

センサ工学

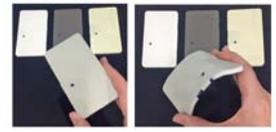
ロボティクス学科 平井 慎一



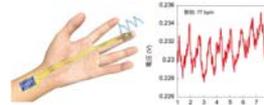
ソフトセンサ：柔らかいセンサ



http://www.ams.eng.osaka-u.ac.jp/user/isihara/wp-content/uploads/2016/08/sensor_ver1-e1541744713909.jpg



https://www.dic-global.com/news/news_file/20190201_%E3%83%93%E3%83%AB%E3%82%B8%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%B3%E3%82%B0%E3%BC%92.jpg



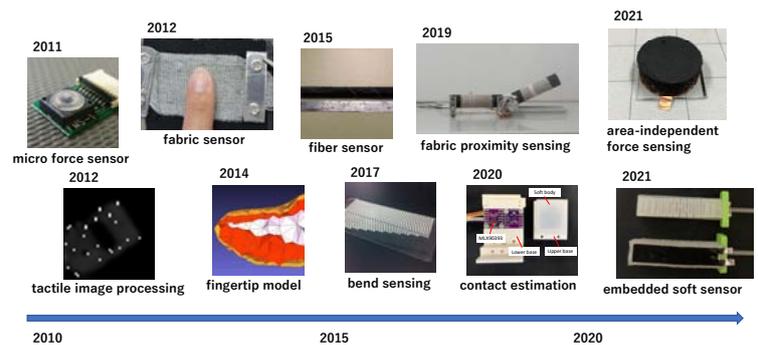
<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20210422-1876923/images/003.jpg>



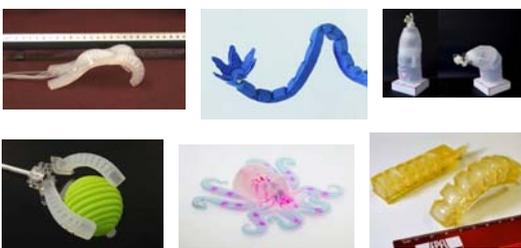
ソフトセンサ：触覚センシング



材料特性や表面特性を感知



ソフトセンサ：ソフトロボティクス



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

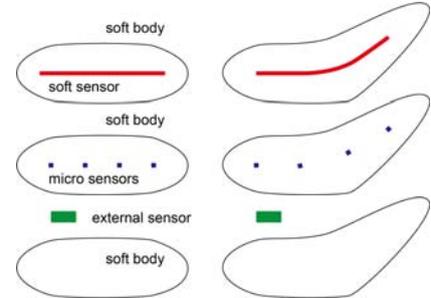
- 4.1 概論
- 4.2 抵抗センサ
- 4.3 静電容量センサ
- 4.4 電場応答型センサ
- 4.5 磁気センサ
- 4.6 光学センサ

著者

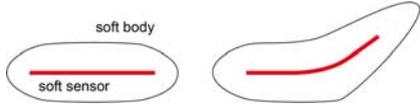
- 新竹 純 (電気通信大学)
- 平井 慎一 (立命館大学)
- 高木 賢太郎 (豊橋技科大)
- 高嶋 一登 (九工大)
- 川節 拓実 (大阪大学)
- 下ノ村 和弘 (立命館大学)



ソフトロボットにおけるセンシング



ソフトロボットにおけるセンシング

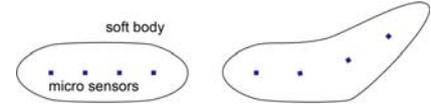


伸縮○/曲げ○ エラストマー, ゲル, ファイバー
伸縮×/曲げ○ フィルム, ワイヤ

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

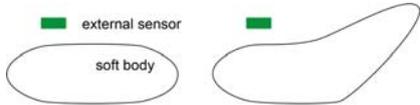


マイクロメートルオーダーのサイズのセンサ
MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 技術で製作

