

## センサ工学

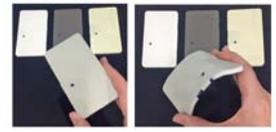
ロボティクス学科 平井 慎一



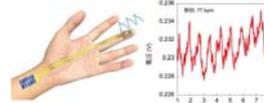
## ソフトセンサ：柔らかいセンサ



[http://www.ams.eng.osaka-u.ac.jp/user/isihara/wp-content/uploads/2016/08/sensor\\_ver1-e1541744713909.jpg](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://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)



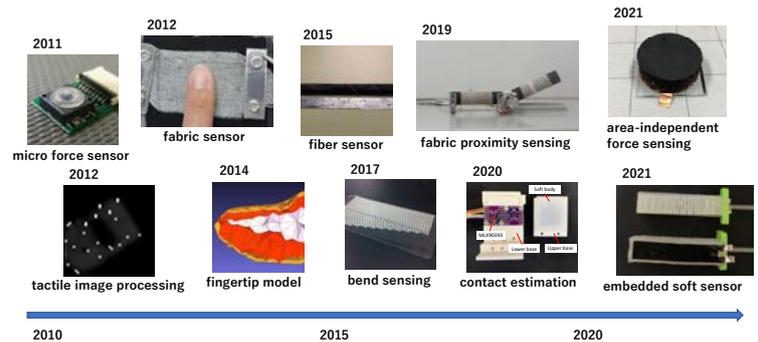
<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20210422-1876923/images/003.jpg>



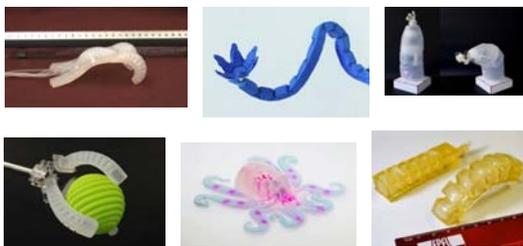
## ソフトセンサ：触覚センシング



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・舛屋 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

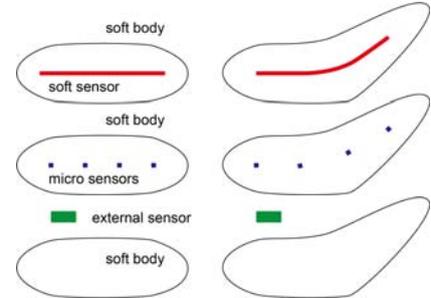
- 4.1 概論
- 4.2 抵抗センサ
- 4.3 静電容量センサ
- 4.4 電場応答型センサ
- 4.5 磁気センサ
- 4.6 光学センサ

### 著者

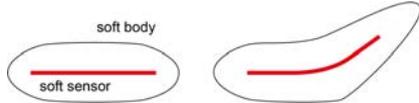
- 新竹 純 (電気通信大学)
- 平井 慎一 (立命館大学)
- 高木 賢太郎 (豊橋技科大)
- 高嶋 一登 (九工大)
- 川節 拓実 (大阪大学)
- 下ノ村 和弘 (立命館大学)



# 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

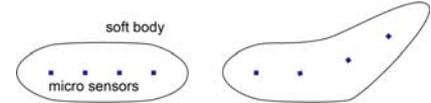


伸縮○/曲げ○ エラストマー, ゲル, ファイバー  
伸縮×/曲げ○ フィルム, ワイヤ

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

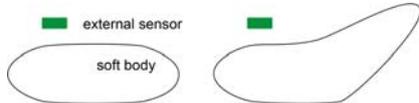


マイクロメートルオーダーのサイズのセンサ  
MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 技術で製作

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

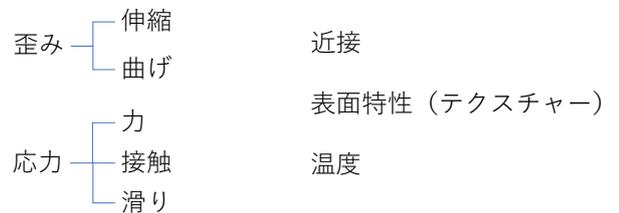


カメラ, レンジファインダーなど  
ソフトロボットと外部環境の状態を認識

ボディの材料や表面特性を設計  
計測結果の伝達が課題

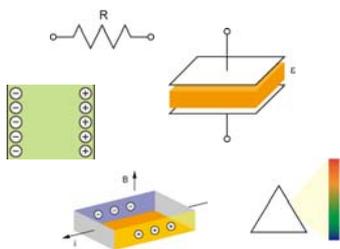


# センシング量



## 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

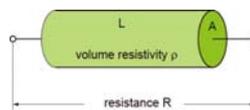
## センシング量とセンシング方式

	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								

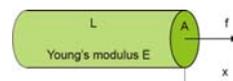
## センシング量とセンシング方式

	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)

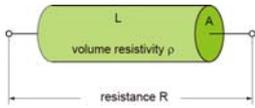


$$R = \rho \frac{L}{A}$$

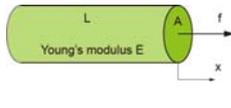


$$f = \frac{EA}{L} x$$

## 抵抗センサ（伸縮）

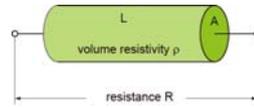


$$R = \rho \frac{L}{A}$$



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

## 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  $\Delta R$  ?

このファイバー状センサは実用的か？

## 断面積の増減を考慮

体積が不変と仮定  $AL = (A - a)(L + x)$

$$Ax - aL - ax = 0$$

$$Ax - aL = 0$$

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

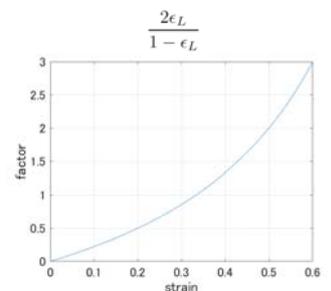
## 断面積の増減を考慮

$$R + \Delta R = \rho \frac{L + x}{A - a} = R \frac{1 + \epsilon_L}{1 - \epsilon_L}$$



