三次元環境を移動可能な多脚型ロボット —身体の柔軟性を利用した未知環境への適応—

齋藤 明日希*・永山 和樹*・本間 義大*・青柳 龍志*
伊藤 一之*・大道 武生**・芦澤 怜史**・松野 文俊***

Multi-legged Robot for 3-dimensional Environments —Adaptive Mechanism Using Flexible Body and Legs—

Asuki SAITO*, Kazuki NAGAYAMA*, Yoshihiro HOMMA*, Ryushi AOYAGI*,
Kazuyuki ITO*, Takeo OOMICHI**, Satoshi ASHIZAWA** and Fumitoshi MATSUNO***

Maintenance and inspection of old buildings, bridges, tunnels and so on are one of the important tasks of robots, and these robots are expected to be used for search and rescue missions in case of disasters. However, in such environment, it is difficult to operate robots autonomously because the surface of them are complex and unknown. In inspection tasks, many robots are expected to be simultaneously operated by a small number of operators, therefore lack of autonomy is a serious problem for practical use. To solve this problem, we focus on flexible mechanisms of bodies of creatures, and we propose two types of multi-legged robot. One is for climbing vertical walls and the other is for climbing vertical pipes. We developed prototype robots and conducted experiments. As a result, we confirmed that the developed robot can climb autonomously by utilizing the passive mechanisms.

Key Words: multi-legged robot, wall climbing robot, pipe climbing robot, flexible mechanism, inspection of buildings

1. はじめに

日本各地においてインフラの老朽化が進み、大規模かつ広範囲にわたる対象を迅速に点検し十分な保守作業を行なうことが必要とされてきている¹⁾。このような社会的要請をうけ、インフラの保守点検にロボットを活用する試みが注目されるとともに、災害などの緊急時には、これらのロボットをレスキュー活動^{2)~4)}へ転用することが検討されている。

これらの作業では、人員不足を補うため、作業員に代わって、ロボットが自律的に点検作業を行なうことが期待されており、ロボットには非常に高い自律性が要求される。また、実際の作業環境は、複雑な未知構造物上を3次元的に移動しながら点検を行なうことが要求される環境であり、これを実現

するためには、多自由度を有する高い機動性をもったロボットが必要とされる。しかし、一般に、未知で複雑な環境において、多自由度ロボットを自律的に制御することはきわめて困難であり、高度な計測制御技術が必要とされる一方で、実際に複雑な計測装置や制御器を稼働しようとした場合には、計算時間の問題から実時間動作が困難となるといった問題も生じる。したがって、インフラ点検は、従来の「計測されたデータをもとに計算器内に環境のモデルを構成し、このモデルを用いて動作を計画して制御する」という枠組みでは、実現が非常に難しいタスクであり、この問題を如何にして解決するかがインフラ点検ロボットの実現における大きな課題となっている。

一方、生物は、比較的知能の低い下等な生物であっても、自身の多自由度を巧みに動かし、複雑な実世界で機敏かつ適応的に振る舞うことができる。

これは、生物は進化の過程で、環境に適した身体を獲得しており、脳による計算に依らず、身体と環境との相互作用によって適応的な振る舞いを実現しているからであると考えられており、Embodied Intelligence^{5)~7)}, morphological computation^{8)~10)}, affordance^{11)~19)}, dynamics based control^{20), 21)}など、さまざまな分野において研究が行なわれている。

* 法政大学理工学部 小金井市梶野町 3-7-2

** 名城大学理工学部 名古屋市中白区塩釜口 1-501

*** 京都大学大学院工学研究科 京都市西京区京都大学桂

* Faculty of Science and Technology, Hosei University, 3-7-2 Kajino-cho, Koganei

** Faculty of Science and Technology, Meijo University, 1-501 Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya

*** Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyotodaigakukatsura, Nishikyo-ku, Kyoto

(Received October 20, 2017)

(Revised May 31, 2018)

