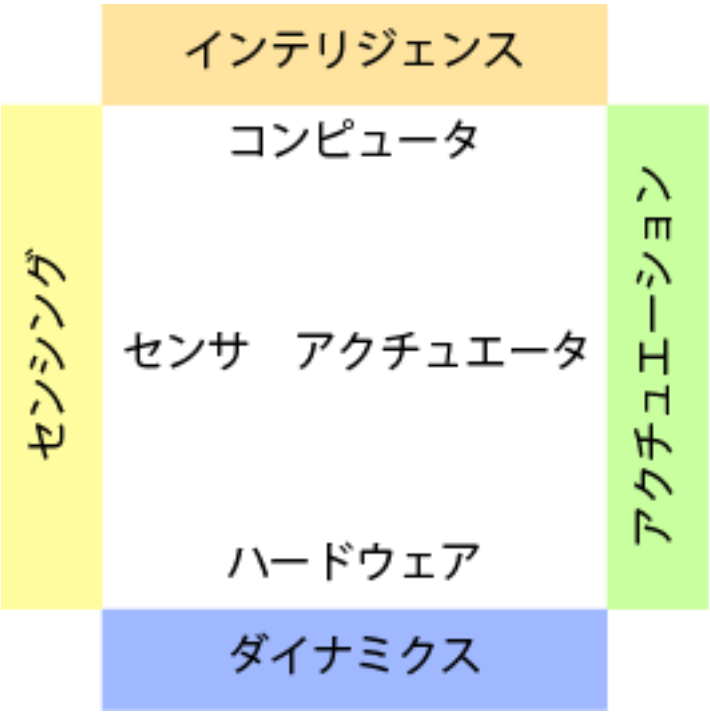
マイクロシステムの
ロボティクスへの応用

平井　慎一
立命館大学ロボティクス学科

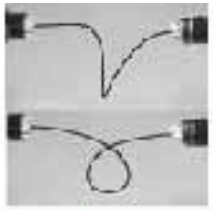
ロボティクスとは?

ロボティクスとは?

Intelligent connection from perception to action
(Winston, Brady 1980)



ロボティクスとは?



インテリジェンス

センシング

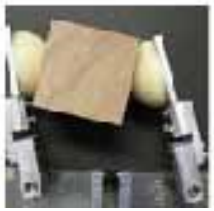
コンピュータ

センサ　アクチュエータ

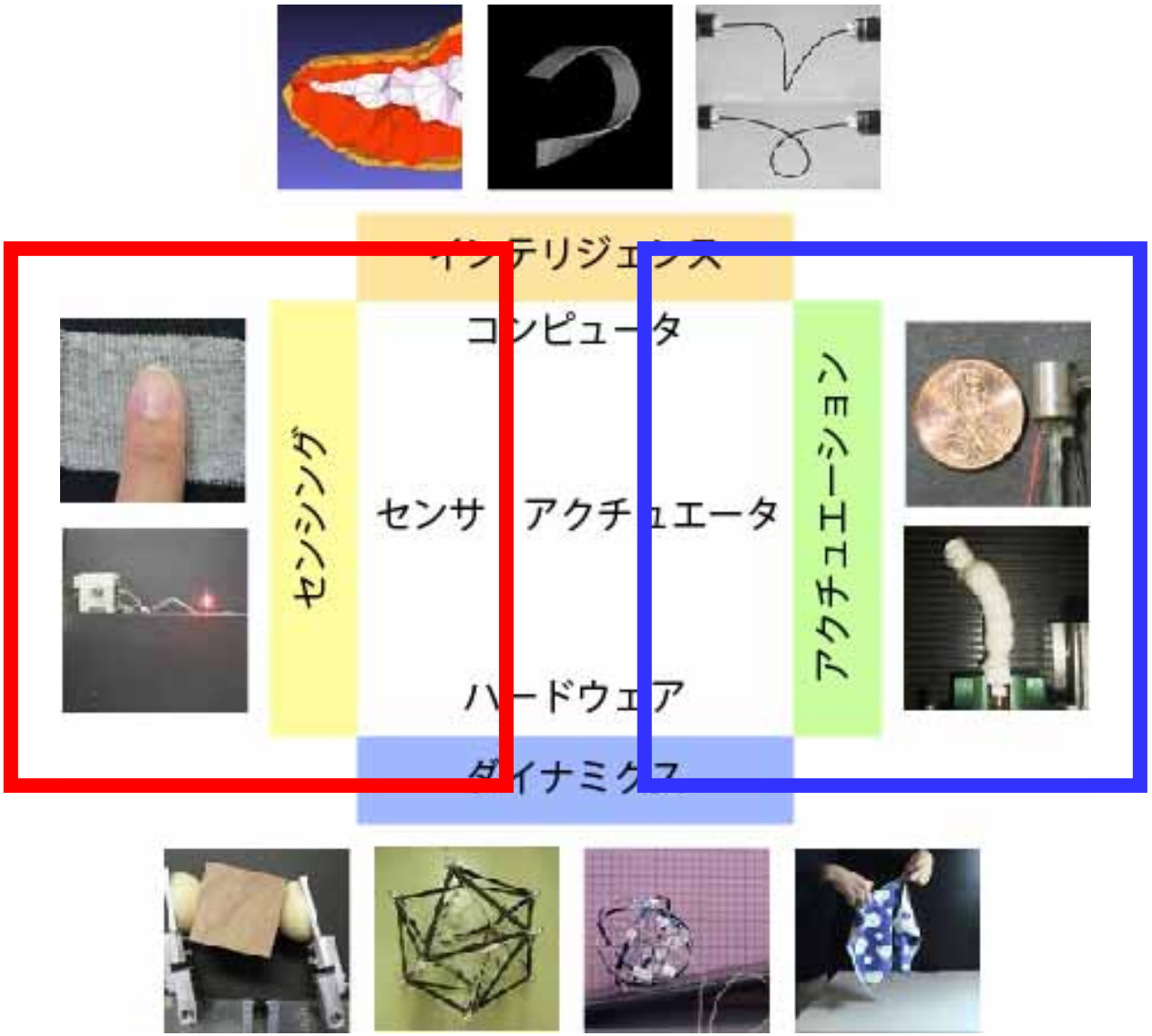
ハードウェア

アクチュエーション

ダイナミクス



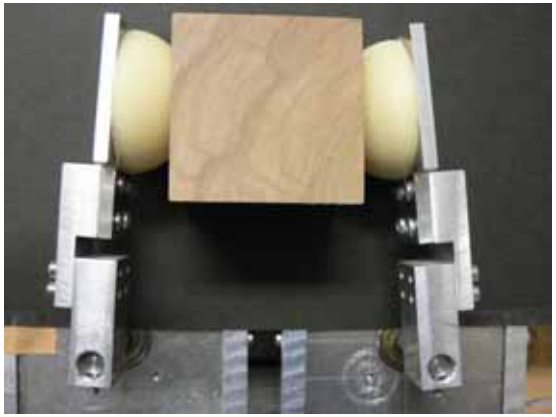
ロボティクスにおけるマイクロ技術

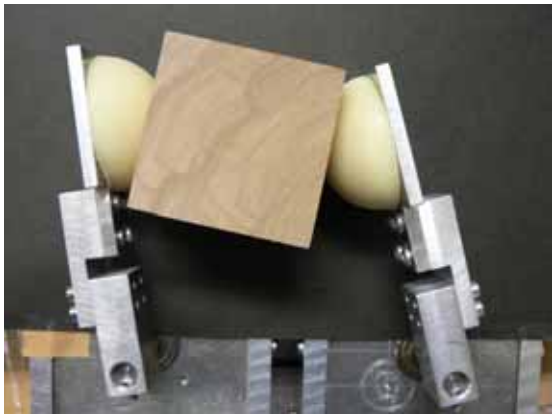


ロボティクスにおけるマイクロ技術

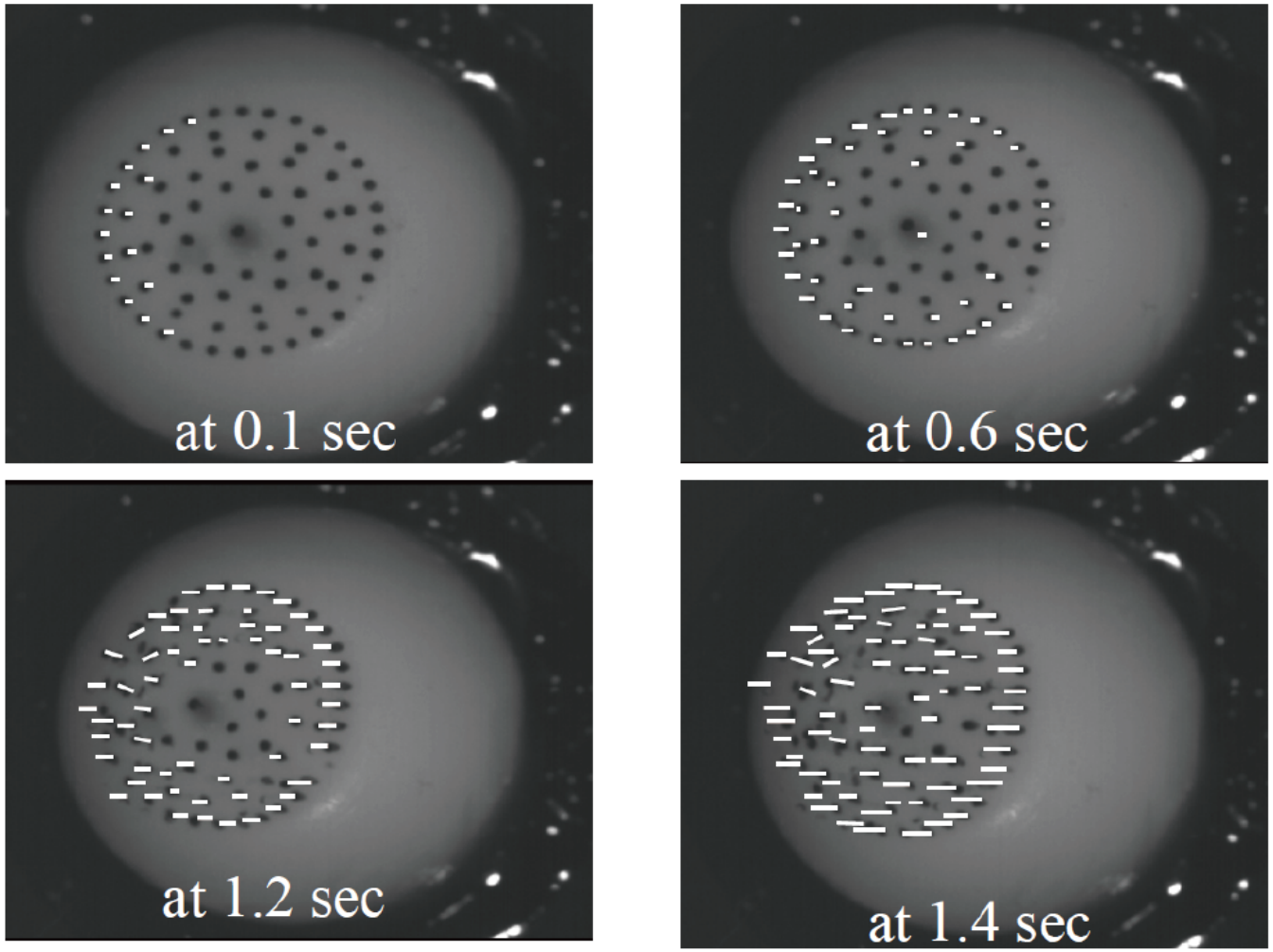
- ✓ マイクロフォースモーメントセンサによる滑り検出
- ✓ 無拘束ポペット弁の圧力制御
- ✓ マイクロパーツフィーディング

