

2004/12/07

香川大学地域開発共同研究センター
柔軟物ハンドリング技術交流グループ キックオフミーティング

柔らかさが生み出す 巧みな物体操作

平井 慎一
立命館大学ロボティクス学科

ロボティクス学科

設立 1996年

教員 (2004年)

有本卓

小澤隆太

川村貞夫

野方誠

牧川方昭

石井明

金岡克弥

手嶋教之

平井慎一

渡部透

伊坂忠夫

永井清

前田浩一

**ロボティクス・メカトロニクス技術に関わる
教育と研究**

協力

教育

ロボティクス学科

マイクロ機械システム
工学科

電子情報デザイン学科

知能情報学科

研究

ロボティクス・F A研究センター

スポーツ健康産業センター

マイクロ技術研究センター

VLSIセンター

SR (Synchrotron
Radiation) センター

平井研究室

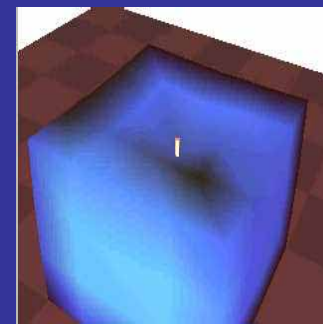
集積機械知能研究室



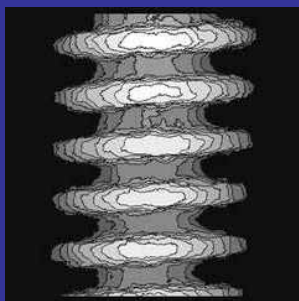
FPGAビジョン



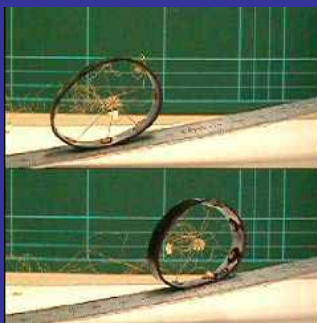
柔軟指操作



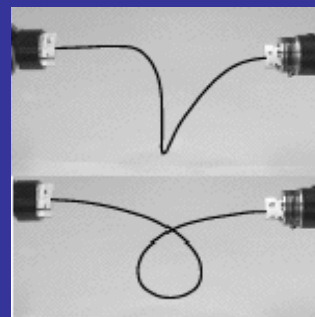
仮想レオロジー物体



三次元イメージング



跳躍移動ソフトロボット



線状物体操作



紙葉類操作

Sensing

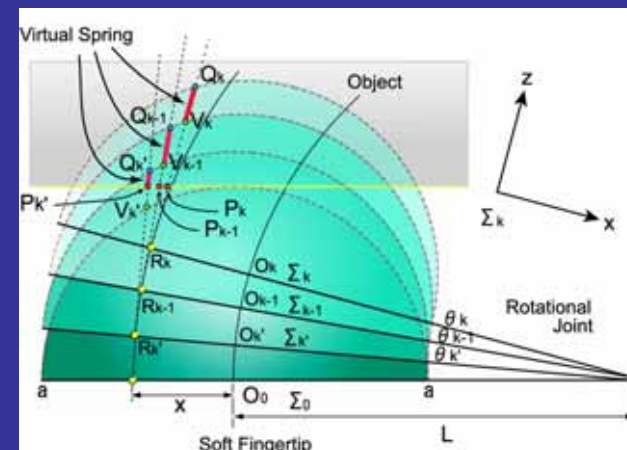
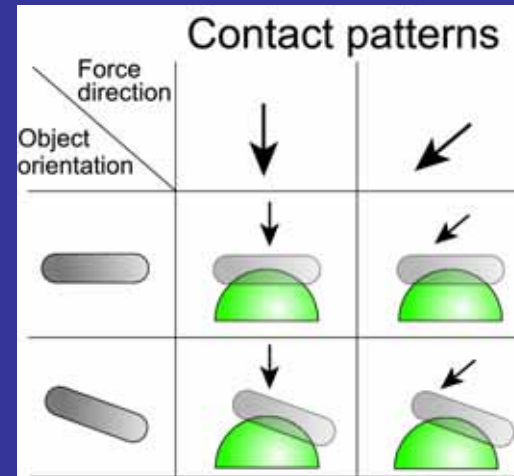
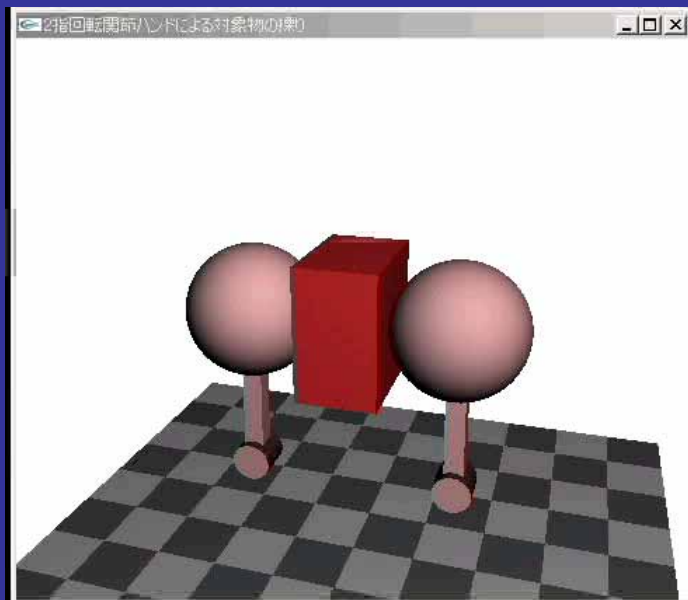
Action

柔らかい物体とメカニズムの制御

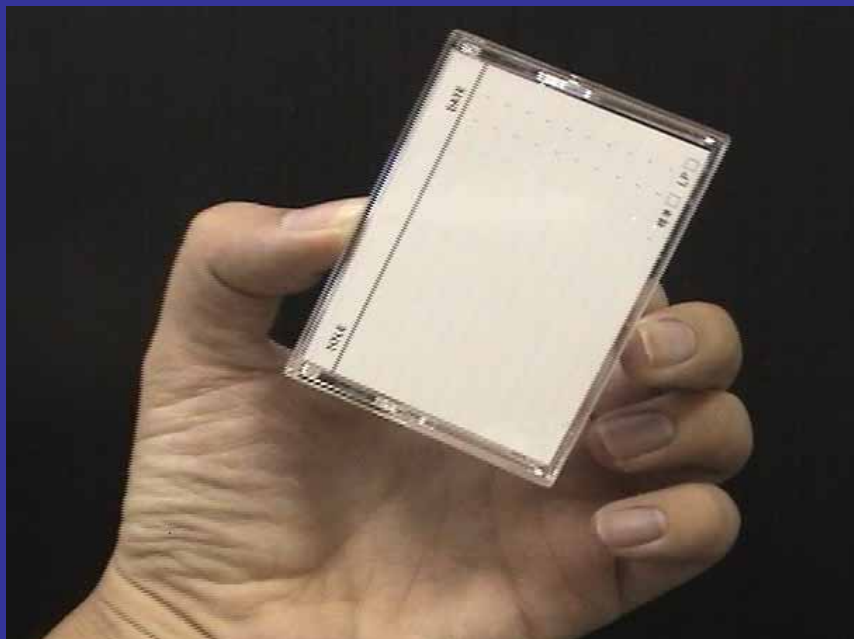
柔軟指操作

2002-

柔軟指モデル



何を目標しているか



人間のような器用な物体操作



1自由度指2本 = 合計2自由度
安定把持と姿勢制御？

従来のアプローチ

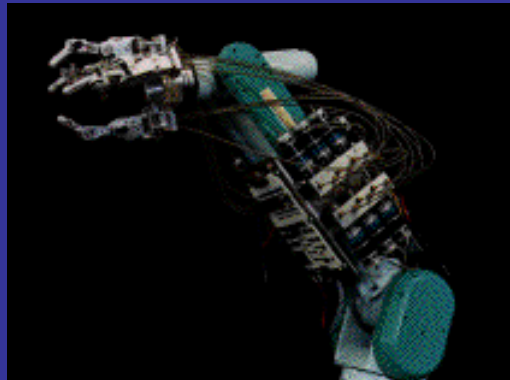
immobilization



ハンドで物体を固定
アームで運動を実現

器用な操作を実現できない

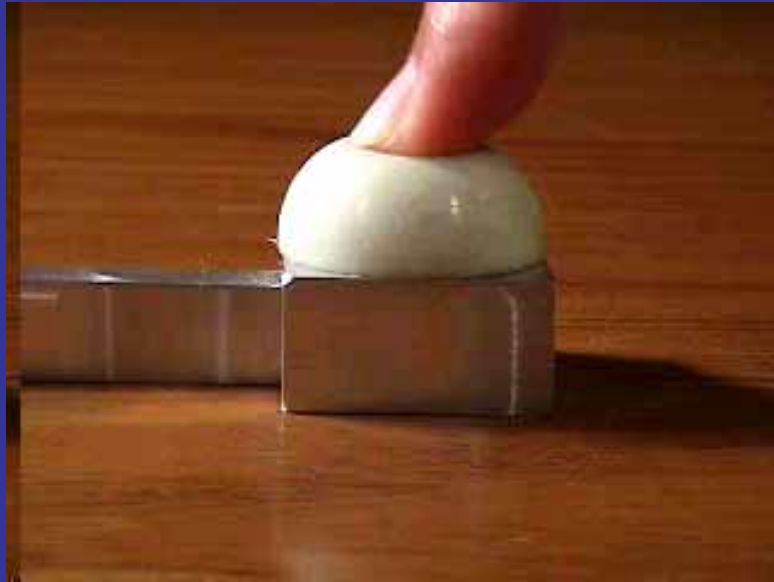
多指ハンド



三本以上の指
各指:二自由度以上

**複雑なメカニズム
複雑な制御則**

アプローチ



半球柔軟指

材質: ポリウレタン樹脂

人の指先と爪の構造

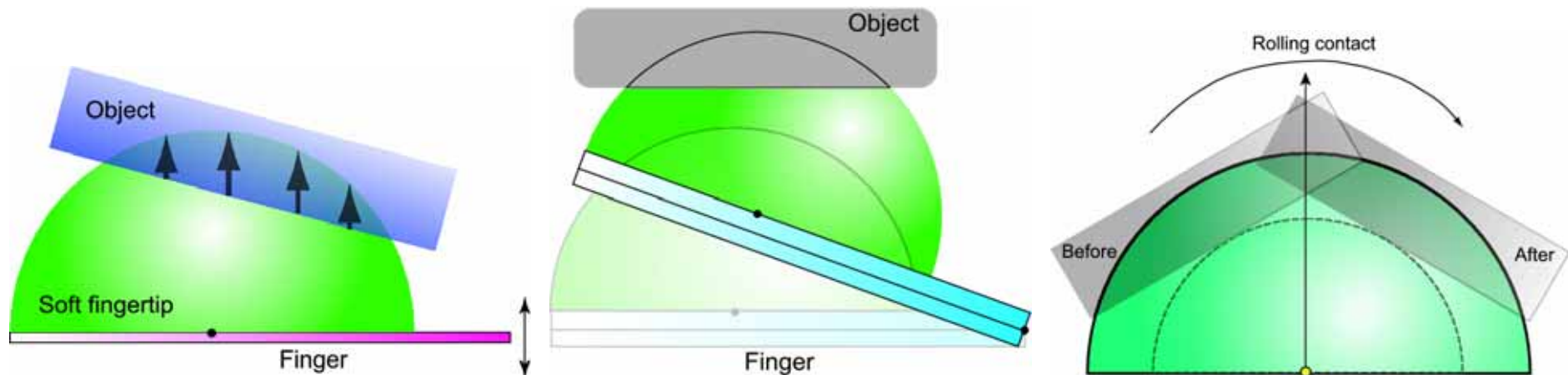
幾何学的非線形性



最小自由度からスタート

1自由度指2本 = 合計2自由度

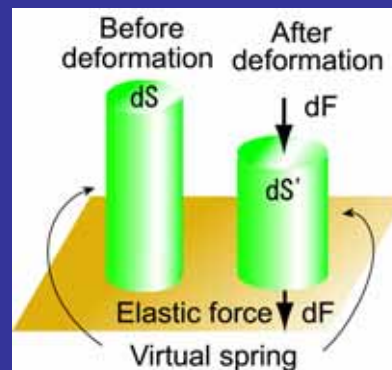
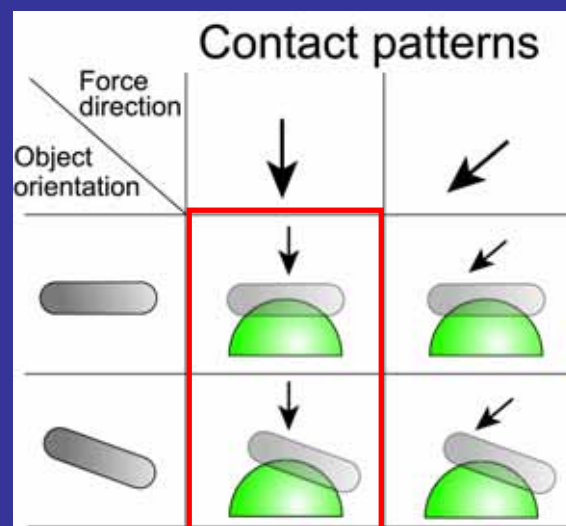
モデリング



