

2021年度マニピュレーション冬の学校
マニピュレーションのための触覚・力覚センサ技術

ソフトロボティクスにおける触覚センシング

立命館大学 平井 慎一



ソフトロボット学入門 －基本構成と柔軟物体の数理－

新学術領域「ソフトロボット学」・ロボット学会[監修]
鈴森 康一・新山 龍馬・中嶋 浩平・舩屋 賢 [共編]

- 序章 ソフトロボットの概念
- 第1章 ソフトロボットの力学
- 第2章 やわらかい知能
- 第3章 ソフトアクチュエータ
- 第4章 ソフトセンサ
- 第5章 ソフトロボットの設計と製作
- 第6章 ソフトロボットの機能と制御



ソフトロボット学入門 －基本構成と柔軟物体の数理－

第4章 やわらかいセンサ

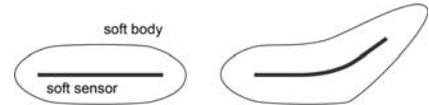
- 4.1 概論
- 4.2 抵抗センサ
- 4.3 静電容量センサ
- 4.4 電場応答型センサ
- 4.5 磁気センサ
- 4.6 光学センサ

著者

新竹 純 (電気通信大学)
平井 慎一 (立命館大学)
高木 賢太郎 (豊橋技科大)
高嶋 一登 (九工大)
川節 拓実 (大阪大学)
下ノ村 和弘 (立命館大学)



ソフトロボットにおけるセンシング

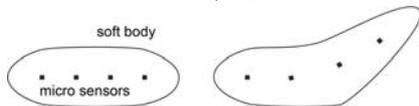


伸縮○/曲げ○ エラストマー, ゲル, ファイバー
伸縮×/曲げ○ フィルム, ワイヤー

ボディの伸縮や曲げ: センサで許容される変形の範囲内
ボディの伸縮や曲げ: 信号線や電力線の変形の範囲内



ソフトロボットにおけるセンシング

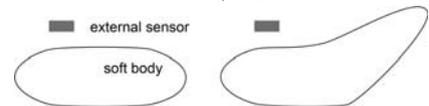


マイクロメートルオーダーのサイズのセンサ
MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 技術で製作

ボディの変形: センサの挙動の影響は少ない
ボディの伸縮や曲げ: 信号線や電力線の変形の範囲内



ソフトロボットにおけるセンシング

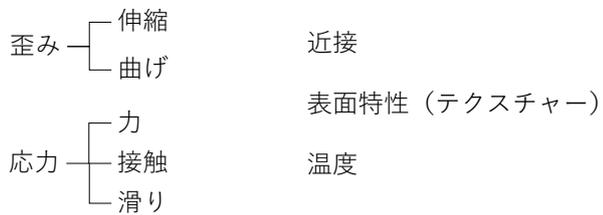


カメラ, レンジファインダーなど
ソフトロボットと外部環境の状態を認識

ボディの材料や表面特性を設計
計測結果の伝達が課題

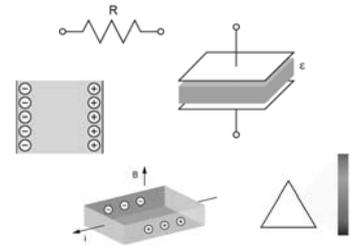


センシング量



センシング方式

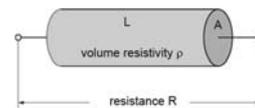
- 電気抵抗
- 静電容量
- 圧電効果
- 磁気
- 光 (画像)



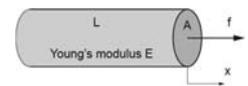
センシング量とセンシング方式

	歪み		応力		近接	表面	温度
	伸縮	曲げ	力	滑り			
電気抵抗							
静電容量							
圧電効果							
磁気							
光							

抵抗センサ

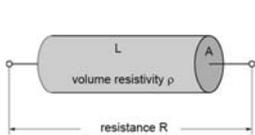


$$R = \rho \frac{L}{A}$$



$$f = \frac{EA}{L} x$$

抵抗センサ



$$R = \rho \frac{L}{A}$$



$$\Delta R = \rho \frac{x}{A}$$

抵抗センサ

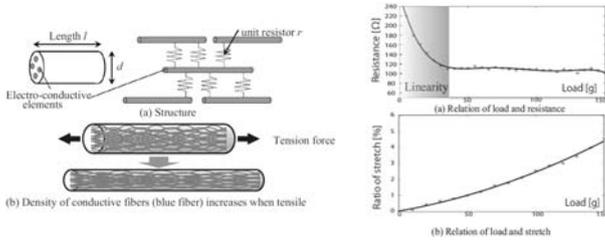
体積抵抗率 (電気抵抗率)	
アルミニウム	$2.65 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
鉄	$1.00 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$
炭素	$1.65 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$
ケイ素	$3.97 \times 10^3 \Omega \cdot m$
紙	$10^4 \sim 10^{10} \Omega \cdot m$
ポリエステル	$10^{12} \sim 10^{14} \Omega \cdot m$
ゴム	$10^{13} \Omega \cdot m$



$$\Delta R = \rho \frac{x}{A}$$

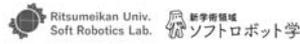
<https://ja.wikipedia.org/wiki/電気抵抗率の比較>

