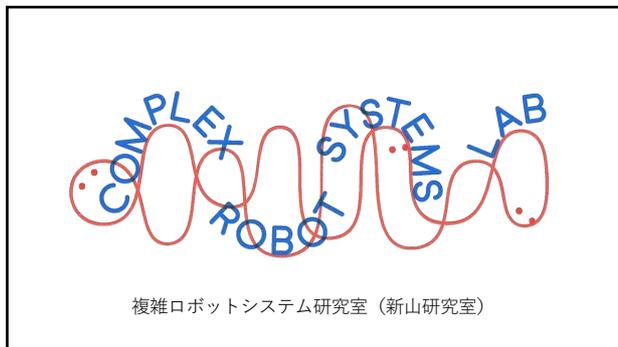
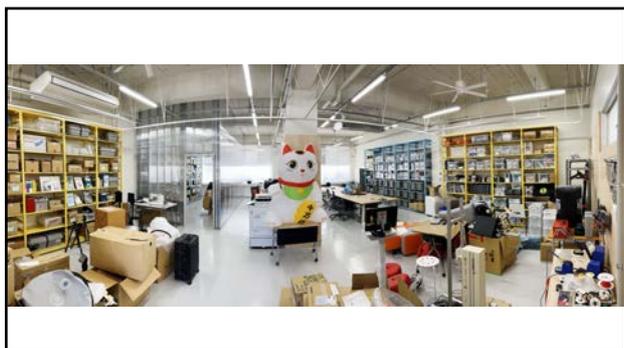


1



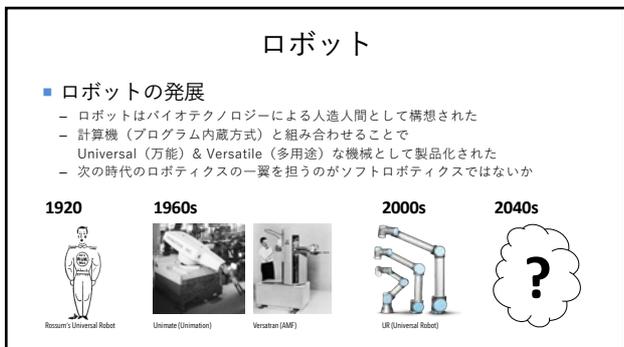
2



3



4



5



6

ハードロボティクスの到達点

- Motor skills + finite state machine? 昆虫的?



7

協働ロボット



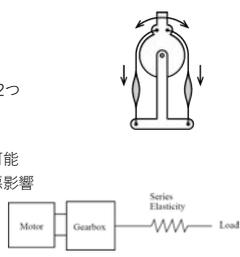
Universal Robot, URS Kuka, LBR Iiwa Rethink Robotics, The Baxter & Sawyer

Kawada, Nextage ABB, YuMi Fanuc, CR-35iA

8

代表的な剛性調節機構

- 拮抗駆動
 - 筋骨格系にみられる
 - 非線形ばねの釣り合い
 - 短所: 1自由度の駆動にアクチュエータが2つ
- SEA (Series Elastic Actuator)
 - アクチュエータの出力軸に弾性を挟む
 - アクチュエータを追加すれば弾性も調節可能
 - 短所: 複雑、角度フィードバック制御に悪影響



9

剛体機構によるやわらかさの模擬

- メカニカルな実装の限界
 - 32脚ロボット「モチボット」 [Kajiri et al., 2018]



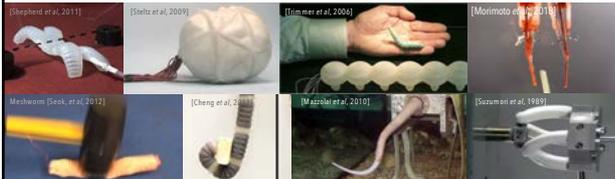
FREE FORM LOCOMOTION COMPARED WITH DISCRETE ROLLING LOCOMOTION

10

ソフトロボティクス

柔軟材料の諸特性を積極的に利用することでロボットの機構や制御を革新しようとする学術分野

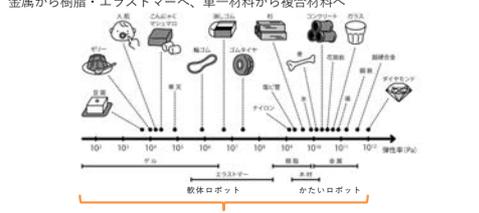
注: 骨のない軟体ロボットには限らない
柔軟材料の機械的・化学的・電気的・心理的性質



