

機関番号：12608

領域設定期間：平成30年度～令和4年度

領域番号：8003

研究領域名（和文） ソフトロボット学の創成：機電・物質・生体情報の有機的融合

研究領域名（英文）

領域代表者

鈴木 康一（SUZUMORI Koichi）

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：00333451

交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,189,600,000円

研究成果の概要

有史以来、科学技術はひたすら「パワー」と「確実性」を追い求めてきたとは言えないだろうか。確実な動作を求めて機械も材料も「かたさ」を追求してきた。一方、近年、機械・電子、情報処理、材料科学、等、複数の異なった分野で、生体システムが持つ「やわらかさ」を指向する新興学術が同時多発的に勃興してきた。これは偶然ではない。生体・人間中心へ傾向する科学技術の大きな流れが背景にあると我々は捉えた。本領域では「やわらかさ」を目指す新興学術の種を融合し、出会うはずのなかった研究者を出合わせる。それによって、従来の科学技術とは真逆とも言える価値観に立脚した大きな学術の潮流を創りだし、「やわらかさ」に立脚する学術領域「ソフトロボット学」を切り拓く。

研究分野：

ロボティクスおよび知能機械システム関連

キーワード：

ロボティクス、ソフトメカニズム、ソフトアクチュエータ、ソフトマテリアル、ソフトコンピューティング、バイオメカニズム

1. 研究開始当初の背景

これまで科学技術はひたすら「パワー」と「確実性」を追い求めてきたとは言えないだろうか。パワフルで確実な動作を求めて機械も材料も「かたさ」を追求してきた。一方、21世紀に入り、機械・電子、情報処理、材料科学、等、複数の異なった分野で、生体システムが持つ「やわらかさ」を指向する新興学術が同時多発的に生まれてきた。例えば、柔軟に変形する電子回路、状況に応じてフレキシブルに反応する人工知能、時間が経つと自然に戻る生分解性プラスチックである。「かたさ」から「やわらかさ」への変化が、この10数年でいろいろな分野で勃発してきた。これは偶然ではなく、生体・人間中心へ傾向する科学技術の大きな流れが背景にあると我々は捉えてきた。有史以来、自然の驚異や外敵から身を守り豊かな社会を築くために、パワーと確実性が科学技術の最重要目標となっていた。しかし産業革命とIT革命を経てこれらの目標はある程度達成された現在、持続可能な社会の実現へ人類の目標はシフトしつつある。「かたさ」から「やわらかさ」への大きな変化の象徴的存在として、われわれは「ソフトロボット学」を位置付けてきた。

ソフトロボットへの関心はこの10数年間に世界的に急速に高まってきた。ソフトロボットに関する学術論文数は2010年以降指数関数的に増加している。EUやUSでもソフトロボットに関する大型予算を使ったプロジェクトが行われてきた。

わが国では、古くから「やわらかさ」に関する研究が世界に先んじて進められてきた。例えば、ロボット工学ではソフトアクチュエータや柔軟メカニズム、材料分野では機能性ポリマアクチュエータやハイドロゲル、電子デバイス分野ではフレキシブルエレクトロニクスなど、世界をリードする先駆的な研究が活発に行われてきた。

本研究領域では、「やわらかさ」に関するわが国の強みと勃興する新しい学術の芽を融合し、従来の人工物・機械に関する「堅い」価値観・方法論とは大きく異なる、生体システムの価値観に基づき「しなやかで自立する人工物に関する知の体系」の創成を目指した。

2. 研究の目的

わが国には、各分野に「やわらかさ」に関する世界的な研究を進めるトップランナーたちがいる。本領域は、出会うはずのなかったこれら研究者を出会わせ、「やわらかさ」を目指す新興学術の種の融合を進め、それによって、従来の科学技術とは真逆とも言える価値観に立脚した大きな学術の潮流を創りだすことをめざした。従来の人工物・機械に関する「堅い」価値観・方法論とは大きく異なる、生体システムの価値観に基づく「しなやかで自立する人工物に関する知の体系」の創成を目指した。

具体的には、従来のロボット学の中心であった機械工学、電気・電子工学、情報科学に加え、材料科学、生物学を強力に巻き込むことで、従来の価値観とは真逆とも言える新しい学術の潮流を「ソフトロボット学」という形で創り上げることを目指した。新しい学術知見の創出、体系化、人材育成とともに、ソフトロボット学が秘める実用的価値も踏まえ、産業界との連携・実用化をも視野に入れた研究を行ってきた。