並進接触

回転接触

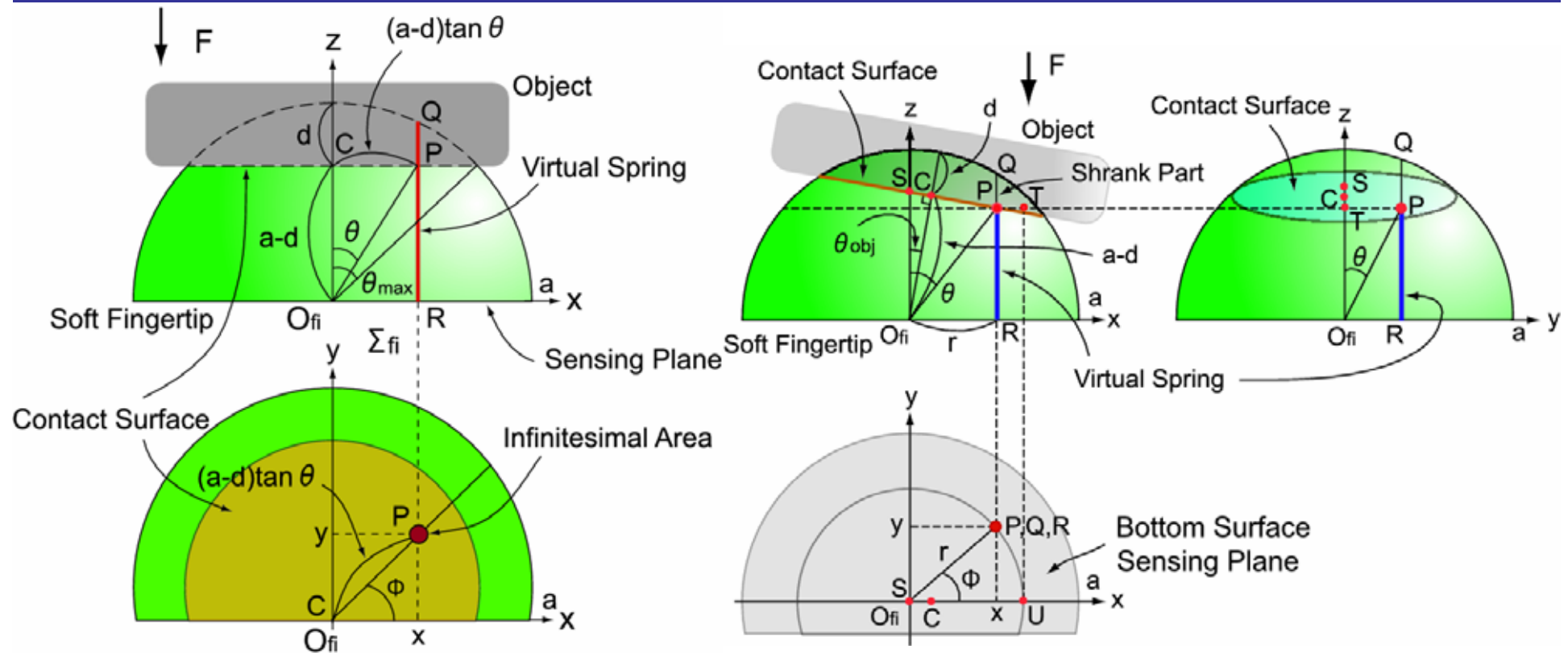
弾性転がり接触



ヤング率大: 剛体指上での転がり
ヤング率小: 柔軟指上での転がり

柔軟指: 仮想円筒バネの集合

並進接触モデル



垂直

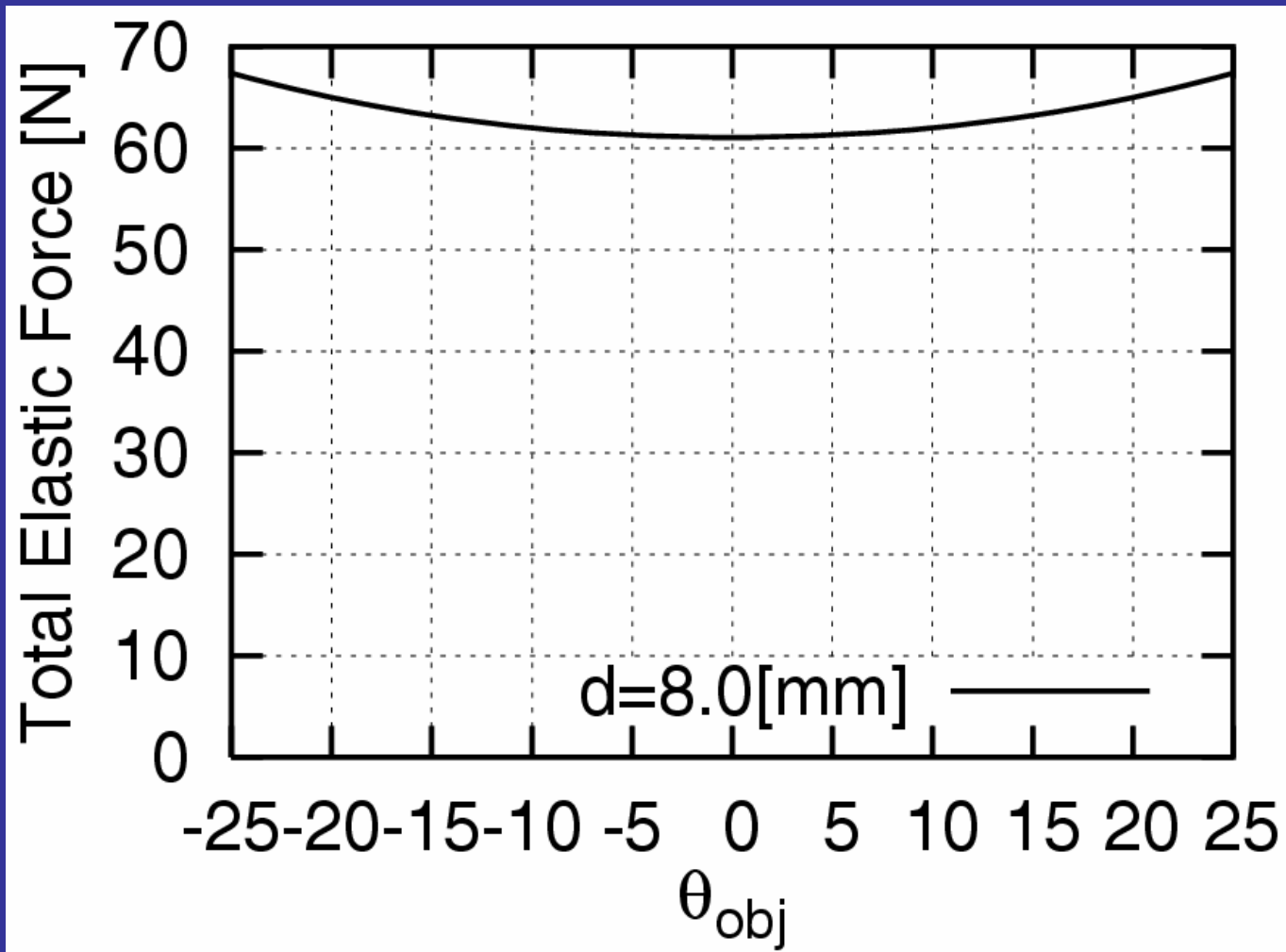
$$dP = E \left(1 - \frac{a-d}{\sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}} \right) \frac{a-d}{\sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}}$$

斜め

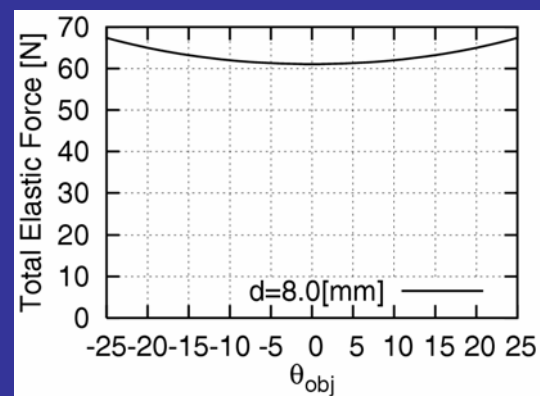
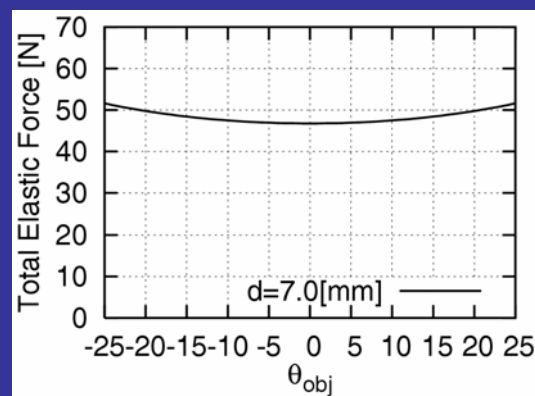
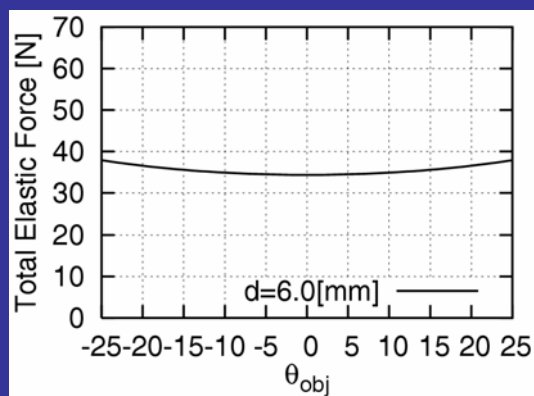
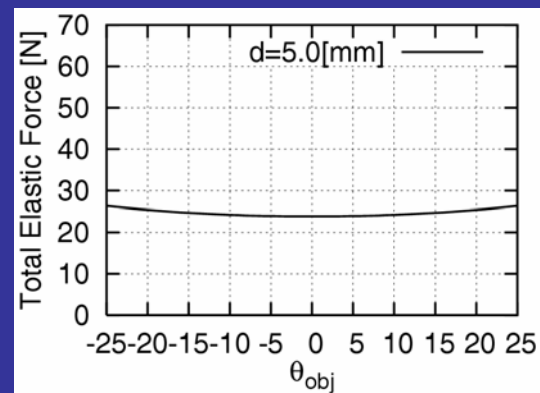
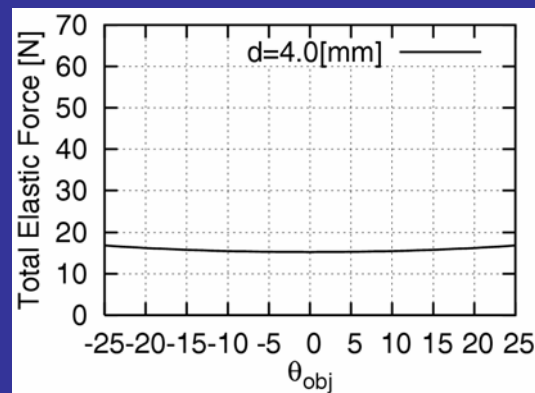
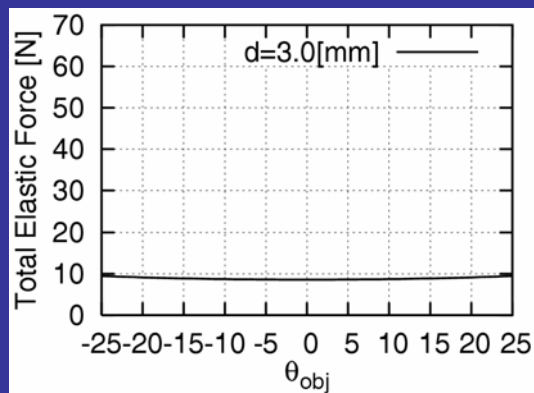
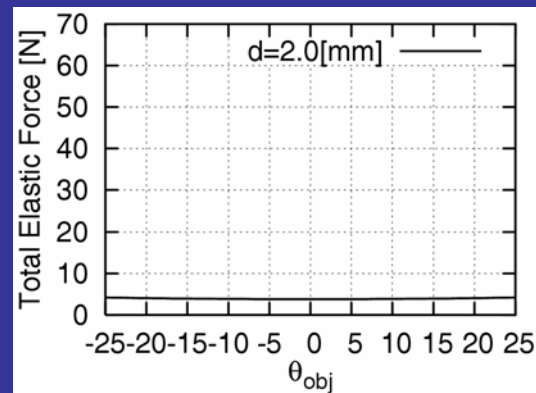
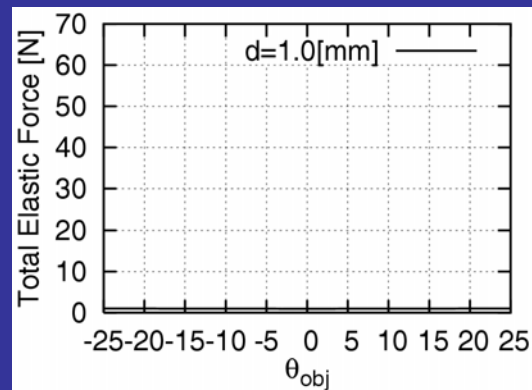
$$dP = E \left(1 - \frac{a-d - \sin \theta_{obj} \cdot x}{\cos \theta_{obj} \cdot \sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}} \right) \frac{a-d - \sin \theta_{obj} \cdot x}{\cos \theta_{obj} \cdot \sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}}$$

シミュレーション

対象物姿勢角 θ_{obj} による弾性力の変化



シミュレーション



実験装置 (並進接触用)

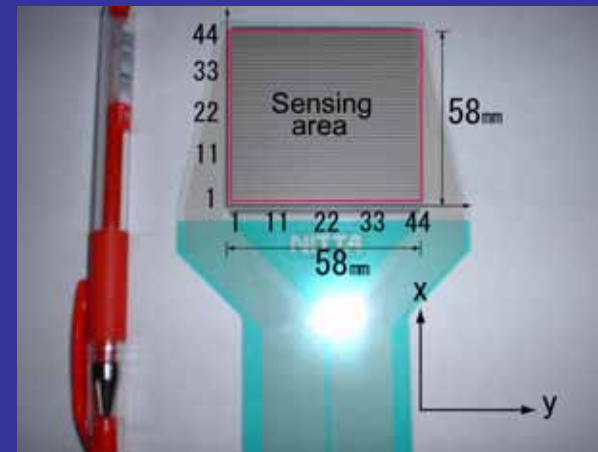
マイクロテスタ (INSTRON JAPAN社製)

→ 圧縮実験 ヤング率同定



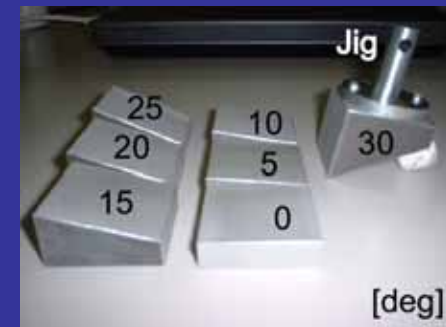
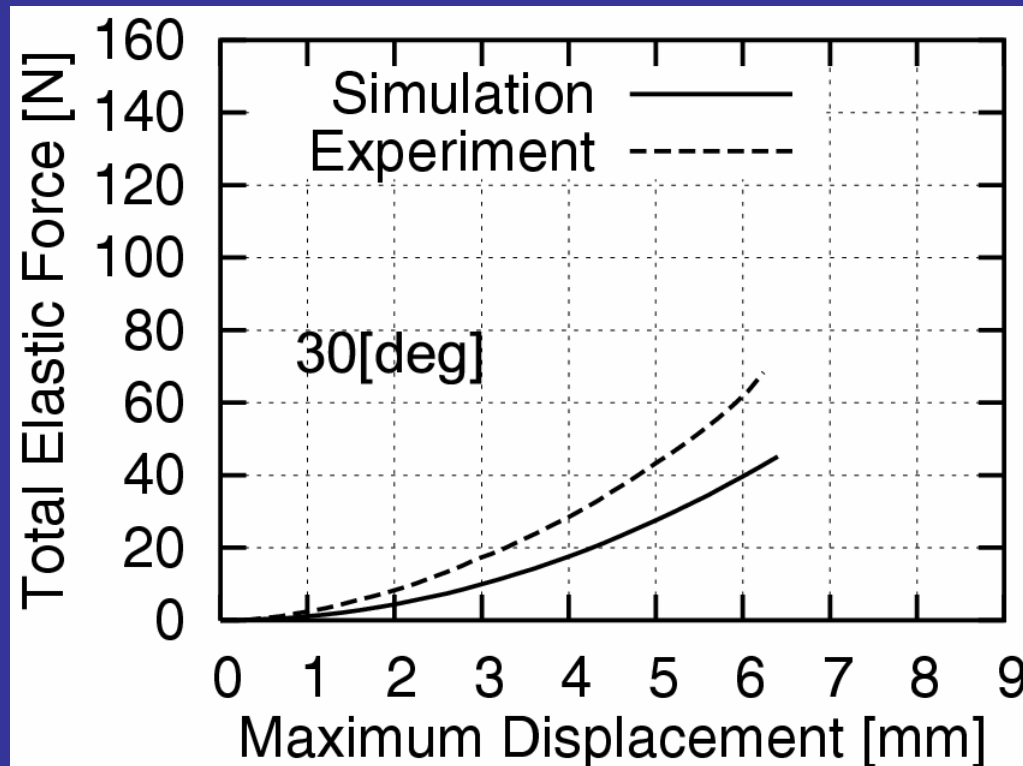
分布圧センサ (ニッタ社製)

→ 分布力の計測



実験結果 (指先弾性力)

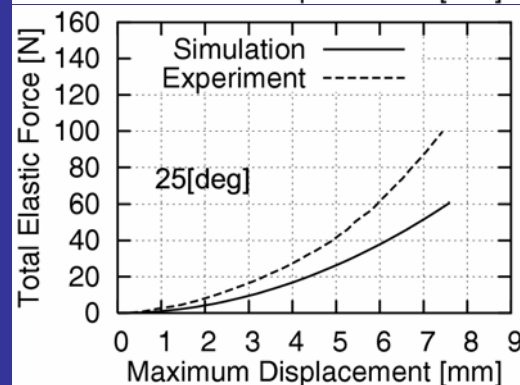
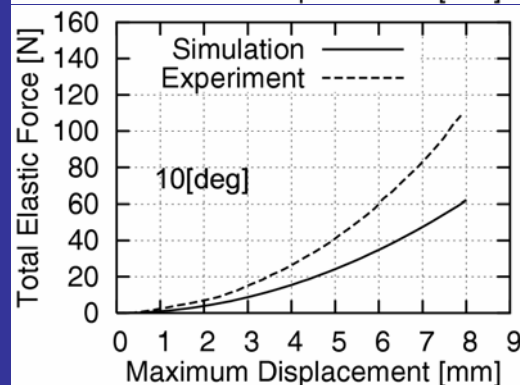
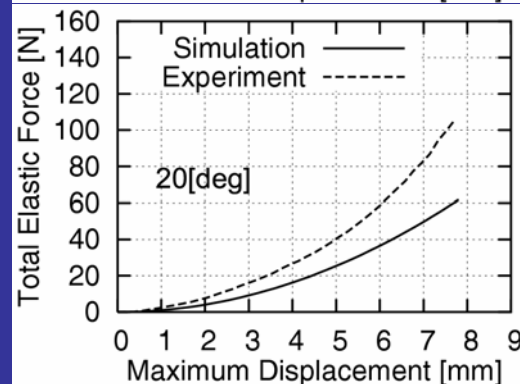
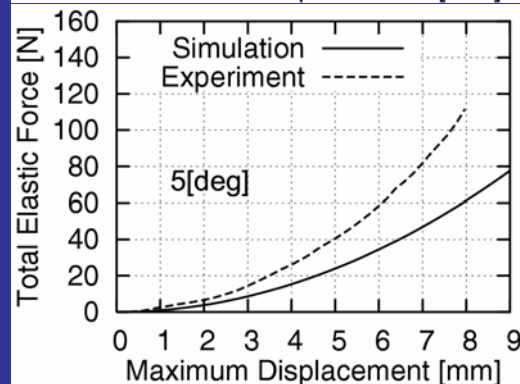
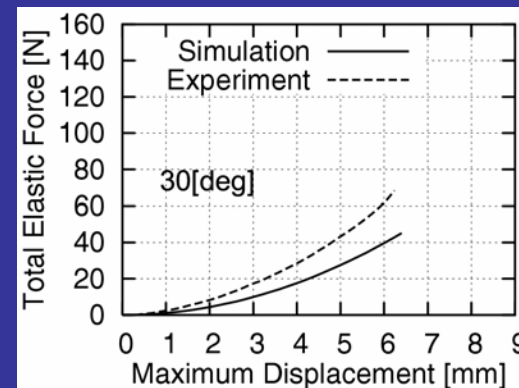
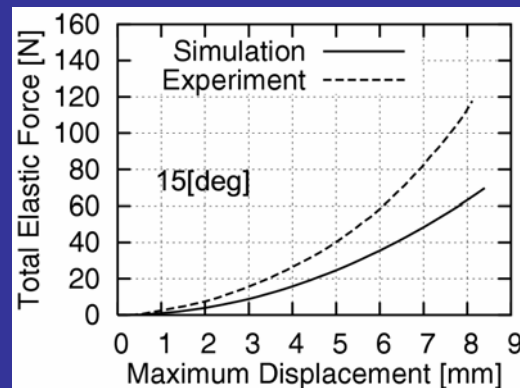
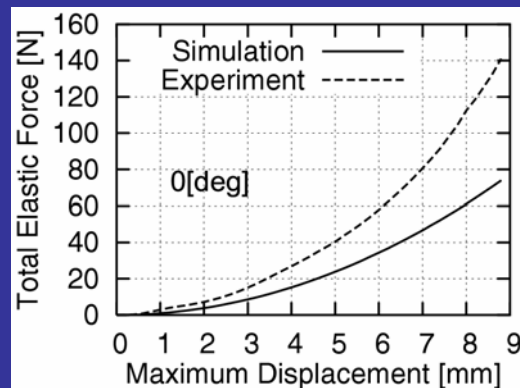
最大変位量dを変数にとった場合



