

# スペクトル画像を用いた土の種類の見別と含水比の推定に基づく コーン指数の推定

○山内統広 †, 筑紫彰太 †, 田村雄介 †, 山川博司 †, 永谷圭司 †, 藤井浩光 ‡, 千葉拓史 §  
山本新吾 §, 茶山和博 §, 山下淳 †, 浅間一 †

○ Norihiro YAMAUCHI †, Shota CHIKUSHI †, Yusuke TAMURA †  
Hiroshi YAMAKAWA †, Keiji NAGATANI †, Hiromitsu FUJII ‡, Takumi CHIBA §  
Shingo YAMAMOTO §, Kazuhiro CHAYAMA §  
Atsushi YAMASHITA † and Hajime ASAMA †

† : 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻

‡ : 千葉工業大学先進工学部未来ロボティクス学科, § : 株式会社フジタ

E-mail: yamauchi@robot.t.u-tokyo.ac.jp

<要約>本研究では, スペクトル画像を用いて土の種類の見別と含水比の推定を行うことで建設機械の走破性を示す指標の1つであるコーン指数を推定する手法を提案した. 実験結果から, スペクトル画像を用いたコーン指数の推定は可能であることが分かった.

<キーワード>スペクトル画像, 土の種類, 含水比, コーン指数

## 1 序論

土砂災害が発生した場合, 更なる被害を防ぐために, 迅速な復旧工事が必要となる. 迅速な復旧工事を実施するためには, 建設機械を災害現場で使用することが求められるが, 災害現場の地盤が軟弱である場合, 建設機械が転倒する可能性がある. 従って, 復旧工事の前に災害現場における建設機械の走破性の調査が重要になる.

建設機械の走破性を調査する従来手法には, 走破性の指標の1つであるコーン指数を測定する手法がある [1]. コーン指数とは, コーンペネトロメータと呼ばれる器具を地面に挿入し, その際に発生する土の抵抗力を, コーンペネトロメータの上部についているメーターで読み取ることで得られる値である. 土の抵抗力が強いほど建設機械の走破性が高く, またコーン指数も高いので, コーン指数が高いほど建設機械の走破性が高いと判定することができる. これまでコーン指数の測定は人の手で行われてきたが, 災害現場では2次災害の危険が存在するため, 無人でコーン指数を測定する手法が求

められる. 無人でコーン指数を測定する先行研究には, ロボットにコーン指数を測定する器具を装着して遠隔操作する手法が提案されている [2] [3]. この手法は, 人手によるコーン指数測定をロボットに置き換えたものであるが, 測定器具を測定地点に1カ所ずつ接触させる必要があるため, ロボットが進入できない場所でのコーン指数の測定はできない. 一方, 非接触でコーン指数を推定する先行研究には, 水が光を吸収する近赤外の波長帯を撮影した画像を用いてコーン指数を推定する手法が提案されている [4] [5]. この手法は, 画像を用いることでロボットが進入できない場所での推定も可能にしたが, 土に含まれる水の量の指標である含水比にのみ注目しており, 含水比以外でコーン指数に影響を与える土の種類には注目していない. 従って, 推定されたコーン指数の精度が低いという問題がある.

そこで本研究の目的を, 土の種類と含水比の双方に注目した, 非接触での建設機械のためのコーン指数の推定とする.

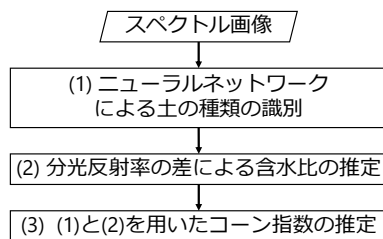


図 1 提案手法の概要

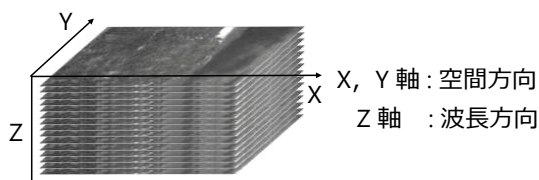


図 2 スペクトル画像

## 2 提案手法

### 2.1 提案手法の概要

提案手法の概要を、図1に示す。本研究では、非接触でコーン指数を推定するために、まず画像を用いて土の種類と含水比の推定を行う。次に、コーン指数は土の種類と含水比に大きく依存する。そこで、土の種類と含水比からコーン指数を推定する。従って、土の種類と含水比の推定を画像を用いて非接触で行うことによって非接触での走破性判定を行う。