11

「かたい」と「やわらかい」を使いこなす

- 適材適所、ロボットの材料・設計の選択肢を広げる
 - 金属から樹脂・エラストマーへ、単一材料から複合材料へ



ソフトロボティクス

12

なぜいまやわらかいロボットか？

- ニーズ：人間とロボットの共生
 - 協働ロボット、サービスロボット
 - 人間 vs. ロボットという価値観からの脱却
人間に寄り添い、人間の能力を拡張してくれる存在
- 技術の成熟：次世代型ロボットの探索
 - ロボットの作り方が変わる
高分子材料の発展、デジタルファブリケーション
 - ロボットの操り方が変わる
シミュレーション、機械学習、受動ダイナミクス
 - 産業用ロボット（高減速比モータ駆動多関節）とは異なる設計思想

13

ハード vs. ソフト：アクチュエータの例

古典アクチュエータ

- 剛体からなる機構
- 回転、並進
- アクチュエータ、伝動要素、エフェクタが分かれており、組み立て分解が可能
- 電磁力、油空圧
- 強い、大型

ソフトアクチュエータ

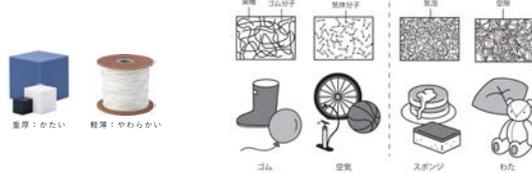
- 構造を工夫した柔軟材料
- 変形、特に屈曲や収縮
- アクチュエータとボディが一体化している
- 油空圧、エントロピー弾性、結晶の相変態、化学反応、マクスウェル応力
- 弱い、小型・中型



14

材料と微細構造によるやわらかさ

- やわらかい材料：エラストマー、ゲル、流体（水、空気）
- やわらかい形態・構造：薄い・細い：フィルム、糸、発泡材料
メタマテリアル



15

やわらかい身体の利点

■ 変形 mechanical deformation

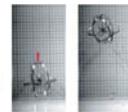
- 衝突安全性
- 豊富な受動自由度による形状適応（なじみ）
- 弾性エネルギーの蓄積・放出



Inflatable Arm [Sanan et al., 2011]



Jamming Gripper EMPIRE



Crawling and Jumping Soft Robot [Matsuyama, et al., 2007]

16

発展的な機能

- 一体化
 - コンパクト化、機能の重ね合わせ
 - 継ぎ目のないためから複雑な形状、生物への接近
- 変化 transformation
 - 状態・弾性・柔軟が変わる
 - 金属結晶の相変態、ガラス転移、固体・液体・気体、ジャミング転移
 - 成長、自己修復
 - 生分解性、消化、溶解、可食
- 知能
 - 身体性
 - Morphological Computation：記憶、時系列生成

17

ソフトロボットに関する世界初の教科書



袴谷 博一, 伊崎 浩平, 新山 豊義, 松尾 昌樹 編著
ソフトロボット入門 最新編成と高知能の数理
(オーム社, 2023年)



Koichi Suzumori, Kenjiro Fukuda, Ryouma Niyama, Koshi Nakajima Ed.
"The Science of Soft Robots"
(Springer, 2023)

研究者による単著



細田 博
『柔らかいヒューマノイド』
(化学同人, 2016年)



袴谷 博一
『面白いけどもなロボット』
(化学同人, 2021年)

ハンドブック



新山 豊義
『やわらかいロボット』
(金子書房, 2018年)



吉川 英元, 川上 勝 監修
『やわらかいロボットハンドブック』
(NTS, 2022年)



日本ロボット学会編
ソフト工学ハンドブック
(コロナ社, 2023年2月)

