

令和 2 年 4 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (特設分野研究)

研究期間：2016～2019

課題番号：16KT0099

研究課題名(和文) 自切する生物から切り拓くスーパーレジリエントなシステムの設計論

研究課題名(英文) Design principle of super-resilient system inspired by creature that can autotomize

研究代表者

加納 剛史 (Kano, Takeshi)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：80513069

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：現在の人工物は、故障や環境変化に対する適応が著しく困難である。この問題解決のため、外敵に襲われると腕を自ら切断して残存腕が何本であろうとも非構造的な実世界環境下を自在に逃げ回ることができるクモヒトデに着目し、生物実験、数理モデリング、ロボット実機実験を組み合わせたアプローチにより、クモヒトデのロコモーションに内在する制御原理の解明を試みた。具体的には、クモヒトデの腕切断時の腕内・腕間協調様式を観察し、その知見に基づき数理モデルを構築した。そして、クモヒトデ型ロボットを用いて提案モデルの妥当性を示した。また、周口神経環を部分的に切断する実験を行い、クモヒトデの進行方向決定メカニズムも解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

移動ロボットが未知の実世界環境下で動き回るためには、ロボットの一部分が故障してもリアルタイムに適応し、移動能力を維持することが不可欠である。しかしながら、従来のロボットは想定外の故障に即座に適応するのは困難であった。本成果は、世界で初めて想定外の故障に即座に適応可能なロボットを実現できた点で意義深く、今後災害現場などの過酷な環境下でも機能できる移動ロボットの実現へと道が切り拓かれると期待される。また、理学的観点においては、動物が身体の一部に傷害を負ったときに、身体の協調の仕方を適切に変えて動く原理の解明にもつながると期待できる。

研究成果の概要(英文)：Current artificial systems have difficulty in adapting to their physical damages and changes in the environment. To address this issue, we focused on brittle stars which can occasionally lose some of their arms and promptly coordinate the remaining arms to escape from predators, and aimed to elucidate the control mechanism underlying their resilient locomotion through behavioral experiments, mathematical modeling, and robot experiments. Specifically, we observed the way of inter- and intra-arm coordination during the locomotion of brittle stars whose arms were partially removed, and proposed a mathematical model on this basis. The proposed model was validated by real-world experiments with a brittle star-like robot developed. We also performed behavioral experiments in which circumoral nerve ring was partially transected, and clarified the mechanism for the determination of moving direction.

研究分野：ロボティクス

キーワード：自律分散制御 レジリエンス 生物模倣ロボット クモヒトデ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、移動ロボットは、災害現場や宇宙環境などの人間が到達できないような過酷な環境下でも適切に機能することが期待されている。その上で問題となっているのが、多くのロボットは少しでも故障が起こるとその影響がロボット全体におよび、たちまち機能が破綻してしまうということである。

これまでも、この問題を解決するための方法がいくつか提案されてきた。一つは、予め起こりうる故障への対応策を用意しておき、故障を検出した際にそれを用いるという手法である[1]。しかしながら、これでは想定外の故障が起こった時に対応することが不可能である。もう一つは、学習や試行錯誤を通して故障に応じた動き方をロボットが獲得するという方法である[2, 3]。この方法は想定外の故障にも適応できるが、計算量が多いため適応するのに数十秒～数分もの時間を要してしまう。以上からわかるように、「想定外の」故障に対して「即座に」適応可能な移動ロボットの実現方法は確立していない。

