

Tomographic Tactile Sensor

トモグラフィ型触覚センサ

Shunsuke Yoshimoto／吉元俊輔

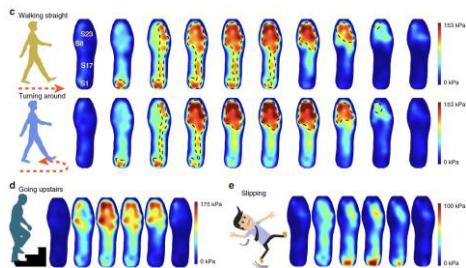
Osaka University／大阪大学

yoshimoto@mech.eng.osaka-u.ac.jp

(背景) ヒトの力触覚機能を理解・再現するための計測技術への期待

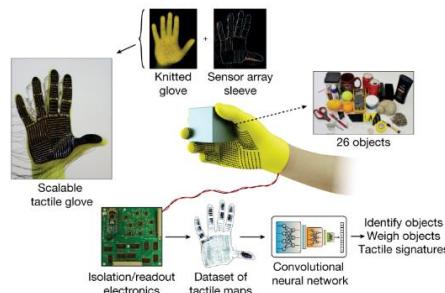
従来の触覚センサとその応用

歩容の認識



[J. Tao et al., 2020]

把持物体の認識



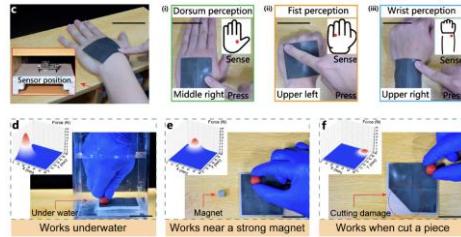
[S. Sundaram et al., 2019]

ロボット制御



[G. Cheng et al., 2019]

入力インターフェース



[H. Hu et al., 2022]

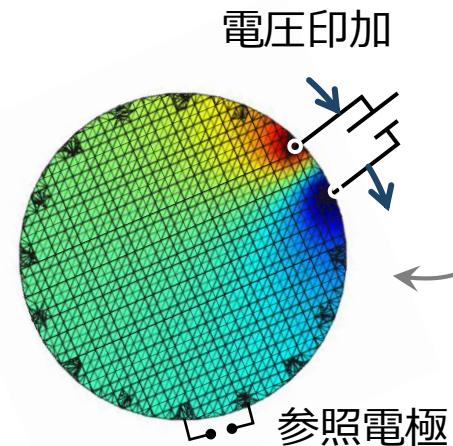
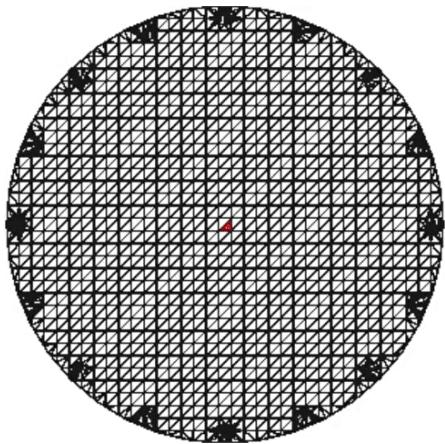
接触圧力分布を可視化するセンサ構造の分類

構造	寸法	形状	柔軟性	配線
アレイ式	小	限定的	低	高難
マトリクス式	中	限定的 (シート)	中～高	中難
連続体式	スケーラブル	多様	高	容易

柔軟・自在形状かつ高性能・多機能なセンサをどのように実現するか？

(背景) トモグラフィ型触覚センサとその課題

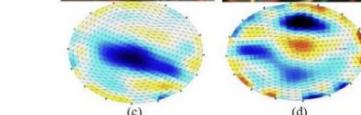
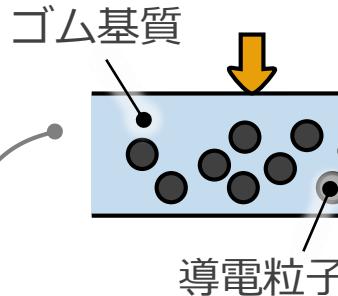
電気インピーダンストモグラフィ (EIT)



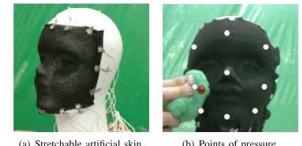
$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla u) = 0$$

- 複数の励起条件で
物体表面の電位分布を取得
- 逆問題（不良設定問題）を解き、
物体内部のインピーダンス分布を可視化

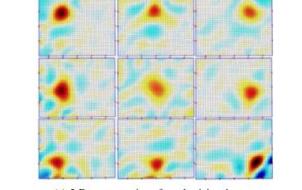
荷重により
抵抗の変化する材料



[A. Nagakubo et al., 2007]



(a) Stretchable artificial skin.



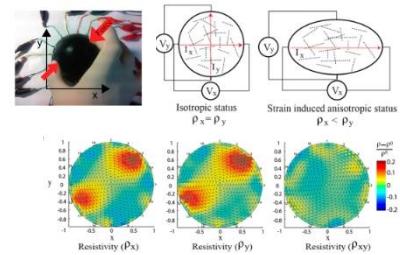
(c) 2-D representation of conductivity changes.

[D. Silvera-Tawil et al., 2015]

- ✓ スケーラビリティ, 柔軟性, 形状自由度
✗ 感度, 時空間分解能

機能性

多自由度化



[H. Lee et al., 2017]

搭載性

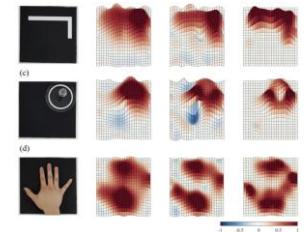
スプレー塗布



[J. Oh et al., 2018]

性能

DNNアプローチ



[H. Park et al., 2021]

