

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24246074

研究課題名(和文) 特異な対称構造を持つクモヒトデから探る振る舞いの多様性の発現機序

研究課題名(英文) Toward realization of resilient behavior inspired by ophiuroid locomotion

研究代表者

石黒 章夫 (Ishiguro, Akio)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：90232280

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,300,000円

研究成果の概要(和文)：現在のロボットは、設計時に想定した稼働環境や使用目的に極度に最適化されているため、その振る舞いは著しく単調かつ画一的であり、またそれゆえに環境や身体の変化に対して脆弱である。一方で生物は、身体が持つ膨大な自由度の間に時空間的秩序を生み出すことで、適応的かつ多様な振る舞いを自己組織的に創り出している。本研究では、特異な対称性を持ち、自切する動物であるクモヒトデに着目し、状況依存的に多様かつレジリエントな振る舞いを発現する機序の解明を目的とした。その結果、比較的シンプルな自律分散制御則によって優れた適応性と耐故障性を有する振る舞いを再現できることを実験的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Most robots are vulnerable to changes in environment and their own morphology such as failures. To overcome this problem, we drew inspiration from an ophiuroid, which is a primitive living organism. An ophiuroid, which consists of a central disc and five functionally interchangeable arms that diverge radially from the central disc, can move away from predators or harmful stimuli by autotomizing its arms. Very interestingly, an ophiuroid can maintain locomotion after losing its arms arbitrarily.

In this study, we modeled the control principle underlying this resilient behavior. We showed that a simple decentralized control scheme could well reproduce that behavior by performing numerical simulations as well as experiments with real physical ophiuroid-like robots.

研究分野：システム工学，ロボット工学，数理生物学

キーワード：自律分散制御 クモヒトデ 肢間協調 肢内協調 振る舞いの多様性

1. 研究開始当初の背景

振る舞いの多様性は、生物とロボットを決定的に分け隔てる知の属性であると言っても過言ではない。現在のロボットは、設計時に想定した稼働環境や使用目的に極度に最適化されているため、その振る舞いは著しく単調かつ画一的であり、またそれゆえに環境変化に対して脆弱である。一方で生物は、身体が持つ膨大な自由度の間に時空間的秩序を生み出すことで、環境適応的かつ多様な振る舞いを自己組織的に創り出している。この発現機序の学理究明と普遍性の高いロジックの構築は、生物制御様式の理解の深化のみならず、既存技術では実現不可能な「環境に応じて多様な振る舞いを生成して適応可能な人工物」の工学的実現にもつながると期待される。

このような知の形態の発現機序を理解する上で、力学系を基盤とした自律分散制御は強力なツールとなり得る。これまでのこのアプローチでは、結合振動子系を基盤とした力学系を考え、脳・神経系（制御系）と身体系（機構系）、そして環境から構成される直積空間内に安定したリミットサイクルを生起させるように自律分散制御則を設計するのが常識であった。このような結合振動子系に基づく描像により、歩行や這行、遊泳といったロコモーション様式における環境適応的な振る舞い生成の原理の考察が進められてきた。

しかしながら従来の描像では、振る舞いの多様性についての考察をするには著しい制約が存在する。なぜならば、従来の描像で記述可能なのは、必然的にすべての自由度がリズムに振る舞うものに限定されるからである。生物が示す驚くほど多様な振る舞いの発現機序を説明しうる理論的基盤の創出は喫緊の課題である。

2. 研究の目的

上述の背景を踏まえ、本研究では、生物が示す適応的かつ多様な振る舞いの発現機序を説明しうる普遍性の高いロジックの構築を目指す(図1)。このためには、適切なモデル生物に着目して最小限の基本論理設定から考察を進めていく方法論が有効である。そこで本研究ではモデル生物としてクモヒトデに着目する。クモヒトデは棘皮動物の一種であり、ヘビのようにしなやかに動く5本の腕が盤(ばん)と呼ばれる胴体部から放射状に伸びた、きわめて特異な身体構造を有している。この特異な対称性(五放射相称)ゆえに、クモヒトデがある方向に移動するためには、一つの腕の内部にある多数の自由度を巧みに制御する腕内協調のみならず、5本の腕の間でリズムに動かすものやそうでないものなどへと状況に応じて巧妙に機能分化させる腕間協調も必然的に要請される。さらに驚くべきは、クモヒトデは自切る動物であることである。クモヒトデは捕食者や忌

