

飛翔体を用いた植物の三次元正規化植生指数の画像化

Three-dimensional NDVI imaging by using SfM technic and flying object

三橋 龍一† 王 丁丁† 福本 義隆† 佐鳥 新‡ 佐々木 正巳†
 Ryuichi Mitsuhashi Teitei Ou Yoshitaka Fukumoto Shin Satori Masami Sasaki

1. まえがき

農作物の生育状況を観測する指数として低高度から観測した正規化植生指数 (NDVI : Normalized Difference Vegetation Index) が使用され始めている。従来から、人工衛星や航空機を使用したリモートセンシングの 1 つとして、広域の観測に使用されている。しかし、人工衛星を使用した場合には北海道内の農協等からの聞き取りでは、高解像度のデータを取得する事が出来ず、更に必要なデータを取得するまでに数か月の期間を要しており、翌年度の参考データとしての利用が主であった。また、航空機による観測では観測データ取得の度に高額な費用を要し、飛行位置以外は斜め方向からの観測になるため、正確な NDVI の取得が困難であった。そのような中、二次元ではあるが 2016 年度から北見工業大学の研究グループが、畑の観測をマルチコプターにより行う試みを始めている。特に北海道のような大規模な水稲栽培が行われている地域では、施肥や水温の差などにより単一の稲田内でも場所によって品質に大きく関わる稲のタンパク質量の時間変化が異なるため、適切な収穫時期の判定情報として、タンパク質量の測定も可能である NDVI の活用の重要性が高まっている⁽¹⁾。

しかし、現在行われている観測は、いずれも飛翔体からの直下、あるいは塔などの高所からの斜め方向からの観測である。本研究は、一般的な畑や水田にも適用可能であるが、いままで観測が困難であった大きく高さのある植物への適用を試みた。そこで、森林の伐採の影響やスギ花粉等の発生予測を行うため、測定対象を樹木として NDVI を計測して、三次元画像化をすることによって高さ方向に広がっている植生の画像化の検討を行った。

2. 正規化植生指数

植生指標 (VI: Vegetation index) とは、植物の光の反射特徴に基づいて算出した値で、植物の活性度を表すものである。VI の年間変動は、気候や成長に左右される植物の活性度分布状況を表すため、VI の変動を解析することは、植物の気候による活性度の変動、さらには地球環境の変動を解析することに繋がる。

植生指数の代表的なものとして NDVI があげられる。こ

の NDVI の算出式は極めて単純で、R を赤色の反射率、IR を近赤外色の反射率とすると次式で表される。

$$NDVI = (IR - R) / (IR + R) \dots \dots \dots (1)$$

したがって、NDVI は -1 ~ +1 に正規化した値を示し、正の値が大きいほど植生が濃いことを示す。図 1 は試作したマルチスペクトルカメラ⁽²⁾で撮影した樹木である。図 1(a) は通常の RGB の波長、図 1(b) は R に代わって IR の波長を用いた画像である。植生の活性度が高いほど IR が R より相対的に大きい値となるため、赤色が強く表示される傾向にある。



(a) R: 620nm, G: 542nm, B: 497nm



(b) R: 760nm, G: 542nm, B: 497nm

図 1 樹木の R+G+B 画像と IR+G+B 画像

NDVI の測定に使用する最適な赤色及び近赤外色の波長は対象とする植物および植生の得たい情報によって異なる。そこで、ハイパースペクトルカメラを使用して、測定に最適な波長を調べた。図 2 に使用した北海道衛星⁽³⁾のハイパースペクトルカメラのブロックダイアグラムを示す。また、本実験に使用したハイパースペクトルカメラ (HSC1700) を図 3 に示す。

使用した HSC1700 は 400 ~ 800nm を 72 バンドでデータ取得するものであり、図 4 に示すように画素ごとに

†北海道科学大学 Hokkaido University of Science

‡北海道衛星(株) Hokkaido-sat CO., LTD.

