

平成 29 年 12 月 14 日

東北大学 電気通信研究所
科学技術振興機構(JST)
北海道大学
東北大学 大学院医学系研究科

**クモヒトデに学んだ，想定外の故障に
「即座に」適応可能な移動ロボット
シンプルな数式でクモヒトデの複雑な動きを表現**

【概要】

東北大学電気通信研究所の石黒章夫(いしぐろあきお)教授，加納剛史(かのうたけし)准教授，佐藤英毅(さとうえいき)氏(大学院修士課程，当時)，小野達也(おのたつや)氏(大学院修士課程，当時)，北海道大学電子科学研究所の青沼仁志(あおぬまひとし)准教授，東北大学大学院医学系研究科の松坂義哉(まつざかよしや)講師(現 東北医科薬科大学教授)の研究グループは，想定外の故障に対して即座に適応できる移動ロボットの開発に世界で初めて成功しました。

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す。しかしながら，従来のロボットは想定外の故障に適応するのに数十秒～数分もの時間を要していました。この問題解決のため本研究では，原初的な棘皮(きょくひ)動物^{注1}であるクモヒトデに着目しました。クモヒトデには「脳」のような高度な情報処理を担う中枢神経系はなく，放射神経と呼ばれる単純な神経系しかないにもかかわらず，5本の柔軟な腕を適切に協調させて推進することが可能です。さらには，外敵に襲われるなどして腕を失った際(自ら腕を切断することもあります)，残った腕が何本であろうともそれらを即座に協調させて推進し続けることができます。このようにクモヒトデは，驚異的な耐故障性を有しています。

本研究では，腕を除去あるいは短くしたクモヒトデの観察結果をもとに，「各腕が環境から進行方向側に反力を受けたときにのみ地面を蹴る」という，極めてシンプルな数式で記述される自律分散制御則を設計しました。そして，この制御則をクモヒトデ型ロボットに実装したところ，腕をいかように破壊しても数秒以内に適応して動き続けることができました。

この成果は，想定外の事象に対処可能な適応能力の高いロボットを実現するための基盤技術を提供し，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

実現へと道を切り拓くと期待されます。また、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ます。

本研究成果は、2017年12月13日(日本時間17時00分)に英国の科学誌 Royal Society Open Science 電子版に掲載されました。

<参考図> ※最終ページに動画 URL 案内あり

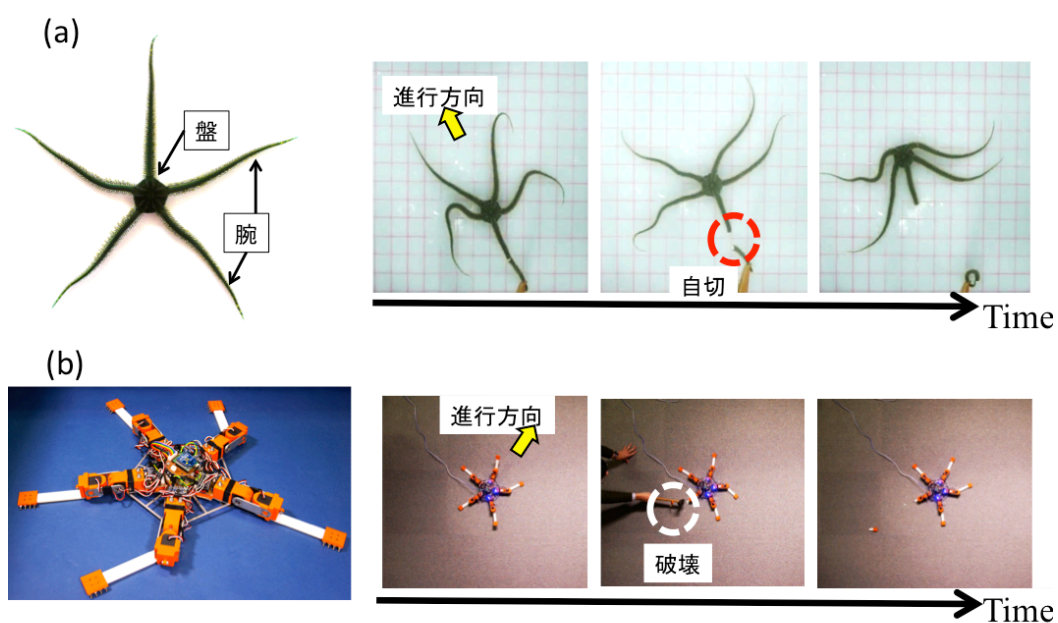


図1 (a) クモヒトデの全体像(左)と腕を自ら切断して推進する様子(右)。(b)開発したクモヒトデ型ロボット PENTABOT II(左)と、腕を破壊した時のロボットの運動の様子(右)。ロボットの腕をいかように破壊しても即座に適応し、残った腕を協調させて推進し続けることが可能。