$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{2\epsilon_L}{1 - \epsilon_L}$$

$$\frac{x}{L} = \frac{\Delta R}{2R + \Delta R}$$



## 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

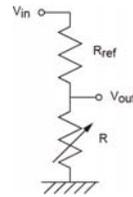
ゴム（エラストマー）  $\rho = 10^{10} \Omega\text{m}$

体積が不変と仮定する

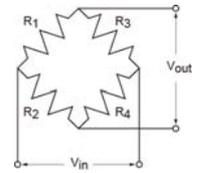
$x = 1\text{mm}$  に対する  $\Delta R$  ?



## 抵抗の計測



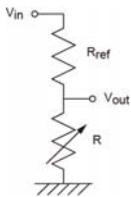
分圧回路  
voltage divider



ホイーストブリッジ回路  
Wheatstone bridge circuit



## 分圧回路



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

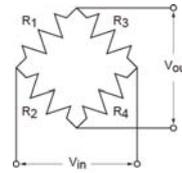
$$V_{out} = Ri$$

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

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



## ホイーストブリッジ回路



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

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

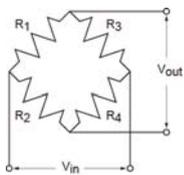
$$V_{out} = R_1 i_{13} - R_2 i_{24}$$

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

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



## ホイーストブリッジ回路



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

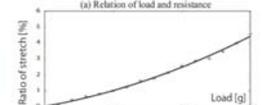
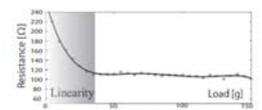
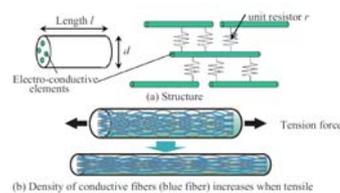
$$\frac{R_1}{R_1 + R_3} = s \quad \left( = \frac{V_{out}}{V_{in}} + \frac{R_2}{R_2 + R_4} \right)$$

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

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



## 導電系センサ

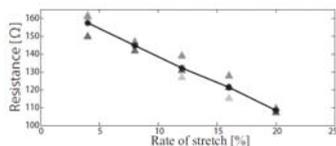
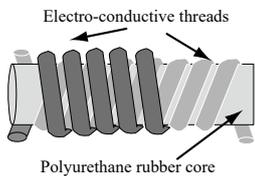


Ho et al., IEEE Sensors J., 13(10), 2013

計測範囲 ~ 2%



### ダブルカバリング構造

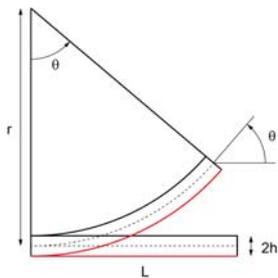


計測範囲 ~ 20%

### 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)

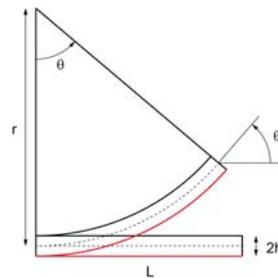


センサをフィルムに貼り付ける  
フィルムは曲がる  
フィルムの中立面は伸縮しない

フィルムの曲げは一様と仮定

$$r\theta = L$$

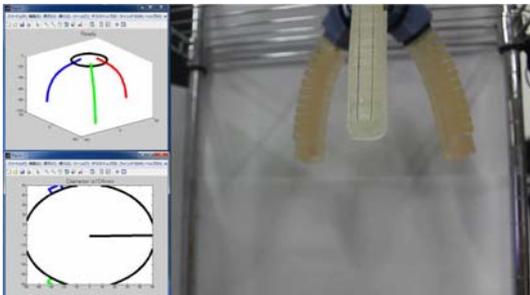
### 抵抗センサ (曲げ)



センサの伸び

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

### 柔軟指の曲げの推定

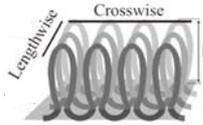


Matsuno et al., IEEE RCAR 2017

### 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								

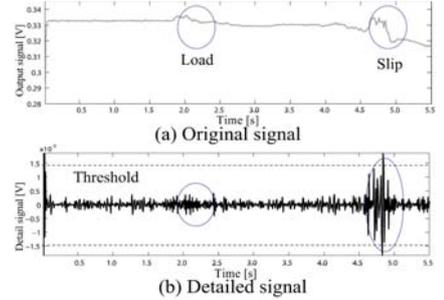
## パイル生地センサ



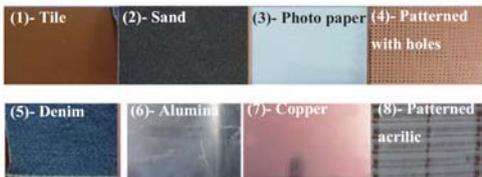
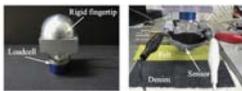
## 滑りの検出

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

