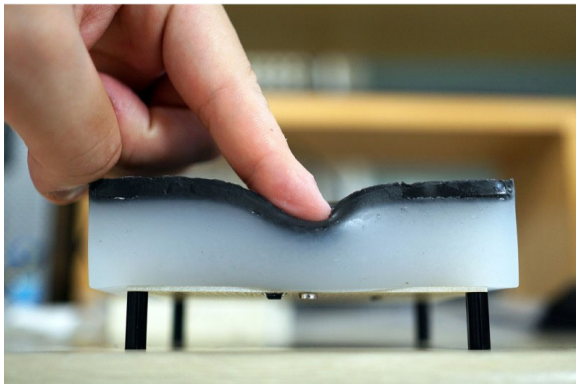
センサ工学

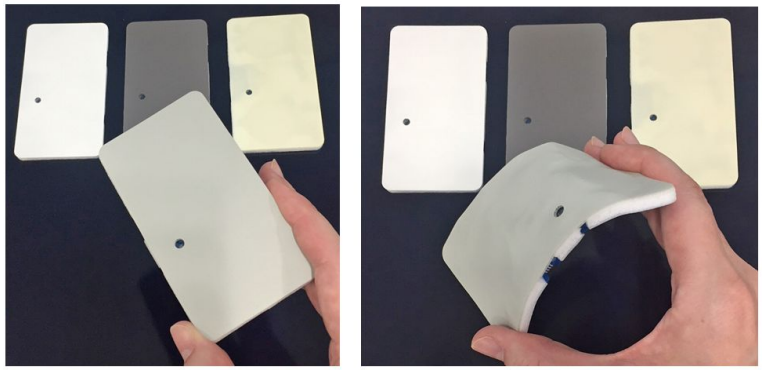
ロボティクス学科　平井 慎一

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

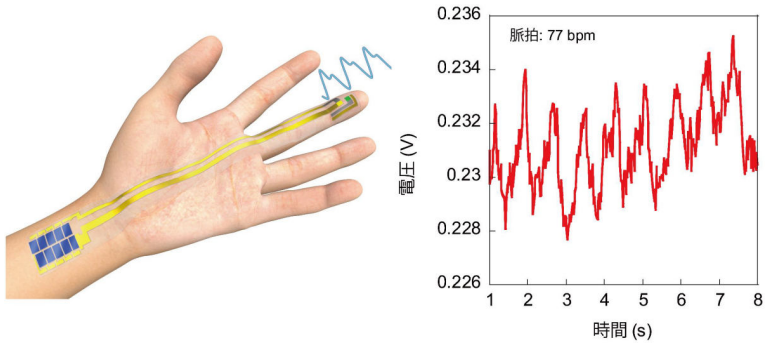
ソフトセンサ：柔らかいセンサ



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



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



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

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

ソフトセンサ：触覚センシング

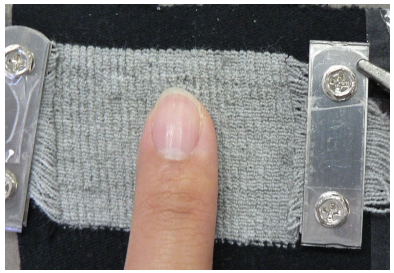
材料特性や表面特性を感知

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

2011

micro force sensor

2012

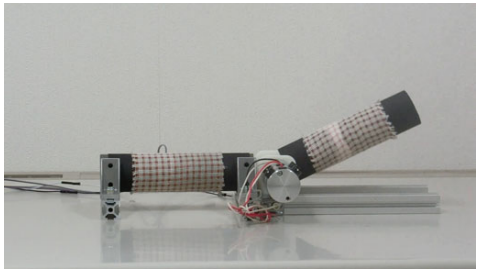


fabric sensor

2015

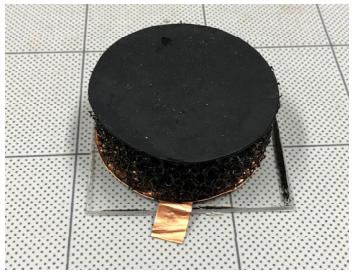
fiber sensor

2019



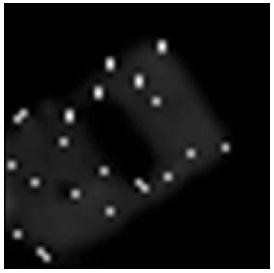
fabric proximity sensing

2021



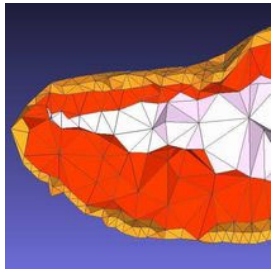
area-independent force sensing

2012



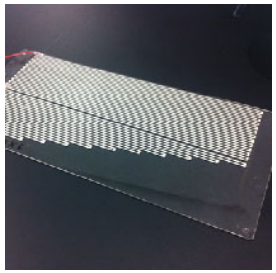
tactile image processing

2014



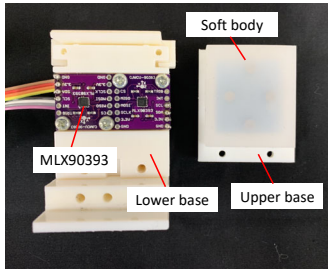
