Table 1 Cultivation conditions.

試験区	品種	播種日 (月/日)	移植日 (月/日)	基肥		追肥		生育期		
				施用日 (月/日)	N施用量 (gN/m ²)	施用日 (月/日)	N施用量 (gN/m ²)	幼穂形成期 (月/日)	出穂期 (月/日)	成熟期 (月/日)
1	ふさおとめ	3/15	4/10	4/4	3.0	6/13	3.0	6/11	7/10	8/10
2	ふさこがね	3/15	4/10	4/4	3.0	6/14	3.0	6/13	7/11	8/14
3	コシヒカリ	3/15	4/10	4/4	3.0	6/30	3.0	6/19	7/16	8/19
4	ふさおとめ	3/15	4/10	4/4	3.0	6/13	3.0	6/11	7/10	8/10
5	ふさこがね	3/15	4/10	4/4	3.0	6/14	3.0	6/13	7/11	8/14
6	コシヒカリ	3/15	4/10	4/4	3.0	6/30	3.0	6/19	7/16	8/19
7	ふさおとめ	4/2	4/23	4/18	0.0	6/30	3.0	6/16	7/12	8/12
8	ふさおとめ	4/2	4/23	4/18	3.0	6/30	3.0	6/16	7/12	8/12
9	ふさおとめ	4/2	4/23	4/18	6.0	6/30	3.0	6/16	7/12	8/12
10	ふさこがね	4/2	4/23	4/18	0.0	6/30	3.0	6/17	7/14	8/16
11	ふさこがね	4/2	4/23	4/18	3.0	6/30	3.0	6/17	7/14	8/16
12	ふさこがね	4/2	4/23	4/18	6.0	6/30	3.0	6/17	7/14	8/16
13	コシヒカリ	4/2	4/23	4/18	0.0	7/2	4.0	6/25	7/19	8/24
14	コシヒカリ	4/2	4/23	4/18	3.0	7/2	1.5	6/25	7/19	8/24
15	コシヒカリ	4/2	4/23	4/18	6.0	7/2	1.5	6/25	7/19	8/25
16	ふさおとめ	4/2	4/23	4/18	0.0	6/30	3.0	6/16	7/12	8/12
17	ふさおとめ	4/2	4/23	4/18	3.0	6/30	3.0	6/16	7/12	8/12
18	ふさおとめ	4/2	4/23	4/18	6.0	6/30	3.0	6/16	7/12	8/13
19	ふさこがね	4/2	4/23	4/18	0.0	6/30	3.0	6/17	7/14	8/16
20	ふさこがね	4/2	4/23	4/18	3.0	6/30	3.0	6/17	7/14	8/16
21	ふさこがね	4/2	4/23	4/18	6.0	6/30	3.0	6/17	7/14	8/17
22	コシヒカリ	4/2	4/23	4/18	0.0	7/2	3.0	6/25	7/19	8/24
23	コシヒカリ	4/2	4/23	4/18	3.0	7/2	3.0	6/25	7/19	8/25
24	コシヒカリ	4/2	4/23	4/18	6.0	7/2	3.0	6/25	7/19	8/25
25	ふさおとめ	4/23	5/14	5/8	1.5	7/2	3.0	6/27	7/22	8/22
26	ふさおとめ	4/23	5/14	5/8	3.0	7/2	3.0	6/27	7/22	8/22
27	ふさこがね	4/23	5/14	5/8	3.0	7/2	3.0	6/29	7/23	8/27
28	ふさこがね	4/23	5/14	5/8	1.5	7/2	3.0	6/29	7/23	8/27
29	コシヒカリ	4/23	5/14	5/8	0.0	7/15	3.0	7/7	8/2	9/8
30	コシヒカリ	4/23	5/14	5/8	3.0	7/15	3.0	7/7	8/2	9/8
31	ふさおとめ	4/23	5/14	5/8	1.5	7/2	3.0	6/27	7/22	8/22
32	ふさおとめ	4/23	5/14	5/8	3.0	7/2	3.0	6/27	7/22	8/22
33	ふさこがね	4/23	5/14	5/8	3.0	7/2	3.0	6/29	7/23	8/27
34	ふさこがね	4/23	5/14	5/8	1.5	7/2	3.0	6/29	7/23	8/27
35	コシヒカリ	4/23	5/14	5/8	0.0	7/15	3.0	7/7	8/2	9/8
36	コシヒカリ	4/23	5/14	5/8	3.0	7/15	3.0	7/7	8/2	9/8
37	ふさおとめ	5/20	6/3	5/28	1.5	7/17	3.0	7/14	8/4	9/10
38	ふさおとめ	5/20	6/3	5/28	3.0	7/17	3.0	7/14	8/4	9/10
39	ふさこがね	5/20	6/3	5/28	3.0	7/17	3.0	7/15	8/6	9/12
40	ふさこがね	5/20	6/3	5/28	1.5	7/17	3.0	7/15	8/6	9/12
41	コシヒカリ	5/20	6/3	5/28	0.0	7/23	3.0	7/18	8/8	9/14
42	コシヒカリ	5/20	6/3	5/28	3.0	7/23	3.0	7/18	8/8	9/14
43	ふさおとめ	5/20	6/3	5/28	1.5	7/17	3.0	7/14	8/4	9/10
44	ふさおとめ	5/20	6/3	5/28	3.0	7/17	3.0	7/14	8/4	9/10
45	ふさこがね	5/20	6/3	5/28	3.0	7/17	3.0	7/15	8/6	9/12
46	ふさこがね	5/20	6/3	5/28	1.5	7/17	3.0	7/15	8/6	9/12
47	コシヒカリ	5/20	6/3	5/28	0.0	7/23	3.0	7/18	8/8	9/14
48	コシヒカリ	5/20	6/3	5/28	3.0	7/23	3.0	7/18	8/8	9/14

