

機関番号：12608
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20500153
 研究課題名(和文) 産業用無人ヘリコプターを用いた農業用ハイパースペクトルデータ取得系に関する研究
 研究課題名(英文) Study on hyperspectral data acquisition system for agriculture using industrial RC helicopter
 研究代表者
 宇都 有昭 (UTO KUNIAKI)
 東京工業大学・大学院総合理工学研究科・助教
 研究者番号：90345356

研究成果の概要(和文)：

雨季と稲作の生育時期が重なる日本型農業事情を考慮した場合、高高度からのデータ取得は困難であると予想されることから、雲や雨の影響を受けることなく広範囲の圃場内の農作物のハイパースペクトルデータを高空間・波長分解能で取得可能なリモートセンシング技術として、産業用無人ヘリコプター搭載型ハイパースペクトルデータ取得技術の開発を実施した。また、ハイパースペクトルに基づく農作物状態(いもち病被害度、LAI、SPAD値)の定量的な推定法を開発した。

研究成果の概要(英文)：

Under the humid subtropical climate in Japan, it is difficult to obtain optical remote sensing data during the rainy season in growing period of vegetation. In this study, a low altitude hyperspectral observation system mounted on industrial RC helicopter is developed. Estimation methods of quality and quantity of vegetation, e.g. LAI, SPAD, based on hyperspectral data are developed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000円	390,000円	1,690,000円
2009年度	1,800,000円	540,000円	2,340,000円
2010年度	500,000円	150,000円	650,000円
年度			
年度			
総計	3,600,000円	1,080,000円	4,680,000円

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学 ・ 知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：リモートセンシング、ハイパースペクトル、計測工学、精密農業、産業用無人ヘリコプター

1. 研究開始当初の背景

(1) GPS・GIS・リモートセンシング技術・インターネットの整備に伴い、農作物の品質向上、トレーサビリティ・システムを実現する「精密農業」への期待が高まっている。地区・圃場内での農作物品質を高いレベルで安定化するためには、管理圃場内の生育状態の

分布を取得し、水管理、追肥、刈入れなどの時期を決定する必要がある。従来は、2波長間の演算に基づく葉色値(SPAD)と葉身窒素濃度との相関などを利用し、携帯型接触式葉緑素計を用いた人手による圃場内サンプリングから生育ムラの推定が行われていたが、より「精密」な作物管理のためには、データ

品質（空間分解能、波長分解能）及び作業効率の改善が不可欠である。

(2)近年、ハイパースペクトルセンサを搭載した衛星・航空データの取得が可能となりつつあるが、農作物品質の推定に十分な空間解像度が実現されているとは言い難い。また、雨季と稲作の生育時期が重なる日本型農業事情を考慮した場合、高高度からのデータ取得は困難であると予想される。マイクロ波を利用した合成開口レーダ(SAR)、インターフェロメトリック SAR(InSAR)、ポラリメトリック SAR(POLSAR)は、雲や雨を透過して地物の形状を観測可能であり、農作物の収量などの推定は可能であるが、糖度・水分ストレスなど品質の推定には不向きであると考えられる。

(3)当研究室では、機動性に優れた高精度ハイパースペクトルデータ取得系として、クレーン搭載型ハイパースペクトルデータ取得システムを開発した。本システムでは、ハイパースペクトルラインセンサを先端に搭載したクレーンを旋回させることにより、高空間・波長分解能（空間解像度 5mm、波長分解能 5nm (121 バンド)）で圃場内作物のスペクトル分布を取得するものである。また、本システムは車載型であるため、機動力に優れた短本システムにより、葉色のピュアスペクトルが取得可能となり、より詳細な農作物の生育状態の推定が可能となった。

(4)しかしながら、車両設置・クレーン長等の制限により、提案したクレーン搭載型ハイパースペクトルデータ取得システムでは圃場全体の分布の取得が困難であることが明らかになった。

