

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24年 5月 21日現在

機関番号：32675

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010 ～ 2011

課題番号：22700156

研究課題名（和文） 実世界を利用した情報の抽象化とロボットの自律制御への適用

研究課題名（英文） Abstraction of information using properties of the real world and application to control of autonomous robot

研究代表者

伊藤 一之 (ITO KAZUYUKI)

法政大学・理工学部・准教授

研究者番号：90346411

研究成果の概要（和文）：

本研究では、従来の物理量を測るセンサに代わる枠組みとして、実世界そのものを情報処理機構として利用することにより、環境から少数の汎用かつ主観的情報を直接計測する枠組みを提案し、ロボットの自律制御へ適用した。

また、その成果をレスキューロボットの設計に応用し、災害現場などを想定した不整地を自律的に走行可能な高い走破性と自律性を兼ね備えたロボットの実現に成功した。

研究成果の概要（英文）：

In this paper, we proposed an approach for abstracting necessary subjective information from large amount of information of the complex real environment by using the properties of the real environment as an information processor. We applied the proposed approach for developing a rescue robot, and we confirmed that both of the autonomy and the mobility could be realized in a high level by the proposed approach.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：知能情報処理

1. 研究開始当初の背景

近年、ロボットの活躍が期待される範囲は、工場などの比較的単純な既知環境から、家庭、宇宙開発、災害救助活動などの複雑な未知環境へと拡大してきている。しかし、ロボットの制御法に目を向けてみると、制御理論に基づく手法、ニューラルネットワーク、ファジー制御など、さまざまな手法が提案されてい

るが、これら従来のどの手法を用いたとしても、自律ロボットを複雑な未知環境へ適用することは極めて困難である。これは、ロボットの持つ限られた知覚能力および計算資源を用いて、複雑な実世界をいかにして表現するかという問題に起因するものであり、P1「計測における問題」、P2「モデル構築における問題」、P3「実時間処理における問題」

の三つの問題に分けて考えることができる。ここで、計測における問題とは、実世界の必要な状態全てを計測することは不可能であるという問題であり、モデル構築における問題とは、未知環境をモデル化するために必要な情報を予め準備することが不可能であるという問題である。また、実時間処理における問題とは、実世界の複雑さの増加に伴って実時間処理が困難となるという問題である。

本研究では、これらの問題が、従来の枠組みにおいて、「物理学に基づいて実世界を表現していることにある」と考える。物理学では、世界を可能な限り客観的かつ詳細に記述することが重要とされる。しかし、この枠組みでは、世界を完全に表現するためには、無数の次元の標準座標系が必要になり、ここで、情報量の組み合わせ爆発が生じる。また、情報量の組み合わせ爆発を避けるため、実世界を理想化してモデル化し、これに基づいて制御系を設計した場合には、この制御系は、理想化されたモデルと整合するような、簡単で変動の小さな環境でしかうまく動作しない。

一方、生物に目を向けてみると、生物にとって重要なことは、「捕獲者に捕まる前に逃げる」など、限られた時間内（実時間）に行動することであり、環境や自身の状態を詳細に観測し客観的に表すことは必要ではない。むしろ、実時間に情報を処理するためには、処理すべき情報は少ない方がよく、この意味で、世界をいかに少ない汎用な情報で抽象的に表現するかが重要となる。また、この情報は各個体やその状況に依存した主観的な情報でよい。したがって、生物の内部では、物理学の目指す世界の表現方法とはまったく逆の表現方法を用いて実世界を表現していると考えられる。

このことから、従来のロボットの枠組みの問題点は、環境を多数の詳細な客観的情報（物理量）に分解して計測し、この情報を用いて、ロボットの内部で世界を再合成している点にあり、この再合成の際に、情報量の指数的増加問題が発生していると考えられる。これを踏まえ、環境から少数の汎用な抽象化された主観的情報を直接計測し、これを用いて小さな内部表現を構成することができれば、情報量の指数的増加は回避され、生物のような適応的な行動を実時間に生成することが可能となると考えられる。本研究では、従来の物理量を測るセンサに代わる枠組みとして、実世界そのものを情報処理機構として利用することにより環境から少数の汎用かつ主観的情報を直接計測する枠組みを提案し、上述の3つの問題を解決す

