スペクトル画像を用いた土質パラメータの推定に基づく 建設機械の走破性判定*

 筑紫 彰太 **
 山内 統広 ***
 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 **
 淺間 一 **

Judgement of Trafficability of Construction Machinery Based on Estimation of Soil Parameters from Spectral Images

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

In the event of a disaster, unmanned construction with remotely operated construction machinery is critical for quick disaster recovery. Those machines can weight up to several tons and can easily sink on inadequate soil. Therefore, it is important to judge the trafficability of remotely operated construction machinery at a disaster site. In this research, we propose a non-contact method for judging trafficability. The proposed method classifies the soil type and estimates the water content using spectral images. The cone index is then estimated and the trafficability is judged from the cone index. As experiment, we judged the trafficability for a real construction machine using the proposed method. The results showed the effectiveness of the proposed method based on soil type classification and water content estimation.

Key words: spectral images, trafficability, soil parameters

1. 序 論

1.1 研究背景

土砂災害が発生した場合、迅速な復旧活動が必要である.し かし、2次災害の危険から人の立ち入りが困難な災害現場も存 在する. そのような災害現場では、遠隔操作型の建設機械を使 用した無人化施工が有効である.特に災害発生直後の現地調査 や建設機械の運用では、2次災害の危険性が高いため、遠隔操 作型の建設機械での対応が期待されている.しかし、土砂災害 発生直後の災害現場は、建設機械が走破できない軟弱な地盤も 存在する.このような地盤を建設機械が走行した場合,建設機 械がスタック,または転倒する可能性がある.また,建設機械 がスタック、転倒した場合、その建設機械が動けなくなるだけ でなく、復旧活動全体の妨げになり、作業が停滞する. さらに、 災害発生直後の軟弱な地盤は、土に含まれる水分(以降、含水 比)が非常に多く、全ての地盤において建設機械が走破できな いほど軟弱なこともある. そのような場合, 建設機械を走破さ せるために,軟弱な地盤の土質改良を行うことがある¹⁾.この 土質改良は、土の種類や含水比などの土質パラメータに基づい て、固化材の種類、添加量を決めるため、土の種類や含水比な どの土質パラメータを定量的に推定する必要がある.従って, 遠隔操作型の建設機械での円滑な復旧活動のためには、災害現 場において、土の種類識別、含水比の推定、建設機械の走破性 判定が必要である.

従来,建設機械の走破性は、コーン指数 (kN/m²) によって判

† 東北大学(仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-1)

定されており、コーン指数の算出は、コーン貫入試験によって 行われている²⁾³⁾. コーン貫入試験は、コーンペネトロメータ と呼ばれる計測装置を地盤に挿入し、その際に発生する土の抵 抗力を計測することでコーン指数を算出できる. 土の抵抗力が 強いほど、コーン指数が高くなり、履帯式の建設機械は、コー ン指数 200 kN/m² 未満で走破できなくなる⁴⁾. しかし、2 次災 害の危険が存在する災害現場において、人間がコーンペネトロ メータで地盤のコーン指数を算出し、走破性を判定することは 大変危険である. また、地盤のコーン指数は、土の種類と含水 比によって一意に決まる⁵⁾. よって、遠隔操作型の建設機械で 復旧活動を行うためには、土の種類と含水比に基づき建設機械 の走破性を判定することが有効である.

1.2 関連研究

これまでに走破性判定に関する研究は様々行われてきた.地 盤に接触して,走破性を判定する研究として,古谷らは,貫入 試験機を搭載したクローラロボットを用いて,遠隔操作で貫入 試験を行い,地盤調査を行った⁴⁾.しかし,この手法は,左右 クローラの間に貫入試験機が搭載されており,計測したい地盤 上に直接移動して貫入試験を行う必要があり,走行前に計測し たい地盤の走破性判定はできない.そのため,走破不可能な軟 弱地盤を走行した場合,クローラロボットがスタックするた め,災害現場での走破性判定には使用できない.

Zacny らは,月面において,移動ロボットの走破性判定を目 的に貫入試験機を搭載した移動ロボットを開発した⁶.この貫 入試験機は,移動ロボットの先端に取り付けられており,計測 したい地盤上に移動することなく貫入試験が可能である.しか し,1回の計測で1点の計測しかできないため,計測点の近く に軟弱地盤があり,走行してしまった場合,スタックしてしま う可能性がある.そのため,災害現場での建設機械の移動を想 定した走破性判定には適さない.よって,災害現場での建設機 械の走破性判定においては,1回の計測で,建設機械が走行で

^{*} 原稿受付 令和2年5月28日

掲載決定 令和2年8月20日

^{**} 正 会 員 東京大学(東京都文京区本郷 7-3-1)

^{***} 東京大学

^{††} 千葉工業大学(千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

^{***} フジタ(東京都渋谷区千駄ヶ谷 4-25-2)

きる車体幅の範囲の走破性を判定する必要がある.