しかし、従来の生物型ロボットの研究では、生物の運動を模倣したものや、身体の構造を模倣したものなど、さまざまなロボットが開発されているが、生物のもつ高い適応性の実現には至っていない^{22)~30)}。前者は、位置制御系によって制御されたアクチュエータを用いて、あらかじめ埋め込まれた運動を再生するものが一般であり、事前に想定された環境においては高い性能を発揮するものの、想定された環境とは異なる環境においては上手く機能しないという問題が残っている。また、後者は、身体構造にのみ注目したものが多く、身体構造と運動の生成との関係について十分に言及されていない。広瀬らにより提案されたソフトグリップ³¹⁾は、ロボットの構造と運動の生成との関係に言及した先駆的な研究であり、適応的な運動を機能的に生成することが可能な優れた機構である。しかし、環境とロボットとの関係性については十分に言及されていない。

われわれは、これまでの研究において、この生物の高い適応性が如何にして実現されているかに注目し、この適応的な振る舞いを生成する仕組みをロボットに埋め込むことで、複雑な実環境に対応可能な多自由度ロボットの開発を行ってきた^{32)~35)}。

本論文では、身体の機構、制御器、環境を1つのシステムとして捉え、適応的な運動を生成する仕組みを実現するための設計指針を示すとともに、その具体的な実現例として、インフラ点検において想定される「凹凸や湾曲の存在する垂直壁」、および、「配管、角柱などの柱状物」の2つの環境を考え、実際にロボットを開発してその有用性を検証する。

2. 生物の戦略

2.1 規則的なパターンの繰り返しと柔軟性による複雑な運動の生成

多脚型の生物は、脚を規則的なパターンを用いて動かすことで、身体が多自由度を個別に制御しようとした場合に生じる情報量の指数的增加による問題を回避していることが知られている。しかし、各脚の詳細な動きに注目すると、全く同一のパターンをただ繰り返しているわけではなく、環境の状態に応じて適応的に運動が調整されていることが確認できる。これは、脳などの中枢による集中制御ではなく、柔軟性をはじめとする身体ダイナミクスや、反射などの局所的な制御を用いて環境との相互作用により実現されていると考えられている^{5)~22)}。

2.2 環境に存在する普遍的性質の利用

タコは物体を把持する際、脚の根元から先端に向かって順に脚を物体に接触させることで把持を行なっていることが報告されている^{36), 37)}。

これは、根元から順に物体と接触することで、物体の形状に関係なく、一度物体と接触した点を移動させることなく物体を包み込むことができるという幾何学的な性質を利用したものであると考えられる。これによりタコは物体の形状を事前に計測することなく把持を行なうことができる。

このほかにも、環境の普遍的性質として動力学的性質がさまざまな場面で利用されていることが、morphological computation^{8)~10)}や dynamics based control^{20), 21)}など研究において報告されている。また、生態心理学では、環境に存在する行為の可能性を affordance^{11)~17)}と呼び、生物はこの affordance を探索することでさまざまな行為を実現していると考えられている。

2.3 生物における振る舞いの生成と従来の制御系との違い

複雑な実世界では、同じ状況が2度再現されることはなく、生物は、毎回異なる状況に対して適切に振る舞っているかのように観測される。しかし、われわれ自身の経験では、われわれは、毎回同じような状況において、単に同じように振る舞っているように感じている。たとえば、毎日、靴下を履く際、各関節の軌道レベルでは毎回異なる履き方をしている。それにもかかわらず、履き方の違いを意識することはなく、今日もいつもと同じ履き方で難なく履くことができたと認識している。これは、与えられた軌道を正確に繰り返すという、従来のロボットの制御系と本質的に異なる重要な特徴である。

本論文では、この生物の運動生成における、「運動を生成する入力レベルでは、毎回、同じ戦略を繰り返しているだけにもかかわらず、出力側の生成された運動を見ると、環境に合わせて毎回異なる適応的な振る舞いが生成されている」という仕組み³⁸⁾をいかにして実現するかについて考え、同じ戦略の繰り返しから異なる適応的な振る舞いを生成するメカニズムとして、実世界に存在する力学的性質などの普遍的な性質に注目し、この普遍的な性質を利用するために、身体の受動的な構造を利用する方法を提案する。

3. 提案手法

3.1 設計指針

本研究では、2章で述べた生物の戦略をロボットの制御に適用することで未知環境において環境を計測することなくさまざまな環境に適応可能なロボットの実現を目指す。以下に、ロボットを実現する際の設計指針について、身体構成と制御方法の2つの観点から簡単にまとめたものを示す。