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

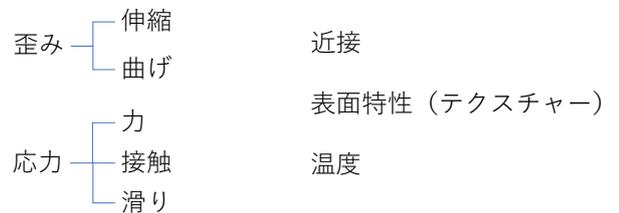


カメラ, レンジファインダーなど
ソフトロボットと外部環境の状態を認識

ボディの材料や表面特性を設計
計測結果の伝達が課題

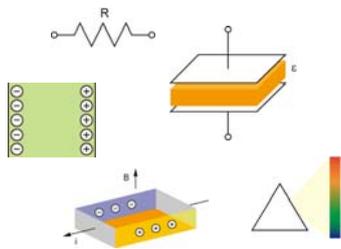


センシング量



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 | 接触 | | | |
| 電気抵抗 | | | | | | | | |
| 静電容量 | | | | | | | | |
| 圧電効果 | | | | | | | | |
| 磁気 | | | | | | | | |
| 光 | | | | | | | | |

センサ工学 抵抗センサとその応用

ロボティクス学科 平井 慎一

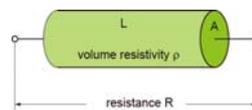
センシング量とセンシング方式

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

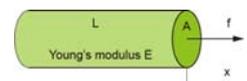
センシング量とセンシング方式

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

抵抗センサ (伸縮)

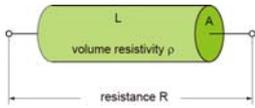


$$R = \rho \frac{L}{A}$$

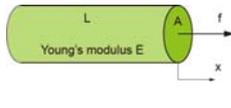


$$f = \frac{EA}{L} x$$

抵抗センサ（伸縮）

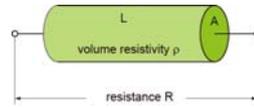


$$R = \rho \frac{L}{A}$$



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

抵抗センサ（伸縮）



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



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

抵抗センサ（伸縮）

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



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

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

抵抗センサ（伸縮）

$L = 100\text{mm}$, $A = 1\text{mm}^2$ のファイバー状センサ

ゴム（エラストマー） $\rho = 10^{10} \Omega\text{m}$

$x = 1\text{mm}$ に対する ΔR ?

断面積の増減を考慮

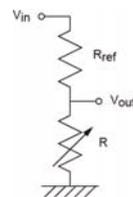
体積が不変と仮定 $AL = (A-a)(L+x)$

$$Ax - aL - ax = 0$$

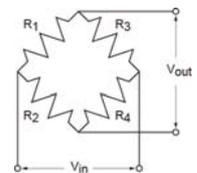
$$Ax - aL = 0$$

$$a = \frac{A}{L}x$$

抵抗の計測

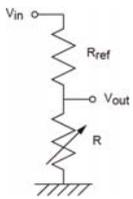


分圧回路
voltage divider



ホイーストブリッジ回路
Wheatstone bridge circuit

分圧回路



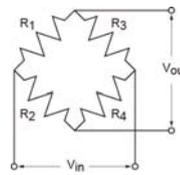
$$V_{in} = (R_{ref} + R)i$$

$$V_{out} = Ri$$

$$V_{out} = \frac{R}{R + R_{ref}} V_{in}$$

$$R = \frac{V_{out}}{V_{in} - V_{out}} R_{ref}$$

ホイーストブリッジ回路



$$V_{in} = (R_1 + R_3)i_{13}$$

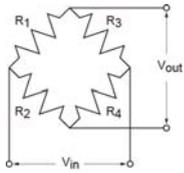
$$V_{in} = (R_2 + R_4)i_{24}$$

$$V_{out} = R_1 i_{13} - R_2 i_{24}$$

$$V_{out} = R_1 \frac{V_{in}}{R_1 + R_3} - R_2 \frac{V_{in}}{R_2 + R_4}$$

$$= \left(\frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_2}{R_2 + R_4} \right) V_{in}$$