柔軟指操作



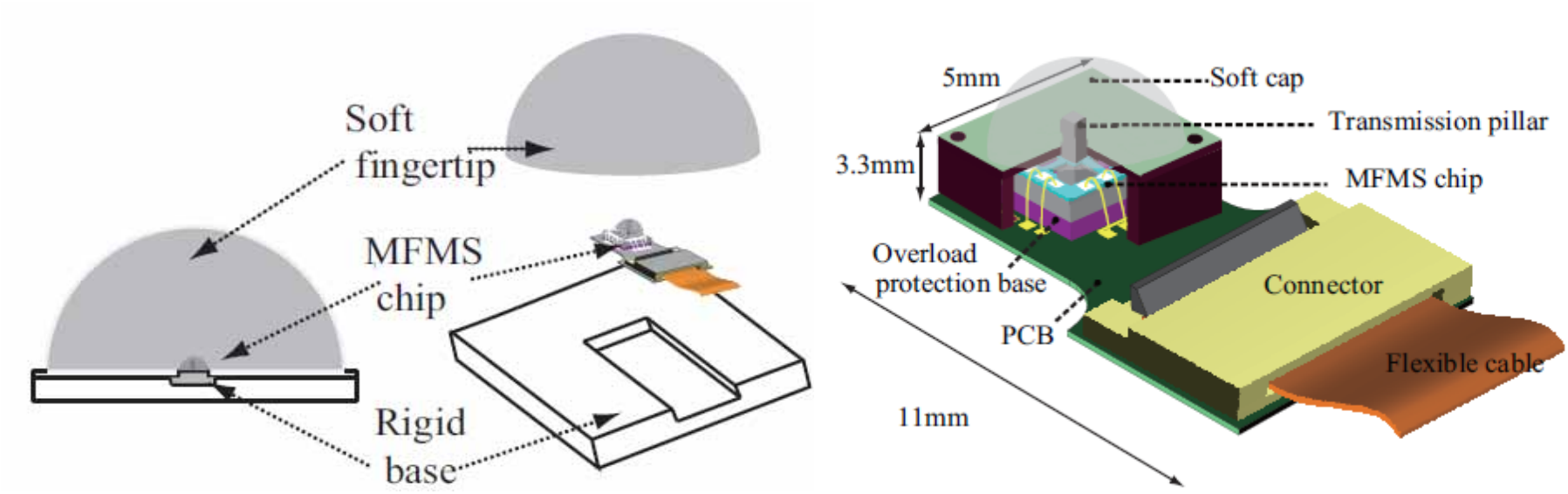


局所滑りと全体滑り



局所滑りと全体滑り

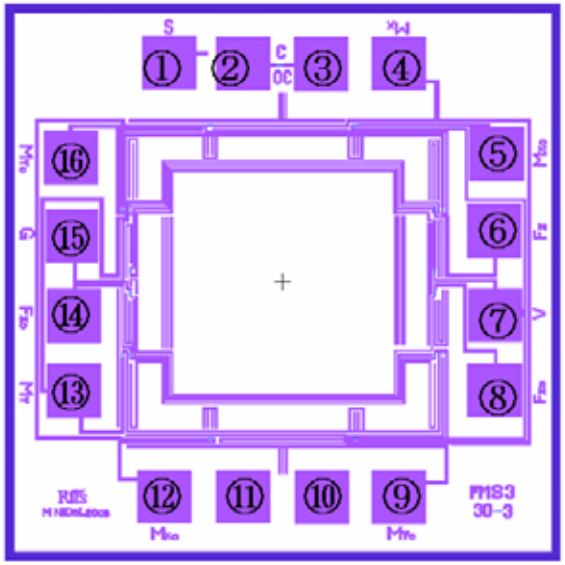
マイクロフォースモーメントセンサ

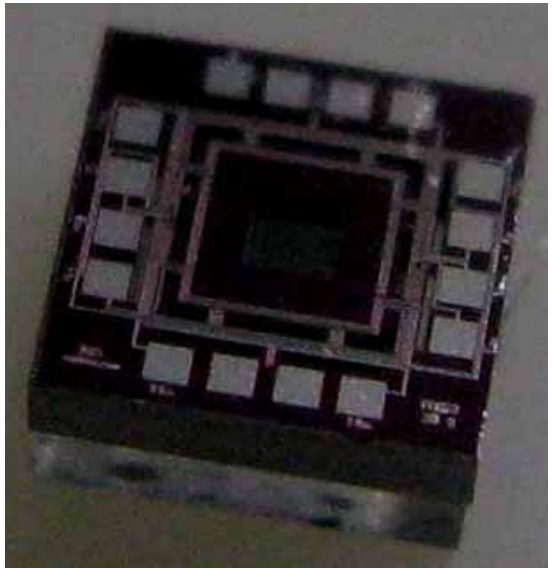


components Fz, Mx, My

Ho, Dao, Sugiyama, and Hirai, Development and Analysis of a Sliding Tactile Soft Fingertip Embedded with a Microforce/Moment Sensor, IEEE Trans. on Robotics, 27-3, 2011

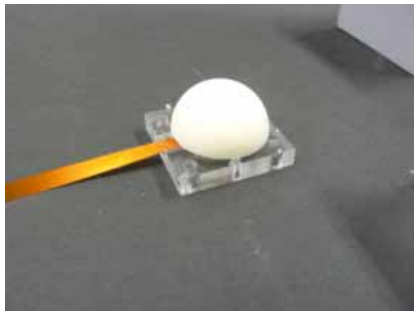
マイクロフォースモーメントセンサ

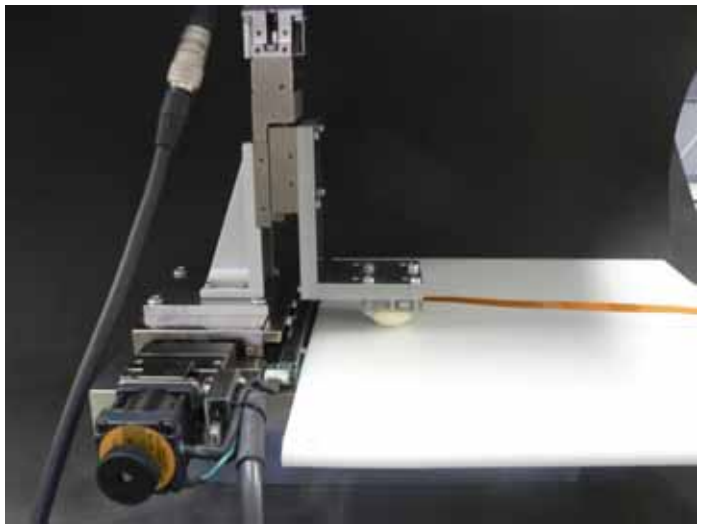


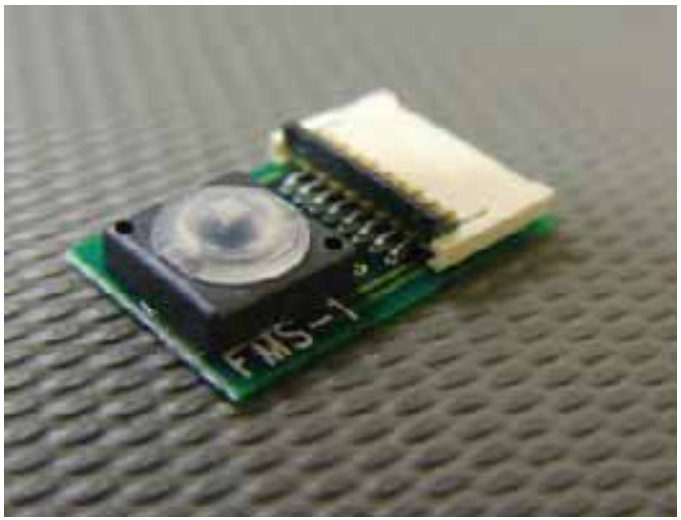


MFMS chip characteristics	
Volume (mm3)	2 x 2 x 0.5
Outputs	Fz (N) , Mx (N.mm) , My (N.mm)
Piezoresistors	16
Supply Voltage (V)	2

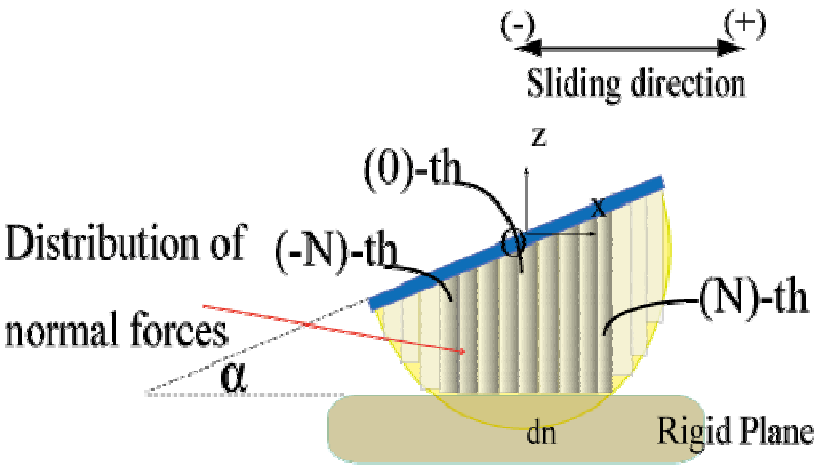
マイクロフォースモーメントセンサ

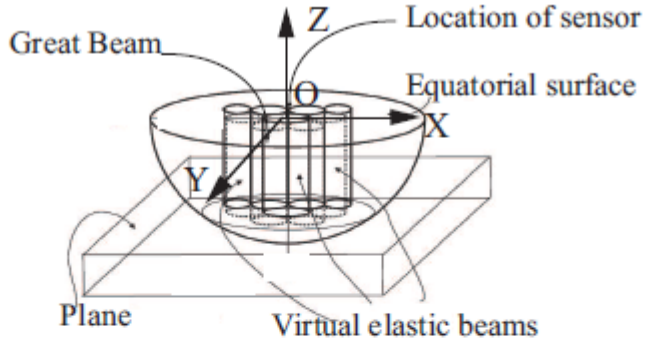




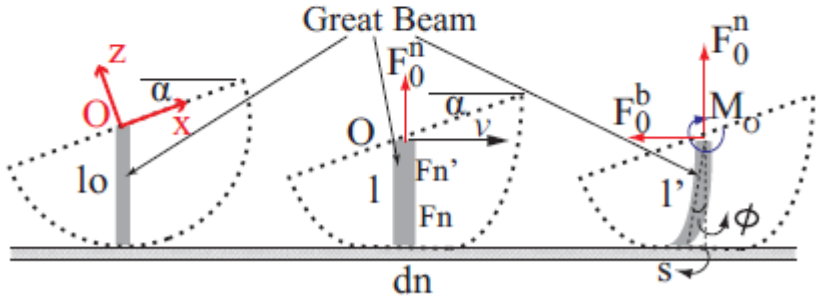


解析モデル





(a)

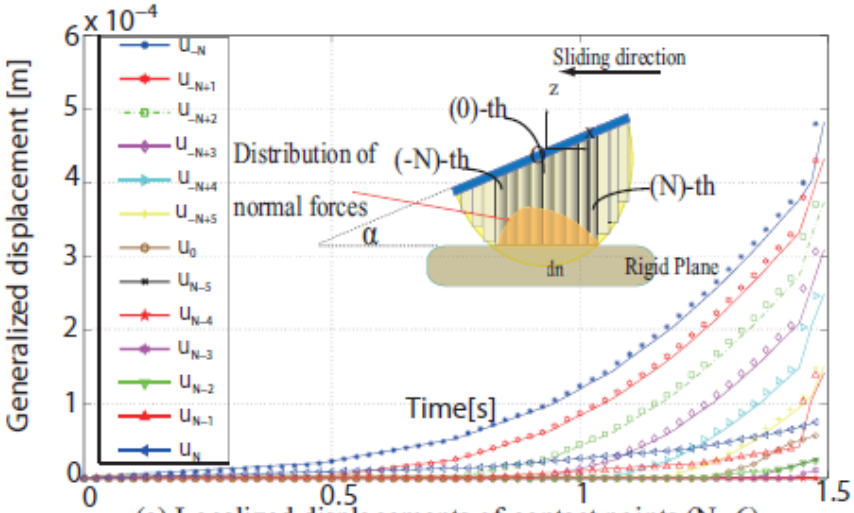


(b-1) Free state (b-2) Pushing (b-3) Sliding

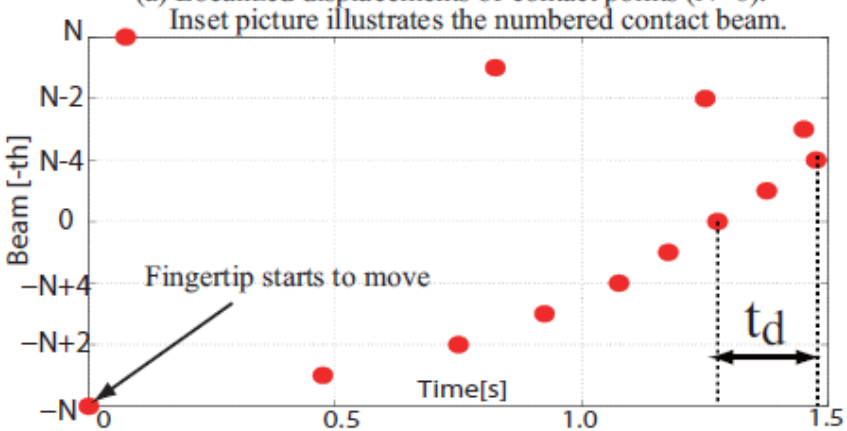
$$F_O = \begin{bmatrix} \cos\alpha & p\sin\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{i=0}^n \\ F_{i=0}^b \end{bmatrix}$$

$$F_0^n = \frac{Es_0}{l_0}\left(l_0 - \frac{l}{\cos\phi}\right) \quad where: \quad \phi = \arctan\frac{s(t) - u_0(t)}{l}$$

シミュレーション

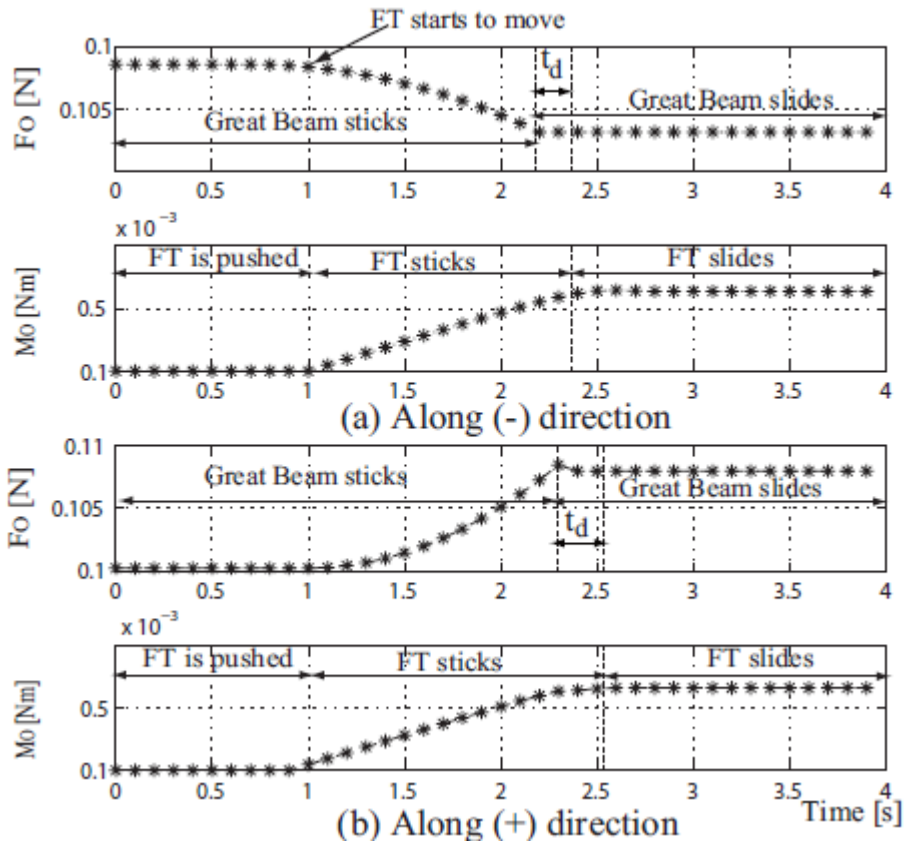


(a) Localized displacements of contact points (N=6).
Inset picture illustrates the numbered contact beam.