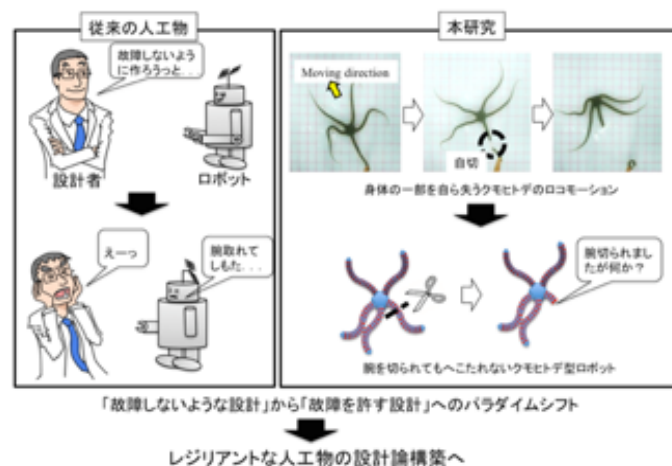


図1：本研究の目的

2. 研究の目的

上記問題解決のため、クモヒトデという、盤と5本の腕からなる棘皮動物に着目した。クモヒトデは、外敵に襲われると腕を自切し、残存腕が何本であろうとも非構造的な実世界環境下を機敏に逃げ回る(図1)。即ちクモヒトデは、「故障しないように」設計されている現在的人工物とは対照的に、「故障(身体一部の欠損)を許容する」という戦略を採っているのである。上記のクモヒトデの振る舞いは、上位の周口神経環と下位の放射神経からなる極めて単純な分散神経系により実現されている。この事実から鑑みるに、クモヒトデには、下位での部分最適解を上位で統合して全体最適解を導き出す、階層性を有する精妙な自律分散制御原理が内在し、それが「故障を許容する設計」を可能にしていると考えられる。そこで本研究では、クモヒトデのロコモーションに内在する制御原理を解き明かし、想定外の故障に即座に適応可能な人工物の設計論を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

目的達成のため、生物学者、工学者、数学者が協働し、生物実験、数理モデリング、ロボット実機実験を融合させた独創的なアプローチを採った。生物実験では、腕や周口神経環の一部を切断した際の行動を観察した。得られた知見をもとに数理モデリングを行い、レジリアントな振る舞いに内在する「核」となる制御原理を抽出した。最後に、得られた原理をクモヒトデ型ロボット実機に実装し、その妥当性を実世界検証した。

以上のアプローチを用い、1) 腕間・腕内自由度の協調メカニズム、2) 進行方向の決定メカニズム、に分けて制御原理の理解を試みた。なお、2)については、ロボット実機ではなくシミュレーションにより制御則の妥当性の検証を行った。

4. 研究成果

(1) 腕間・腕内自由度の協調メカニズム

① 行動観察実験

【実験1】

クモヒトデが腕の切断パターンに応じてどのような振る舞いを発現するかについて観察した。まず、各腕の動きをどのように協調させるか(腕間協調メカニズム)に焦点を当てるため、残存腕を短く切断して腕内の自由度を極力取り除き、実験を行った。結果を図2に示す。同図からわかるように、クモヒトデは腕をいかように切断しても難なく推進する。図2(a)-(g)のいずれの切断パターンにも共通して、各腕は接地するや否や地面を蹴り出し、十分に蹴り出した後に腕を進行方向側に振り戻すという傾向が観



図2：実験1

察された。

【実験 2】

腕内自由度の協調メカニズムを探るため、平らな地面の上にゴムでできた四角柱状の物体が複数設置されている環境下で、ロコモーションを観察した。結果を図 3 に示す。同図より、クモヒトデは物体を積極的に活用して推進していることがわかる。ここで注意されたいのは、腕が物体に接した時の反応は腕と物体のぶつかり方によって異なるという点である。物体から得られる反力が推進の助けになるような場合は腕を積極的に物体に押し付けているが（図 3 黒矢印）、逆に推進の妨げになる場合は物体をすり抜けるように腕を前方に運んでいる（図 3 白矢印）。すなわち、クモヒトデは「推進に利する手応え」は積極的に活用し、「推進を妨げる手応え」は活用しないということが明らかになった。

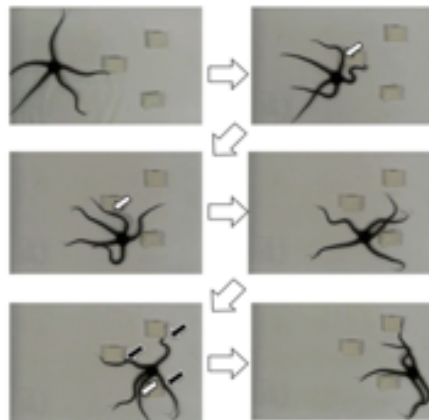


図 3 : 実験 2

②数理モデリング

まず、実験 1 の結果をもとに、腕間協調メカニズムの数理モデリングを行った。以下その概要を説明する（図 4）。

身体は盤と 5 本の腕から成り、各腕はヨー方向とピッチ方向の二自由度を有している。各関節は以下の自律分散的なメカニズムにより駆動される。まず、何らかの刺激により進行方向が決定されると仮定する。各腕はランダム力を受け、それにより環境と相互作用する。その結果環境から受けた反力が推進に利する場合、その反力が増すようにフィードバックが働き（パワーストローク）、ヨー関節角が閾値に達すると腕を地面から浮かせて振り戻す（リカバリstroーク）。逆に、環境から受けた反力が推進を妨げる場合、反射メカニズムは働かない。