約198 gであり、小型UAVに搭載可能である。空撮によるNDVIはBIZWORKS社が提供するソフトウェアYubaflex2.0を利用し、Yubaflexで撮影した画像の近赤外、赤の観測輝度を用いて輝度ベースで求めた。このソフトウェアでは、Yubaflexで撮影した画像の赤のバンドにも近赤外感度（780～800 nm程度）が幾分か含まれることを考慮し、これを減算処理すると同時に、近赤外感度の増強を行っている。

3. 地上観測

ハイパースペクトルカメラ（エバ・ジャパン社NH-7）を使用し、空撮とほぼ同時にマルチスペクトル画像（波長分解能5 nm：観測波長帯350 nm～1100 nm）を地上で取得した。カメラは、地表面から1.5 mの高さに固定し、撮影角度は45度として撮影画像1つに試験圃場の48区画の1つが入るように水稻の近接画像を撮影した。本研究では、ハイパースペクト

ルカメラを地上観測によるNDVIの計測に使用し、今後は、ハイパースペクトル計測による水稻生育の解析を行う予定であるが、今回はYubaflexによるNDVIとの器差補正のための校正データとしてのみ利用した。

水稻の生育状況の実測データは、千葉県農林総合研究センターが観測した播種・移植時期（全4期）、施肥量（基肥、追肥）、倒伏程度、試験区の一部の水稻の刈り取りにより計測した草丈、茎数、LAIを使用した。

4. データ解析

1) オルソ空中写真およびDSM, CSMsの取得

UAVで撮影した鉛直写真からオルソ空中写真および水田圃場のDSM（Digital Surface Model）、SfM-MVS（Structure from Motion and Multi-View Stereo）ソフトウェアPhotoScan Professional（Agisoft社）を用いて作成した。SfM-MVSソフトウェアでは、地表面を撮影した複数枚の画像から特徴点を抽出、合成し、自動的に対象の立体モデル（3Dモデル）を作成することができ、そのモデルに地上基準点（経度、緯度、高さ）を設定することによりオルソ空中写真とDSMを作成することができる。以降、本論ではBendig *et al.*, (2014)に準拠し、SfM-MVSソフトウェアで作成された作物群落のDSMをCSMs（Crop Surface Models）とする。また、SfM-MVSソフトウェアの測量精度に関しては小花和ら（2015）で検証されており、測量精度は設定する基準点情報の精度に依存し、正確な基準点情報を設定することで対象の詳細な起伏や配置を測量できることがわかっている。

CSMsは水稻の生育に伴い変化するため、撮影時期ごとのCSMsから初期地表面高度（裸地状態のDSM）を差し引き、各区画内の水稻の平均群落高（キャノピー高）を求めた。

2) 正規化植生指数（NDVI）の取得

空撮により取得したYubaflex画像の近赤外、赤の観測輝度をもとに、Yubaflex専用ソフト（Yubaflex2.0）で輝度ベースのNDVIを計算、画像化し、地理情報システム（GIS）上でオルソ化した後、モザイク画像を作成した。その後、水稻部だけのNDVIを得るため、 $NDVI > 0$ を植生域とし、水域・土壌を排除した。

Yubaflexと違いハイパースペクトルカメラでは波長分解能5 nmでピンポイントの波長を観測可能であり、Yubaflexと同時に観測することで、NDVI観測値

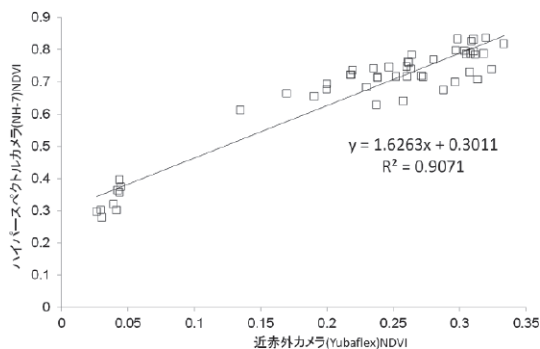


図-3 Yubaflex2.0で計算したNDVIとNH-7で計測したそれとの関係

Fig. 3 Correction of NDVI (correlation between Yubaflex2.0 value and NH-7 value).