身体構成方法

1. ロボットの身体に受動関節や柔軟リンクを用い、受動的な運動が可能な構成とする。
2. 能動関節の駆動により身体と環境が相互作用し身体柔軟関節(柔軟リンク)が受動的に運動する構成とする。
3. 柔軟関節間(柔軟リンク間)に拘束を与え、これらが連動して運動する構成とする。

制御方法

1. 能動関節には周期的なパターンを印加し、位置制御は行なわない。
2. 受動関節間の拘束を変化させることによりロボットと環境からなる系のマクロ的な振る舞いを制御する。
3. ロボットのミクロ的な振る舞いは、環境との相互作用に

より受動的に実現される。

ロボットには、受動関節や柔軟リンクなど、環境との相互作用により受動的に運動が生成される機構を積極的に用い、運動の生成を環境の力学的性質に委ねることで制御系の負担を軽減する。能動関節は、系に力学的エネルギーを供給するために用いられ、能動関節の運動によって受動関節が環境と相互作用し、ロボット全体の運動が生成される。また、各受動関節を互いに連携させ、ロボット全体として合目的な運動が生成されるよう、各受動関節の間に力学的な拘束を与える。能動関節の制御は、あらかじめ埋め込まれた規則的なパターンを周期的に繰り返すものとし、ロボット全体の運動は、各関節間の力学的拘束を変化させることで制御する。これにより、従来手法の問題であった、多自由度を制御する際の制御系の負担を大幅に軽減することが可能となる。ここで、提案する方法と従来の設計方法との重要な相違点は、能動関節と受動関節の役割を明確に分け、能動関節を身体と環境からなる系にエネルギーを注入するために用い、受動関節を環境に適した振る舞いを生成するために用いている点である。これにより、各関節の角度を直接制御する必要がなくなり、能動関節により与えられたエネルギーを用いて受動関節が環境からの反力により受動的に運動し、適応的な運動が生成される。能動関節への入力レベルで見れば、毎回同じパターンを繰り返しているだけにもかかわらず、受動関節の運動は、環境に合わせて毎回異なるものとなり、2.3節で述べた、生物の制御系の特徴である「適応的な運動の生成」を実現することができる。

本論文では、この設計指針を用いたロボットの具体例として、「凹凸や湾曲の存在する垂直壁を昇降するロボット」、および、「配管、角柱などの柱状物を昇降するロボット」の2つのロボットを例に、実際にロボットを開発してその有用性を検証する。

3.2 垂直壁用ロボット

Fig. 1～Fig. 3 および Table 1 に設計指針に基づいて開発した垂直壁用のロボット URARAKAIII の概要とその仕様を示す。ここで、U1 から U7 は、特徴的な機構を番号付けしたものであり、その詳細は以下で述べる。

ロボットは6脚からなり、各脚の先端には吸盤が取り付けられている。吸盤の吸着は、外部に置かれたエアーコンプレッサーの圧力をエジェクタを用いて負圧に変換することで実現している。各脚は自重を支える十分な剛性を確保するための剛体リンク機構 (U6) と、壁の凹凸や湾曲に適応するための柔軟関節 (U2, U3, U4) および柔軟リンク (U7) からなる。Fig. 4 に示すように、吸盤の先端には柔らかいスポンジ (U1) が取り付けられており、これによって壁表面の凹凸に受動的に適応する。また、吸盤自身が非常に柔らかい蛇腹状の構造 (U2) となっていることで、僅かな押し付ける力で、壁の角度に合わせて吸盤が受動的に変形する。壁と吸盤が接触し吸引によりスポンジ (U1) および蛇腹 (U2) が圧縮されることで

Fig. 1 Whole system

Fig. 2 Developed robot (side view)

Fig. 3 Simplified mechanism of the robot (side view)

Table 1 Specification of wall robot

Robot	Full length	500 mm
	Width	350 mm
	Height	200 mm
	Weight	2.1 kg
Air compressor	Power	1.5 kW
	Discharge pressure	0.69 MPa
	Tank capacity	8 L
	Weight	14 kg
Sucker	Width	70 mm
	Height	35 mm
	Weight	87 g
Servomotor	Model number	KRS-2572HV ICS
	Rated voltage	12 V