導電糸センサ

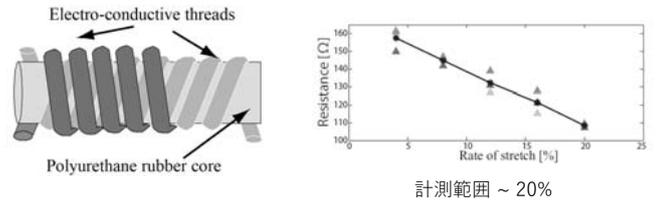


Ho et al., IEEE Sensors J., 13(10), 2013

計測範囲 ~ 2%



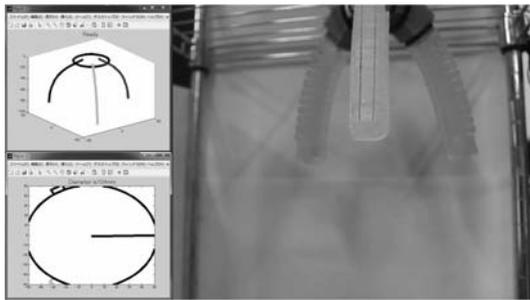
ダブルカバリング構造



計測範囲 ~ 20%



柔軟指の曲げの推定



Matsuno et al., IEEE RCAR 2017



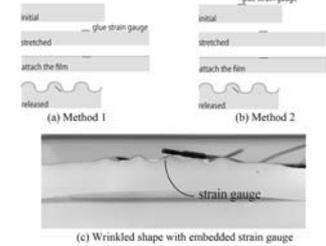
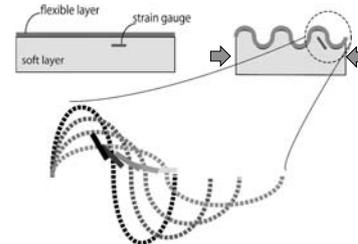
Wrin'Tac2



Ho @JAIST



Sensing Elements: Strain Gauges
Actuating Element: Expansion/Contraction



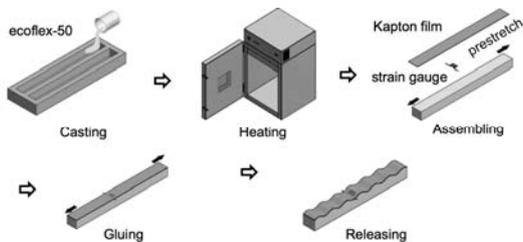
Wrin'Tac2 can change the posture of sensors based on morphological change under elongation, to match different sensing tasks

Wrin'Tac2

Ho @JAIST



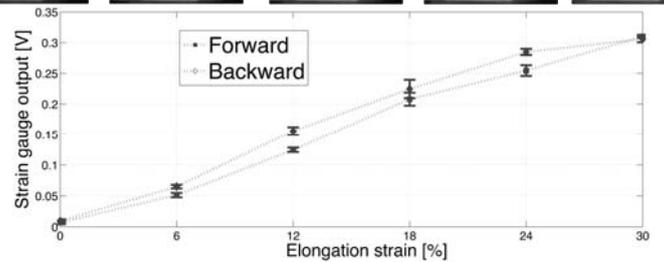
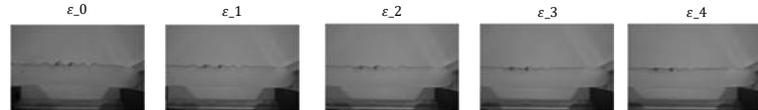
WrinTac is fabricated by assembling three components



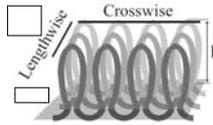
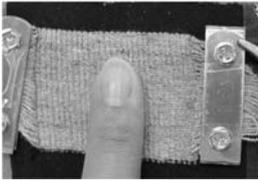
Qiukai Qi, Shinichi Hirai, and Van Anh Ho, Wrinkled Soft Sensor with Variable Afferent Morphology, IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L), Vol. 4, Issue 2, pp. 1908-1915, 2019



