

地表面に対する光源とスペクトルカメラの位置関係を考慮した スペクトル画像によるコーン指数推定

Cone Index Estimation with Spectral Images

Considering Poses of Light Source and Camera with Respect to Ground Surface

○学 山口勇希 (東京大) 小松 廉 (東京大) 正 筑紫彰太 (近畿大) 王 鈺晟 (東京大)
正 永谷圭司 (東京大) 千葉拓史 (フジタ) 茶山和博 (フジタ)
正 浅間 一 (東京大) 安 琪 (東京大) 正 山下 淳 (東京大)

Yuki YAMAGUCHI, The University of Tokyo
Shota CHIKUSHI, Kindai University
Keiji NAGATANI, The University of Tokyo
Kazuhiro CHAYAMA, Fujita Corporation
Qi AN, The University of Tokyo

Ren KOMATSU, The University of Tokyo
Yusheng WANG, The University of Tokyo
Takumi CHIBA, Fujita Corporation
Hajime ASAMA, The University of Tokyo
Atsushi Yamashita, The University of Tokyo

In unmanned construction for landslide recovery, it is important to know the strength of the ground to prevent construction machinery from getting stuck due to the softness of the ground. However, a problem with wide-range ground strength estimation in previous studies is that unevenness and inclination variation of the surface can reduce the accuracy of the estimation, so this study aims to propose a cone index estimation method that is robust to unevenness and inclination variation. The proposed method uses a reflectance model to estimate spectral reflectance from spectral images considering the poses of the light source and the camera with respect to the ground surface, and then estimates the cone index from this spectral reflectance. The results of indoor validation experiments confirm the effectiveness of the proposed method.

Key Words: cone index, spectral images, unmanned construction, reflectance model

1 序論

1.1 研究背景

日本は世界に比べて地震や豪雨、噴火などの自然災害が高い頻度で発生している。このような自然災害は土砂災害を誘発する場合が多い。土砂災害による人的・経済的被害を軽減するためには、建設機械を投入して復旧作業を迅速に行う必要があるが、作業中に作業員が二次災害に巻き込まれる危険性がある。そのため、二次災害を防ぐために操縦者が建設機械を遠隔操作する無人化施工の需要が高まっている [1]。また、災害現場に軟弱な地盤が存在する場合、建設機械がスタックや転倒を起こす可能性がある。建設機械のスタックや転倒が発生すると、その建設機械を立て直すために復旧作業が遅延・中断してしまう。無人化施工の場合では車体の傾きや振動の微小な変化の知覚に操縦者の体性感覚を頼れないため、軟弱な地盤でのスタック等の回避を遠隔操作中に行うことが困難になる [2]。そこで、軟弱な地盤を回避するための方法として、あらかじめ地盤強度を調査し、建設機械が走行可能な範囲を把握することが考えられる。この調査は建設機械を投入する前に行われる必要があり、迅速さが求められる。

1.2 先行研究

地盤強度を表す指標としてコーン指数がある [3]。コーン指数から各建設機械の走行が可能か判断できる。通常、コーン指数は人がコーンペネトロメータという棒状の器具を地面に貫入して測定を行うが、災害現場では二次災害に巻き込まれる危険性がある。遠隔でコーン指数を測定する

手法として、コーン指数を測定するための器具を搭載したロボットを遠隔操作する手法が挙げられる [4]。この手法は人による測定をロボットで代替するものであり、測定箇所の地面に1箇所ずつ測定器具を貫入する必要がある。そのため、広範囲の測定には時間がかかり、迅速に復旧作業に取り掛かることが困難になる。

筑紫らはスペクトル画像を用いて一度に広範囲の地盤に対してコーン指数を推定する手法を提案している [5]。スペクトル画像とは複数の波長帯の光の強度を記録した画像である。この手法では分光反射率が既知である校正用シートと地盤のスペクトルを比較して地盤の分光反射率を求め、土の種類と含水比、及びコーン指数を推定する。しかし、分光反射率を求めるときに地表面に対する光源やカメラの位置関係が考慮されていないという問題点が存在する。一般に、物体表面に対する光源や観測の幾何的な位置関係によって同じ物体でも観測される反射光強度が変化する。同様に、災害現場に存在する地表面の凹凸や傾斜の変化などで地表面と光源である太陽やスペクトルカメラとの位置関係に変化が生じると、反射光強度も変化する。そのため、地盤の分光反射率が正しく推定されず、コーン指数推定の信頼性も低下する。そこで本研究の目的を、地表面の凹凸や傾斜の変化に頑健なコーン指数推定手法の提案とする。