避物質に遭遇すると、腕の一部を自ら切断し、残存腕を巧みに協調させて新たなロコモーション様式を自己組織的に生み出して逃避する。このように驚くべき振る舞い生成能力を有しているが、クモヒトデは棘皮動物であるため、単純な神経系しか有していない。図2にクモヒトデの神経系の構造を示す。同図に示すように、クモヒトデの神経系は、放射神経と周口神経環のみから構成された、きわめて単純な構造を有している。このため、クモヒトデには、適応的かつ多様な振る舞いを発現するシンプルベストな自律分散制御様式がもっとも端的なかたちで内在しているはずである。

そこで本研究では、クモヒトデをモデル生物として採り上げ、その適応的かつ多様な振る舞いの発現機序を説明しうる自律分散制御則の数理モデル化ならびにその実験的検証を目的とした。

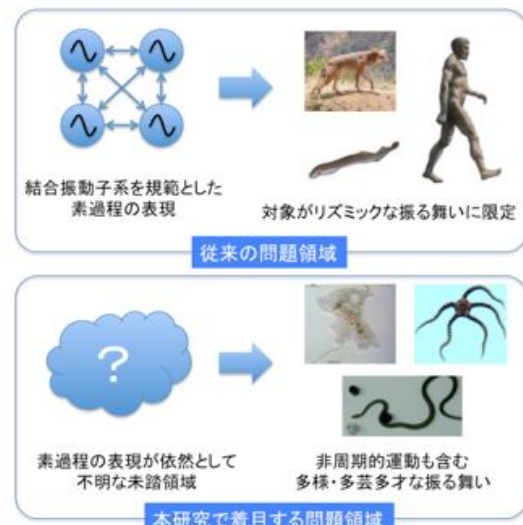


図1：本研究の立場

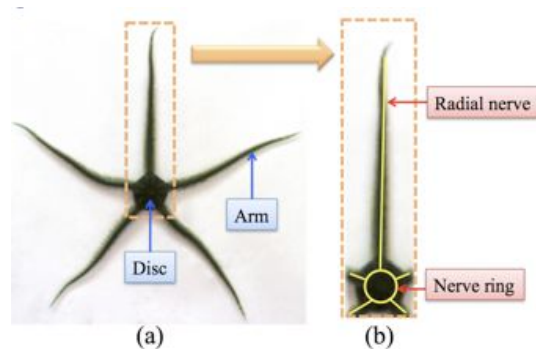


図2：クモヒトデの神経系の構造

3. 研究の方法

クモヒトデは、生物学においてはきわめてマイナーな存在であるため、その行動に関する学術的報告はごく少数の論文に限られており、なおかつそれらは簡単な運動学的考察にとどまっているのが現状である[1]。それ

以下、各項目に関する研究成果を説明する。

4. 研究成果

1) 振る舞いの多様性の発現機序解明

ここでは、クモヒトデが5本の腕をリズムに動かすものやそうでないものなどへと状況に応じて巧妙に機能分化させる腕間協調メカニズムに焦点を当てた。

まず、行動観察を行った。結果を図3に示す。同図から、進行方向に投げ出しセンシングを行う leading arm (非周期的運動)、大きく振って漕ぐように推進力を生成する side arm (周期的運動)、そして受動的で推進に寄与しない posterior arm (非周期的運動)へ機能を分化させて推進していることがわかる。また、これらの腕の機能は外部からの誘引・忌避刺激に応じて状況依存的に変化し、全方向へロコモーションを生成可能であることも確認した。

上記行動観察結果を再現すべく、自律分散制御に基づく数理モデルを構築した。モデル構築にあたり、各腕が示す周期的・非周期的運動の双方を記述可能な素過程を用いる必要がある。そこで、ここでは振動性・興奮性を記述可能な Active Rotator モデル[2]を用いた。Active Rotator モデルは以下の式で与えられる：

$$\dot{\phi}_i = \omega - a_i \cos \phi_i$$

ただし、 ϕ_i は位相、 ω は固有角速度を表す。ここで、パラメータ a_i の値によって図4に示す3つの状態を取り得ることに注意されたい。 $|a_i| < \omega$ の時は、角速度 $\omega - a_i \cos \phi_i$ で位相が増え続けるため、振動性(周期的運動)を示す。一方、 $a_i > \omega$ および $a_i < -\omega$ の場合には、 $\omega - a_i \cos \phi_i = 0$ を満たす安定平衡点と不安定平衡点が生じ、外乱などが加わらない限り安定平衡点の位相に収束して動かない興奮性(非周期的運動)を示す(以下、 $a_i > \omega$ の場合の興奮性を「正の興奮性」、 $a_i < -\omega$ の場合の興奮性を「負の興奮性」と呼ぶ)。この振動性、正の興奮性、負の興奮性をそれぞれクモヒトデの side arm, leading arm, posterior arm に対応づけて腕の運動を記述することとした。具体的には、腕の機能の動的な変更を実現するために、 a_i の時間発展を、外部からの誘引刺激、他の腕との間の神経結合、環境から受ける反力を考慮して設計した。モデルの詳細は紙面の都合上割愛する。