Sense of Self-Deformation



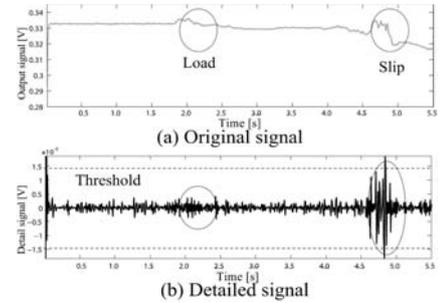
パイル生地センサ



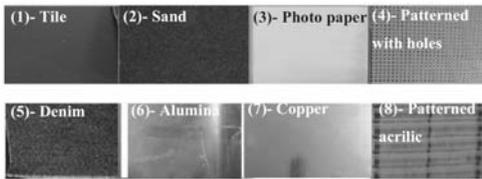
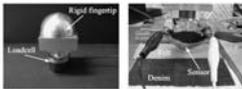
滑りの検出

ウェーブレット変換
高周波成分の振幅

Van Ho and Shinichi Hirai
Robotics: Science and Systems VII
pp.129-136, 2012

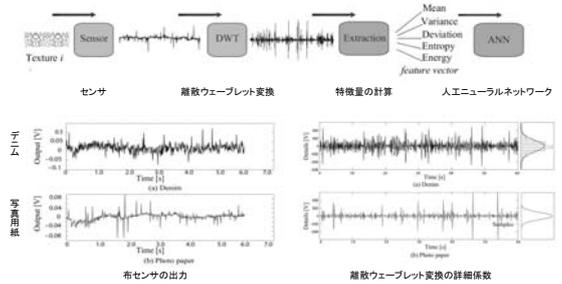


表面テクスチャーの識別

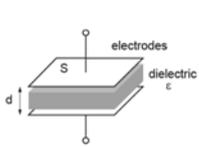


Ho, Makikawa, and Hirai, IEEE Sensors Journal, 2013

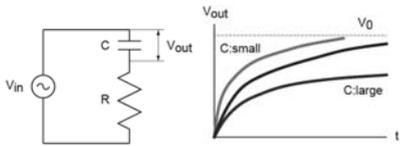
表面テクスチャーの識別



静電容量センサ

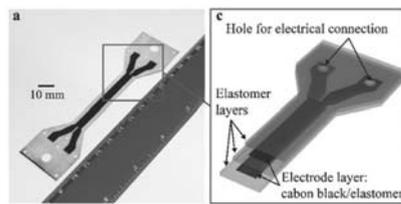


$$C = \epsilon \frac{S}{d}$$



$$V_{out}(t) = V_0 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{RC}t\right) \right\}$$

ソフト歪みセンサ

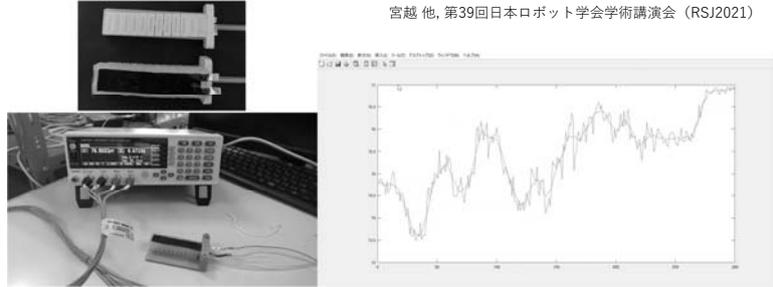


新竹 純 (電気通信大学)

Jun Shintake et al., Advanced Materials Technologies, 2018

ソフト歪みセンサによる曲げ計測

宮越 他, 第39回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2021)



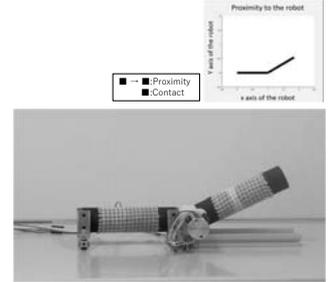
UEC 電気通信大学 Ritsumeikan Univ. Soft Robotics Lab. 新学術領域 ソフトロボット学

Fabric-based Proximity/Contact Sensor

Sensor made of conductive fabric
Can detect approaching/contacting objects

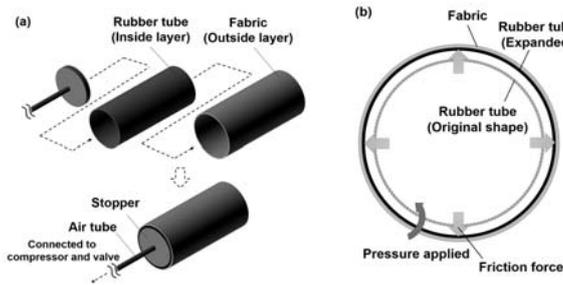


Can cover curved surfaces of rigid/soft robots
Applicable to safety sensors of robots



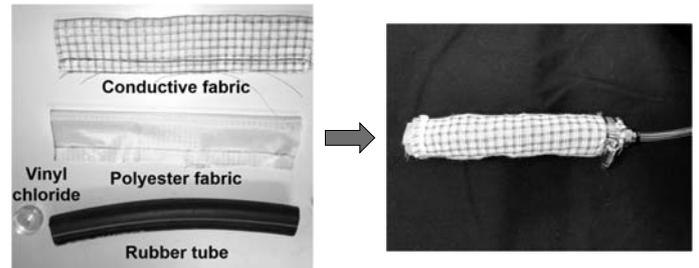
Ritsumeikan Univ. Soft Robotics Lab. 新学術領域 ソフトロボット学