2 提案手法

2.1 対象とするシステムの概要

本研究が目指す最終的なシステムの概要を図1に示す。Light Detection And Ranging (LiDAR), Global Naviga-

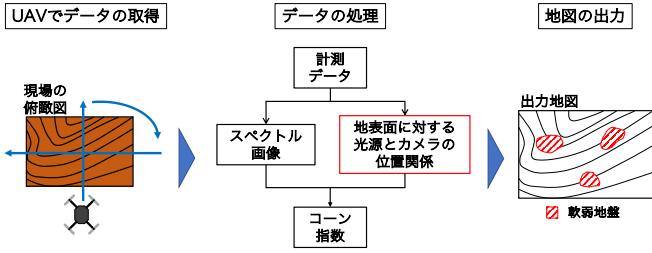


Fig.1 Overview of the system

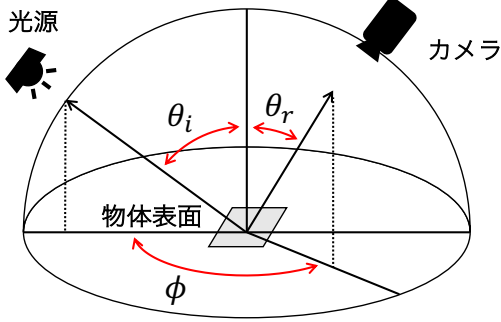


Fig.2 Angular parameters used in reflectance models

tion Satellite System (GNSS) コンパス、スペクトルカメラを搭載した Unmanned Aerial Vehicle (UAV) に災害現場の上空を複数方向から飛行させ、データを取得する。LiDAR からは三次元の環境地図、GNSS コンパスからは UAV の緯度や経度、姿勢、方位を取得可能である。緯度・経度と時刻から太陽の高度と方位角が計算できる。また、事前に校正を行えば、計算した太陽の高度・方位角や環境地図、UAV の姿勢、方位から地表面に対する光源とスペクトルカメラの位置関係を求めることができる。地盤のスペクトル画像及び、スペクトル画像撮影時の地表面に対する光源とスペクトルカメラの位置関係からコーン指数を推定する。推定したコーン指数から軟弱地盤の範囲を判断し、地図上に反映する。操縦者はこの地図を参照して軟弱地盤を回避しながら建設機械を遠隔操作する。本論文では地表面に対する光源とスペクトルカメラの位置関係とスペクトル画像からコーン指数を推定する手法について述べる。

2.2 分光反射率の推定

本研究では、地表面に対する光源とスペクトルカメラの位置関係を考慮するために物体の反射特性を表現する反射モデルを利用する。反射モデルに用いられる角度パラメータを図 2 に示す。 θ_i 、 θ_r 、 ϕ は物体表面から見た光の入射や観測の方向を表し、地表面の凹凸や傾斜の変化はこれらのパラメータの変化に相当する。以降では θ_i 、 θ_r 、 ϕ をまとめて Θ と記述する。反射光は拡散反射成分と鏡面反射成分にわけることができるが、鏡面反射成分は物質の分光特性を反映していないため、拡散反射成分をコーン指数推定に用いる。拡散反射を表現するモデルとして、Lambert モデルと Oren-Nayer モデルが挙げられる。前者は理想的な拡散反射を表し、 θ_i が同じならば、反射光強度はどの方向から観測しても変化しない。一方で、後者は物体の表面を V 字型の凹みの集合としてモデル化し、物体表面に対す