5.56nm 間隔で光の強度データを取得することが可能である。つまり、ハイパースペクトルカメラで得られる画像データは図 5 に示すように二次元平面に波長方向の情報を加えた三次元データと言える。NDVI の算出に使用する R と IR の波長は測定対象とする植物により異なり、本ハイパースペクトルカメラを利用して樹木の活性度(測定対象の葉緑素量)は、620nm の赤色と 760nm の近赤外色で特徴的に測定できることが明らかになった。この樹木等の植物の測定に最適な波長は、植物ごとに若干の差があることも明らかになった。

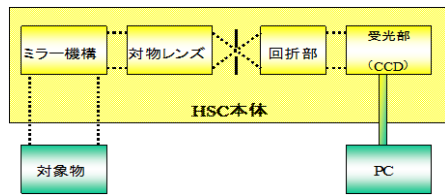


図 2 ハイパースペクトルカメラのブロック図



図 3 ハイパースペクトルカメラ (HSC1700)

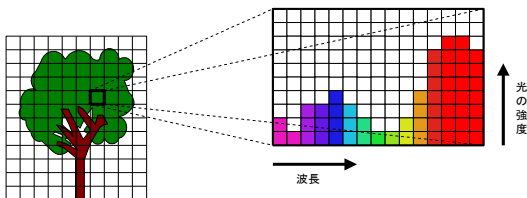


図 4 ハイパースペクトルデータ の概念

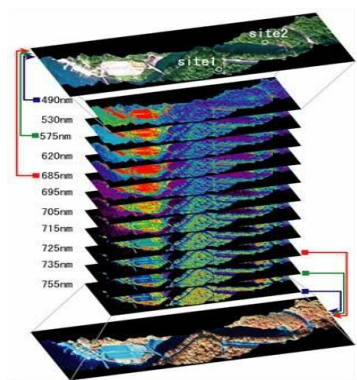
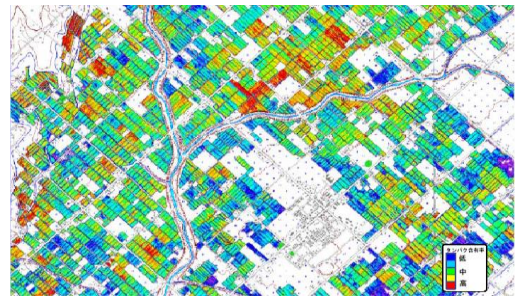
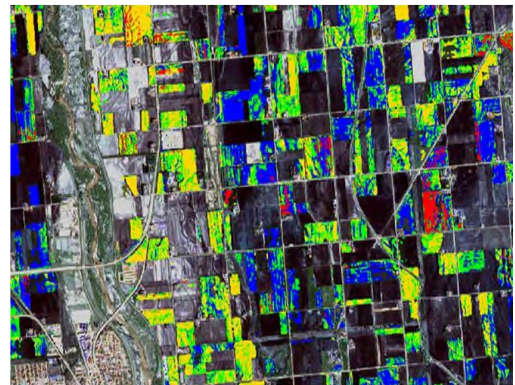


図 5 ハイパースペクトルデータのイメージ

図 6(a)は人工衛星、図 6(b)は航空機に搭載したマルチスペクトルカメラで撮影したデータから、NDVI を導出したタンパクマップである。人工衛星の画像データは解像度が低いため、区画ごとの稲や小麦のタンパク質量しか測定できなかったが、地図と重ね合わせることで、水田ごとに明確にたんぱく質量が異なることを知る事ができた。このことにより、タンパク質量が適量な状態で刈り取る情報を提供することが可能であることが示された。しかし、現状では人工衛星で観測したデータの提供が数か月後であるため、リアルタイムでの活用はできていない。



(a) 測定した水田の収穫期前後のタンパクマップ
(画像提供:富士通北海道システムズ)



(b) 小麦のタンパクマップ
(画像提供:北海道農業試験場)

図 6 人工衛星と航空機のデータから生成した NDVI 画像

3. 飛行体とカメラ

3.1 マルチコプター

近年、マルチコプターを用いた空撮が盛んにおこなわれている。そこで、試験的に撮影用のカメラを搭載する飛行体としてマルチコプターを使用して三次元画像化のための画像データを取得することにした。一般的に市販されているマルチコプターは、GoPro という 200g 以下のカメラを搭載して飛行する性能をもっている。しかし、第 2 章で述べた試作したハイパースペクトルカメラは、バッテリーを含めて約 5kg の重量があり、入手が容易であるマルチコプターでは離陸することが不可能である。そこで、本研究専用にカスタマイズが可能である図 7 に示すマルチコプターを自作した。また、自作することにより市販の小型マルチコプター価格と同程度の約 20 万円で制作