Variable Stiffness Link with Fabric Sensor

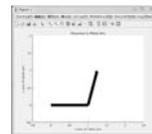
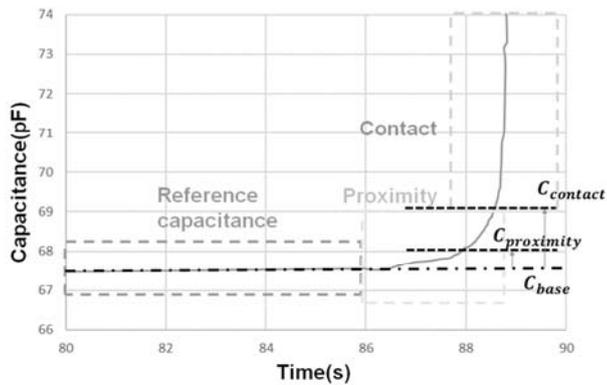


Ritsumeikan Univ. Soft Robotics Lab. Queen Mary University of London 新学術領域 ソフトロボット学

Variable Stiffness Link with Fabric Sensor

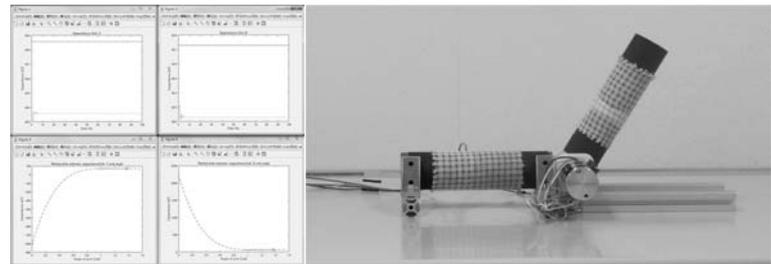


Ritsumeikan Univ. Soft Robotics Lab. Queen Mary University of London 新学術領域 ソフトロボット学

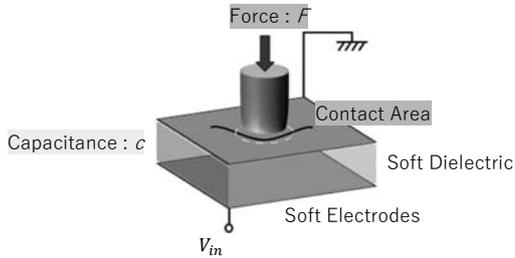


■: Proximity
■: Contact
—: Measured
- -: Reference

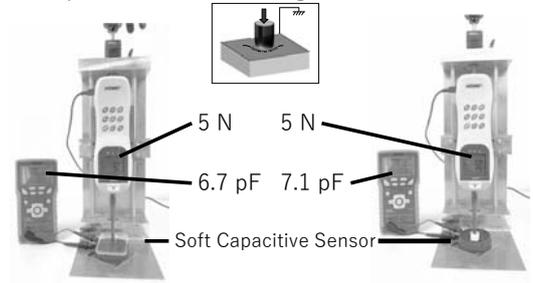
Matsuno et al., IEEE RAL, 4(2), 2212-2219, 2019



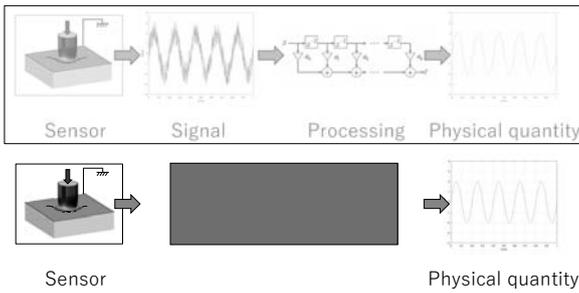
Soft Capacitive Sensing



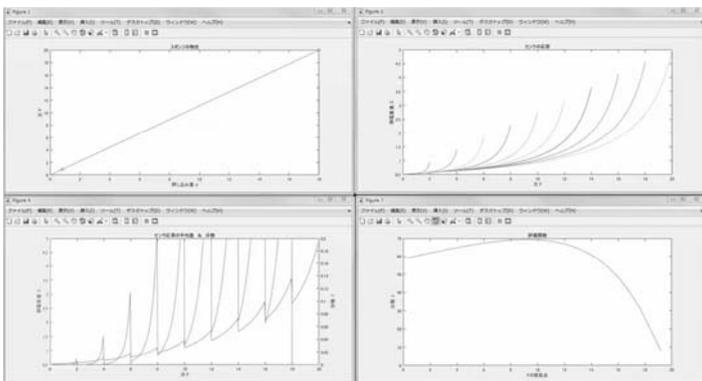
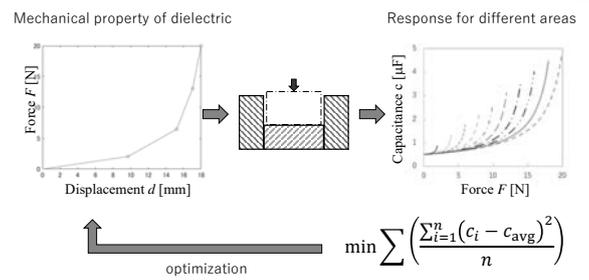
Soft Capacitive Sensing