fingertip model

2017



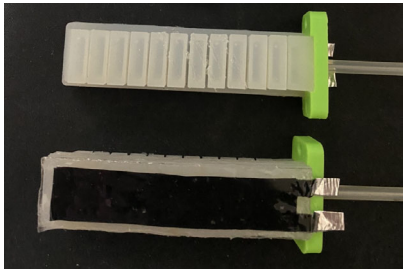
bend sensing

2020



contact estimation

2021

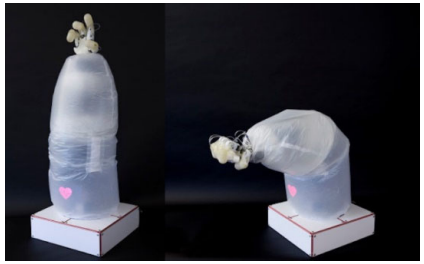


embedded soft sensor

2010 2015 2020

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

ソフトセンサ：ソフトロボティクス



Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

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

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

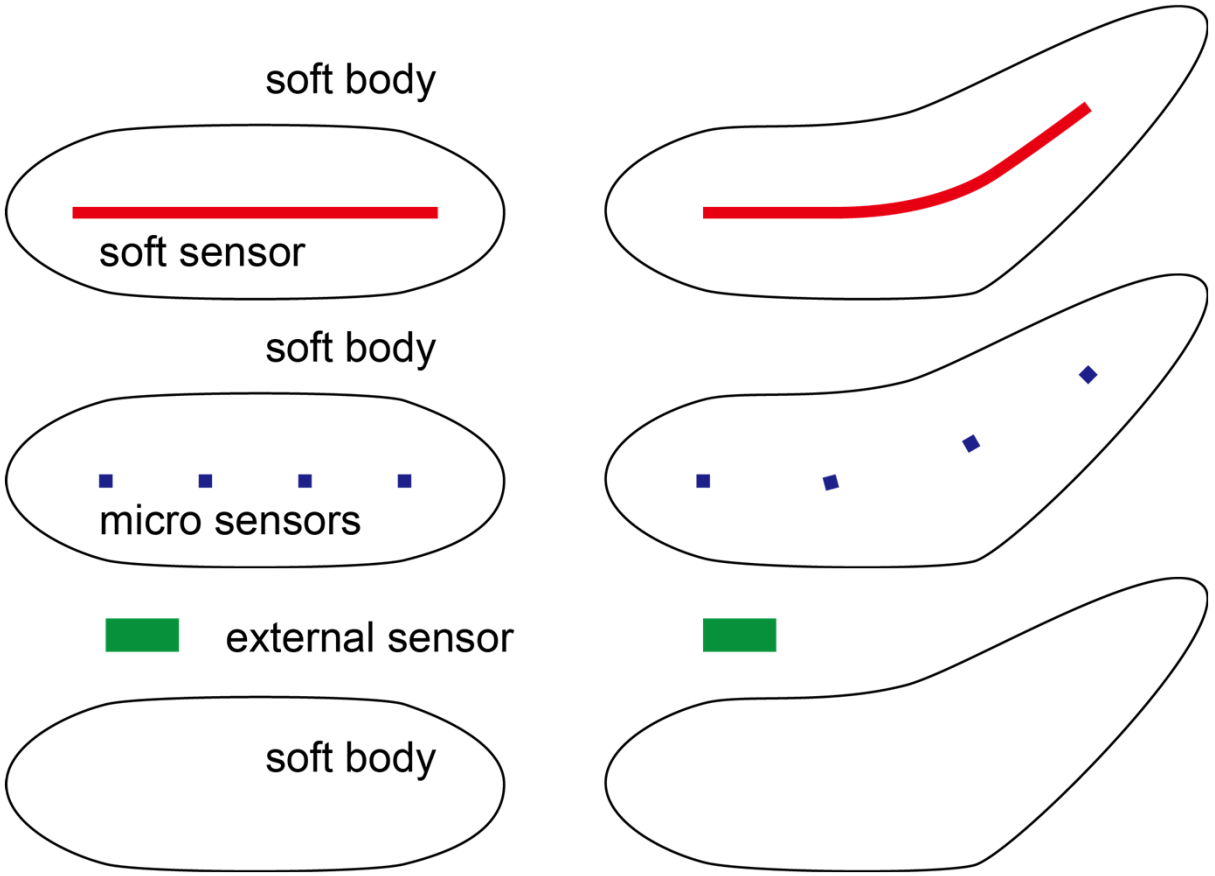
ソフトロボット学入門
－基本構成と柔軟物体の数理－

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）

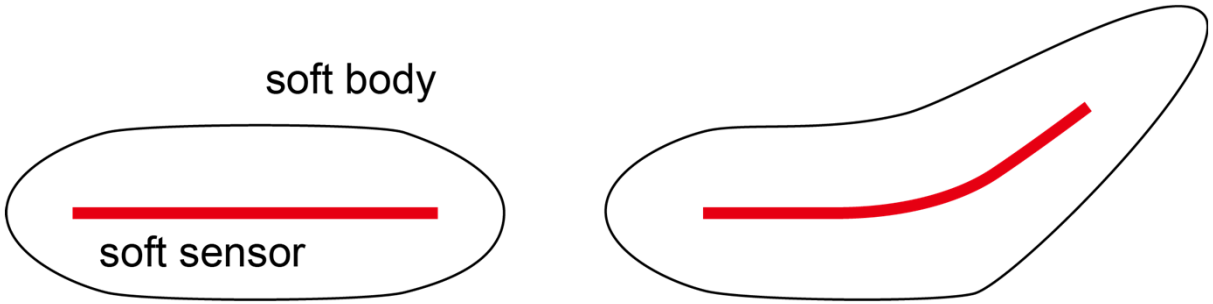
Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

ソフトロボットにおけるセンシング



Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

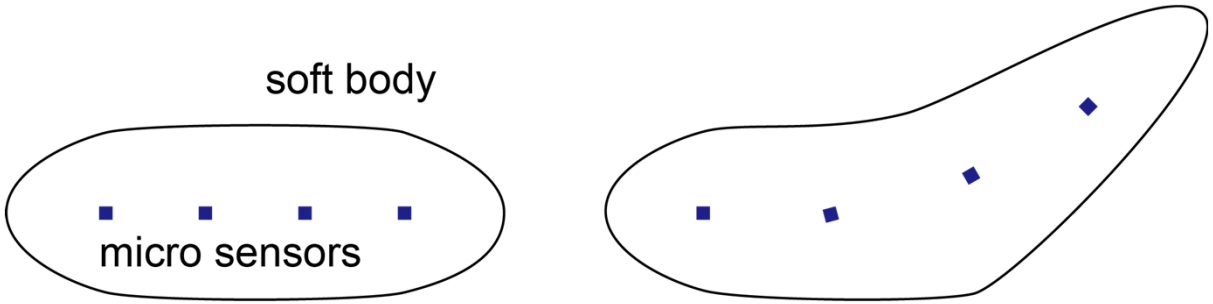
ソフトロボットにおけるセンシング



伸縮〇／曲げ〇　　エラストマー，ゲル，ファイバー
伸縮×／曲げ〇　　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

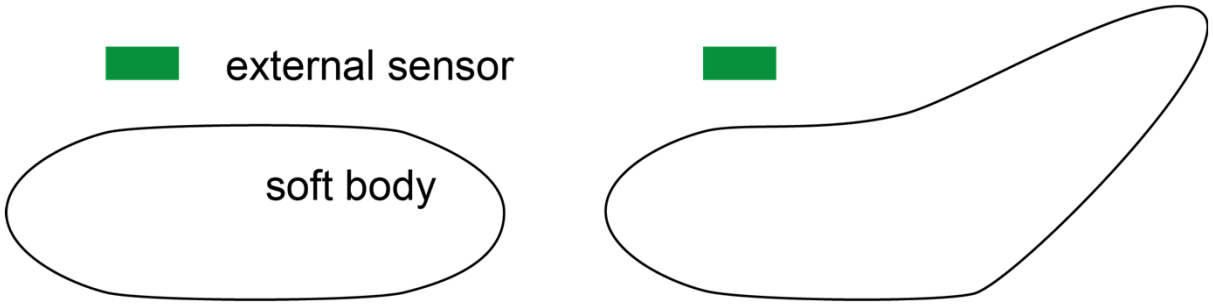


マイクロメートルオーダーのサイズのセンサ
MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 技術で製作