る光源や観測の位置関係を考慮することで、より現実に近い反射を表現可能としている [6]。そのため、本研究では分光反射率推定に利用する反射モデルとして Oren-Nayer モデルを採用した。Oren-Nayer モデルにおける反射光強度 $L(\Theta, \sigma, \lambda, \rho_{\lambda_i})$ は次式で求めることができる。

$$L(\Theta, \sigma, \lambda, \rho_{\lambda_i}) = \frac{\rho_{\lambda_i}}{\pi} E_{0\lambda_i} \cos \theta_i \left[C_1(\sigma) + C_2(\alpha, \beta, \phi, \sigma) \cos \phi \tan \beta + C_3(\alpha, \beta, \sigma) (1 - |\cos \phi|) \tan \frac{\alpha + \beta}{2} \right] + 0.17 \frac{\rho_{\lambda_i}^2}{\pi} E_{0\lambda_i} \cos \theta_i \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.13} \left[1 - \cos \phi \left(\frac{2\beta}{\pi} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \alpha &= \max(\theta_i, \theta_r), \\ \beta &= \min(\theta_i, \theta_r), \\ C_1 &= 1 - 0.5 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.33}, \\ C_2 &= \begin{cases} 0.45 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.09} \sin \alpha & \text{if } \cos \phi \geq 0 \\ 0.45 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.09} \left[\sin \alpha - \left(\frac{2\beta}{\pi} \right)^3 \right] & \text{otherwise} \end{cases}, \\ C_3 &= 0.125 \left(\frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.09} \right) \left(\frac{4\alpha\beta}{\pi^2} \right)^2, \end{aligned} \quad (2)$$

である。 λ_i はスペクトル画像での波長、 ρ_{λ_i} は波長ごとの物体の反射率、 σ は物体の表面粗さ、 $E_{0\lambda_i}$ は光源からの入射光強度を表す。

式 (1)、式 (2) に使われているパラメータのうち、 $E_{0\lambda_i}$ は分光反射率が既知の校正用の物質を用いてあらかじめ求めることができる。また、 Θ はここでは既知とする。実際の運用では 2.1 項で述べたようなシステムを用いれば Θ を取得可能である。一方、 σ と ρ_{λ_i} は未知であり、簡単のため次のように二段階にわけて σ と ρ_{λ_i} を推定する。まず、 σ を定数とみなして離散的に値の候補を与え、それぞれの σ について全測定条件におけるモデルと測定値の相対誤差の二乗和が最小となる ρ_{λ_i} を波長ごとに求める。そして、求めた ρ_{λ_i} を用いて、全測定条件・全波長における相対誤差の二乗和が最小となる σ を求める。この σ と対応する ρ_{λ_i} を推定値とする。

2.3 コーン指数の推定

コーン指数は土粒子の鉱物組成や粒度分布、球形率、含水比などの土質パラメータに大きな影響を受ける。また、物質の種類や状態に応じて異なる分光反射率を得ることができるため、分光反射率から土質パラメータを推定することができる。つまり、分光反射率とコーン指数には関連があり、分光反射率からコーン指数を推定できることが期待

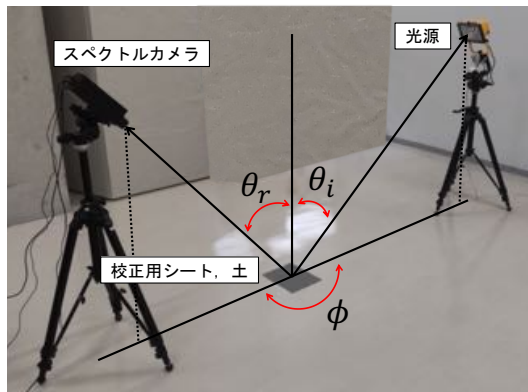


Fig.3 Experimental environment



Fig.4 Soil compacted in the mould

される。本研究では、まず、線形判別分析を用いて分光反射率から土の種類を推定する。次に、推定された土と同じ種類の土で学習が行われたランダムフォレスト回帰 [7] のモデルを用いて、分光反射率からコーン指数を推定する。このとき線形判別分析とランダムフォレスト回帰に用いる分光反射率は同じものである。

3 検証実験

提案手法の有効性を確認するために、検証実験を行った。実験環境を図 3 に示す。実験は屋内で行い、光源としてハロゲンランプを使用した。土を入れた容器または校正用シートを中央に置き、ハロゲンランプまたはスペクトルカメラを載せた三脚を周囲に設置する。図中の θ_i , θ_r , ϕ を変化させて、測定条件を変える。スペクトルカメラはエバ・ジャパン株式会社製の NH-7、土は市販の赤土、真砂土、珪砂を用いた。校正用シートは分光反射率が既知であり、光源のスペクトルを計算するために用いられる。