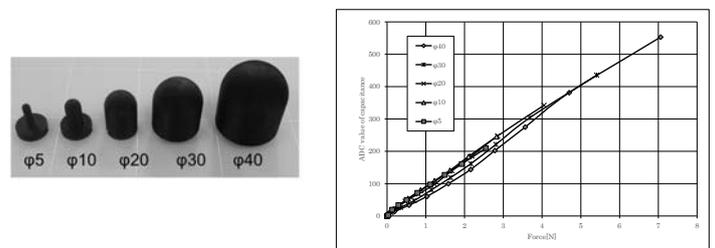
Soft Capacitive Sensing



Soft Capacitive Sensing

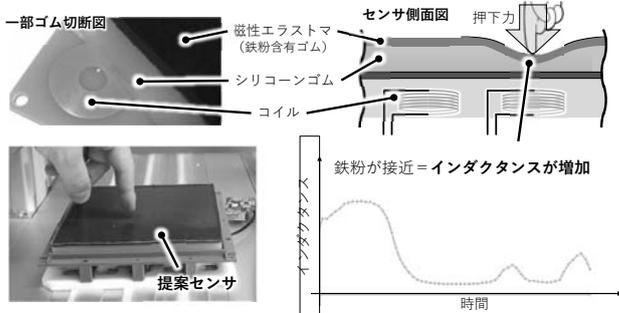


Soft Capacitive Sensing





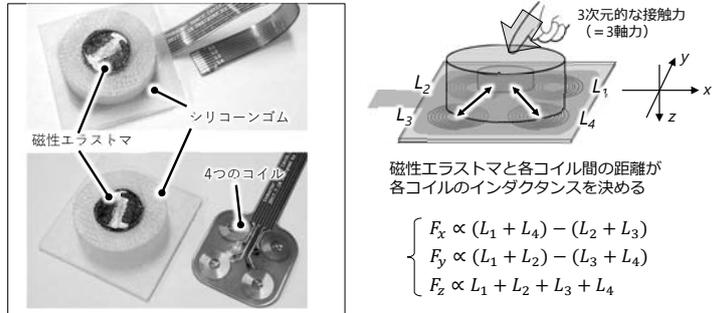
磁性エラストマの変位 (=接触力) をインダクタンス変化から取得



T. Kawasetsu, et al. "Size dependency in sensor response of a flexible tactile sensor based on inductance measurement." Proc. 2017 IEEE Sensors Conf., 2017. 37



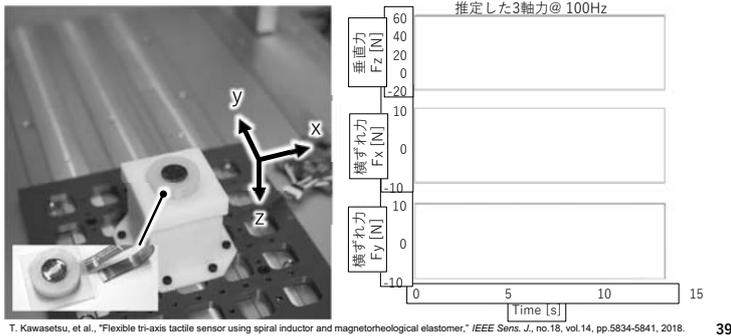
複数のコイルを用いることで接触力の方向も推定可能



T. Kawasetsu, et al. "Flexible tri-axis tactile sensor using spiral inductor and magnetorheological elastomer." IEEE Sens. J., no.18, vol.14, pp.5834-5841, 2018. 38



複数のコイルを用いることで接触力の方向も推定可能



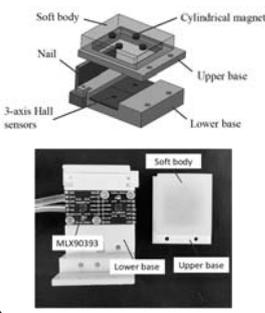
T. Kawasetsu, et al. "Flexible tri-axis tactile sensor using spiral inductor and magnetorheological elastomer." IEEE Sens. J., no.18, vol.14, pp.5834-5841, 2018. 39