次に、提案モデルの妥当性を検証するため、ロボット実機 PENTABOT を開発した(図5)。PENTABOT は、中央にある盤と盤から放射状に伸びる5本の腕から構成され、盤の直径0.15[m]、腕の長さ0.16[m]、高さ0.16[m]、重量は0.98[kg]である。各腕には関節駆動用のサーボモータが2個搭載されており、pitch 軸方向と yaw 軸方向に回転可能となっている。また各腕には、床反力計測用のポテンシオメータが搭載されている。

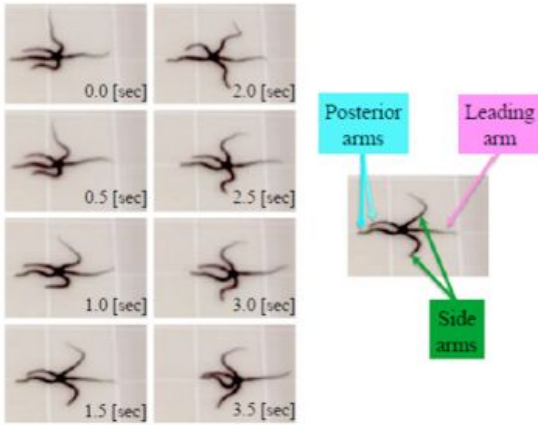


図3：腕の機能分化に関する行動観察実験

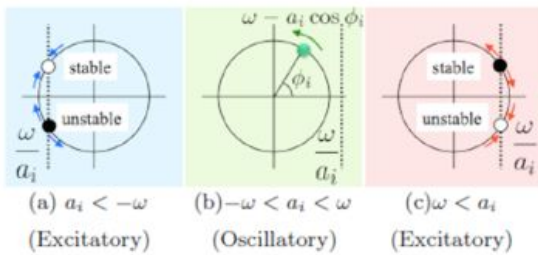


図4：Active rotator モデル

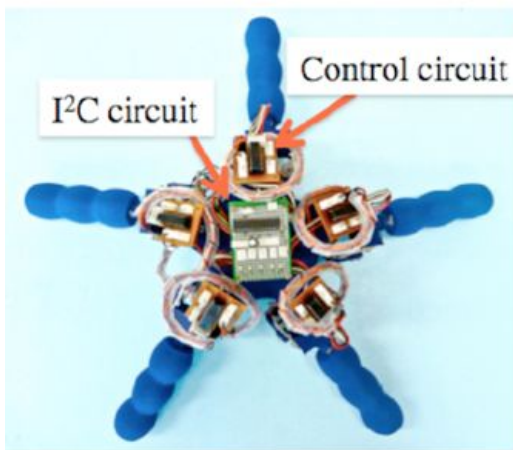


図5：クモヒトデ型ロボット PENTABOT

ゆえ、本研究ではみずから行った行動観察実験の結果をもとに現象論的な数理モデルを構築し、それをロボットに実装して振る舞いを再現するという構成論的アプローチを用いて、クモヒトデの適応的かつ多様な振る舞いに内在する自律分散制御則の解明を試みた。

具体的には、以下に示す項目ごとに考察することにした：

- 1) 振る舞いの多様性の発現機序解明
- 2) 腕の故障・欠損への適応メカニズムの解明

ロボット実機を用いた実験結果を図6に示す。同図において、赤丸は誘引刺激を受け leading arm となった腕を示す。ロコモーション時に非周期的な運動を行う leading arm および posterior arm, 周期的な運動を行う side arm へと、腕の機能を適切に分化させている様子が確認できる。