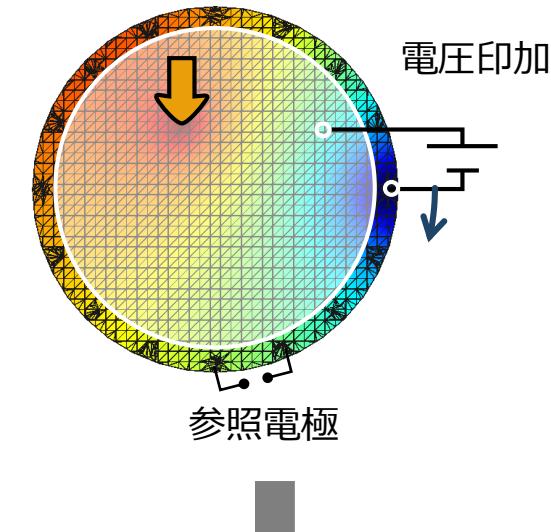
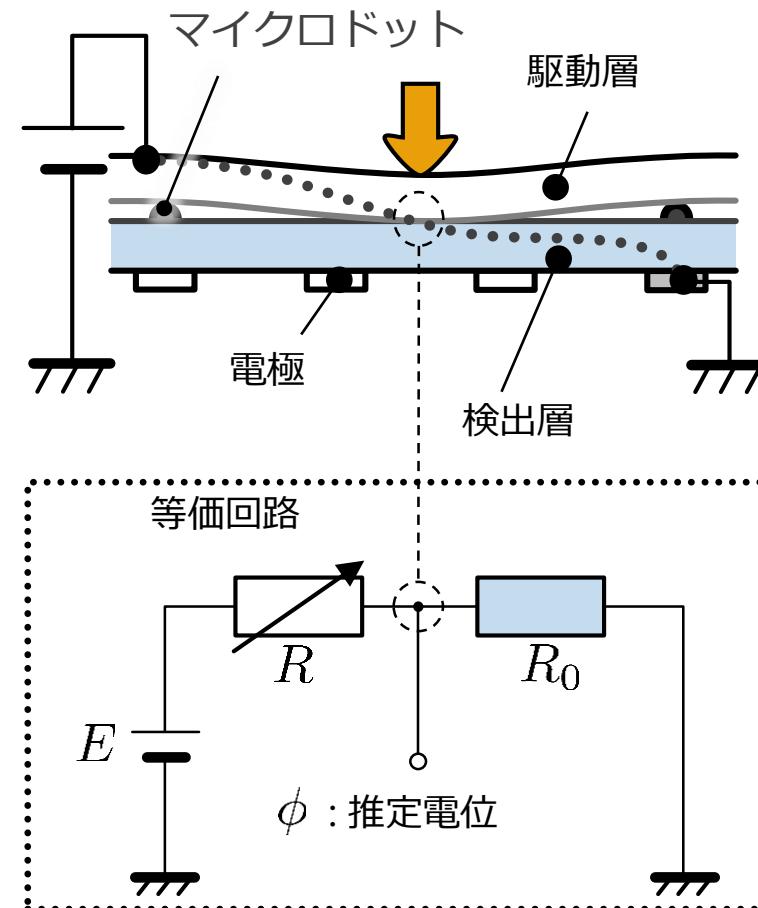
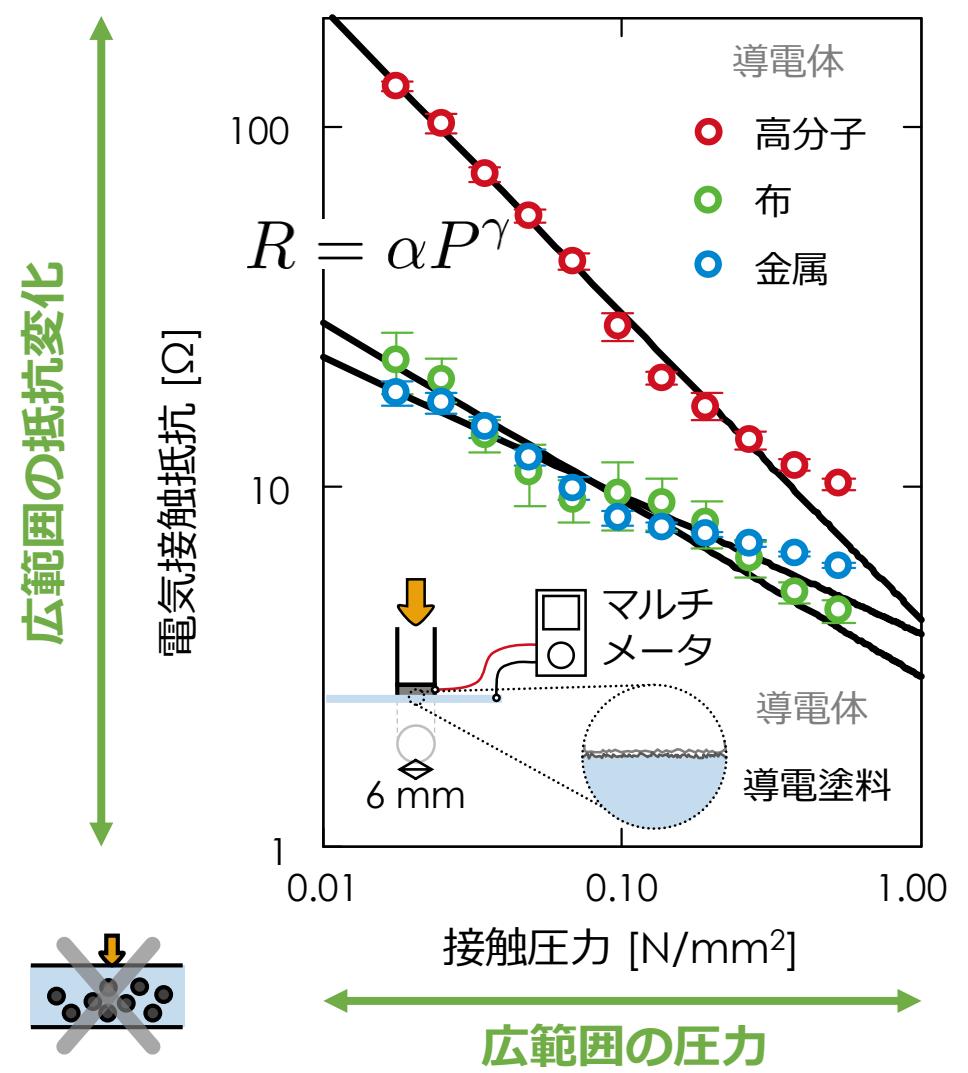
(提案) 電気接触抵抗に着目した計測手法