の比較を行った。その結果をもとに、図-3に示すように、ハイパースペクトルカメラによる地上観測値をもとに回帰式（1）を作成し、Yubaflexにより空撮した画像からYubaflex2.0で算出したNDVI値の補正を行った。ハイパースペクトル画像のNDVIは、Ustin *et al.*, (2009)の生物物理学的指標の一覧からNDVIの計算に使用する波長を設定し、各区画内の平均NDVIを（2）式を用いて求めた。

$$NDVI_{Hyper} = NDVI_{Yubaflex2.0} \times 1.6263 + 0.3011 \quad (1)$$

$$NDVI_{Hyper} = (DN_{845nm} - DN_{665nm}) / (DN_{845nm} + DN_{665nm}) \quad (2)$$

ここで、 $NDVI_{Hyper}$ はハイパースペクトルカメラ観測値より算出したNDVI、 $NDVI_{Yubaflex2.0}$ はYubaflexで撮影された画像からYubaflex2.0を用いて輝度ベースで算出したNDVI、 $DN_{845,665nm}$ はハイパースペクトルカメラの観測輝度と観測波長である。

このように使用する機材のセンサー、観測波長の違いからNDVIに器差があるが、今後、複数のセンサー、カメラを用いた同時観測を行い、カメラごとの性能評価、NDVI観測値の校正を行う予定である。以降、本論では $NDVI_{Hyper}$ をNDVIと表記する。

3) 水稻の倒伏（コシヒカリ）

コシヒカリは、他の品種に比べ草丈が長く、倒伏の危険性が高い。倒伏の様子は、地表面と水稻の茎の角度で0（無）～5（甚）で評価し、「倒伏程度」として定量化される。川口（1991）ではコシヒカリにおいて出穂期13～14日前（追肥時期）の草丈と倒伏との関係を調べており、追肥時期の草丈が84 cm以

上だと倒伏の危険性が高いことがわかっている。また、幼穂形成期の草丈が70 cmを越える場合も倒伏の危険性が高いと報告されている(石川県県央農林総合事務所, 2014)。本研究では、これら2つの草丈による倒伏予測指標のいずれか1つでも条件を満たした場合、重度な倒伏が予測される倒伏予測エリアとした。この草丈を用いた倒伏予測指標は、CSMsで計測する群落高に応用することで、UAV空撮画像から面的に倒伏予測エリアを把握することができる。

5. 生育状況実測データとUAV観測データ

今回はUAV観測データの精度検証などに重要な生育状況の実測データ観測日とUAV観測日を同期させることはできなかった。特に実測日(7月7日)はUAV観測日と日数に差があるため、実測日を挟む2回の観測データ(7月2日, 7月16日)の間を線形補間することで、7月7日のUAV観測データを推定し、実測日と同日のデータとした。また、UAV観測と推定モデルの精度検証は、RMSE(Root Mean Squared Error)を用い評価した。

Ⅲ. 結果と考察

1. NDVIモニタリング

図-4に各区画のNDVIの時系列変化を示す。観測圃場の水稻のNDVIは共通して、移植期から上昇し、出穂期をピークに成熟期に向けて下降を示した。播種・移植を行った時期が早いものほど先にピークが現れ、田植時期の違いによる生育ステージのずれが明瞭に観測された。

図-5に空撮による可視画像とNDVI画像の一覧を示す。品種の違いによる生育の違いも認められ、出穂前の観測結果では、同じ播種・移植時期であっても生育の遅いコシヒカリのNDVIが一番低くなった。同じ播種・移植時期、品種のものであっても、施肥量を試験区ごとに変えており、施肥量が多い試験区ほど高いNDVIを示した。また、コシヒカリを栽培した試験区では重度の倒伏があり、倒伏した水稻は周辺の成熟した水稻よりもNDVIが高くなっている様子も確認されており、倒伏エリアのマッピングと、その大規模圃場における応用が考えられる。なお、NDVI画像中の黒い斑点は計測用の刈り取り区画である。

このようにNDVI画像から圃場内の生育状況の違いが、詳細に観測された。このことはUAVを用いた

近接リモートセンシングによる作物生育モニタリングの可能性を示している。例えば、NDVIと類似した原理を用いるSPAD値(葉色値)を利用した施肥管理は既に行われており、NDVI観測結果も同様に施肥量調整に使用し、品質向上・環境負荷(窒素問題)の軽減ができる可能性が示唆された。

2. 草丈、群落高計測

図-6aに草丈の実測値とCSMsによる群落高(以

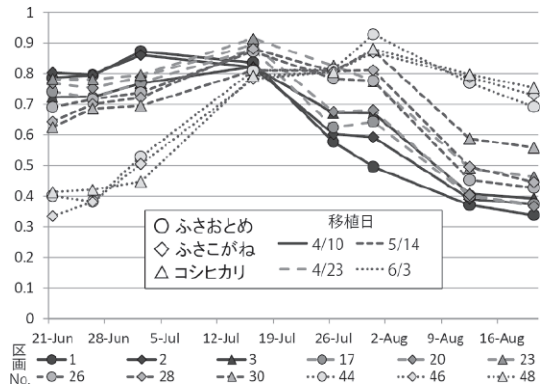


図-4 試験区毎のNDVIの時系列変化

Fig. 4 Time series of NDVI.