Fig. 4 Developed sucker

Fig. 5 Flexible joint (U3)

剛性が増加し、自重を支えることが可能となる。このとき、U1 および U2 よりも剛性の大きな柔軟関節である U3 が受動的に回転することで、自重を支えながら、壁と脚の傾きに対応することが可能となる (Fig. 5)。また、Fig. 6 に示すように、吸盤の周囲には、3 点支持を行なうためのピンが取り付けられており、吸盤の吸着力 F_1 、吸盤の根元に加わる鉛直下向きの力 F_2 、壁がピンを押す力 F_3 、の 3 つの力が釣り合うことで自重を支える構成になっており、壁と吸盤との間に十分な摩擦が得られる場合には、吸着力と鉛直下向きの力との関係は (1) 式で表わすことができる。ここで、 r は吸盤の中心から 3 点支持により構成される 3 角形の外周までの鉛直下向き方向の距離であり、 l は F_2 の作用点から壁までの距離

Fig. 6 Three-point mounting

Fig. 7 Pantograph for passive adjustment of length

である。Fig. 7 に示すように、吸盤は、受動並進運動を行なうリンク機構 (U4) と、能動並進運動を行なう機構 (U5)、能動回転運動を行なう機構 (U6) を介して体幹と接続されており、U5 によって壁に押し付けられる。U4 は、複数の脚が吸着しつつ体幹が動いた際の幾何学的な拘束に受動的に対応するためのものであり、吸盤が壁に吸着した状態で U6 を回転させることで、体幹が昇降する。Fig. 8 に示すように、体幹は角ジャバラと受動関節により構成された柔軟リンク構造 (U7) となっている。U8 は、ねじれに対して高い剛性を持ち、左右のうち一方の脚しか接地しない場合でも、必要な押しつけ圧を確保可能であるとともに、Fig. 8 に示すように、壁の奥行方向に対しては柔軟性を持ち、環境の湾曲に対して受動的に適應することが可能である。

アクチュエータは U5 および U6 を駆動させるためのものであり、各脚が 2 つのアクチュエータを有している (Fig. 9)。

各アクチュエータは、Fig. 10 に示す周期的な運動を繰り返し、これにより剛体リンクが運動し歩行が実現される。この際、受動関節および柔軟リンクが環境との相互作用により受動的に環境に適應し、環境に合わせた振る舞いが生成される。

開発したロボットでは、Fig. 3 に示すように、柔軟関節の弾性力を、壁に近いほうから体幹に向かって、順に高くしていくことで、小さな凹凸から大きな湾曲まで、受動的に適應できるような設定となっている。

Fig. 8 Adaptation to a curved surface (U7)

Fig. 9 Movement of the legs

Fig. 10 Locomotion pattern (wall claiming)

3.3 柱状物を昇降するロボット

つぎに, Fig. 11 および Table 2 に設計指針に基づいて開発した, 柱状物昇降ロボット TAOYAKAI II とその仕様を示す. ここで, T1 から U4 は, 特徴的な機構を番号付けたものであり, その詳細は以下で述べる.

Table 2 Specification of pipes robot

robot	Length	521 mm
	Width	897 mm
	Height	178 mm
	Weight	1.5 kg
Wire winder	Motor	RE-290
	Torque	2.3 kg · cm
	Gear ratio	84:1
	Pulley diameter	15 mm
Servo motor	Model number	KRS-2552HV ICS
	Rated voltage	12 V
	Maximum torque	14 kg · cm

Fig. 11 Developed robot for pipes

ロボットは 4 脚からなり, 多様な形状の柱状物を把持可能な柔軟脚 (T1) が取り付けられている. Fig. 12 に示すように柔軟脚 T1 は受動関節からなる多リンク構造となっており, 脚を開くためのラバーがリンクの外側に, 脚を閉じるためのワイヤーがリンクの内側に取り付けられている. 受動多リンク構造により, 脚は, 前後方向には関節が受動的に回転する一方で, 上下, および, ねじれ方向には高い剛性をもつ. これにより, 未知形状物を受動的に把持可能であるとともに, 自重を支えるために必要な剛性が確保されている. また, ワイヤーを巻き取るための機構にはギア比 84:1 のウォームギア (Fig. 13) を採用しており, 一度把持すると, モーターへの通電を切った場合でもその状態が保持可能な構造となっている.

