

ソフトロボティクス Soft Robotics

平井 慎一
集積機械知能研究室

<http://www.ritsumei.ac.jp/se/~hirai/>

ロボット vs 生物



ロボット
硬い材質
硬いモータ

生物
柔らかい材料
柔らかい筋肉

柔らかいロボット？

ソフトロボットに向けて

- 移動跳躍ソフトロボット
- 柔軟指操作
- 生体組織モデリング
- CMOS+FPGA ビジョン
- 線状物体操作

平井研究室

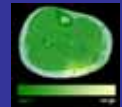
集積機械知能研究室



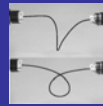
CMOS+FPGA
ビジョン



柔軟指操作



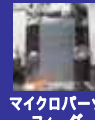
生体組織モデリング



線状物体操作



跳躍移動ソフトロボット



マイクロパーツ
フィーダ



マイクロ空圧
アクチュエータ

Sensing

Action

柔らかい物体とメカニズムの制御

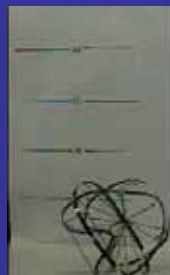
跳躍移動ソフトロボット

2003-

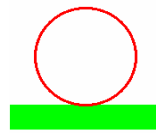


柔軟なボディ

ポテンシャルエネルギーの
蓄積と放出



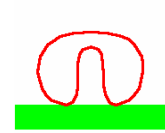
エネルギーの蓄積と放出



安定



不安定



高エネルギー

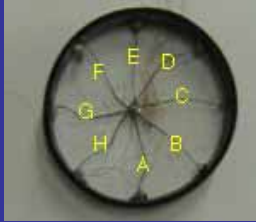
ノミの跳躍



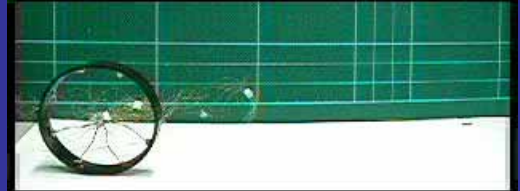
弾性タンパク質
ロック機構



円形柔軟ロボット



転がり移動



坂登り



跳躍



愛知万博 プロトタイプ展



初期形状からの跳躍量



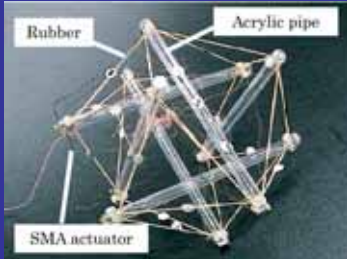
(a) Cap

(b) Cup

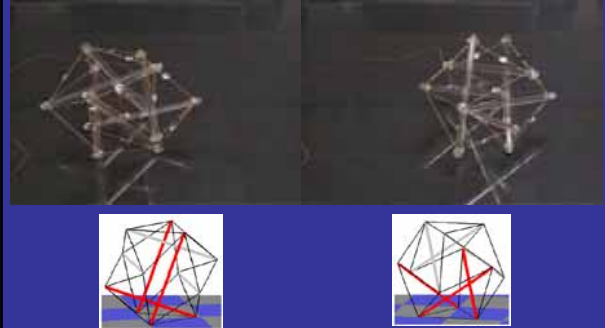
(c) Peanut

(d) Dish

テンセグリティロボット

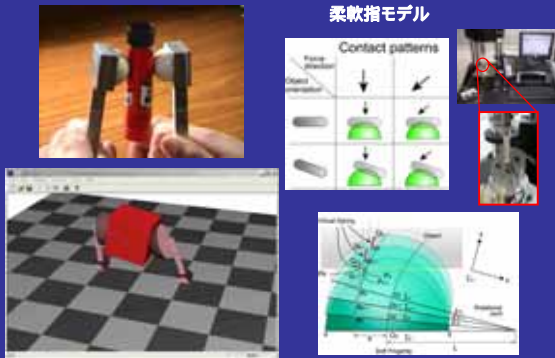


テンセグリティロボット



柔軟指操作

2002-



Background (1/3)

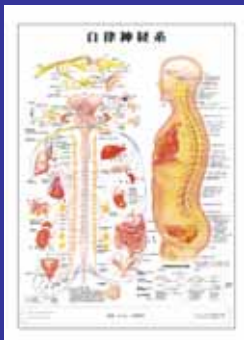


Humans exhibit outstanding dexterity

What's the sources of dexterity

brain-nerve system
binocular eyes
tactile receptors
else?

Background (2/3)



Brain-nerve system

delay in signal transmission
(30 – 50 ms)

Why humans can manipulate objects despite of delay?

Background (3/3)



Human finger

soft fingertip
hard fingernail on the reverse side

Differs from animals

Does this structure contribute to dexterity?



何を目指しているか



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?