以上からわかるように、本モデルの鍵は、「環境から受ける手応えを瞬時に判別し、推進に利する手応えのみを積極的に活用する」という自律分散制御則が用いられている点である。筆者らはこの制御則を「手応え制御」と呼ぶことにした。

次に、実験 2 の知見に基づき、上述の手応え制御を発展させることで、腕内協調と腕間協調が連関した自律分散制御則を提案した。その詳細については紙面の都合上割愛する。

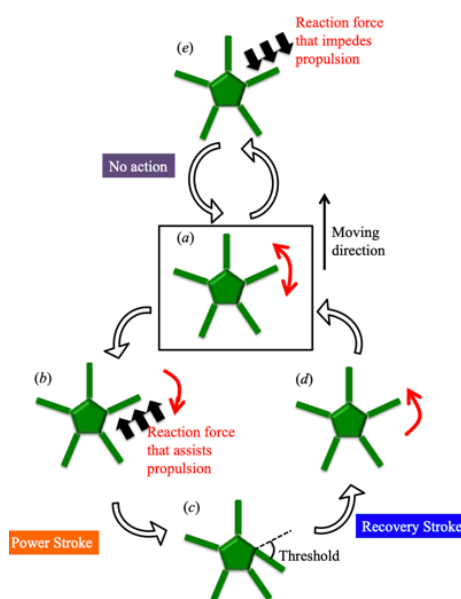


図 4 : 手応え制御則の概要

③ロボット実機実験

前節で述べた手応え制御則の実世界での妥当性を検証するため、クモヒトデ型ロボット実機を開発した。今回開発したロボット実機 PENTABOT II を図 5 に示す。PENTABOT II は、金属板でできた盤と 5 本の腕から構成され、盤の直径 0.18 m、腕の長さ 0.13 m、重量 0.87 kg である。盤中央部には、電源管理およびマイクロコンピュータ間通信用の基板が搭載されている。ロボットの各腕はヨー関節とピッチ関節の 2 自由度を有し、各関節に実装されたサーボモータにより駆動される。

以上の自律分散制御則をロボット実機に実装し振る舞いを観察した。まず、ロコモーション中に 1 本の腕を破壊した（図 6）。腕が破壊されても即座に適応し、残存腕を協調させて推進していることがわかる。次に、様々な腕の切断パターンに対して実験を行った。その結果腕の協調パターンが実際のクモヒトデの振る舞い（図 2）とよく一致した。以上より、提案制御則の妥当性が確かめられた。

次に、腕に多自由度を有するクモヒトデ型ロボットを開発して実機実験を行い、腕内協調と腕間協調が連関した自律分散制御則の妥当性を確かめた。詳細は紙面の都合上割愛する。



図 5 : ロボット PENTABOT II

(2) 進行方向の決定メカニズム

紙面の都合上、概要のみ述べる。周口神経環を様々に切断し、忌避刺激を与えた際の振る舞いを観察した。その結果、切断箇所や忌避刺激を与えた箇所と反対方向にクモヒトデが推進することが明らかになった。この行動観察結果をもとに数理モデルを構築し、シミュレーションにより振る舞いを定性的に再現することに成功した。以上により、クモヒトデが進行方向を決定するメカニズムが明らかになった。