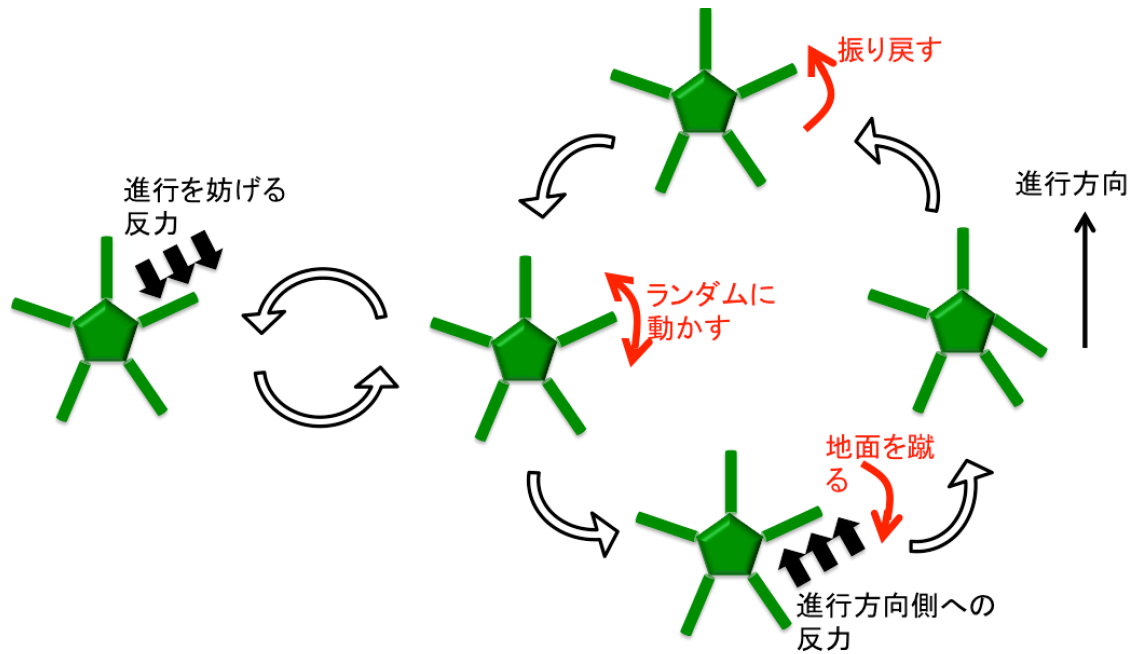


図 2 提案した制御則の概要。まずそれぞれの腕をランダムに動かす。その結果、環境から進行方向側に反力(押し返される力)を受けたならば地面を蹴り、地面を蹴りきったら腕を地面から上げて進行方向側に振り戻す。得られた反力が進行の妨げとなる場合は何もしない。脳に相当するメインコンピュータは存在せず、それぞれの腕が自身のセンサー情報を用いて単純な判断を行うだけで、適切な振る舞いをリアルタイムに生み出すことができる。

【研究の背景】

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ます。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す。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ました。

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す[参考文献 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できません。

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やり方です[参考文献 2,3]。この方法は想定外の故障にも適応できますが、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います。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ません。

【研究の方法】

多くの動物は身体の一部に傷害を受けても即座に適応することが可能です。そこで本研究では動物の動きに着想を得ることにしました。その中でも特に、クモヒトデという動物に着目しました。クモヒトデは、盤と5本の腕からなる五放射相称の身体構造をした棘皮動物です。興味深いことに、外敵に襲われるなどして腕を失った際（自ら腕を切断することもあります）、残った腕が何本であろうともそれらを即座に協調させて動き回ることが可能です(図 1(a))。このような優れた能力を持つクモヒトデですが、驚くべきことにクモヒトデは明確に「脳」と呼べるような中枢神経を有しておらず、盤のなかの周口神経環と腕の中に伸びる放射神経からなる単純な神経系しか存在しません。このことから、クモヒトデの故障への適応能力は、局所的な感覚情報をもとに身体各所において動作を決定する自律分散的な制御により実現されていると考えられます。

本研究では、腕を除去あるいは短くしたクモヒトデの行動観察結果をもとに、以下の自律分散制御^{注2}則を構築しました(図 2)。まず腕をランダムに動かし、環境からの反力(押し返される力)を検出します。進行方向側への反力を得た場合は、その腕を動かすことで前に進めることを意味するので、積極的に地面を蹴り、蹴りきったら腕を地面から上げて進行方向側に振り戻します。逆に、得られた反力が進行の妨げとなる場合は何もしません。この動作をそれぞれの腕が行うだけです。この制御則をシンプルな数式で記述し、開発したクモヒトデ型ロボットに実装しました。そして、腕を破壊した際に実際のクモヒトデのように即座に適応できるかどうかを調べました。