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

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

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

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

センシング量

- 歪み
  - 伸縮
  - 曲げ
- 応力
  - 力
  - 接触
  - 滑り

近接

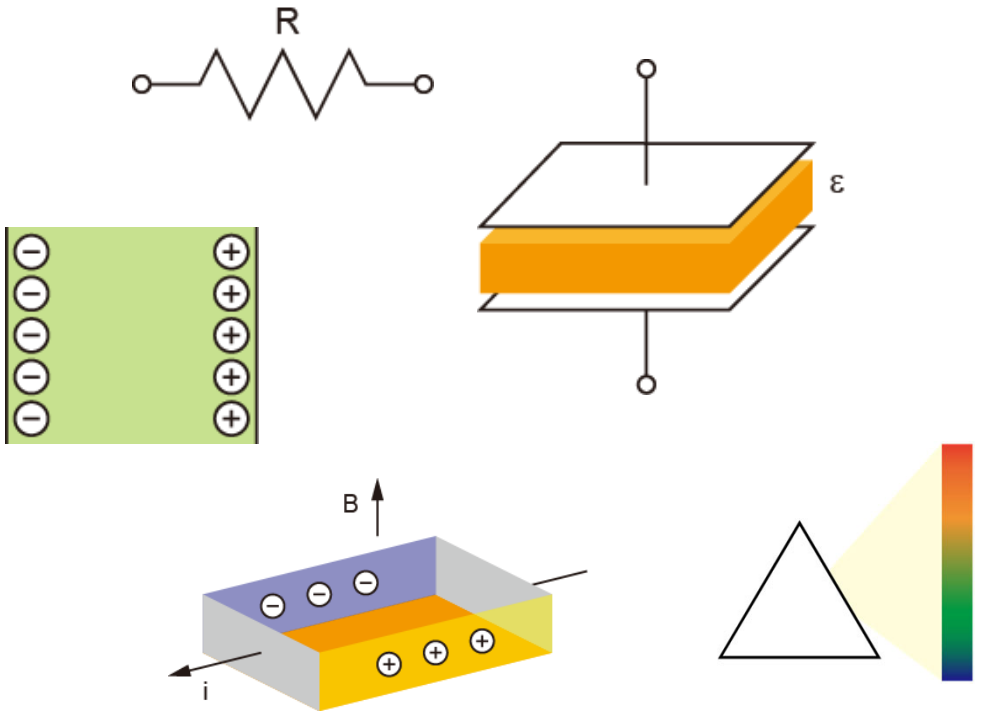
表面特性（テクスチャー）

温度

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

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									

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

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

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

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									

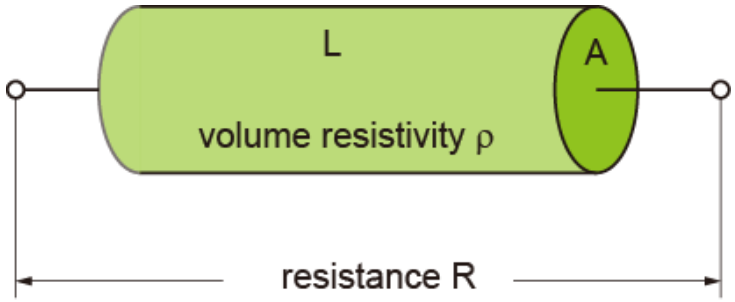
Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