土の種類と含水比の推定を行うための画像には、スペクトル画像を使用する。スペクトル画像とは、撮影した対象物からの入射光を分光させることにより、複数の波長帯の光の強さを記録した画像である。一般的なRGB画像がR, G, Bの3波長帯の光の強さを記録した画像であるのに対し、スペクトル画像の波長帯の数は4以上であり、多い場合には数百に及ぶ。スペクトル画像のイメージを図2に示す。図2において、x軸とy軸が空間方向を示し、z軸方向が波長方向を示す。z軸方向に積み重なった画像の枚数が、分光した波長帯の数となる。スペクトル画像に記録された各波長帯の光の強さからそれぞれの波長帯の分光反射率を算出することができ、それらを波長の長さにそって並べることで分光反射率スペクトルを取得できる。

また、物質は、その分子や原子の構造、あるいは物質を構成する微粒子の大きさや形、表面の粗さによって、光の波長ごとの反射、散乱、吸収、そして放射の

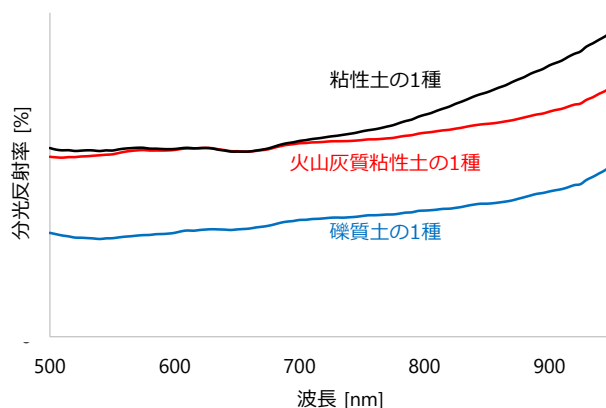


図 3 異なる土の種類分光反射率スペクトル

度合いが異なる [6]。従って、分光反射率スペクトルを用いて、物質の種類や状態を推定することができる。

そこで、本研究では、スペクトル画像から分光反射率スペクトルを取得し、それを用いて土の種類と含水比の推定を行う。以下の2.2節、2.3節、及び2.4節において、図1で示した提案手法の各ステップ(1)、(2)、(3)の詳細を解説する。

### 2.2 ハイパースペクトル画像を用いた土の種類識別

図1の(1)における土の種類を識別するステップでは、異なる土の種類がそれぞれ別の分光反射率スペクトルを持つことを利用する。土の種類が異なると、有機物含有量や、土の粒子の鉱物組成、直径の分布、形状、および表面の粗さなどが異なる。これらの違いが分光反射率スペクトルに影響するため、土の種類によって、分光反射率スペクトルが異なる。土の種類によって分光反射率スペクトルが異なる例を図3に示す。

多くの土の種類を分光反射率スペクトルから識別するためには、記録した波長帯の数が多い分光反射率スペクトルを取得する必要がある。そのためには、波長分解能が高く、記録できる波長帯の数が多いスペクトル画像を使用する必要がある。そこで、本研究では、ハイパースペクトル画像というスペクトル画像を土の種類識別に使用する。ハイパースペクトル画像とは、スペクトル画像のなかでも入射光を分光させた波長帯の数が非常に多く、波長分解能の高いスペクトル画像である。このハイパースペクトル画像から分光反射率スペクトルを取得し、それを3層のニューラルネットワークを用いて分類することによって、土の種類を識別する。