(b) Order of first movements vs. time of contact points (N=6)

力とモーメントの計測値

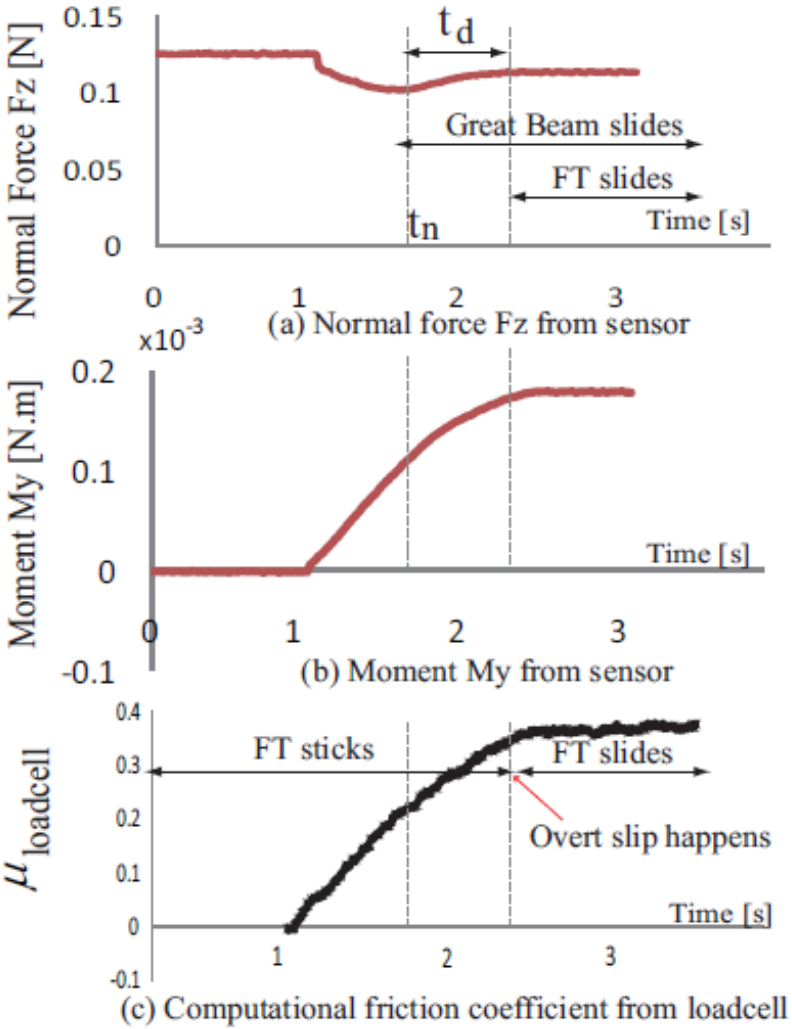


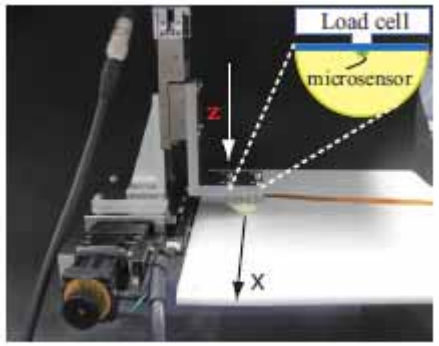
(a) Along (-) direction

(b) Along (+) direction

シミュレーションにより遅れ td が存在することが判明

シミュレーションと実験



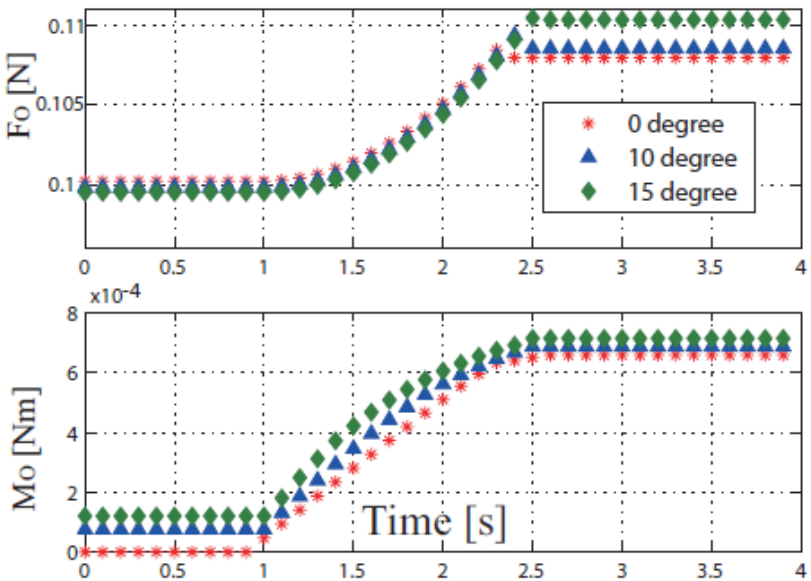


Velocity [mm/s]	t_d [s]
0.5	3.2
1	2.0
2	0.7
3	0.43
4	0.31
5	0.2

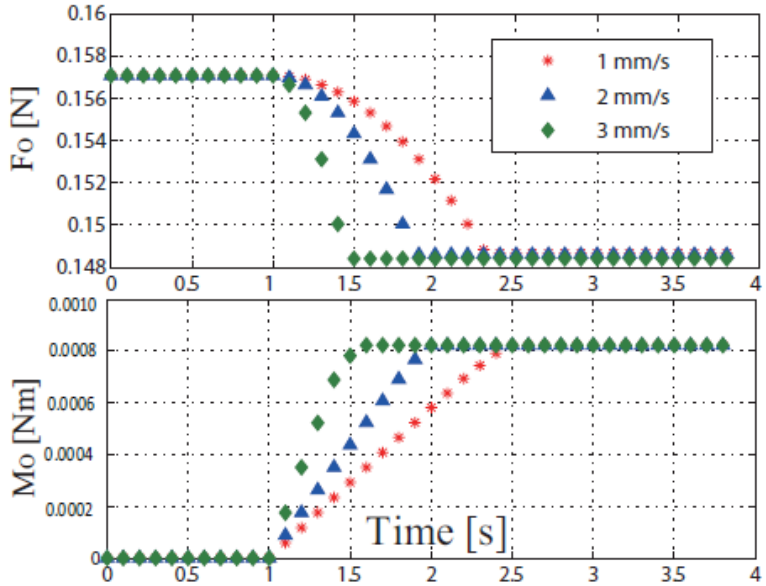
遅れ td により滑りを検出

シミュレーション

Contact angle varies

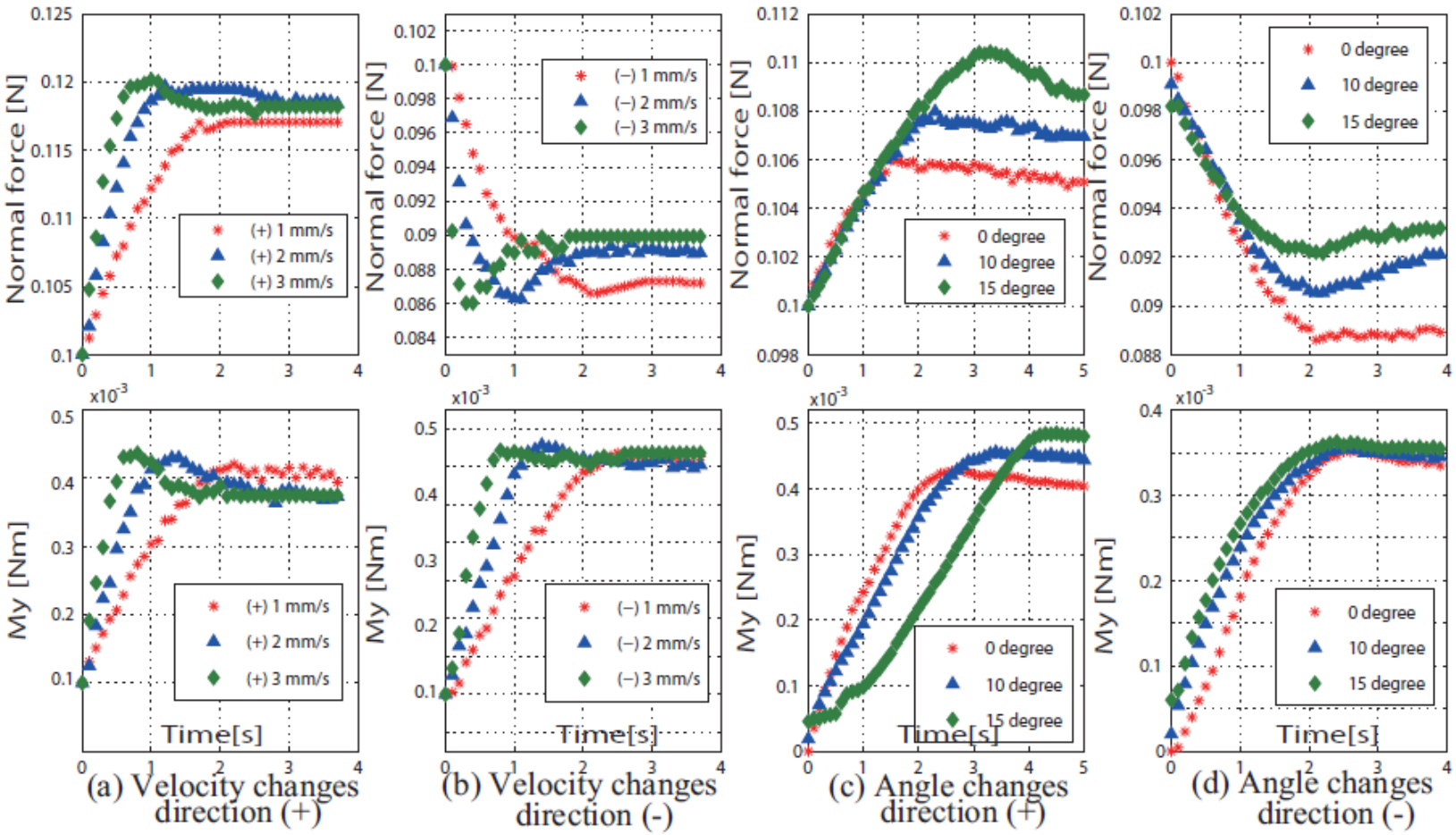


Sliding velocity varies



ANSYS によるシミュレーションも同様の結果を示す

シミュレーションと実験



結論

- ✓ マイクロフォースモーメントセンサを指の中央に配置
- ✓ 全体滑りに先立ち，センサが反応
- ✓ 局所滑りを検出することが可能

実際は…

- ✓ 1996年　ロボティクス学科設立
- ✓ 杉山教授, 田畑教授 (現　京都大学) , 小西教授
- ✓ 小さい力センサを作れないか?

- ✓ 2004年ごろから杉山研究室と本格的な共同研究
- ✓ 2006年　国際会議発表
  Fujii, Inoue, Dzung, Sugiyama, Hirai,
  Proc. IEEE Sensors, 2006
- ✓ 2011年　論文

空気圧駆動

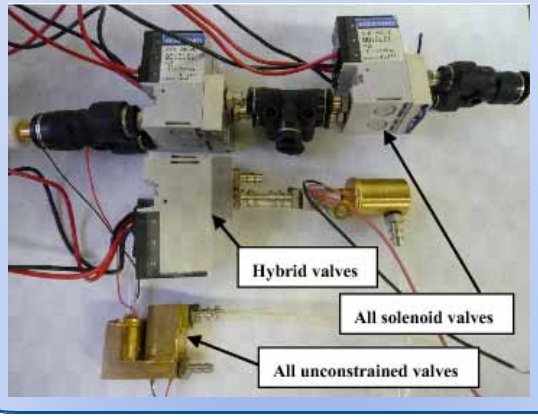
http://www.squse.co.jp/development/robot.html

"Shadow Hands" made by Shadow robot company

- McKibben actuator
  - Light
  - Flexible

➢Pneumatic valves

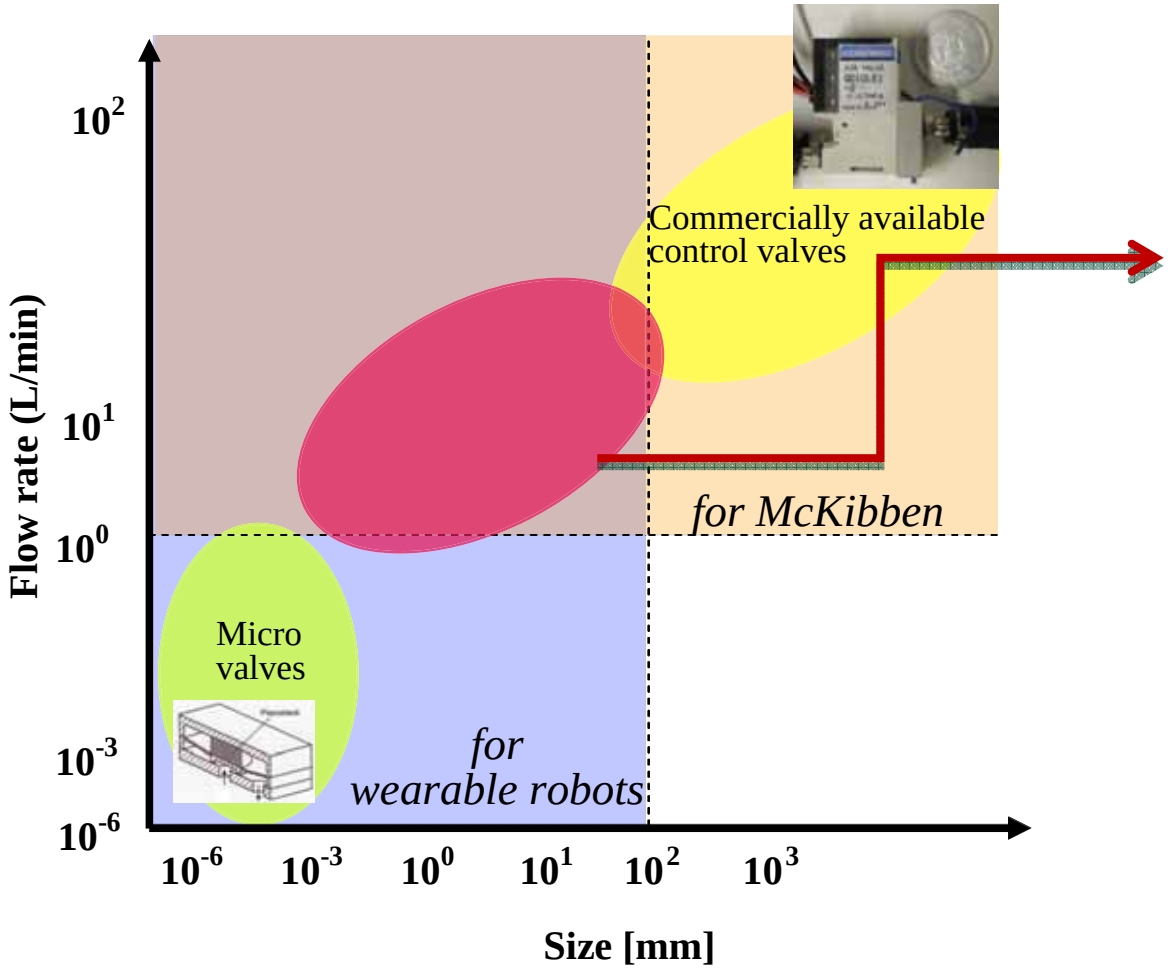
- Pressure : 0.2~0.5 MPa
- Flow rate : 2.5 L/min~
- Compact size