これらの関連研究に対して,非接触で走破性を判定する研究 として,Rankinらは,車輪型の無人車両の経路選択のために, 画像から乾燥した地盤と湿った軟弱地盤や水溜りの領域検出手 法を提案した⁷⁾.この手法は,スペクトル画像を用いて,画像 中に含まれる乾燥した地盤と軟弱地盤の反射光強度を比較する ことで,それらの領域を検出した.しかし,この手法は,湿っ た地盤や水溜りの領域を無人車両が回避することを目指して おり,これらの領域を走行することは考慮していない.そのた め,乾燥した地盤と軟弱地盤の相対的な反射光強度の違いから 領域を検出しており,軟弱地盤の土の種類の識別,定量的な含 水比の推定はできない.

Roemi らは、農業、森林用の車輪型車両が地盤を破壊しない 走行を実現するために画像から地盤のコーン指数を推定した⁸⁾. この手法は、植生や地盤を含むスペクトル画像から地盤の領域 を検出し、反射光強度を線形回帰モデルにフィッティングする ことで、地盤のコーン指数を推定した.しかし、土の種類の識 別はしておらず、反射光強度から地盤のコーン指数を直接推定 している.また、対象とした地盤のコーン指数は、約 1000~ 10000 kN/m²の非常に硬い地盤を対象としており、本研究が対 象とした 200 kN/m² 未満の軟弱地盤とは大きく異なる.よっ て、これまでの関連研究は、本研究が対象とする災害現場での 建設機械の走破性判定には適さない.

1.3 研究目的

ここまでに述べたように、2次災害の危険性がある災害現場 において、遠隔操作型の建設機械で復旧活動を行うためには、 非接触で土の種類の識別と含水比の推定に基づいた建設機械 の走破性判定が有効である.また、これまでに災害現場での 200 kN/m² 未満の軟弱地盤を対象とし、土の種類の識別と含水 比の推定に基づいた建設機械の走破性判定は行われていない. よって、本研究の目的を、非接触での土の種類の識別と含水比 の推定に基づいた建設機械の走破性判定手法の構築とする.

1.4 研究概要

本研究は、非接触で建設機械の走破性を判定するために、ス ペクトル画像を用いて土の種類の識別と含水比の推定を行い, この土の種類と含水比に基づき,コーン指数を推定,建設機械 の走破性を判定する.ここで、スペクトル画像とは、入射光を 分光させ,複数の波長帯の光の強さを記録した画像である⁹⁾. この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,放射の度合いが異なる¹⁰⁾.そのため,分光 反射率及びそのスペクトルを用いることは、物質の種類や状態 を推定するための有効な手段である.よって、このスペクトル 画像から取得した分光反射率及び分光反射率スペクトルに基づ き、土の種類の識別と含水比の推定を行う.この結果から、地 盤のコーン指数を推定し、建設機械の走破性を判定する.

1.5 論文構成

本稿は,以下の4章からなる.第2章は,本研究で提案す る土の種類の識別と含水比の推定に基づくコーン指数推定及び 建設機械の走破性判定手法について述べる.第3章は,提案 した手法を実機に搭載し,実環境での提案手法の有効性を検証 した.よって,実験結果ならびに考察を述べる.最後に第4章 で,まとめと今後の展望を述べる.

2. 提案手法

2.1 提案手法の概要

本研究は、図1のフローチャートに示すように,非接触で建 設機械の走破性を判定するために,スペクトル画像から取得し た分光反射率及び分光反射率スペクトルを用いることで,土の 種類の識別と含水比の推定を行う.

図1のフローチャートの土の識別と含水比の推定における分 光反射率及び分光反射率スペクトルの取得では、R,G,Bの3 波長帯以外の波長帯も取得可能なマルチスペクトル画像を用い て,非接触での土の種類の識別と含水比の推定を行う.本研究 は、含水比の推定において、土と含水比の分光反射率の関係を 解析によって明らかにし、その関係に基づいた走破性判定手法 を新規に提案する.

図1のフローチャートのコーン指数の推定では、土の種類 の識別と含水比の推定に基づき、コーン指数を推定する.ここ で、建設機械の走破性を判定する場合、移動機構や車体幅など の建設機械の特性を考慮する必要がある.従って、移動機構や 車体幅などの建設機械の特性を考慮したコーン指数の閾値に基 づき、建設機械が走破可能か不可能かの走破性を判定する.