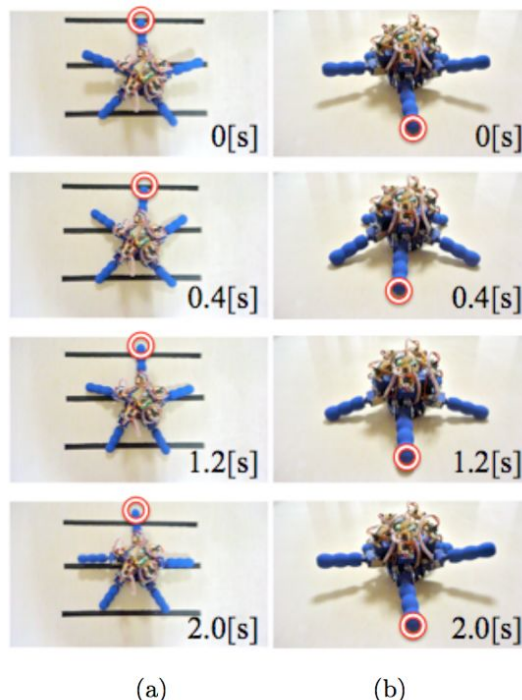


図 6：実機実験結果．腕を適切に機能分化させて推進している．

2) 腕の故障・欠損への適応メカニズムの解明
クモヒトデが腕を欠損した際に残存腕を適切に協調させてロコモーションするメカニズムの解明を試みた。まず、下記の行動観察実験を行った。

【実験 1】

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7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。ここで注意すべきは、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7 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7 白矢印)という点である。すなわち、クモヒトデは推進に利する「手応え」を積極的に活用し、推進を妨げる「手応え」を回避することがわかる。

【実験 2】

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

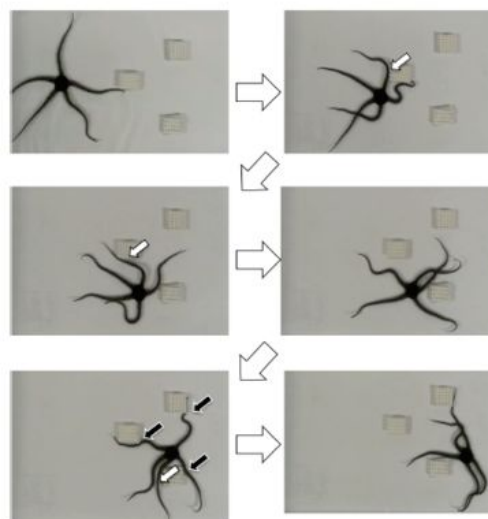


図 7：実験 1

除き、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を観察した。結果を図8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。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察された。

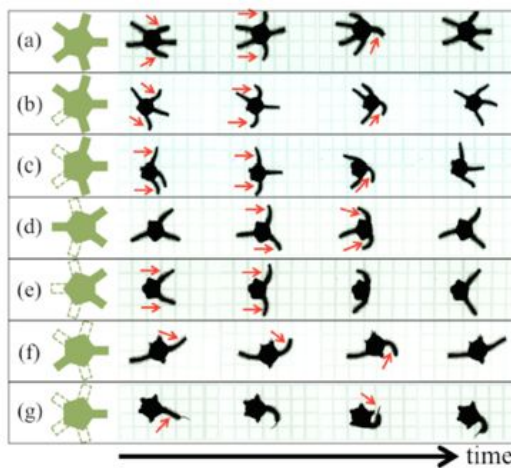


図 8：実験 2

【実験 3】

腕と地面との接触が振る舞いに及ぼす影響を調べるため、5本の腕がすべて短く切断されたクモヒトデを土台の上に乗せて振る舞いを観察した(図9)。同図からわかるように、各腕どうし協調をとれずに腕を乱雑に振り回す様子がみられた。このことから、地面との接触によって生じる感覚情報は腕間協調に不可欠であることがわかる。