空気圧駆動

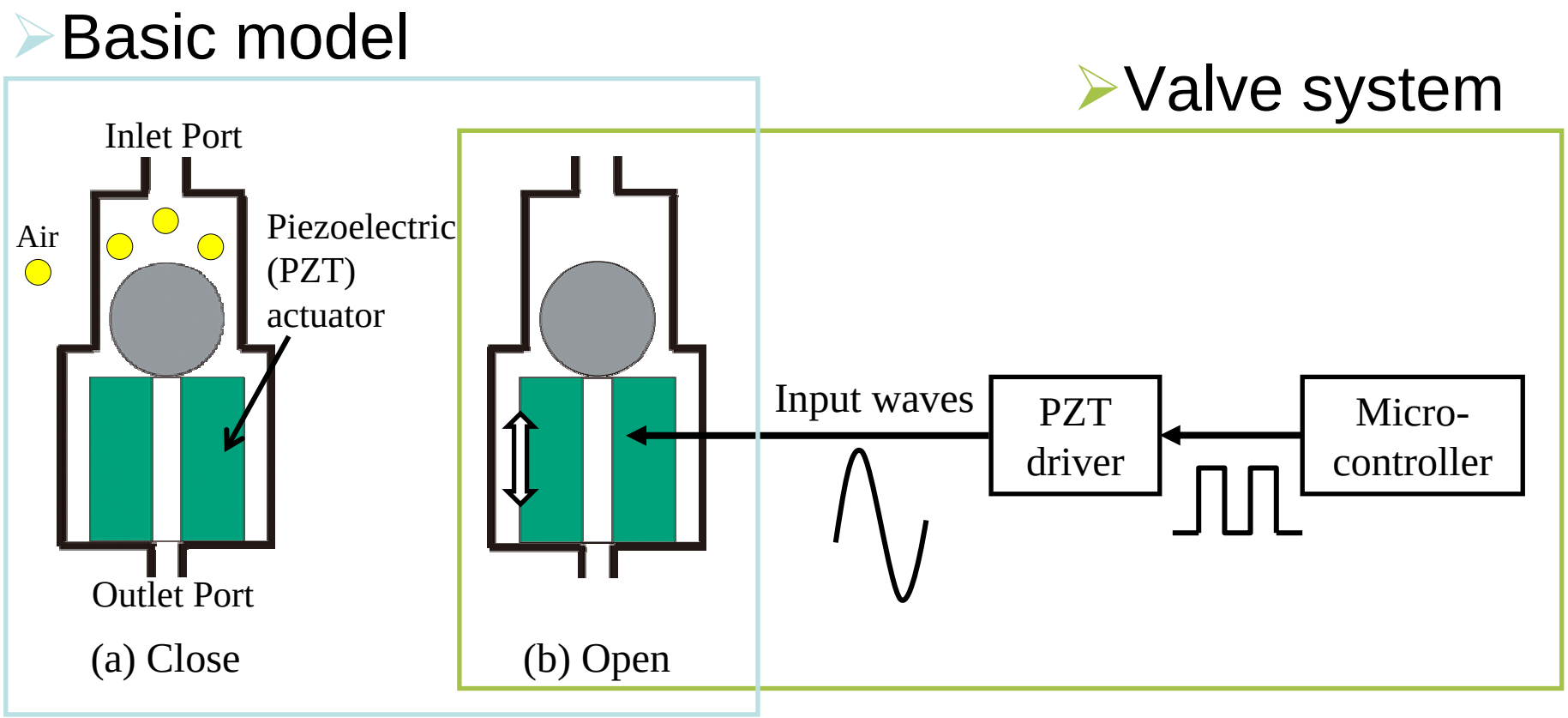
空気圧駆動

空気圧弁の現状


Flow rate (L/min)
10^2
10^1
10^0
10^{-3}
10^{-6}
10^{-6} 10^{-3} 10^0 10^1 10^2 10^3
Size [mm]
Commercially available control valves
for McKibben
Micro valves
for wearable robots

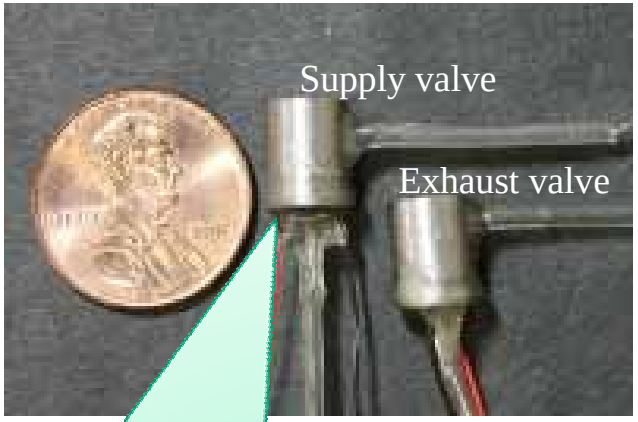
Unconstrained valves
Supply valve
Exhaust valve

無拘束ポペット弁の原理

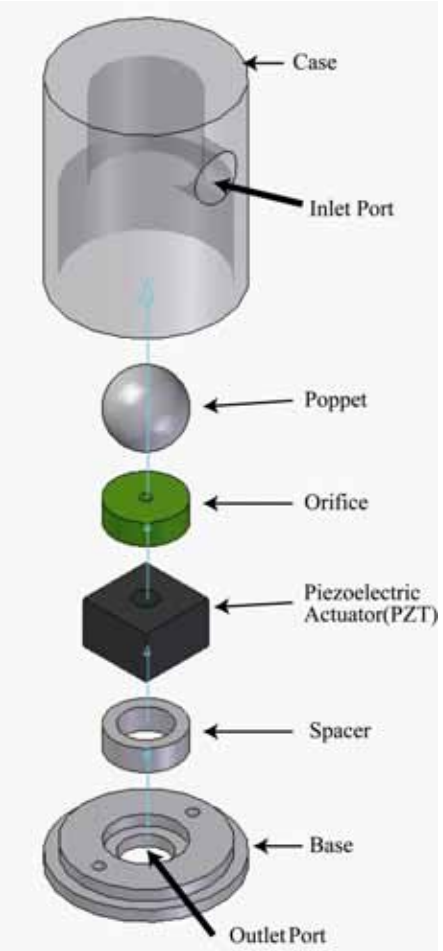


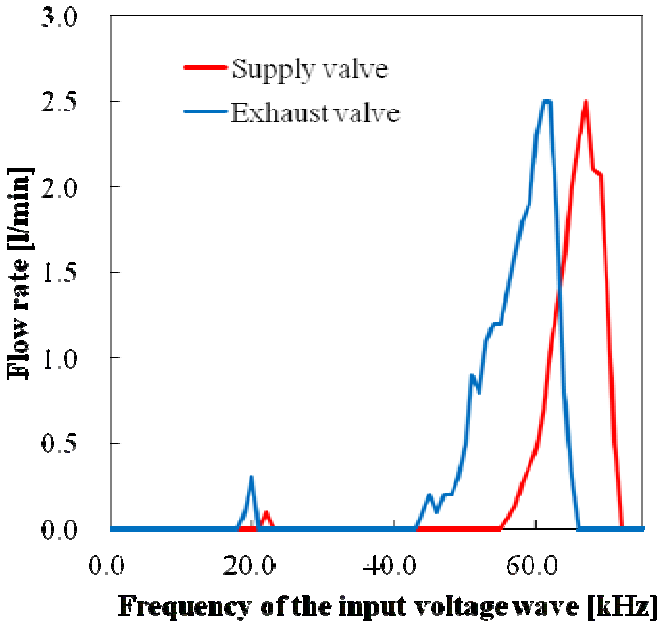
Sumadi, Hirai, and Honda, Miniaturized Unconstrained On-Off Pneumatic Poppet Valve - Experiment and Simulation -, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 14-5, 2009

無拘束ポペット弁のプロトタイプ

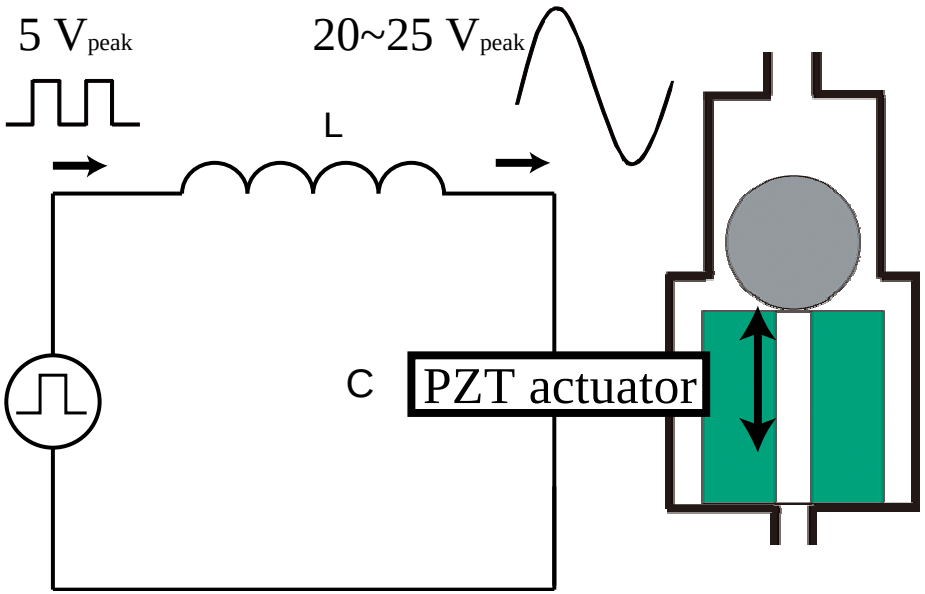


- Size : ϕ 7×9 mm
- PZT : 3×3×2 mm
- Orifice hole: ϕ 0.5 mm





無拘束ポペット弁の駆動回路



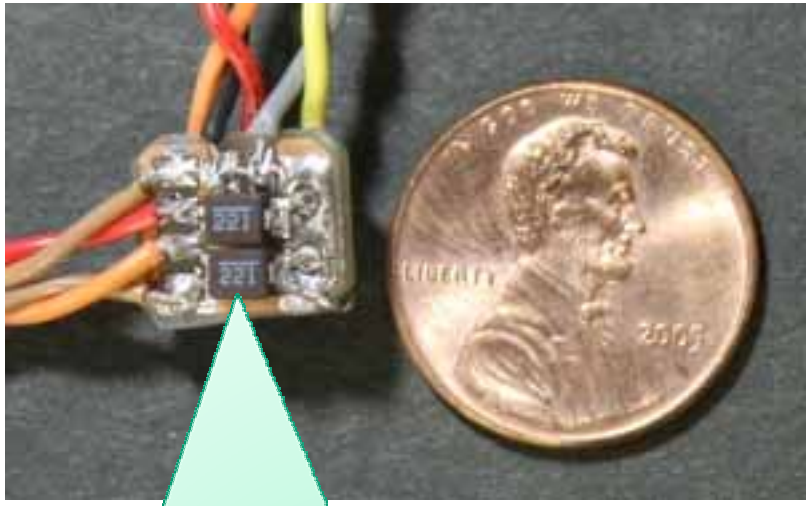
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