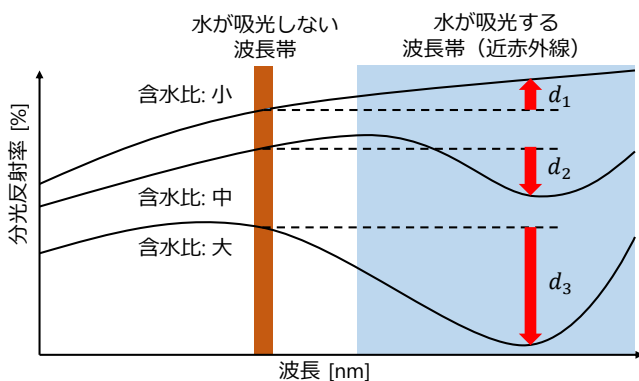


図 4 含水比の増加に伴う分光反射率の減少

### 2.3 マルチスペクトル画像を用いた含水比の推定

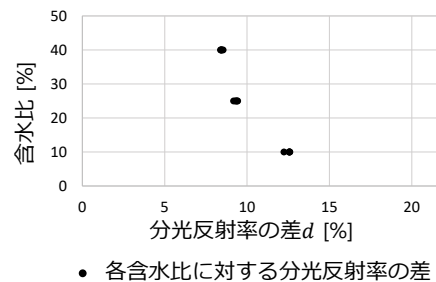
図 1 の (2) における含水比を推定するステップでは、水が近赤外の光を吸収することを利用する。含水比が増加すると近赤外の波長帯の分光反射率が他の波長帯の分光反射率よりも大きく減少するため、近赤外の波長帯の分光反射率から水が光を吸収しない波長帯の分光反射率を引いた差が小さくなる。例として、含水比の増加に伴って、分光反射率スペクトルの、特に近赤外の波長帯の分光反射率が大きく減少するグラフを図 4 に示す。図 4 のグラフにおいて、縦軸が分光反射率、横軸が波長を示す。また、含水比が 1 番低い状態における 2 つの波長帯の分光反射率の差を  $d_1$ 、含水比が真ん中の状態における差を  $d_2$ 、含水比が 1 番高い状態における差を  $d_3$  とすると、

$$d_1 > d_2 > d_3 \quad (1)$$

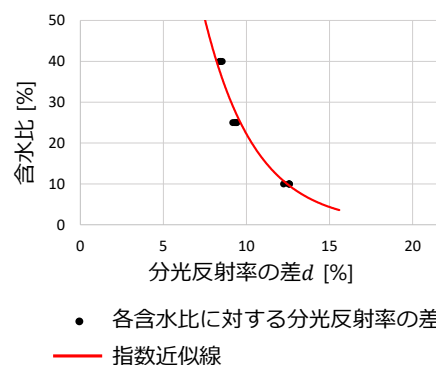
となっていることが分かる。この式 (1) より、含水比が増加すると、近赤外の波長帯の分光反射率から水が光を吸収しない波長帯の分光反射率を引いた差は、逆に減少することが分かる。この性質を利用することによって、含水比を推定する。

水は近赤外の広い範囲の光を吸収するため、近赤外の広い範囲を 1 つの波長帯で取得する必要がある。そこで、本研究では、波長分解能が低いマルチスペクトル画像を使用する。マルチスペクトル画像とは、スペクトル画像のなかでも入射光を分光させた波長帯の数が少ない画像であり、1 つの波長帯あたりの波長幅を長くすることができる。

本研究では、水が光を吸収する近赤外の波長帯として



(a) 含水比と 2 つの波長帯の分光反射率の差の関係



(b) 指数近似線によるモデルフィッティング

図 5 分光反射率の差の関係へのモデルフィッティング

900 ~ 1700nm の波長帯を、そして水が光を吸収しない波長帯として 570nm の波長帯を使用することとした。

その 2 つの波長帯の分光反射率の差と含水比を比較したグラフの例を図 5(a) に示す。この図 5(a) のグラフにおいて、縦軸は含水比、横軸は 2 つの波長帯の分光反射率の差  $d$  を示す。図 5(a) のグラフに示す通り、含水比の減少に伴って、2 つの波長帯の分光反射率の差  $d$  が増加していることが分かる。このグラフに近似線をフィッティングし、そのフィッティングされた近似線を用いることで含水比を推定する。

2 つの波長帯の分光反射率の差  $d$  と含水比のグラフにフィッティングさせる近似線として、本研究では指数近似線を使用する。図 5(a) のグラフに指数近似線をフィッティングさせた様子を、図 5(b) に示す。本研究では、まず最初にそれぞれの土の種類に対して、含水比の異なるサンプルを作り、そのサンプルのマルチスペクトル画像を撮影する。次に、そのマルチスペクトル画像を用いて算出した分光反射率の差を用いてフィッティングした指数近似線を取得し、その指数近似線を