また、コーン指数の測定を行う場合には JIS A 1228 「締固めた土のコーン指数試験方法」に従う。ただし、図 4 のようにモールド内で土を締固めた後、コーンペネトロメーターによるコーン指数の測定を行う前にスペクトル画像の撮影を行う。

4 実験結果・考察

4.1 分光反射率推定

赤土について、 $\theta_i = 45^\circ$, $\phi = 180^\circ$ とし、 θ_r を 0° から 70° まで 5° 間隔で変化させてスペクトル画像を取得した。

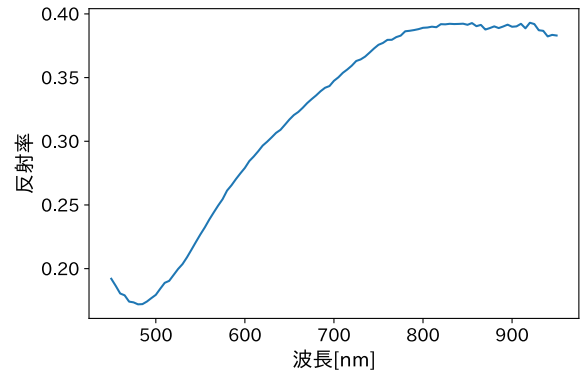


Fig.5 Estimated spectral reflectance of red clay

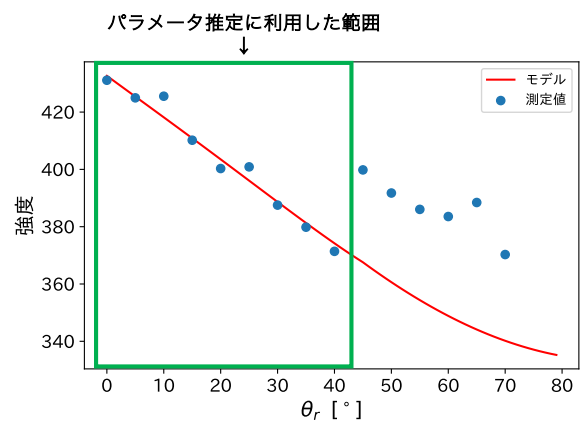


Fig.6 Comparison of measurements and models ($\theta_i = 45^\circ$, $\phi = 180^\circ$, $\lambda_i = 750 \text{ nm}$)

その結果、赤土での反射光スペクトルが θ_r によって大きく変化することがわかった。つまり、測定条件による反射光スペクトルの変化を考慮していない既存手法では推定される分光反射率に違いが生じる。また、 $\theta_r = 45^\circ$ では鏡面反射によるものと思われるピークも確認された。コーン指数の推定には拡散反射成分を用いる必要があるので、本研究では鏡面反射が顕著でない $\theta_r < \theta_i$ のデータのみを分光反射率推定に用いることとした。

$\theta_r < \theta_i$ となる θ_r が $0^\circ - 40^\circ$ のデータを用いて、提案手法に従ってパラメータ推定を行った。このとき、スペクトル画像から土の領域を切り出し、その領域での平均の反射光強度を測定値として推定に用いた。推定に用いる σ の候補として 0.01 間隔で 0 から 1 まで与えた。その結果、 $\sigma = 0.33$ となり、図 5 に示す分光反射率が得られた。波長 750 nm における、推定された σ と ρ_{λ_i} を用いて計算したモデル式と測定値の比較を図 6 に示す。パラメータ推定に利用した $\theta_r = 0^\circ - 40^\circ$ の範囲での全測定条件・全波長での測定値とモデル式の平均絶対誤差率はおよそ 1.01% であった。

4.2 コーン指数推定

3 種類の土のそれぞれに対して 5 種類の含水比で、 $\theta_i = 45^\circ$, $\theta_r = 0^\circ - 40^\circ$ (5° 間隔), $\phi = 180^\circ$ としてスペクトル画像の撮影を行い、コーン指数を測定した。スペクトル画像

	走破不可能	走破可能
走破不可能	342	120
走破可能	42	1806

Fig.7 Results of trafficability assessment in the proposed method

の土の領域を 15 画素 × 15 画素のパッチで切り分け、それぞれのパッチの平均反射光強度を測定値とした。この値を用いて提案手法に従って分光反射率を推定し、推定された分光反射率と測定したコーン指数、土の種類ラベルからデータセットを作成する。データセットのうち、 $\theta_r = 0^\circ - 30^\circ$ のデータを訓練データとし、それ以外の $\theta_r = 35^\circ, 40^\circ$ のデータをテストデータとして用いた。

