

SoilSense: 土壤微生物燃料電池を活用したリアルタイム力覚フィードバックインタフェースの実現

塚越 雄真* Tian Min* 杉浦 裕太*

概要. 近年気候変動対策として持続可能なエネルギーの需要が高まっている。この課題に対し水分のみで作動する土壤微生物燃料電池 (Soil-based Microbial Fuel Cells, SMFC) が効率的な電力源を代替するものとして注目を集めている。これは、土壤中の微生物の代謝活動を通じて電力を生成するものである。本研究では、SMFC を柔軟なセンサとして活用するための新たなデザインスペースを提案する。カソードと土壤表面の接触面積の変化によって生じる電圧変動を利用し、土壤を様々な環境に適用可能な「ユビキタスなセンサ素材」として導入する。このアプローチにより、静電容量センサや力センサに類似したセンシング機能を実現する。私たちは、さまざまな電極構成および体積含水率 (VWC) におけるこの現象の基本原理を調査した。また、多様な入力に対応するため、柔軟な素材を用いたモジュール型のコンテナを設計・製作した。さらに、SMFC を用いたユースナリオを実証し、バイオデザインとして土壤を使用する際の設計上の考慮点について結論を示す。

1 はじめに

自然界に広がる土壤は、微生物学 [6][9]、農業 [1][10]、再生可能エネルギー [11][3] などの多様な分野で注目されている。SMFC は、アノードを土壤内、カソードを土壤表面に設置することで、微生物の代謝により有機物から電力を生成できる。実験では、最大 731mV の電圧と 200 μ W の電力を発生することが確認されている [4][5]。しかし、現実の環境では、出力が不安定であり、水分や土壤成分の変動に大きく影響を受ける [7][11]。これまでの SMFC の研究は安定したエネルギー生成に主眼を置いていたが、土壤をインタラクションの要素として活用する可能性は十分に探求されていない。本研究では、SMFC をエネルギー源にとどまらず、インタラクションにตอบสนองする動的要素として再解釈することで、新たな設計空間を開拓することを目指す。

2 SoilSense インタフェース

本研究は、SMFC を活用したインタラクティブな力センサ「SoilSense」を提案する。SMFC は圧力にตอบสนองするが、湿潤環境での運用が必要であり、ユーザが直接カーボンフェルトや土壤に触れることは実用的ではない。しかし、土壤の可塑性を活かすことで、柔軟素材や硬い容器に対応し、デザインの幅を広げられる。さらに、複数のカソードや SMFC の組み合わせにより、センサの精度向上と多次元データの取得が可能となる。

Copyright is held by the author(s). This paper is non-refereed and non-archival. Hence it may later appear in any journals, conferences, symposia, etc.

* 慶應義塾大学

自己発電のみでの駆動は難しいため、昇圧コンバータを用いて複数の SMFC から効率的に電力を蓄え、蓄電したエネルギーをインタラクションに活用することを想定する。

2.1 センサモード

押す: 50mm 容器に最大 30N の圧力を硬質プレートで均等に加え、電圧変化を測定した。押す力は通常 100N を超えないため、先行研究 [8][2] に基づきこの範囲内で評価した。

ねじる: 蓋の回転角度をカメラで記録し、電圧データと同期させた。時計回りのねじりによって土壤が圧縮され、電圧変化が発生した。

曲げる: 複数のカソードを 1つのアノードと共有することで、方向性のある力を検出した。中央に仕切りのある蓋では、カソード間で異なる電圧が観察され、仕切りがない場合は電圧差が 0 となった。左右の圧力差によって、対応するカソードで電圧の変化が確認された。

3 利用シナリオ

本研究は SoilSense をセンシング技術として活用し、土壤をインタラクションの媒介とする。本セクションでは、その応用例として 2つの主要なシナリオを示し、設計空間を探る。