以上から得られた知見を以下にまとめる：

- i) ロコモーションをする際に何らかの要因によって対称性が破られ、進行方向が決定されている。

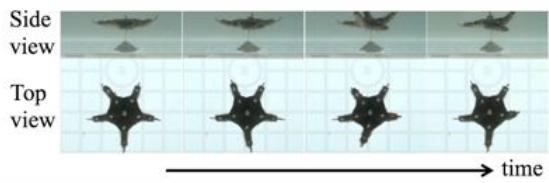


図 9：実験 3

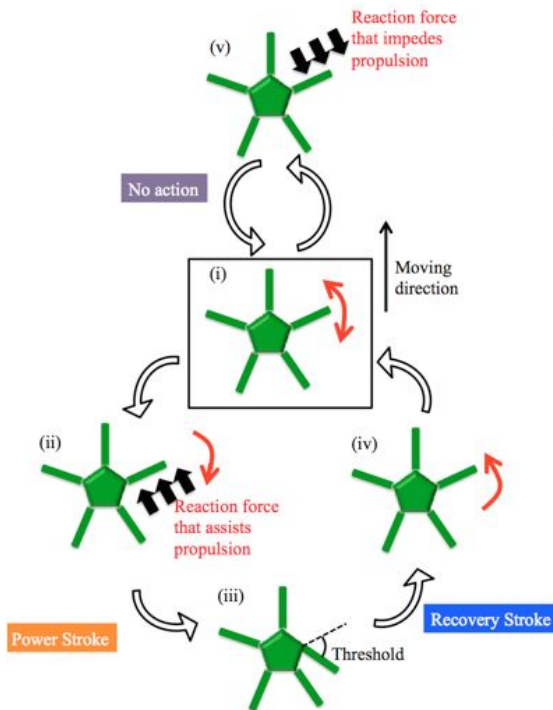


図 10：構築したモデルの概要

- ii) 地面との接触がないとロコモーションできない。
- iii) 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振り戻している。
- iv) 推進に利する「手応え」を積極的に活用し、推進を妨げる「手応え」は活用しない。

上記知見をもとに、自律分散制御に基づく数理モデルを構築した。紙面の都合上、式の詳細は省略するが、その要諦は図 10 に示すとおりである。まず、各腕をランダムに動かし、環境からの反力を取得する(図 10 (i))。得られた反力が推進に利する場合、地面を後方に蹴りだし(図 10(ii))、限界角まで達したら腕を振り戻す(図 10 (iii), (iv))。得られた反力が推進を妨げる場合は、アクションを起こさない(図 10 (v))。

本モデルでは、腕間協調を神経結合により創り出しているのではなく、身体を介した力学的相互作用を活用している。それゆえ、腕を切断しても、その身体構造に呼応した振る舞いが自己組織的に生み出されると期待される。

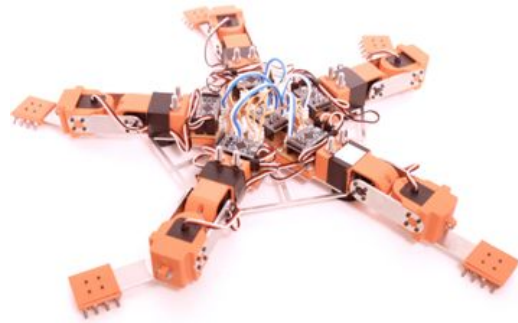


図 11：クモヒトデ型ロボット実機 PENTABOT II

構築した数理モデルの妥当性を検証するため、今回開発したクモヒトデ型ロボット実機 PENTABOT II を図 11 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。ロボットの各腕には、図 5 のようにサーボモータ 2 個とサーボモータを駆動させるための制御回路基板が搭載されている。各腕は、サーボモータを駆動することでヨー方向とピッチ方向に動かすことができる。また、各腕は腕切断実験にも対応できるように取り外しが可能になっている。実験結果を図 12 に示す。同図より、腕を除去しても即座に適応し、

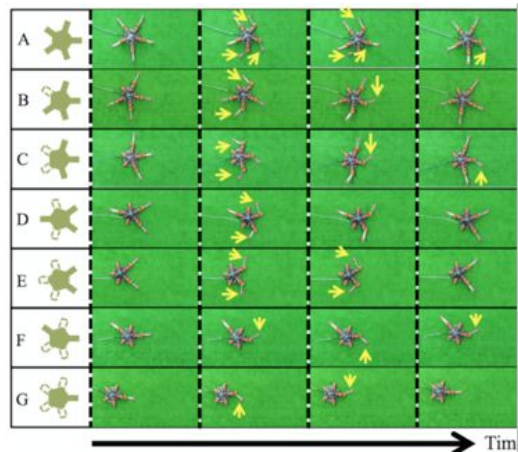


図 12：実機実験結果。腕を取り除いても残存腕を協調させて推進する。

残存腕を協調させながら推進していることがわかる。

以上より、クモヒトデが腕の故障・欠損に対して適応するメカニズムを明らかにすることができた。この知見は、故障に対してリアルタイムに適応可能なロボットの設計論になり得ると期待され、その波及効果はきわめて大きい。

[1] Y.I. Arshavskii et al., *Neurophysiology*, **8**, 398-404 (1976)