る。

2. 研究の目的

現状の技術水準では、自律ロボットを家庭などの実環境へ適用することは極めて困難である。これは、ロボットの持つ限られた知覚能力および計算資源を用いて、複雑な実世界をいかにして表現するかという問題に起因するものである。本研究では、この問題の原因が、物理学に基づいて実世界を客観的かつ詳細に表現していることにあると考える。一方、生物に目を向けてみると、生物にとって重要なことは、限られた時間内（実時間）に行動することであり、実世界を少数の主観的かつ汎用な情報で抽象的に表現することでこの問題を解決していると考えられている。本研究では、従来の物理量を測るセンサに代わる枠組みとして、実世界そのものを情報処理機構として利用することにより、環境から少数の汎用かつ主観的情報を直接計測する枠組みを提案し、ロボットの自律制御へ適用する。

3. 研究の方法

本研究は、身体の力学的性質・電子部品の電磁気学的性質・化学薬品の化学的性質など、実世界の性質を情報処理系として利用し、情報の汎化・抽象化を行うものである。したがって、これらを利用できるよう、実際に、従来とは異なる設計指針に基づき、新しくロボットを製作し、その有用性を実験により検証する。

具体的には、不整地を走行する蛇型ロボットおよび、アーマー型ロボットを製作し、実際に、力学的性質、電磁気学的性質、化学的性質のそれぞれが、情報処理系として有効に機能することを実験により検証する。また、2年目には、それら具体例の実験結果を解析し、設計指針の一般化を行う予定である。

4. 研究成果

不整地を走行するロボット[**]、および、多自由度アームによる物体の把持[**]において、従来の方法に比べて非常に少ない量の汎化され情報を用いて複雑な対象に対処可能であることが確認された。また、提案手法により強化学習の汎化も可能であることを確認した[**]。詳細は、各文献を参照されたい。

本報告書では、複雑な環境において自律的に振る舞う多自由度ロボットへの適用における一例として、瓦礫上を走行するヘビ型ロボットの自律制御について述べる。

複雑な瓦礫上を任意の方向に進むためには、瓦礫の凹凸に合わせ、身体の各関節を適切に動かす必要がある。したがって、従来の方法では、瓦礫の状況を詳細に計測し、複数の関節を同時に制御する必要があり、非常に多くの情報処理を必要とするタスクである。

この問題に対し、我々は、生物の筋肉の仕

組みに注目し、ロボットの機構を再設計することで情報を抽象化し、入力2次元、出力1次元の非常に簡単な制御系により、目標物体を追従して瓦礫上を走行可能なヘビ型ロボットを実現した。

一般に、従来のロボットは、回転関節で構成され、各関節にギヤおよびモータを持ち、関節の回転角度そのものが制御される。これに対して生物は、粘弾性を有する筋肉を、一つの関節に対して複数個もち、筋肉の張力のバランスにより運動が実現される。このため、関節の角度そのものは厳密には制御されておらず、筋肉は、環境との接触により、環境の凹凸に合わせ、受動的かつ適応的に伸縮する。したがって、細かな制御は必要とされず、関節の細かな運動は、身体と環境との力学的な相互作用に委ねられている。これは、瓦礫のような複雑な環境上を走行する際には極めて有利な特徴である。

我々は、この筋肉の「粘弾性による受動的な適応」と、「張力のバランスによる運動の実現」に着目し、前者をゴム素材を用いた受動関節で、後者をワイヤーを用いた拘束力のバランスで実現する方法を開発した。

図1に開発したヘビ型ロボットの概要を示す。ヘビ型ロボットは、複数のクローラをゴム素材により結合して構成される。また、図2に示すように、左右にそれぞれ1本、計2本のワイヤーが張り巡らされ、このワイヤーの長さは、後部の能動プーリーにより制御される。