操作インタフェース: SoilSense の力センシングは、圧力に迅速かつリアルタイムで反応する。これを用いて、タップや長押しを検出するコントローラが構築可能である。図 2(a) のように、シリコンパッド付きセルでしきい値を基にゲームを制御するボタ



図 1. カソードに圧力が加わると SMFC の出力電圧が力に応じて変化するため、土を力覚センサとして使用することで、(b) 押す、(c) 曲げる、(d) ねじるという動作に反応する触覚インタフェースを作成でき、様々なインタラクションデザインへの応用が可能となる。



図 2. (a) ゲームを操作するボタン、(b) 押すと対応する画像と発音が表示される動物モデル、(c) 土壌の水分量を通知する植物、(d) 通過する人の数を記録する芝生

ンを作成した。さらに、MudWatt のアイデアを参考に、動物型容器を用いた教育的インタラクションを設計し（図 2(b)）、容器への圧力で対応する動物の画像と音声が表示される仕組みを実現した。

植物や自然とのインタラクション: SoilSense は、植物とのインタラクションにも適している。植物は光や湿気などの刺激に反応するが、その速度は遅い [12]。図 2(c) に示すように、SMFC を鉢植えに設置し、ユーザが土壌表面を押すと湿度情報が通知される仕組みを導入した。また、屋外では、人の体重による圧力を検出し、通過人数を記録する地表面センサとして応用可能である（図 2(d)）。この概念実証をもとに、スケーラブルなセンサの開発が求められる。

4 議論と制約

再現性と耐久性: SoilSense の再現性には課題があり、製造プロセスのばらつきや環境変数の影響が大きいため、電圧変化から力の大きさを正確に予測することは困難である。一方で、カソードのサイズや水分条件が異なっても電圧変化の一貫性が確認さ

れており、再現性の確保に有用である。電圧の増加率を基にしたしきい値の設定やキャリブレーションの導入が推奨される。土壌は繰り返し圧力を受けることで疲労しやすいため、今後はさまざまな土壌の臨界圧力や不可逆な変化の要因を特定する必要がある。

エネルギー消費とセンシング評価: SoilSense のエネルギー収集と消費の課題は既存研究でも指摘されているが、本研究ではセンサ機能の実証を優先しており、エネルギー効率の詳細な評価は行っていない。現在のシステムはしきい値ベースの検出に依存しており、高度な機械学習モデルへの適用は未検討である。今後は、多様な環境におけるエネルギー消費の評価と、力センシングデータを用いた高度な認識手法の適用が求められる。

5 結論

本研究では、SMFC を利用したインタラクティブな力センサである SoilSense を提案した。異なる電極配置および体積含水率 (VWC) 条件下で、圧力と電圧の関係を調査し、SoilSense が複数のジェスチャに対応する力センサとして有効であることを確認した。また、プロトタイプとアプリケーションシナリオを通じて、SoilSense の多様な応用可能性を示した。本研究は、バイオ素材をインタラクティブシステムに統合することで、持続可能な社会に向けた新たな方向性を提案するものである。

謝辞

本研究の一部は、JST さきがけ（課題番号：JP-MJPR2134）の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Z. Chang, F. Zhang, J. Xiong, J. Ma, B. Jin, and D. Zhang. Sensor-free Soil Moisture Sensing Using LoRa Signals. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, 6(2), jul 2022.