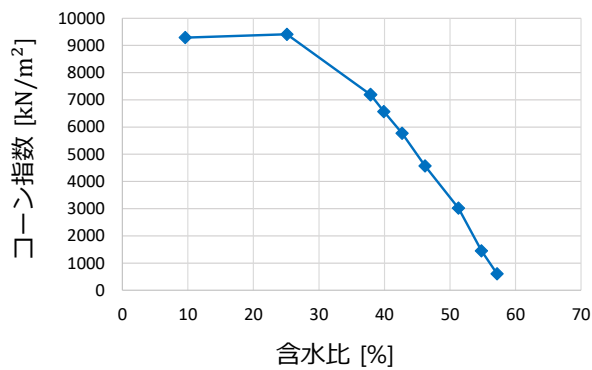


図 6 コーン指数と含水比の関係

用いて含水比を推定する。

## 2.4 土の種類と含水比を用いたコーン指数の推定

図 1 の (3) における土の種類と含水比からコーン指数を推定するステップにおいては、土の種類と含水比がコーン指数に大きく影響することを利用する。コーン指数に大きな影響を与える土の性質として、有機物含有量、土の粒子の鉱物組成や直径の分布、形状、および表面の粗さ、ならびに含水比がある。これらの性質のうち、含水比以外の、有機物含有量、土の粒子の鉱物組成や直径の分布、形状、および表面の粗さは、外部の状況に左右されない土に固有の性質である。そこで、これらの土に固有の性質が同じ土を同じ種類であると定義し、2.2 節で解説した手法でハイパースペクトル画像を用いた土の種類の識別を行うことによって、コーン指数に大きな影響を与える土の性質のうち、まだ分かっていない性質が含水比のみとなる。よって、各土に対し、コーン指数と含水比の関係が分かれば、2.3 節で解説した手法でマルチスペクトル画像を用いた含水比推定を行うことによって、コーン指数を推定することができる。

本研究では、土の種類と含水比からコーン指数を推定するため、土の種類ごとに含水比を変えながらコーン指数を測定しておくことで予め土の種類によって異なるコーン指数と含水比の関係を記録しておく。ある土におけるコーン指数と含水比の関係を示すグラフの例を図 6 に示す。この図 6 のグラフにおいて、縦軸はコーン指数、横軸は含水比を示す。このグラフには、含水比ごとに測定されたコーン指数の値がひし形の点としてプロットされている。この図 6 に示したようなグ

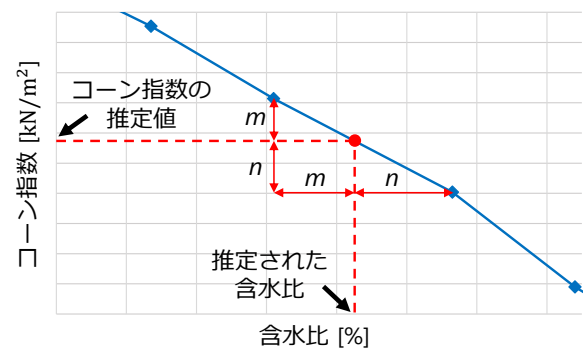


図 7 推定された含水比からのコーン指数の推定

ラフが、土の種類と同じ数だけ記録されており、それらの中から、土の種類を識別することによって、コーン指数推定に使用するべきグラフが分かる。使用するべきコーン指数と含水比の関係を示すグラフにおいて、推定された含水比に最も近い含水比の点を 2 点選び、その 2 カ所の含水比が推定された含水比を内分する比率  $m:n$  を求める。次に、選ばれた 2 点のコーン指数をこの内分比率  $m:n$  で内分する点のコーン指数を、コーン指数の推定値とする。推定された含水比からコーン指数の推定値を求める様子を図 7 に示す。

## 3 実験

提案手法の有効性を確認するための検証実験を行った。ハイパースペクトル画像とマルチスペクトル画像を用いて土の種類の識別、含水比の推定、さらにその 2 つを用いたコーン指数の推定を行い、それらを、実際の土の種類ならびに測定した含水比およびコーン指数との間で比較することによって、提案手法の有効性を検証した。

### 3.1 実験環境

検証実験においてコーン指数推定の対象とした環境は、含水比を調整した工事現場内の屋外の土である。なお、対象とする工事現場内の屋外の土は、含水比が増加した場合に建設機械が走破できない程コーン指数が減少する粘性土である。また、対象とする工事現場内の屋外の環境において、縦 5m、横 3m の長方形の実験場所を 3 カ所作り、それぞれ異なる含水比に調整して検証実験を行った。工事現場内の屋外の様子と 3 カ所の実験現場を図 8 に示す。