2.2 土の種類の識別手法

土には様々な性質があり、その性質の程度を示すための指 標が複数存在する。例えば、土の性質には、土の粒子の材質や 直径の分布、形、表面の粗さ、土に含まれる水の量などがある ^{11/12/13)}.それらを示す指標として、土の粒子の鉱物組成、有機 物含有量、粒度分布、球形率、含水比があり、これらの土の性 質の程度を示す指標のことを土質パラメータと呼ぶ¹⁴⁾.土は 種類によって、この土質パラメータが異なるため、分光反射率 スペクトルも異なる。そのため、土の種類を識別するために は、土の分光反射率スペクトルを計測することが有効である。 また、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、波長帯の数が多い分光反射率スペクトルを計測する必 要がある。そのため、スペクトル画像のなかでも入射光を分光 させた1つの波長帯の幅が短く、波長帯の数が非常に多いマル チスペクトル画像を土の種類の識別に使用する。



Fig. 1 Flowchart of trafficability judgment

マルチスペクトル画像は、ラインスキャン方式で対象とする 物体を走査するように撮影するため、マルチスペクトル画像を 構成する画素ごと、あるいは画素の列ごとに入射光を分光させ て得た分光反射率スペクトルを記録し、それを終えると、次の 画素や画素の列の入射光を分光して分光反射率スペクトルを記 録する.そのため、スペクトル画像の画素ごとに、撮影した物 質の分光反射率スペクトルが記録されている.従って、土の種 類を識別するために、マルチスペクトル画像の1画素ごとの 分光反射率スペクトルを使用する.また、この分光反射率スペ クトルは、非線形であり、相互に相関性が高い多数波長の連続 データである¹⁵⁾.

そこで、本手法は、多クラスの土の種類の識別であったこ と、入力データとなる分光反射率スペクトルは、非線形であ り、相互に相関性が高い多数波長の連続データであったこと、 入力データとなるスペクトル画像1ピクセルの波長帯数が数百 波長帯と、RGB 画像1ピクセルの3波長帯と比較して、次元 数が大きかったことから、土の識別において、ニューラルネッ トワークを採用した.この手法のニューラルネットワークの 構造は、土の種類を識別するために、全結合とし、土の種類ご との分光反射率スペクトルを計測し、それぞれの土の分光反射 率スペクトルの特徴量を学習しておく.そのため、ニューラル ネットワークへの入力は、分光反射率スペクトルとなり、その ノード数は、計測可能な波長帯の数となる.また、出力は、土 の種類となり、そのノード数は、識別したい土のクラス数とな る.本手法では、この学習済のニューラルネットワークを使用 し、土の種類を識別する.

2.3 土の含水比の推定手法

2.3.1 土の含水比と分光反射率の解析

土は,粒径によって,水を透す性質を表す透水係数が異なる. 粒径が 2mm 以上の礫や粒径が 2mm~0.074mm の砂の地盤は, 透水係数が高く,水を透し易く,粒径が 0.005mm 以下の粘土 の地盤は,透水係数が低く,水を透し難い性質がある¹⁶⁾.そ のため,土の種類が粘土の場合に,コーン指数 200 kN/m² 未満 の軟弱地盤になる可能性が非常に高い.よって,図1に示すフ ローチャートの土の種類の識別において,粘土の地盤が識別さ れた場合に含水比の推定を行う.

土は、同じ種類、同じ波長帯であっても含水比によって分光 反射率が異なり、同じ種類の土の場合、含水比が高く湿った土 に対して、含水比が低く乾燥した土は、分光反射率が相対的に 高くなる傾向がある¹⁷⁾.また、水は、近赤外の1450 nm を最 大吸収波長として、1300 nm~1700 nm の波長帯に、光を吸収 する波長帯がある¹⁸⁾.そこで、本研究では、これらの特性から 土の含水比と分光反射率の関係を明らかにし、その関係に基づ き、土の含水比の推定手法を新規に提案する.

土は、含水比の増加に伴って、分光反射率が低くなる傾向に ある.また、水が光を吸収する波長帯では、含水比の増加に 伴って、分光反射率の変化量が大きくなる.さらに、水が光を 吸収しない波長帯では、含水比の変化に対して、分光反射率の 変化量が小さくなる特性がある.ここで、含水比が高い土にお ける、水が光を吸収する波長帯と吸収しない波長帯の分光反射 率の差を d_h とする.また、含水比が低い土における、水が光 を吸収する波長帯と吸収しない波長帯の分光反射率の差を d_l とする.その場合、分光反射率の差 d_h は d_i よりも小さくなる ことに本研究は着目した.