角度が増加するにつれて、
弾性力の傾きが徐々に増加

$$dF(d, \theta_{obj}) = E \iint_S \left(1 - \frac{a - d - \sin \theta_{obj} \cdot x}{\cos \theta_{obj} \cdot \sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}} \right) dx dy$$

実験結果 (指先弾性力)



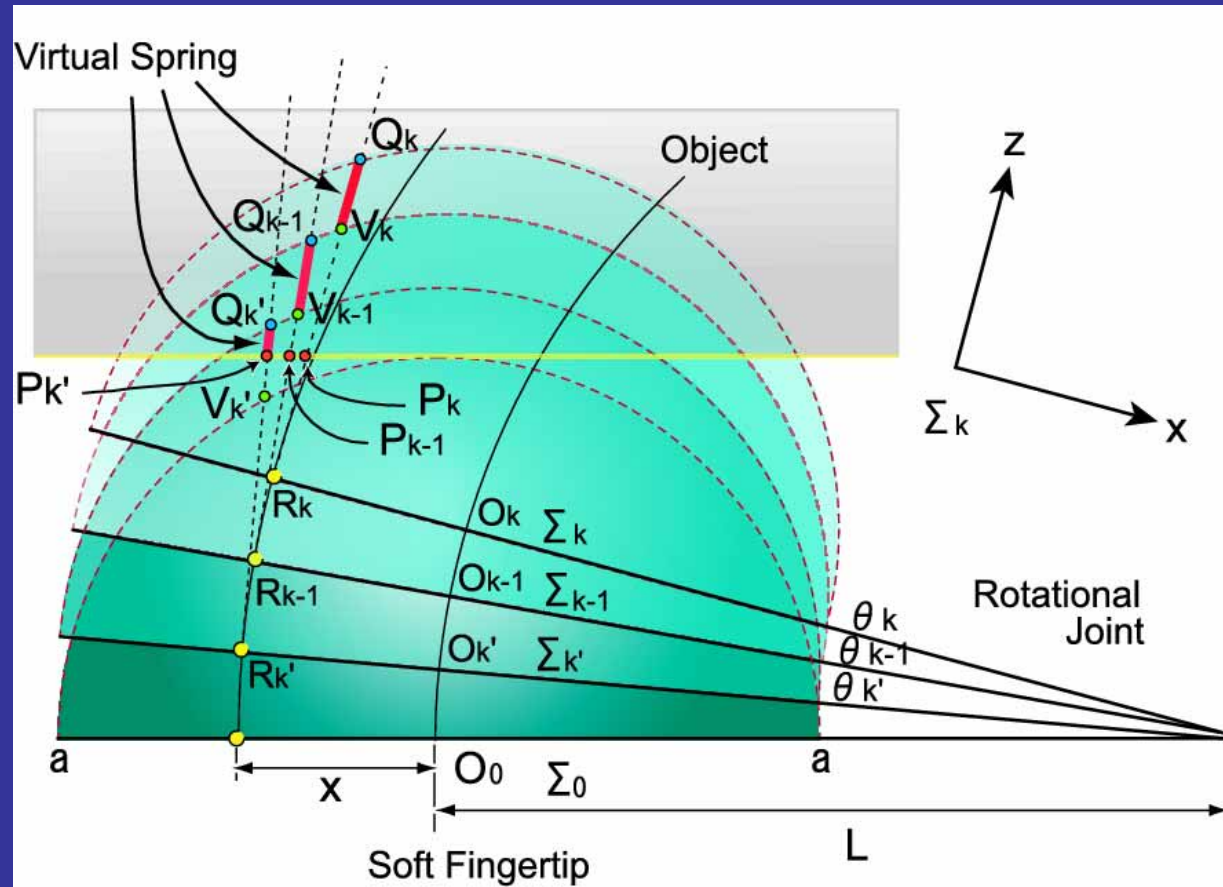
手指の押し実験結果
(韓, 川村 1999年ロボット学会誌)
と等しい傾向



理論的に初めて説明

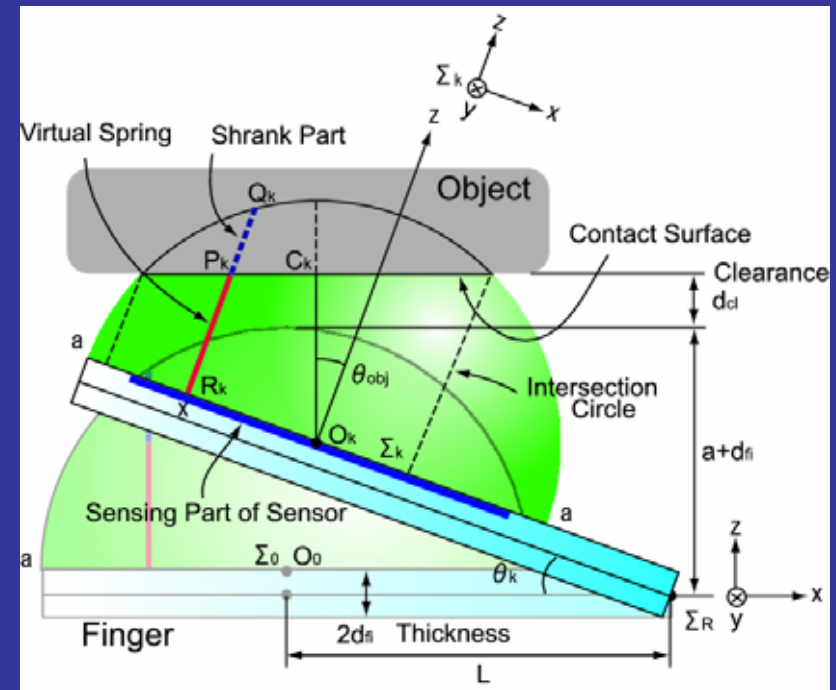
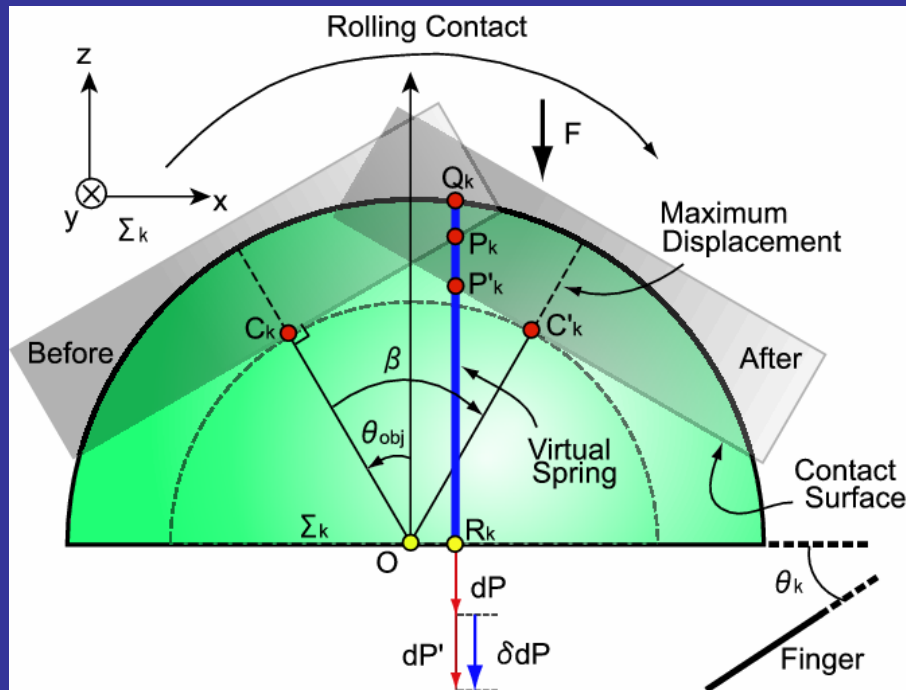
理論と実験の差は
ヤング率の計測誤差

回転接触モデル



$$dP = E \left[\sum_{k=k'+1}^n \left(1 - \frac{t(x, y, \delta\theta_k)}{\sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}} \right) \frac{t(x, y, \delta\theta_k)}{\sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}} + \{1 - g(x, y)\}g(x, y) \right]$$

弾性転がり接触モデル



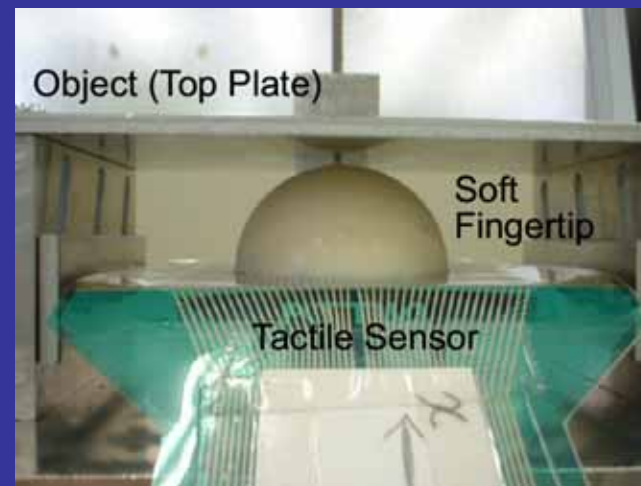
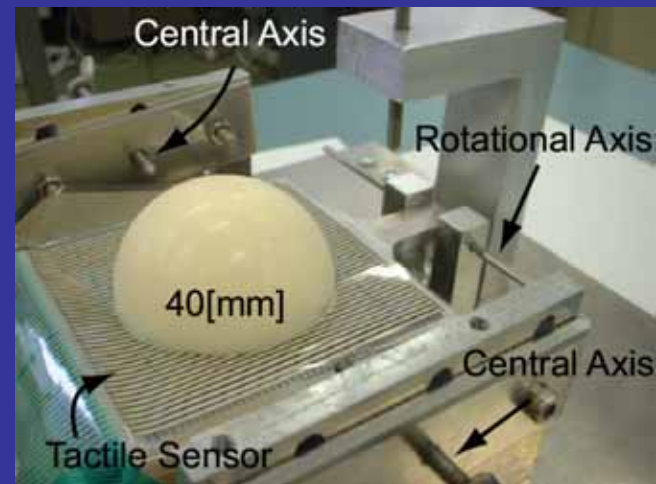
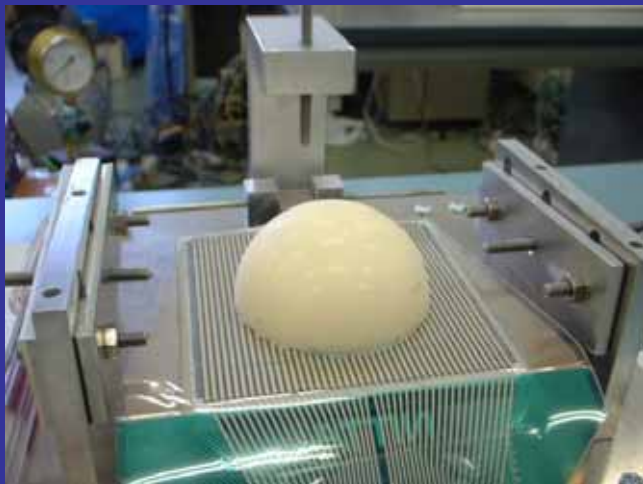
$$v(x, y) = \frac{a + d_{cl} + d_{fi}(1 - \cos \theta_k) - L \sin \theta_k - x \sin \theta_{obj}}{\cos \theta_{obj} \sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}}$$

$$w(x, y) = \frac{a + d_{cl} + d_{fi}(1 - \cos \theta_k) - L \sin \theta_k - x \sin(\theta_{obj} + \beta)}{\cos(\theta_{obj} + \beta) \sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}}$$

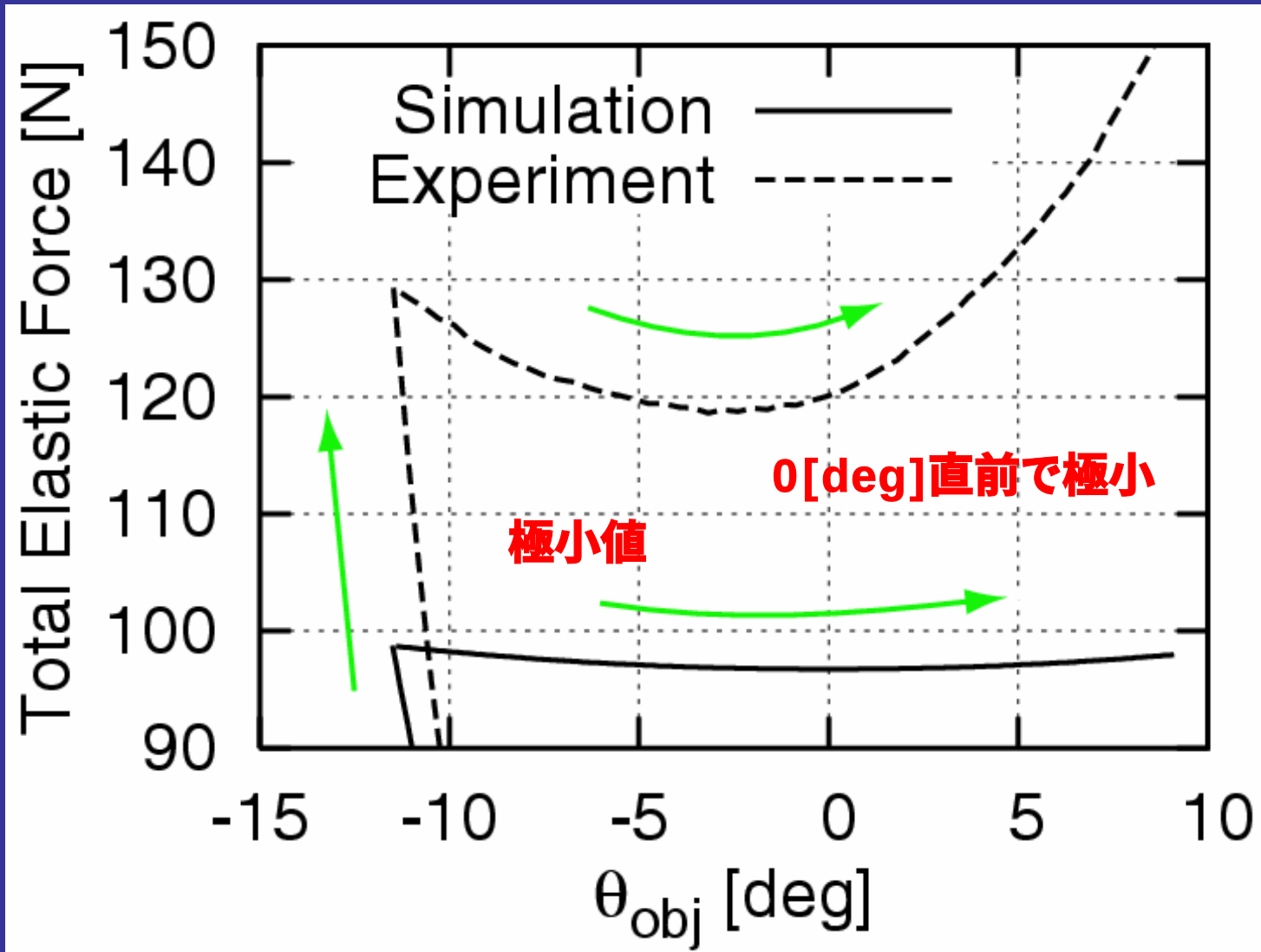
$$\delta dP = E[\{1 - w(x, y)\}w(x, y) - \{1 - v(x, y)\}v(x, y)]$$

$$dP_{new} = dP + \delta dP$$

実験装置 (回転・転がり接触用)



実験結果 (指先弾性力)



サンプリング時間と遅延

CCDカメラ (サンプリング時間 33msec)
画像処理 (遅延 33msec)