ホイーストブリッジ回路



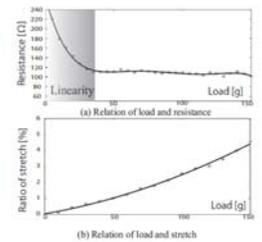
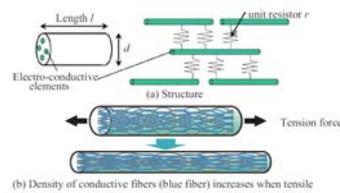
$$V_{out} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_2}{R_2 + R_4} \right) V_{in}$$

$$\frac{R_1}{R_1 + R_3} = s \quad \left(= \frac{V_{out}}{V_{in}} + \frac{R_2}{R_2 + R_4} \right)$$

$$s = \frac{V_{out}}{V_{in}} + \frac{R_2}{R_2 + R_4}$$

$$R_1 = \frac{s}{1-s} R_3$$

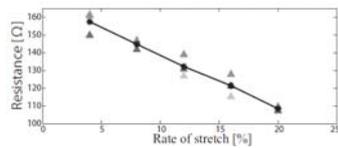
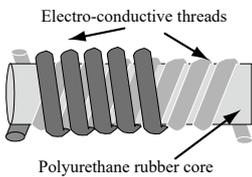
導電糸センサ



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

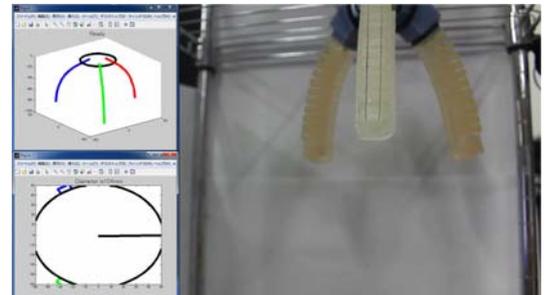
計測範囲 ~ 2%

ダブルカバリング構造



計測範囲 ~ 20%

柔軟指の曲げの推定

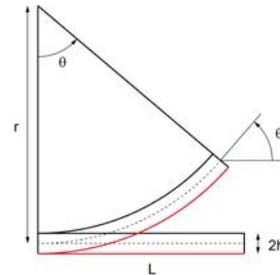


Matsuno et al., IEEE RCAR 2017

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 | 接触 | | | |
| 電気抵抗 | | | | | | | | |
| 静電容量 | | | | | | | | |
| 圧電効果 | | | | | | | | |
| 磁気 | | | | | | | | |
| 光 | | | | | | | | |

抵抗センサ（曲げ）

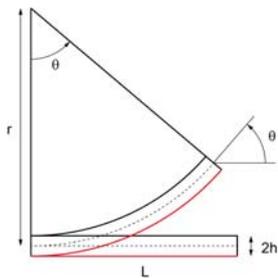


センサをフィルムに貼り付ける
フィルムは曲がる
フィルムの中立面は伸縮しない

フィルムの曲げは一樣と仮定

$$r\theta = L$$

抵抗センサ（曲げ）



センサの伸び

$$\begin{aligned} x &= (r + h)\theta - L \\ &= (r + h)\theta - r\theta \\ &= h\theta \end{aligned}$$