3. 研究の方法

様々な学術領域で勃発する「やわらかさ」に関する科学の芽と人材を効果的に融合させ、世界に先んじて「ソフトロボット学」としてまとめ上げるために、(1)三層構造異分野融合推進と(2)ボトムアップエンジン/トップダウンステアリングという施策を行った。

(1)三層構造異分野融合推進：

第1層目は課題内融合である。本領域では各計画研究課題自体を異分野の研究者が連携する形で構想し、異分野融合を強力に目指す研究課題とした。第2層は研究班内の異分野融合である。3つの研究班(A01, A02, A03)にそれぞれ3つの計画研究課題を設置し、ここに公募研究も入れて、それぞれがしなやかな身体、動き、知能を追求する異分野融合研究を推進する体制とした。

上記の第1～2層は初年度から3年目にかけて実施する。後半2年は、restructuringを行い、3つの研究班(A01, A02, A03)の活動と並行して、ソフトロボット設計学(S01)、物質学(S02)、情報学(S03)の組織を形成し、これら3つの「学」を柱とした「ソフトロボット学」の体系化を行った。これを第3層目の異分野融合と呼んでいる。

(2)「ボトムアップエンジン/トップダウンステアリング」：

本領域における研究推進の原動力は、各分野で誕生し急成長する新興学術の知見の融合によって生まれる「研究の芽」である。各研究課題からボトムアップで展開する新しい研究の芽や成果を領域推進の原動力ととらえている。一方、領域の最終目標「ソフトロボット学」の体系化には、この原動力を適切な方向にステアリングする必要がある。これは各研究班、総括班、領域全体会議での議論を踏まえ、領域代表のトップダウンで行った。

4. 研究の成果

ロボティクス、機械工学、電気・電子工学、情報科学、材料科学、生物学、動物学にわたる異分野融合の強力な推進により、しなやかな身体、しなやかな動き、しなやかな知能に関する、ソフトロボットを構成する要素研究が数多く生まれた。また、これらを融合しソフトロボットへ統合する手法の研究成果として、現時点における「ソフトロボット学」を体系化し、和文、欧文のそれぞれのテキストとしてまとめ上げた。

【しなやかな身体】に関しては、様々な形態のソフトロボットを現実のものとして実現する「ソフトロボットの身体」の主要な構成方法を明らかにすることができた。剛体から構成され、変形・変化を起こさない従来のロボットシステムを拡張し柔軟性を取り込むために、機械工学・電子工学と生命現象を力学的に扱うバイオメカニクスの融合を図った。動物の機能解剖学や生物ロコモーションの知見を積極的に利用するとともに、生きた細胞のロボットへの応用にも取り組んだ。これにより、下記の成果が生まれた。

- 変形する柔軟身体を記述するモデル、環境との相互作用を表現するモデルの構築
- ロボットおよび比較する動物の実環境での振る舞い（形態変化や粘弾性等）の計測手法の開発
- 筋肉細胞や生分解性材料を用いた変化するロボットの基盤技術の構築
- やわらかさとかたさが複雑に組み合わさったロボットの設計・製作手法の体系化(例：右図、ダチョウ規範ミニピュレータ)
- ソフトロボットのための実演に基づく視覚・力学フィードバックによる制御手法の実現

【しなやかな動き】に関しては、高機能高分子材料を基盤とした各種の新しいアクチュエータ、センサ、機能デバイス、メカニズムを創り出し、柔軟材料の変形に立脚した新しい動きの機構を構築した。具体的には、

- 高分子ナノ薄膜を基材とする無線給電式筋電計測シス



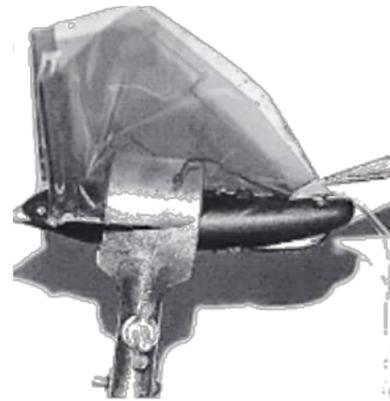
テムや薄膜ソフトセンサ(例: 右図, アスリート用のウェアラブル筋電計測デバイス)

- イオン交換膜変形を利用したソフトアクチュエータの新しい造形技術確立
- 柔軟生物であるヒモムシの吻構造に基づく伸縮メカニズムの確立
- 各種柔剛切替機構, 柔剛兼備なウロコ状機構, 自己修復機能を実現する血管メカニズムが開発できた。



【しなやかな知能】に関しては, やわらかいロボットの複雑なダイナミクスを理解し, やわらかさを積極的に活用した情報処理を実装する研究を進めた. これにより, 下記の成果が生まれた.