18

ソフトロボット学入門 目次

序章 ソフトロボットの概念	第4章 やわらかいセンサー
0.1 ソフトロボットとは何か	4.1 やわらかいセンサーの導入方法と種類
0.2 ソフトロボットの歴史	4.2 抵抗センサー
0.3 動物ロボットからのソフトロボット学様式	4.3 静電容量センサー
第1部 柔軟物体の感測と情報処理	4.4 電場応答性センサー
第1章 柔軟体モデリング	4.5 電気式触覚センサー
1.1 ソフトロボットの力学	4.6 光学センサー
1.2 弾性ロッド	
1.3 柔軟曲面	第3部 ソフトロボットシステムの設計と制御
第2章 やわらかい知能	第5章 設計指針と製作方法
2.1 やわらかい身体に制御をアウトソースする	5.1 ソフトロボットのつくり方
2.2 脳-身体-環境系に対する力学系のアプローチ	5.2 ソフトメカニズム
2.3 やわらかい身体の情報処理能力	5.3 生物模倣メカニズム
第2部 やわらかい機能性材料とデバイス	5.4 3Dプリンタを用いたソフトロボット製作
第3章 ソフトアクチュエータ	5.5 形状記憶
3.1 ソフトアクチュエータ概論	5.6 シート積層による曲げ構造
3.2 空圧ソフトアクチュエータ	第6章 ソフトロボットの基本機能と制御
3.3 イオン導電性高分子アクチュエータ	6.1 概 論
3.4 DEA	6.2 ソフトロボットハンド
3.5 熱応答性材料	6.3 連続ロボットアーム
3.6 筋繊維アクチュエータ	6.4 インクジェット印刷ロボット
	6.5 ゼム駆動
	6.6 飛行移動
	6.7 遊泳移動

20

Springer版テキストブック

やわらかい高分子材料、やわらかいセンサー、自動振動ゲル、バイオハイブリッドシステムなどの内容が加わったより分厚い内容。PART I~IIIから成る。

PART I: Design of Soft Robots

- Chapter 2. Soft Mechanisms
 - 2.1 Deformable mechanisms (Kenjiro Tadakuma)
 - 2.2 Typical soft mechanisms (Hiromi Mochiyama)
- Chapter 3. Biological Mechanisms
 - 3.1 Robotics-inspired biology (Takeshi Yamasaki)
 - 3.2 Musculoskeletal system (Megu Gunji, Yoichi Masuda, Akira Fukuhara)
- Chapter 4. Soft Manipulation and Locomotion
 - 4.1 Soft robot hands (Shinichi Hirai)
 - 4.2 Continuum arm (Ryuma Niiyama)
 - 4.3 Peristaltic locomotion (Taro Nakamura, Takuya Umedachi)
 - 4.4 Aerial flight with soft components (Toshiyuki Nakata)
 - 4.5 Aquatic swimming with soft fins and body (Hiroto Tanaka)



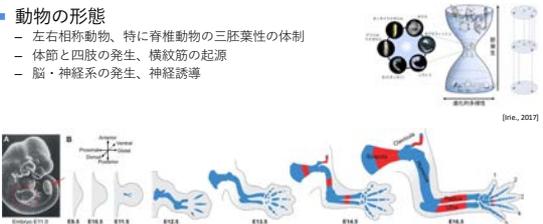
21

Robot Architecture ロボットアーキテクチャ

22

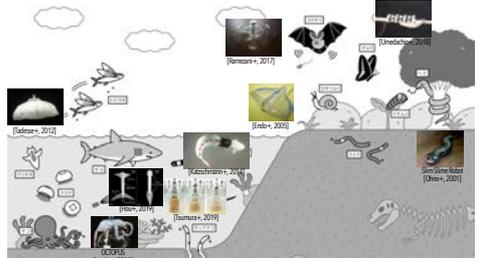
Body Plan

- 生物の個体発生における身体構造、諸器官の配置
- 動物の形態
 - 左右相称動物、特に脊椎動物の三胚葉性の体制
 - 体節と四肢の発生、横紋筋の起源
 - 脳・神経系の発生、神経誘導