2. 研究の目的

(1)本研究では、雲や雨の影響を受けることなく広範囲の圃場内の農作物のハイパースペクトルデータを高空間・波長分解能で取得可能なリモートセンシング技術として、産業用無人ヘリコプター搭載型ハイパースペクトルデータ取得技術の確立を目指す。

(2)また、本技術により初めて取得が可能となる高空間・波長分解能のハイパースペクトルデータを利用することで、既存の技術（衛星・航空画像）では困難であった農作物状態の定量的な推定技術の確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、曇天時にも高精度・広範囲のリモートセンシングが可能な産業用無人ヘリコプター搭載型ハイパースペクトルデータ取得技術の確立を目指す。また、本技術により初めて取得が可能となる高空間・波長分解能のハイパースペクトルデータに基づく農作物状態の定量的な推定技術の確立を目指す。

(1) 耐衝撃、耐振動性の改善：予備実験によ

り、無人ヘリコプターの振動がデータ精度に重大な影響を与えることが確認された。また、本研究において使用するハイパースペクトルラインセンサは、プリズム部と CCD 部の接続部が振動に弱い構造である。本研究では、センサ制御部およびセンサ本体の耐衝撃・耐振動特性の改善をおこなう。

(2) 取得データに基づく圃場内作物生育状態の推定：本システムにより初めて取得可能となる高空間・波長分解能のハイパースペクトルデータに基づく作物状態（葉緑素量、葉面積指数等）の推定技術の確立を目指す。

4. 研究成果

(1) 観測機器の試作

本研究では、無人ヘリ“RMAX”（ヤマハ発動機社製：最大積載量：30 kg、実用距離（目視範囲）：150 m（水平距離）、飛行時間：60 min）を観測プラットフォームとして使用した。HS イメージセンサは、1 フレーム毎にライン空間軸と波長軸の 2 次元の光学情報を取得できるプッシュブルーム式ハイパースペクトルリニアアレイセンサを用いた。センサ系は、イメージセンサおよび分光器から構成され、バンド数 121、波長分解能 5 nm、波長幅 0.85 nm、フレームレート 30 fps、センサ視野角約 30° である。また、植物の葉内クロロフィル量の推定には、可視～近赤外域（400-800 nm）における分光反射係数が有効であることから、分光器には観測波長帯 400-1000 nm の ImSpector V10（Specim 社製）を、イメージセンサには MC-781PF（Texas Instruments 社製）を用いた。

試作した観測機器は、無人ヘリに搭載される HS イメージセンサと情報取得用ラップトップ PC（Lenovo 社製）、情報取得補助用の高性能小型 CCD カメラ HG-88s（RF SYSTEM 社製）から構成され、これらは全て飛行時の振動による破損・誤動作を防ぐための防振対策を施した状態で、防除作業時等には何も取り付けられないスペースである機体底部に取り付けた。また、センサや CCD カメラ等に供給される電源は、ヘリ本体のバッテリー（DC12V, 5A）から供給されており、全機器重量は約 11 kg となった。観測機器外観を図 1 に示す。

(2) グループ分割手法による指標抽出

ここで提案するグループ分割手法は、教師付き順序付けアルゴリズムを利用した指標決定手法である。2つの定量データがある場合に、それらの値による順位を比較することで相関を調べることができる。しかし、光学的リモートセンシングを行う際には日照条件の変化や背景の映り込み、空気中の水分による吸収などの問題があり、また地上測定対象が植生などの生物であることも考慮すると、両方のデータに誤差が生じてしまう。そのた

め全てのデータにおいて両方のデータが完全に対応するとは考えにくい。本手法は、そのような測定誤差を吸収するために大域的なグループ分割を行ってから細かい処理を行い指標を決定する。まず、地上測定データで似た状態にあるものをグループ化し、スペクトルデータから指標を用いて計算される特徴量（正規化差分および2次差分指標）について同様の分割が行える指標があるかどうか調べ、指標を決定する。これによって絞りきれない場合には、その時の要素順位差を計算することで指標を決定する。アルゴリズムの流れを図2に示す。