- フレキシブルセンサと物理リザバー計算の融合により, やわらかいダイナミクスを最大限活用することによる既存の計算限界の突破 (例: 右図, 飛翔ロボットの羽のダイナミクスを利用した風向き推定)
- 化学反応を利用した自律駆動系とメカトロニクスの融合による制御の新原理の提案
- 体内時計および線虫の集団運動の制御を通じた時空間的なリズムとパターンの形成現象の解明とロボット応用



【ソフトロボットの体系化】に関しては, ソフトロボット設計学, ソフトロボット物質学, ソフトロボット情報学, という3本の柱から現時点における現時点における「ソフトロボット学」を体系化し, 世界標準を目指したテキストとして, 和文, 欧文にそれぞれまとめ上げた. (参照: 右図)



5. 主な発表論文等 (受賞等を含む)

【しなやかな身体に関するもの】

1. N. Harada, and H. Tanaka, “Kinematic and hydrodynamic analyses of turning manoeuvres in penguins: body banking and wing upstroke generate centripetal force”, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 225, No. 24, 2022.
2. K. Nonoyama, M. Shimizu, and T. Umedachi, “Upside-Down Brachiation Robot Using Elastic Energy Stored Through Soft Body Deformation”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 7, No. 4, p. 11291–11297, 2022.
3. S. Iyobe, M. Shimizu, and T. Umedachi, “Diverse Behaviors of a Single-Motor-Driven Soft-Bodied Robot Utilizing the Resonant Vibration of 2D Repetitive Slit Patterns”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 7, No. 2, pp. 992-999, 2022.
4. N. Harada, T. Oura, M. Maeda, Y. Shen, D. M. Kikuchi and H. Tanaka, “Kinematics and hydrodynamics analyses of swimming penguins: wing bending improves propulsion performance”, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 224, No. 21, pp. 1-20, 2021.
5. K. Tanaka, S. Nishikawa, R. Niiyama, and Y. Kuniyoshi, “Immediate generation of jump-and-hit motions by a pneumatic humanoid robot using a lookup table of learned dynamics”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 6, No. 3, pp. 5557–5564, 2021.
6. Y. Shen, N. Harada, S. Katagiri, and H. Tanaka, “Biomimetic Realization of a Robotic Penguin Wing: Design and Thrust Characteristics”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 2021, 2020.
7. S. Hamaguchi, T. Kawasetsu, T. Horii, Hisashi Ishihara, R. Niiyama, K. Hosoda, and M. Asada, “Soft Inductive Tactile Sensor Using Flow-Channel Enclosing Liquid Metal”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 3, pp. 4028-4034, 2020.
8. H. Tanaka, G. Li, Y. Uchida, M. Nakamura, T. Ikeda, and H. Liu, “Measurement of time-varying kinematics of a dolphin in burst accelerating swimming”, *PLoS ONE*, 14, e0210860, 2019.
9. T. Umedachi, M. Shimizu, and Y. Kawahara, “Caterpillar-inspired Crawling Robot using Both Compression and Bending Deformations”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4, pp. 670-676, 2019.

【しなやかな動きに関するもの】

10. Z. Jiang, N. Chen, Z. Yi, J. Zhong, F. Zhang, S. Ji, R. Liao, Y. Wang, H. Li, Z. Liu, Y. Wang, T. Yokota, X. Liu, K. Fukuda, X. Chen, and T. Someya, “A 1.3-micrometre-thick elastic conductor for seamless on-skin and implantable sensors”, *Nature Electronics*, Vol. 5, pp. 784-793, 2022
11. R. Liu, Z. L. Wang, K. Fukuda, and T. Someya, “Flexible self-charging power sources”, *Nature Reviews*