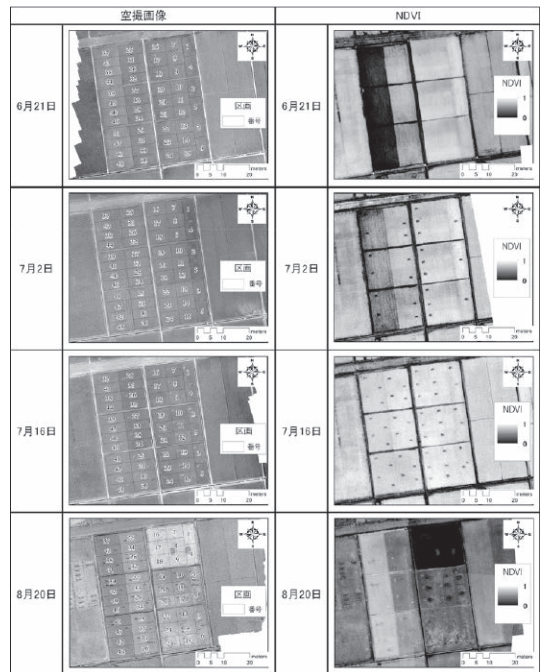


図-5 空撮画像とNDVIの時系列画像

Fig. 5 Time series images of aerial photographs and NDVI.

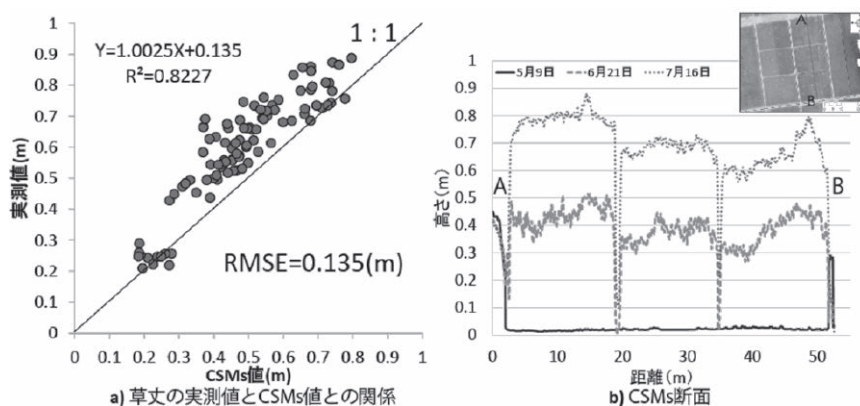


図-6 CSMsによる群落高計測

Fig. 6 Plant height observation by CSMs.

降CSMs値とする)の相関を示す。実測データのある出穂前の2期(6月20日, 7月7日)の水稲の草丈と、ほぼ同時期の空撮画像から作成したCSMs値(48区画×2期=96サンプル)を比較した結果、決定係数で0.8227と高い相関があり、草丈が0.4 m以下を除き、草丈の方が全体的に高いCSMs値を示した。

実測による草丈とCSMs値の回帰直線を式(3)に示す。

$$\begin{aligned} \text{草丈} &= 1.0025 \times \text{CSMs} + 0.135 \\ R^2 &= 0.8227 \quad (\text{草丈} \geq 0.4) \end{aligned} \quad (3)$$

草丈とCSMs値の差は、水稲の高さの計測方法の違いと考えられる。実測の草丈計測は試験区の一部を刈り取り、水稲を真っ直ぐに伸ばした最長部を計測している。一方、CSMs値は区画内の平均群落高を求めており、図-6bのCSMsの断面図にあるように水稲の最も高い点だけでなく垂れた状態の群落も含まれる。そのため、CSMs値の方が全体的に低くなると考えられる。

また、図-6bの3時期のCSMsの断面図では、異なる時期の群落高の差が計測できており、さらに群落高が高い場所は、施肥量が多く生育の良い場所と一致した。このように、CSMsでは群落高を計測でき、水稲の生育状況を把握することが可能であった。

SfM-MVSを用いて作成するCSMsは、コンパクトデジタルカメラを小型UAVに搭載し空撮を行った複数枚の画像から作成可能であり、作成されたCSMsは観測時の水稲の群落高を計測でき、水稲の生育量として定量化できることが明らかとなった。

3. NDVIを用いた生育量推定・予測

1) 草丈, 茎数, LAI

出穂前の水稲におけるNDVIと草丈、茎数およびLAIとの相関を図-7に示す。品種により生育過程および特徴が異なるため、品種ごとに相関関係が異なる結果となったが、いずれも高い相関が得られた。そこで、NDVIとの相関関係をもとに、NDVIを用いた出穂前における草丈・茎数・LAI推定のための回帰モデルを品種ごとに導いた。ただし、LAIについては品種による回帰モデルの差が小さかったため、品種を統合した回帰モデルも作成した。また、LAIの回帰モデルは指数関数となるため、LAIの実測値がほぼ等間隔となるように任意の観測値を選択し、回帰モデルを作成した。茎数については、出穂前の最高分けつ期にピークを迎えるため、6月20日のデータのみを使用した。得られた各項目の推定式を図-7と式(4)~(7)に示す。

$$\begin{aligned} \text{草丈} &= 1.0780 \times \text{NDVI} - 0.1705 \\ R^2 &= 0.9279 \quad (\text{ふさおとめ}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{草丈} &= 1.0652 \times \text{NDVI} - 0.1583 \\ R^2 &= 0.8782 \quad (\text{ふさこがね}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{草丈} &= 1.1726 \times \text{NDVI} - 0.1691 \\ R^2 &= 0.9373 \quad (\text{コシヒカリ}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{茎数} &= 563.60 \times \ln(\text{NDVI}) + 794.60 \\ R^2 &= 0.8713 \quad (\text{ふさおとめ}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{茎数} &= 578.19 \times \ln(\text{NDVI}) + 792.78 \\ R^2 &= 0.8871 \quad (\text{ふさこがね}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{茎数} &= 720.02 \times \ln(\text{NDVI}) + 943.49 \\ R^2 &= 0.9045 \quad (\text{コシヒカリ}) \end{aligned}$$