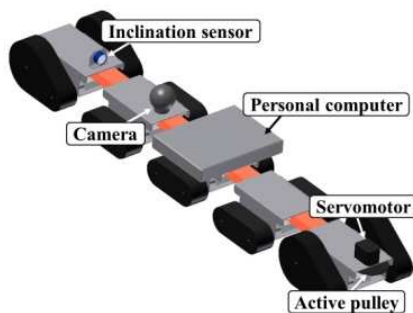


図1 ヘビ型ロボット

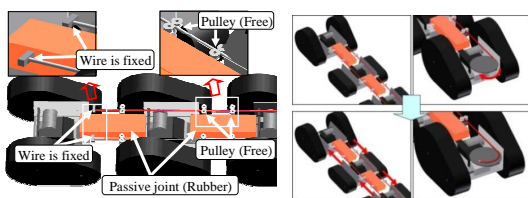


図2 ワイヤーによる拘束

ロボットは、このクローラを回転させることで推進し、瓦礫の凹凸や障害物との接触に合わせ、ゴム素材により実現された関節が受動的に運動し、環境に適応する。ロボットの推進方向は、2本のワイヤーの長さにより決

まり、これは、後尾のプーリーを回転させることで制御される。例えば、後部のプーリーを右向きに回転させ、右側のワイヤーを短く、左側のワイヤーを長くすることで、ロボットは右へ旋回する。この際、図3に示すように、旋回中に障害物に接触した場合には、各関節は受動的に左右に曲がり、自動的に障害物を回避する。多数の障害物が存在する環境では、ロボットの進行方向は、障害物の回避に伴い、一時的に左右に蛇行するものの、左右のワイヤーの長さが等しい場合には前進し、左側のワイヤーが短い場合には、蛇行しつつも左に旋回する(図4)。

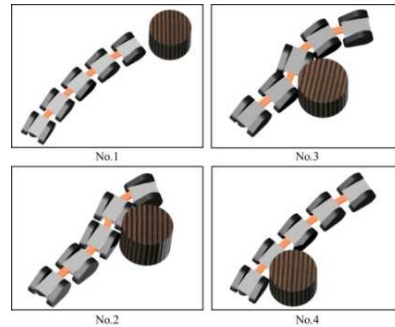


図3 障害物の自動回避

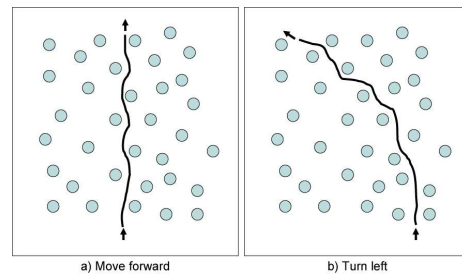


図4 ワイヤーによる進行方向の制御

つまり、小さな障害物の回避や凹凸を乗り越えるための動作は、受動関節により自動的に行われるため、制御器は、全体としての進行方向を、ワイヤーの長さの差を変えることで操作するだけでよい。つまり、複雑な環境と身体の高自由度による膨大な情報が、進行方向という1次元の情報に抽象化されているといえる。

