知覚量に基づく制御系設計

—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—

伊 藤 一 之*・福 森 嘉 孝**

Proposal of New Framework of Controller Design Based on Perception —Feedback Control of a Snake-like Robot Using Perception of Direction—

Kazuyuki ITO* and Yoshitaka FUKUMORI**

In this paper we propose new framework of controller design for redundant robots which works in unknown complex world. We consider three problems of unknown complex world. They are problem of sensing, problem of modeling and problem of real-time processing. We show that the cause of the problem is to model the real world by using physical quantity. To solve the problems, we employ perceptual model, which is an abstracted expression of the real world, instead of the conventional physical model. To realize new controller which use the perceptual model, we propose the passive intelligence and the active intelligence. We show that the perception can be realized in real-time by the passive intelligence using properties of the real world, and we also show that active intelligence can control the robot without suffering of the problem of real-time processing by using the perceptual model.

To demonstrate the effectiveness of the proposed framework, we have applied the framework to a snake-like robot which has crawlers. As a result, effective behavior moving toward a light source has been realized.

Key Words: problem of sensing, problem of modeling, problem of real-time processing, concept, snake-like robot, affordance

1. はじめに

近年、ロボットの多自由度化に伴い、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、多自由度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、ロボットのも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¹⁾、「計測における問題」、「モデル構築における問題」、「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すべ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、実世界をモデル化するた

めに必要な情報をあらかじ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。

一方、生物の振る舞いに目を向けてみると、生物は、これらの問題に悩まされることなく、自律的、適応的に振舞うことができる。また、われわれ人間も自らの身体のもつ多自由度を適切に使い分け複雑な運動を適応的に行なうことができる。この、ロボットの制御系と生物の制御系の違いを生じさせる本質的な原因については、未だ十分に解明されていないが、さまざまな研究分野において「力学的性質をはじめとする実世界のもつ性質」が、これを解明する一つの大きな鍵であると考えられ、注目を集めている^{3), 6)~9)}。

本論文では、これら三つの問題が同時に発生する状況において適切に機能する制御系をいかにして実現するかについて考える。われわれは、これらの問題が、現在一般的に用いられている制御系の枠組みにおいて、「物理学に基づいて実世界を記述し、計算機の中で必要な情報処理のすべてを行なおうとしている点」にあると考え、これに代る枠組みとして、「知覚量を用いて実世界を抽象的に記述する枠組み」を提案する。そして、知覚量を抽出するために実世界そのものを情報処理機構として利用することで、これらの問題を解決でき

* 法政大学工学部 小金井市梶野町 3-7-2

** 岡山大学大学院 岡山市津島中 3-1-1

* Faculty of Engineering, Hosei University, Koganei

** Okayama University

(Received March 4, 2005)

(Revised December 2, 2005)

ることを示す。提案手法の有用性を検討するため、クローラにより推進する蛇型ロボットを例に、提案手法により制御系を実現する。そして、実世界を情報処理機構として用いることで「方向」の知覚量を実時間に抽出可能であることを示す。また、この方向を表わすスカラー量を単純にフィードバックするだけで、多自由度の蛇型ロボットの制御が実現可能であることを示す。

2. 実環境への適用における困難性

本章では、未知で変化を伴う複雑な環境において活動する多自由度ロボットの制御系設計における問題点について述べ、本論文で解決する問題を明らかにする。

P1 計測における問題

これは、実世界の必要な状態すべてを計測することは不可能であるという問題である。一般に、実世界で適応的に振舞うロボットを実現するためには、非常に多くの情報を必要とする。しかし、ロボットに搭載可能なセンサの数と種類には限界があり、また、技術的に測定不可能な物理量が存在するため、必要な情報すべてを計測することは不可能である。

P2 モデル構築における問題

実世界をモデル化するために必要な情報をあらかじめ準備することが不可能であるという問題である。動力学に基づいて運動する対象を考えた場合には、制御対象のモデルを構成するために対象のさまざまな物理パラメータが必要となる。しかし、未知で変動する環境において活動するロボットを考えた場合には、モデルの構築に必要な物理パラメータをあらかじめ同定しておくことは不可能である。また、このモデルの構築が不可能であるという問題は、計測が不可能であった状態をモデルを用いて推定することも不可能であることを意味する。

P3 実時間処理における問題

これは、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。一般に、環境の複雑さの増加やロボットの自由度の増加に伴ってコントローラにおいて処理しなければならない計算量が指数的に増加し、実時間処理が困難となる。

本論文では、これらの問題が同時に発生する状況においてどのように制御系を構成するべきかについて考える。

3. 従来手法の問題点と本論文の指針

本章では、従来の制御系設計の枠組みの問題点を述べるとともに、本論文の指針を示す。Fig. 1 に従来の枠組みを示す。従来の枠組みでは、実世界の状態は、多数の物理量に分解され、センサを用いてコンピュータ内に取り込まれる。コンピュータ内に実現されたコントローラは、これらの物理量を基に制御則を計算しアクチュエータを駆動するための信号を生成する。制御信号は、アクチュエータによって実世界の運動となり、実世界へと返される。Fig. 1 に示すように、この枠組みでは、センサとアクチュエータが、実世界と情報の