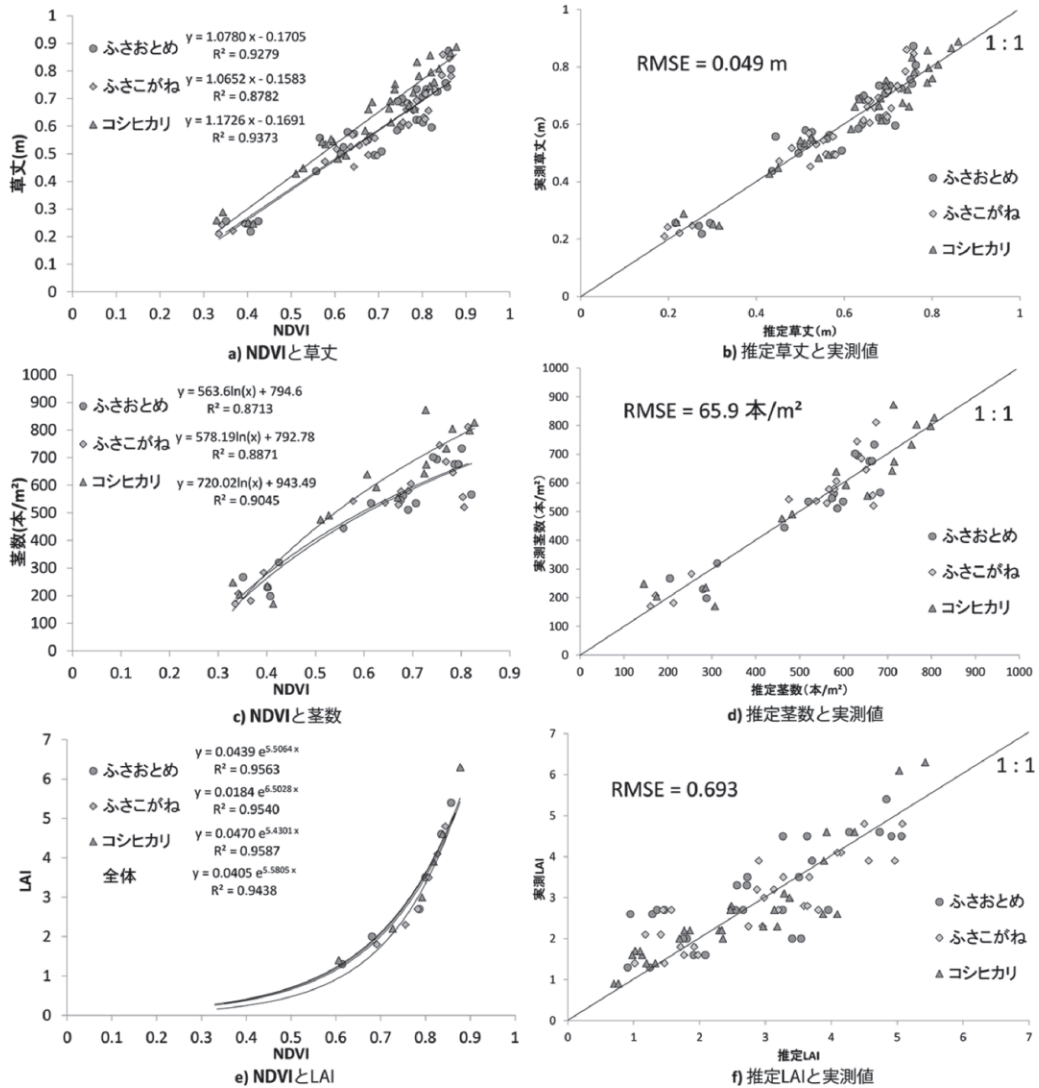


図-7 NDVIを用いた生育量の推定
Fig. 7 Rice growth estimation using NDVI.

$$\begin{aligned}
 \text{LAI} &= 0.0439e^{5.5064 \times \text{NDVI}} \\
 R^2 &= 0.9563 \quad (\text{ふさおとめ}) \\
 \text{LAI} &= 0.0184e^{6.5028 \times \text{NDVI}} \\
 R^2 &= 0.9540 \quad (\text{ふさこがね}) \\
 \text{LAI} &= 0.0470e^{5.4301 \times \text{NDVI}} \\
 R^2 &= 0.9587 \quad (\text{コシヒカリ}) \\
 \text{LAI} &= 0.0405e^{5.5805 \times \text{NDVI}} \\
 R^2 &= 0.9438 \quad (\text{全体})
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