Magnetic-based Tactile Sensing

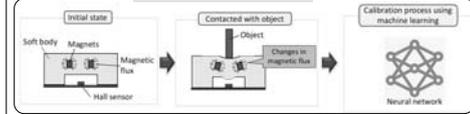
Hisyam Rosle
Universiti Malaysia Perlis



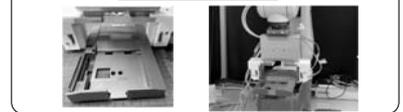
Design and Fabrication



Sensing Principle



Assembly Task

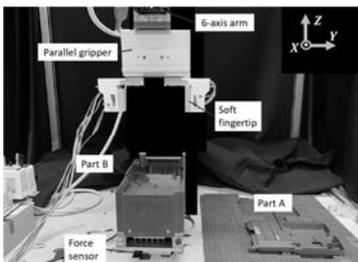


M. H. Rosle, R. Kojima, K. Or, Z. Wang, and S. Hirai. "Soft Tactile Fingertip to Estimate Orientation and the Contact State of Thin Rectangular Objects," in IEEE Robotics Automation Letters, vol. 5, no. 1, pp. 159-166, 2020

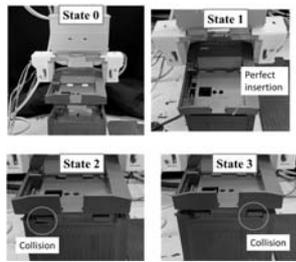
Magnetic-based Tactile Sensing

Contact State Classification

Hisyam Rosle
Universiti Malaysia Perlis



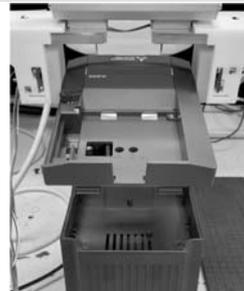
Experimental setup using 6-axis arm: classification of contact states with electrical converter



Contact state definition.
Successful state: State 1
Failure state: State 2 and 3

Magnetic-based Tactile Sensing

The arm moved upward once failure state (State 2 and 3) was detected



State 2 (Left collision)



State 3 (Right collision)



下ノ村和弘 (立命館大学)

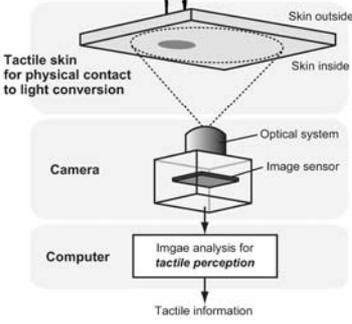
カメラを用いた触覚画像センサの基本構造

センサ面
 接触面への物理的接触を光学的な情報に変換する。典型的な変換方式として、
 ・導光板を用いた方式
 ・マーカ変位に基づく方式
 ・反射膜を用いた方式

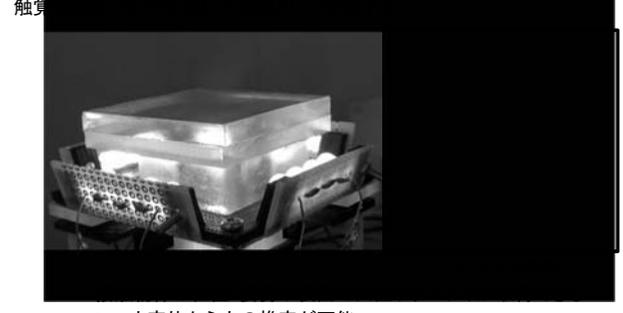
カメラ
 センサ面を裏側から撮影する。必要に応じて適切な照明も利用する。

コンピュータ
 カメラ画像を解析し、触覚情報を取り出す。

Shimomura, K.; Tactile Image Sensors Employing Camera: A Review. *Sensors* **2019**, *19*, 3933. 3



触覚画像センサ



- ・マーカ変位から力の推定が可能
 - ・解像度 750 × 750 [pixel]
- Nozu, Shimomura, *IEEE/ASME AIM2018*

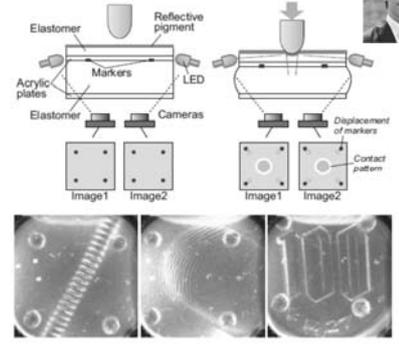


ハンド内位置・姿勢と力の複合センシング

触覚情報に基づいて、ボルトを目標の穴に挿入することを考える。

ボルトのハンド内での位置・姿勢
 ボルト先端の位置・姿勢を目標の穴に対して合わせるため
ボルト先端にはたらく力
 ボルト先端が穴に入ったかどうかを知るため
 → 反射膜方式とマーカ変位方式を組み合わせる

Nozu, Shimomura, *IEEE/ASME AIM2018*



ハンド内位置・姿勢と力の複合センシング

The figure shows a robotic hand performing bolt insertion. It includes a photograph of the hand and several sensor data overlays: 'Normal force' (vertical force), 'せん断力' (shear force), and 'ボルトの位置・姿勢' (bolt position and posture). A text box states: '触覚情報のみに基づいて、ボルト先端を目標の穴に挿入し、仮締めする。' (Based on tactile information only, insert the bolt tip into the target hole and temporarily tighten it.)