そこで、含水比と分光反射率の関係を明らかにするために、 5種類の土を解析した.解析した土の基準は、粒度(土を構成 する粒子の大きさの度合) 0.075 mm 未満の細粒分が 50 % 以 上の土とした. 解析には, 粘性土の藤森粘土, 火山灰質粘性土 の関東ロームに分類される伊勢原ローム、粘性土や火山灰質粘 性土に粒径, 粒度が類似している硅砂9号を使用した. これ らの藤森粘土,関東ローム, 硅砂は, 土質工学分野において, 地盤強度や土質改良などの試験、検証に最もよく使用される ¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾代表的な土である.この代表的な3種類の土に加えて, 国内で採取した火山灰質粘性土の境沢ローム、粘性土の宮崎粘 土の2種類を使用し解析した.また,以降,藤森粘土,伊勢原 ローム, 硅砂9号, 境沢ローム, 宮崎粘土をそれぞれ, Fu, Is, K9, Sa, Miと記載する. 解析では、それぞれの土で、含水比 が10%, 25%, 40%のサンプルを用意し、水が光を吸収する 900~1700 nm の波長帯の分光反射率 r1* と水が光を吸収しな い 570 nm の波長帯の分光反射率 r2* の差 d* を解析した(*は hまたはmまたはlを表す). 解析結果を 図 2 に示す. 図 2 のグラフは、縦軸が含水比、横軸が分光反射率を示す. グラフ 中の緑三角は、水が光を吸収する 900~1700 nm の波長帯の分 光反射率 r1*, 青クロスは,水が光を吸収しない 570 nm の波 長帯の分光反射率 r2* である.赤丸は、水が光を吸収する 900 ~1700 nm の波長帯の分光反射率 r1* と水が光を吸収しない 570 nm の波長帯の分光反射率 r2* の差 d* である.分光反射 率の差 d_{*} は,式(1)で表され,黒実線が,分光反射率の差 d_{*} に指数近似線をフィッティングした結果である.

$$d_* = r1_* - r2_*. \tag{1}$$

これらの結果から,本解析で対象とした5種類の土において は,土の種類が同じであっても含水比によって,分光反射率が 異なることを確認した.また,含水比が増加するに従って,水 が光を吸収する波長帯と水が光を吸収しない波長帯の分光反射 率の差 *d*^{*} が減少する傾向が見られた.従って,含水比が低, 中,高のとき,それぞれの分光反射率の差を *d*¹, *d*^m, *d*^h とす ると,式 (2)の関係が成り立つことを解析から明らかにした.

$$d_l < d_m < d_h. \tag{2}$$

従って、この解析結果に基づき、水が光を吸収しない波長帯 の分光反射率 $r2_*$ と水が光を吸収する波長帯の分光反射率 $r1_*$ を計測し、分光反射率の差 d_* を算出することが、含水比の推 定に有効である。そこで、図2に示すように、土の種類ごとに 含水比を変えつつ分光反射率の差 d_h 、 d_m 、 d_l を算出し、土の 種類によって異なる指数近似線を記録しておく。

2.3.2 土の含水比の推定

含水比の推定手法では、識別した土に対応した 図3 に示す ような指数近似線を用いることで、土の含水比を推定する.図 3 は、含水比と土に対応した指数近似線の例を表し、グラフの 横軸が分光反射率、縦軸が含水比を表している.含水比の推定 は、実際の現場で撮影した地盤のマルチスペクトル画像の水が 光を吸収する 900~1700 nm の波長帯の分光反射率 r1e と水が 光を吸収しない 570 nm の波長帯の分光反射率 r2e から式(1) を用いて、分光反射率の差 de を算出する.この分光反射率の 差 de を図3 に示すように、指数近似線に代入することで、土 の含水比 we を推定する.



Fig. 2 Relationship between water content and spectral reflectance

2.4 建設機械の走破性判定手法

建設機械の走破性は、走行する建設機械と地盤のコーン指数 によって決まるため、建設機械の移動機構や車体幅などの特性 を考慮して、走破性を判定する必要がある.また、1.1節で述 べたように、地盤のコーン指数は、土の種類と含水比によって 一意に決まる⁵⁾.従って、土の種類の識別と含水比の推定から 地盤のコーン指数を推定する.この推定したコーン指数に基づ き、建設機械の特性を考慮した走破性判定手法を構築する.

