

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K17838

研究課題名（和文）LiDARの受光強度を活用した土壌含水量の推定

研究課題名（英文）Estimation of soil water content using LiDAR intensity

研究代表者

江藤 亮輔（Eto, Ryosuke）

防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群）・システム工学群・講師

研究者番号：20761480

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、LiDARの受光強度を利用して土壌表面の含水比を推定する手法を開発することである。まず、豊浦砂、火山灰、真砂土を対象として室内実験によりLiDARのレーザ照射角度、含水比とLiDAR受光強度の関係を計測した。得られたデータからガウス過程回帰により含水比推定モデルを生成した。本モデルは室内実験では、推定値が誤差±5ポイント内に収まった割合は70%から98%であった。また、実際にクローラロボットにLiDARを搭載して行った屋外実験では誤差±2～4ポイントでの推定を実現できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非接触での含水量推定は2波長の近赤外光の受光強度を用いて推定されている。しかし、使用される波長は1500nm付近や2000nm付近のものであり高価なセンサが必要であった。本研究の提案手法は、近年無人口ロボットに搭載されているLiDARの受光強度のみを用いて土壌含水量を推定するものである。そのため、ロボットの周辺土壌の含水量を推定するために新たに高価なセンサを必要とせず、ロボットの簡素化、低廉化に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a method to estimate the water content ratio of soil surface using LiDAR intensity data. First, I measured the relationship between the LiDAR laser irradiation angle, water content, and LiDAR intensity data for Toyoura sand, volcanic ash, and Masa soil in laboratory experiments. Water content estimation models were generated from the obtained data using Gaussian process regression. In laboratory experiments, the estimated value by the model was found to be within ±5 points of error in 70% to 98% of the cases. In outdoor experiments with a robot equipped with a LiDAR, the model was able to estimate the water content within ±2 to 4 points of error.

研究分野：ロボット工学

キーワード：LiDAR 含水比 ガウス過程回帰

1. 研究開始当初の背景

近年、日本では人手不足や安全性の観点から作業の自動化、遠隔化が進められている。特に、事故の多い自動車の運転の自動化、熟練技能者不足を解消するための建設作業や農作業の自動化、災害時の危険域での作業やアクセス不良を解決するため復旧作業の遠隔化は重要な課題である。これらの自動化、遠隔化を実現するためには周辺環境を認識することが必要不可欠である。中でも土壌に含まれる水分量は、農業においては植物の生育状況を管理するために必要であり、また水分は土壌の物理的性質にも大きな影響を与えるため、作業ロボットの走行、地盤の掘削、作業装置等への土の付着などを考慮する際にも重要な情報となる。

非接触式の水分量計測は、一般的に近赤外光を利用した光学的手法が採用され、水が吸収しやすい **1450 nm** や **1940 nm** 周辺の波長光を複数用いている。土壌含水量の推定にも **1800**、**2119 nm** の波長光を使用する **NSMI** や **1300**、**1450 nm** の波長光を使用する **WISOIL** などの指標がある[1]。しかし、これらで使用されるセンサは測定距離が最大で **300 mm** 程と短く、また計測は一点で行われている。広い範囲での測定はハイパースペクトルカメラを用いることで可能であるが、どちらの場合でもセンサが追加されるためロボットの重量や費用が増加するといった問題が生じる。そのため、ロボットに通常搭載されるセンサを活用した広範囲の土壌水分量の計測が望まれる。

最近の作業ロボットは、自律や遠隔操縦により走行する際に自己位置推定や環境認識を行うため **GPS**、可視光カメラ、**Light Detection And Ranging (LiDAR)** などを搭載していることが多い。**LiDAR** は周囲に **785 nm** または **905 nm** 程度の近赤外光を照射し、周囲の形状を探索する。このセンサで用いられる近赤外光の波長光を活用して土壌の含水量を推定できればロボットの省センサ化に貢献できる。

2. 研究の目的

本研究課題では、**LiDAR** の受光強度を用いて土壌含水量を推定する手法の構築を目的とする。**LiDAR** を用いた含水量の推定は航空機に搭載した例があるが、土壌の種類が既知であり、上空からの計測のため土壌との距離や近赤外光の照射角度を考慮していないなどの問題があり、また波長も吸光度が高い **1069 nm** を使用している[2]。陸上走行ロボットに搭載される **LiDAR** では、土壌表面に対しての照射角度や土壌表面粗さ、土壌の種類によって受光強度が変わってしまう。これまでの手法では、複数の近赤外光を使用して計測精度を高めているが、本研究課題ではロボットに一般的に搭載される可視光カメラの情報と合わせることで土壌表面含水量の推定を実現する。