図1 産業用ヘリ搭載型HS取得系

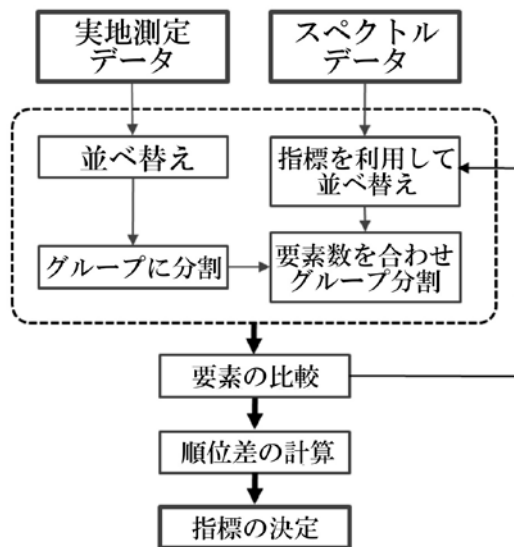


図2 グループ分割手法

(3) グループ分割手法によるいもち病感染圃場検出

米は天候不良や特定の病虫害、病菌によって大きく収量を落とす可能性があるため、安定した供給のために品種改良や農薬の開発が進められている。病菌についてはいもち病、紋枯病、白葉枯病などが知られているが、中

でもいもち病は古来から稲に発生する定型的な病気であり、大幅な減収を招く。近年、長期残効型箱薬剤による防除や、品種改良によりいもち病に強く、良食味である品種の研究が進められているものの、有効と思われていた薬剤に対する耐性菌の出現も報告されており、未だ最も恐れられている病菌である。また、いもち病は収量を落ち込ませるだけではなく、感染した圃場から収穫された米の食味を落とすことも知られている。本研究では、グループ分割手法を用いていもち病検出に有効な指標を抽出することを目的とした。

FieldSpec3により取得した地上観測 HS データおよび被害度指数のデータセットに基づき最適化された指標（波長 595nm, 700nm, 1585nm における反射率に基づく 2 次差分値）を、航空 HS 画像に適用した結果例を図3に示す。図中の三角形で示される部分はいもち病と報告のあった圃場、丸で示される部分は健全圃場である。いもち病圃場において高い値を示すことが確認できた。

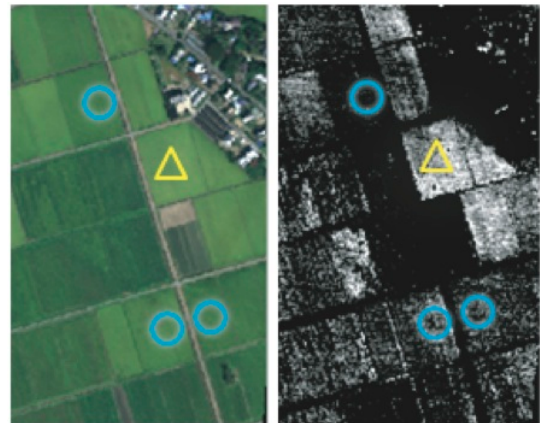


図3 いもち病報告圃場

(4) グループ分割手法による葉面積指標抽出

葉面積指標 (LAI: Leaf Area Index) とは、地表単位面積においてその上方空間に存在する葉の片側面積の割合である。単位面積あたりの植物の生長速度は、葉に吸収される日照量や光合成有効放射量に比例するため、LAI は植生の生長を把握する上で重要な指標である。イネにおいては生産高を向上させるためには特に穂揃期まで LAI を高めておくことが重要であるとされており、それ以降も各成長段階における最適 LAI に合わせていくことの必要性が報告されている。また、葉を大きくする特性を持つ窒素肥料に関しても LAI との相関が確認されているため、LAI の把握は肥料量の調節にも役立つことが期待される。

本研究では、グループ分割手法を用いて LAI 推定指標を作成し、従来手法である NDVI を用いた推定と比較してその有効性を明らかにした。

航空 HS データおよび LAI-2000 により取得した地上計測 LAI のデータセットに基づき最適化された指標 (波長 545nm, 1170nm, 1290nm における反射率に基づく 2 次差分値) による推定値と実測 LAI の関係を図 4 に示す。相関係数が 0.8 以上となり高い相関を示すことが確認された。