また、本研究では、スペクトル画像を撮影するため



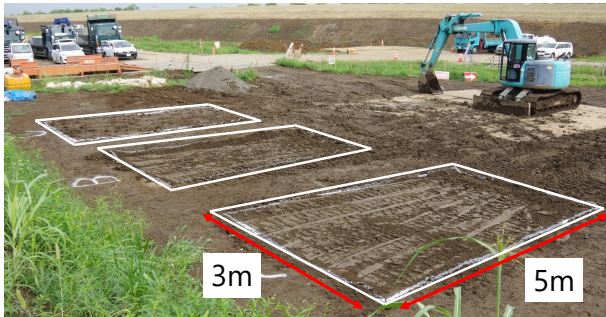


図 8 検証実験の対象とする工事現場内の屋外

に、エヴァ・ジャパン株式会社製の NH-7 というハイパースペクトルカメラと、Tetracam Inc. 製の Macaw というマルチスペクトルカメラを使用した。2つのスペクトルカメラの配置を図9に示す。また、ハイパースペクトルカメラの写真と仕様を図10と表1に、マルチスペクトルカメラの写真と仕様を図11と表2にそれぞれ示す。

スペクトル画像は入射光を4つ以上の波長帯に分光して記録するため、1つの波長帯あたりの光量が一般的なRGB画像のR, G, Bの各波長帯に比べ少ない。従って、一般的なRGB画像に比べて明るい状況で撮影する必要がある。そのため、検証実験においてスペクトル画像の撮影は、天候がよく、晴れている時に行った。

### 3.2 実験手順

まず最初に、異なる含水比に調整した3カ所の実験場所それぞれにおいて、ハイパースペクトル画像とマルチスペクトル画像を撮影した。ハイパースペクトル画像は、事前に撮影しておいた他の5種類の粘性土のハイパースペクトル画像と共に学習用と評価用の画像に分け、学習用の画像でニューラルネットワークの学習を行ったあと、評価用の画像で実験場所の土の種類に対する再現率を求めた。マルチスペクトル画像からは、水が光を吸収する近赤外の波長帯に当たる900～1700nmの波長帯の分光反射率と水が光を吸収しない570nmの波長帯の分光反射率を取得し、その2つの分光反射率の差を用いて指数近似線によるフィッティングを行うことで含水比を推定した。次に、識別した土の種類と推定した含水比から、予め記録していたコーン指数と含水比の関係のグラフを参照することでコーン指数を推定した。最後に、検証実験を行った3カ所の実験場所において含水比とコーン指数の測定を行った。

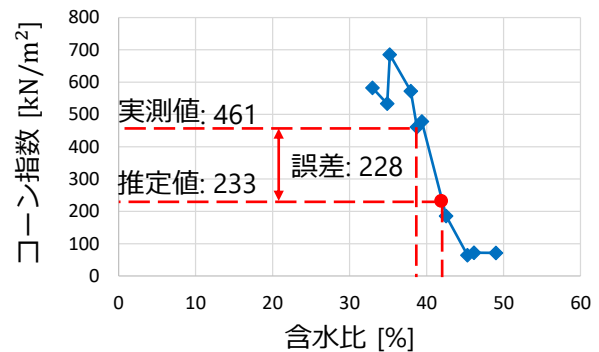


図 13 実験場所の土の含水比とコーン指数の関係

含水比とコーン指数の測定の様子を図12に示す。

### 3.3 実験結果

まず、実験現場の粘性土を含めた6種類の粘性土の土をハイパースペクトル画像で識別した結果、実験現場の粘性土を撮影したハイパースペクトル画像を97.7%の再現率で識別できた。このことから、ハイパースペクトル画像を用いて波長分解能の高い分光反射率スペクトルを取得することで土の種類を識別できることが分かった。

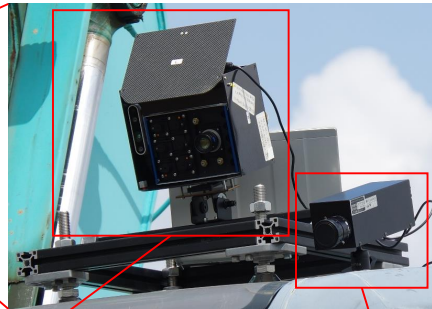
次に、含水比とコーン指数の、実験場所で測定した実測値と提案手法で推定した推定値、実測値と推定値の誤差の絶対値を表3に示す。この表より、含水比の誤差は3つとも小さく、含水比が精度良く推定できていることが分かる。一方、コーン指数の誤差については、表の上から2番目と3番目は精度良く推定できているが、1番上の誤差が大きいことが見てとれる。これは、検証実験の対象となった土の含水比とコーン指数の関係に原因がある。検証実験の対象の土の含水比とコーン指数の関係を示すグラフを図13に示す。図13のグラフにおいて、縦軸および横軸は、図6および図7と同様、それぞれコーン指数と含水比を示す。グ