土のコーン指数と含水比の関係の例を図4に示す.図4の縦 軸はコーン指数、横軸は含水比を表し、ひし形の点が含水比ご とにコーンペネトロメータで実測定されたコーン指数を示す. この含水比とコーン指数の関係のように、土は、含水比の増加 に従って、コーン指数が減少し、土の種類によって傾きが異な る.よって、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つつコーン指数を測定し、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.この関係を使用することで、コーン指数を推定する.コー ン指数の推定は、図5に示すように、推定された含水比 we に 最も近い含水比 w1 と w2 の2 点を選び, 2 点の含水比 w1 と w₂を内分する比率 m:nを求める.次に,含水比 w₁と w₂ のコーン指数 q1 と q2 をこの内分比率 m:n で内分する点を コーン指数の推定値 qe とする. よって, このグラフから算出 される地盤のコーン指数に基づき,建設機械の特性を考慮し, 地盤のコーン指数の閾値を設定して、建設機械の走破性を判定 する.

3. 実 験

3.1 実験概要

本研究で提案する土質パラメータ推定に基づく建設機械の走 破性判定の有効性を検証するために屋外実験を行った.実験 環境は 図 6 に示すように,大きさが長さ 5 m ×幅 3 m ×深さ 0.5 m で,粘性土の野田粘土(以降,Nd)を使用した.このと き,含水比が 36.59 %,コーン指数が 642.6 kN/m² の強固な地 盤 Nd_h と含水比が 45.32 %,コーン指数が 64.08 kN/m² の軟 弱な地盤 Nd_s の 2 カ所を用意した.それぞれの地盤は,全て 掘削,水を加えて撹拌し,含水比の偏りが小さくなるように調 整した.この実験環境において,建設機械に搭載したマルチス ペクトルカメラを用いて,土の種類の識別,含水比の推定を行 い,地盤のコーン指数を算出,その結果に基づき建設機械の走 破性を判定する.

3.2 実験方法

建設機械の走破性判定を行うために,事前に実験現場の地盤 をマルチスペクトルカメラで撮影し,ニューラルネットワーク の学習をするためのマルチスペクトルカメラ画像と土と含水比 の関係を算出するためのマルチスペクトルカメラ画像を取得し た.土の種類は,2.3節で述べたように,礫や砂の地盤は,含 水比が高い場合でも軟弱な地盤になる可能性は低いため,2.3 節の5種類の土に加え,粘性土として,実験現場の土 Nd の1 種類を使用した.

本実験では、これら6種類の土の分光反射率スペクトルを 学習したニューラルネットワークで、土の種類を識別する.こ の結果に基づき、識別された土に対応した含水比の関係を用 いて、土の含水比を推定し、地盤のコーン指数を推定、走破 性を判定する.このとき、判定結果の有効性を検証するため に、走破可能、走破不可能のどちらが判定された場合におい ても、実際に建設機械を走行させ確認した.建設機械は、質量 13400 kg、全長7.44 m、全幅2.49 m、全高2.73 mのコベルコ 建機日本株式会社の履帯式の油圧ショベル SK130UR-1E を使 用した.また、建設機械の特性を考慮し、移動機構が履帯式で あったため、地盤のコーン指数の閾値を200 kN/m²とした.



Fig. 3 Water content estimation method



Fig. 4 Relationship between cone index and water content

3.2.1 土の種類の識別

土の種類の識別は、2.2節で述べたように、非常に多くの波 長帯の分光反射率スペクトルを計測することが有効であった. 従って、土の種類の識別では、画像解像度が 2048×1080 画素 で,可視光の波長帯を含む,350 nm~1100 nm の範囲の波長 帯で、分解能が151の分光反射率スペクトルを計測可能なエ ヴァ・ジャパン株式会社製のマルチスペクトルカメラ NH-7 を 使用し、波長帯の数が非常に多いマルチスペクトル画像を取得 した. 事前に取得した,6種類の土の学習用マルチスペクトル 画像で,ニューラルネットワークの学習を行った.ニューラル ネットワークは、2.2節で述べた構成で、入力層のノード数は、 マルチスペクトルカメラで計測可能な波長帯数から 151,中間 層のノード数は65、出力層のノード数は、識別したい土の種 類のクラス数から6とした.中間層の活性化関数はReLU,出 力層の活性化関数は Softmax を使用した. 中間層と出力層の間 ではドロップアウトを行い, ニューラルネットワークの最適化 には RMSporp を使用した. データは, 1280×1024 画素のマル チスペクトル画像から抽出した 360000 画素を使用し,1 画素 毎に土の種類を識別した.このとき、学習用データとテスト用 データは、異なるマルチスペクトル画像を使用し、データの割 合が4:1となるように、k=5でk分割交差検証を行った. バッチサイズを128,12 エポックでニューラルネットワークの 学習を行い,評価用データを用いて,土の種類を識別した.