実際に製作したロボットを図5から図8に、仕様を表1にそれぞれ示す。



図5 ロボット全体像

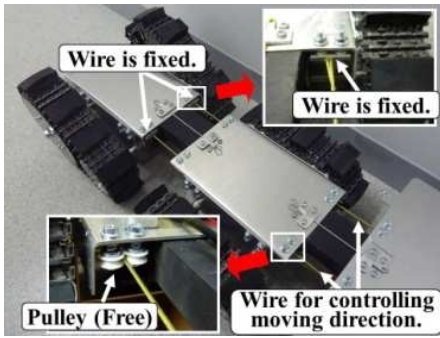


図 6 ワイヤによる拘束

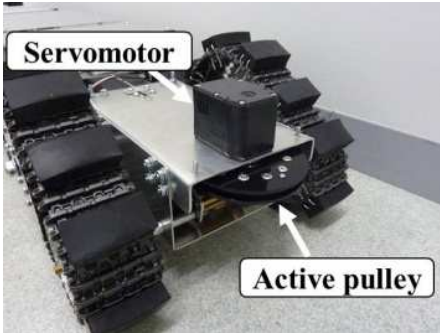


図 7 後部能動プーリー

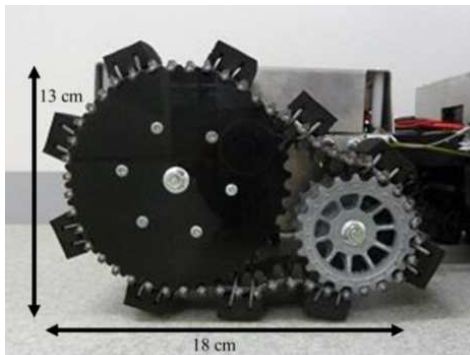


図 8 クローラ

表 1 仕様

直径 [cm]	100
幅 [cm]	20
高さ [cm]	15
重量 [kg]	10

提案した機構に制御系を搭載し、自律化した際の基本性能を実験により確認する。ロボットにはカメラと傾斜センサを搭載し、赤い物体へ向かって自律的に移動させる。実験は、平地と障害物がある環境とで行う。制御系には、以下の式を用いた。

$$\varphi = -k_1(x - x_d) - k_2(\theta - \theta_d) \quad (1)$$

ここで、 k_1, k_2 ($k_1, k_2 > 0$) は比例ゲインである。 x は目標物体のカメラ座標系における水

平方方向の位置、 θ はロボットの重力方向からの傾斜角度である。 x_d, θ_d はそれぞれ x と θ の目標値である。 φ は左右のワイヤーの長さを制御するためのプーリーの回転角度である。傾斜角度はロボットの後方から前方を見た場合に、左向きを正とする。本実験では、目標値は $x_d = 0, \theta_d = 0$ と設定した。

段差を走破する際の目標物体の方向および先頭リンクの傾斜の変化を図 9 に、実現された運動の一例を図 10 にそれぞれ示す。また、階段を走行する際の様子を図 11 に、瓦礫上を走行する際の様子を図 12 に示す。

図 9 および図 10 から、ロボットはカメラから得られた情報と (1) 式を用いて、目標物体へ向かって自律的に移動していることが確認できる。また、センサから得られるロボットの傾斜に応じて、能動プーリーの角度が適応的に制御されるため、ロボットは転倒することなく障害物を走破している。このことから、カメラと傾斜センサの 2 次元の情報のみで目標物体を追従しながら段差などの不整地を走破可能であることが確認できる。

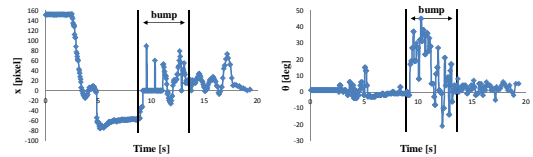


図 9 方向および傾斜の変化

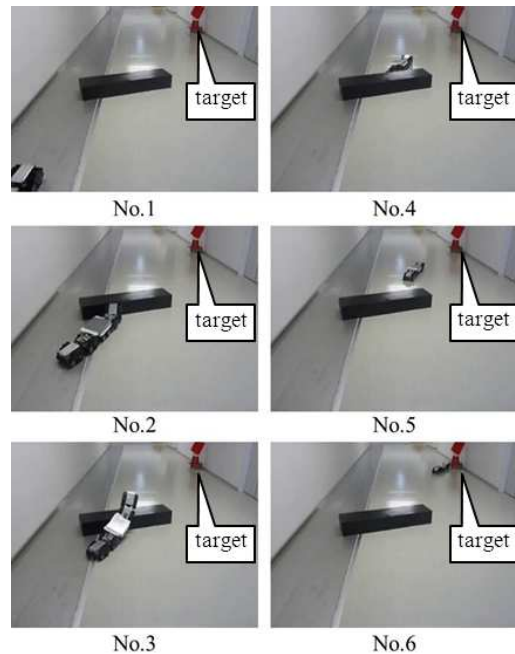


図 10 自律走行 (段差)