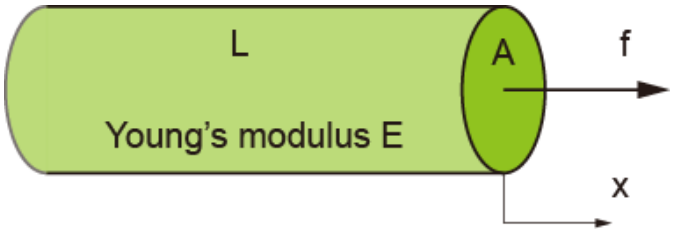
センシング量とセンシング方式

	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									

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

抵抗センサ（伸縮）



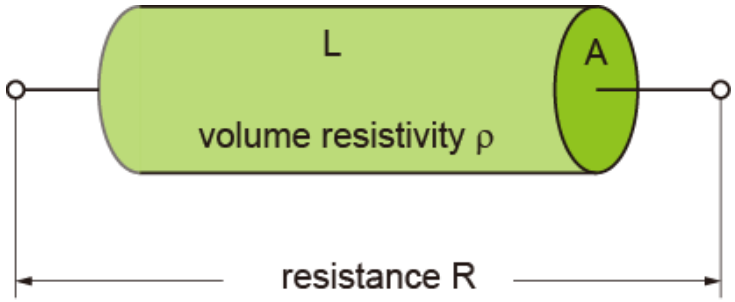


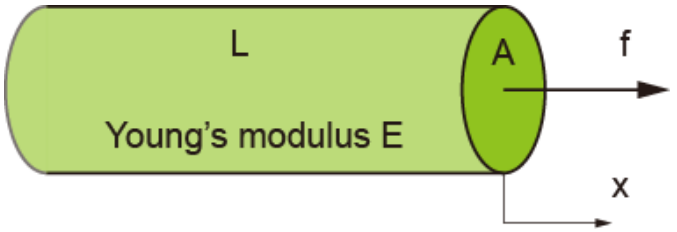
$$R = \rho \frac{L}{A}$$

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

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

抵抗センサ（伸縮）



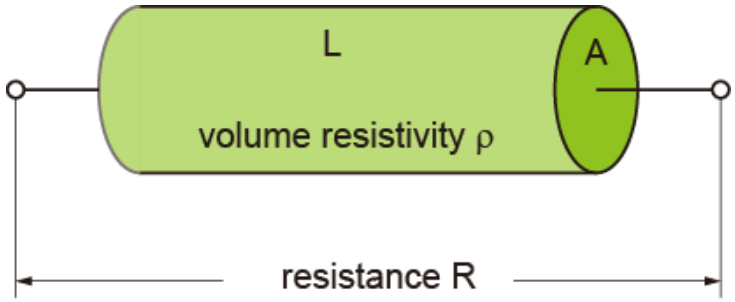


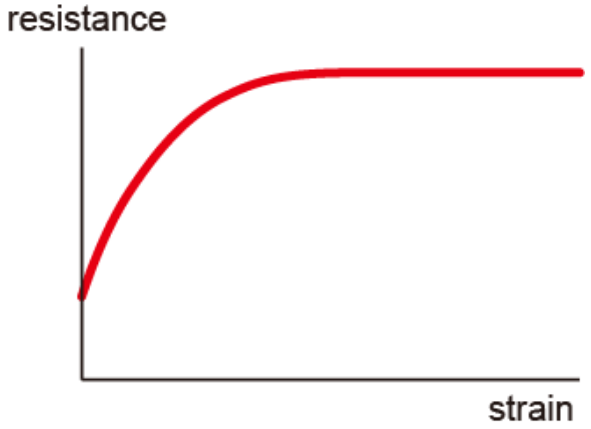
$$R = \rho \frac{L}{A}$$

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

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

抵抗センサ（伸縮）



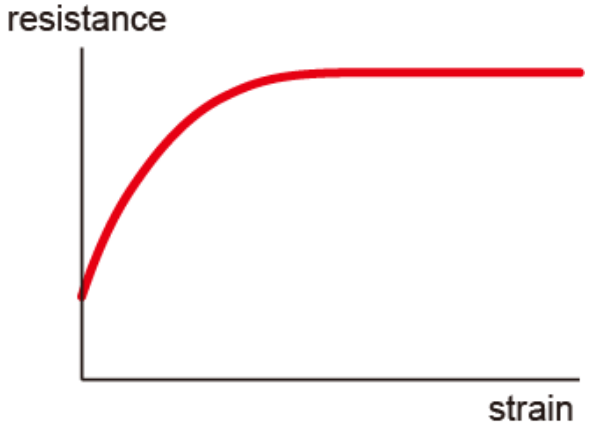


$$R = \rho \frac{L}{A}$$

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

抵抗センサ（伸縮）

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



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

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

抵抗センサ（伸縮）

L = 100mm, A = 1mm^2 のファイバー状センサ

ゴム（エラストマー）$\rho = 10^{10}\ \Omega m$

x = 1mm に対する ΔR ?

このファイバー状センサは実用的か?

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

断面積の増減を考慮

体積が不変と仮定　$AL = (A - a)(L + x)$

$$Ax - aL - ax = 0$$

$$Ax - aL = 0$$

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

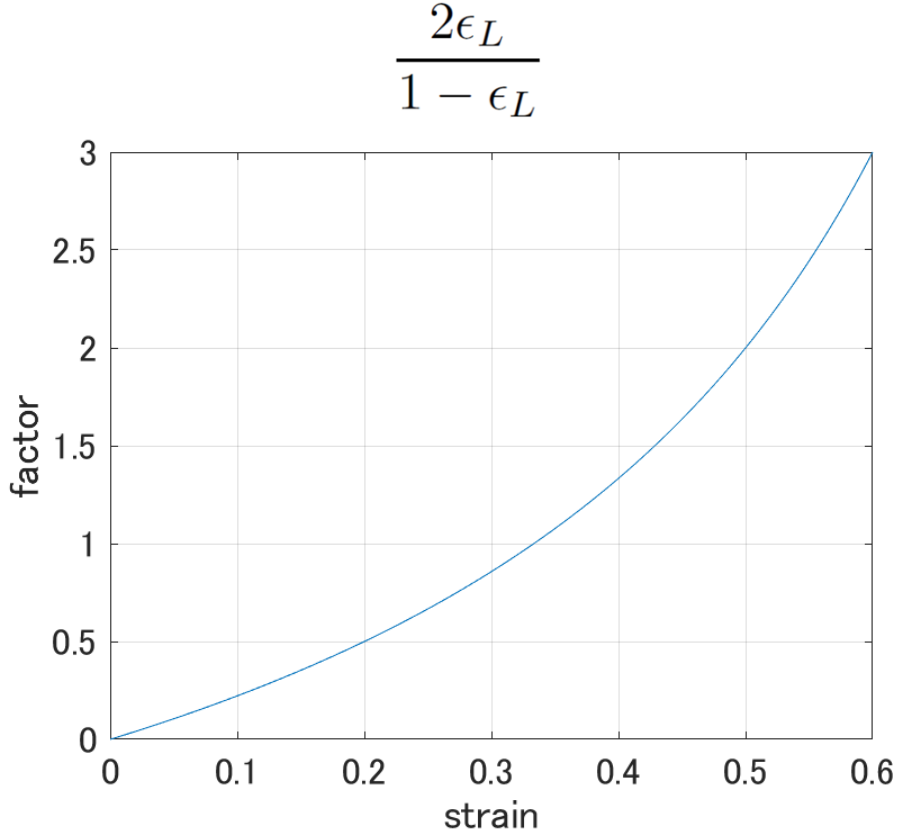
Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

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）

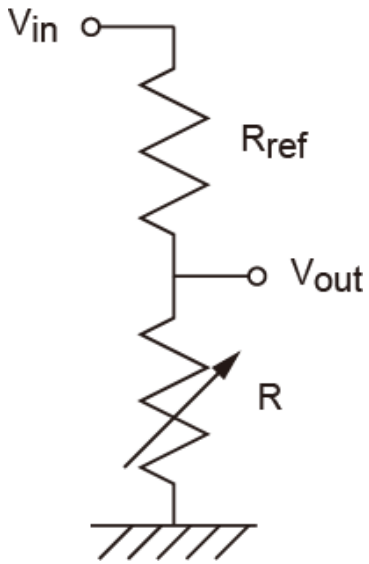
$L = 100mm$, $A = 1mm^2$ のファイバー状センサ

ゴム（エラストマー）$\rho = 10^{10}\ \Omega m$

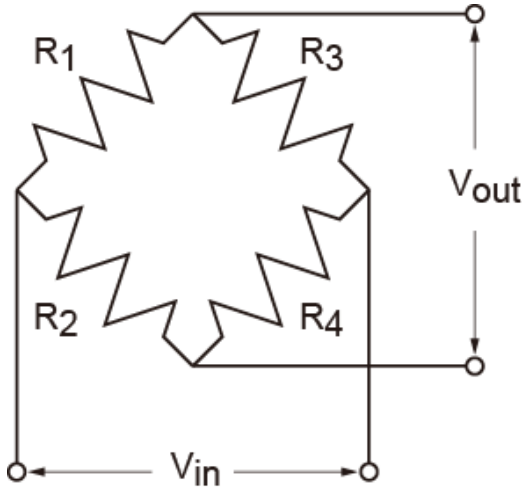
体積が不変と仮定する

$x = 1mm$ に対する ΔR ?

抵抗の計測



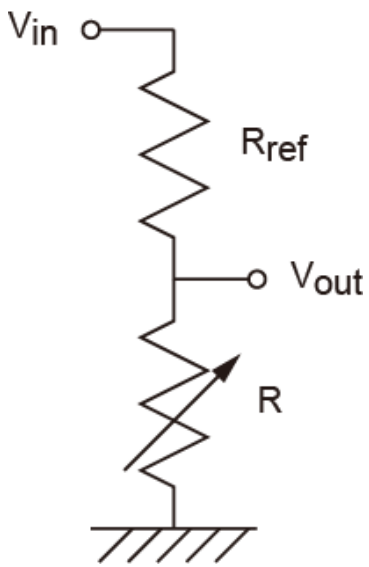
分圧回路
voltage divider



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

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

分圧回路



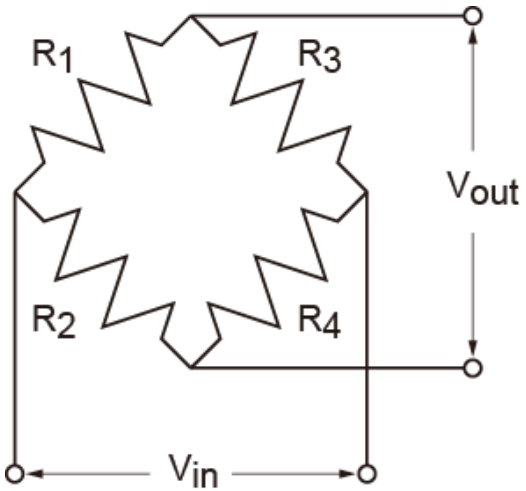
$$V_{\text{in}} = (R_{\text{ref}} + R)i$$