【成果の内容】

クモヒトデ型ロボットが5本の腕を活用して推進している最中に、1本の腕をハンマーで破壊した時の様子を図 1(b)に示します。腕を破壊後、即座(数秒以内)に残りの

腕を協調させて推進していることがわかります。さらに腕を破壊していったところ、残存腕が 1~3 本の場合でも推進し続けることを確認しました。また、ロボットの腕の協調パターンや移動速度を定量的に評価したところ、実際のクモヒトデとおおむね合致しました。

【研究の意義】

本研究の成果は、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構築につながると期待されます。本研究で提案した制御則は、従来の多くのロボットに採用されている中央集権的な制御方策(脳に相当するメインコンピュータが身体各部位に逐一動作指令を送る制御方策)ではありません。「動作の結果得られた感覚情報が望ましければその動作を継続し、そうでなければその動作をやめる」ことを各腕が行うという、きわめてシンプルな数式で記述される自律分散的な制御方策を用いています。それゆえ、想定外の故障が起きても少ない計算量で即座に適應することができます。従来のロボット工学の枠組みとは本質的に異なるこの制御手法の適用先は、必ずしもクモヒトデ型ロボットに限定されず、想定外の事象に対処可能な適應能力の高いロボットの実現へと道を切り拓くことが期待されます。

さらに、本研究は生物学的な意義も有しています。これまで動物が身体の一部に傷害を負った際にどのように適應していくのかのメカニズムはほとんどわかっていませんでした。本研究の成果はこの問題に対する重要な知見を提供し、動物が有するリアルタイムな適應能力の発現原理の解明につながると期待されます。

【用語説明】

注 1 棘皮動物:

五放射相称の身体構造で、進行方向を決めるような前後左右の体軸を持たない動物。クモヒトデの他、ウニ、ヒトデ、ナマコ、ウミユリなどが棘皮動物に属する。

注 2 自律分散制御:

単純な知覚・判断・行動出力を持つ要素が多数集まって全体としての機能を発揮する制御方策。

【研究助成資金等】

科学技術振興機構 CREST「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」
研究領域の研究課題「環境を友とする制御法の創成」(研究代表者:小林亮)
JPMJCR14D5 (主たる共同研究者:石黒章夫, 青沼仁志)

日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究(A) 24246074 (研究代表者:石黒章夫)

日本学術振興会 学術研究助成基金助成金 基盤研究(B) 16KT0099 (研究代表者:加納剛史)

東北大学学際科学フロンティア研究所 領域創成研究 (研究代表者:加納剛史)

【掲載論文名】

“A Brittle Star-like Robot Capable of Immediately Adapting to Unexpected Physical Damage”

(予期せぬ物理的なダメージに対して即座に適応可能なクモヒトデ型ロボット)

Takeshi Kano, Eiki Sato, Tatsuya Ono, Hitoshi Aonuma, Yoshiya Matsuzaka, and Akio Ishiguro

2017 年 12 月 13 日 (英国時間・電子版)

【参考文献】

[1] Blanke M, Kinnaert M, Lunze J Staroswiecki M. 2006 *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Berlin, Heidelberg: Springer. (doi: 10.1007/978-3-540-35653-0)

[2] Bongard J, Zykov V, Lipson H. 2006 Resilient machines through continuous self-modeling, *Science* **314**, 1118–1121. (doi: 10.1126/science.1133687)

[3] Cully A, Clune J, Tarapore D, Mouret JB. 2015 Robots that can adapt like animals. *Nature* **521**, 503–507. (doi: 10.1038/nature14422)

【動画 URL】※12 月 14 日 (木) 10:00 以降に公開

<https://youtu.be/Jq4L4ZKpXq0>

問い合わせ先

(研究に関すること)

東北大学電気通信研究所

教授 石黒章夫

TEL: 022-217-5464

E-mail: ishiguro@riec.tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学電気通信研究所総務係

TEL: 022-217-5420

FAX: 022-217-5426

E-mail: somu@riec.tohoku.ac.jp

(JST の事業に関すること)

戦略研究推進部 ICT グループ

松尾浩司

TEL: 03-3512-3525

FAX: 03-3222-2063

E-mail: crest@jst.go.jp

科学技術振興機構広報課

TEL: 03-5214-8404

FAX: 03-5214-8432

E-mail: jstkoho@jst.go.jp

北海道大学総務企画部広報課

TEL: 011-706-2610

FAX: 011-706-2092

E-mail: jp-press@general.hokudai.ac.jp