訓練データでモデルの学習を行い、学習済みモデルを用いてテストデータで推定された分光反射率からコーン指数の推定を行った。その結果、平均絶対誤差 144.3 kN/m^2 でコーン指数が推定できた。しかし、データによっては推定結果と測定値で $1,000 \text{ kN/m}^2$ 以上の誤差が見られた。今回用いた分光反射率の波長域は $450 \text{ nm} - 950 \text{ nm}$ であり、コーン指数に大きな影響を与える水の吸収波長である短波長赤外線領域が含まれていない。そのため、含水比の増加は分光反射率の全体的な低下としてのみ現れる。一方で、表面の土粒子の盛り上がりで生じる影やスペクトル画像に存在する縞状のノイズによっても測定される反射光強度が変化する。両者の変化が類似していたため、推定精度が低下したと考えられる。

次に、既存手法と提案手法で推定したコーン指数に基づいて、走破性判定を行った。歩行や多くの建設機械の走行ができない状態の目安であるコーン指数 200 kN/m^2 を閾値とした。図 7 に提案手法で推定したコーン指数による走破性判定の結果を示す。真値が走破不可能であるデータのうち、正しく走破不可能と判定されたデータの割合は、既存手法では 71.9%であったのに対し、提案手法では 74.0%と改善が見られた。

5 結論

本研究では、地表面に対する光源とスペクトルカメラの位置関係を考慮した反射モデルを分光反射率推定に用いることで、地表面の凹凸や傾斜の変化に頑健なコーン指数推定手法を提案した。検証実験を行った結果、土でも一般的な物体と同様に測定条件による反射光強度の変化が見られた。そこで、提案手法で推定したパラメータを用いて計算した Oren-Nayar モデルのモデル式と測定値を比較したと

ころ、平均絶対誤差率が約 1.01%であった。また、推定した分光反射率を用いたコーン指数の推定では、平均絶対誤差 144.3 kN/m^2 であった。さらに、提案手法では既存手法に比べて走破不可能であるという判定を高い再現率で行えた。したがって、提案手法の有効性が確認され、地表面に対する光源とスペクトルカメラの位置関係を考慮したコーン指数の推定手法が確立された。

今後の展望として、コーン指数推定の精度は改善できる余地があるので、短波長赤外線の波長域を測定可能なスペクトルカメラを利用したり、新たな推定モデルを利用したりするなどの手法の検討を行いたい。また、今回の実験は屋内で行われ、用いた土の種類も少ないので、屋外でも屋内と同様に提案手法が適用可能であるか、より多くの土や含水比に対しても提案手法が有効であるかなどの検証を重ねる必要がある。さらに、データ範囲を制限しないための拡散反射と鏡面反射の両方を考慮した反射モデルの構築や 2.1 項で述べた実際に運用可能な全体のシステムの確立を目指す。

参考文献

- [1] 茂木正晴, 山元 弘, “無人化施工による災害への迅速・安全な復旧活動”, 計測と制御, vol.55-6, pp.495-500, 2016.
- [2] 重松康祐, 坪内孝司, 皿田 滋, “重心及びZMP予測に基づく遠隔操縦油圧ショベルの転倒防止制御”, 日本機械学会論文集, vol.83-850, pp.17-40, 2017.
- [3] Mulqueen, J., Stafford, J. V. and Tanner, D. W., “Evaluation of Penetrometers for Measuring Soil Strength,” *Journal of Terramechanics*, vol.14-3, pp.137-151, 1977.
- [4] Zacny, K., Wilson, J., Craft, J., Asnani, V., Oravec, H., Creager, C., Johnson, J. and Fong, T., “Robotic Lunar Geotechnical Tool,” In *Proceeding of the Earth and space 2010: Engineering, science, construction, and operations in challenging environments*, pp.166-181, 2010.
- [5] 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, 浅間 一, “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”, 精密工学会誌, vol.86-12, pp.1057-1063, 2020.
- [6] Oren, M. and Nayar, S. K., “Generalization of Lambert’s Reflectance Model,” In *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp.239-246, 1994.
- [7] Breiman, L., “Random forests,” *Machine Learning*, vol.45, pp.5-32, 2001.