$$V_{\text{out}} = Ri$$

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

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

ホイーストンブリッジ回路



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

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

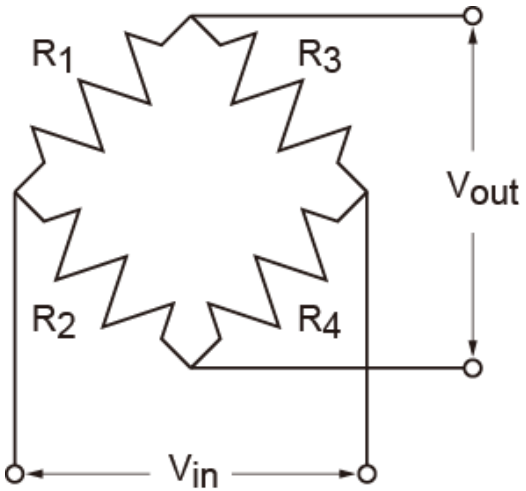
$$V_{\text{out}} = R_1 i_{13} - R_2 i_{24}$$

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

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

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

ホイーストンブリッジ回路



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

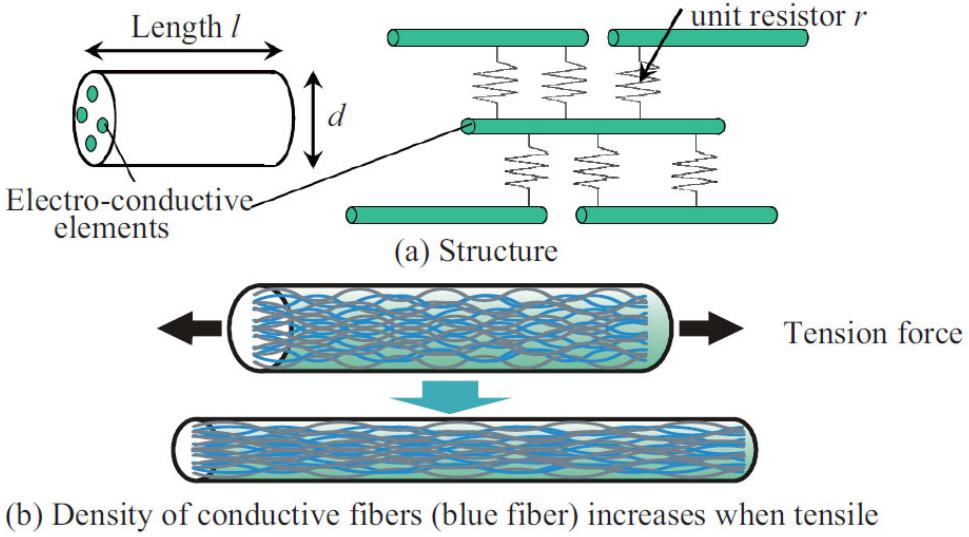
$$\frac{R_1}{R_1 + R_3} = s \quad \left(= \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} + \frac{R_2}{R_2 + R_4} \right)$$

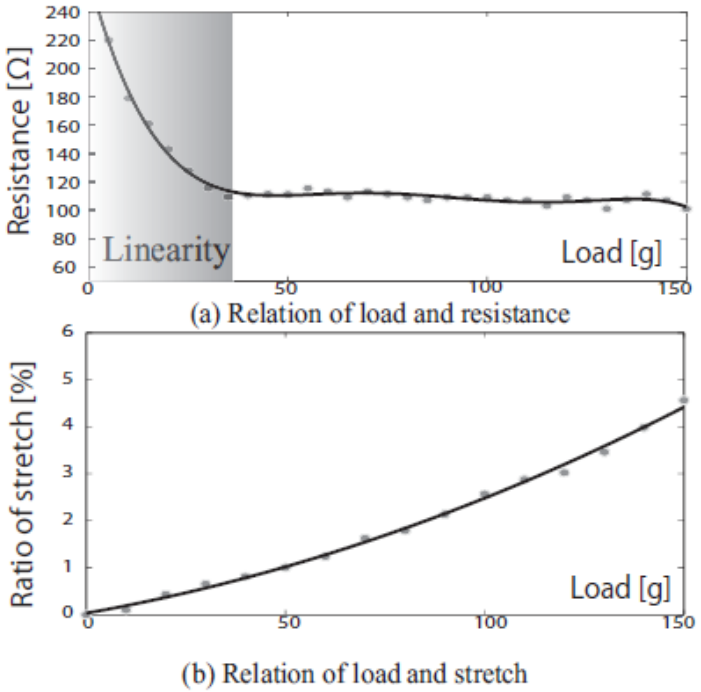
$$s = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} + \frac{R_2}{R_2 + R_4}$$