また, 物体との間に十分な摩擦を発生させるとともに, 表面の小さな凹凸に対応するため, 摩擦係数の大きなスポンジが脚の表面に取り付けられている (Fig. 12 a)). 脚を閉じるための動作は, タコの動作^{34), 35)}を基に設計されている. この動作をラバーの弾性を利用して受動的に実現するため, 脚のラバーは Fig. 12 b) に示すように, 根元から先端に向かって, ラバーの幅を調整し, バネ定数が徐々に大きくなるように設定されている. これにより, 単にワイヤーを巻き取るという操

Fig. 12 Flexible leg mechanism (T1)

Fig. 13 Wire winder (T2)

作だけで、根元側のリンクから先頭に向けて柱状物に巻き付きながら徐々に脚が曲がっていくという動作が実現され、柱状物体の形状を計測することなくさまざまな形状の柱状物体を把持することが可能となる (Fig. 12 c)). つぎに、胴体の機構について説明する. Fig. 14 に示すように、ロボットの胴体 (T3) は、前後方向に回転可能な受動関節を 1 つもち、受動関節には、その可動範囲を制限するためのワイヤーと、胴体を柱状物に押し付ける力を発生させるためのラバーが取り付けられている. また、胴体には補助脚が取り付けられており、上下 2 組の脚のうちどちらか一方が開いている場合でも、補助脚が柱状物と胴体との距離を一定に保ち、胴体の姿勢を安定させる. ロボットの昇降は根元に取り付けられた、脚を上下させるためのアクチュエータ (T4) とワイヤーを巻き取るためのアクチュエータ (T2) によって行なわれる (Fig. 15). ロボットの移動は、Fig. 16 に示すように、4 脚の柔軟脚が柱状物を把持した状態で胴体を脚部が押し上げる、2. 下脚を

Fig. 14 Body mechanism (T3)

Fig. 15 Leg mechanism (T4)

Fig. 16 Locomotion pattern (pipe claiming)

開く, 3. 下脚をもち上げる, 4. 下脚が柱状物を把持する, 5. 上脚を開く, 6. 上脚をもち上げる, 7. 上脚が柱状物を把持する, の 7 つの規則的なパターンを繰り返すことで行なう. 柱状物の形状の違いに対する適応は受動的に行なわれるため、特別な制御は必要とされず、脚を上下に動かすための

アクチュエータと脚を開閉するためのアクチュエータを規則的に動かすだけで、多自由度の制御が可能であり、柱状物の形状にあった振る舞いが生成される。

また、これに加え、提案機構は、ロボットの自重が脚を物体に押し付ける力に変換され、摩擦力となって自重を支えるという構造となっており、電源を切った場合でも落下せず、自重をそのまま保持することが可能である。

具体的には、脚が物体に巻き付いた状態で脚に自重が加わることで、物体から脚を押し広げる方向に力が伝わり、物体と脚の間の摩擦力が増大する。また、この脚を広げようとする力はワイヤーの張力に変換され、ウォームギアへと伝わる。しかし、ワイヤーは、ウォームギアの高ギア比によって事実上ロックされているため動くことができず、そのままの状態が保持され自重を支えることができる。

このように、提案機構では、先に述べた設計指針において示したように、受動関節で構成された柔軟な脚に対して、ワイヤーの長さを固定するという拘束を与えることで、柔軟性により実現される適応性を保持したまま、力のつり合いによって受動的に定常状態を作り出すことで、自重を支えるという機能を実現している。また、これにより、脚を閉じるためにワイヤーを巻き取るモータは、単に、脚の受動関節を物体の形状に合わせて回転させる程度の力があればよく、自重をモータの力により支える必要はないため、比較的小さなモータを用いて実現可能である。以上から、高い適応性に加え、安全性、省エネルギー性においても従来の機構に比べ優れていると考えられる。