S. Yoshimoto et al., IEEE TIE, 2020

触覚センサ, 特願2018-054266

IROS 2022 Workshop 招待講演

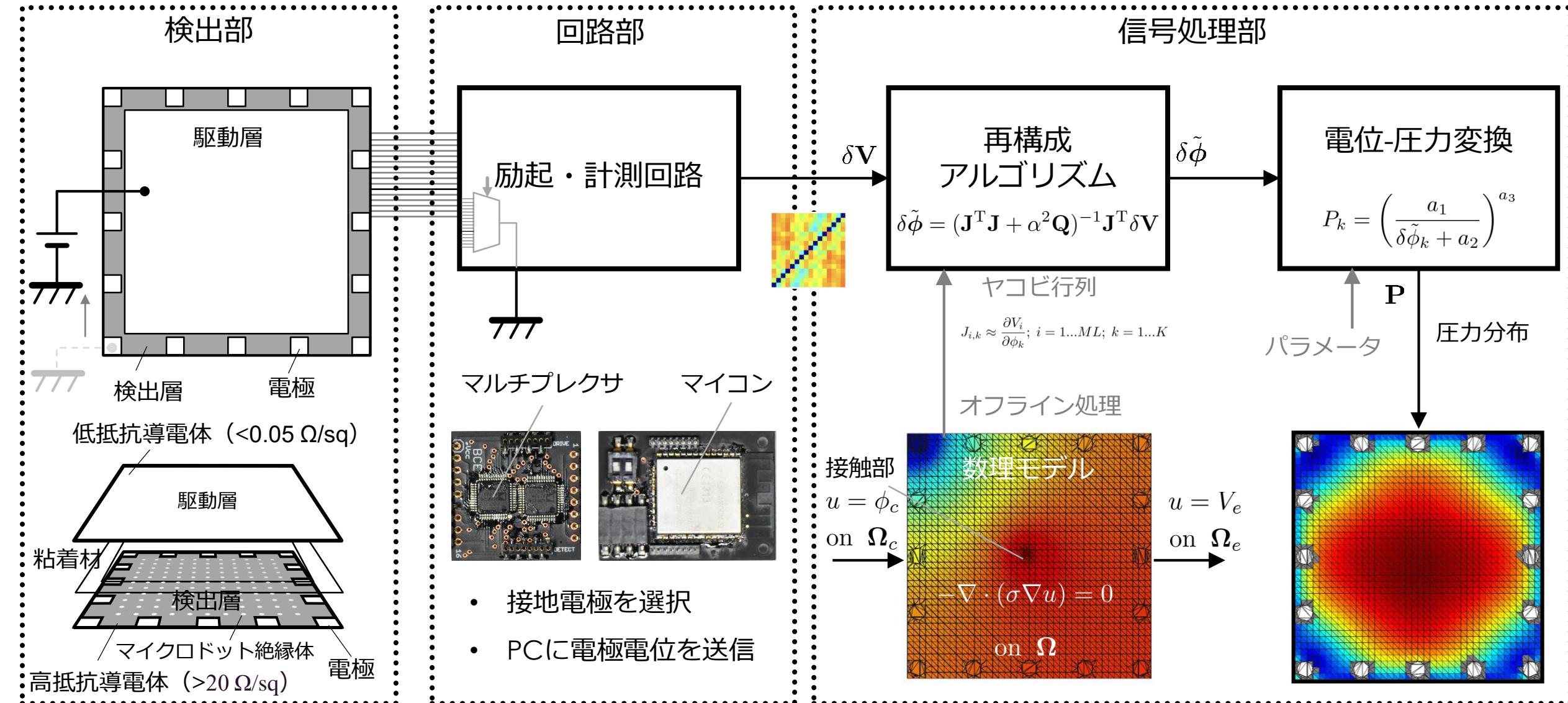
圧力と接触抵抗の関係



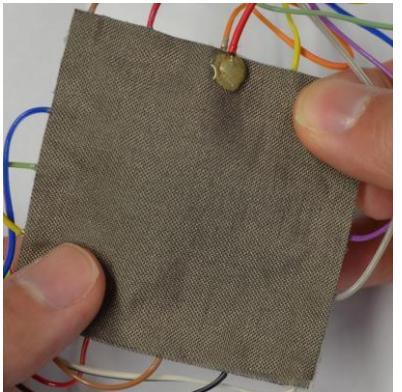
- 新規計測システム
- ・スイッチング手法
 - ・逆問題とその解法

✓ 材料選択性, 搭載性, 検出感度に優位性あり

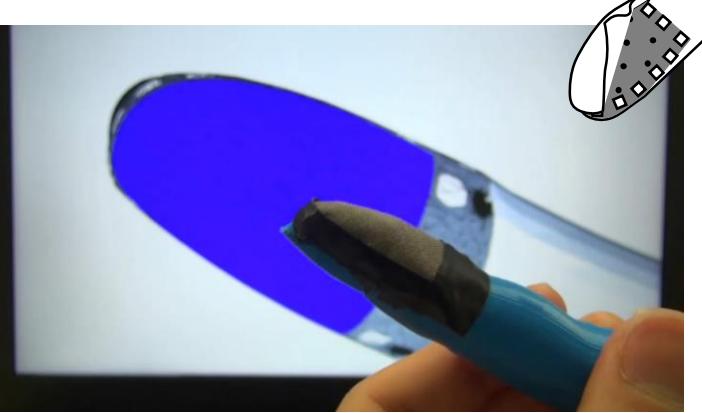
電気接触抵抗式トモグラフィ型触覚センサのシステム概要



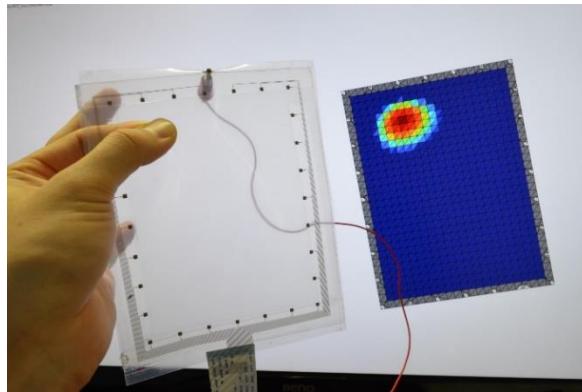
自在な検出部の設計が可能に



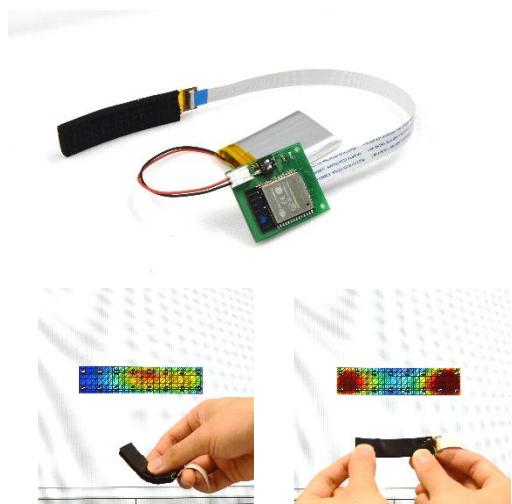
柔軟



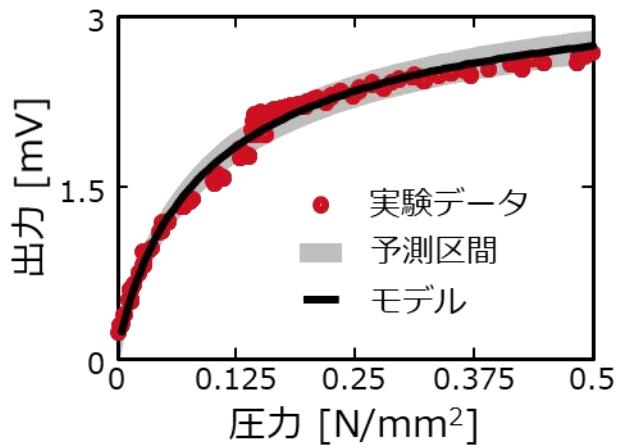
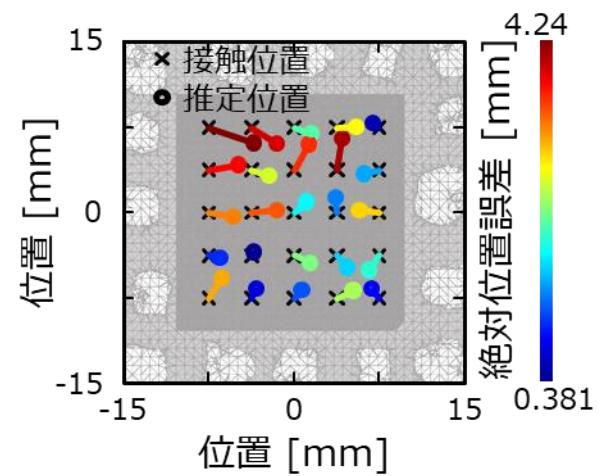
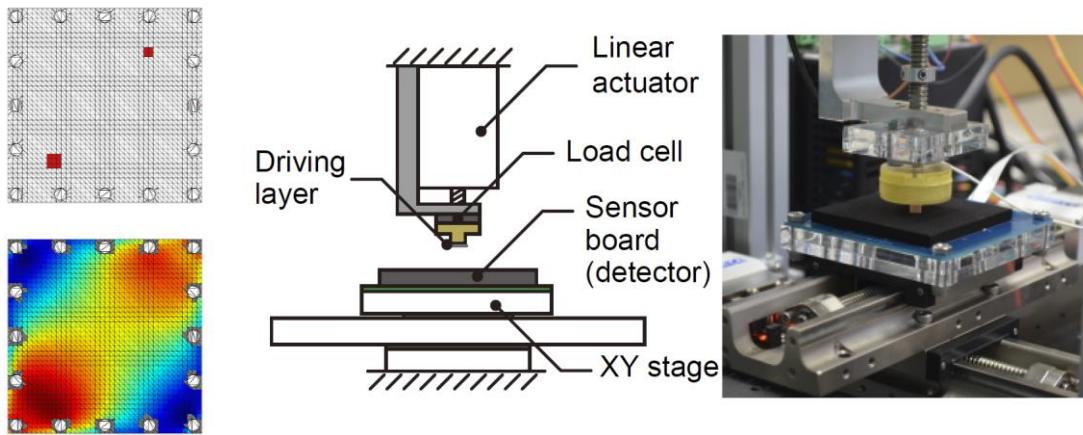
3次元形状



透明化



変形可能



更に時空間性能や機能性を高めるにはどのように設計するのが良いか？

高性能化・多機能化に向けて

時間分解能

時間分解能は、励起条件とスイッチング周波数に比例する

→ どのように励起条件を減らせばよいか?

ヒトの触覚機能:

検出能 $1 - 100 \mu\text{m}$, 力のダイナミックレンジ: 50 dB ,

帯域: $0 - 1 \text{ kHz}$, 空間分解能: $0.7 - 2 \text{ mm}$

[C. Hatzfeld, and T. A. Kern, 2009.]



空間分解能

電流の拡散により、計測データの独立性が低い（不良設定問題）

→ 最新のEIT再構成手法を適用するとどのくらい精度が上がるか?

機能性

インピーダンス変化を生じさせる現象には、（接触抵抗以外にも）色々と存在する

→ どのような新しい機能を実装可能か?