することが可能であった。その機体の構成パーツを表 1 に、諸元を表 2 に示す。本論文で三次元正規化植生指数の画像化に使用したデータは、この制作したマルチコプターに試作したマルチスペクトルカメラを搭載して取得したものである。



図 7 制作したマルチコプター

表 1 制作したマルチコプターの構成パーツ

フレーム	TAROT16mm3k カーボンファイバ
プロペラ	ARRIS カーボンファイバ
フライトコントローラ	DJINAZA-MV2
GPS	DJIGPSCCombo
バッテリー	ZIPPY5000mAh6S20C
ESC	HOBBYWINGXROTOR40A0PT0
コネクタ	XT-60/XT-90-s アンチスパーク
モーター	ARRIS4010380KV ブラシレス
プロポ	FUTABA6J
DCDC コンバータ	DJILite
バッテリーチェッカー	BM-6810 リポバッテリーアラーム

表 2 制作したマルチコプターの諸元

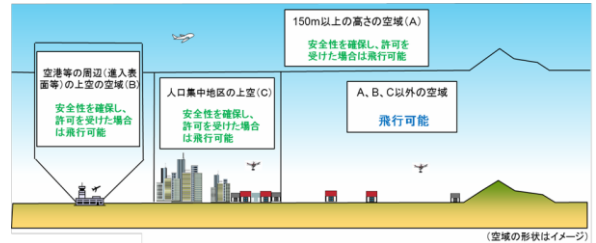
本体重量(バッテリー含まず)	2050g
バッテリー重量	790g(5000mAh)
飛行時間	10,000mAh6s 約 20 分
単モーターシステム出力	最大 2,150g
最大離陸重量	約 10kg
直径(プロペラ含む)	110cm
高さ	40cm

3.2 ハイブリッド型気球

平成 27 年 12 月 10 日より図 8 に示すような新たな航空法が施行され、マルチコプターの飛行に関して厳しいルールが適用になった。そのため、マルチコプターを手軽な飛行体として利用することが困難になった。

そこで、研究開発中の係留式高層プラットフォーム⁽³⁾から生まれたハイブリッド型気球を飛行体として利用することを検討している。北海道内には係留式の飛行船型気球で数百メートルの高度、また小型気球を成層圏までの上空まで上昇させ、地球等の撮影を一部商業化することに成功している例もある。係留式高層プラットフォームの研究では、最終的に定点固定の機体を成層圏に停留す

ることを目標にしているが、その開発過程の各高度別に活用可能な用途を創出し、そのためのプラットフォームを実現することにより、その有用性を広く認知させながら開発を続けていく計画である。その 1 つとして、本研究で必要としている低高度での空撮画像データを取得するシステムで利用するための準備をしている。



(a) 新航空法の規制概要

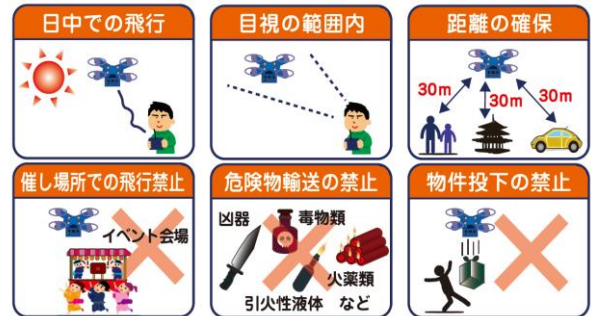
★飛行禁止空域

次の場所では、無人航空機の飛行は禁止されていますので、ご注意ください！飛行させたい場合には、国土交通大臣による許可が必要ですので、所定の手続きを行ってください。



★飛行の方法

無人航空機を飛行させる際には、次の方法に従って飛行させましょう！これらの方法によらずに飛行させたい場合には、国土交通大臣による承認が必要ですので、所定の手続きを行ってください。



(b) 新航空法の詳細説明

図 8 新航空法(平成 27 年 12 月 10 日施行)

(国土交通省のホームページより)