- [2] A. DiDomenico and M. Nussbaum. Estimation of forces exerted by the fingers using standardised surface electromyography from the forearm. *Ergonomics*, 51:858–71, 07 2008.
- [3] J. Dziegielowski, B. Metcalfe, P. Villegas-Guzman, C. A. Martínez-Huitle, A. Gorayeb, J. Wenk, and M. Di Lorenzo. Development of a functional stack of soil microbial fuel cells to power a water treatment reactor: From the lab to field trials in North East Brazil. *Applied Energy*, 278:115680, 2020.
- [4] S. Imologie, A. Gbabo, and O. Shekwaga. Performance of a Single Chamber Soil Microbial Fuel Cell at Varied External Resistances for Electric Power Generation. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 3:53–58, 08 2016.
- [5] Y.-B. Jiang, W.-H. Zhong, C. Han, and H. Deng. Characterization of Electricity Generated by Soil in Microbial Fuel Cells and the Isolation of Soil Source Exoelectrogenic Bacteria. *Frontiers in Microbiology*, 7, 2016.
- [6] R. Kim, P. Pataranutaporn, J. Forman, S. A. Lee, I. H. Riedel-Kruse, M. Alistar, E. S. Lazaro Vasquez, K. Vega, R. Van Dierendonck, G. Gome, et al. Microbe-HCI: Introduction and Directions for Growth. In *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–4, 2021.
- [7] G. Marcano and P. Pannuto. Soil Power? Can Microbial Fuel Cells Power Non-Trivial Sensors? In *Proceedings of the 1st ACM Workshop on No Power and Low Power Internet-of-Things, LP-IoT'21*, p. 8–13, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [8] T. Nilsen, M. Hermann, C. Eriksen, H. Dagfinrud, P. Mowinckel, and I. Kjekken. Grip force and pinch grip in an adult population: Reference values and factors associated with grip force. *Scandinavian journal of occupational therapy*, 19:288–96, 02 2011.
- [9] P. Pataranutaporn, A. Vujic, D. S. Kong, P. Maes, and M. Sra. Living bits: Opportunities and challenges for integrating living microorganisms in human-computer interaction. In *Proceedings of the augmented humans international conference*, pp. 1–12, 2020.
- [10] J. Wang, L. Chang, S. Aggarwal, O. Abari, and S. Keshav. Soil moisture sensing with commodity RFID systems. In *Proceedings of the 18th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobiSys '20*, p. 273–285, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [11] B. Yen, L. Jaliff, L. Gutierrez, P. Sahinidis, S. Bernstein, J. Madden, S. Taylor, C. Josephson, P. Pannuto, W. Shuai, G. Wells, N. Arora, and J. Hester. Soil-Powered Computing: The Engineer's Guide to Practical Soil Microbial Fuel Cell Design. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, 7(4), jan 2024.
- [12] J. Zhou, B. Barati, J. Wu, D. Scherer, and E. Karana. Digital biofabrication to realize the potentials of plant roots for product design. *Bio-Design and Manufacturing*, 4(1):111–122, Mar 2021.

未来ビジョン

SoilSense は、土とカーボンフェルトを用いた持続可能なセンサ技術であり、「押す」「曲げる」「ねじる」などの物理ジェスチャを識別する特徴を持つ。これにより、環境との自然なインタラクションを実現し、従来の電子入力デバイスに代わる手段を提供する。本研究では、電極の配置や水分条件下における圧力と電圧の関係を検証し、これらのジェスチャに対応するソフトコンテナを設計した。

現状では発電速度の制約から、ノンバッテリーの入力デバイスとしての実用化には課題がある。しかし、電力供給を SMFC に完全依存することで、外部からの電源を供給せずに SMFC で電力を賄いその電力を利用してインタラクションを行う入力デバイスとして活用することが可能である。また、SoilSense は都市空間、スマートホーム、教育などの幅広い分野での活用が期待される。グリーンインフラ

においては、人間のジェスチャーや歩行をトリガーにイルミネーションや音に変化するインタラクティブな都市空間を演出する。さらに、土壌の湿度や圧力をリアルタイムで測定し、そのデータをもとに灌漑や排水システムを自動制御することで省エネ効果を高め、持続可能なインフラの構築を促進するだけでなく、スマートホームにおいては、SoilSense を室内の植物の土に組み込むことで、土を押す、触れるといった動作でスマート照明の調整や音楽の再生を行うなど、直感的な IoT 操作を可能にする。

この技術は、人と環境をつなぐ豊かな体験を創造し、持続可能な社会に向けた自然と共生するインタフェースの構築を目指すものである。