12. M. Takakuwa, K. Fukuda, T. Yokota, D. Inoue, D. Hashizume, S. Umezu, and T. Someya, “Direct gold bonding for flexible integrated electronics”, *Science Advances*, Vol. 7, eabl6228, 2021
13. J. Zhong, Z. Li, M. Takakuwa, D. Inoue, D. Hashizume, Z. Jiang, Y. Shi, L. Ou, M. O. G. Nayeem, S. Umezu, K. Fukuda, and T. Someya, “Smart Face Mask based on an Ultrathin Pressure Sensor for Wireless Monitoring of Breath Conditions”, *Advanced Materials*, 2021.
14. S. I. Rich, S. Lee, K. Fukuda, and T. Someya, “Developing the Nondevelopable: Creating Curved-Surface Electronics from Nonstretchable Devices”, *Advanced Materials*, 34, 210668, 2021.
15. M. Saito, E. Kanai, H. Fujita, T. Aso, N. Matsutani, and T. Fujie, “Flexible induction heater based on the polymeric thin film for local thermotherapy”, *Adv. Funct. Mater.*, Vol. 31, 2102444, 2021.
16. W. Y. Li, A. Takata, H. Nabae, G. Endo, and K. Suzumori, “Shape Recognition of a Tensegrity With Soft Sensor Threads and Artificial Muscles Using a Recurrent Neural Network”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 6, pp. 6228–6234, 2021
17. R. Liu, M. Takakuwa, A. Li, D. Inoue, D. Hashizume, K. Yu, S. Umezu, K. Fukuda, T. Someya, “An Efficient Ultra-Flexible Photo-Charging System Integrating Organic Photovoltaics and Supercapacitors”, *Adv. Energy Mater.*, 2020.
18. Asuka Ishiki, Hiroyuki Nabae, Akio Kodaira, Koichi Suzumori, “PF-IPMC: Paper/Fabric Assisted IPMC Actuators for 3D Crafts”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 3, 2020.
19. R. Mukaide, M. Watanabe, K. Tadakuma, Y. Ozawa, T. Takahashi, M. Konyo, and S. Tadokoro, "Radial-Layer Jamming Mechanism for String Configuration," *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020.
20. M. Watanabe, K. Tadakuma, M. Konyo, and S. Tadokoro, "Bundled Rotary Helix Drive Mechanism Capable of Smooth Peristaltic Movement," *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020.
21. H. Kimura, K. Fukuda, H. Jinno, S. Park, M. Saito, I. Osaka, K. Takimiya, S. Umezu, and *T. Someya, “High Operation Stability of Ultraflexible Organic Solar Cells with Ultraviolet-Filtering Substrates”, *Advanced Materials*, 31, 1808033, 2019.
22. Z. Jiang, K. Fukuda, W. Huang, S. Park, R. Nur, M. O. G. Nayeem, K. Yu, D. Inoue, M. Saito, H. Kimura, T. Yokota, S. Umezu, D. Hashizume, I. Osaka, K. Takimiya, and T. Someya, “Durable Ultraflexible Organic Photovoltaics with Novel Metal-Oxide-Free Cathode”, *Advanced Functional Materials*, 29, 1808378, 2019.
23. A. Kodaira, K. Asaka, T. Horiuchi, G. Endo, H. Nabae, and K. Suzumori, “IPMC Monolithic Thin Film Robots Fabricated through a Multi-Layer Casting Process”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2), pp. 1335-1342, 2019.
24. S. Park, S. Won Heo, W. Lee, D. Inoue, Z. Jiang, K. Yu, H. Jinno, D. Hashizume, M. Sekino, T. Yokota, K. Fukuda, K. Tajima, and T. Someya, “Self-powered ultra-flexible electronics via nano-grating-patterned organic photovoltaics”, *Nature*, 516, pp. 516-521, 2018.
- 【しなやかな知能に関するもの】
25. Y. Yamada, H. Ito, and S. Maeda, “Artificial temperature-compensated biological clock using temperature-sensitive Belousov-Zhabotinsky gels”, *Scientific Reports*, Vol. 12, 22436, 2022.
26. Mitsumasa Nakajima, *Katsuma Inoue, Kenji Tanaka, Yasuo Kuniyoshi, Toshikazu Hashimoto, and Kohei Nakajima, “Physical deep learning with biologically inspired training method: gradient-free approach for physical hardware”, *Nature Communications*, Vol. 13, 7847, 2022.
27. Y. Yamada, Y. Otsuka, Z. Mao, and S. Maeda, “Periodical propagation of torsion in polymer gels”, *Scientific Reports*, Vol. 12, 16679, 2022.
28. K. Tanaka, Y. Minami, Y. Tokudome, K. Inoue, Y. Kuniyoshi, and K. Nakajima, “Continuum-body-pose estimation from partial sensor information using recurrent neural networks”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 7, No. 4, pp. 11244-11251, 2022.
29. W. Sun, N. Akashi, Y. Kuniyoshi and K. Nakajima, “Physics-Informed Recurrent Neural Networks for Soft Pneumatic Actuators”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 7, No. 3, pp. 6862-6869, 2022.
30. Seiji Wakabayashi, Takayuki Arie, Seiji Akita, Kohei Nakajima, and Kuniharu Takei, “A Multitasking Flexible Sensor via Reservoir Computing”, *Advanced Materials*, 2201663, 2022.
31. K. Tanaka, Y. Tokudome, Y. Minami, S. Honda, T. Nakajima, K. Takei, and K. Nakajima, “Self-organization of remote reservoirs: transferring computation to spatially distant locations”, *Advanced Intelligent Systems*, 2100166, 2021
32. Y. Lu, Y. Fujita, S. Honda, S.-H. Yang, Y. Xuan, K. Xu, T. Arie, S. Akita, and K. Takei, “Wireless and flexible skin moisture and temperature sensor sheets toward the study of thermoregulator center”, *Advanced Healthcare Materials*, Vol. 10, 202100103, 2021.
33. K. Inoue, K. Nakajima, and Y. Kuniyoshi, “Designing spontaneous behavioral switching via chaotic itinerancy”, *Science Advances*, vol. 6, No. 46, eabb3989, 2020.
34. N. Kawamoto, H. Ito, I. T. Tokuda, and H. Iwasaki, “Damped circadian oscillation in the absence of KaiA in *Synechococcus*”, *Nature communication*, 2020.
35. K. Nakajima, K. Fujii, M. Negoro, K. Mitarai, and M. Kitagawa, “Boosting computational power through spatial multiplexing in quantum reservoir computing”, *Physical Review Applied*, 11, 34021, 2019.
36. Sugi T, Ito H, Nishimura M, and Nagai KH, “C. elegans collectively forms dynamical networks”, *Nature*