f : Resonance frequency

L : Inductance of the coil

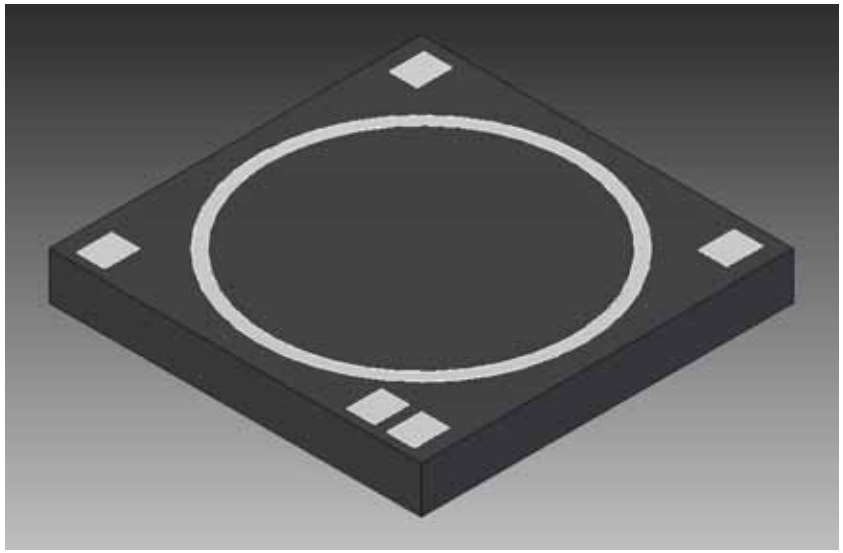
C : Capacitance of PZT actuator

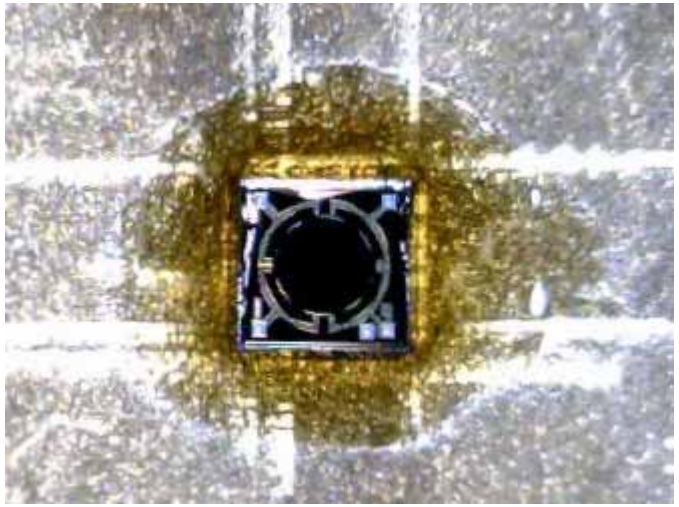
➢miniaturized driver



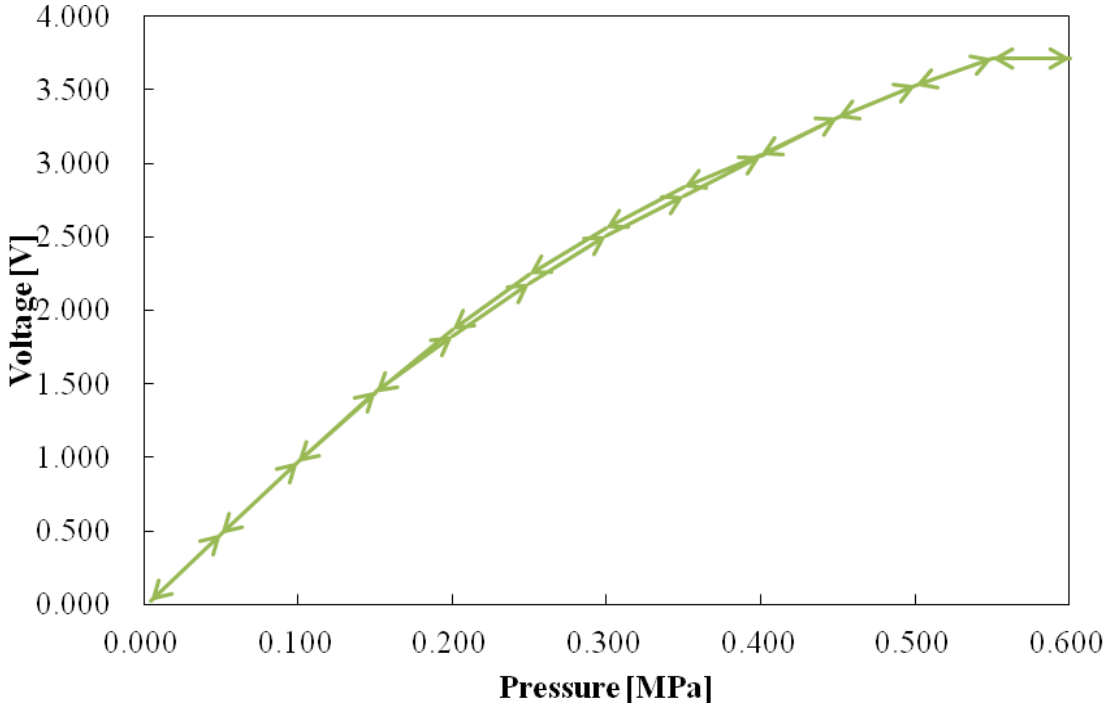
- Driving TWO valves
- Two coils and one gate-driver
- Supply voltage is only 10 V

マイクロ圧力センサの組み込み



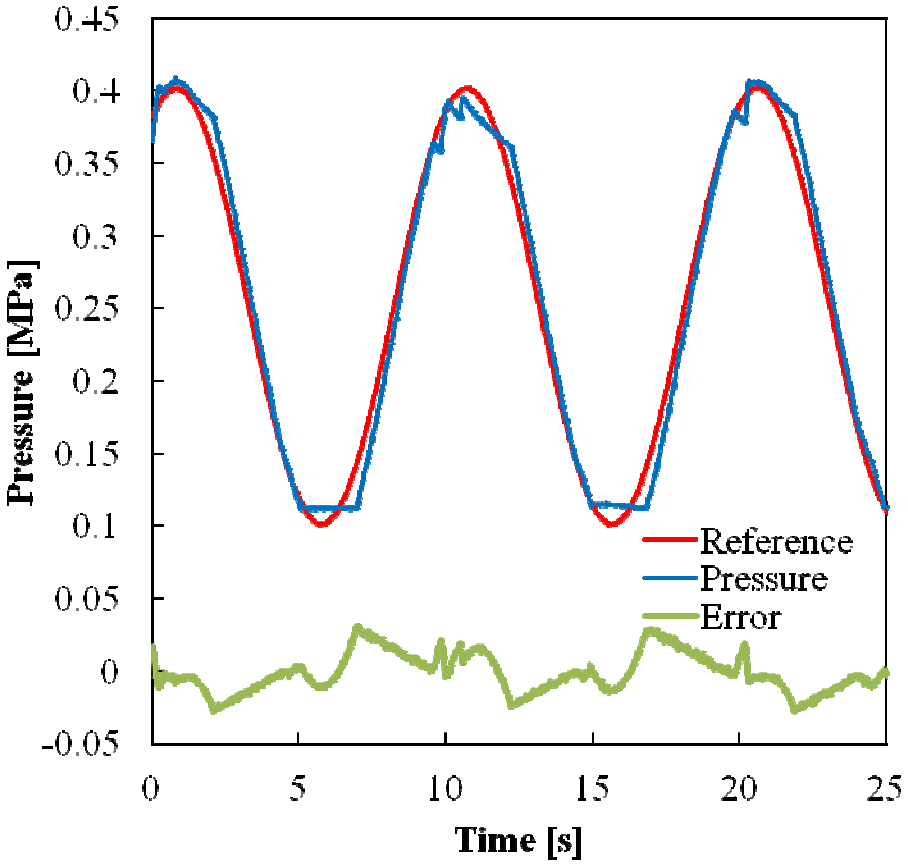


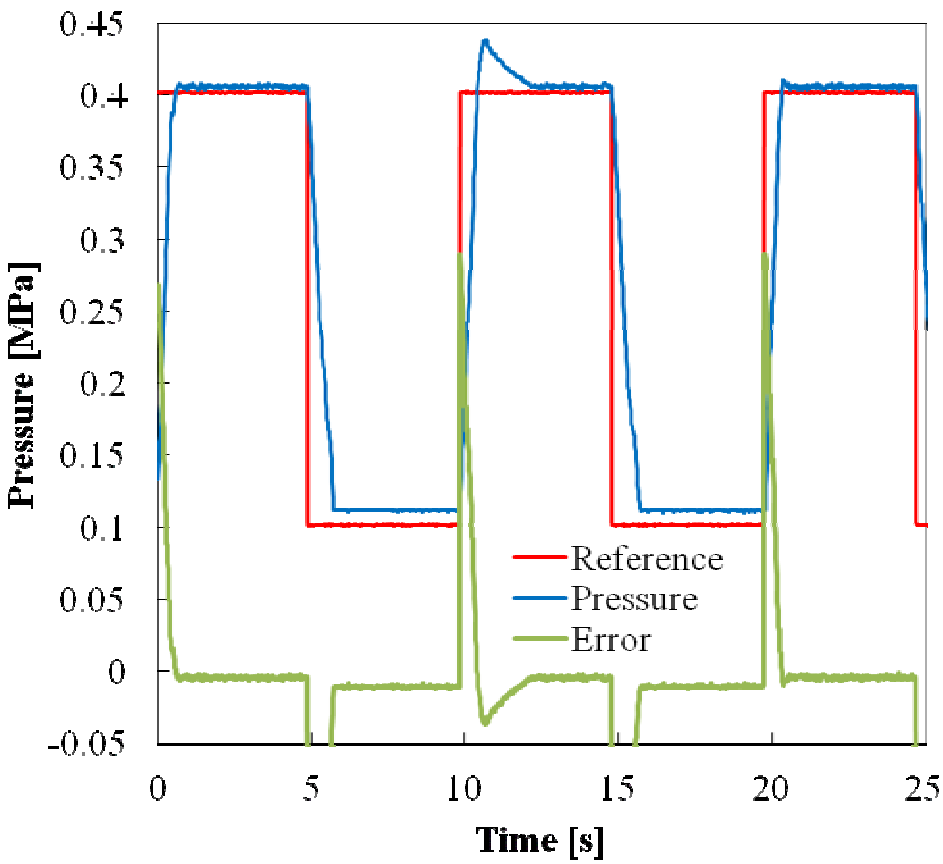
無拘束ポペット弁の圧力制御



出力電圧の測定結果　電源5.00 V, ゲイン5.17 (24 kΩ)