柔軟指



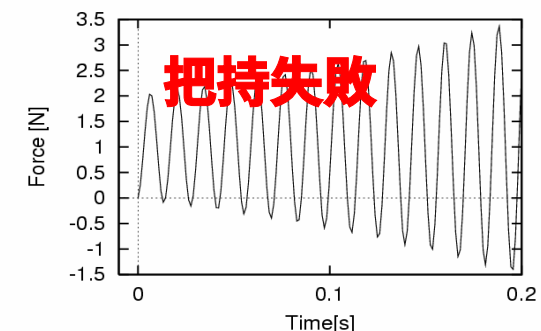
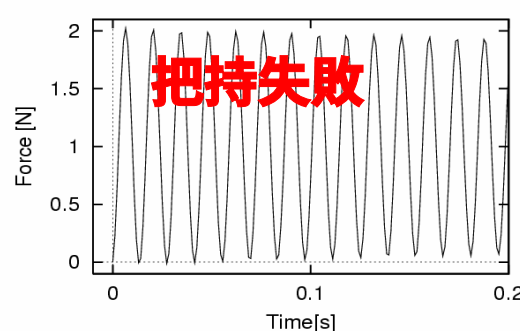
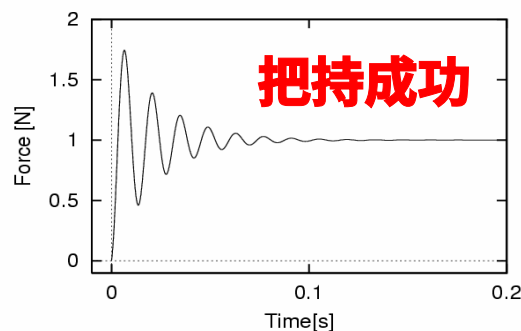
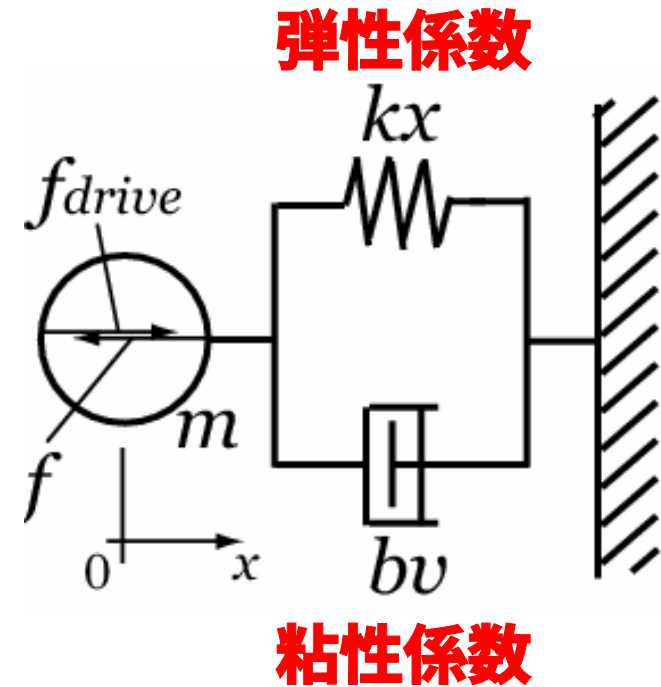
分布圧センサ
(サンプリング時間 2msec~)

離散／連続ダイナミックモデル

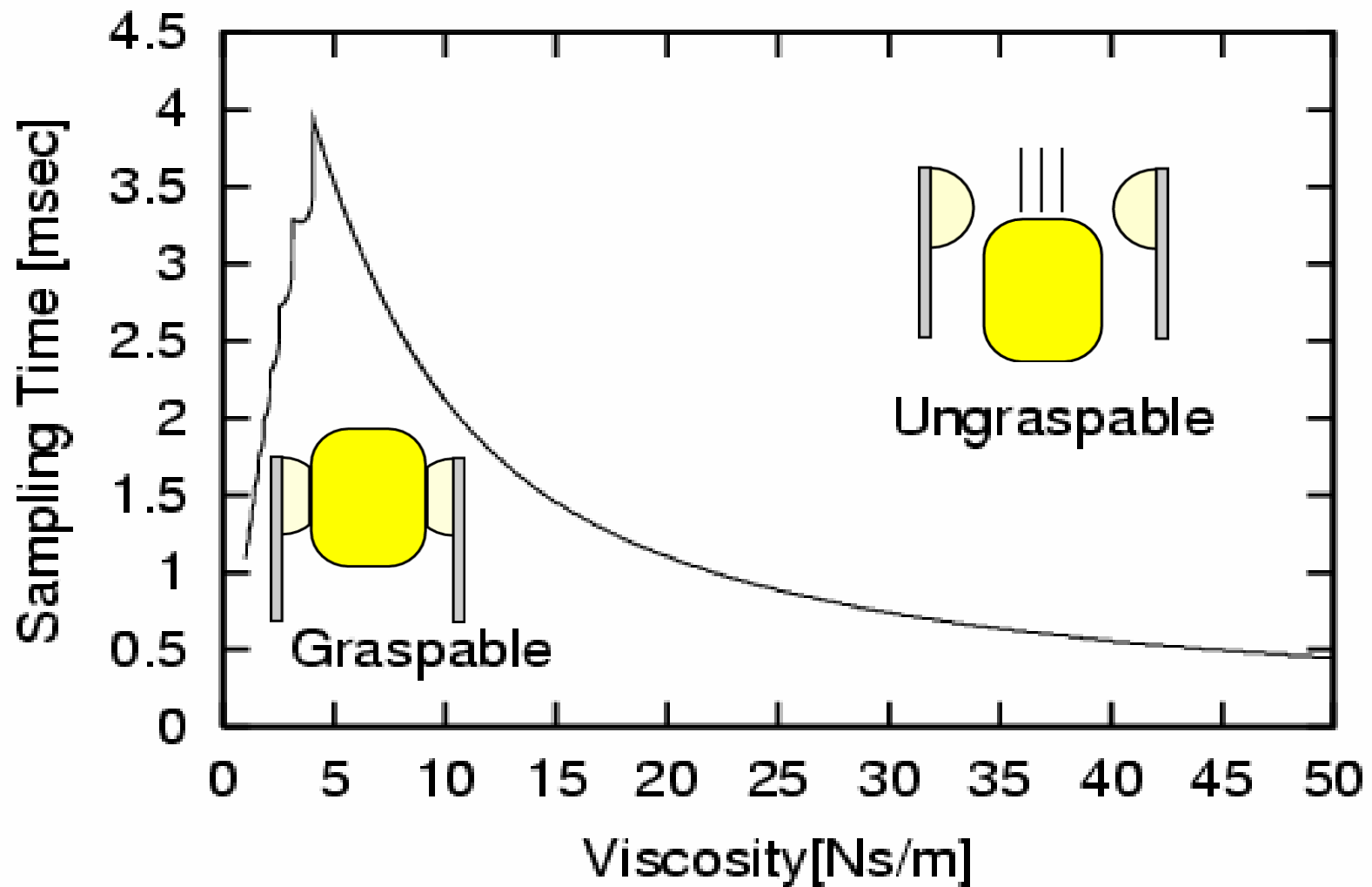
$$\begin{cases} m\ddot{x}(t) = K_f(f_d - f(t)) \\ \quad -kx(\left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor T) - b\dot{x}(\left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor T) \\ f(t) = kx(\left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor T) + b\dot{x}(\left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor T). \end{cases}$$

T:サンプリング時間

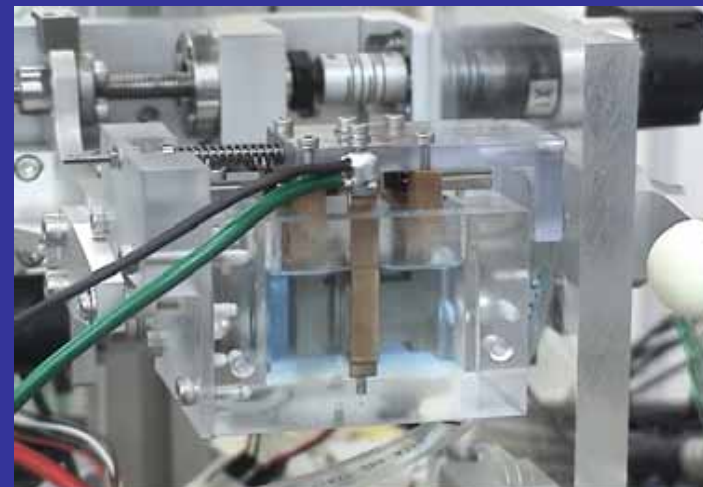
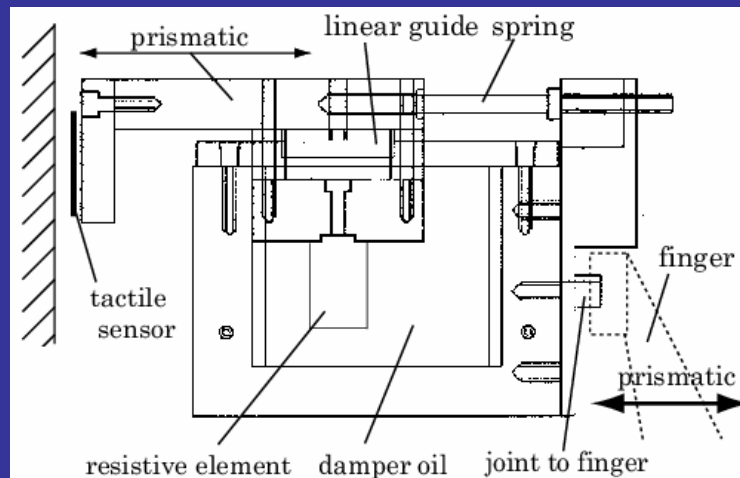
制御則 $f_{drive} = K_f(f_d - f(t))$



把持可能性

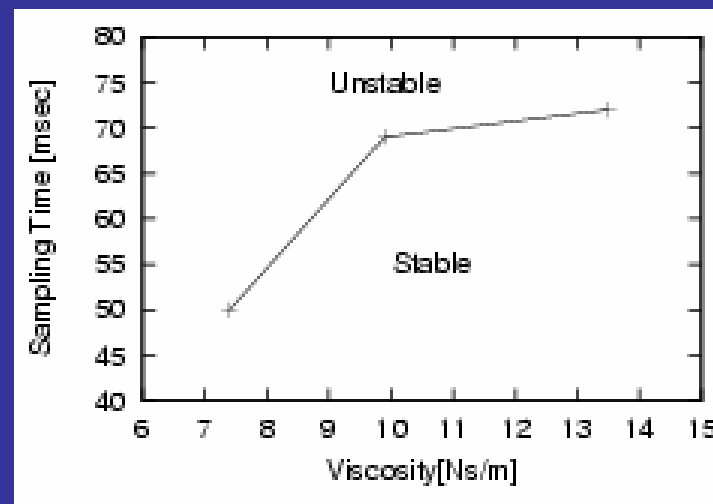


検証実験

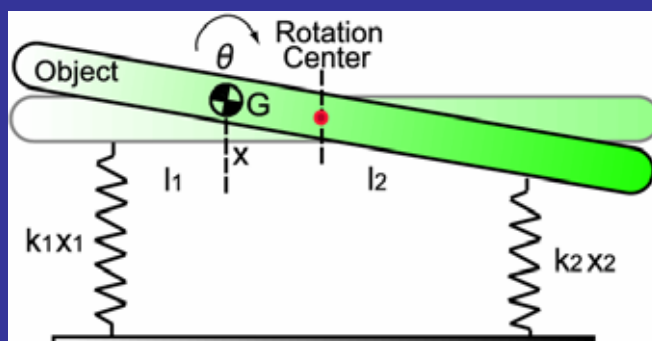
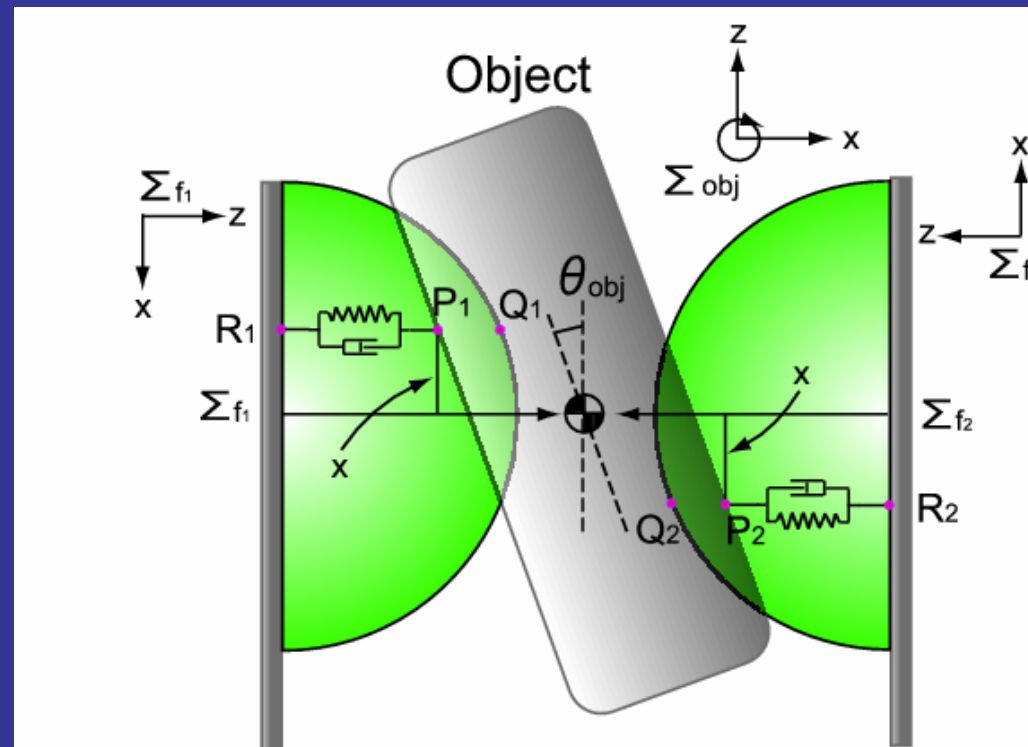


可変動特性指先 (Variable Dynamics Fingertip)

可動部質量[g]	45.2
全体質量[g]	174.0
可動範囲[mm]	0~5
バネ係数[N/m]	2000
粘性係数[Ns/m]	
水槽部空	7.4
オイル#500	9.9
オイル#1000	13.5

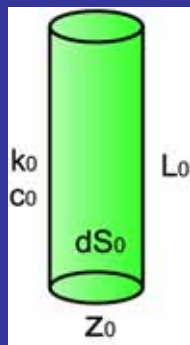


粘弾性モデル



対象物の回転の運動方程式

微小粘弾性力



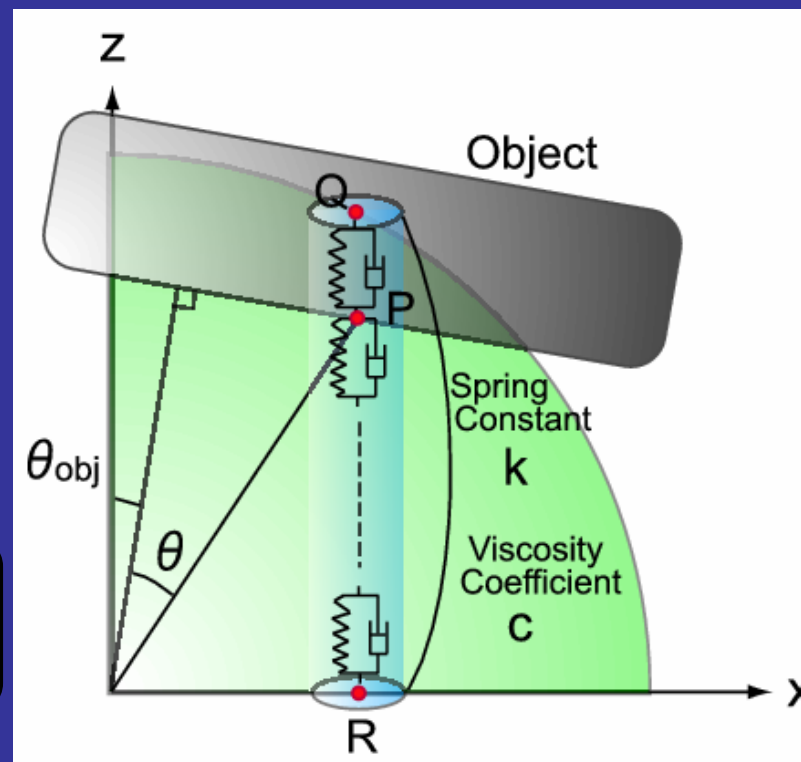
基準粘弾性係数

$$z_0 = k_0 + j\omega c_0$$

単一反想ばねの粘弾性係数

$$z = z_0 \cdot \frac{dS}{dS_0} \cdot \frac{L_0}{L} = (E + j\omega D) \frac{dS}{L}$$

E:ヤング率 D:粘性率



微小粘弾性力

$$dF = z \cdot PQ = \left(E \cdot PQ + D \cdot \frac{dPQ}{dt} \right) \frac{dS}{QR}$$