Fig. 1 Conventional framework

世界との境界となる。

われわれは、従来の制御系設計において P1-P3 が問題となるのは、物理学に基づいて実世界を記述し、計算機の中で必要な情報処理のすべてを行なおうとしている点にあると考える。物理学に基づいた制御系を実現するためには、実世界の状態を物理量として計算機内に取り込むための計測が必要となり、また、計算機内で実世界を表現するためにモデルが必要となる。さらに、本来、物理学は、実世界をできる限り客観的かつ詳細に記述することを目的として作られた体系であるので、物理学を基に実世界のモデルを構築すれば、それに必要とされる情報量は膨大なものとなる。そして、これらが、P1-P3 が問題として表面化する理由であると考えられる。

一方、生物の振る舞いを考えた場合、生物にとっては、実世界を客観的かつ詳細に記述することは必要ではない。むしろ逆に、自らのもつ限られた計算資源を有効に活用するためには、実世界は可能な限り少ない情報量で抽象的に記述されるほうが都合が良い。したがって、自分が生きていくために区別する必要のない状態を同一視することで、実世界を抽象化し、この抽象化された主観的なモデルを基に振る舞いが決定されていると考えられる。ここで、重要となるのは、如何にして抽象的な情報を実世界から抜き出し、この抽象的な情報を用いた制御系を構築するかである。

本論文では、実世界との相互作用を伴うタスクについて考え、実世界そのものを情報処理機構の一部と考えることで、計測やモデルを必要としない情報処理系が実現可能であることを示す。そして、この実世界の情報処理系を用いて実世界の多数の情報を抽象化する枠組みを提案する。さらに、この抽象化された少数の情報のみを計算機内に取り込み、この抽象化された情報を制御量とする制御系の枠組みを提案し、提案した枠組みにおいては、P1-P3 が問題とならないことを示す。

4. 知覚量に基づく制御系設計

本章では、従来の「物理量を制御量とする制御系」に代わる新しい制御系の枠組みとして「抽象的な概念の大きさを表わす知覚量を制御量とする制御系」を提案し、その概要を示す。

4.1 物理量と知覚量

本節では、概念の大きさを表わす量と物理量との違いを述

Fig. 2 Leverage

べ、概念の大きさを表わす量として知覚量を定義する。

通常、制御理論では、実世界は、物理量を変数とする数式によりモデル化される。また、このモデル化の際、“独立かつ完全な一般座標系⁴⁾”が用いられ、座標系がこのような構成となるように、使用する物理変数の種類と数が決定される。物理量は、それをある物理単位を用いて表わすとき、対象が決まれば、その大きさを表わす値が一意に決まる絶対的な量であり、観測者の違いや観測者の状態の違いによって値が異なることはない。(ここでは、計測誤差は考えない)。

一方、われわれ人間が外界を知覚する場合には物理量とは異なる主観的な量を用いていると考えられる。たとえば、距離を知覚する際には、「遠い」、「近い」などの抽象的な概念が用いられ、物理量で表わせば同じ 5 km の距離であっても、徒歩で移動する場合と車で移動する場合とではその意味は異なり、徒歩の場合には遠く感じられ、車の場合には近く感じられる。これは、知覚される距離の概念の大小は、活動主体の置かれた状況に依存して変化する主観的かつ相対的な量あることを意味する。

ここで、上記のわれわれ人間が通常使っていると思われる、ある概念で表わされる量を物理量と区別して知覚量と呼ぶことにし、本論文で用いる知覚量を以下のように定義する。知覚量とは、ある活動主体が、ある身体をもち、ある環境におかれ、ある目的をもっている場合、この活動主体が自らの状況を基に外界を知覚する際に用いられる主観的、相対的、抽象的な量である。

4.2 実世界を利用した情報処理機構

本節では、テコの原理を例に、実世界を情報処理機構として用いることが可能であることを述べ、また、この情報処理機構は、計測やモデルを必要としないことを述べる。

Fig. 2 にテコの例を示す。ここで、このテコがつりあっているとき、(1) 式が成り立つことが知られている。

$$m_1 l_1 + m_2 l_2 = m_3 l_3 \quad (1)$$

ここで、つりあいの位置が事前にわかっていない場合に、このつりあいの位置を探すことを考える。たとえば、右側の錘の位置 (l_3) を変える操作によって、つりあいの位置を探すことができる。この操作は、テコを用いて (2) 式を計算していることに相当し、この例は、テコが実世界そのものを用いた情報処理機構になり得ることを示している。

$$l_3 = (m_1 l_1 + m_2 l_2) / m_3 \quad (2)$$

従来、このような情報処理系は、天秤ばかりなどの道具として使われてきたが、以下に示す非常に重要な性質は注目されず、電子計算機の進歩とともに徐々に姿を消してきている。