時空間性能のトレードオフをどのように解決するか？

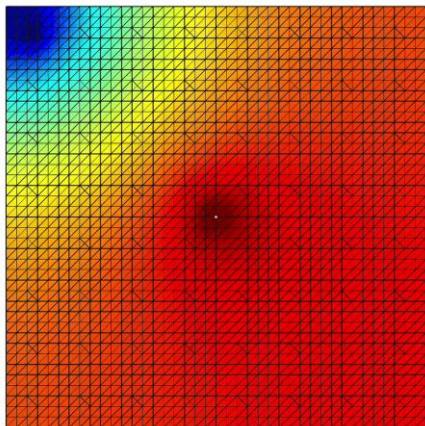
$$T_s = L_s \cdot \Delta T$$

T_s : サンプリング時間 / 1 frame

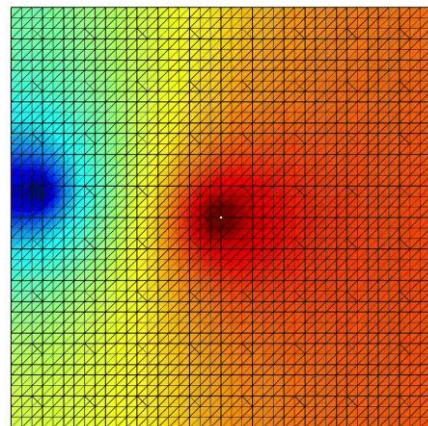
L_s : 電極数

ΔT : 切り替え時間 \propto 励起数

従来：全励起

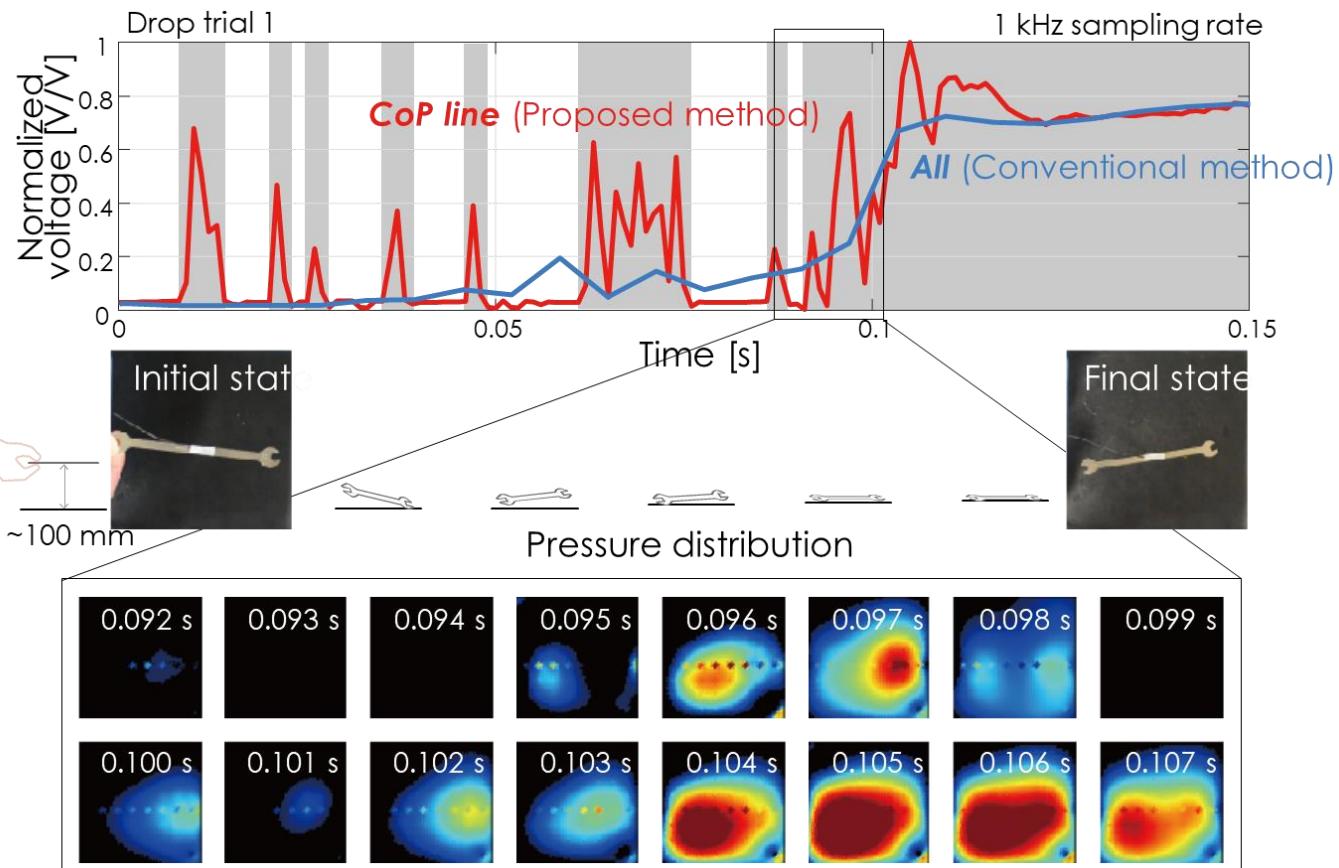
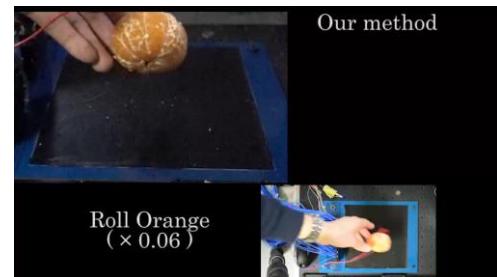


提案：選択的励起

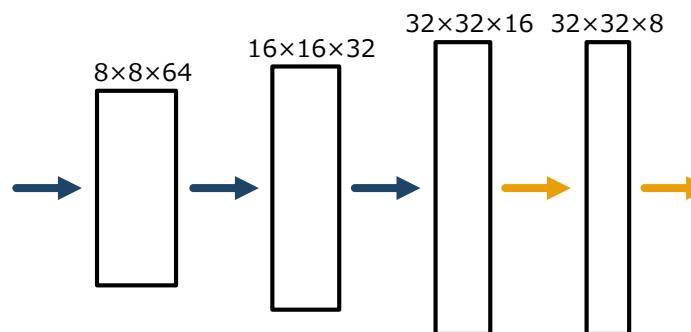
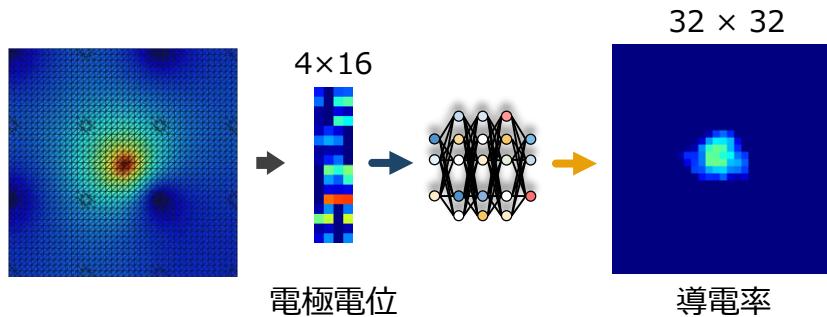


電位勾配が大きくなるような励起条件が支配的

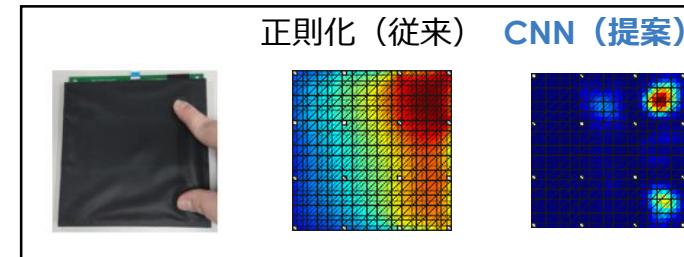
✓ 高時間分解能の達成 (1000 fps)