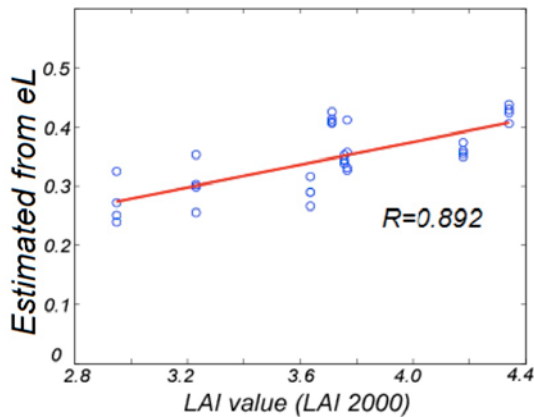


図 4 LAI 推定値と実測値の関係

(5) 包絡線上の仮想反射率に基づく SPAD 値推定

稲作における栄養診断では、稲葉内のクロロフィル量を調べるために葉緑素計 (SPAD-502) が広く用いられている。そして、この出力値 (SPAD 値) を用いて、農業試験場や普及指導機関、JA 等では、稲の栄養診断を行っている。具体的には、7 月上旬中頃の追肥のタイミングや施肥量を判断するために SPAD 値が用いられている。この様に、SPAD 値は、稲の栄養状態を的確に診断可能な重要な値である。しかしながら、SPAD 値の測定は、人間が水田に入り、葉を装置に挟んで測定する必要があり、多くの場合、圃場端の測定となってしまう、圃場全体を代表していないことから、リモートセンシングデータに基づく葉緑素密度分布技術の確立が求められる。

LVI は植生反射スペクトル波形において、緑色域波長 λ_G (540-560 nm 付近) と近赤外域波長 λ_{NIR} (740-770 nm 付近) のピーク反射係数 (R_G, R_{NIR}) を結んだ直線である包絡線を利用した指標である。この包絡線上に設定した反射係数 (仮想反射係数 iR_x) とそれに対応する実反射係数 R_x を 400-800 nm 間の波長で走査し、仮想反射係数 iR_x と実反射係数 R_x の乖離度合を正規化した $LVI = \{(iR_x - R_x)\} / \{(iR_x + R_x)\}$ を評価する。この解析から SPAD 値との相関値が最大となる波長 λ_x を選定することで、LVI を決定した。推定値と実測 SPAD 値の関係を図 5 に示す。 R^2 が 0.7 以上となり高い相関を示すことが確認された。

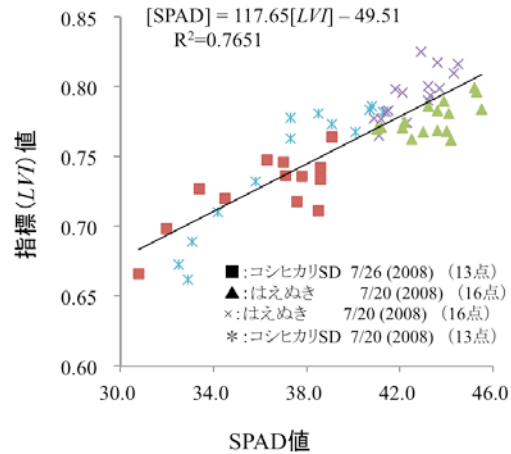


図 5 SPAD 推定値と実測値の関係

(6) 産業用ヘリ搭載型 HS 取得系による HS 画像に基づく SPAD 値推定

2010 年 7 月 15 日に山形県酒田市広野地区における水稲圃場をヘリ観測系にて観測した。観測条件は、飛行高度 5、10、20m、飛行速度 5、15km/h とした。取得データの空間解像度を表 1、2 に示す。また、SPAD 値の取得は 2010 年 7 月 14 日に実施した。