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

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

導電糸センサ

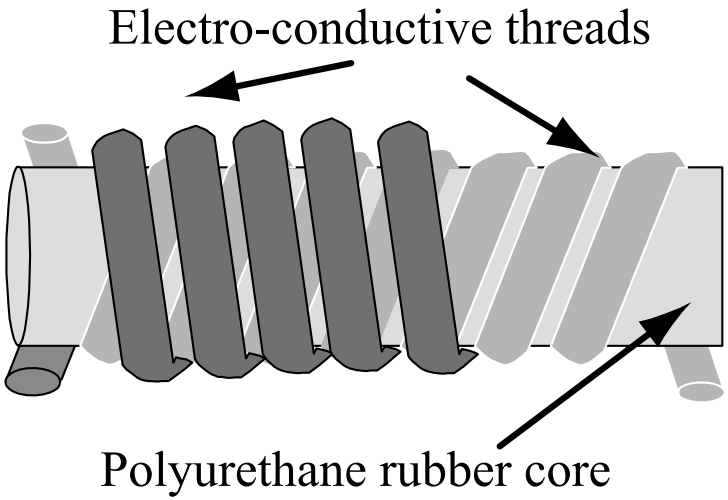


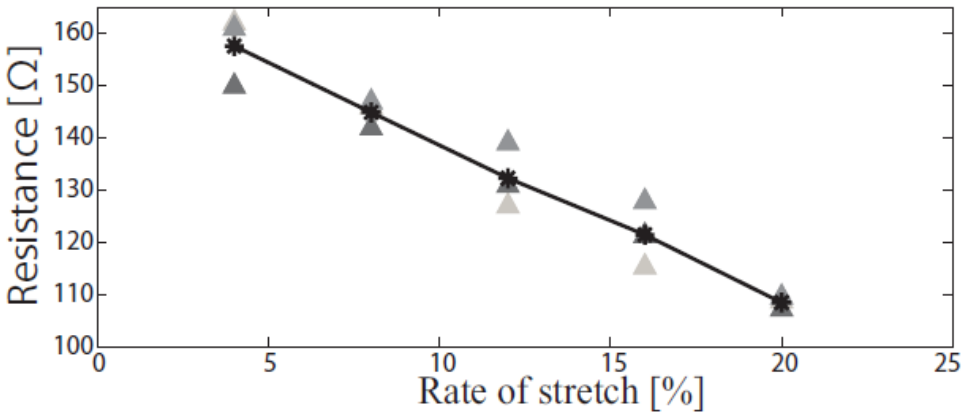


計測範囲 ~ 2%

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

ダブルカバリング構造





計測範囲 ~ 20%

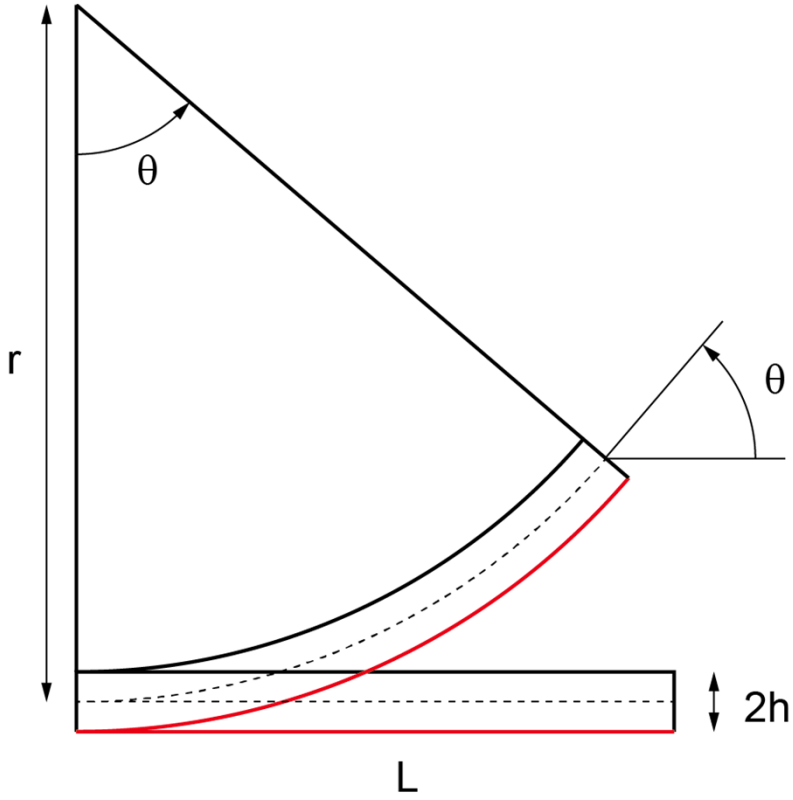
Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