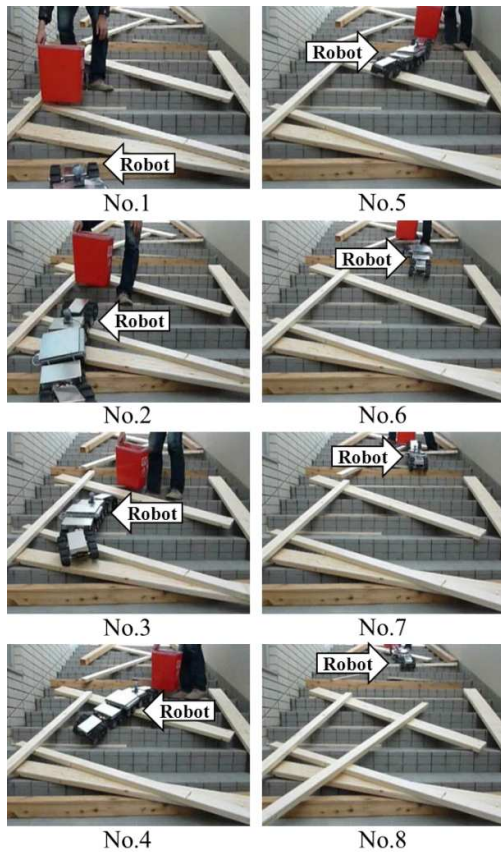


図 11 自律走行 (階段)

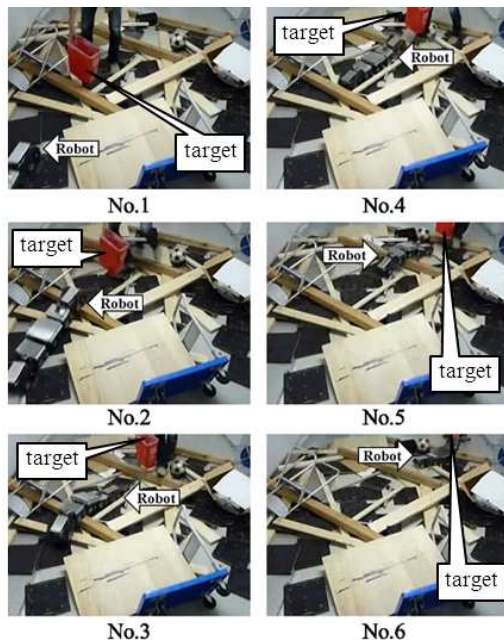


図 12 自律走行 (瓦礫)

以上から、実世界の性質を用いた情報の抽象化が実現できていることが確かめられる。

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 2 件)

①. 伊藤一之, 小安達哉, “知的な振る舞いの発現におけるアクチュエータの役割”, 知能と情報(日本知能情報フuzzy学会誌), 査読有, Vol. 24, pp.627-636, 2012/02/15

②. 伊藤一之, 宮川陽太, 近藤雄太, 山下武尊, “接触までの残り時間 τ を用いた群行動の維持(光源を搭載した移動ロボット群への適用)”, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, Vol. 77, pp.4641-4652, 2011/12/25

〔学会発表〕(計 20 件)

①. S. Kuroe, K. Ito, Autonomous control of octopus-like manipulator using reinforcement learning, 9th International Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence, pp. 553-556, 2012/03/27, SALAMANCA (SPAIN)

②. Y. Takeuchi, K. Ito, Reinforcement learning in dynamic environment -Abstraction of state-action space utilizing properties of the robot body and environment-, The Seventeenth International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp.938-942, 2012/01/20, OITA(JAPAN), B-Con Plaza

③. S. Kashiwada, K. Ito, Proposal of semiautonomous centipede-like robot for rubbles, The Seventeenth International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp.1127-1130, 2012/01/19, OITA(JAPAN), B-Con Plaza

④. T. Kon, K. Ito, Control of flock behavior by using tau-margin -Obstacle avoidance and reformation-, The Seventeenth International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp.634-637, 2012/01/19, OITA(JAPAN), B-Con Plaza