23

生物規範ソフトロボット



24

Locomotion (移動運動)

- Terrestrial locomotion
 - Legged
 - Limbless crawling: snake, snail
 - Rolling: caterpillar
- "Artificial" Locomotion
 - Wheel, Continuous Track
 - Jet Propulsion (gas)
- Aerial Locomotion
 - Flapping: bee, bird
 - Gliding
- Aquatic locomotion
 - Flotation: water strider
 - Swimming: fish, eel, dolphin, salamander, penguin
 - Undulation
 - Fin
 - Jet Propulsion: squid, octopus, cuttlefish

25

ソフトロボティクスのトピック

<p>連続アーム</p>  <p>Bionic Motor Robot, Festo, 2017</p>	<p>ソフトグリップ</p>  <p>SOFTeatics, NITTA, 2019</p>	<p>インフレイタブルロボット</p>  <p>Inflatable Robot Arm, Otterlab</p>
<p>フレキシブル エレクトロニクス</p>  <p>[藤坂ら, 2012]</p>	<p>ソフトアクチュエータ</p>  <p>[Shimada et al., 2015]</p>	<p>バイオハイブリッド</p>  <p>[Morimoto et al., 2018]</p>

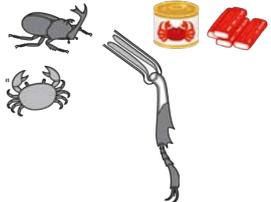
26

ロボットのボディプランとは

- ロボットアーキテクチャ
 - 形態やスケール
 - 構造や材質
 - アクチュエータやエネルギー源
 - 制御方式：集中制御、分散制御
- コンピュータアーキテクチャ
 - ノイマン型コンピュータ
 - CPUとメモリの接続方式、メモリのアドレス方式
 - CPUの命令セット

27

動物

<p>Endo-skeletal System 内骨格</p> 	<p>Exo-skeletal System 外骨格</p> 
---	--

28




特別展「昆虫」
2019年7月13日～10月8日 国立科学博物館
2019年7月13日～9月30日 大田市立自然史博物館

昆虫人間は可能か？@国立科学博物館 昆虫展

29

JSEL

The First Steps of a Robot Based on Jamming Skin Enabled Locomotion

Annan Mozeika
Erik Steltz
Heinrich Jaeger

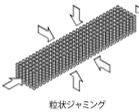
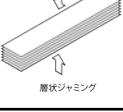


Funded under the DARPA Chemical Robots program, contract W911NF-08-1-0209

30

Jamming

- Granular, fiber, layer/laminar, beads

 <p>粒状ジャミング</p>	 <p>繊維状ジャミング</p>
 <p>層状ジャミング</p>	 <p>数珠状ジャミング</p>

31

デジタルファブリケーション

- 3Dプリンタを使ったモノづくり

Hack Rod by Primmordial Research Project, Autodesk, and Bandito Brothers, 2016.
 Kawada Robotics, Nextage
 Stratsys Object24

32

ソフトロボットの製作方法

- 直接造形 (3Dプリント)
 - 光硬化樹脂や熱可塑性樹脂を積層
- 型成形 (型を3Dプリント)
 - 液状の柔軟材料を流し込み、硬化させる

各種スライサーソフト
 ドライフィラメントに力
 印刷条件の決定
 3Dプリント
 サポート除去
 表面洗浄
 UV硬化
 研磨 等の後処理

33

Musculoskeletal Robot

筋骨格ロボット

34

34

生体の筋肉はすごい

スペックよりもシステムとしての使いやすさ

- 実装密度
 - 隙間なく配置できる
- スケラブル
 - アリからゾウまで同じ仕組み
 - 数を増やすコストが低い
- タフ
 - 過負荷に強い
- モバイルシステムとしての完結性
 - 周辺機器と動力源を含めて上記を満足

Biceps Brachii
 Brachialis
 brachioradialis
 Serratus Anterior
 Gluteus Maximus
 Hamstrings
 Biceps Femoris (short head)
 Gastrocnemius
 Soleus
 Tibialis Anterior
 Iliopsoas
 Pectus Femoris
 Vastus