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									

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

抵抗センサ（曲げ）

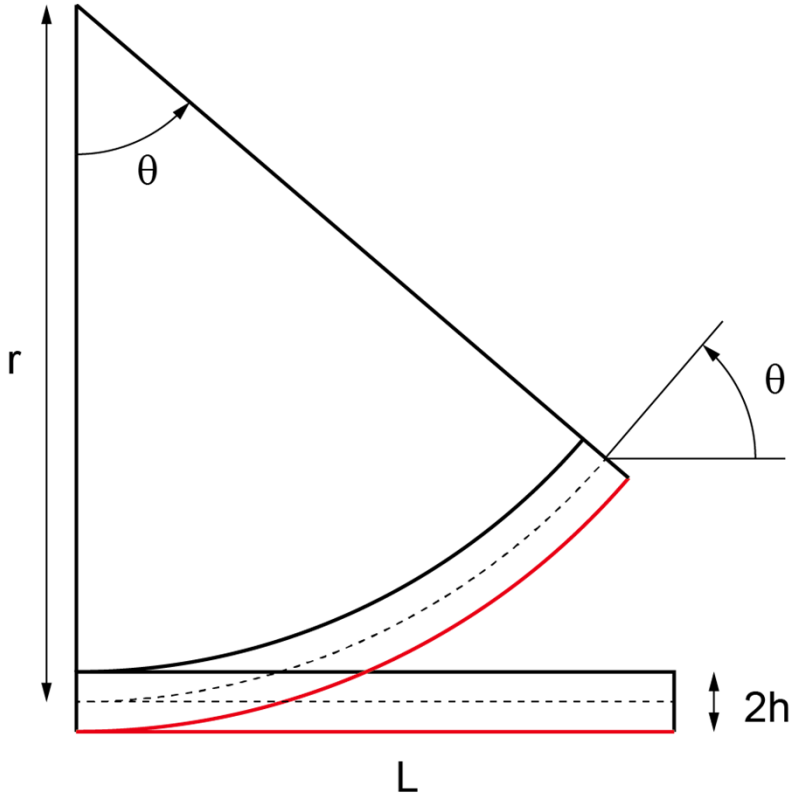


センサをフィルムに貼り付ける
フィルムは曲がる
フィルムの中立面は伸縮しない

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

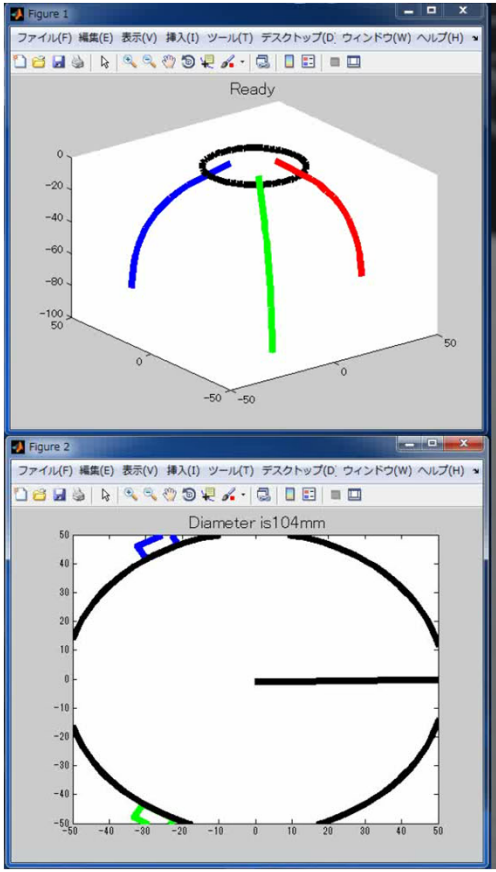
$$x = (r+h)\theta - L$$

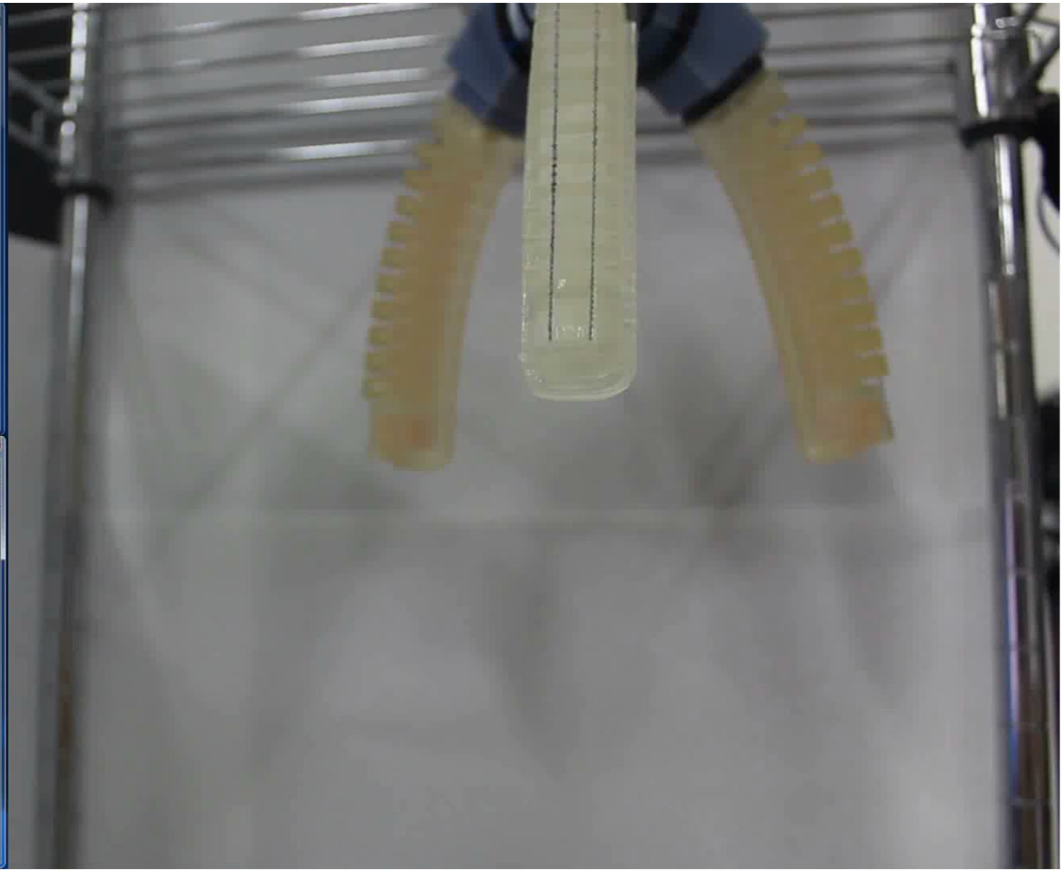
$$= (r+h)\theta - r\theta$$

$$= h\theta$$

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

柔軟指の曲げの推定





Matsuno et al., IEEE RCAR 2017

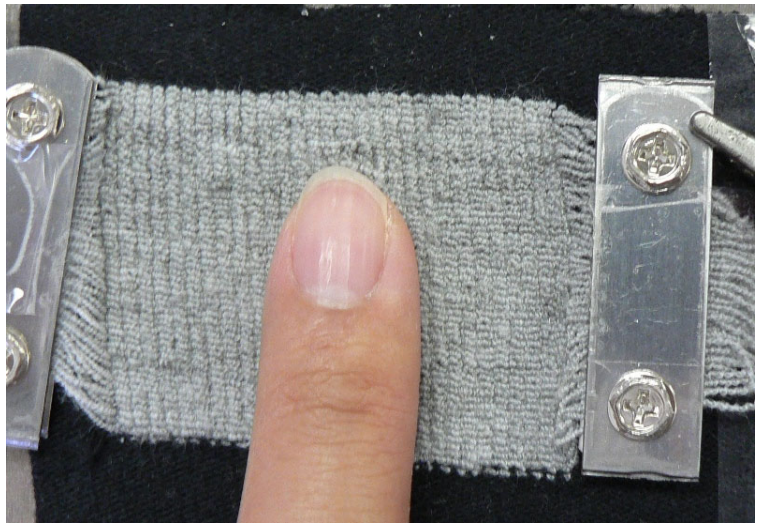
Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