3.2.2 土の含水比の推定

土の含水比の推定も6種類の土を使用した.事前に取得した,6種類の土のマルチスペクトル画像を用いて,それぞれの 土に対応した土と含水比の関係を算出した.土の含水比の推定 は,2.3節で述べたように,水が光を吸収する波長帯と水が光 を吸収しない波長帯を計測することが有効であった.従って, 土の含水比の推定では,画像解像度が1280×1024 画素で,水





Fig. 6 Experiment environment

が光を吸収する 900~1700 nm の波長帯と水が光を吸収しない 570 nm の波長帯を計測可能な Tetracam Inc. 製のマルチスペク トルカメラ Macaw を使用し,波長帯の数が少ないマルチスペ クトル画像を取得した.

実験現場の土の含水比と分光反射率の関係を解析するため に、実験現場の含水比が異なる土の水が光を吸収する近赤外 の波長帯と水が光を吸収しない波長帯の分光反射率の差 d を 算出した.実験では、6 種類の土の含水比と分光反射率の関係 を用いることで、3.2.1 項で識別された土の含水比を推定した. このとき、含水比を推定する範囲は、横幅を建設機械の全幅と し、奥行を実験環境の改良した地盤内とした.そのため、強固 な地盤は、470×680 画素の範囲、軟弱な地盤は、400×590 画 素の範囲とし、その範囲内の含水比の平均値を推定した.

3.2.3 走破性の判定

土の種類の識別と含水比の推定に基づき建設機械の走破性を 判定した.実験現場の土のコーン指数と含水比の関係を解析す るために,実験現場の含水比が異なる土のコーン指数をコーン ペネトロメータで計測した.実験では,6種類の土の含水比と コーン指数の関係を用いることで,3.2.1項で識別された土の コーン指数を推定した.このとき,コーン指数を推定する範囲 は,含水比の推定と同様に,強固な地盤を,470×680 画素の範 囲,軟弱な地盤を,400×590 画素の範囲とし,その範囲内の コーン指数の平均値を推定した.

最後に,建設機械の走破性を判定した.走破性判定は,強固 な地盤の470×680 画素の範囲と,軟弱な地盤の400×590 画素 の範囲において,走行可能,不可能な範囲を明らかにするため に,それぞれの判定範囲を10 画素×10 画素のグリッドに分 割,各グリッドは,3.2.1 項で識別した土であることを前提と し,グリッドごとに含水比の平均値,コーン指数の平均値を推 定し,走破性を判定した.また,判定結果の有効性を確認する ために,走行不可能と判定された場合においても実際に走行し 走破性を確認した.

3.3 実験結果

3.3.1 土の種類の識別結果

実験環境の粘性土を含めた6種類の土を,波長帯の数が非常 に多いマルチスペクトル画像の分光反射率スペクトルで識別し た結果を図7(a)に示す.図7(a)の混同行列の縦軸は,真の土 の種類を示し,横軸は,提案手法によって,識別された土の種類 を示す.この結果から,実験環境の土Ndは,Precision 97.3%, Recall 97.0%の精度で識別した.

3.3.2 含水比の推定結果

土の種類の識別によって,実験環境の土と同じ土 Nd が推定 されたため,波長帯の数が少ないマルチスペクトルカメラで分 光反射率スペクトルを計測,土 Nd に対応した図 7(b)の土と 含水比の関係を用いて,実験環境の含水比を推定した.その結 果,強固な地盤 Nd_hは,実測含水比 36.59% に対して,推定含 水比 31.92% となり,軟弱な地盤 Nd_sは,実測含水比 45.32% に対して,推定含水比 48.36% となった.この結果から,そ れぞれの地盤の含水比を,絶対誤差 12.8% と 6.71% で推定 した.

3.3.3 走破性の判定結果

土の種類の識別によって,実験環境の土と同じ土 Nd が推定されたため,土 Nd に対応した図 7(c)の含水比とコーン指数の関係からコーン指数を推定した.その結果,強固な Nd_h は,実測 コーン指数 642.6 kN/m² に対して,推定コーン指数 608.8 kN/m² となり,軟弱な Nd_s は,実測コーン指数 64.08 kN/m² に対して,推定コーン指数 71.4 kN/m² となった.この結果から,それぞれの地盤のコーン指数を,絶対誤差 5.26 % と 10.3 % で推定した.