センシング量とセンシング方式

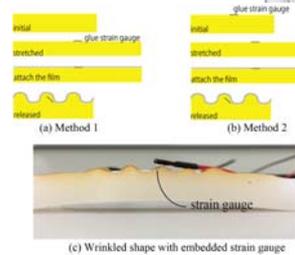
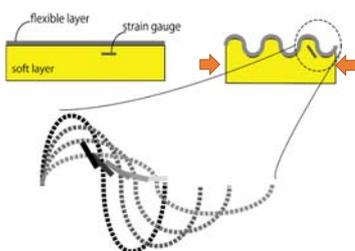
| | 歪み | | | 応力 | | 近接 | 表面 | 温度 |
|------|----|----|---|----|----|----|----|----|
| | 伸縮 | 曲げ | 力 | 滑り | 接触 | | | |
| 電気抵抗 | | | | | | | | |
| 静電容量 | | | | | | | | |
| 圧電効果 | | | | | | | | |
| 磁気 | | | | | | | | |
| 光 | | | | | | | | |

Wrin'Tac2

Ho @JAIST



Sensing Elements: Strain Gauges
Actuating Element: Expansion/Contraction



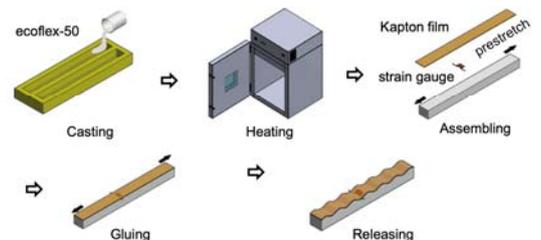
Wrin'Tac2 can change the posture of sensors based on morphological change under elongation, to match different sensing tasks

Wrin'Tac2

Ho @JAIST

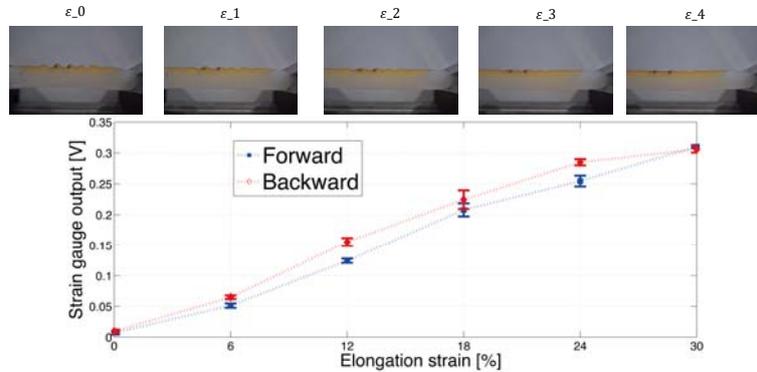


WrinTac is fabricated by assembling three components



Qiyukai 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

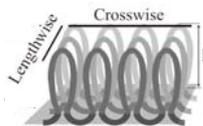
Sense of Self-Deformation



センシング量とセンシング方式

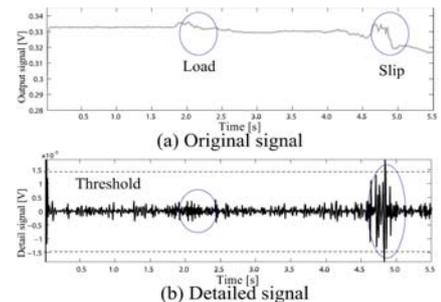
| | 歪み | | 応力 | | 近接 | 表面 | 温度 |
|------|----|----|----|----|----|----|----|
| | 伸縮 | 曲げ | 力 | 滑り | | | |
| 電気抵抗 | | | | ● | | | |
| 静電容量 | | | | | | | |
| 圧電効果 | | | | | | | |
| 磁気 | | | | | | | |
| 光 | | | | | | | |

パイル生地センサ



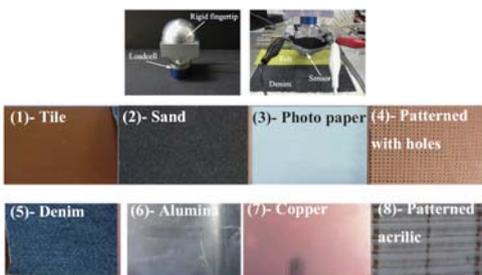
滑りの検出

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