オイラーの運動方程式

$$I\ddot{\theta}_{obj} = \sum_{i=1}^2 M_{fi}$$

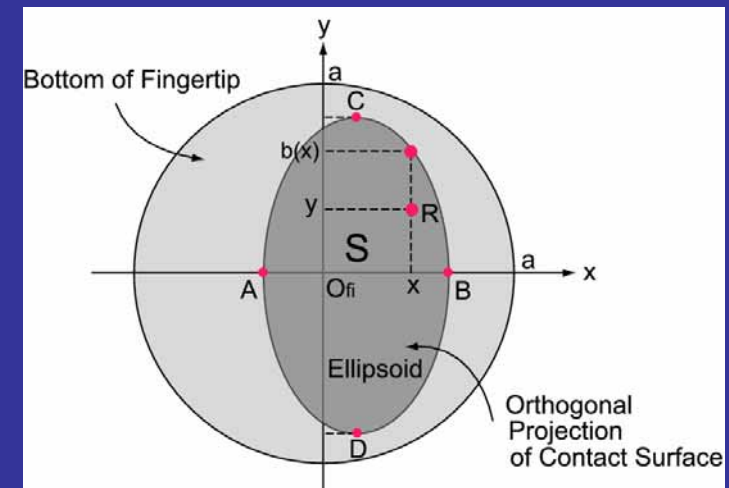
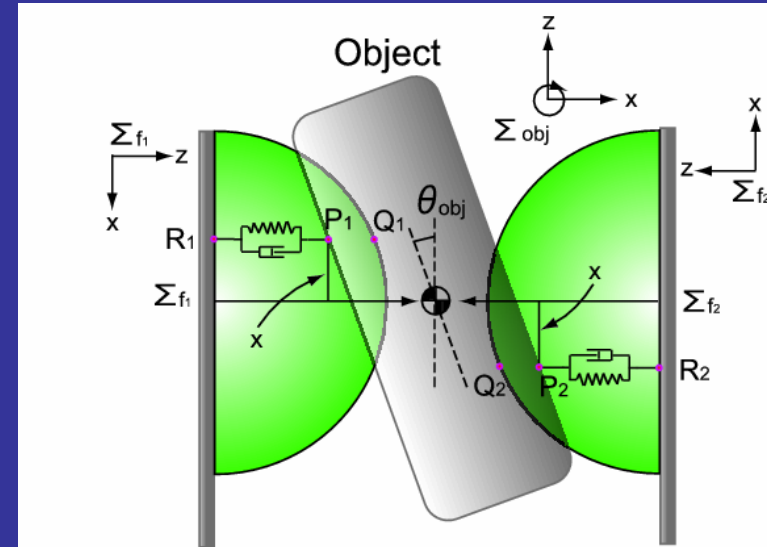


$$I\ddot{\theta}_{obj} = 2 \int_A^B \int_{-b(x)}^{b(x)} x dF(d, \theta_{obj})$$

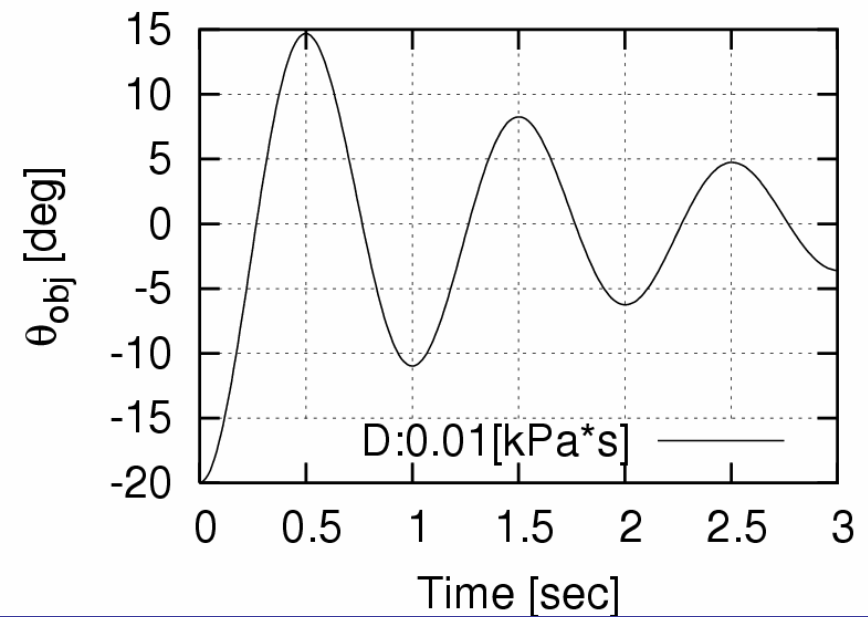
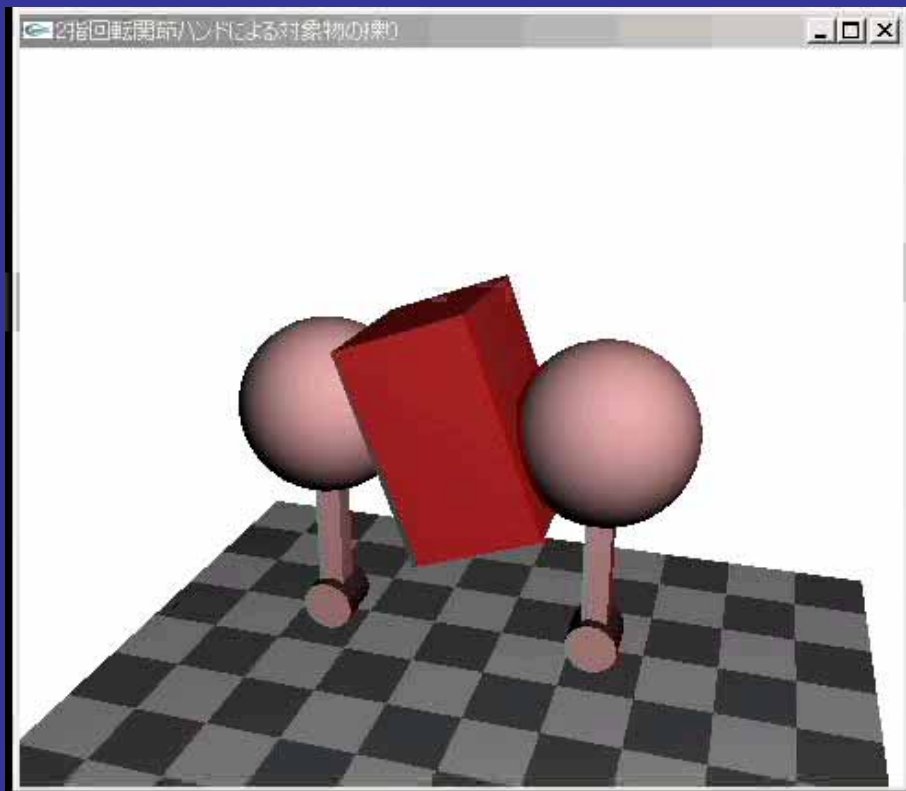
$$A = (a - d) \sin \theta_{obj} - \sqrt{a^2 - (a - d)^2} \cos \theta_{obj}$$

$$B = (a - d) \sin \theta_{obj} + \sqrt{a^2 - (a - d)^2} \cos \theta_{obj}$$

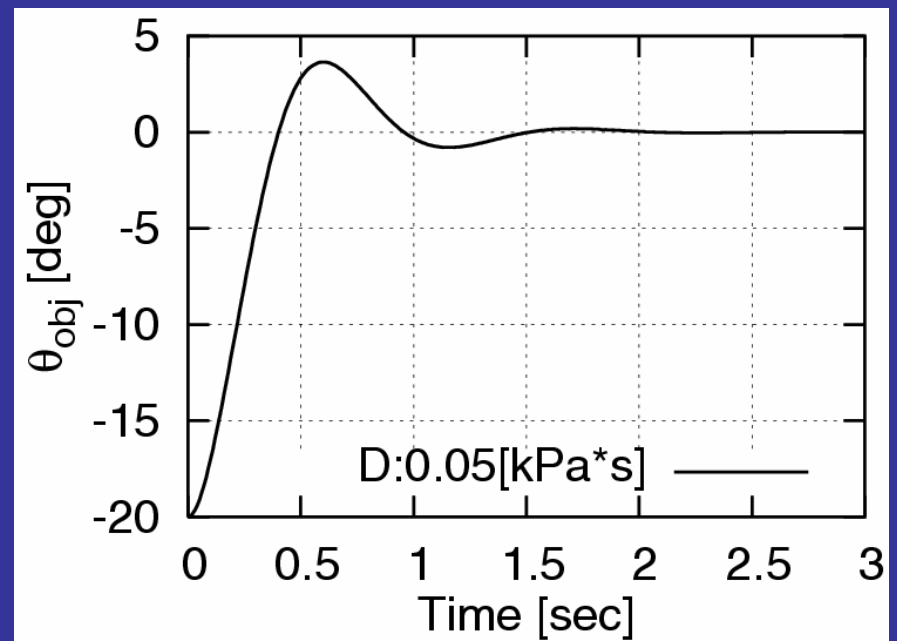
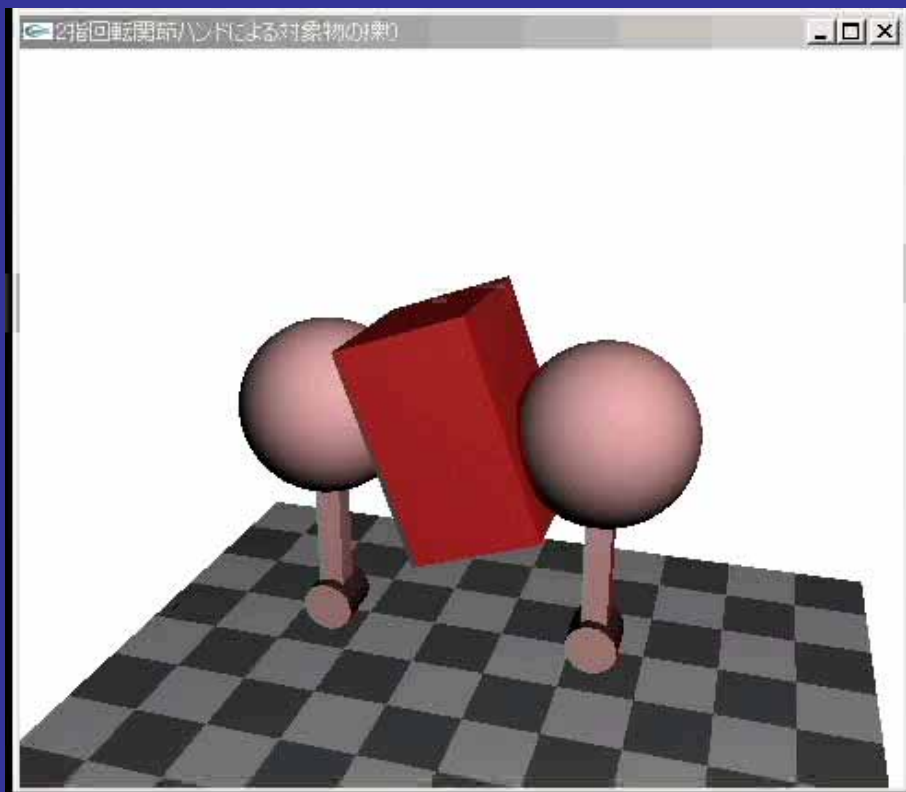
$$b(x) = \sqrt{a^2 - (a - d)^2 - \frac{\{x - (a - d) \sin \theta_{obj}\}^2}{\cos^2 \theta_{obj}}}$$



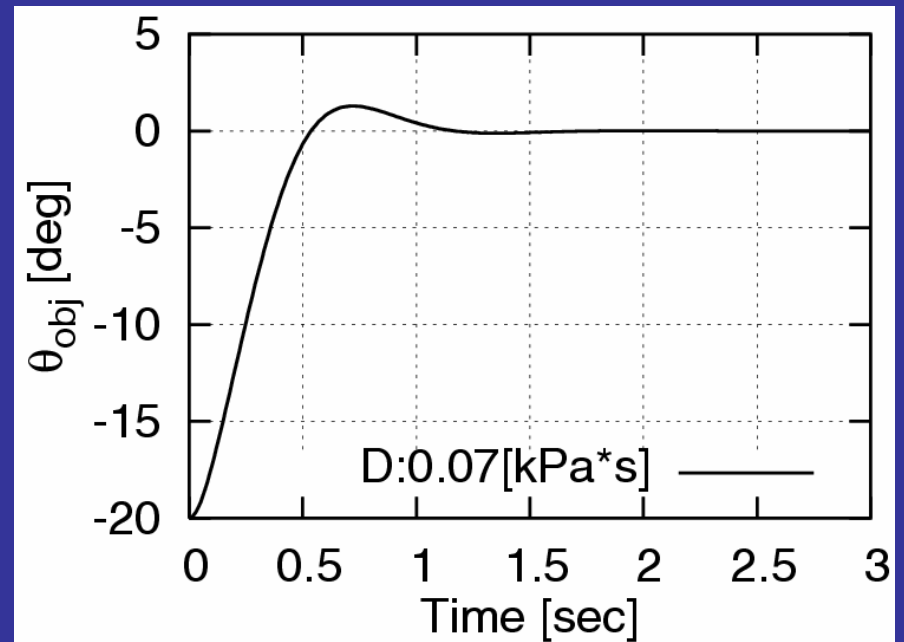
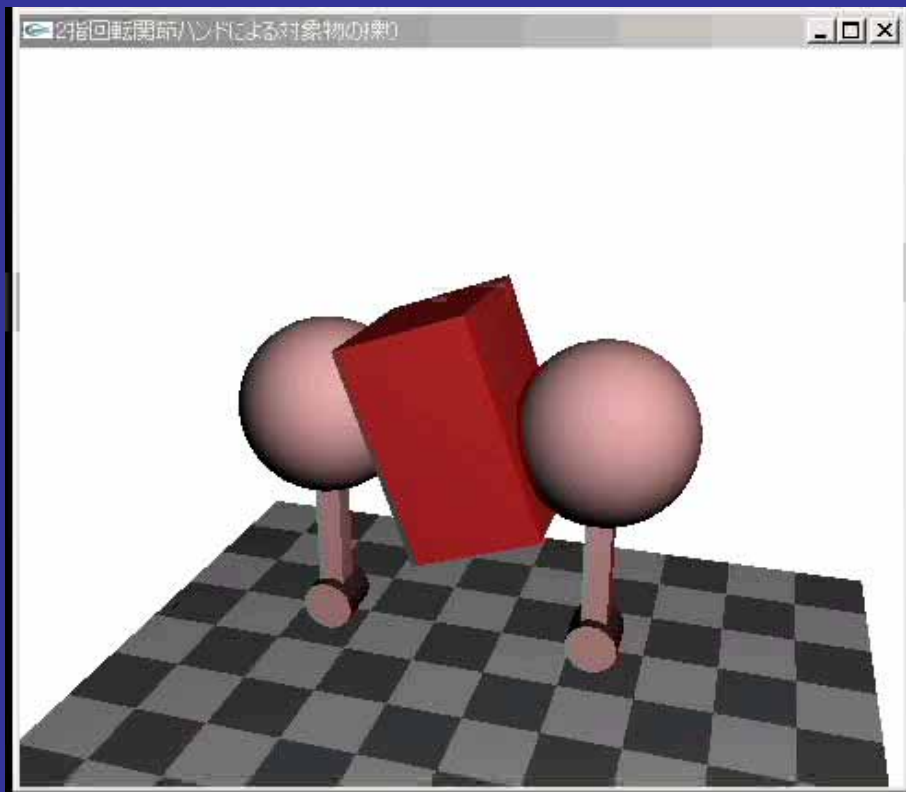
シミュレーション