圧力制御の実験結果



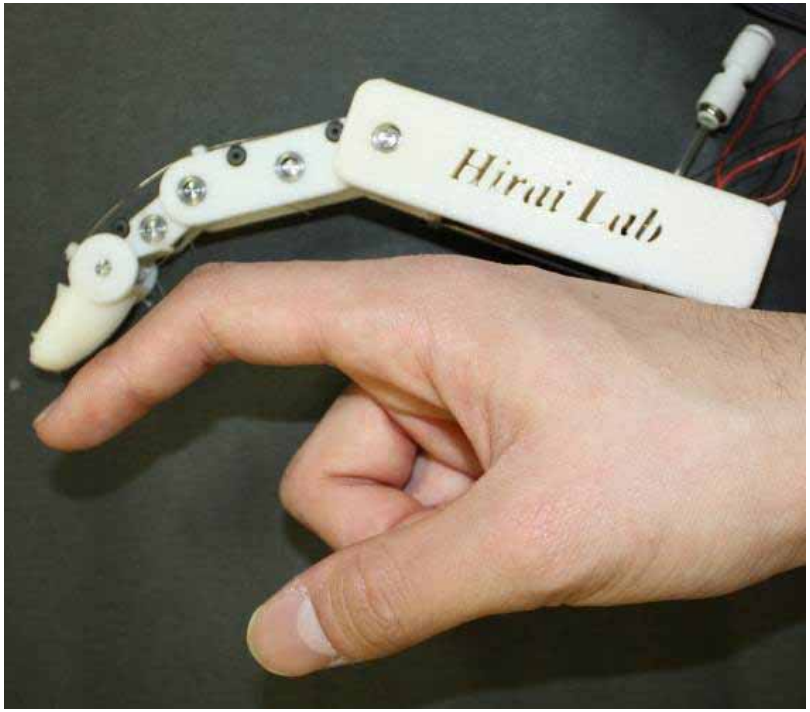


- Error are less than ±0.03 MPa
- Can track the reference

- Dead time is about 60 ms
- Rising time is 700 ms

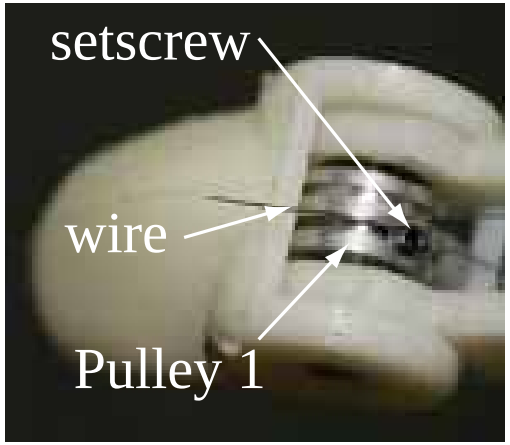
ロボットフィンガー

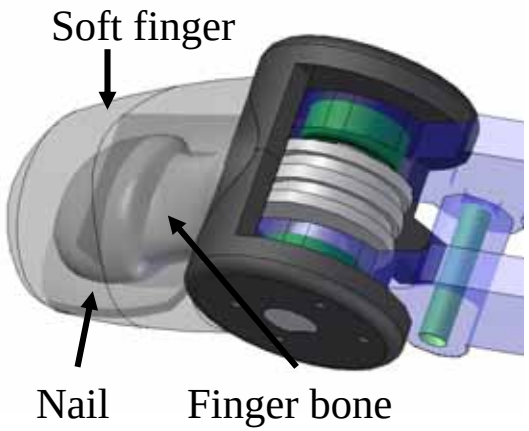
➢Robot finger



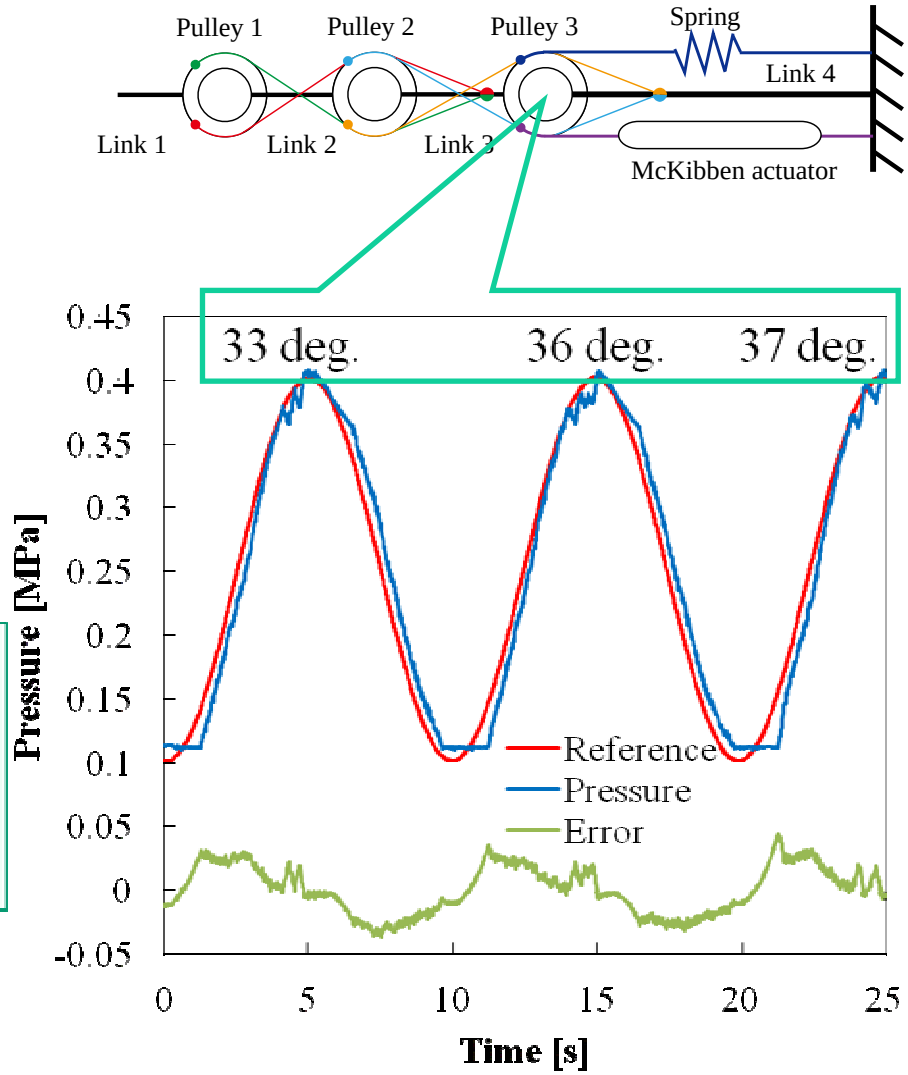
➢Without the cover of Link 4

➢Soft fingertip





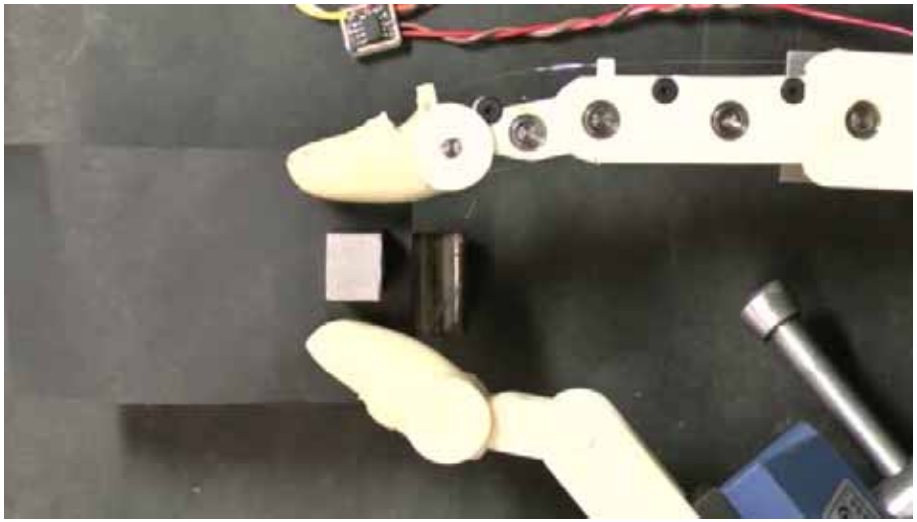
ロボットフィンガー



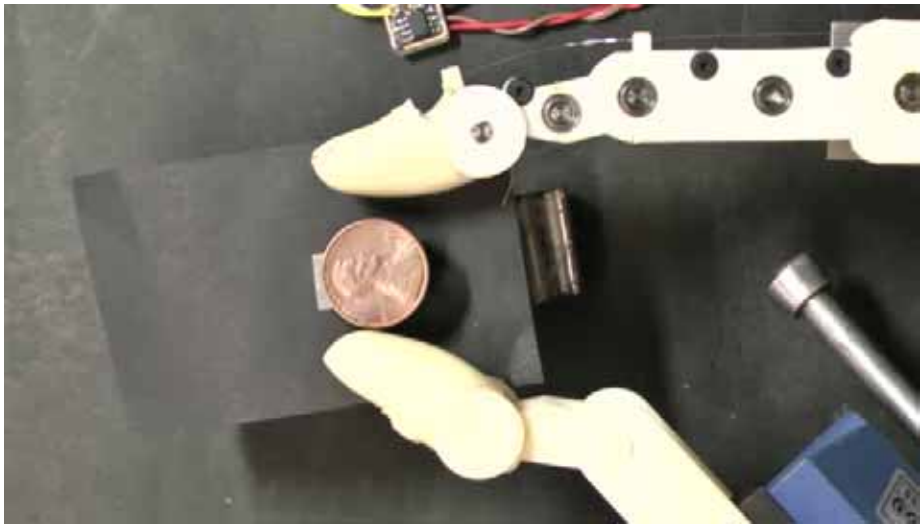
- The angle of Pulley 3 is 30~37 deg.
- McKibben displacement is 2.5 mm
- The error is ±0.03 MPa

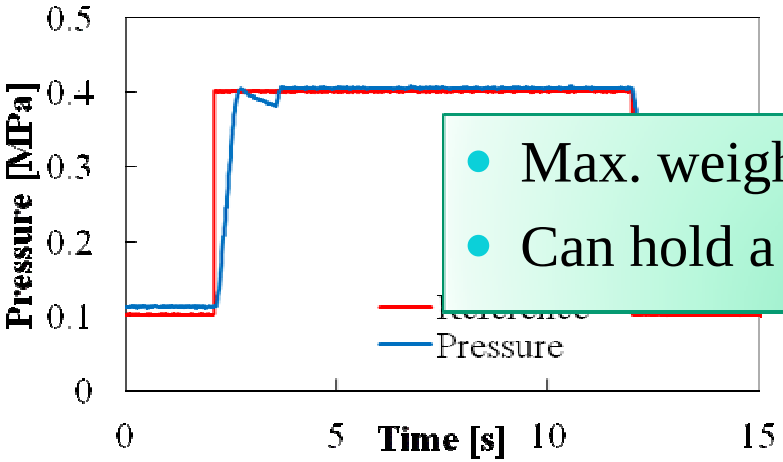
ロボットフィンガー

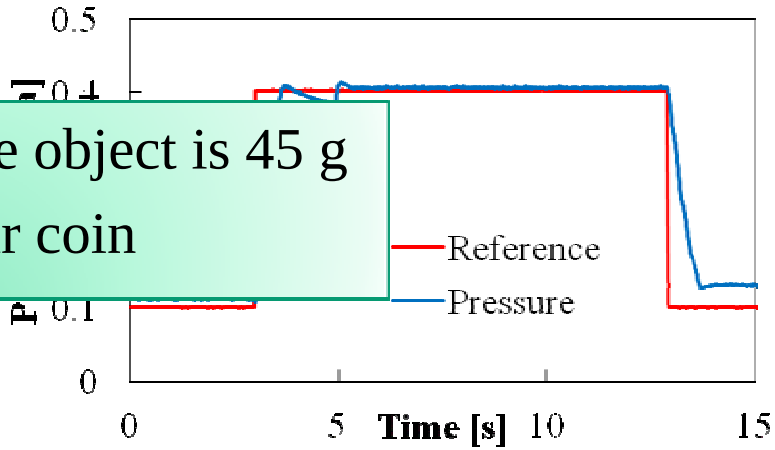
➢15 g object



➢1 cent coin







- Max. weight of the object is 45 g
- Can hold a circular coin

結論

- ✓ 無拘束弁によるマッキベンアクチュエータ駆動
- ✓ マイクロ圧力センサを組み込む
- ✓ ロボットフィンガーへ内蔵し，運動を制御

実際は…

- ✓ 1996年　ロボティクス学科設立
- ✓ アクチュエータに関する共同研究
- ✓ 空気圧アクチュエータに関する研究

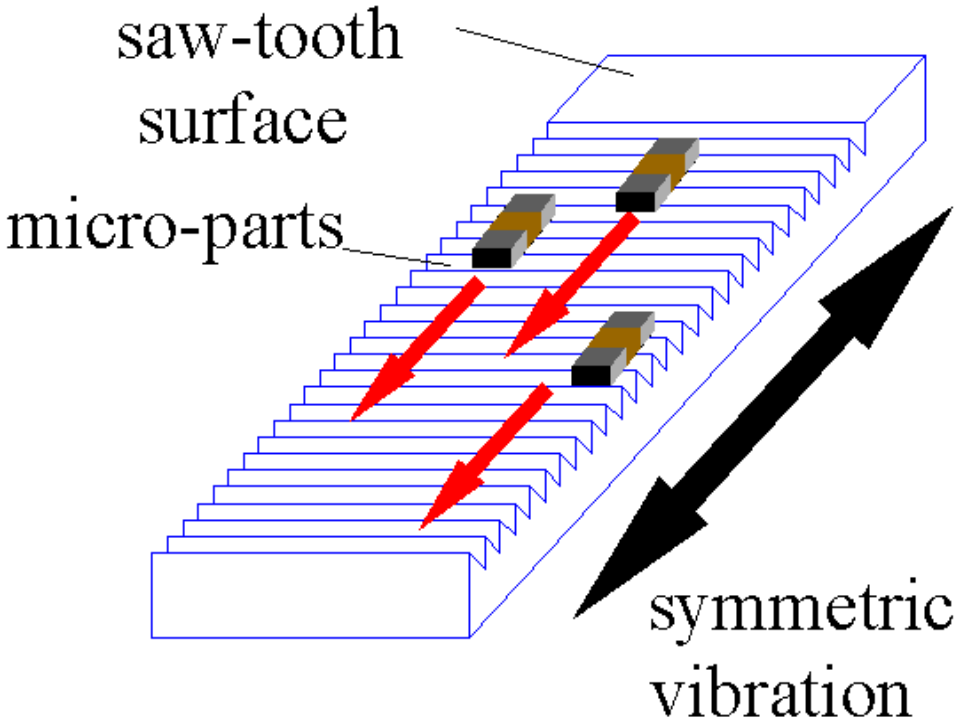
- ✓ 2003年ごろから弁の小型化
- ✓ 2005年　国際会議発表
  Uehara and Hirai, 9th ICMT2005, 2005
- ✓ 2009年　論文

マイクロパーツフィーディング

Type	Size (t×w×h[mm])	Weight[mg]
2012	2.0×1.2×0.6	7.5
1005	1.0×0.5×0.5	1.2
0603	0.6×0.3×0.3	0.3
0402	0.4×0.2×0.2	0.1
0201	0.2×0.1×0.1	0.01
・：	・：	・：