Robotic bolt insertion and tightening based on in-hand object localization and force sensing
 Nozu, Shimomura, *IEEE/ASME AIM2018*



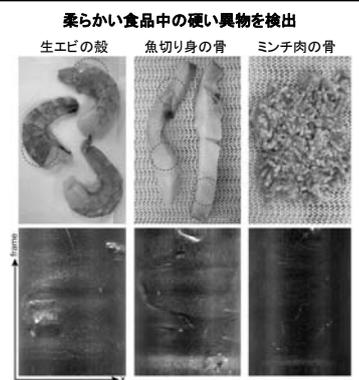
ローラ型触覚画像センサと食品検査への応用

柔らかい食品中の硬い異物を検出

生エビの殻 魚切り身の骨 ミンチ肉の骨

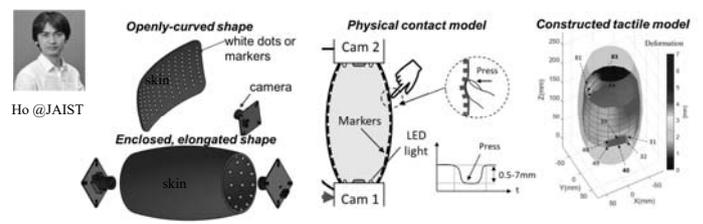
対象物上でローラを転がしながら触覚情報取得

Ho @JAIST



Large-Scale Tactile Sensing 触覚センサ

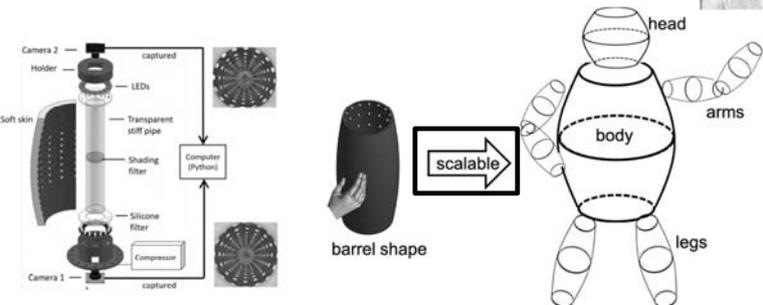
- 触覚検知装置の大きさと耐久性の課題を解決するため、複数台の小型カメラを内部に設置し、スキンに広範囲に接触したことによる3次元の歪み・変形量を計算する。
- カメラの設定によって、配線の複雑さをほぼ完全に無くし、センシングの精度や動作の耐久性を高める。



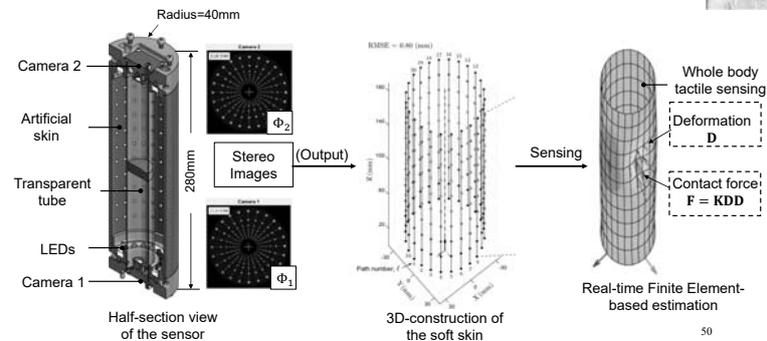
提案者: Ho, Anh Van, Duong, 朝比奈, 触覚検知装置及び触覚検知方法, 出願番号: 2019-018391



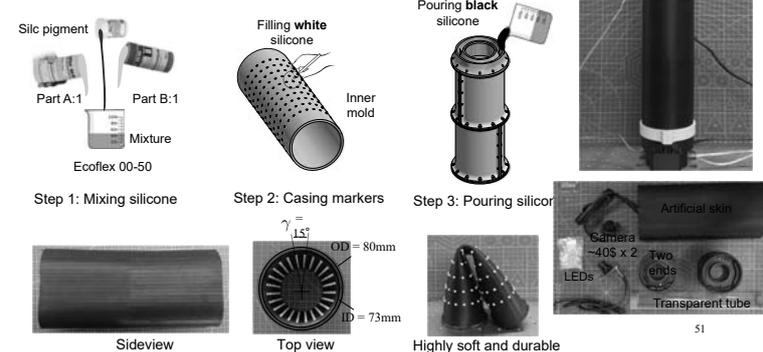
Large-Scale Tactile Sensing



原理



試作



Large-Scale Tactile Sensing

Lac Van Duong and Van Anh Ho, Large-Scale Vision-Based Tactile Sensing for Robot Links: Design, Modeling, and Evaluation, *IEEE Transaction on Robotics*, Vol. 37, Issue 2, pp. 390-403, April, 2020.