表 1 高度と空間解像度の関係 (速度 15km/h)

飛行高度 [m]	5	10	20
画像幅 [m]	2.68	5.36	10.72
ピクセル幅 [mm]	5.5	11.1	22.1

表 2 速度と空間解像度の関係 (高度 10m)

飛行速度 [km/h]	5	15
画像幅 [m]	5.36	
ピクセル幅 [mm]	11.1	
ピクセル長 [mm]	30-34	80-90

各種観測条件により取得されたデータに LVI を適用することで、高度 20m、速度 15/m の場合に高い相関 ($R^2 > 0.9$) を示すことが確認された。取得データに基づくカラー画像および SPAD 推定値分布を図 6、7 に示す。

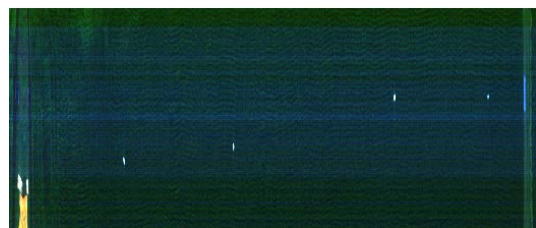
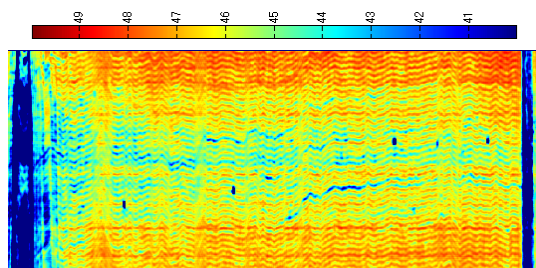


図 6 カラー画像 (R:650nm, G:550nm, B:450nm)



(b) SPAD 値推定強度画像

図 7 カラー画像および SPAD 値推定強度画像

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

①向山信治、小杉幸夫、宇都有昭、齊藤元成也、小田九二夫、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、vol. 50、no. 2、pp. 90-95、2011、査読有り

②宇都有昭、小杉幸夫、尾形俊成、小田川信哉、可視/近赤外ハイパースペクトルデータに基づくナラ枯れ指標 NWI に関する研究、写真測量とリモートセンシング、vol. 49、no. 5、pp. 294-309、2010、査読有り

③浅野太郎、小杉幸夫、宇都有昭、小阪尚子、小田川信哉、小田九二夫、グループ分割手法によるハイパースペクトルデータからの葉面積指数推定、写真測量とリモートセンシング、vol. 49、no. 6、pp. 338-347、2009、査読有り

〔学会発表〕(計 18 件)

①宇都有昭、先崎俊裕、小杉幸夫、齊藤元也、尾形俊成、多バンド正規化植生指標による秋期紅葉山林からのナラ枯れ被害推定、生研フォーラム「広域の環境・災害リスク情報の収集と利用フォーラム」、2011 年 3 月 17 日、東京大学

②向山信治、小杉幸夫、宇都有昭、齊藤元也、小田川信哉、小田九二夫、HS 観測による農作物の状態推定技術実用化に向けた基礎的研究、生研フォーラム「広域の環境・災害リスク情報の収集と利用フォーラム」、2011 年 3 月 17 日、東京大学

③小田川信哉、齊藤元也、小杉幸夫、宇都有昭、小田九二夫、佐々木由佳、航空機ハイパースペクトルセンサ AISA を用いた植生指標による大豆収量予測と雑草侵入および大気補正手法影響評価、日本リモートセンシング

学会第 49 回学術講演会、2010 年 11 月 10 日、鹿児島市

④Kuniaki Uto、Yukio Kosugi、Jiro Sasaki、Statistical analysis of growth levels of rice paddy based on hyperspectral imagery with high spatial resolution, 2nd workshop of hyperspectral image and signal processing: evolution in remote sensing、2010 年 6 月 15 日、レイキャビク