小型･軽量化への要求

マイクロパーツフィーディング



フィーダ表面に非対称な周期構造を生成
輸送対象物との接触に非対称性
対称振動による微小物体の一方向輸送を実現

マイクロパーツフィーディング

水平な対称振動による駆動

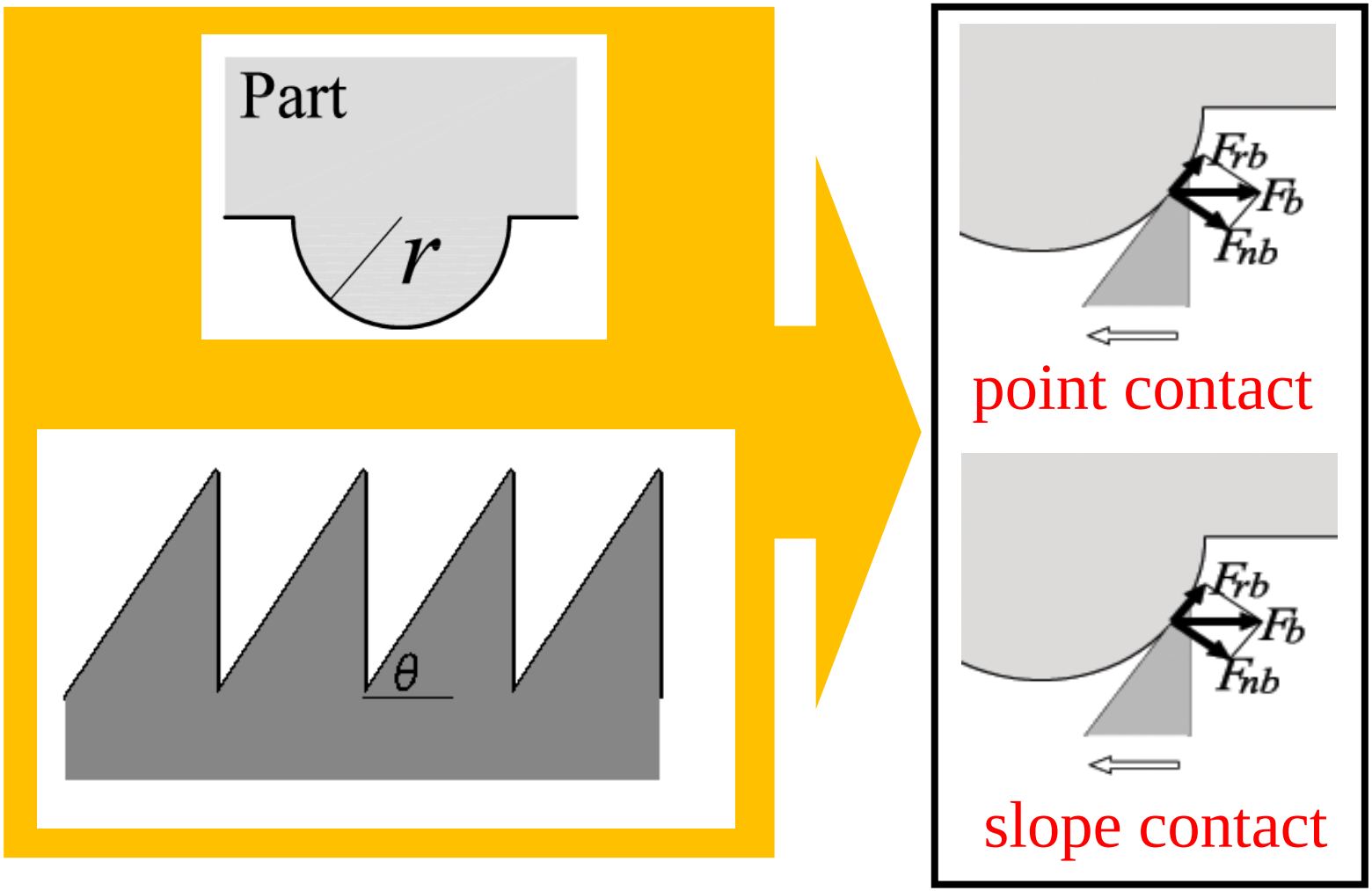
機器のセッティングが容易
駆動エネルギの効率化

接触面積減少による凝着力低下

低振動エネルギによる輸送の実現

マイクロパーツフィーディング

接触の非対称性



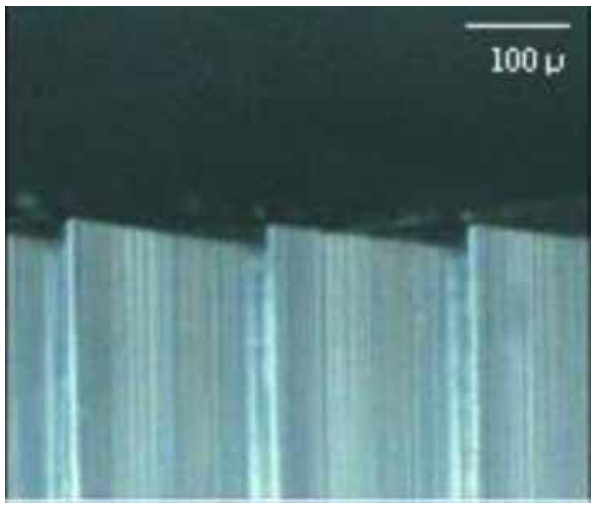
マイクロパーツフィーディング

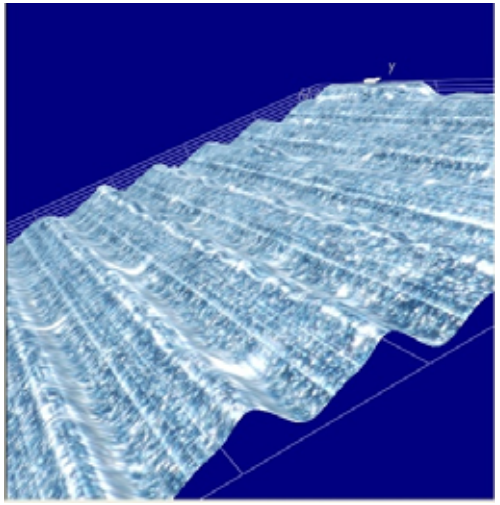
非対称周期構造生成技術

(1)ダイシングソー
(2)エキシマレーザ
(3)LIGAプロセス
(4)フェムト秒レーザ
(5)異方性エッチング

マイクロパーツフィーディング

Sawtoothed silicon wafers using a dicing saw

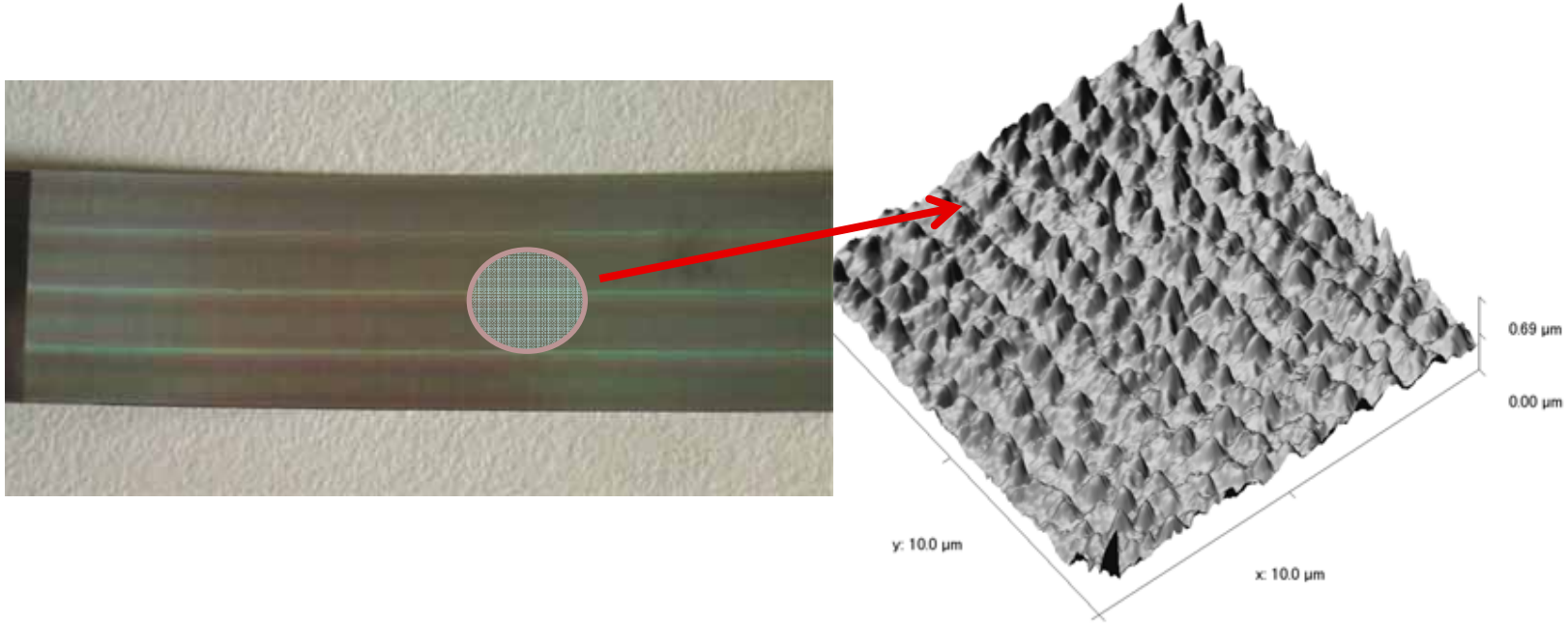




Pitch:10 to 100 μm

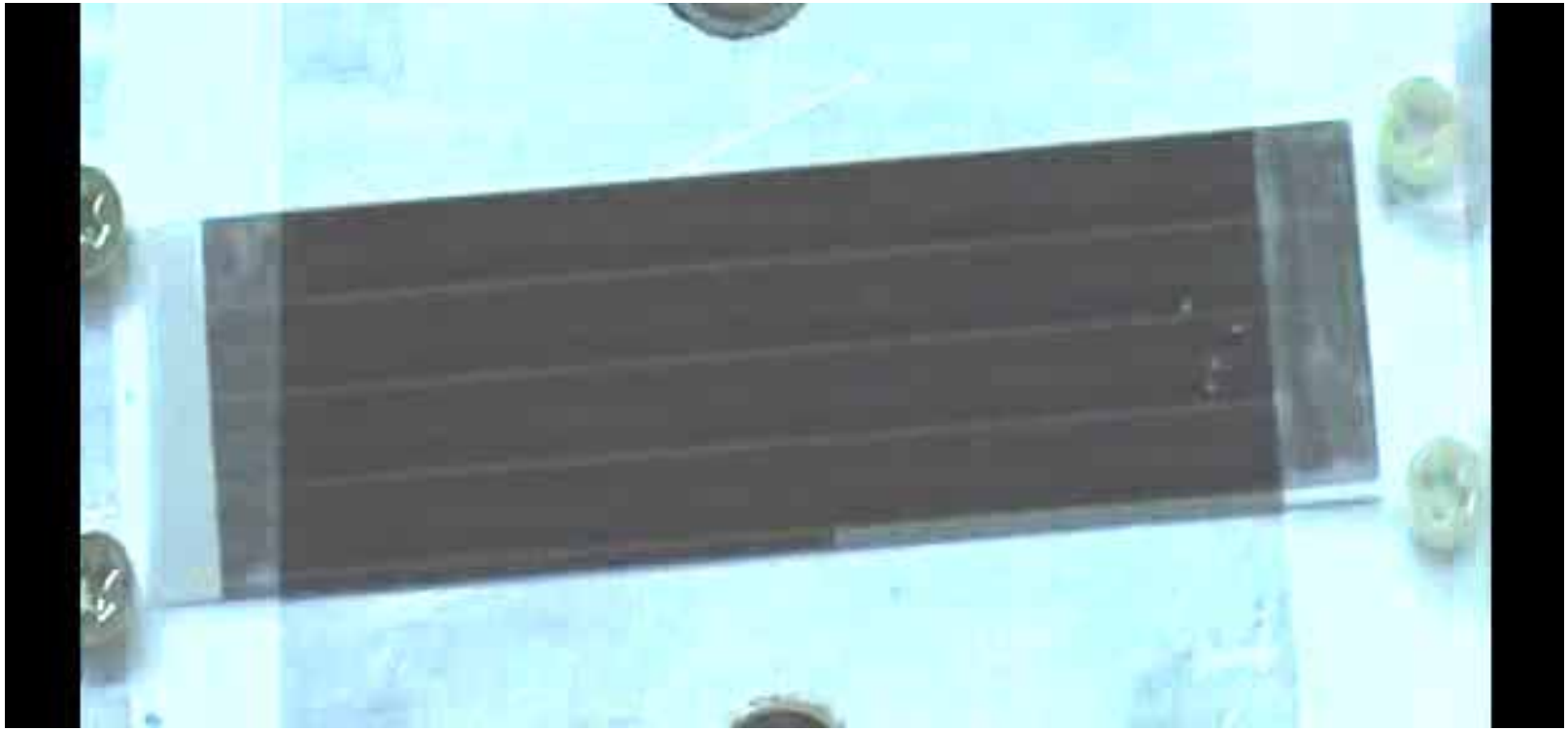
マイクロパーツフィーディング

Stainless tapes fabricated by femtosecond laser irradiation



Pitch: 1 to 2 µm

マイクロパーツフィーディング



Mitani and Hirai, Submillimeter Micropart Feeding Along an Asymmetric Femtosecond-Laser-Microfabricated Surface, Int. J. of Automation Technology, 3-2, 2009

マイクロパーツフィーディング

非対称周期構造生成技術

(1)
(2)
(3)
(4)
(5)