畠込みニューラルネットワーク(CNN)による空間分解能の改善

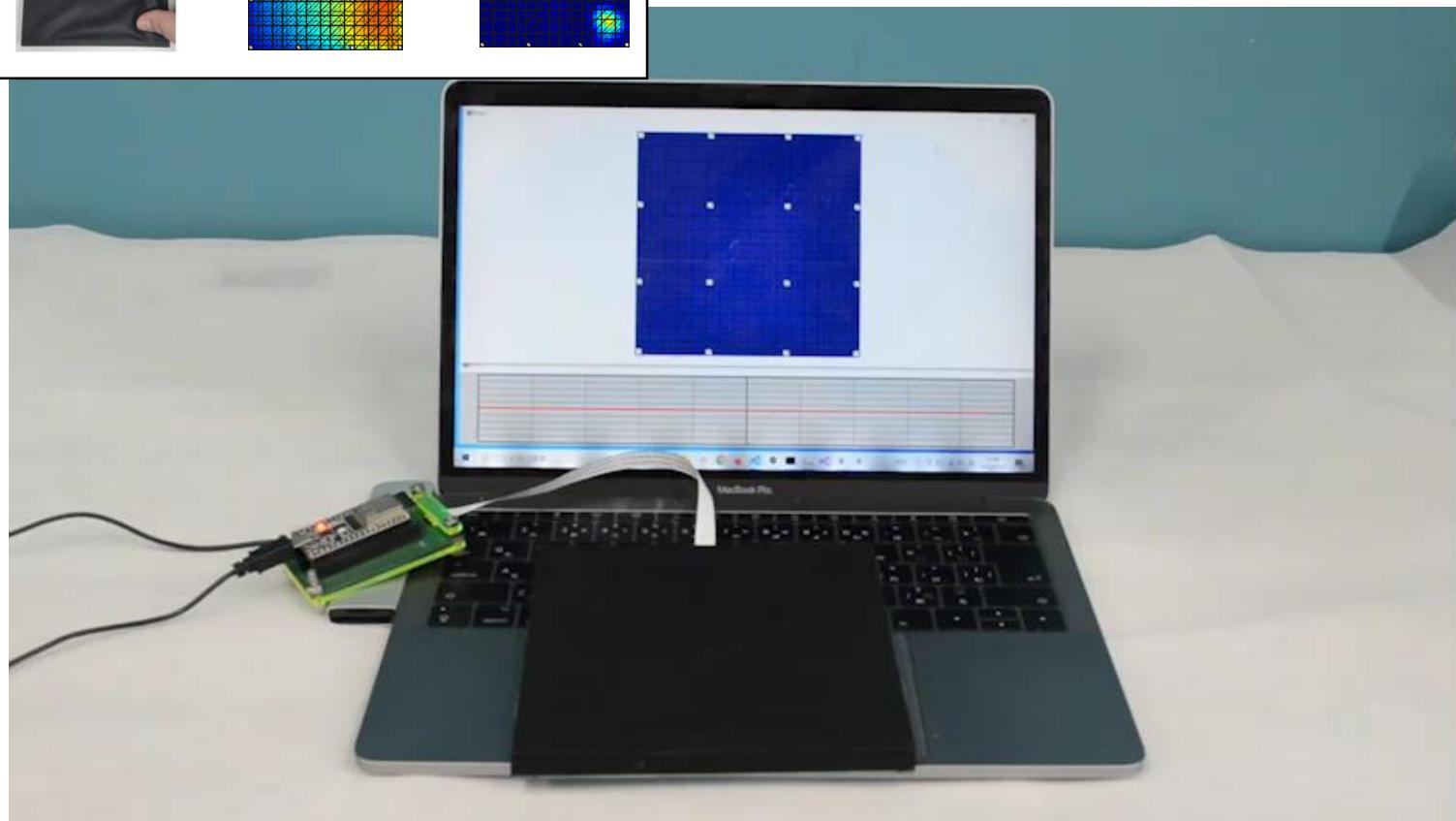


→ 転畠込み層・活性化関数 (ReLU)
→ 畠込み層・活性化関数 (ReLU)



A. Kojima et al., IEEE IROS 2022

SI2022 優秀講演賞

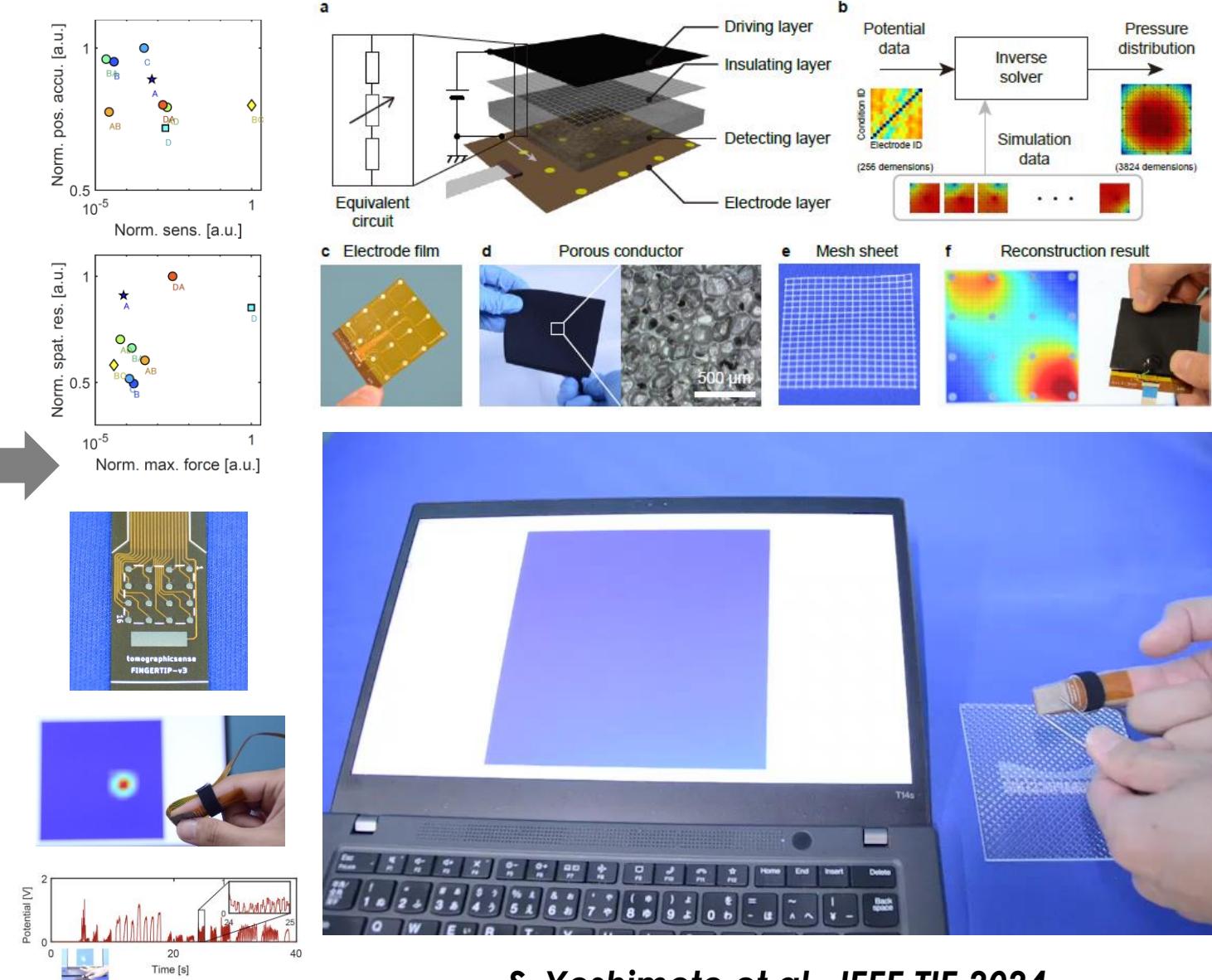
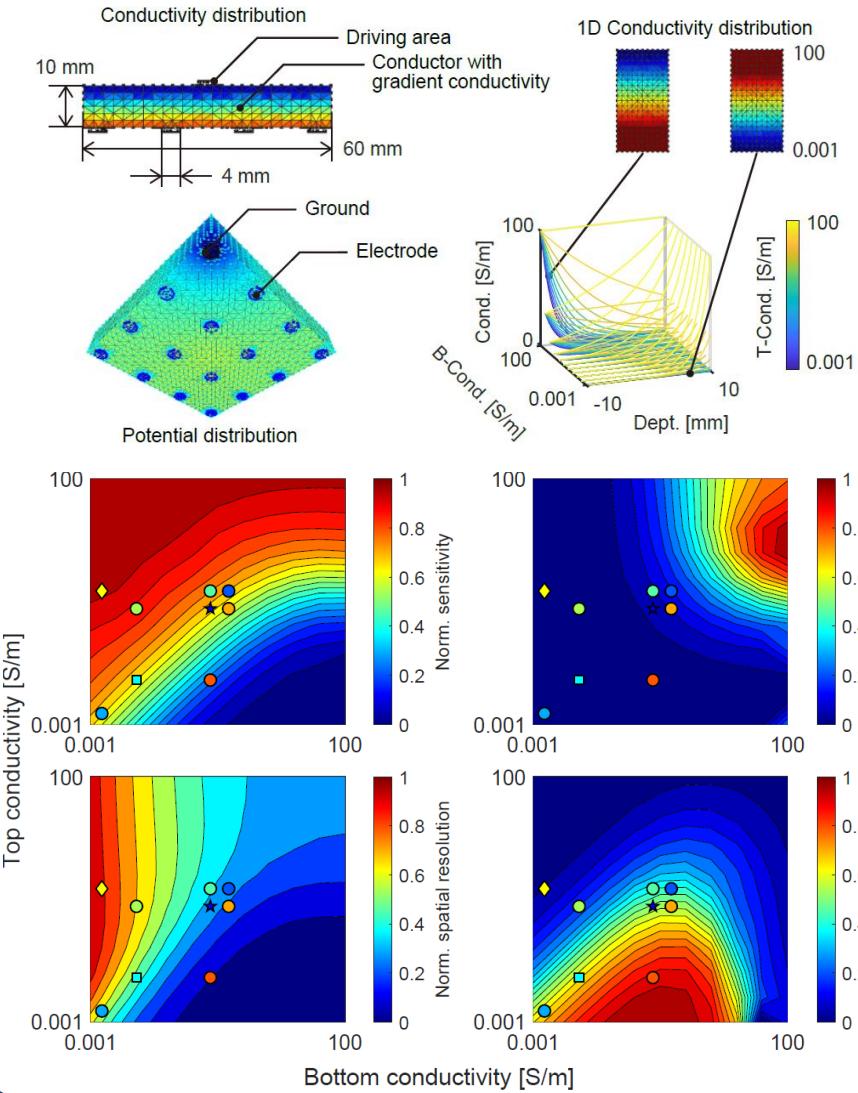