気球は浮力により上昇するが、風が強い時には流されて危険であるため揚げることはできない、その一方で風は風がないと浮上することができない。その両方の特性の優れた点を取り入れて開発を行っているのが図 9 に示すハイブリッド型気球である。テザーを使用することにより、浮力・揚力・抗力の均衡がとれるため、風に流される距離が小さくテザーを調整することにより、飛行位置を自由に設定することが可能である。また、モーター等の高周波の振動もないため、撮影される画像に与える影響もなく、本研究のデータ取得に適したものである。

試作したハイブリッド型気球の浮力は 550g であったが、地上の風速が約 3m/s の状況下では、一般的な釣具屋で入手可能であるマグロ釣り用のリールと釣り糸を使用して実験を行ったところ、リールを巻きあげる時に使用した張力計の最大可能測定値を超えて、正確な張力を計測することが出来なかった。つまり、50kg 以上の物体の搭載が可能であると考えられる。本研究で使用されるマルチス

ペクトルカメラを搭載して、ハイブリッド型気球を使用する場合には、より小型の機体で十分ではあるが、飛翔安定性の面から、同程度のサイズの機体を使用する予定である。



(a) 試作したハイブリッド型気球の外観



(b) 試作したハイブリッド型気球の飛翔実験
図 9 試作したハイブリッド型気球

3.3 マルチスペクトルカメラ

NDVI の算出式には、赤色と近赤外色の反射光を同時に二次元画像として取得する必要があるため、図 10 に示す R(620nm)と IR(760nm)の 2つの帯域画像を同時に取得するマルチスペクトルカメラを試作した。受光素子である CCD のスペックは、400~900nm・1280×960 ピクセルであり、狭帯域のバンドパスフィルタを使用して分光する表 3 に示すスペックの 2 眼カメラである。マルチコプターに取り付けたジンバルに搭載して基礎実験を行うため、小型・軽量であることが求められ、バッテリーを除いた重量は約 160g である。電源は、マルチコプターから供給するものとしている。カメラのレンズ部に狭帯域のバン

ドパスフィルタを装着することにより、400~900nm の任意の帯域を撮影可能である。



図 10 試作した 2 眼式マルチスペクトルカメラ

表 3 試作した 2 種類のマルチスペクトルカメラ

型式	MSC1805C2-OBS_USB2	MSC1805C4-OBS_USB2
特徴	小型・軽量	
インターフェース	USB2.0(ホスト)撮影データ転送に使用	
バンド数(フィルタ数)	2 バンド	4 バンド(1 バンド+RGB: 3 バンド)
分光方式	バンドパスフィルタによる分光	
計測波長	フィルタに準ずる(但し、400nm-900nm 間の波長帯推奨, RGB の場合: 固定)	
フィルタ径	25mm	
ゲイン/露出	オート(フィルタの特性にあわせた自動補正)	
量子化ビット数	8	
画像サイズ(ピクセル)	1,280×960	
データサイズ	14MB	19MB
データ形式	BIL 形式	
撮影時間	約 3 秒	
寸法(突起含まず)	95mm×58mm×66mm	
重量	約 160g(バッテリー含まず)	
電源	5V1A(microUSB)	

4. 実験の概要と実験結果

4.1 実験の概要

NDVI の三次元画像化の実験に先立ち、マルチコプターに搭載したカメラで撮影して取得したデータを使用して、SfM(Structure from Motion)⁽⁴⁾⁽⁵⁾処理によって、三次元画像の合成が可能であるか確認するための実験を行った。試作したマルチスペクトルカメラとほぼ同じ重量のスマートフォンを搭載してカラー画像の取得を行った。図 11 の樹木が測定対象で、約 30 メートルまでの高度で撮影を行った。RGB データを SfM 処理して得られた三次元画像が図 12 である。本実験は GoPro 用ジンバルを使用して行ったものであるが、モーターによる高周波の振動の