35

[空気圧人工筋肉]

36

空気圧人工筋肉

繊維強化型人工筋ファミリー

Braided-fiber
 General
 Parallel-fiber

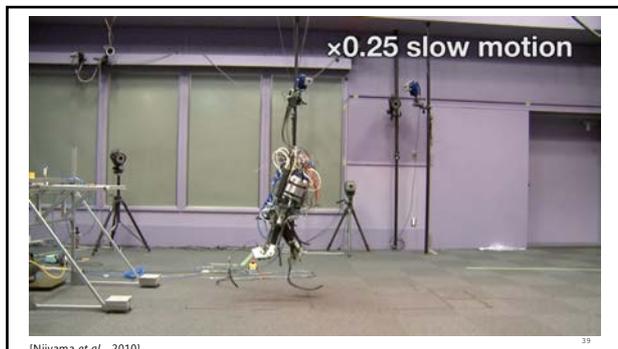
McKibben Muscle, 1957
 Bridgestone-Mitsubishi Arm, 1984
 [Hrai et al., 2001]
 Raibornator [Norttsugu et al., 1995]
 [Krishnan, 2015]
 Small-diameter PAM [Suzumori et al., 2011]
 Warsaw-type, 1968
 WAP-1, 1968
 Pleated PAM [Daerden et al., 2001]
 [Nokamura et al., 2009]

縦方向繊維強化 (伸縮)
 縦方向繊維強化 (収縮)
 縦方向繊維強化 (伸縮)
 縦方向繊維強化 (収縮)

37



38



39

Approaches to Human Motor Skills

Embodied Layer

- Biomechanics
- Passive Dynamic Walking
- Sensory-motor coupling
- Uncertain environment
- Emergent behaviors

Controller and Planning Layer

- Well-defined movement
e.g. bipedal locomotion
- Torque, Angle, Posture

WAB-1
[Kane et al., 1972]

Dense (TU Delft)
[De Waele et al., 2005]

Athlete Robot
[Nishiyama et al., 2010]

ASIMO

Atlas

Digit

40

Musculoskeletal Robots

2002-2010	2011-2013	2014-present
<p>Remote handshake robot [Nishiyama et al., ICRA 2007]</p>	<p>[Nishiyama et al., ICRA 2009 WS] [Nishiyama et al., CLAWAR 2009] [Nishiyama et al., AMAM 2011] [Nishiyama et al., 2012]</p>	<p>[Dimitrova et al., ROBO 2016] [Nishikawa et al., ICOSP 2017] [Nishikawa et al., AMAM 2014] [Nishikawa et al., ICRA 2016] [Chen et al., ROBO 2017] [Nishikawa et al., Humanoids 2015] [Ishii et al., IKRS 2018]</p>
<p>Ars Electronica 2009 [Ushigome et al., VRMM 2010]</p>	<p>[Nishikawa et al., AMAM 2011] [Yamada et al., IKRS 2011]</p>	