これらの簡易モデルを用いた推定結果と実測値を比較すると、草丈のRMSEは、ふさおとめ0.056 m、ふさこがね0.045 m、コシヒカリ0.045 m、全体で0.049

mと数cm程度の誤差で推定が行えることが明らかとなった。茎数のRMSEは、ふさおとめ57.8本/m²、ふさこがね69.3本/m²、コシヒカリ70.6本/m²、全体で65.9本/m²の推定結果を示した。LAIのRMSEは、ふさおとめ0.599、ふさこがね0.831、コシヒカリ0.622、全体で0.693となり、草丈、茎数に比べ推定精度は低くなった。

水稻の草丈の計測においては、CSMsを用いた草丈の計測は群落高を観測するため、風などによる水稻の状態による計測結果の誤差が生まれる。それらの誤差が大きい場合は、NDVIを用いて草丈の推定

を行うことで、上記のような誤差要因は軽減され、観測結果を補完できると考えられる。ただし、これらのモデルは適用期間が出穂前に限定されるため、生育期間中のモニタリングを継続する場合は、生育ステージに合わせてCSMsによる群落高計測などとの併用が必要である。

このように近接空撮画像のNDVIを用いた生育量推定モデルは、草丈で約0.05 m (5 cm)、茎数で約70本/m²、LAIで約0.7の誤差で各パラメータの推定が行えることが明らかとなった。これらの推定モデルは本研究で使用したカメラ (YubaflexとNH-7) でのNDVI観測値をもとに作成されており、モデルの普遍性、汎用性については今後検証を行う必要があるが、実利用においては重要となる「簡易かつ低価格な手法」で生育量に関わるパラメータを推定できる可能性を示すことができた。なお、生産者は草丈や茎数から生育量を把握し各品種の適正範囲と比較することで、以後の生育制御方法を決定しており、草丈や茎数は、水稻の生育状況を把握する重要な指標である。これらの生育状況の推定・予測をUAVにより行うことで、生育管理における労力と時間の大幅な軽減につながる可能性がある。

2) 倒伏予測 (コシヒカリ)

川口 (1991) の草丈を用いた倒伏予測の基準は本研究の観測値に適用することができる。例えば、(3)式に示すCSMsから求めた草丈に適用することができるが、SfM-MVSソフトウェアを用いてCSMsを作成する際のソフトウェアでの処理時間はCPUやメモリなどのコンピューターのスペックに依存する。撮影画像数が非常に多く、処理するデータ容量が膨大

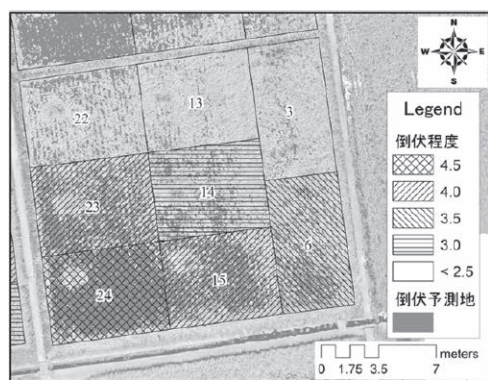
な場合は、処理時間が数十時間に及ぶことがあり、速報性が求められる状況でのデータ提供が困難な場合がある。

そこで、本研究で作成したNDVIから草丈を推定するモデルを応用することで、NDVIを用いた倒伏予測指標を作成した。この方法では数枚程度の画像のオルソモザイク画像の解析結果を用いるため、本研究ではデータ提供までに要した時間が約30分程度と速報性が高かった。予測指標をまとめると、①幼穂形成期のNDVIが0.74以上、②出穂前13～14日のNDVIが0.86以上となる。この条件のどちらか一方でも満たした場合、重度な倒伏が予測される。

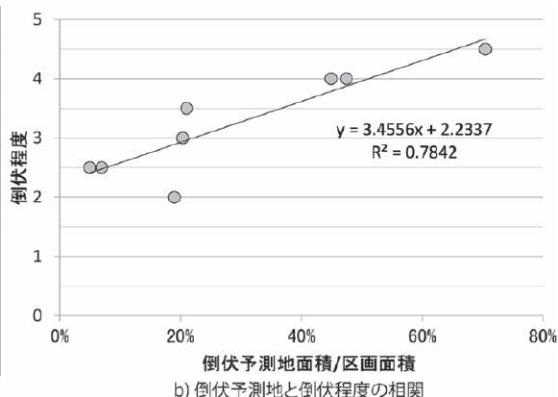
この予測手法を、コシヒカリの栽培を行った試験区に適用した結果を図-8に示す。その結果、重度な倒伏が予測されたエリアと実際の倒伏程度が甚だしい区画の空間分布はほぼ一致した。また、区画内に占める倒伏が予測された面積の割合が高いほど倒伏程度も大きい結果となった。このように、NDVIを使用し倒伏予測を行うことができ、生育管理の際に、追肥量軽減・倒伏防止処置などの生育調整を行う必要性が高い場所を面的かつ詳細に把握できることがわかった。

IV. 結論

センサーをプラットフォームに搭載し地上を計測するリモートセンシングにおいて、小型UAVとしてラジコン電動マルチコプターを利用することにより、光学センサーによる衛星観測の雲量による制約が軽減され、航空機に比べても低コストで観測できるという優位性が生じる。本研究では、これまで衛



a) 倒伏予測地と倒伏程度の空間分布



b) 倒伏予測地と倒伏程度の相関

図-8 倒伏予測結果と実際の倒伏地

Fig. 8 lodging prediction results and actual lodging area.