3. 研究の方法

(1) 実験室内で **LiDAR** (北陽電機社製 **UTM-30LX-EW**) を用いて供試土の含水量、レーザ照射角度と受光強度の関係を明らかにした。土は豊浦砂、火山灰、真砂土の三種類を用いた。供試土表面の中心から距離 **600 mm**、高さ **280 mm** の位置に角度 30° でセンサを設置し、レーザを供試土表面中心線付近に照射した。供試土は縦 **185 mm**、横 **255 mm**、深さ **10 mm** の容器に入れ、設置台は供試土表面中心まわりに回転することができる。**LiDAR** 方向への回転を正、水平時を 0° として $\pm 20^\circ$ の範囲内 5° 刻みで傾きを変更し、受光強度を測定した。傾きは供試土が容器から滑り落ちない範囲で設定した。含水量の指標には、供試土の乾燥質量に対する水の質量比である含水比を使用した。各供試土を乾燥状態から飽和するまで 5% 刻みで含水比を変更し、各含水比で傾斜角度を変更して実験を実施した。また、土の表面も均した状態と均さずに粗い状態の 2 種類で計測して表面状態による影響も調査した。

(2) (1) で取得したデータを活用してガウス過程回帰による土壌含水量推定モデルを構築した。ガウス過程回帰にはガウスクアーネルを用いた。はじめに、入力データに照射角度と受光強度を用いて、各土で含水比を推定する回帰モデルを構築した。次に、可視光カメラの **R** と **B** で正規化した値を入力データに加えて、土の種類に関係なく含水比を推定する回帰モデルを構築した。

(3) クローラロボットに **LiDAR** を搭載して屋外を走行し、(2) で開発した推定手法の有効性を確認した。火山灰を含水比 $0 \sim 20\%$ の範囲内で約 5% 刻みで調整した後、間隔を空けて配置し、その上をロボットで走行した。照射角度は **LiDAR** で取得した点群データから計算した。走行後に各火山灰の 3 か所でサンプリングし、**100** で **24** 時間乾燥した後との質量差から含水比を測定して推定値と比較した。

4. 研究成果

(1) 図1に傾斜角，含水比と受光強度の関係を示す．火山灰は豊浦砂，真砂土と比較して受光強度が小さい．また，全ての供試土は含水比が増加すると受光強度が低下することが確認できた．さらに，豊浦砂と真砂土は傾斜角が大きくなると受光強度もほぼ線形に増加することも確認した．一方，火山灰では受光強度は飽和時を除き傾斜角の影響を受けにくい．全ての供試土において，含水比が増加すると受光強度は傾斜角の影響を受けやすくなることが明らかとなった．特に飽和時では大きく影響を受けるが，この理由として表面に水が多く存在することで，土粒子ではなく水面での反射光が増加するためと考えられる．

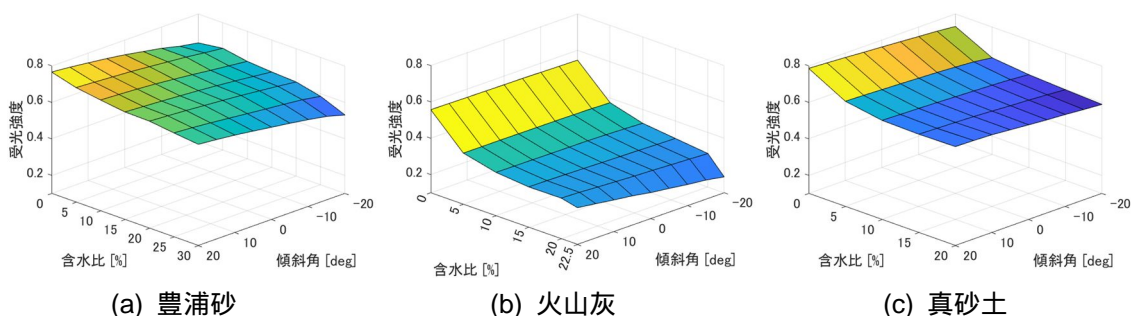


図1 傾斜角，含水比と受光強度の関係

(2) 図2にガウス過程回帰モデルを使用した含水比の推定結果を示す．入力データに照射角度と受光強度を用いて各供試土で生成した推定モデルでは，誤差 ± 5 ポイント内に収まった割合は豊浦砂が**70.6%**，火山灰**98.6%**，真砂土**88.3%**を実現した．全ての供試土で含水比が大きくなると推定誤差も大きくなる傾向を確認した．水が多く存在する土は受光強度が傾斜角の影響を受けやすく，そのため表面の形状や粗さによる誤差が大きくなったと考えられる．表面粗さの影響を確認するため，豊浦砂の表面を均した状態のデータのみを用いてモデルの作成，推定を行った．その結果，誤差 ± 5 ポイント内の割合は**82.5%**と大きく改善した．表面形状による誤差を少なくするためには測定データを増やして平均値を使用することが考えられる．