- 複数電極同時接地
- 数値計算による学習データの生成
- 学習データに雑音を重畠
- 導体間の接触抵抗を推定

✓ 高空間分解能: 1辺の10%の間隔で入力点を弁別可能 (従来の1/4以下)

人の触覚機能に迫るトモグラフィ型触覚センサ (材料メーカーとの共同研究)

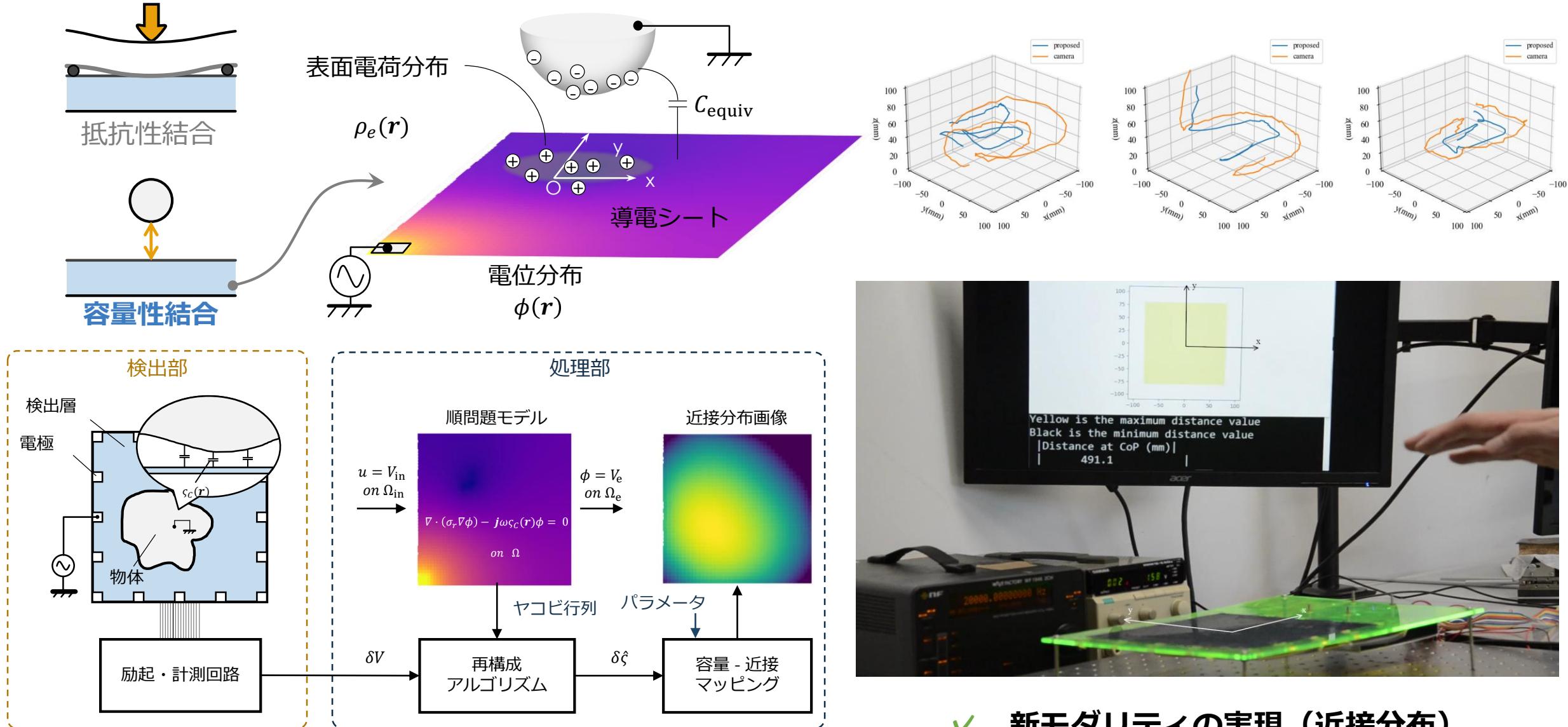
Sim.による有效的なパラメータの調査



S. Yoshimoto et al., IEEE TIE 2024

静電容量式トモグラフィによる近接分布推定

Z. Li et al., Sensors, 2021

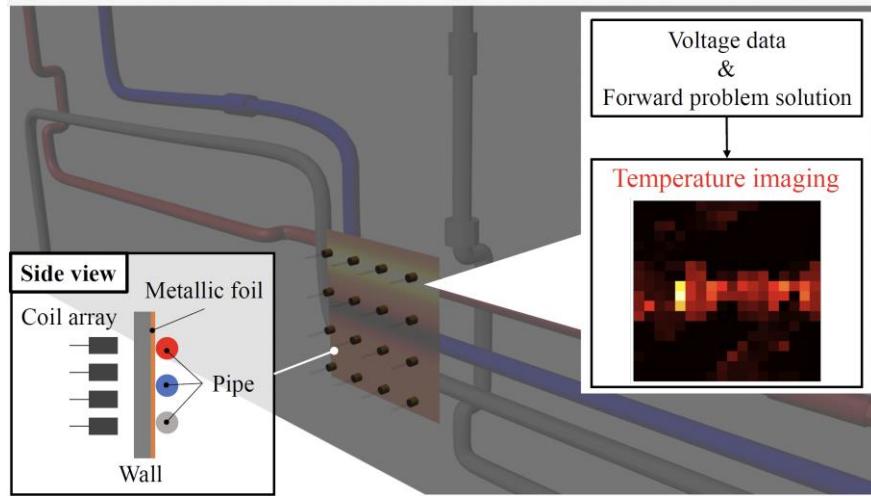


✓ 新モダリティの実現（近接分布）

電磁トモグラフィによる温度分布推定

S. Hayashi et al., IEEE Sensor J., 2023

SICE優秀学生賞, 2023



金属シートの
温度-導電率関係式

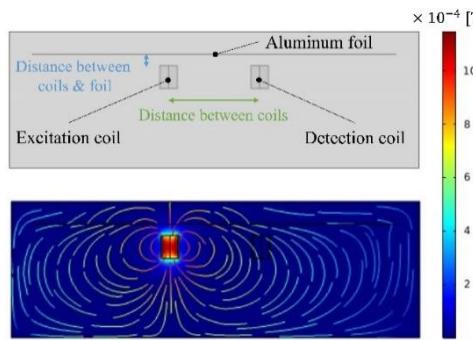
$$\Delta T = \frac{1}{\alpha} \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\sigma_b}$$