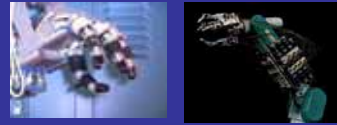
従来のアプローチ

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

柔軟指操作

RTによるソフトな指先のモデリングと解析

従来研究

ハードな指先
剛体系ベースの制御
複雑で外乱に弱い



指先の弾性体カパー
力学的解析なし
巧みさの解明に違い

単純で安定な操作

ソフトな指先

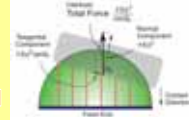


人の巧みさの
力学的解明へ



最少自由度指による操作の計測

平行分布モデルの発見と
ダイナミクスの解明



$$U_{\text{perp}}(d, \theta_p) = \frac{\pi E d^3}{3 \cos^2 \theta_p}$$

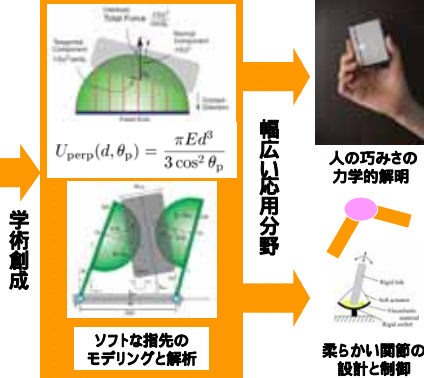
柔軟指操作の学術

多指ハンド 硬い指

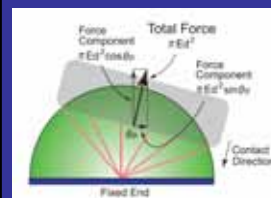


V.S.

二指ハンド 柔軟指

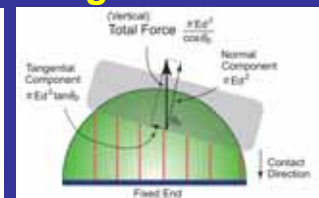


Modeling



radial

$$F_{\text{radial}} = \pi E d^2$$

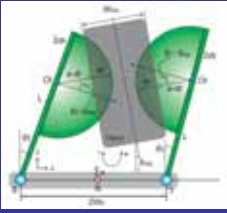


parallel

$$F_{\text{perp}} = \frac{\pi E d^2}{\cos \theta_p}$$

dependence on object posture

Simulation (1/3)



dynamic simulation based on Lagrange formulation

kinetic and potential energies

object
left fingertip right fingertip

$$T = \frac{1}{2} m_{obj} (\dot{x}_{obj}^2 + \dot{y}_{obj}^2) + \frac{1}{2} I_{obj} \dot{\theta}_{obj}^2 + \frac{1}{2} I_{finger} \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_{finger} \dot{\theta}_2^2$$

$$U = U_{parallel}(d_{n1}, d_{t1}, \theta_1 - \theta_{obj}) + U_{parallel}(d_{n2}, d_{t2}, \theta_2 + \theta_{obj}) + m_{obj} g y_{obj}$$

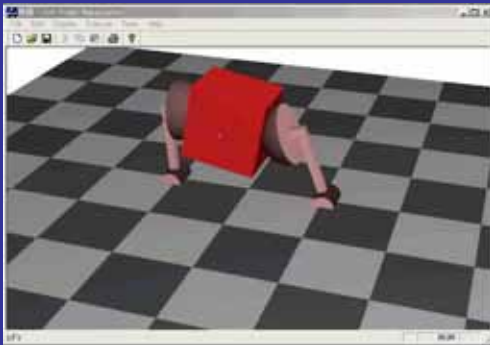
Simulation (2/3)

Lagrangean

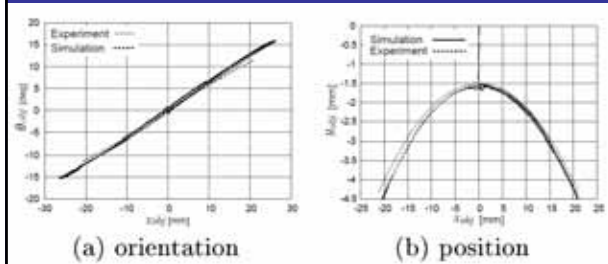
$$\mathcal{L} = T - U + \lambda_1^H C_1^H + \lambda_2^H C_2^H$$

object } $\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}_{obj}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_{obj}} = \frac{\partial}{\partial t} (\lambda_1^H C_1^H + \lambda_2^H C_2^H)$ holonomic
 fingers } $\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_i} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_i} = \frac{\partial}{\partial t} (\lambda_1^H C_1^H + \lambda_2^H C_2^H)$ non-holonomic
 fingertips } $\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{d}_{n,i}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial d_{n,i}} = \frac{\partial}{\partial t} (\lambda_1^H C_1^H + \lambda_2^H C_2^H)$ normal
 $\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{d}_{t,i}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial d_{t,i}} = \frac{\partial}{\partial t} (\lambda_1^H C_1^H + \lambda_2^H C_2^H)$ tangential

Simulation (3/3)