次に，入力に可視光カメラから得られる画像のRとB値の分光強度を正規化した値を入力に追加して全ての土を対象とした含水比を推定するモデルを生成した．水の吸光度は，赤色領域の波長帯が高く，青色領域では低いためRとB値を使用した．誤差 ± 5 ポイント内の割合は**81.9%**であり，可視光カメラの情報を用いること土の種類によらず含水比を概ね推定できることを確認した．

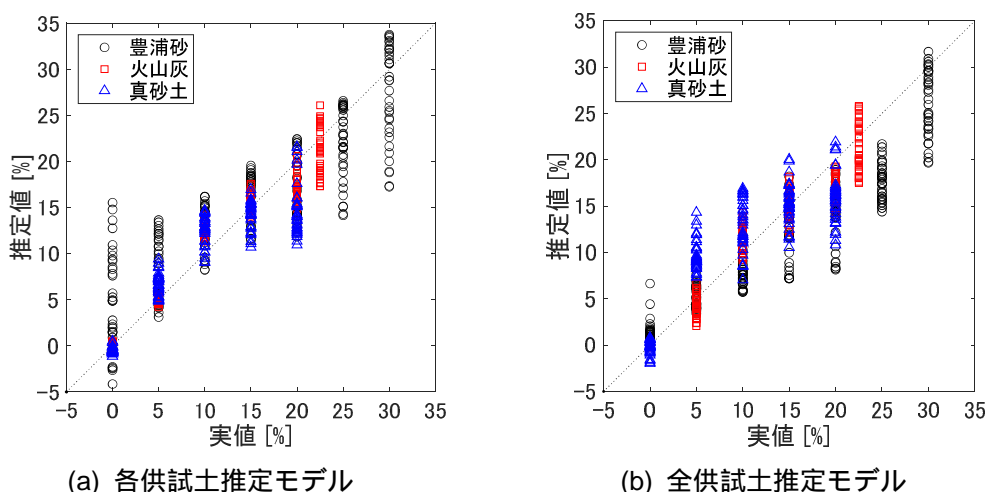


図2 室内実験での含水比の推定結果

(3) 図3にロボットの可視光カメラの映像にLiDARのレーザ照射位置における推定含水比を提示した一例を示す。各火山灰での推定値の平均は、含水比4%の火山灰のとき2%、10%のとき14%、15%のとき18%、20%のとき23%であったため、概ね土壌表面の含水比を推定できることが確認できた。しかし、含水比が10%を超えると3~4ポイント大きく推定してしまっており、推定精度の向上が課題として挙げられる。この誤差の原因としては、太陽光の影響と考えられる。そのため、屋内試験で得られた実験データを補正して太陽光が照射されているときの推定モデルを作成することが必要である。

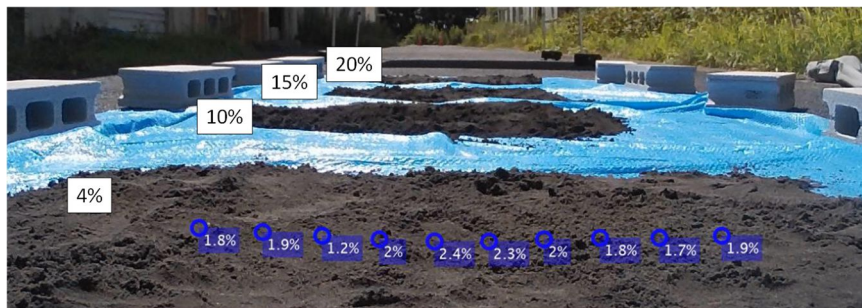


図3 屋外実験での含水比の推定結果

参考文献

- [1] Jing Tian, Shangkun Song, and Honglin He : **The Relationship between Soil Emissivity and Soil Reflectance under the Effects of Soil Water Content , Physics and Chemistry of the Earth , Vol. 110 , pp. 13-137 (2019)**
- [2] 谷宏, 小林伸行, 菌部礼, 王秀峰, 一条博幸: 航空レーザスキャナを用いた土壌水分の推定に関する事例研究, 環境情報科学論文集, Vol. 21, pp. 463-466 (2007)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 江藤 亮輔	4. 巻 67
2. 論文標題 クローラ型移動ロボットを用いた路面状況の評価方法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 オペレーションズ・リサーチ	6. 最初と最後の頁 542, 549
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 江藤 亮輔, 山川 淳也
2. 発表標題 ガウス過程回帰によるLiDAR受光強度からの土壌含水比の推定
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------