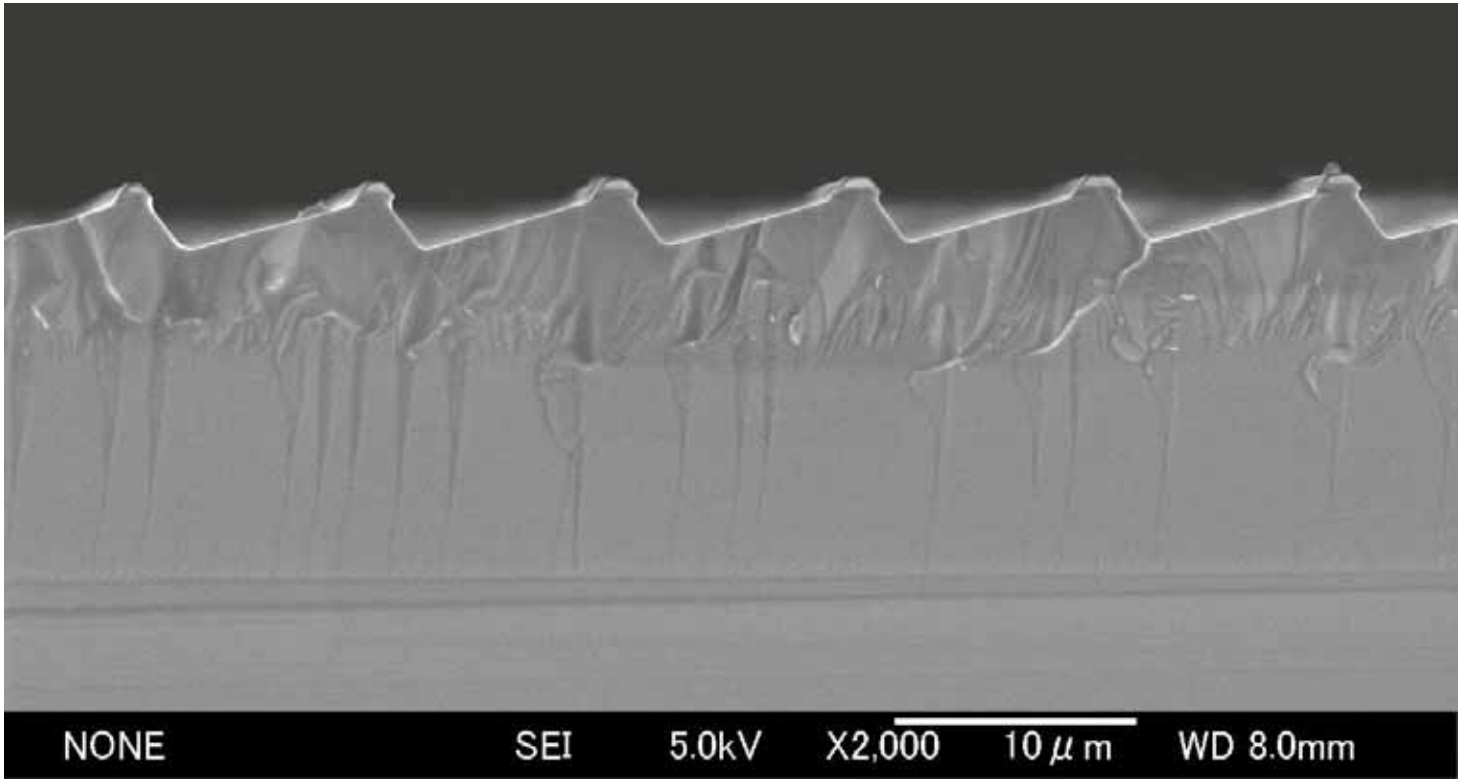
面方位<221>の面を有する
シリコンウェハのエッチング

↓

エッチング面の前方と後方に
異なった結晶面が存在
結晶面間のエッチング速度が
異なるため，非対称の傾斜面
を持つ三角形状を生成

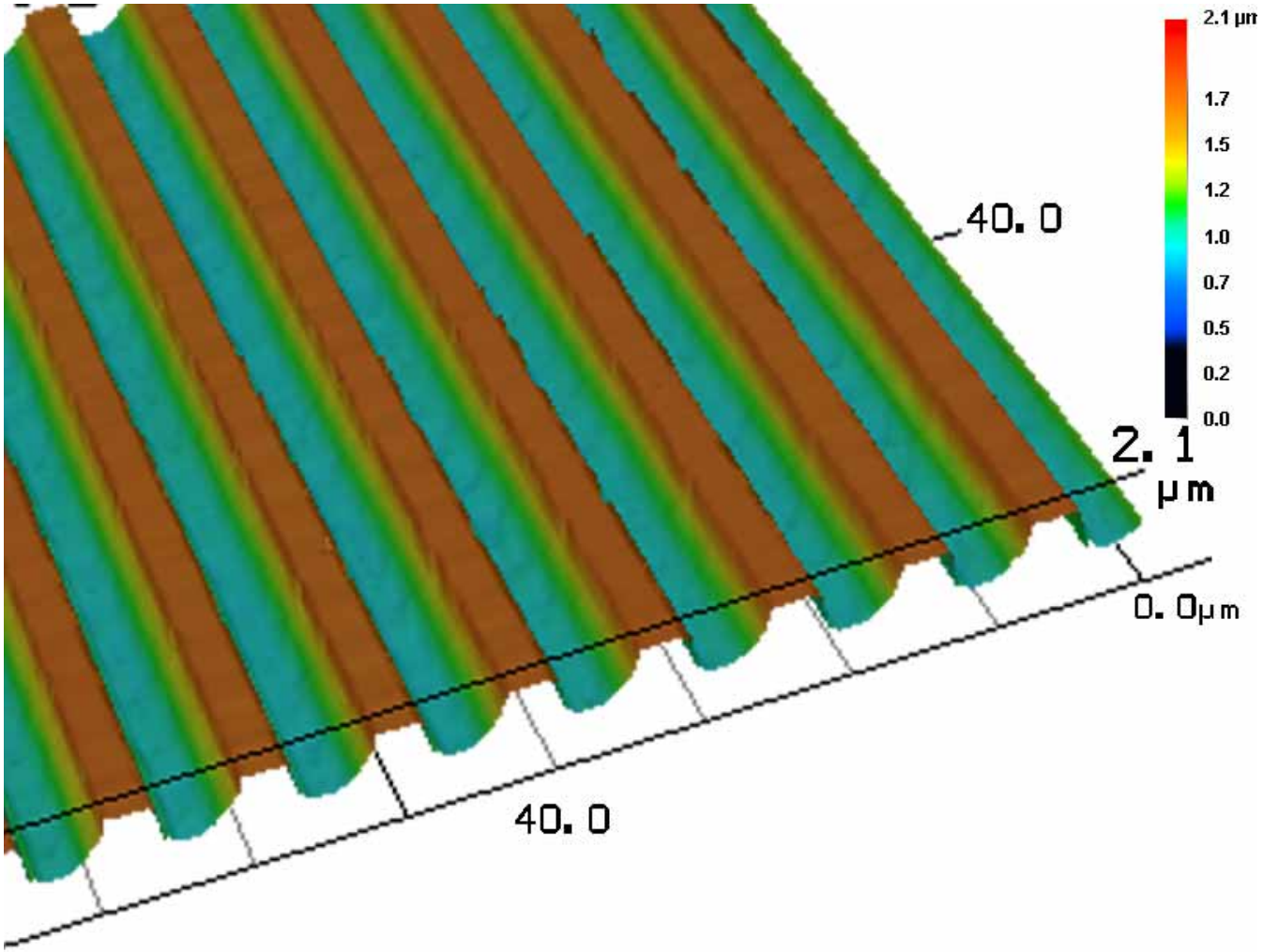
マイクロパーツフィーディング

加工面断面のSEM画像

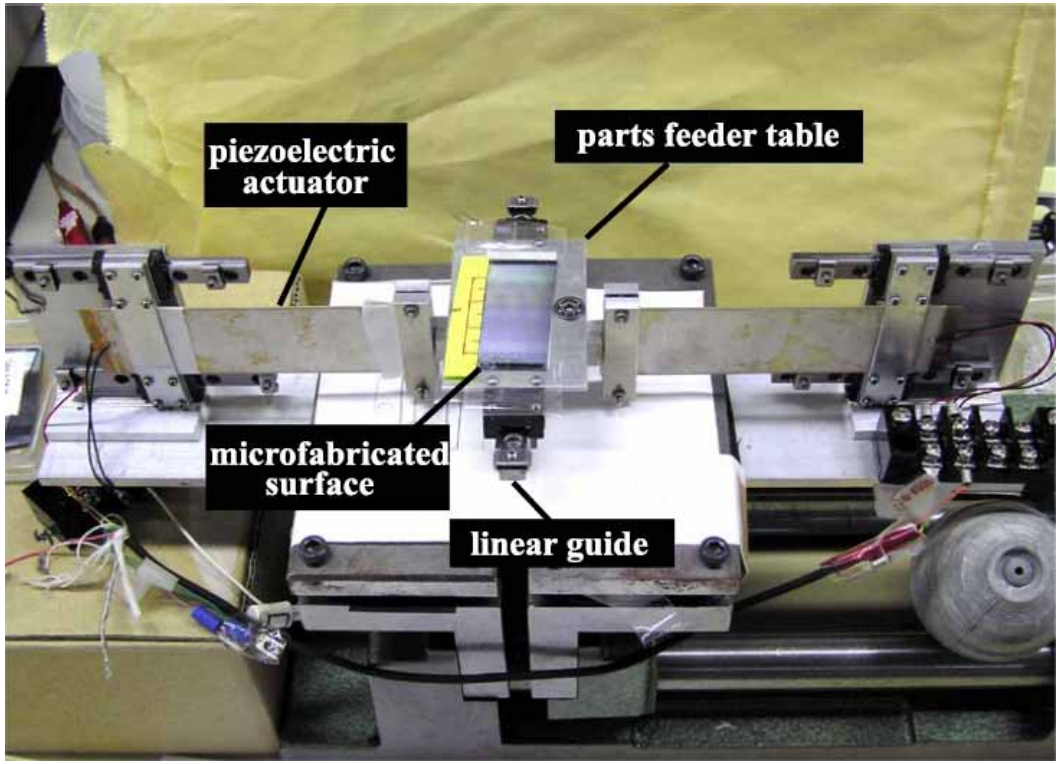


マイクロパーツフィーディング

加工面断面のSEM画像



マイクロパーツフィーディング

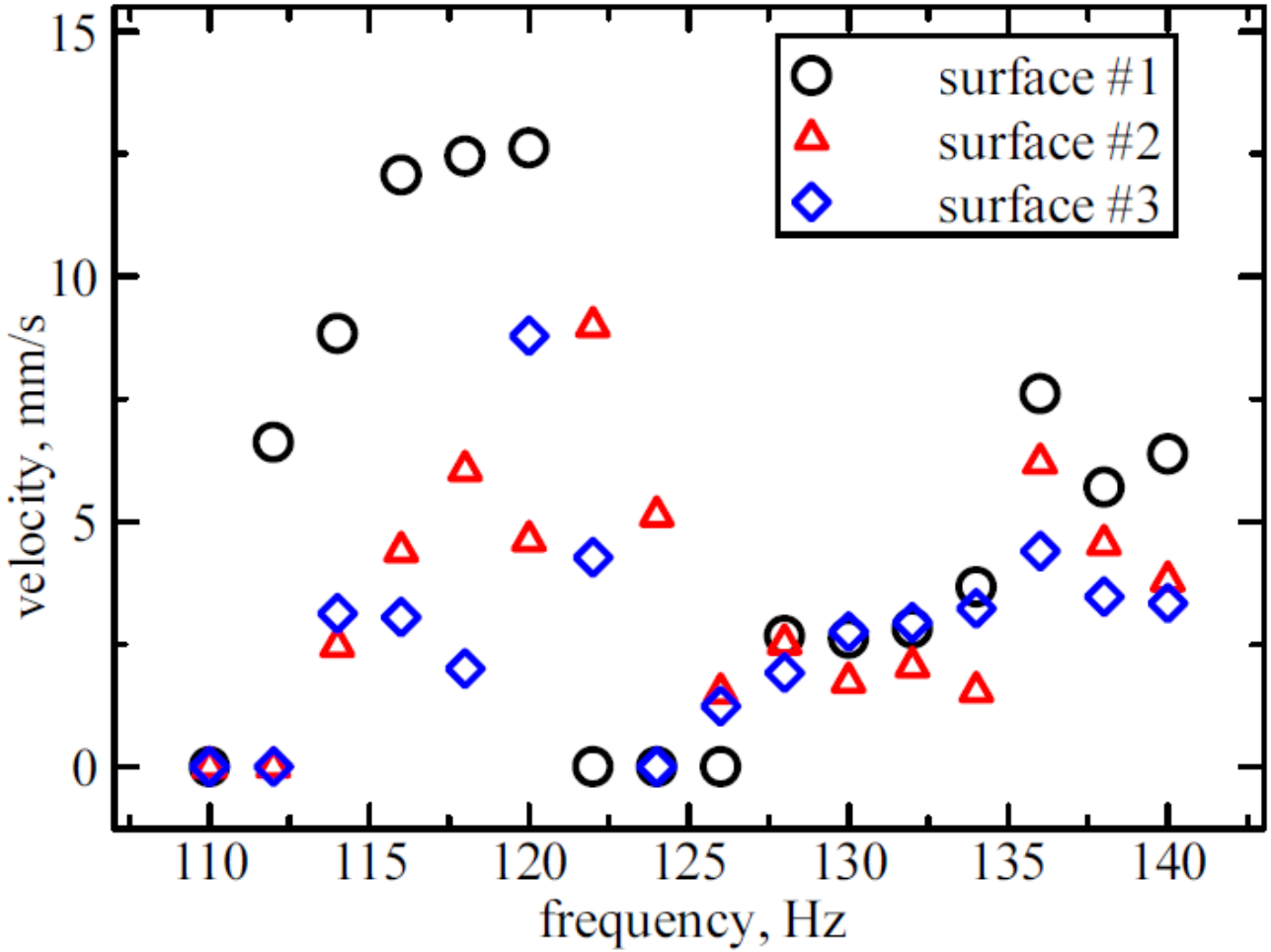


実験装置

- 振動振幅：0.2mm
- 振動周波数：110〜140Hz
- 振動波形：方形波

- 輸送対象物：
  0402チップコンデンサ
- 環境：25℃, 60%RH

マイクロパーツフィーディング



結論

- ✓ 非対称表面による運動の生成
- ✓ 様々な加工法
- ✓ 0402チップコンデンサを 5〜10 mm/s で搬送

実際は…

- ✓ 2001年　マイクロパーツ搬送に関する相談
- ✓ のこぎり歯による搬送
- ✓ 片刃のダイシングソーによる加工
- ✓ 2004年　口頭発表
- ✓ 2005年　国際会議発表

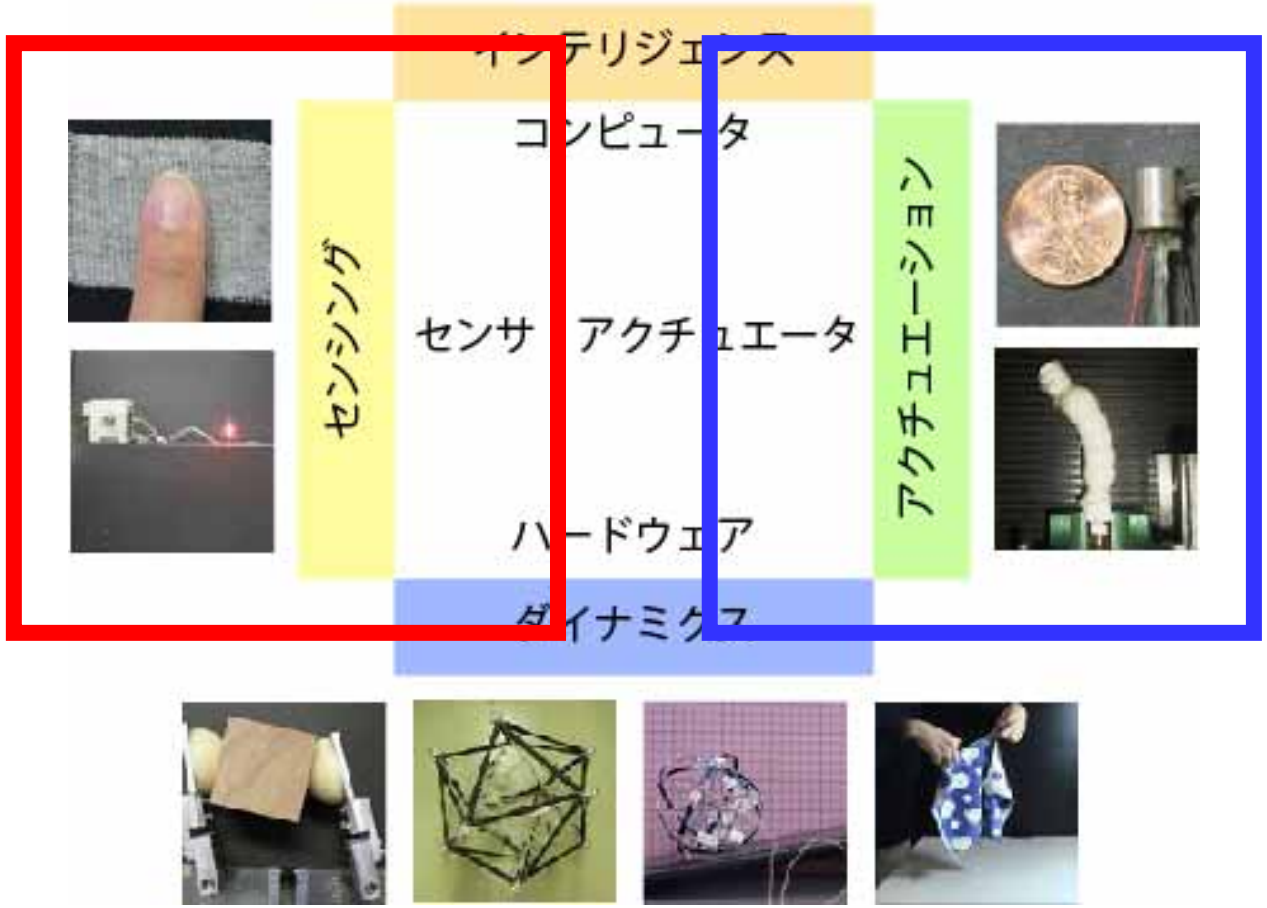
  Mitani, Sugano, Hirai, Proc. IEEE ICRA, 2005
- ✓ 2006年　論文

  Mitani, Sugano, Hirai,
  IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 11-6, 2006

ロボティクスにおけるマイクロ技術

多くの適用例

工夫が必要



謝辞

Prof. Sugiyama

Dr. Ho Van

Dr. Mitani

OMRON

DISCO
Kiru·Kezuru·Migaku Technologies

Canon キヤノン マシナリー株式会社

謝辞

Laboratory members