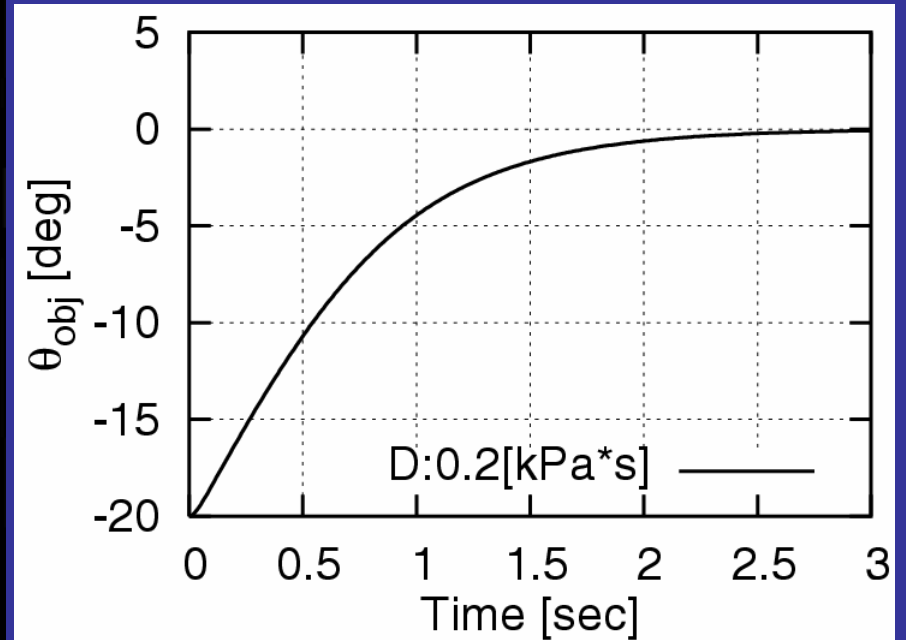
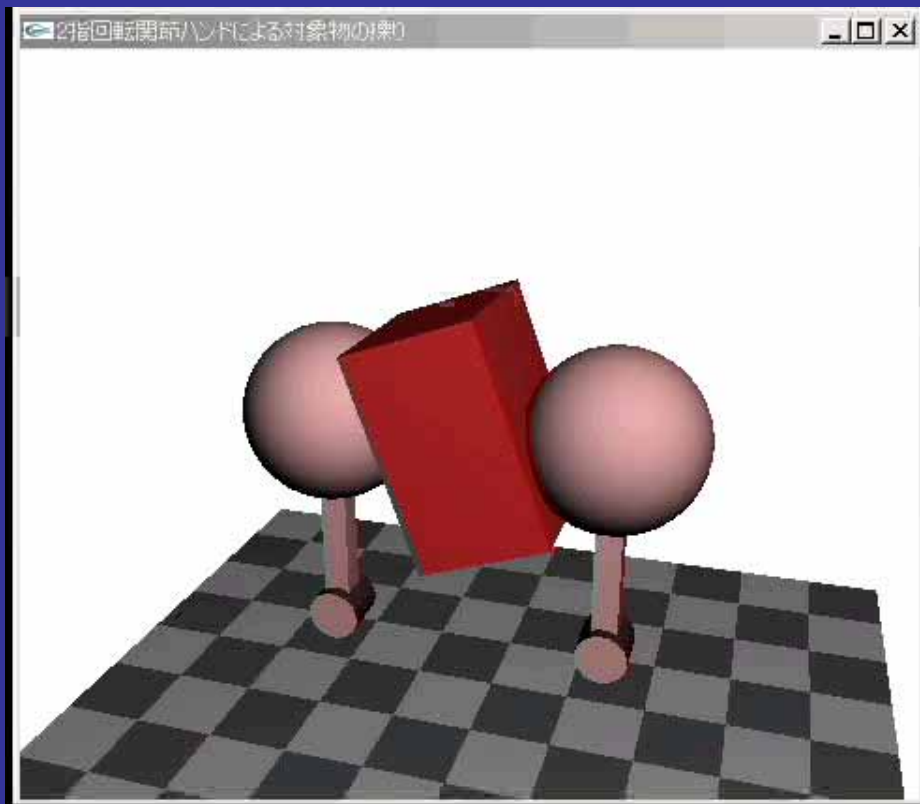
シミュレーション



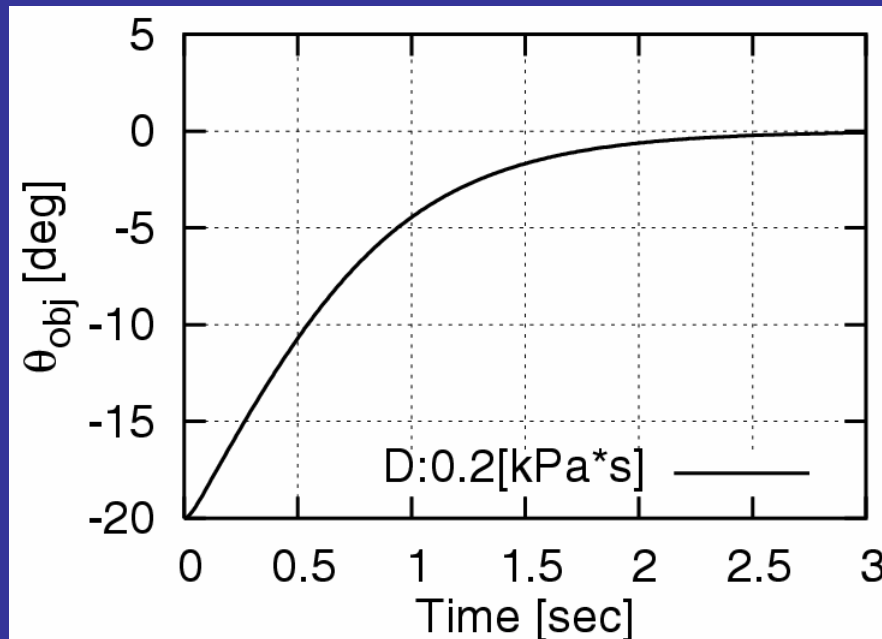
シミュレーション



シミュレーション



シミュレーション



柔軟指による把持



制御入力がない場合



安定

ヤング率: 約0.36[MPa]

対象物: 10[g], 85[mm] × Φ 10[mm]

初期角度: -20[deg]

指径: Φ 26[mm]

最大変位量 d : 3.0[mm]

実際の把持



0 msec



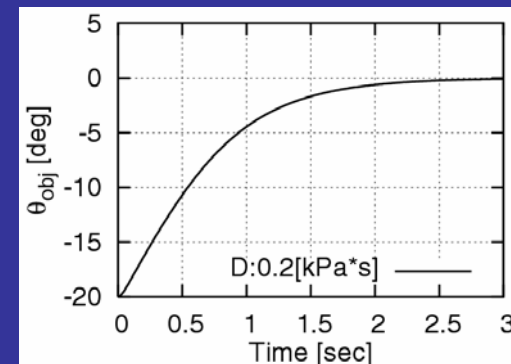
33 msec



66 msec



198 msec



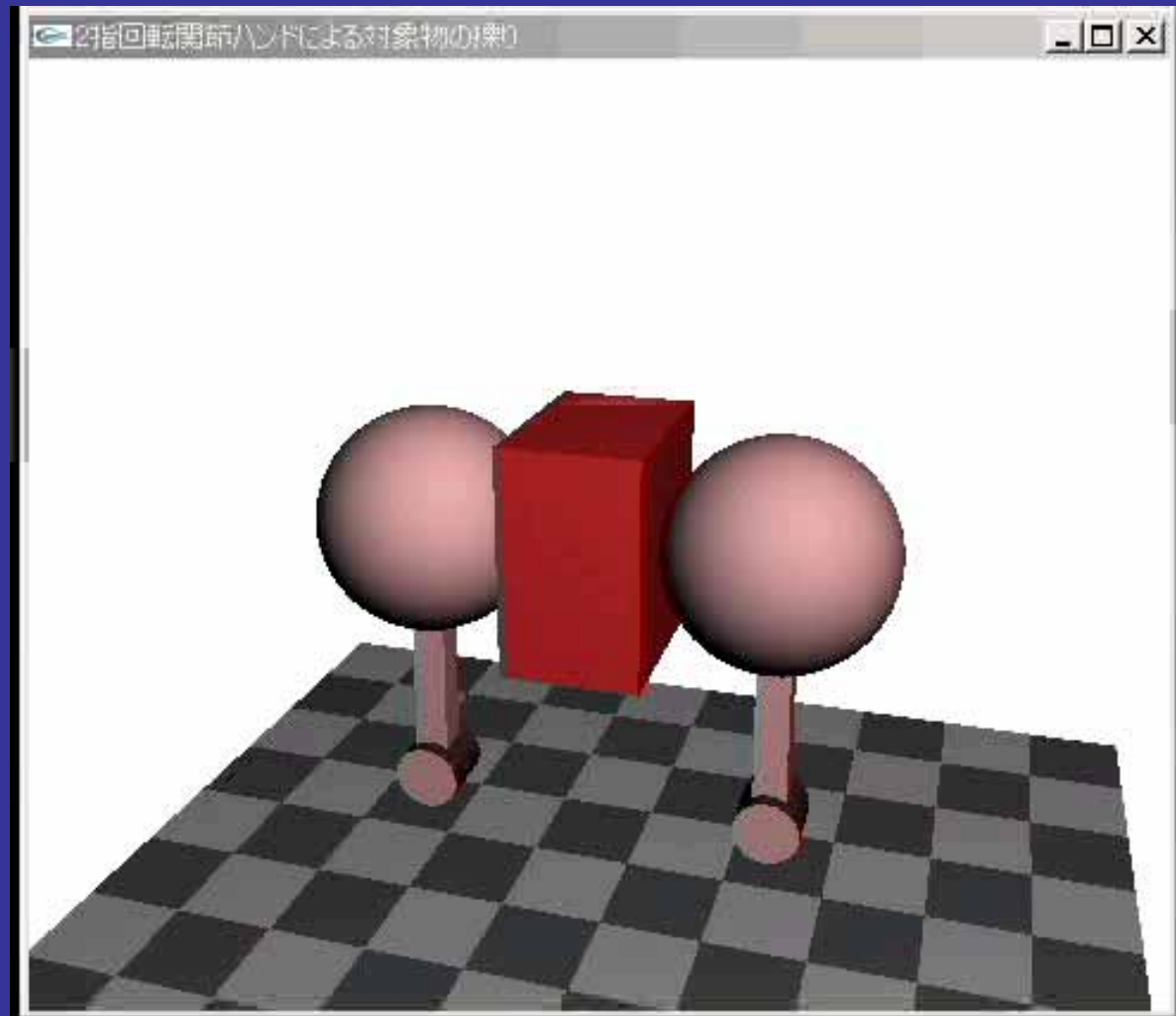
シミュレーションより
10倍以上速く収束
(目測)

過減衰



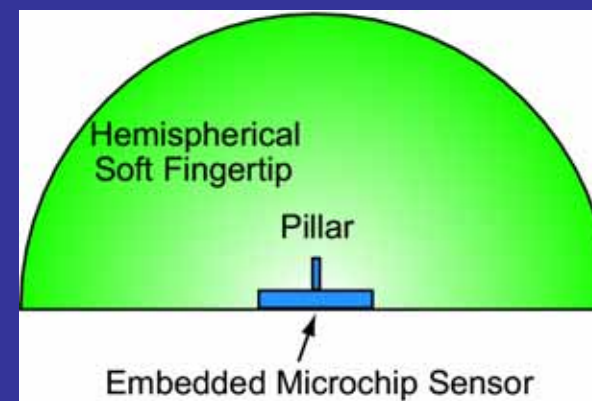
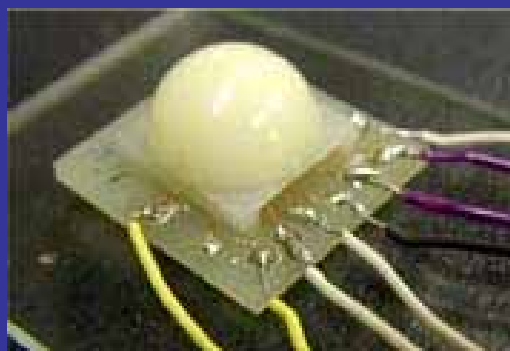
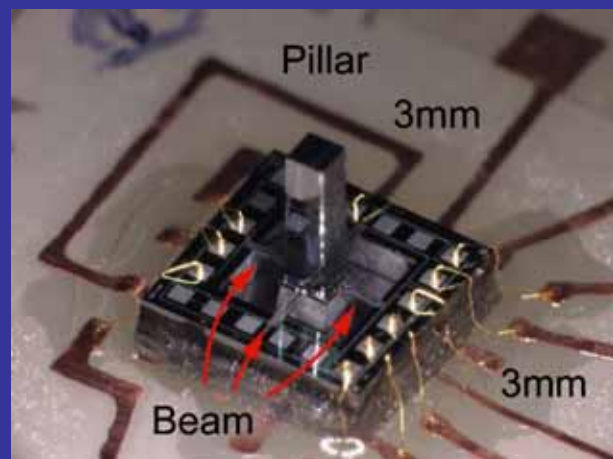
弾性力が弱い?

シミュレーション (1自由度2指)

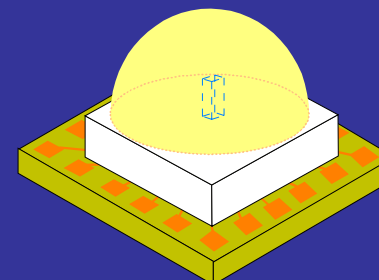
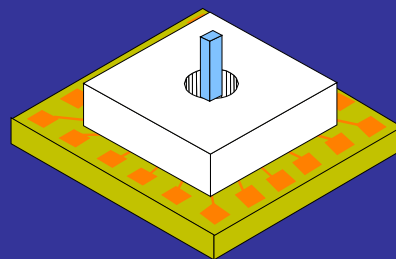
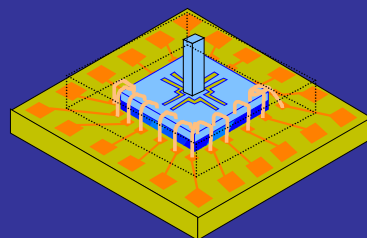


柔軟指操作のための埋め込み型 マイクロフォースセンサ

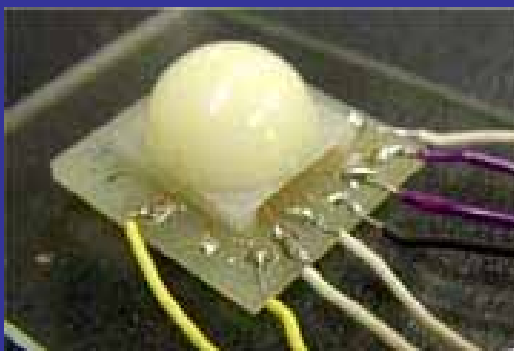
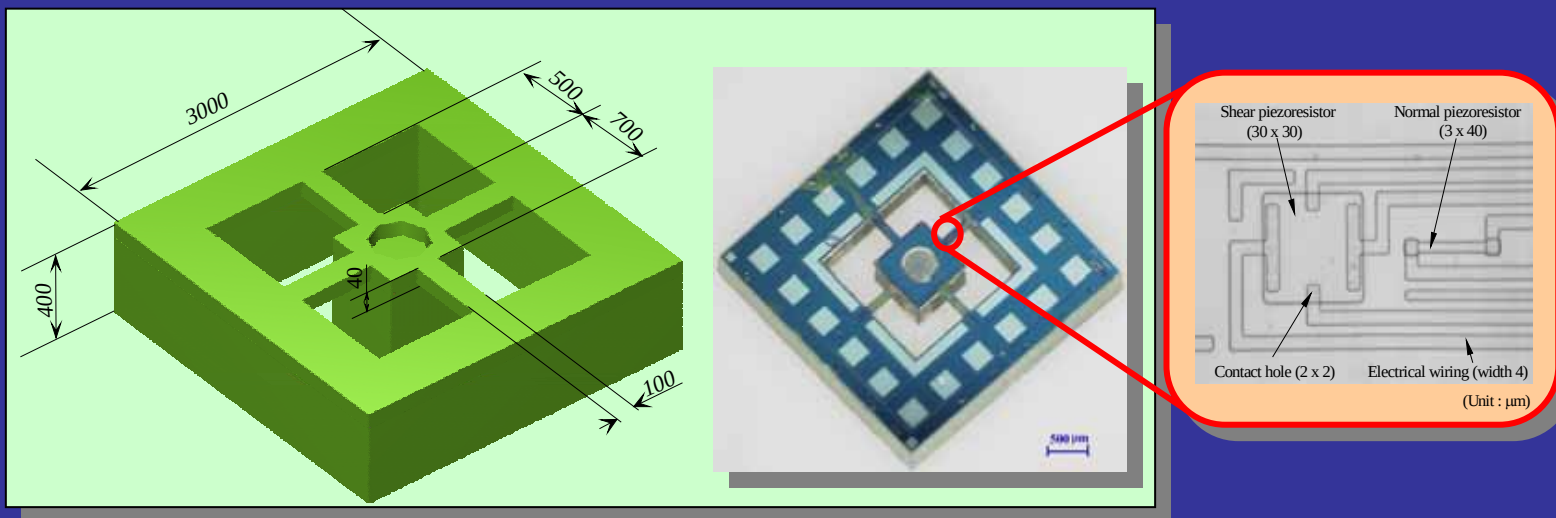
2003-