Ho @JAIST

Large-Scale Vision-based Tactile Sensing for Robot Links: Design, Modeling, and Evaluation

Lac Van Duong and Van Anh Ho

Japan Advanced Institute of Science and Technology (JAIST)

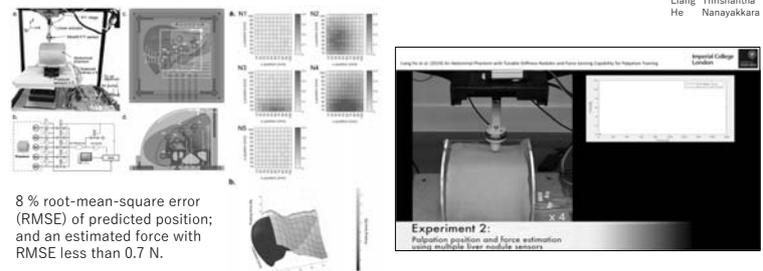
Japan, 2020

IEEE Transactions on Robotics (T-RO)

Abdominal Phantom sensors calibration



Liang He, Thirishantha Nanayakkara



He, L., Herzog, N., de Lusignan, S., & Nanayakkara, T. (2018, July). "An Abdominal Phantom with Tunable Stiffness Nodules and Force Sensing Capability for Palpation Training". *IEEE Transactions on Robotics*, 2020

First generation abdominal palpation simulators with facial expressions



Thilina Lalitharatne, Yongxuan Tan, Thirishantha Nanayakkara

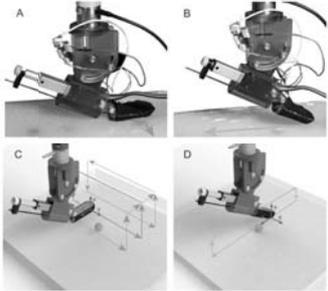


Lalitharatne, Thilina Dulantha, Yongxuan Tan, Liang He, Florence Leong, Neira Van Zalk, Simon de Lusignan, Fumiya Iida, and Thirishantha Nanayakkara. "MorphFace: A Hybrid Morphable Face for a Robopatient." *IEEE Robotics and Automation Letters* 6, no. 2 (2021): 643-650.

Variable stiffness robotic finder



Herzig et al. A Variable Stiffness Robotic Probe for Soft Tissue Palpation in IEEE RAL 2018

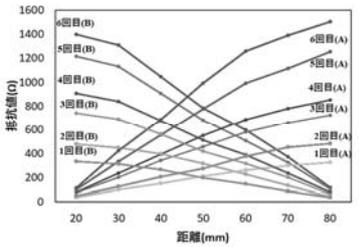
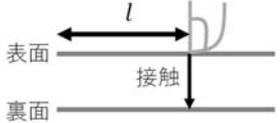
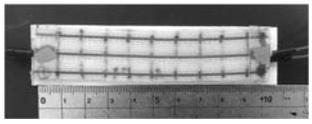


Herzig et al. Conditioned haptic perception for 3D localization of nodules in soft tissue palpation with a variable stiffness probe in PLOS ONE 2020
DOI: 10.1371/journal.pone.0237573

ソフトロボットにセンサを用いる

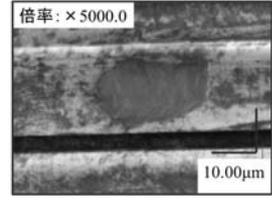
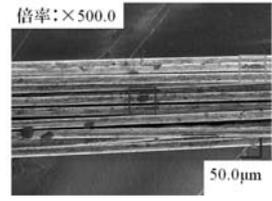
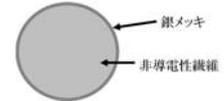
- センサの経年変化, センサに対する環境の影響
- センサの埋め込み方法
 - 接着剤や取り付け材がボディの柔らかさに影響
- 信号/電力線の変形特性
- センサと信号/電力線との接合部
 - 接合部がボディの変形に伴い破断
 - 接合部の接触抵抗が変動

導電糸タッチセンサ



中村 他, ロボティクス・メカトロニクス講演会2018

導電糸タッチセンサ



終わりに

- センサの研究
 - 何をセンシングするか
 - 何が重要か (精度, 速さ, ロバスト性 ...)
 - マルチモーダル, 情報処理するマテリアル
- センシング方式の研究
 - 環境の影響に対してロバスト
 - 動作に必要な情報の検出 / 推定

終わりに

- 物理を理解する
- 応用を意識する