星や航空機で行われてきた水稻モニタリングにおいて、可視画像と近赤外画像を撮影できる2種類のデジタルカメラによる低空からの空撮を高頻度で行うことにより、水稻のNDVI、草丈、茎数、LAI等の生育量に関わるパラメータを取得し、生育状況をモニタリングすることを目的とした。

栽培条件を変えた複数の区画を持つ水田圃場を対象としてUAVで撮影したNDVI画像によると施肥量の多い区画ほど高いNDVIを示し、NDVIの時系列変化からは田植時期の違いによる生育ステージの差を明確にとらえることができた。区画ごとの栽培条件による差がNDVI画像に詳細かつ明瞭に表れたことは、UAV空撮によるNDVIを用いた圃場内の施肥量調整の可能性を示している。

重なり合う可視画像からSfM-MVS技術を使用することで水稻のキャノピーのCSMsを作成することができた。田植え前のDSMと異なる生育段階におけるCSMsの差から群落高を計測することができ、水稻を破壊せずに人が立ち入ることが困難な圃場の中心部なども、非破壊かつ面的に生育状況を計測できることを示した。

NDVIを説明変数とした出穂前における生育量推定モデルの推定誤差をRMSEで評価した結果、草丈で、ふさおとめ0.056 m、ふさがね0.045 m、コシヒカリ0.045 m、全体0.049 m、茎数は、ふさおとめ57.8本/m²、ふさがね69.3本/m²、コシヒカリ70.6本/m²、全体65.9本/m²、LAIは、ふさおとめ0.599、ふさがね0.831、コシヒカリ0.622、全体0.693となり、草丈では約5 cm、茎数は約70本/m²、LAIは約0.7の誤差で推定できるモデルを構築することができた。今後、これらの推定モデルを別の年度、圃場に適用し、普遍性、汎用性に関する検証を行う予定である。

コシヒカリにおける倒伏予測では、倒伏を予測したエリアと実際に倒伏したエリアの空間分布はほぼ一致した。区画内に占める倒伏予測エリアの面積の割合と実際の倒伏程度の相関を見ても、倒伏予測エリアの割合が高いほど倒伏程度も大きくなり、NDVIを使用した倒伏予測が可能であることを示した。

このように、UAVによる低空からの空撮画像を用いた水稻モニタリングでは、草丈、茎数、LAIの計測において、手間と労力のかかる生育状況の実測に代えて、UAVによる生育量計測、推定手法を代用できる可能性があり、NDVI計測、倒伏予測においては、施肥量の調整、倒伏防止処置といった生育管理

の可能性を示すことができた。

本研究で試行した植生モニタリング手法は、精密農業による施肥量調整（適正利用・最少利用）に伴う環境負荷の軽減が期待できるだけでなく、その他の水環境研究への活用も可能である。例えばLAIは、地表面における水収支または熱収支を計算する水文モデルにおいても、重要な地表面データの1つとなっている。UAVはその機動性と高時間・空間分解能の画像が得られる特性を活かして水文・水資源分野における汎用的な計測システムとなる可能性があるが、墜落等の事故を防ぐため徹底的に安全性に配慮した運用が必要となる。

今後は、UAVの自律飛行システムの活用による観測労力の軽減とヒューマンエラーの防止を含めた観測の確実性の向上を図ることが課題である。また、収量やタンパク含有率の推定モデルの構築や、ハイパースペクトルイメージセンサーや熱赤外カメラをUAVに搭載した観測を行う予定である。

謝辞

本研究では、千葉県農林総合研究センター水稻温暖化対策研究室にデータ提供を頂いたほか、圃場利用等様々な面でご協力頂いた。ここに記し、御礼申し上げます。

引用文献

- 秋山 侃・石塚直樹・小川茂男・岡本勝男・斎藤元也・内田 諭 2006. 農業リモートセンシングハンドブック, システム農学会; 518.
- 秋山 侃・富久尾歩・平野 聡・石塚直樹・小川茂男・岡本勝男・斎藤元也・内田 諭・山本由紀代・吉迫 宏・瑞慶村知佳 2014. 農業リモートセンシングハンドブック, システム農学会; 292.
- 安積大治・志賀弘行 2003. 水稻成熟期のSPOT/HRVデータによる米粒蛋白含有率の推定. 日本リモートセンシング学会誌. 23 (5): 451-457.
- Bendig J, Bolten A, Bennertz S, Broscheit J, Eichfuss S, Bareth G, 2014. Estimating Biomass of Barley Using Crop Surface Models (CSMs) Derived from UAV-Based RGB Imaging. *Remote Sensing* 6 : 10395-10412.
- 井上吉雄・ミアギアシュディン・境谷栄治・中野憲司・川村健介 2008. ハイパースペクトル計測に基づく正規化分光反射指数NDSIマップおよび波長選択型PLSによる植物・生態系変量の評価: 米粒タンパク含有率・クロロフィル濃度・バイオマス評価を事例として. 日本リモートセンシング学会誌. 28 (4): 317-330.
- 石川県農林総合事務所 2014. 水稻栽培管理情報 (JA金沢市版). 5, <http://www.is-ja.jp/kanazawa/saibaikannri630.pdf>. (参照: 2015/07/08).
- 川口祐男 1991. 富山県内におけるコシヒカリ倒伏の現状と対応策 (コシヒカリの倒伏をめぐる). 北陸作物学会報. 26: 138-141.
- 木村篤史・島村秀樹・安田嘉穂 2013. 高分解能Xバンド2偏波SAR画像による水稻の生育・収量の調査. 写真測量とリモートセンシング. 52 (3): 127-140.