図 11 観測実験対象にした樹木

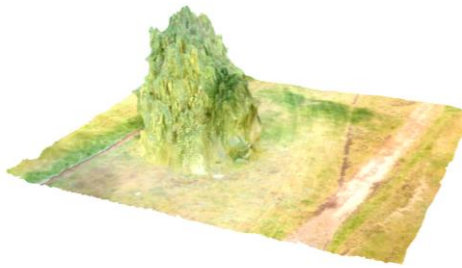


図 12 SfM 処理で可視光の三次元画像化した樹木

影響が僅かに観測された。

三次元正規化植生指数を生成する方法として、図 13 に示すように SfM 処理を行ってから三次元 NDVI 画像を求める方法と、R と IR の一組の画像データから NDVI 画像を生成した後に SfM 処理を行って三次元 NDVI 画像を生成する方法がある。そこで、二次元画像のパノラマ化を行って、どちらの処理手順が有効であるかの実験を行った。その結果、図 14 に示すように、SfM 処理を行った後に NDVI 画像を生成した場合、カメラの振動の影響を大きく受け、二次元正規化植生指数のパノラマ画像ですら得られないことが明らかになった。空撮の際に使用したマルチコプターのモーターでは、それが発生する振動がマルチスペクトルカメラに伝わって来ることにより、画面全体が縞状にゆらゆら揺れる「コンニャク現象」あるいは「ジェロ現象」と呼ばれる画像となることを確認している。その影響が大きいためにパノラマ NDVI 画像の生成に失敗したと考えられる。

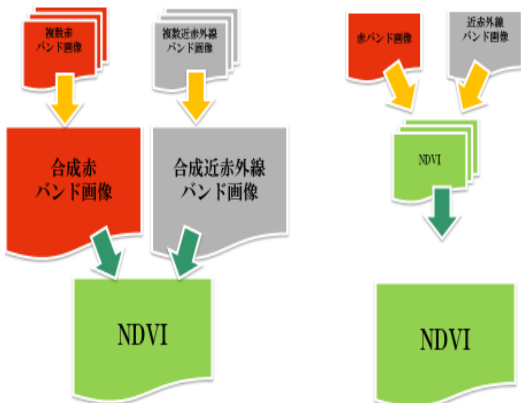
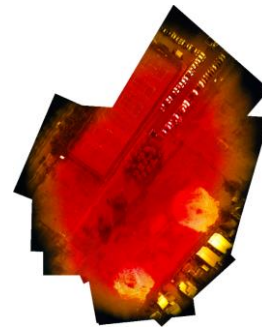
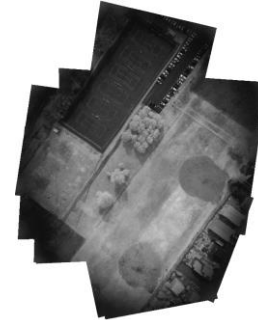


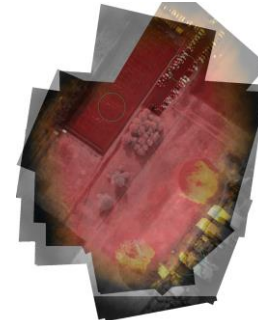
図 13 三次元正規化植生指数画像の 2 つの処理方法



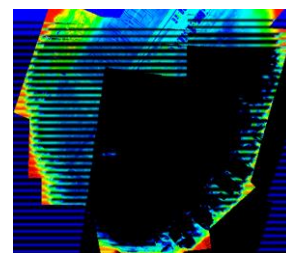
(a) R(620nm) のパノラマ化画像



(b) I R(760nm) のパノラマ化画像



(c) R と I R パノラマ化画像の重ね合わせ図



(d) 二次元 NDVI 画像化例

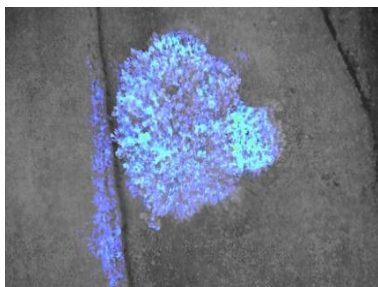
図 14 二次元 NDVI 画像化に失敗した処理例

4.2 実験結果

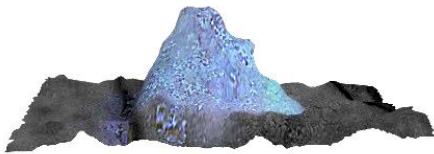
4.1 節の結果に基づいて、本研究では同じ場所の NDVI 画像を生成した後に SfM 処理を行って、三次元正規化植生指数の画像化を行った。図 15(a)は一地点で撮影したデータを二次元の NDVI 処理した画像であり、南方上面(画像の右側)の葉の植生が濃い箇所画素が高輝度に表示されている。これらの二次元 NDVI 画像から生成した三次元 NDVI 画像が図 15(b)であり、実際には簡単な操作で自由