最後に、10 画素×10 画素のグリッドごとに含水比の平均値、 コーン指数の平均値を推定し、走破性を判定した。 2 つの地盤 の走破性判定結果を図8(a)、図9(a) に示す.赤線が走破性を 判定した範囲、黄色のグリッドが走破不可能と判定した地盤を 表す.その結果、強固な地盤 Nd_h は、走破性判定をした範囲 内の97.0%の領域を走破可能と判定し、軟弱な地盤 Nd_s は、 走破性判定をした範囲内の72.9%の領域を走破不可能と判定 した.この走破性判定結果に対して、油圧ショベルの走行試験 を実施したところ、強固な地盤 Nd_h では、図8(b) に示すよう に走破可能であり、軟弱な地盤 Nd_s では、図9(b) に示すよう に油圧ショベルの履帯が土に埋まり走破不可能となったことを 確認した.

3.4 考察

土の種類の識別結果から、土の種類を識別できることを確認 した.この考察として、土の種類の識別に 350 nm~1100 nm の広い範囲かつ高分解能の分光反射率スペクトルを用いること で、土の粒子の粒度分布や球形率などの詳細な土質パラメータ の違いを計測できたためであると考える.加えて、ニューラル ネットワークを用いることで、相互に相関性が高い多数波長の 非線形データから特徴を抽出できたためであると考える.

土の含水比の推定結果から,本研究で新規に提案する水が 光を吸収する近赤外の900 nm~1700 nm の波長帯と,水が光 を吸収しない570 nm の分光反射率の差に基づき,含水比推定 する手法が有効であることを確認した.この考察として,特 徴が異なる2つ波長帯を計測したことに加えて,近赤外を含 む900 nm~1700 nm の広い範囲の波長を1つの波長帯として 分光させたため,温度変化や湿度変化などの外乱に起因する近 赤外の光を吸収する波長帯の多少の変化に対して,ロバストで あったためであると考える.

走破性判定の結果から,土の種類と含水比に基づいた走破性 判定手法が有効であることを確認した.この考察として,コー ン指数は,土の種類と含水比から一意に決まり,これらの土質 パラメータを高い精度で推定できたためであると考える.

4. 結 論

本研究では、2次災害の危険性がある災害現場での復旧活動 のために、土と含水比の分光反射率の関係を解析によって明ら かにし、その関係に基づいた走破性判定手法を新規に提案し た. 土の種類の識別においては, 波長帯の数が非常に多いマル チスペクトル画像から取得した、広い範囲かつ高分解能の分光 反射率スペクトルを用いて, ニューラルネットワークで土の種 類を識別する手法を構築した. 含水比の推定においては, 近赤 外を含む、波長帯の数が少ないマルチスペクトル画像から取得 した水が光を吸収する波長帯と水が光を吸収しない波長帯の分 光反射率の差に着目し、含水比の違いによる2つの波長帯の分 光反射率の差の関係を解析によって明らかにした.この関係に 基づき土の含水比を推定する手法を構築した. 建設機械の走破 性判定においては、土の種類と含水比に基づき、コーン指数を 算出し、建設機械の特性を考慮して、走破性を判定する手法を 構築した.これらの提案手法に基づき,実験を行った結果,実 験環境の土を Precision 97.3 %, Recall 97.0 % の精度で識別, 含水比を,平均誤差率 9.74 % の精度で推定,コーン指数を,平 均誤差率 7.76 % の精度で推定した.また、これらの結果に基 づいた走破性判定において、軟弱な地盤 Nds を走破不可能と 判定し、実際に建設機械で走行した結果、履帯が軟弱地盤に埋 まり走行できないことを確認した.よって,非接触での土の種 類の識別と含水比の推定に基づいた建設機械の走破性判定手法 を新規に構築した.

今後の展望について、本研究では、強固な地盤と軟弱な地盤 での検証であったが、今後は、土の種類が異なる環境や、含水 比、コーン指数が異なる環境²²⁾での検証を行い、適用性を検 証する.また、解析で使用した5種類の土は、手法構築におい て、有効なデータであったが、日本国内、世界の粘性土を網羅 しておらず、必要十分ではない側面もあると考える.そのた め、実用性を考えた場合、土の種類を増やすことや実際の土砂 崩れ現場の土での検証を行う必要があると考える.さらに、ス ペクトル画像を用いたニューラルネットワークでの土の識別を 高精度で実現できたことから、含水比推定やコーン指数推定、 走破性の判定にも有効であると考えられる.従って、学習ベー スでの土の識別、含水比推定、コーン指数推定、走破性判定に ついて検討する.