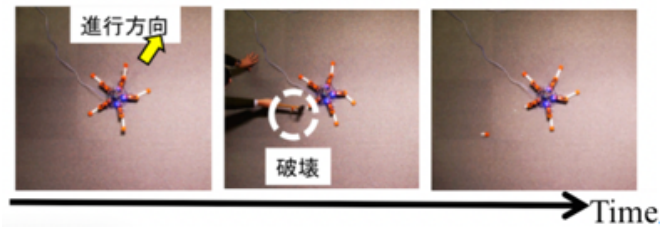


図6：ロボット実験結果

- [1] Blanke M et al. 2006 *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*.
- [2] Bongard J, Zykov V, Lipson H. 2006, *Science* **314**, 1118-1121.
- [3] Cully A et al. 2015 *Nature* **521**, 503-507.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Elizabeth G. Clark, Daichi Kanauchi, Takeshi Kano, Hitoshi Aonuma, Derek E. G. Briggs, and Akio Ishiguro	4. 巻 222
2. 論文標題 The function of the ophiuroid nerve ring: how a decentralized nervous system controls coordinated locomotion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Experimental Biology	6. 最初と最後の頁 jeb192104
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1242/jeb.192104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Kano, E. Sato, T. Ono, H. Aonuma, Y. Matsuzaka, A. Ishiguro	4. 巻 4
2. 論文標題 A Brittle Star-like Robot Capable of Immediately Adapting to Unexpected Physical Damage	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Royal Society Open Science	6. 最初と最後の頁 171200
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1098/rsos.171200	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kano Takeshi, Kanauchi Daichi, Aonuma Hitoshi, Clark Elizabeth G., Ishiguro Akio	4. 巻 13
2. 論文標題 Decentralized Control Mechanism for Determination of Moving Direction in Brittle Stars With Penta-Radially Symmetric Body	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Neurobotics	6. 最初と最後の頁 66
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnbot.2019.00066	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kano Takeshi, Kanauchi Daichi, Ono Tatsuya, Aonuma Hitoshi, Ishiguro Akio	4. 巻 13
2. 論文標題 Flexible Coordination of Flexible Limbs: Decentralized Control Scheme for Inter- and Intra-Limb Coordination in Brittle Stars' Locomotion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Neurobotics	6. 最初と最後の頁 104
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnbot.2019.00104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 T. Kano, D. Kanauchi, H. Aonuma, and A. Ishiguro,
2. 発表標題 Decentralized Control Mechanism Underlying Inter- and Intra-arm Coordination in Brittle Star 's Locomotion
3. 学会等名 The 16th International Echinoderm conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 金内大地, 加納剛史, 石黒章夫
2. 発表標題 クモヒトデに学ぶ階層的な自律分散制御則の実機検証
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 金内 大地 , 加納 剛史, Elizabeth G. Clark, 青沼 仁志, 石黒 章夫
2. 発表標題 回転対称な身体を有するクモヒトデの進行方向はどのように決まるのか？
3. 学会等名 第31回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加納剛史
2. 発表標題 クモヒトデのロコモーションから探る故障に強いシステムの設計論
3. 学会等名 電気学会東北支部第2回産学連携研究会 (招待講演) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takeshi Kano
2. 発表標題 Inter-limb coordination via physical communication during animal locomotion
3. 学会等名 Workshop “On what is in between: An interdisciplinary dialogue around MA(間)” (招待講演)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野達也, 金内大地, 加納剛史, 青沼仁志, 石黒章夫
2. 発表標題 クモヒトデの適応的ロコモーションに内在する階層的な自律分散制御則の解明
3. 学会等名 第29回自律分散システムシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 金内大地, 加納剛史, 石黒章夫
2. 発表標題 柔軟な腕の協調により推進可能なクモヒトデ型ロボットの開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2017 (ROBOMECH2017)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 石田 秀輝 (監修)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 文研出版	5. 総ページ数 152
3. 書名 ビジュアル解説! 自然から学ぶすごい技を持つ生き物図鑑	

〔産業財産権〕

〔その他〕

東北大学プレスリリース
<http://www.tohoku.ac.jp/japanese/2017/12/press20171211-01.html>New Atlas (2017.12.15)
<https://newatlas.com/brittle-star-robot/52624/>
 Electronics 360 (2017.12.14)
<https://electronics360.globalspec.com/article/10634/watch-robot-that-can-adapt-to-physical-damage-was-inspired-by-brittle-stars>
 ScienceDaily (2017.12.14)
<https://www.sciencedaily.com/releases/2017/12/171214100840.htm>
 Asian Scientist (2017.12.25)
<https://www.asianscientist.com/2017/12/tech/starfish-inspired-robots-adaptation/>
 Phys Org (2017.12.15)
<https://phys.org/news/2017-12-brittle-stars-robots-physical.html>
 日本経済新聞(2017.12.13)
https://www.nikkei.com/article/DGXLRS465712_R11C17A2000000/
 日本経済新聞 (2018.2.25)
<https://www.nikkei.com/article/DGKKZ027303840T20C18A2MY1000/>
 産経新聞 (2018.1.25)
<http://www.sankei.com/premium/news/171223/prm1712230015-n1.html>
 日刊工業新聞(2017.12.14)
<https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00454713>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	青沼 仁志 (AONUMA Hitoshi) (20333643)	北海道大学・電子科学研究所・准教授 (10101)	
研究 協力者	石黒 章夫 (ISHIGURO Akio) (90232280)	東北大学・電気通信研究所・教授 (11301)	