な視点から見た画像を表示することが可能である。また、真上から観測ではわからなかった地面の凹凸状況も表示されている。

さらに、平地に近い農園に対しても基礎実験をおこなった。農園では場所によって生育状況が異なることが多く、収穫時期を直接人間が目視と触覚で確認しなければならないため、その負担は農業従事者にとって非常に大きい。図 16 に示すように、農園の二次元 NDVI 画像と三次元 NDVI 画像を得ることに成功した。試作したカメラのレンズ等の影響で周辺に収差の影響がみられるが、太陽光が強く当たる高い場所の方が農作物の活性度が高いことが確認できる。

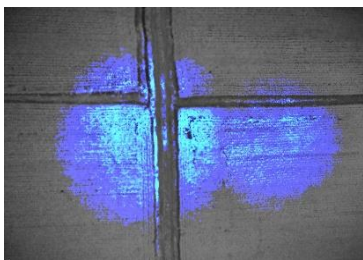


(a) 測定樹木の二次元 NDVI 画像



(b) 測定樹木の三次元 NDVI 画像

図 15 測定対象画像の NDVI 画像化結果



(a) 農園の二次元 NDVI 画像



(b) 農園の三次元 NDVI 画像図

図 16 農園の NDVI 画像化基礎実験結果

以上の結果から、正規化植生指数の三次元画像化は植物の三次元の広がりやの活性度を視覚的に明らかにすることが可能であり、樹木だけではなく様々な農作物の生育状況と地形などの影響による生育差を知ることができ、農業関係者や樹木の管理者にとって有用であることが明らかになった。

5. おわりに

提案した方法により三次元正規化植生指数の画像化が可能であることが明らかになった。本論文で提案した手法は、樹木等の高さ方向に大きく広がっている植物だけではなく、一般的な農園を観測してその二次元 NDVI だけでは得られない生育状況の差異の原因などを探る手段としても活用可能であることを明らかにした。本研究は、札幌オリンピック(1972 年開催)の滑降競技のために恵庭岳の樹木が伐採され、植林などの復元工事が行われたが、40 年以上経過した今でも残るその傷跡が大きな社会問題となっていることに着目し、復元工事のための情報を提供する目的で始めたものである。しかし、より広範囲に提案する手法が適応可能であることが明らかになり、今後は更に応用可能な観測対象を探り、様々な植物の観測実験を続ける予定である。

謝辞

本論文の執筆にあたり、データの取得等に協力して頂いた竹内佑介氏(北海道衛星株式会社)に感謝いたします。また、本研究の一部は、科学研究費補助金(課題番号:16K06310)により行われた。

文 献

- (1) 亀井卓也・伊藤那知・菅井慎也・太田諭志・佐鳥新・千葉一永: 「精密農業高度化のための小型無人航空機を用いた正規化植生指数マップ作成」, 日本航空宇宙学会 - 航空宇宙技術, Vol.12, 2013, pp.111-117(2013)
- (2) 佐鳥新・伊藤那知・竹内佑介・千葉一永・佐々木正巳・三橋龍一: 「超小型衛星搭載用マルチスペクトルカメラの開発」, 日本航空宇宙学会 - 航空宇宙技術, Vol.14, 2015, pp.179-183(2015)
- (3) 三橋龍一・高島竜也・石井一希・佐鳥新・平元理峰・千葉一永・佐々木順也・秋葉謙二郎: 「係留式高層プラットフォーム基礎実験用飛翔体の姿勢計測」, 第 13 回 HASTIC 学術講演会 兼 第 25 回短時間無重力利用に関する講演会 講演論文集, Vol.14, 2015, pp.13-14(2016)
- (4) M.Brown and D.Lowe: "Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features", International Journal of Computer Vision, 74(1), pp.59-73(2007)
- (5) Changchang Wu: "Towards Linear-Time Incremental Structure from Motion", Proc. of the 2013 International Conference on 3D Vision, IEEE Computer Society, pp. 127-134(2013)