4. 実験

最初に、凹凸や湾曲の存在する垂直壁を例に、垂直壁用ロボットの移動性能を実験により確認する。実験環境として、**Fig. 17**に示す、タイル・木の板・湾曲したアクリル板からなる垂直壁を用いた。**Fig. 18**に、タイルおよび木の板からなる壁面を移動するようすを、**Fig. 19**に湾曲面を移動するようすを示す。**Fig. 10**に示した移動パターンの一周期に要した

時間は約15sであり、移動速度は、約25 cm/minであった。

これらの結果から、身体それぞれの柔軟性により、小さな凹凸から大きな湾曲に至るまで受動的に適応できていることが確認できる。

つぎに、柱状物を昇降するロボットの移動性能を確認する。異なる形状の柱状物に対する適応性を確認するため、実験環境として、円筒のパイプ（直径21.6 cm）、角柱（16 cm × 16 cm）の2つの環境を用いた。**Fig. 20**, **Fig. 21**に、円筒のパイプおよび角柱を登るようすを示す。**Fig. 16**に示した移動パターンの一周期に要した時間は約30sであり、移動速度は、約10 cm/minであった。これらの結果から、柱状物用のロボットについても、柱状物の形状を計測することなく、円筒と角柱という異なる形状の物体を登ることが可能であることが確認できる。

これらの2つのロボットの結果において重要な点は、提案手法では、ロボットの振る舞いそのものは、事前に埋め込ま

Fig. 18 Experiment result (tiles and wood board)

Fig. 17 Wall for the experiment

Fig. 19 Experiment result (curved wall)

Fig. 20 Experiment result (pipe)

Fig. 21 Experiment result (wood pillar)

れておらず、また、環境を計測しながら環境に合わせて運動を生成するための制御系も埋め込まれていないという点である。それにもかかわらず、環境に合わせた適応的な振る舞いが環境との相互作用により創発する。この仕組みにより、入力のレベルでは、アクチュエータに対して毎回同一の規則的なパターンを入力するだけで、出力レベルでは適応的な振る舞いを生成することができる。つまり、第2章で述べた「毎回、同じ戦略を繰り返しているだけにもかかわらず、環境に合わせて毎回異なる適応的な振る舞いが生成されている」という生物の特徴を再現できているといえる。

5. 結 言

本研究では、未知で複雑な実環境において活動するロボットについて考え、身体の柔軟性を利用することで環境を計測

することなく、未知環境に適応可能な多脚型ロボットの開発を目標とした。

提案した共通の設計指針に基づき、「凹凸や湾曲の存在する垂直壁」、「配管、角柱などの柱状物」の各環境で適切に振る舞うことが可能なロボットを提案し、実験によりその有用性を確認した。

本研究では、さまざまな環境に適応可能なロボットを実現するための第一段階として、それぞれの環境に特化したロボットの開発を行なったが、今後は、ソフトロボティクスや人工筋肉などの技術を取り入れ、環境に応じて粘弾性および剛性を適切に切り替え可能な身体を実現することで、これらのロボットを1つのロボットに統合し、1つの身体で複数の環境に適応できるロボットの開発を行っていく予定である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 15K00316 および 15KK0015 の助成を受けたものである。また、本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) により、科学技術振興機構を通して委託されたものである。