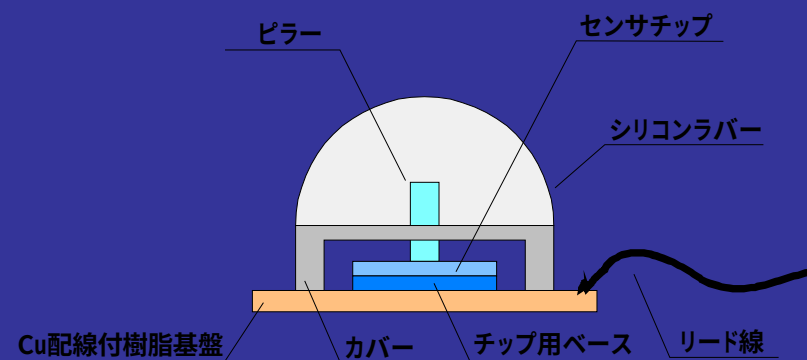
6軸フォースセンサ



ピエゾ抵抗素子

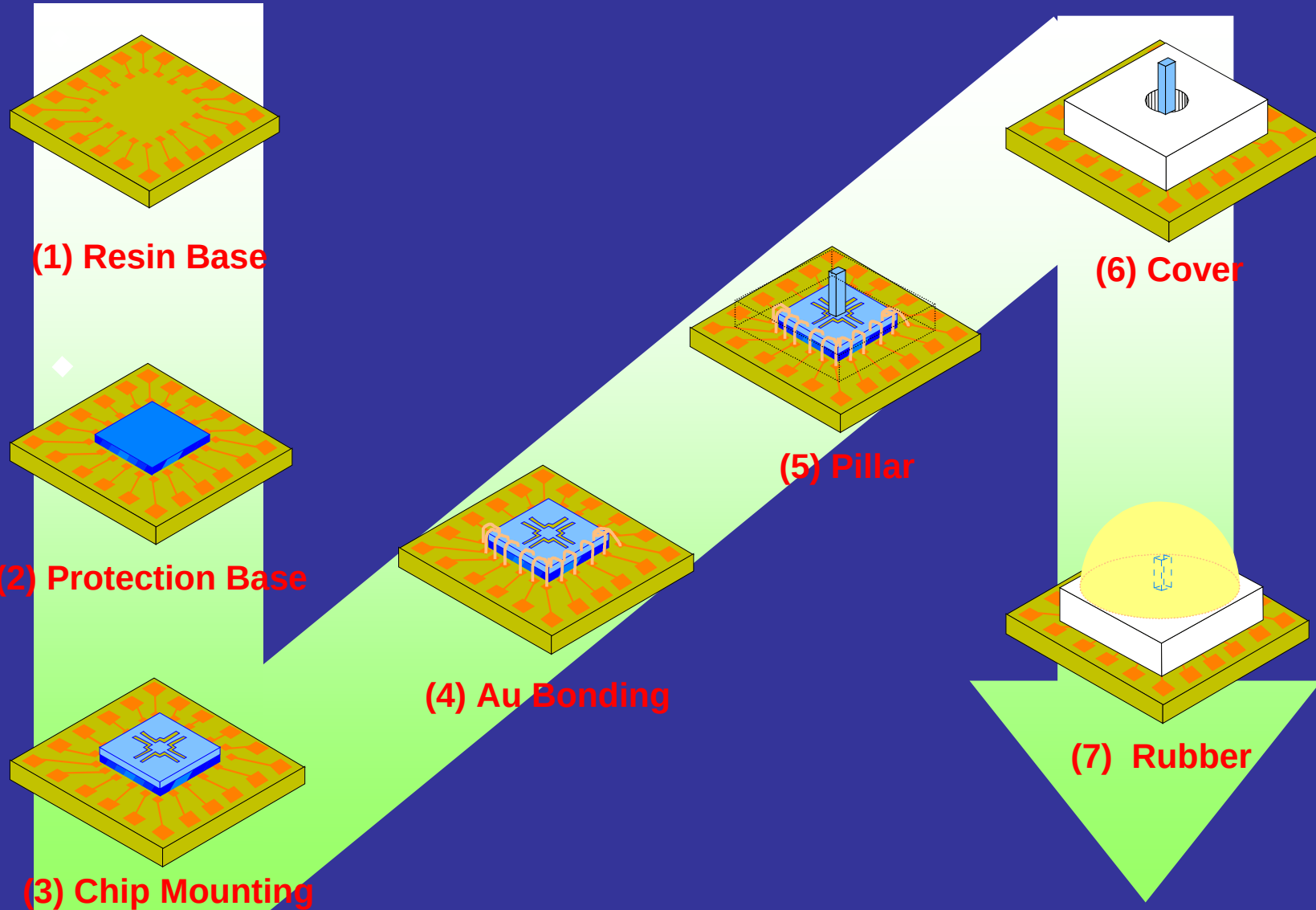


直径 : 8.2[mm]

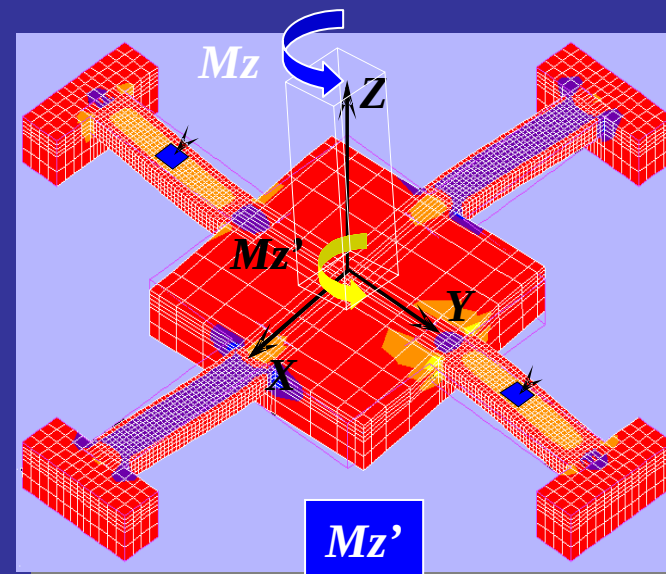
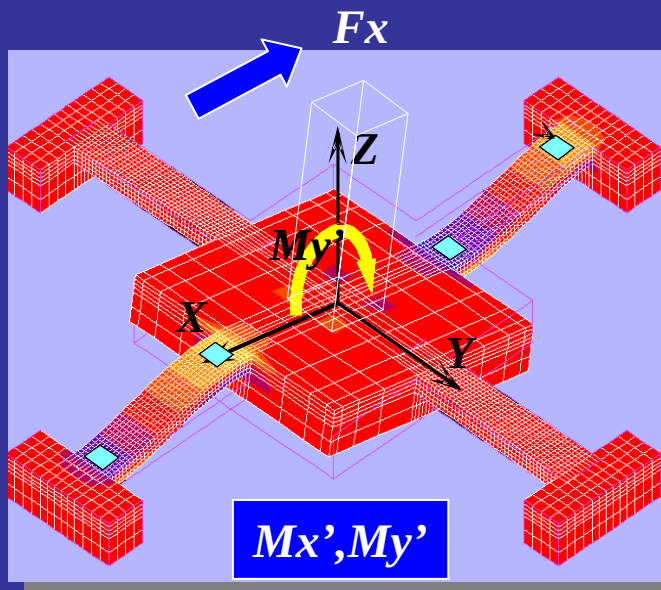
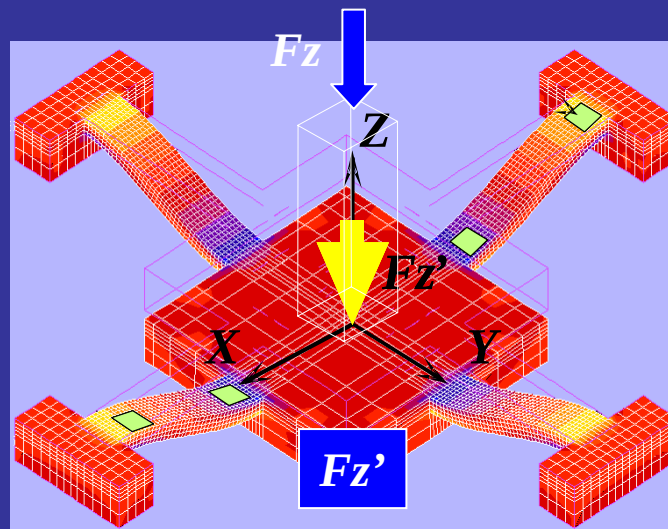


杉山研究室 Dr. Dzung

製作工程



検出原理



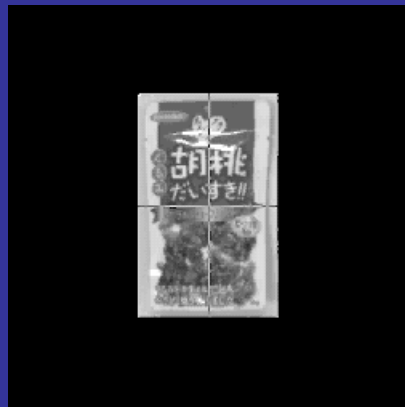
FPGAビジョン

2001-

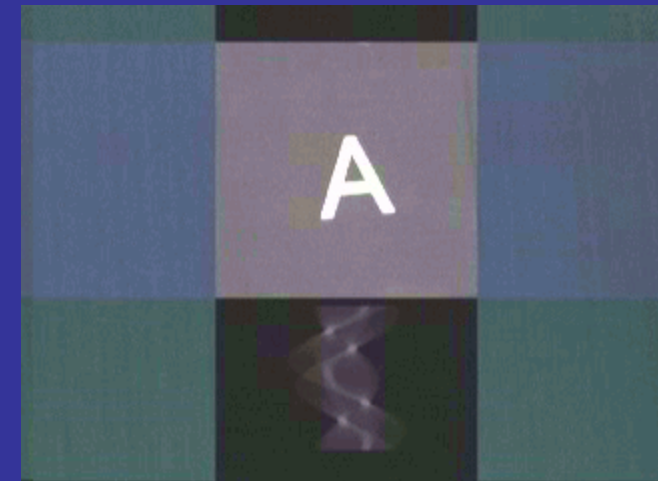
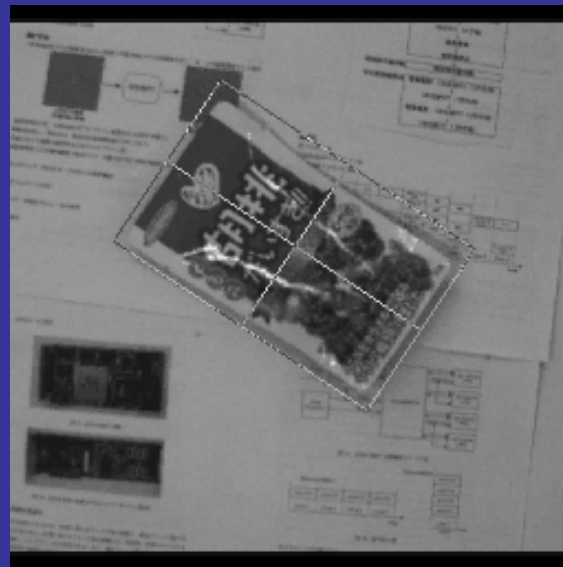
時間を要するビジョンアルゴリズム