[2] S. Shinomoto and Y. Kuramoto, *Progress of Theoretical Physics*, **75**, 1105-1110 (1986)

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計3件,いずれも査読有)

1. 渡辺航, 鈴木翔太, 加納剛史, 石黒章夫, “腕運動の自己組織的役割分担生成を可能とするクモヒトデ型ロボットの自律分散制御”, 計測自動制御学会論文集, 49(1), pp.48-53 (2013) (査読有)
2. T. Kano, S. Suzuki, W. Watanabe, and A. Ishiguro, “Ophiuroid Robot That Self-organizes Periodic and Non-periodic Arm Movements”, Bioinsp. Biomim., 7, 034001 (2012) (査読有)
3. W. Watanabe, T. Kano, S. Suzuki, and A. Ishiguro, “A Decentralised Control Scheme for Orchestrating Versatile Arm Movements in Ophiuroid Omnidirectional Locomotion”, J. Roy. Soc. Int., 9, pp. 102-109 (2012) (査読有)

〔学会発表〕(計19件)

1. 松坂義哉, 佐藤英毅, 加納剛史, 青沼仁志, 石黒章夫, 局所麻酔実験から探るクモヒトデ神経系の分散性と機能局在, 第93回日本生理学会大会(2016.3.23), 札幌
2. 小野達也, 加納剛史, 青沼仁志, 松坂義哉, 石黒章夫, 環境からの手応えを活用するクモヒトデのロコモーションに内在する自律分散制御則, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMEC) (2015.5.19), 京都
3. 佐藤英毅, 加納剛史, 青沼仁志, 松坂義哉, 石黒章夫, クモヒトデの腕間協調メカニズムの数理モデル, 第26回自律分散システムシンポジウム (2014.1.24), 東京
4. 松坂義哉, 佐藤英毅, 加納剛史, 坂本一寛, 青沼仁志, 石黒章夫, 局所麻酔実験から探るクモヒトデの歩行制御の神経機構, 第45回東北地方生理学談話会 (2013.10.5), 仙台
5. T. Kano, S. Suzuki, E. Sato, H. Aonuma and A. Ishiguro, “Toward Realization of Resilient Locomotion: Lessons from the Locomotion of Arm-amputated Ophiuroids”, The 6th International Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines (AMAM2013), (2013.3.11) Darmstadt, Germany
6. 鈴木翔太, 佐藤英毅, 加納剛史, 石黒章夫, 身体構造に応じた振る舞いを自己組織的に発現するクモヒトデの腕内協調メカニズム, 第30回日本ロボット学会学術講演会 (2012.9.17), 札幌
7. T. Kano, S. Suzuki, and A. Ishiguro, “Autonomous Decentralized Control Mechanism in Resilient Ophiuroid

Locomotion”, Living Machines 2012 (2012.7.11) Barcelona, Spain

〔図書〕(計0件)
該当なし

〔産業財産権〕
該当なし

〔その他〕

・解説記事(計1件)
加納剛史, 石黒章夫, “クモヒトデに学ぶレジリアントな振る舞いの設計原理”, 計測と制御, Vol. 54, No. 4 pp. 254-259 (2015)

・受賞(計5件)

1. 渡辺航, 鈴木翔太, 加納剛史, 石黒章夫, 第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2011)優秀講演, 「腕運動の自発的役割分担生成を可能とするクモヒトデ型ロボットの自律分散制御」2011年12月25日
2. 加納剛史, 佐藤英毅, 小野達也, 青沼仁志, 松坂義哉, 石黒章夫, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2014 (SSI2014) SSI Best Research Award, 「クモヒトデのレジリアントなロコモーションに内在する自律分散制御則」, 2014年11月23日

6. 研究組織

(1)研究代表者

石黒 章夫 (ISHIGURO AKIO)
東北大学・電気通信研究所・教授
研究者番号: 90232280

(2)研究分担者

青沼 仁志 (AONUMA HITOSHI)
北海道大学・電子科学研究所・准教授
研究者番号: 20333643

松坂 義哉 (MATSUZAKA YOSHIYA)
東北大学・医学系研究科・講師
研究者番号: 30312557

(3)連携研究者

加納 剛史 (KANO TAKESHI)
東北大学・電気通信研究所・助教
研究者番号: 80513069

坂本 一寛 (SAKAMOTO KAZUHIRO)
東北大学・電気通信研究所・助教
研究者番号: 80261569