参 考 文 献

- 1) 藤野陽三：安全なインフラに向けての維持管理と SIP での取り組み、計測と制御, **55-2**, 117/122 (2016)
- 2) R.R. Murphy: Navigational and Mission Usability in Rescue Robots, 日本ロボット学会誌, **28-2**, 142/146 (2010)
- 3) E. Rohmer, K. Ohno, T. Yoshida, K. Nagatani, E. Konayagi and S. Tadokoro: Integration of a sub-crawlers' autonomous control in Quince highly mobile rescue robot, 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), 78/83 (2010)
- 4) H. Miyanaka, N. Wada, T. Kamegawa, N. Sato, S. Tsukui, H. Igarashi and F. Matsuno: Development of an unit type robot [KOHGA2] with stuck avoidance ability, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3877/3882 (2007)
- 5) R. Pfeifer, F. Iida and G. Gomez: Designing Intelligent Robots—On the Implications of Embodiment—, 日本ロボット学会誌, **24-7**, 783/790 (2006)
- 6) 石黒章夫：知の基盤としてのしぶとさの創成, 日本ロボット学会誌, **24-7**, 800/803 (2006)
- 7) R. Pfeifer and C. Scheier: 知の創成—身体性認知科学への招待—, 共立出版 (2001)
- 8) C. Paul: Morphological Computation, *Robotics and Autonomous Systems*, **54-8**, 619/630 (2006)
- 9) H. Hauser, R.M. Füchslin and R. Pfeifer, (Eds.): *Opinions and Outlooks on Morphological Computation*, self-published (2014)
- 10) R. Pfeifer and F. Iida: Morphological computation: Connecting body, brain, and environment, 日本学術振興会学術月報, **58-2**, 130/136 (2005)
- 11) 佐々木正人：アフォーダンス入門—知性はどこに生まれるか, 講談社 (2008)
- 12) 佐々木正人：アフォーダンス—新しい認知の理論, 岩波書店 (1994)
- 13) 佐々木, 三嶋：アフォーダンスと行為, 金子書房 (2001)
- 14) 佐々木, 三嶋：アフォーダンスの構想, 東京大学出版会 (2002)
- 15) 佐々木, 三嶋：生態心理学の構想, 東京大学出版会 (2005)
- 16) 佐々木正人：アフォーダンス入門—若きロボット研究者の Q&A—, 日本ロボット学会誌, **24-7**, 776/782 (2006)
- 17) 佐々木, 高橋, ギブソン：アフォーダンスの発見, 776/782, 岩

波書店 (2006)

- 18) 古山宣洋: 運動を導く知覚システム, 日本ロボット学会誌, **24-7**, 804/806 (2006)
- 19) 伊藤, 大須賀, 石黒, 古山: 実世界の性質を利用した知覚と制御, 日本ロボット学会誌, **24-7**, 807/811 (2006)
- 20) 有本 卓: 巧みさの演出 ダイナミクスベース制御, 日本ロボット学会誌, **24-7**, 791/796 (2006)
- 21) 大須賀公一: ダイナミクスベース制御の「こころ」, 日本ロボット学会誌, **24-7**, 797/799 (2006)
- 22) 広瀬茂男: ヘビ型ロボットの移動機構, 日本ロボット学会誌, **28-2**, 151/155 (2010)
- 23) A.J. Ijspeert: Biorobotics: Using robots to emulate and investigate agile animal locomotion, *Science*, **346**-6206, 196/203 (2014)
- 24) M. Hirose and K. Ogawa: Honda humanoid robots development, *Phil. Trans. R. Soc. A*, **365**, 11/19 (2007)
- 25) X. Sun, K. Hashimoto, T. Teramachi, T. Matsuzawa, S. Kimura, N. Sakai, S. Hayashi, Y. Yoshida and A. Takanishi: Planning and Control of Stable Ladder Climbing Motion for the Four-limbed Robot "WAREC-1", *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 6547/6554 (2017)
- 26) D. Lahr, V. Orekhov, B. Lee and D. Hong: Early developments of a parallelly actuated humanoid, *Saffir, Proceedings of the ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, DETC2013-12590* (2013)
- 27) H.F.N. Al-Shuka, F. Allmendinger, B. Corves and W.-H. Zhu: Modeling, stability and walking pattern generators of biped robots: A review, *Robotica*, **32-6**, 907/934 (2013)
- 28) 茂木, 川崎, 上月, 白井, 浅野, 中西, 岡田, 稲葉: 筋骨格ヒューマノイドにおける頸部筋群負荷を支持可能な剛性可変脊椎構造の開発, 日本ロボット学会誌, **32-7**, 615/623 (2014)
- 29) 亀川, 齊, 五福: 螺旋尺取り方式を用いて円柱を移動するヘビ型ロボットの提案, 計測自動制御学会論文集, **51-1**, 8/15 (2015)
- 30) M. Kaneko, T. Shirai and T. Tsuji: Hugging Walk, *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics*, 2611/2626 (2000)
- 31) S. Hirose and Y. Umetani: The Development of Soft Gripper for the Versatile Robot Hand, *Mechanism and Machine Theory*, **13-3**, 351/359 (1978)
- 32) K. Ito and S. Hagimori: Flexible manipulator inspired by octopus: Development of soft arms using sponge and experiment for grasping various objects, *Artificial Life and Robotics*, **22-3**, 283/288 (2017)
- 33) M. Masuda and K. Ito: Semi-autonomous Centipede-like Robot with Flexible Legs, *Proc. of IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics 2014 (SSRR2014)* (2014)
- 34) Y. Simodate and K. Ito: Semicircular duplexmanipulator to search narrow spaces for victims, *Proc. IEEE Int. Symp. Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)* (2011)
- 35) K. Ito and Y. Simodate: Development of semi-circular duplex manipulator for search and rescue operations in narrow spaces, *International Journal of Advanced Mechatronic Systems*, **6-1**, 1/11 (2014)
- 36) G. Sumbre, Y. Gutfreund, G. Fiorito, T. Flash and B. Hochner: Control of Octopus Arm Extension by a Peripheral Motor Program, *Science*, **293**-5536, 1845/1848 (2001)
- 37) Y. Gutfreund, T. Flash, G. Fiorito and B. Hochner: Patterns of Arm Muscle Activation Involved in Octopus Reaching Movements, *J. Neurosci*, **18-15**, 5976/5987 (1998)
- 38) 伊藤, 福森: 知覚量に基づく御系設計—蛇型ロボットの方向の