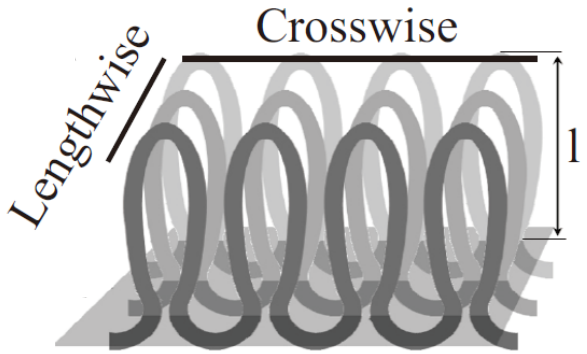
センシング量とセンシング方式

	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									

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

パイル生地センサ



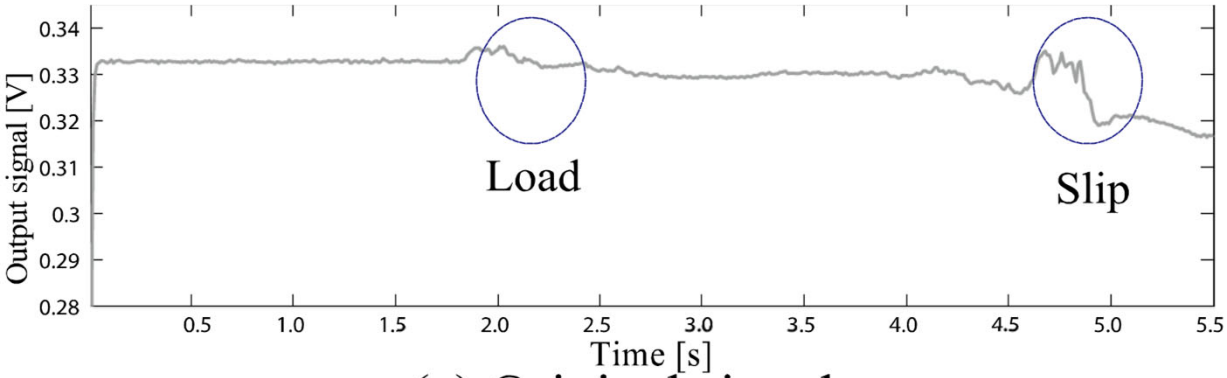


Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

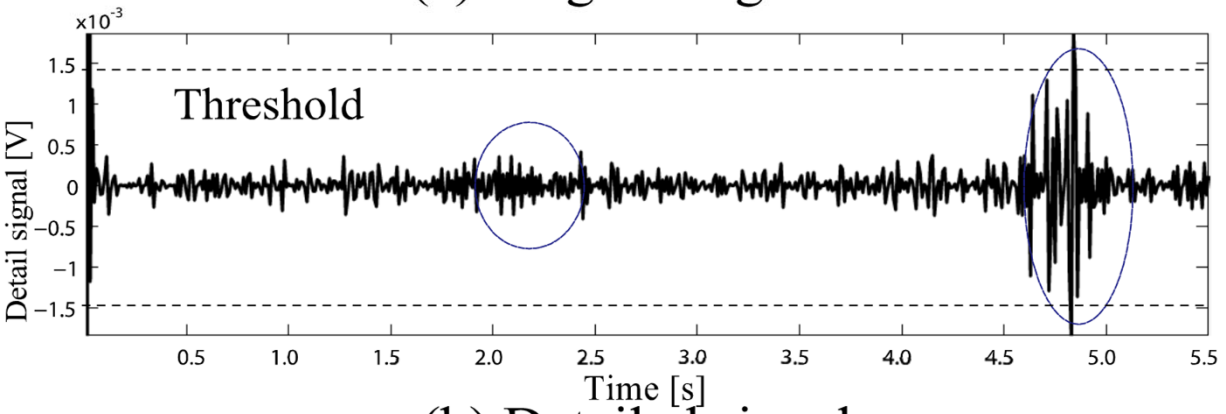
滑りの検出

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



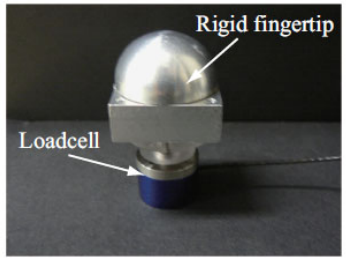
(a) Original signal

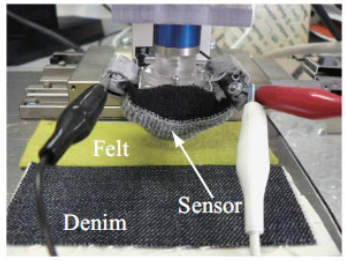


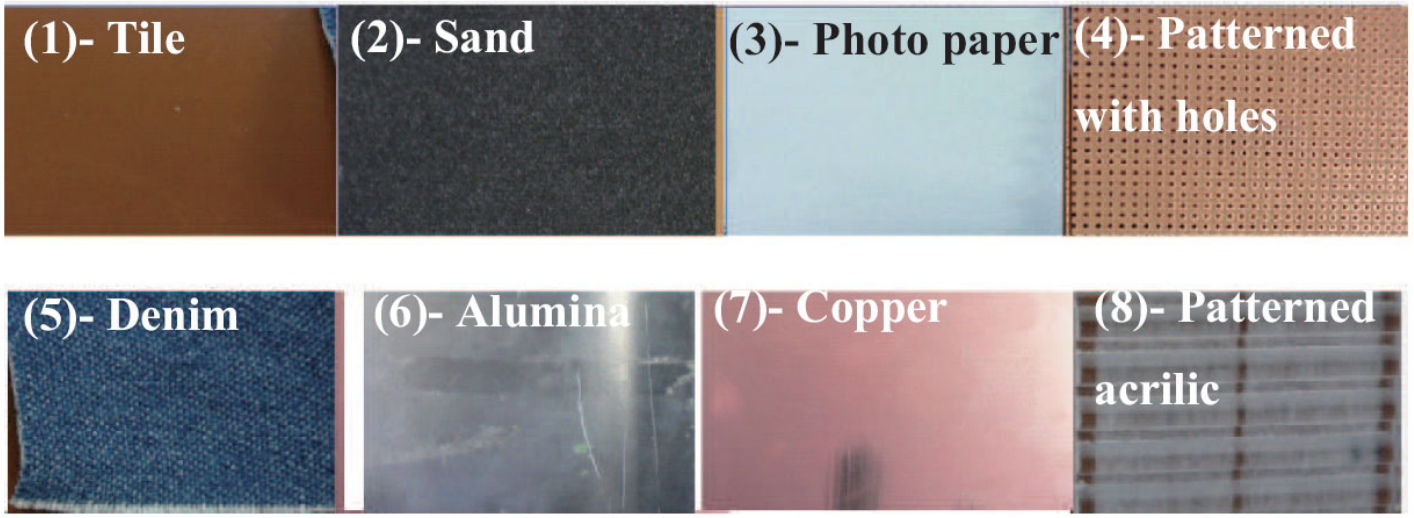
(b) Detailed signal

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

表面テクスチャーの識別







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

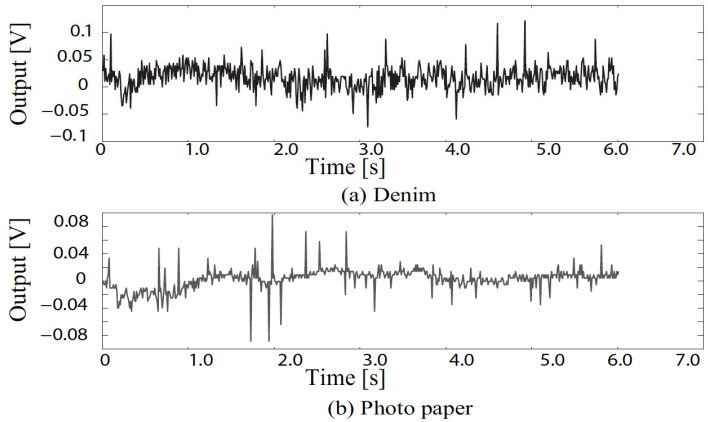
Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.

表面テクスチャーの識別

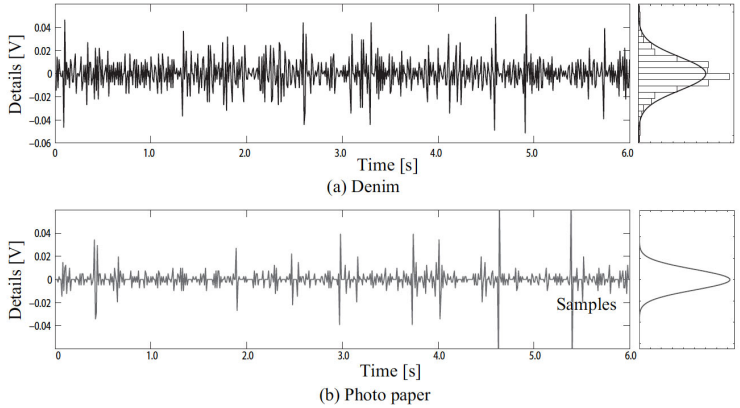
センサ　　離散ウェーブレット変換　　特徴量の計算　　人工ニューラルネットワーク

デニム

写真用紙



布センサの出力



離散ウェーブレット変換の詳細係数

Ritsumeikan Univ.
Soft Robotics Lab.