⑤向山信治、小杉幸夫、宇都有昭、包絡線上の仮想反射率を用いた稲葉 SPAD 値の推定、日本写真測量学会年次学術講演会、2010 年 5 月 17 日、東京大学

⑥Kuniaki Uto、Yukio Kosugi、Evaluation of oak wilt index based on genetic programming、First workshop on hyperspectral image and signal processing: evolution and remote sensing、2009 年 8 月 27 日、グルノーブル

⑦Taro Asano、Yukio Kosugi、Kuniaki Uto、Naoko Kosaka、Shinya Odagawa、Kunio Oda、Leaf area index estimation from hyperspectral data using a group division method、2009 International Geoscience and remote sensing symposium、2009 年 7 月 16 日、ケープタウン

⑧Shinya Odagawa、Masatane Kato、Tomoyuki Suhama、Jiro Sasaki、Kuniaki Uto、Yukio Kosugi、Genya Saito、Evaluation of paddy yield and quality estimation methods based on various vegetation indices, NDSI and PLS using BRDF-corrected airborne hyperspectral data、2009 International Geoscience and remote sensing symposium、2009 年 7 月 15 日、ケープタウン

⑨小杉幸夫、宇都有昭、浅野太郎、菊地信輝、尾形俊成、小田川信哉、小田九二夫、航空機搭載ハイパースペクトルセンサを用いたなら枯れの観測と解析、第 120 回日本森林学会、2009 年 3 月 27 日、京都大学

⑩浅野太郎、小杉幸夫、宇都有昭、小田川信哉、小田九二夫、ハイパースペクトルデータにおけるグループ分割手法を用いたもち病検出に関する研究、電子情報通信学会 2009 年総合大会、2009 年 3 月 4 日、愛媛大学

⑪浅野太郎、小杉幸夫、宇都有昭、小阪尚子、小田川信哉、小田九二夫、グループ分割手法を用いたハイパースペクトルデータの葉面積指数推定、第 16 回リモートセンシングフォーラム、2009 年 3 月 2 日、(財)リモートセンシング技術センター

⑫Naoko Kosaka、Yukio Kosugi、Kuniaki Uto、Kunio Oda、Genya Saito、Agricultural field observation using hyperspectral sensor in Syonai、6th international symposium on integrated field science、2008 年 7 月 27 日、東北大学

⑬Yukio Kosugi、Desjardins Guillaume、Yuji Takabayashi、Sildomar T. Monteiro、Makoto Yamaki、Kuniaki Uto、Genya Saito、Low-altitude hyperspectral imaging of naruko integrated field for the interpretation of high-altitude observations、6th international symposium on integrated field science、2008年7月27日、東北大学

⑭Sildomar Monteiro、Kunaiki Uto、Yukio Kosugi、Kunio Oda、Yoshiyuki Iino、Genya Saito、Hyperspectral image classification of grass species in northeast japan、2008 International Geoscience and remote sensing symposium、2008年7月10日、ボストン

⑮Shinya Odagawa、Masatane Kato、Tomoyuki Suhama、Jiro Sasaki、Kuniaki Uto、Yukio Kosugi、Genya Saito、Development of rice yield estimation method based on spaceborne hyperspectral data: preliminary study using airborne hyperspectral data、2008 International Geoscience and remote sensing symposium、2008年7月9日、ボストン

⑯Kuniaki Uto、Yuji Takabayashi、Yukio Kosugi、Toshinari Ogata、Hyperspectral analysis of Japanese oak wilt to determine normalized wilt index、2008 International Geoscience and remote sensing symposium、2008年7月8日、ボストン

⑰宇都有昭、小杉幸夫、尾形俊成、指標 NWI による ASTER 画像からのナラ枯れ発生域抽出、日本写真測量学会平成 20 年度年次学術講演会、2008年6月19日、横浜市

⑱小杉幸夫、高林裕治、宇都有昭、小田九二夫、尾形俊成、ナラ枯れのハイパースペクトル・リモートセンシングの可能性を探る、第 119 回日本森林学会大会、2008年3月27日、東京農工大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇都 有昭 (UTO KUNIAKI)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・助教

研究者番号：90345356