知覚量を用いたフィードバック制御—, 計測自動制御学会論文, **42-4**, 436/445 (2006)

[著者紹介]

齋藤 明日希

2016年法政大学理工学部電気電子工学科卒業。同年法政大学理工学研究科電気電子工学専攻修士課程入学, 2018年同課程修了, 現在に至る。

永山 和樹

2017年法政大学理工学部電気電子工学科卒業。同年法政大学理工学研究科電気電子工学専攻修士課程入学, 現在に至る。

本間 義大

2017年法政大学理工学部電気電子工学科卒業。同年法政大学理工学研究科電気電子工学専攻修士課程入学, 現在に至る。

青柳 龍志

2017年法政大学理工学部電気電子工学科卒業。同年法政大学理工学研究科電気電子工学専攻修士課程入学, 現在に至る。

伊藤 一之 (正会員)

2002年東京工業大学大学院知能システム科学専攻博士後期課程修了, 博士(工学)。同年岡山大学工学部助手。法政大学工学部専任講師を経て, 2016年より同大学理工学部教授。日本ロボット学会研究奨励賞, 船井情報科学奨励賞, 競基弘賞(学術業績賞)などを受賞。主に知能ロボットに関する研究に従事。

大道 武生 (正会員)

1972年九州大学大学院工学研究科修士課程卒業。同年三菱重工業入社。2001年名城大学教授, 現在に至る。極限作業ロボットの研究に従事, 近年は社会創造ロボティクス, グリーンメカトロニクスを提唱。博士(工学)。

芦澤 怜史 (正会員)

2014 年, 名城大学理工学研究科博士課程 (機械工学専攻) 修了. 同年, 名城大学理工学部メカトロニクス工学科助教, 屋外移動ロボットの研究, 解体作業ロボットシステムの開発, 吸着コンポーネントの開発に従事. 博士 (工学).

松野 文俊 (正会員・フェロー)

1986 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了. 大阪大学, 神戸大学, 東京工業大学, 電気通信大学を経て, 2008 年から京都大学教授 (機械理工学専攻) となり, 現在に至る. 主に, ロボティクス・制御理論・レスキュー学に関する研究に従事. 2005 年より NPO 国際レスキューシステム研究機構副会長. 93 年度システム制御情報学会論文賞, 2001, 2013, 2017 年度計測自動制御学会論文賞, 2001 年度同学会武田賞, 2017 年度同学会友田賞, 2013 年度情報処理学会論文賞などを受賞. IEEE Robotics and Automation Society, Technical Committee on Safety, Security, and Rescue Robotics の Co-Chair などを歴任, 現在, システム制御情報学会会長. IEEE, 日本機械学会 (Fellow), 日本ロボット学会 (Fellow) などの会員. 工学博士.

=====