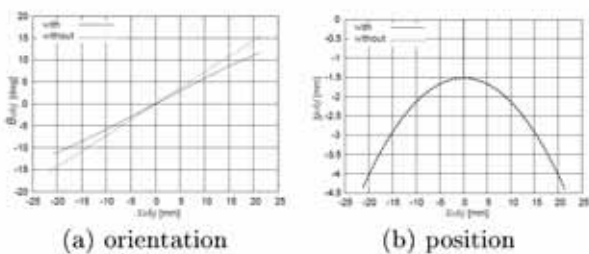


Comparison (1/2)



simulation vs experiment

Comparison (2/2)



with / without tangential deformation

Rigid vs. soft fingertips



rigid fingertips



soft fingertips

stable grasping	A pair of 1-DOF fingers (2DOF)	A single 1-DOF finger (1DOF)
stable grasping & posture control	1 DOF and 2-DOF fingers (3DOF)	A pair of 1-DOF fingers (2DOF)

FEモデル

個々の要素の自由度が高く、多様な形状を表現可能。
 内部変形の挙動が正確。
 接触アルゴリズムにより物体の把持を数値的に解く。
 変位計算に時間がかかる。

例) 二次元人指断面による物体のハンドリング 接触アルゴリズム

シミュレーションの高速化

FEシミュレーションをモデルレス化。さらに、高性能ワークステーションを導入。
 シミュレーション時間の10倍以上の短縮に成功。

今後の展開

- 半球状柔軟指の三次元FEモデルによる把持操作シミュレーションの実現、および評価。
- 人指の三次元FEモデルによる把持操作シミュレーションの実現、および評価。

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]

ピエゾ抵抗素子
シリコンチップ
シリコンパター
チップ用ベース
リード線
C-型接続用基板
カバー

杉山研究室 Dr. Dzung

生体組織モデリング

2005-

力学モデル: パラメータ同定

生体組織の非一様な変形特性を推定したい

MRI (磁気共鳴法)

MRIを用いた非一様生体組織のモデリング

従来研究

引張試験 一様な物体に限定

エラストグラフィ 弾性特性のみ レオロジー特性は不可

ITによる変形場抽出

MRIによる内部計測 特徴点のトラッキング ドロネー図によるメッシュ分割

レオロジー変形の動的モデリング

$$\sigma(t) = \int_0^t R(t-t') \dot{\epsilon}(t') dt'$$

$$R(t-t') = r_1^{max}(t-t') J_1 + r_2^{max}(t-t') J_2$$

$$r_1^{max}(t-t') = \frac{r_1^{max}}{1 + \exp(-\lambda_1(t-t'))}$$

$$r_2^{max}(t-t') = \frac{r_2^{max}}{1 + \exp(-\lambda_2(t-t'))}$$

非一様変形パラメータの推定

CMOS+FPGAビジョン

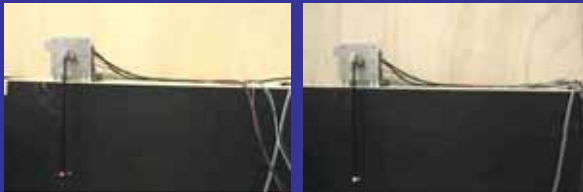
2004-

+

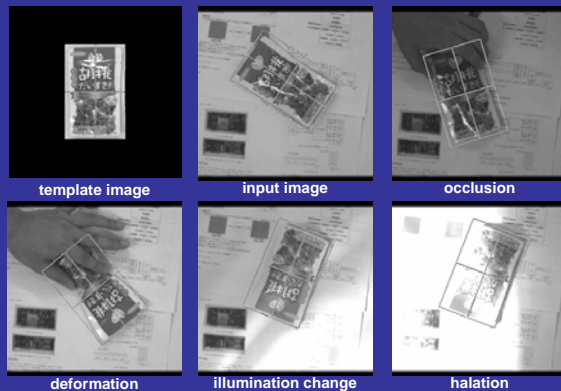
1000fps

制御系の中にビジョンを導入

フレキシブルアームの先端位置制御



Robust Image Registration



線状物体操作

2000-

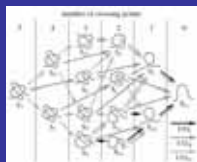


微分幾何座標表現



線状物体の結び / 解き操作

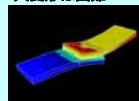
Dr. Wakamatsu (Osaka Univ.)



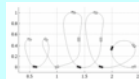
微分幾何を用いた線状物体のモデリング

従来研究

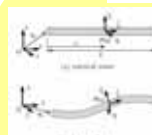
有限要素法
高アスペクト比は困難
大変形は困難



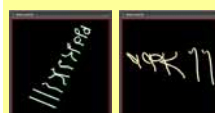
パーティクルモデル
パラメータ同定が困難



微分幾何座標



曲げ, ねじり, 伸縮を表す
最少の変数
曲げ, ねじり, 伸縮剛性が
パラメータであるため
容易に同定可能



大変形が計算可能

帯状物体の変形モデリング



結び目の計算



柔らかさが生み出す巧みさ

- パワーの変換
ポテンシャルエネルギーの蓄積と放出
- 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)

課題

講義で紹介した技術から一つを選び
その使い道を考えよ。
さらにその実現可能性について考察せよ。

<http://www.ritsumeai.ac.jp/se/~hirai/>
[講義] [2009年度] [特殊講義]