参考文献

- 早瀬幸知,青木浩章:災害対応ロボットへの取り組み,建設マネジメント技術,5,(2014),23.
- J. Mulqueen, J. V. Stafford and D. W. Tanner: Evaluation of Penetrometers for Measuring Soil Strength, Journal of Terramechanics, 14, 3, (1977), 137.
- J. V. Perumpral: Cone Penetrometer Applications A Review, Transactions of the ASAE, 30, 4, (1987), 939.
- 4) 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,80, (2016),10.
- 5) 赤井浩一, 柴田徹: 粘土の含水量変化にともなう沖積層強度の推移に ついて, 土木学会誌, 40, 10, (1955), 51.
- K. Zacny, J. Wilson, J. Craft, V. Asnani, H. Oravec, C. Creager, J. Johnson and T. Fong: Robotic Lunar Geotechnical Tool, Proceeding of the









(b) Relationship between water content and spectral reflectance

Fig. 7 Experimental result

(c) Relationship between water content and corn index at experimental site





(b) Results of verification experiment Fig. 8 Experimental results on hard ground $\rm Nd_h$



(a) Judgment result of trafficability

(b) Results of verification experiment Fig. 9 Experimental results on soft ground Nd_s

2010 ASCE Earth and Space, (2010).

- A. L. Rankin and L. H. Matthies: Passive Sensor Evaluation for Unmanned Ground Vehicle Mud Detection, Journal of Field Robotics, 27, 4, (2010), 473.
- Roemi Fernández, Héctor Montes and Carlota Salinas: VIS-NIR, SWIR and LWIR Imagery for Estimation of Ground Bearing Capacity, Sensors, 15, 6, (2015), 13994.
- Shoji Tominaga, Spectral Imaging by a Multichannel Camera, Journal of Electronic Imaging, 8, 4, (1999), 332.
- G. A. Shaw and Hsiao-hua K. Burke: Spectral Imaging for Remote Sensing, Lincoln Laboratory Journal, 14, 1, (2003), 3.
- 11) 小田匡寛, 榎本文勇, 鈴木正: 砂粒子の形状・組成が砂の土質工学的 性質に及ぼす影響に関する研究, 土と基礎, 19, 2, (1971), 5.
- 12) J. A. Okello: A Review of Soil Strength Measurement Techniques for Prediction of Terrain Vehicle Performance, Journal of Agricultural Engineering Research, 50, (1991), 129.
- 13) A. N. Flores, D. Entekhabi and R. L. Bras: Application of a Hillslopescale Soil Moisture Data Assimilation System to Military Trafficability Assessment, Journal of Terramechanics, 51, (2014), 53.
- 14) 渡部要一, 植田智幸, 三枝弘幸, 田中政典, 菊池喜昭: 性能設計概念 に基づいた実用的土質定数設定法, 土木学会論文集 C, 63, 2, (2007), 553.
- 15) 井上吉雄, 食糧-農業インテリジェンスのためのリモートセンシン グ信号利用法, 計測と制御, 55,9,(2016),750.
- 16) 梅田浩司,柳澤孝一,米田茂夫:日本の地盤を対象とした透水係数 データベースの作成,地下水学会誌, 37, 1, (1995), 69.
- 17) 山本晴彦,本條均,脇山恭行:分光反射特性による九州の表層土壌水 分の推定,農業気象,46,4,(1991),223.

- 中島利郎, 的場修: 近赤外光の吸光特性を利用した水の相状態(液相, 固相)の検出, 第57回自動制御連合講演会講演論文集,(2014), 1822
- 19)田中知樹,望月美登志,吉野広司,茶園裕二:中性化 PS 灰の軟弱土 改良特性について,第38回地盤工学研究発表会発表講演集,(2003), 657.
- 20) 脇中康太,谷本俊輔,石原雅規,佐々木哲也:地震履歴が砂の液状 化強度およびコーン貫入抵抗に及ぼす影響に関する動的遠心模型実 験,日本地震工学会論文集,15,6,(2003),44.
- 21) 欧国強,石川芳治,前田昭浩,草野慎一:関東ロームの侵食抵抗特 性,砂防学会誌,47,3,(1994),11.
- 22) 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, 淺間 一: スペクトル画像を用 いた土の種類の識別と含水比の推定に基づくコーン指数の推定, 動 的画像処理実利用化ワークショップ 2020 講演論文集(DIA2020), (2020), 254.