- 近藤昭彦 2003. 水文学へのリモートセンシングとGIS技術の応用 (総説). 地理学評論. 76 (11) :788-799.
- 向山信治・小杉幸夫・宇都有昭・斎藤元也・小田九二夫 2011. 産業用無人ヘリコプター搭載型ハイパースペクトル観測による稲葉のSPAD値推定技術に関する基礎的研究. 写真測量とリモートセンシング. 50 (2) :90-95.
- 日本学術会議 2001. 地球環境・人間生活にかかわる農村及び森林の多面的な機能の評価について (答申) :1-43, http://www.maff.go.jp/j/nousin/noukan/nougyo_kinou/pdf/toushin_zentai.pdf. (参照:2015/07/03).
- 農業技術協会 2010. 次世代大規模経営品質管理システム実用化事業実績報告書 (17-21年度). 財団法人農業技術協会:1-168.
- 農林水産省 2014. “農地に関する統計”, 一戸当たり経営耕地面積 (販売農家), <http://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/10.html>. (参照:2015/07/09).
- 小花和宏之・早川裕式・加藤 顕・ゴメスクリストファー 2015. 小型無人航空機および単独測位GNSS搭載カメラを用いた簡易的な地形測量手法. 地形. 36 (2) :87-106.
- 境谷栄二・井上吉雄 2012. リモートセンシングによる玄米タンパク含有率の推定精度に影響する誤差要因:地域スケールでの実践的応用に向けて. 日本作物学会紀事. 81 (3) :317-331.
- Ustin SL, Jacquimoud S, Palacios-Orueta A, Li L, Whiting ML, 2009. Remote sensing based assessment of biophysical indicators for land degradation and desertification. Recent Advances in Remote Sensing and Geoinformation, Processing for Land Degradation Assessment. London: *ISPRS Series* : 15-44.
- Uto K, Seki H, Saito G, Kosugi Y, 2013. Characterization of Rice Paddies by a UAV-Mounted Miniature Hyperspectral Sensor System. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING* 6(2): 851-860.
- 脇山恭行・井上君夫・中国 江 2003. 水稻登熟期における衛星データおよびアメダスデータを用いた収量予測法. 農業気象. 59 (4) : 277-286.
- (受付:2015年3月28日, 受理:2015年10月10日)
この論文への討議・コメントを, 2016年7月末日まで受け付けます.

Rice Growth Monitoring Using Small UAV and SfM-MVS Technique

Akira HAMA ¹⁾ Yuka HAYAZAKI ²⁾ Atsushi MOCHIZUKI ³⁾
Yasuo TSURUOKA ³⁾ Kei TANAKA ⁴⁾ Akihiko KONDOH ⁵⁾

¹⁾ Graduate School of Science, Chiba University
(1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, Chiba 263-8522)

²⁾ Faculty of Science, Chiba University (At present Meitetsucom Co., Ltd.)
(1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, Chiba 263-8522)

³⁾ CHIBA Prefectural Agriculture and Forestry research Center
(808 Daizennocho, Midori-ku, Chiba, Chiba 266-0006)

⁴⁾ Japan Map Center
(4-9-6 Aobadai, Meguro-ku, Tokyo 153-8522)

⁵⁾ Center of Environmental Remote Sensing, Chiba University
(1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, Chiba 263-8522)

Radio-controlled electric-powered multicopters have become extremely useful as low-cost unmanned aerial vehicle (UAV) with a camera or sensor for proximity remote sensing. Crop growth management is an important use of remote sensing. Particularly for rice, a key crop in Japan, remote sensing is useful to support management for increased yields, optimum harvest time forecasting, and improved eating quality. Observation and prediction have been conducted for wide areas using aircraft and satellite remote sensing. We used a small UAV for growth monitoring of rice: details of growth were monitored using high temporal-spatial resolution images. Then we produced rice growth estimation models. Additionally, structure from motion and multi-view stereo (SfM-MVS) software was used to create ortho mosaic image and crop surface models (CSMs). We used it to monitor rice growth. Observation results revealed details of rice growth differences, which derive from cultivation conditions. Rice growth estimation models yielded good results. We infer that rice production management of techniques such as fertilization can be done using methods used for this study.

Key words : small UAV, proximity remote sensing, growth management, SfM-MVS, CSMs