T : 温度

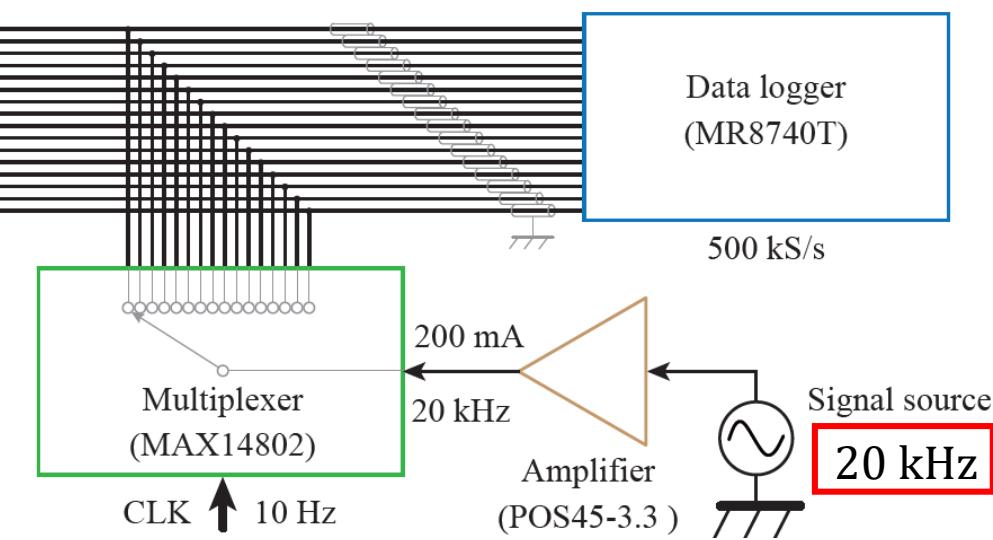
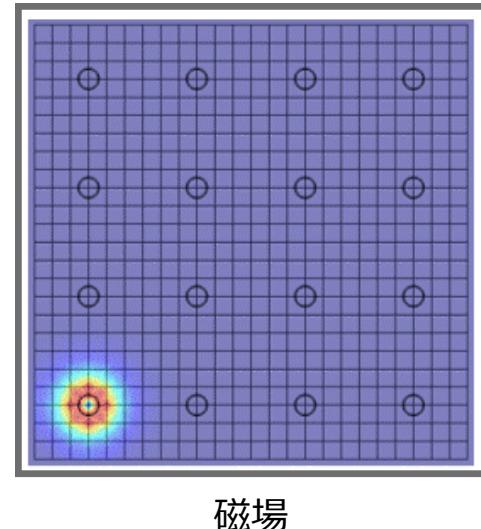
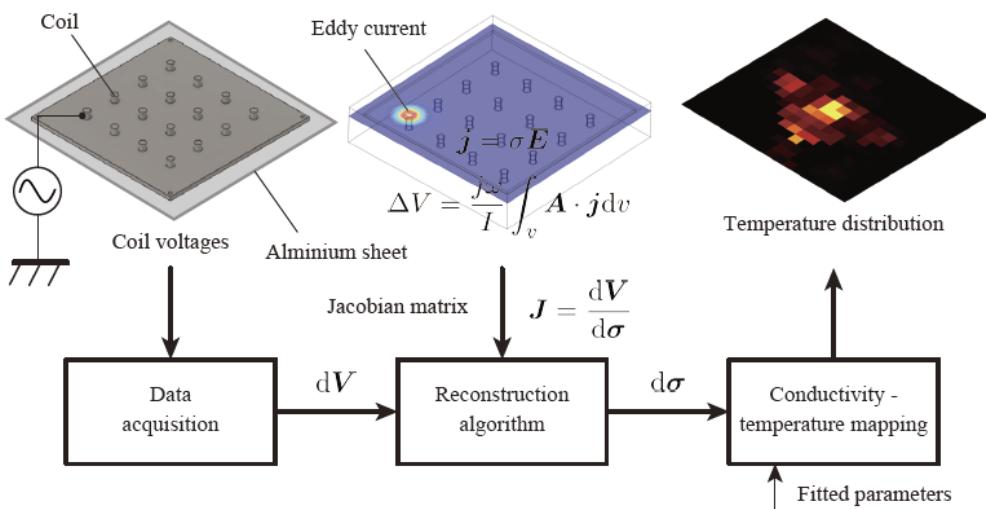
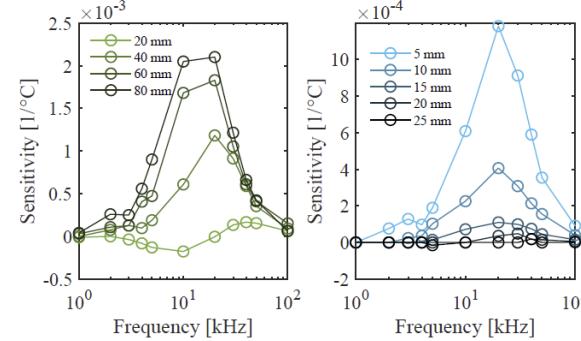
α : 係数

σ : 導電率

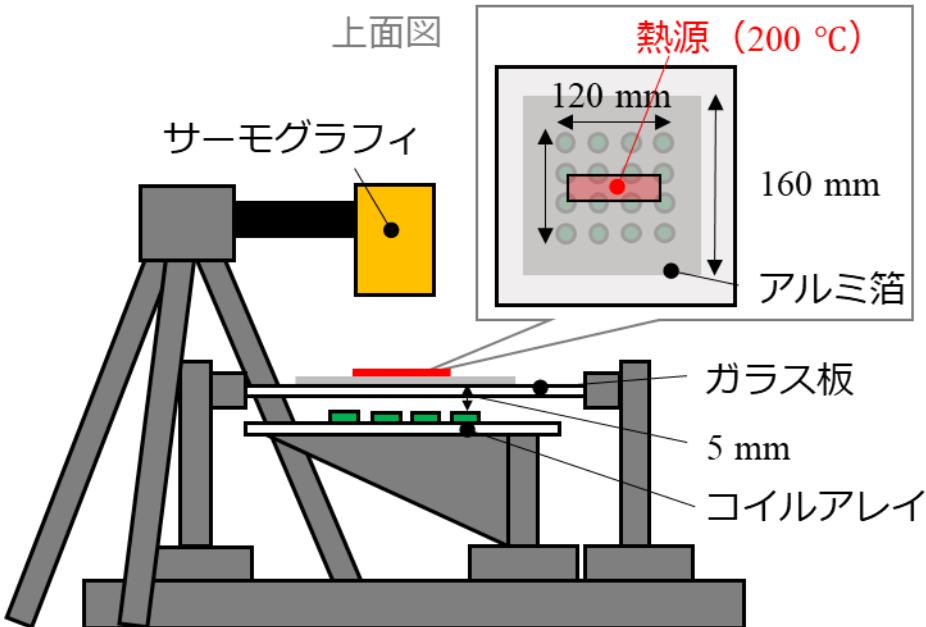
二つのコイルを用いた
磁場解析



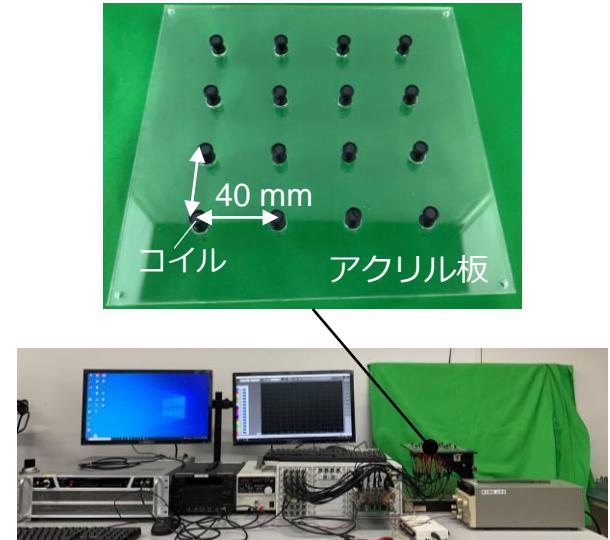
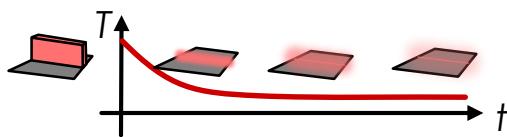
コイル間距離と
シートコイル間距離の影響