41

連続ロボットアーム

42

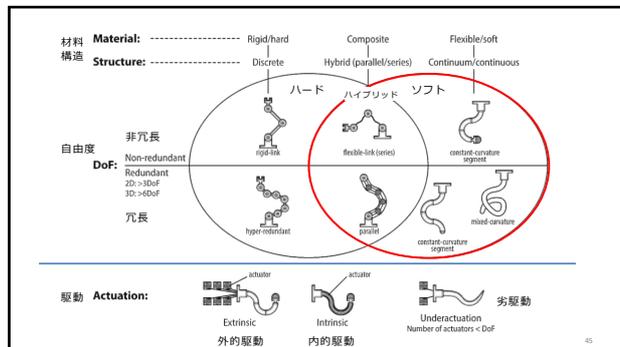
連続ロボットアーム

- 骨や関節のないロボットアーム
- 巻きつき把持、障害物の多い環境
- 課題：リーチング、制御

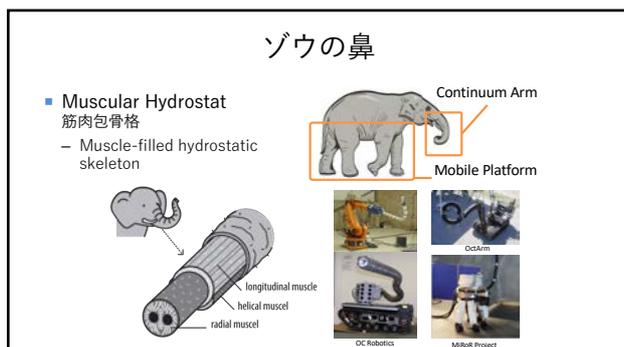
43



44



45



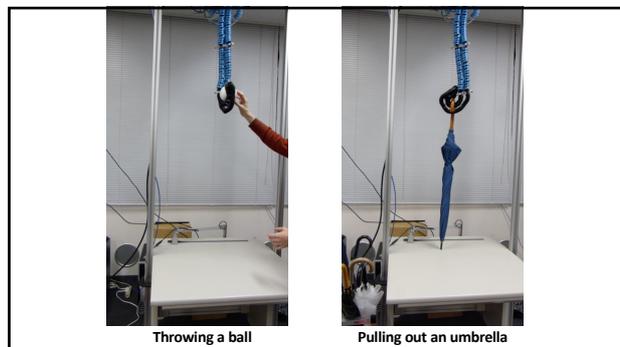
46



47



48



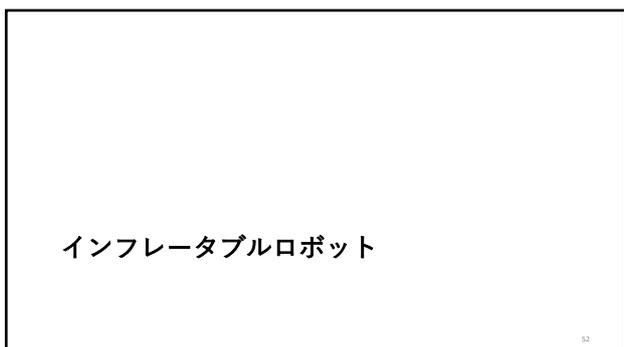
49



50



51



52



53



54



55

インフレーターブル関節機構

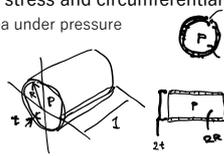
- ワイヤ駆動できるインフレーターブル関節 [Seong et al., 2019]
 - 超軽量な大型可動構造を実現
 - 内蔵ワイヤでアクチュエータが露出しない
 - 国際発表 (RoboSoft) 、 **Best Demo Award受賞**



56

Theory of thin-walled cylinder

- Axial stress and circumferential stress
 - Area under pressure



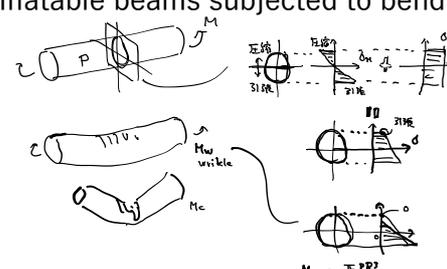
軸応力 $\sigma_a = \frac{P \cdot r}{t} = \frac{P \cdot R}{2t}$

円周応力 $\sigma_c = \frac{P \cdot r}{t} = \frac{P \cdot R}{t}$

$\sigma_c : \sigma_a = 1 : 2$

57

Inflatable beams subjected to bending



$N_w = \frac{P \cdot R^2}{2}$

58

インフレーターブル (空気膜構造) ロボット



pHRI (physical human-robot interaction)

59



60

まとめ

- やわらかさはロボットの可能性を広げる
 - 柔軟材料を活用する新たな技術体系が求められている
 - 身体構造についても更新される
- レポート課題
 - 哺乳類とかなり異なるボディプランを持った生物を1つ選び、その生物をソフトロボットとして実現するにはどのような材料・構造・アクチュエータを使えばよいか考えてA4紙1ページ程度にまとめてください。図を必ず入れること。
 - 締め切り：2週間後

61