⑤. H. Nakatsuka, K. Ito, Sound source detection robot inspired by water striders, The Seventeenth International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp.1107-1110, 2012/01/19, OITA(JAPAN), B-Con Plaza

- ⑥. T. Yoneyama, K. Ito, Development of flexible joints for a humanoid robot that walks on an oscillating plane, The Seventeenth International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp. 1095-1098, 2012/01/19, OITA (JAPAN), B-Con Plaza
- ⑦. 西貝和哉, 伊藤一之, 身体像を考慮した強化学習を用いた多脚ロボットの制御-身体特性を利用した汎化能力の実現-, 第12回自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 1610-1613, 2011/12/24, 京都(日本), 京都大学
- ⑧. 下館侑弥, 伊藤一之, 生存者探査を目的とした半円形二重構造マニピュレータの提案, 第12回自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 17-20, 2011/12/23, 京都(日本), 京都大学
- ⑨. 丸山晴生, 伊藤一之, 不整地での自律走行を目的としたヘビ型ロボットの開発, 第12回自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 13-16, 2011/12/23, 京都(日本), 京都大学
- ⑩. K. Nishigai and K. Ito, Control of multi-legged robot using reinforcement learning with body image and application to a real robot, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2511-2516, 2011/12/11, PHUKET (THAILAND)
- ⑪. T. Yamashiro and K. Ito, Comparative study of affordance-based navigation and model-based navigation -Experimental analysis of learning ability of mobile robot that taps objects with a stick for navigation, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 372-377, 2011/12/07, PHUKET (THAILAND)
- ⑫. Y. Shimodate, K. Ito, Semicircular duplex manipulator to search narrow spaces for victims, 9th IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, pp. 7-12, 2011/11/02, KYOTO (JAPAN), KYOTO University
- ⑬. 宮川陽太, 近藤雄太, 伊藤一之, 接触までの残り時間 τ を用いた群行動の実現-光源を搭載した移動ロボットへの適用-, 第23回自律分散システムシンポジウム資料, pp. 307-312, 2011/01/30, 北海道(日本), 北海道大学
- ⑭. 小林敏治, 伊藤一之, 環境と身体を利用した状態・行動空間の汎化-不整地に適応可能な3次元ヘビ型ロボットへの適用-, 第23回自律分散システムシンポジウム資料, pp. 91-96, 2011/01/29, 北海道(日本), 北海道大学
- ⑮. 西貝和哉, 伊藤一之, 身体像を考慮した強化学習を用いた多脚ロボットの制御-実ロボットへの適用-, 第23回自律分散システムシンポジウム資料, pp. 61-66, 2011/01/29, 北海道(日本), 北海道大学
- ⑯. 丸山晴生, 伊藤一之, 半自律ヘビ型レスキューロボットの開発と性能評価実験, 第11回自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 530-533, 2010/12/23, 宮城(日本) 東北大学
- ⑰. Y. Hagsaka and K. Ito, Determination of Time to Contact and application to timing control of mobile robot, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 161-166, 2010/12/15, TIANJIN (CHINA)
- ⑱. Y. Miyagawa and K. Ito, Realization of Flock Behavior by Using Tau-margin, Proc. of International Conference on Control Automation and Systems, 2010/10/29, KINTEX, GYEONGGI-DO (KOREA)
- ⑲. H. Maruyama, K. Ito, Semi-autonomous snake-like robot for search and rescue, IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics, 2010/07/30, BREMEN (BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND)
- ⑳. T. Koyasu, K. Ito, Acquisition of the Body Image in Evolution -Role of Actuators in Realizing Intelligent Behavior-, Proc. of the 2010 International Conference on Modelling, Identification and Control, pp. 859-864, 2010/07/17, OKAYAMA (JAPAN), OKAYAMA University
- [その他]
ホームページ等
<http://www.k.hosei.ac.jp/~ito/>
6. 研究組織
(1) 研究代表者
伊藤 一之 (ITO KAZUYUKI)
法政大学・理工学部・准教授
研究者番号: 90346411