- マッチトフィルタ
- 位相限定相関法
- ハフ・フーリエ変換法
- 一般化ハフ変換法

FPGA上にアルゴリズムを回路として実装
計算時間の短縮とコストパフォーマンスの両立



マッチトフィルタ

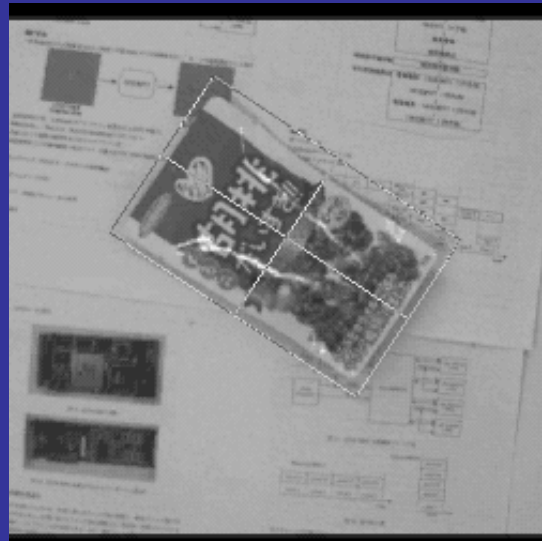


ラドン変換

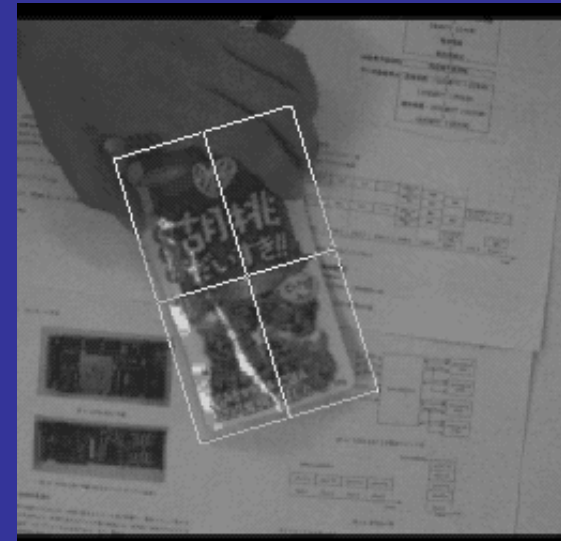
Robust Image Registration



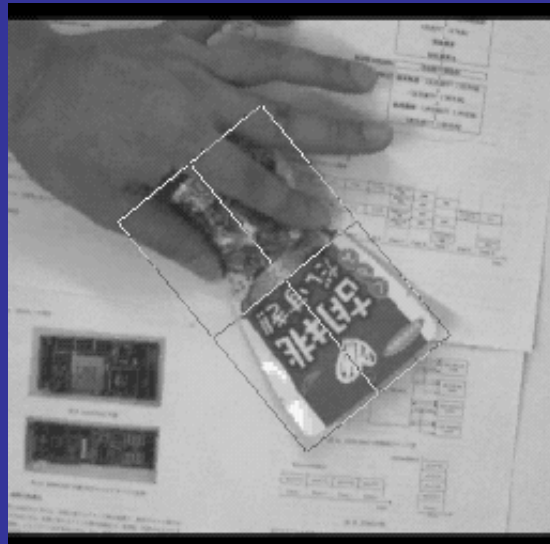
template image



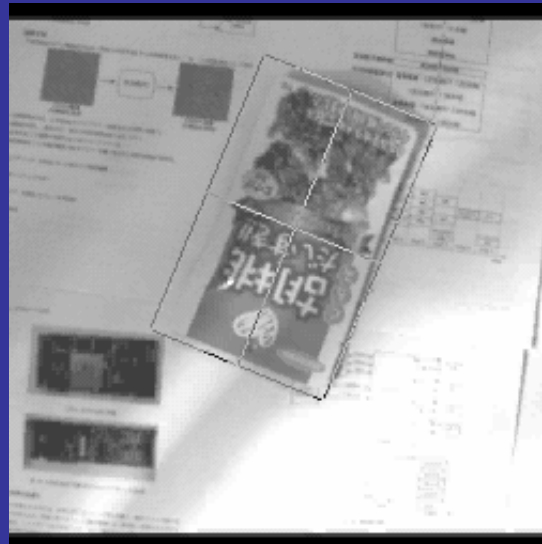
input image



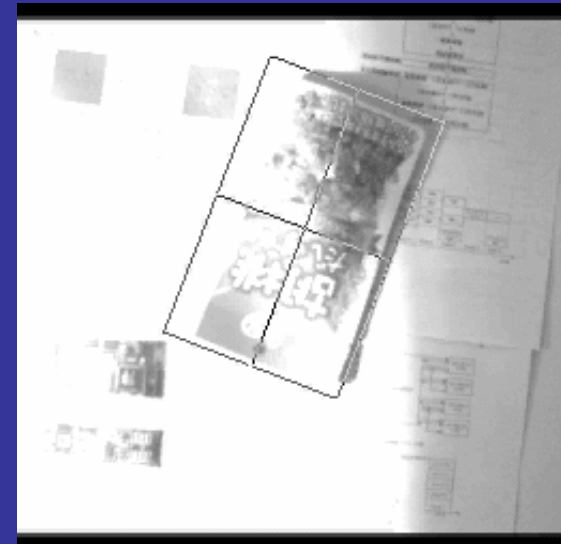
occlusion



deformation



illumination change



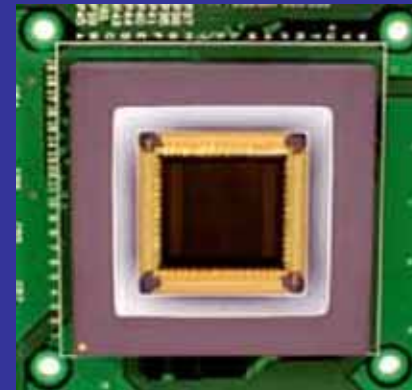
halation

CMOS+FPGAビジョン

2004-



1000fps

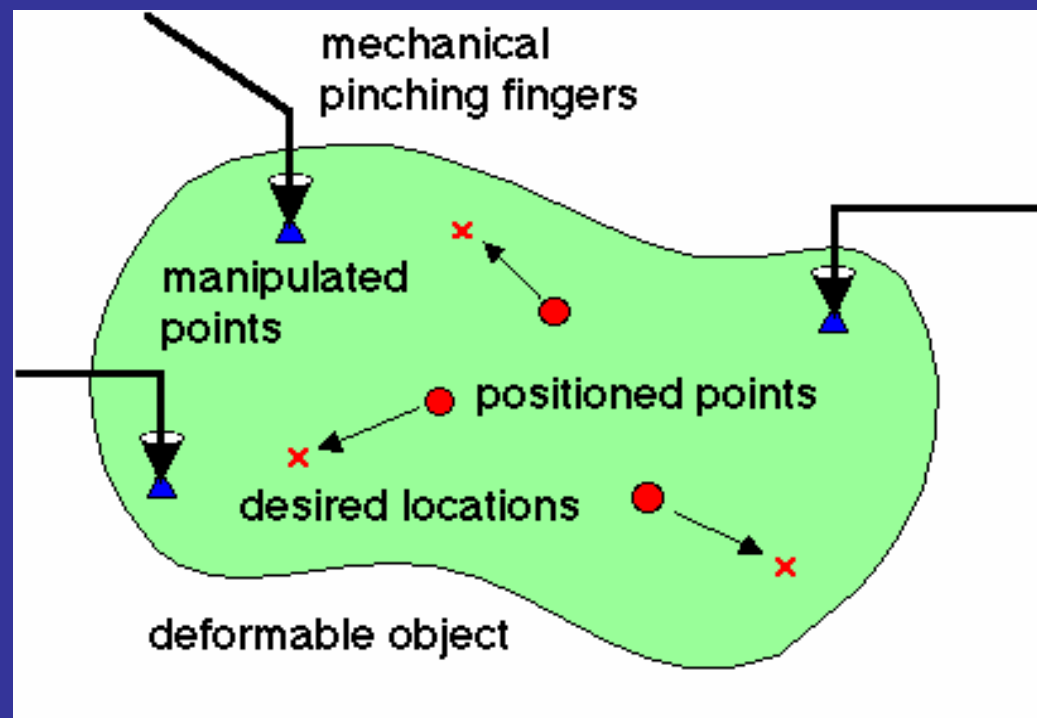


+



制御系の中にビジョンを導入

布地の間接同時位置決め



制御則

積分項のみ

最も近いという関係のみ

幾何学量なし

力学量なし

$$r_j = K_I \int_0^t (r_i^* - r_i) dt$$

▲ × ●

$$r_j^{k+1} = r_j^k + K_I (r_i^* - r_i^k)$$

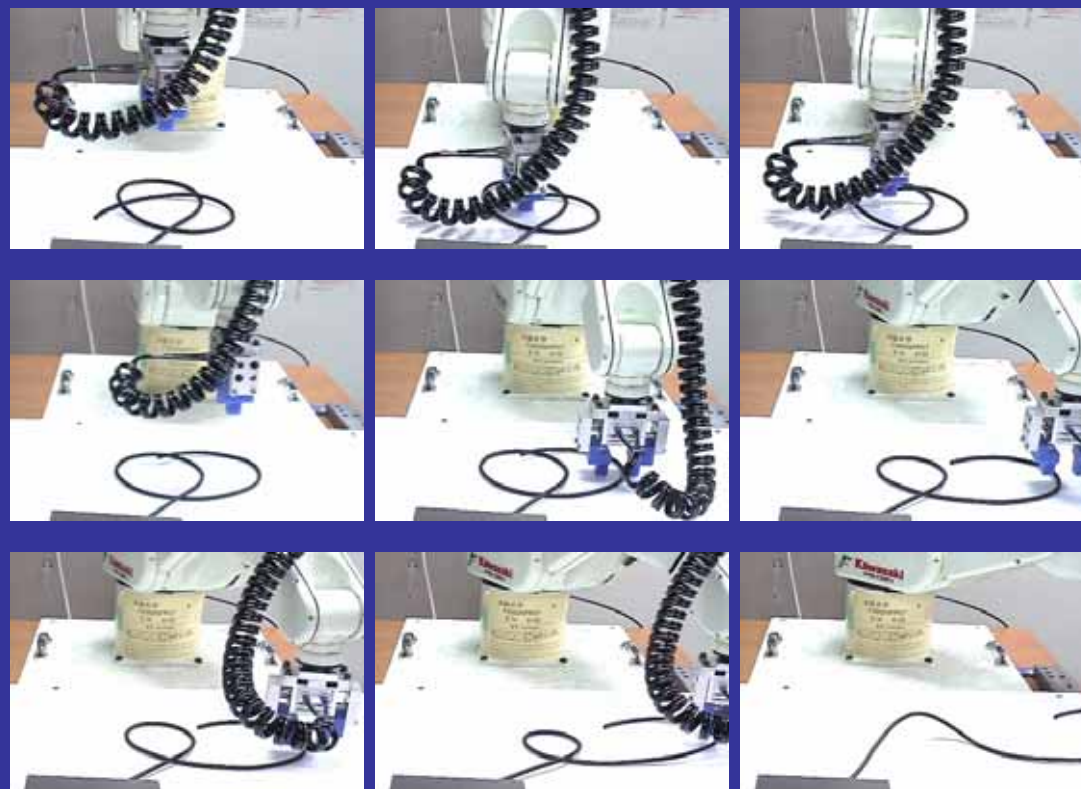
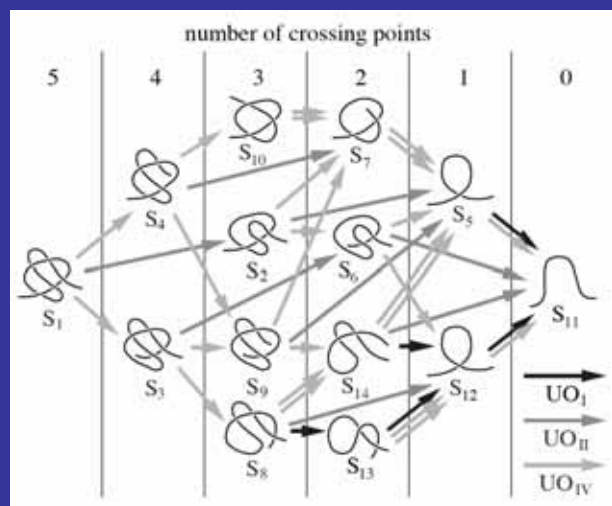
▲ × ●

2000-

線状物体操作



微分幾何座標表現



線状物体の結び／解き操作

Dr. Wakamatsu (Osaka Univ.)

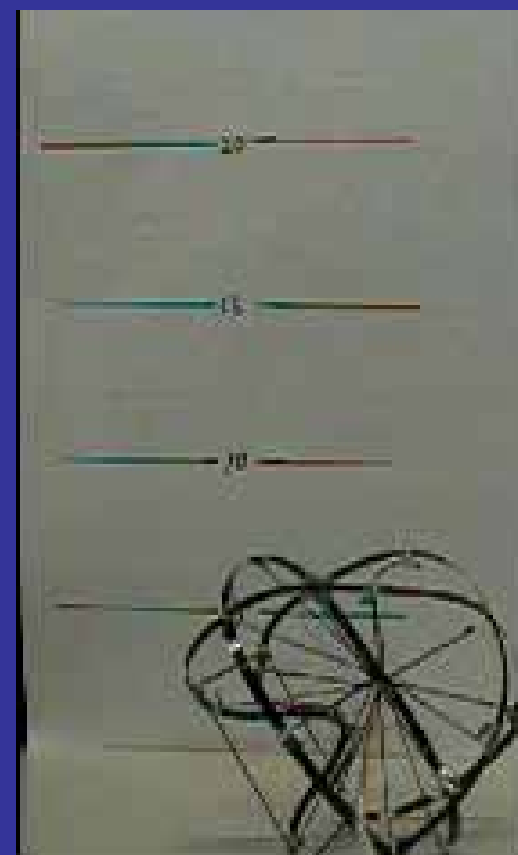
2003-

跳躍移動ソフトロボット

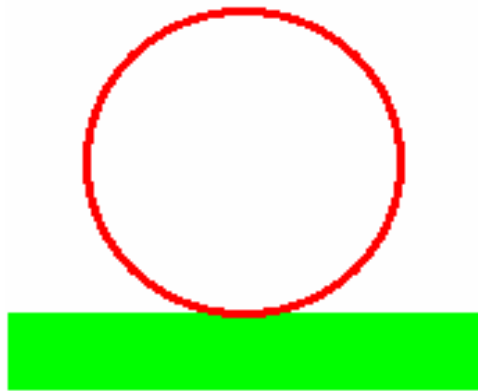


柔軟なボディ

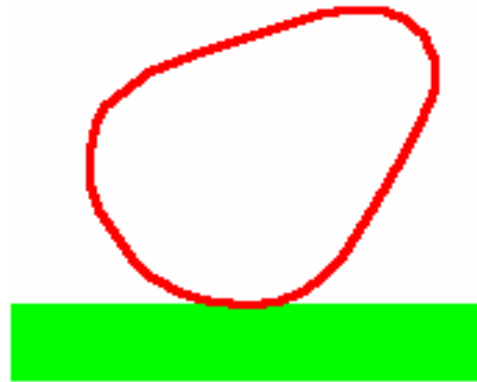
ポテンシャルエネルギーの
蓄積と放出



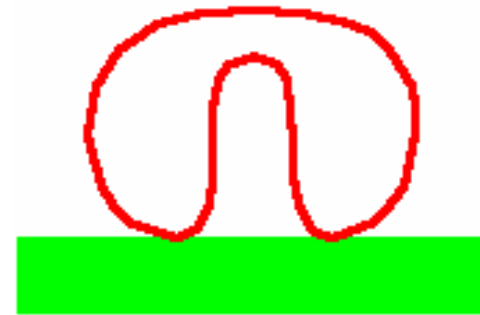
エネルギーの蓄積と放出



安定

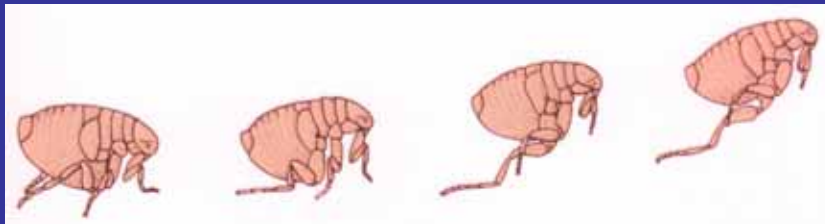


不安定

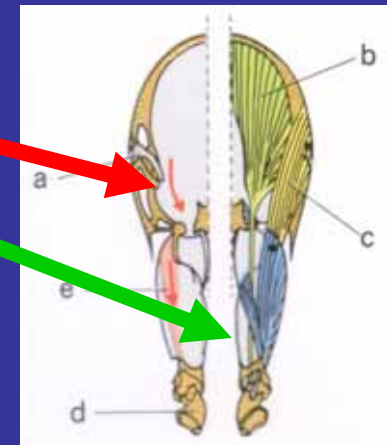


高エネルギー

ノミの跳躍

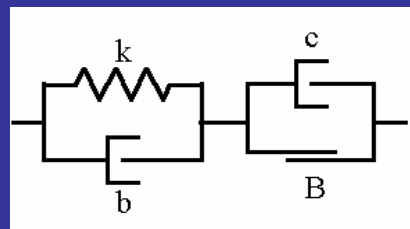
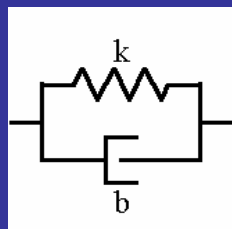
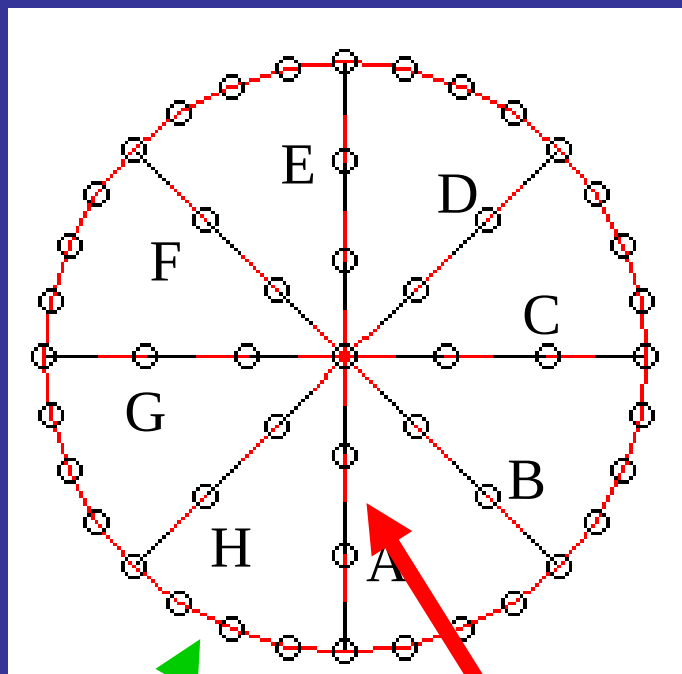


弾性タンパク質
ロック機構



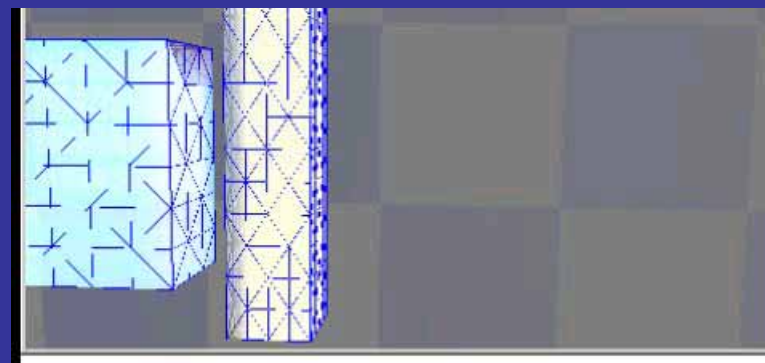
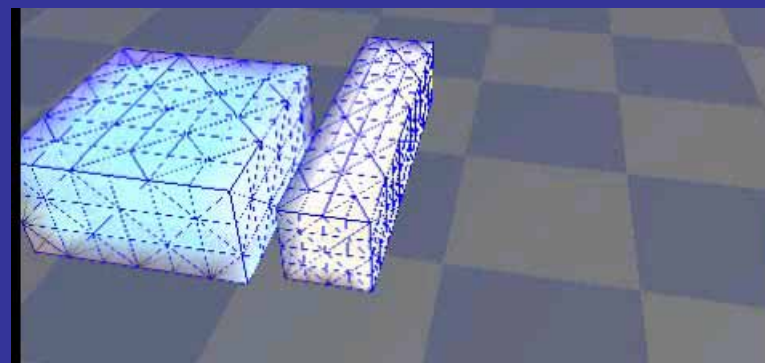
柔軟物モデリング

Particle-based model

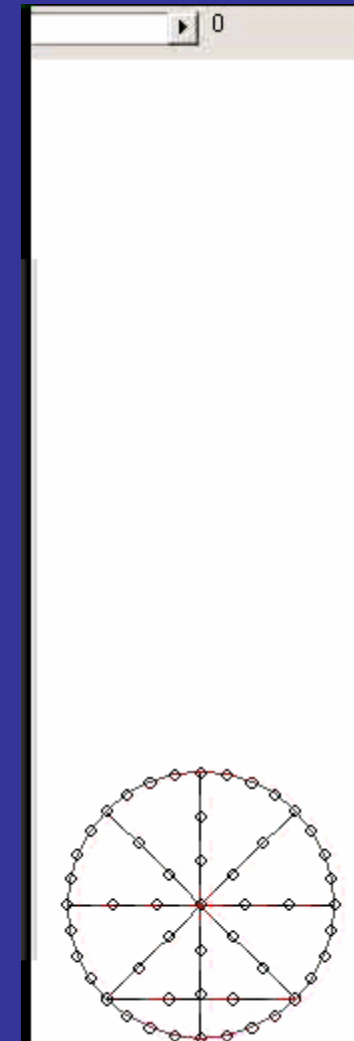
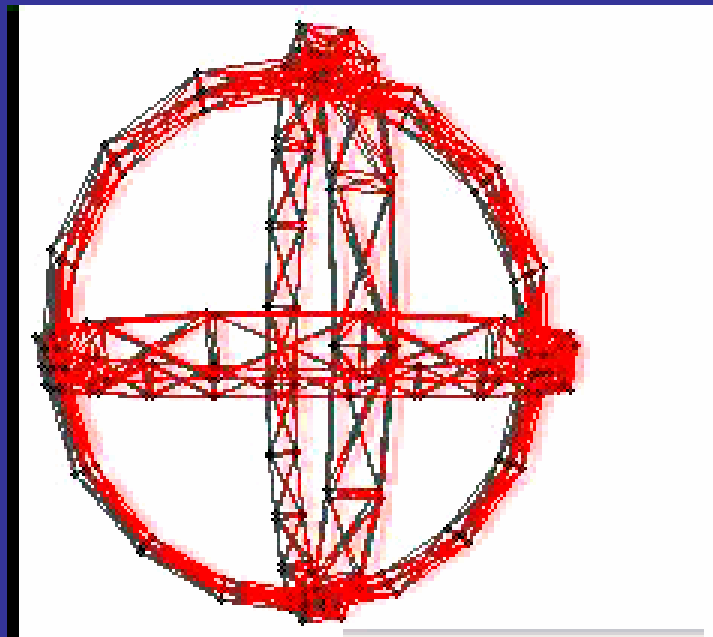


2000-

生地成形過程のシミュレーション



跳躍移動ソフトロボット シミュレーション



柔らかさが生み出す巧みさ

- 把持や操作の安定性
幾何学的非線形が寄与
ポテンシャルエネルギーの極小
- 制御系の安定性
サンプリング時間, 遅れにロバスト
エネルギーの散逸 (受動性)
- パワーの変換
ポテンシャルエネルギーの蓄積と放出

謝辞

柔軟指操作

柴田瑞穂 (D2) 井上貴浩 (D1)

マイクロフォースセンサ

Dzung Dao (杉山研究室PD) 藤井郁夫 (B4)

FPGAビジョン

坪井辰彦 (PD) 森原浩之 (M2) 山本紘督 (M2)

CMOS+FPGAビジョン

高橋考作 (M2) 清水一弘 (B4)

線状物体操作

若松栄史 (大阪大学)

跳躍移動ソフトロボット

杉山勇太 (M2) 塩津あゆみ (B4) 山中雅史 (B4)

柔軟物モデリング

友國誠至 (M2) 田中弘美 (知能情報学科)