表 3 含水比とコーン指数の実測値と推定値の比較

含水比 [%]			コーン指数 [kN/m <sup>2</sup> ]		
実測値	推定値	誤差	実測値	推定値	誤差
38.75	42.03	3.28	461	233	228
46.17	47.39	1.22	72	71	1
45.32	48.53	3.21	64	71	7
平均誤差		2.57	平均誤差		78.6



カメラを搭載した  
建設機械



マルチスペクトルカメラ      ハイパースペクトルカメラ

図 9 ハイパースペクトルカメラとマルチスペクトルカメラの配置



図 10 ハイパースペクトルカメラの外観



図 11 マルチスペクトルカメラの外観

表 1 ハイパースペクトルカメラの仕様

製品名 (メーカー)	NH-7 (エバジャパン)
波長	350 ~ 1100nm (ピッチ: 5nm)
波長帯数	151

表 2 マルチスペクトルカメラの仕様

製品名 (メーカー)	Macaw (TETRACAM)
波長 (中心波長-波長幅)	490nm-10nm, 570nm-10nm 671nm-10nm, 800nm-10nm 900nm-20nm, 950nm-40nm 900 ~ 1700nm (近赤外)
波長帯数	7



(a) コーン指数の測定



(b) 含水比の測定

図 12 検証実験における測定の様子

ラフ中の実測値, 推定値, 誤差は, それぞれ表 3 における 1 番上のコーン指数の実測値, 推定値, 誤差を示す. このグラフより, 検証実験の対象となった土の含水比とコーン指数の関係において, 含水比の実測値と推定値の存在する 38% から 42% の間でコーン指数が大きく減少し, 含水比に対するコーン指数の変動が激しいことが分かる. 以上より, 含水比の誤差が他とあまり変わらなくとも, 表 3 の 1 番上のコーン指数の推定値が, 実測値から大きく乖離することが分かった.

#### 4 結論

本研究では, ハイパースペクトル画像とマルチスペクトル画像を用いて, それぞれ土の種類の識別と含水比の推定を行い, その 2 つの結果からコーン指数を推定する手法を提案した. 3.3 節の実験結果より, 含水比に対するコーン指数の変動が穏やかな土に対しては, スペクトル画像を用いた非接触でのコーン指数の推定が可能であることが分かった. しかし, 含水比に対するコーン指数の変動が激しい場合, 含水比の推定値の誤差に, 含水比の変動が穏やかな場合と同じ程度の誤差が生じて, コーン指数の推定値が大きく乖離することも分かった.

今後の課題としては, 含水比の推定精度を向上させることにより, 含水比に対するコーン指数の変動が大きい場合においても, コーン指数の推定精度を向上させることが挙げられる.

#### 謝辞

本研究の一部は, JSPS 科研費 JP18K13810 の支援を受けた.

#### 参考文献

- [1] J. V. Perumpral: “Cone Penetrometer Applications - A Review”, *Transactions of the ASAE*, Vol. 30, No. 4, pp. 939–944 (1987)
- [2] S. Chhaniyara, C. Brunskill, B. Yeomans, M. C. Matthews, C. Saaj, S. Ransom, and L. Richter: “Terrain Trafficability Analysis and Soil Mechanical Property Identification for Planetary Rovers: A Survey”, *Journal of Terramechanics*, Vol. 49, pp. 115–128 (2012)
- [3] 古屋 弘, 山田 祐樹, 栗生 暢雄, 清酒 芳夫, 森 直樹: “遠隔搭乗操作によるマルチクローラ型無人調査ロボットの開発”, 大林組技術研究所報, No. 80, pp. 1–10 (2016)
- [4] R. Fernández, H. Montes, and C. Salinas: “VIS-NIR, SWIR and LWIR Imagery for Estimation of Ground Bearing Capacity”, *Sensors*, Vol. 15, No. 6, pp. 13994–14015 (2015)
- [5] A. L. Rankin, and L. H. Matthies: “Passive Sensor Evaluation for Unmanned Ground Vehicle Mud Detection”, *Journal of Field Robotics*, Vol. 27, No. 4, pp. 473–490 (2010)
- [6] G. A. Shaw and Hsiao-hua K. Burke: “Spectral Imaging for Remote Sensing”, *Lincoln Laboratory Journal*, Vol. 14, No. 1, pp. 3–28 (2003)