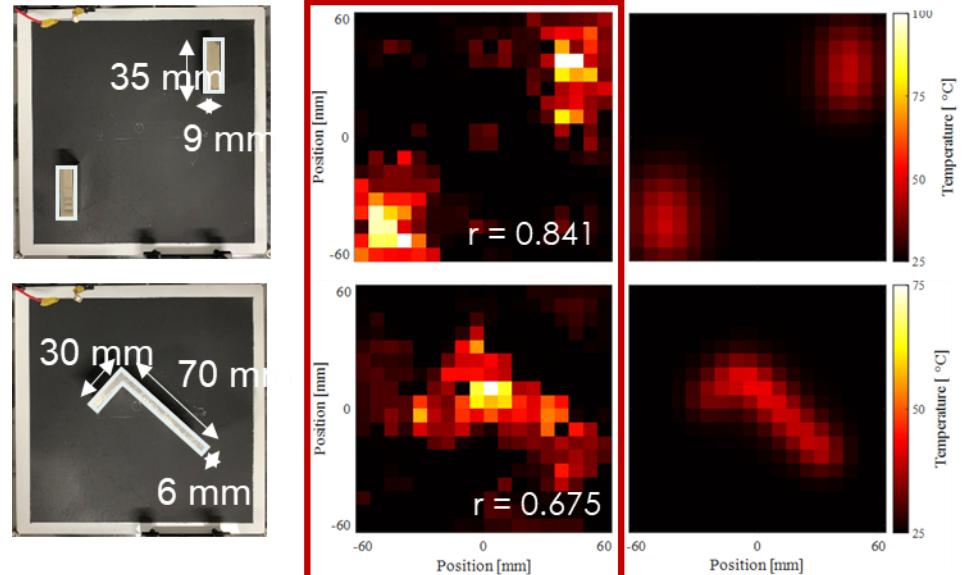
温度分布推定結果の事例



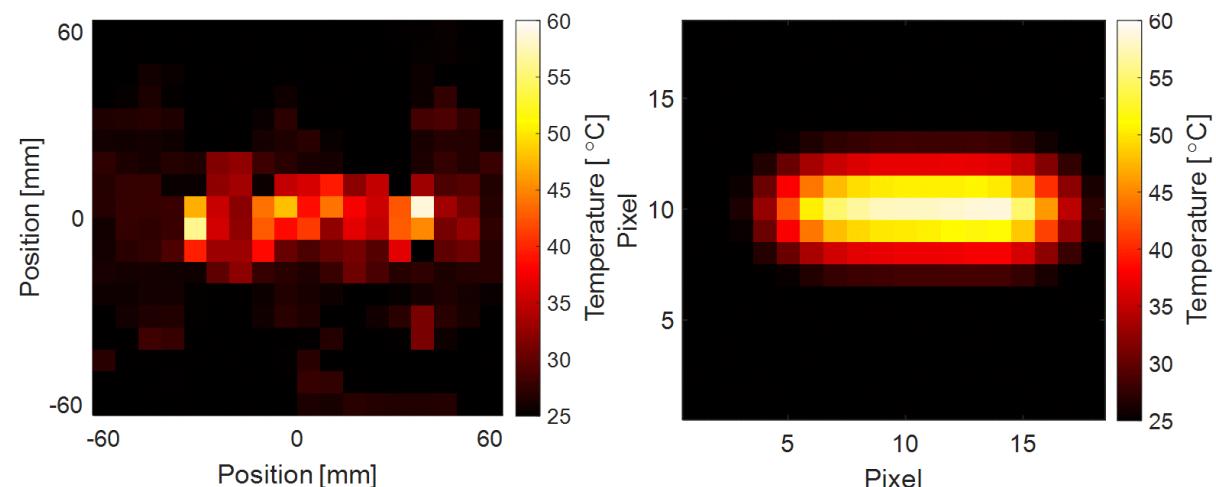
1. 室温 (25 °C) を基準電位に設定
2. アルミ箔に温度分布を与える
3. 温度分布を与えた際の電位を計測
4. 電位差分値から温度を推定



真値
(サーモグラフィ)



再構成結果



✓ 温度分布の非接触可視化に成功

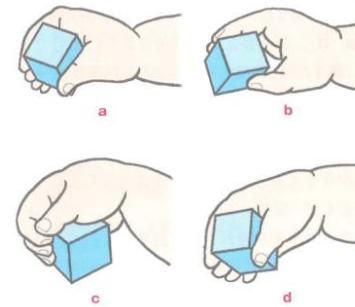
立体形状触覚センサによる乳幼児の把持行動計測と発達評価



(芝浦工業大学との共同研究)

・目的

- ・微細運動スキルの定量的な評価方法の確立
- ・手指運動の巧緻性から脳機能（認知・発達）を推定
- ・発達障害の早期診断（ASD）



正常

異常

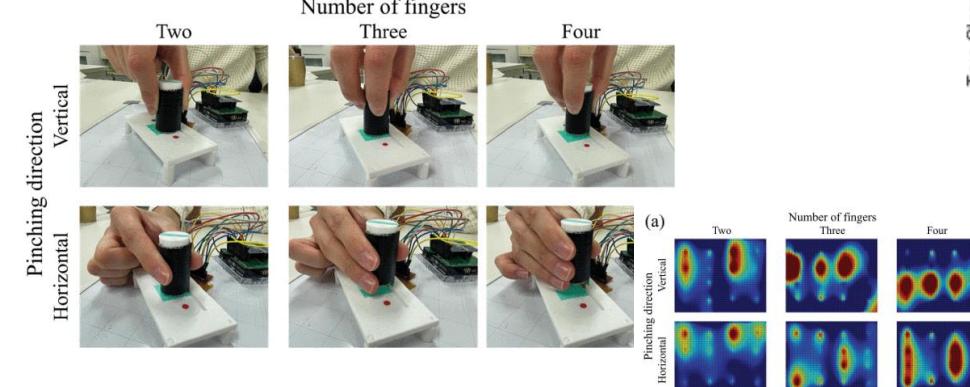
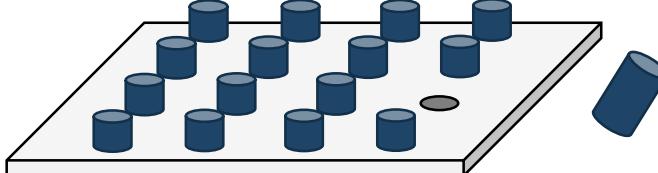
[浅野大喜編, 人間発達学, 2021]

・方法

複雑形状に対する製造方法の確立が必要

- ・立体形状のトモグラフィ型触覚センサで把持状態を定量化
- ・乳幼児を対象にデータを取得, 生後週数・発達との関係を評価

ペグボード円筒ブロック型での実装



R. Asahi et al., IEEE Access 2024

		Predicted Class					
		2 horizontal	2 vertical	3 horizontal	3 vertical	4 horizontal	4 vertical
True Class	2 horizontal	95.0%	3.8%	0.8%		0.2%	0.2%
	2 vertical	2.3%	96.5%		1.0%		0.2%
3 horizontal	1.8%		85.0%	1.7%	9.2%	2.3%	
		0.7%		92.5%			6.8%
4 horizontal	2.3%	1.7%	9.8%		85.0%	1.2%	
				5.3%			94.7%

トモグラフィ型センサ関連発表文献

1. S. Yoshimoto, K. Sakamoto, R. Takeda, A. Yamamoto, Design of a High-Performance Tomographic Tactile Sensor by Manipulating the Detector Conductivity. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.71, no.12, pp.16783-16791, 2024.
2. R. Asahi, S. Yoshimoto, H. Sato, Development of Pinching Motion Classification Method using EIT-based Tactile Sensor. *IEEE Access*, vol.12, pp.62089-62098, 2024.
3. S. Hayashi, S. Yoshimoto, A. Yamamoto, Noncontact 2-D Temperature Imaging of Metallic Foils Using Electromagnetic Tomography. *IEEE Sensors Journal*, vol.23, no.16, pp.17942-17950, 2023.
4. A. Kojima, S. Yoshimoto, A. Yamamoto, Optimization of Electrode Positions for Equalizing Local Spatial Performance of a Tomographic Tactile Sensor. *Frontiers in Robotics and AI*, section Smart Sensor Networks and Autonomy, vol.10, no.1157911, pp.1-9, 2023.
5. Z. Li, S. Yoshimoto, A. Yamamoto, Tomographic Proximity Imaging Using Conductive Sheet for Object Tracking. *Sensors*, vol.21, no.8, pp.2736:1-16, 2021.
6. H. Mitsubayashi, S. Yoshimoto, A. Yamamoto, Adaptive Potential Scanning for a Tomographic Tactile Sensor with High Spatio-Temporal Resolution. In Proc. 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.9827-9832, 2020 (IEEE RAS JJC Young Award).
7. 吉元俊輔, 導電性材料を用いたソフトな触覚センシング, 日本ロボット学会誌, Vol.37, No.5, pp.391-394, 2019.
8. S. Yoshimoto, Y. Kuroda, O. Oshiro, Tomographic Approach for Universal Tactile Imaging with Electromechanically Coupled Conductors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.67, no.1, pp.627-636, 2020.
9. 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 大城理, 触覚センサ, 特願2018-054266, 特開2019-168247, 特許第7081793号, 2018/3/22.