Communications, 10, 683, 2019.

37. V. Caccuciolo, J. Shintake, Y. Kuwajima, S. Maeda, D. Floreano, H. Shea, Stretchable pumps for soft machines Nature 572, 2019/8 pp.516-519

【主な受賞】

1. ソンヨンア, 鳴海拓志, 新山龍馬, Innovative Technologies 2022, 一般財団法人デジタルコンテンツ協会, 2022.11
2. Gembong Edhi Setyawan, et al., Best Paper Award, International Conference of Sustainable Information Engineering and Technology, 2022.11
3. R. Terajima, et al., Best Paper Awards, 2022 IEEE 5th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), 2022.4
4. 松下和磨, 森本雄矢, 竹内昌治, 日本機械学会論文賞, 2022.4
森本雄矢, 船井学術賞, 船井情報科学振興財団, 2022.5
5. W. Sun, et al., MHS2021 Best Paper Award, MHS2021, 2021.12
6. Yuchen Wang, et al., MHS2021 Best Paper Award, MHS2021, 2021.12
7. 竹井邦晴, 丸文学術賞, 一般財団法人丸文財団, 2021.3
8. 森本雄矢ほか, 8th Advanced Robotics Paper Awards, Advanced Robotics Best Paper Award, 日本ロボット学会, 2020.10
9. 新竹純, 令和2年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞, 文部科学省, 2020.4.8
10. Kenjiro Tadakuma, et al., MHS2019 Best Paper Award, IEEE, 2019.12
11. 福田憲二郎, 船井学術賞, 船井情報科学振興財団, 2020.2
12. 竹井邦晴, 船井学術賞, 船井情報科学振興財団, 2020.2
13. 望山洋, Wired Creative Hack Award 2019 特別賞, Wired 日本版 2019.12
14. 難波江裕之, SICE International Young Authors Award for IROS 2019, 計測自動制御学会, 2019/11/07
15. 藤枝俊宣, 2019年度日本生体医工学会 臨床応用研究賞・荻野賞, 日本生体医工学会, 2019.6
16. 福田憲二郎, 平成31年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞, 文部科学省 2019.4
17. 藤枝俊宣, Biomaterials Science Emerging Investigators 2019, Royal Society of Chemistry Journal: Biomaterials Science, 2019.1

ホームページ等

<https://softrobot.jp/>