Fig. 3 Proposed framework

この重要な性質とは、「 m_1, m_2, m_3, l_1, l_2 を計るためのセンサを一切必要としないこと」、「テコ自身が情報処理系であるので、テコのモデルを必要としないこと」、「錘の数が増えたとしても計算時間は増加しないこと」である。これを一般的に表わすと、「処理される情報自体が実世界に含まれているため、計測を必要とせず、すべての情報は実世界にとっては既知であること」、「情報処理は、モデルではなく、実世界そのものを用いて行なわれるため、モデルを必要としないこと」、「情報処理は、実世界により並列的に行なわれるため、処理すべき情報の増加によって計算時間が増加しないこと」のようになる。そして、これが、実世界の性質を利用した情報処理系の重要な性質であり、これは、第2章で述べた P1-P3 が、実世界の性質を利用した情報処理系では一切問題とならないことを意味している。このテコの例では、静的なつりあいについて考えたが、動的な運動について考えれば、実世界を微分方程式を解くための情報処理系として利用することが可能となる。また、力学的性質以外にも、実世界の光学的性質、電磁気学的性質、化学的性質など、さまざまな性質を利用することで、さまざまな情報処理系が実現可能であると考えられる。

本論文では、ロボットの身体を情報処理系の一つとして考え、身体によって実世界の性質を利用した情報処理系を実現する。そして、この情報処理系を、知覚量を抽出するための抽象化処理と、知覚量を運動として実世界へ返すための具象化処理に用いることで、P1-P3 の問題を解決する。

4.3 受動知能と能動知能

本節では、知覚量を用いた制御系を実現するために、制御系の新しい枠組みを提案する。Fig. 3 に提案する枠組みを示す。

提案する枠組みでは、コントローラを「受動知能」と「能動知能」という二つの知能に分けて考える。通常、制御理論においては、演算装置に対して知能という言葉は用いられないが、本論文では、単に演算処理をするのではなく、主体的に「意味」を生成するという意味をこめてあえて知能という言葉を用いる。ここで、受動知能は、4.2節で述べた実世界そのものによって実現される情報処理系であり、主に、ロボットの身体によって実現される。これは、物理的な状態が一意に決まれば、その出力が一意に決まり、意思決定による行動の分岐を伴わず受動的に出力が生成される処理系であるため受動という用語を用いている。

一方、能動知能は、実世界とは独立な、コンピュータなど

の演算装置の中に実現される情報の世界における情報処理系であり、力学的な制約を一切受けない。したがって、物理的な状態とは独立した状態を演算装置内にもち、この状態に基づいて意思決定を行ない出力を能動的に変化させることが可能である。この意味で能動という言葉を用いる。

つぎに、提案手法における情報の流れについて説明する。Fig. 3 に示したように、能動知能は受動知能に囲まれており、受動知能と能動知能の間が「実世界」と「情報の世界」との境界となる。受動知能は実環境と相互作用することにより実世界の多数の情報を抽象化し少数の汎化された知覚量に縮退させる。そして、これを能動知能に渡す。能動知能は、この知覚量を制御量として制御系を構成し、出力信号を生成する。出力信号は受動知能に渡され、受動知能は実環境と相互作用することで知覚量を具象化し、これにより能動知能の出力信号は、多関節の運動などの複雑な動作となって実世界へ返される。

つぎに、提案手法における **P1-P3** の解決方法について述べる。まず、**P1** について考える。4.2節で述べたように、受動知能は、実世界そのものにより実現されているため、計測を必要としない。必要な情報すべては実世界に含まれており、情報処理系自体が実世界により実現されているため、計測という行為を必要とせず、実世界の情報を用いた情報処理が実現される。したがって、**P1** は解決されている。

つぎに、**P2** について考える。受動知能では、実世界のモデルは必要ではなく、モデルの代わりに実世界そのものが情報処理に用いられる。したがって、設計者は、実世界の物理パラメータを一切知る必要はなく、それが動的に変化したとしても、つねに真の値を用いた情報処理が行なわれる。したがって、**P2** は解決されている。

最後に、**P3** について考える。受動知能は実世界により実現されているため、情報処理と運動の実現とは一体であり、受動知能における情報処理は、ロボットの自由度の大きさや、環境の複雑さに依存せず、必ず実時間に行なわれる。また、受動知能による情報の抽象化により、能動知能において処理しなければならない情報量は削減されているため、能動知能における情報処理も実時間に完了することが可能となる。したがって、**P3** は解決されている。

つまり、提案手法では、抽象的な概念の大きさを表す知覚量を実世界から抽出するための処理を、実世界そのものを使って行なうことで、従来の問題を解決しているといえる。ここで、Fig. 3 において、入力側の受動知能と出力側の受動知能がつながっており一体となっている点が重要である。受動知能における情報処理は単に左から右への一方的な順次処理ではなく、出力側（運動を生成する部分）の状態が入力側に影響を及ぼし、また、同時に、入力側の状態が出力側に影響を及ぼす。これは、受動知能が環境と相互作用するなかで、実世界の性質を利用して並列処理により知覚量を生成しているためである。これにより、受動知能は、活動主体が置かれた状況に依存した主観的、相対的な量としての知覚量を実時

間に生成することができる。このことは、情報の抽象化による概念の知覚と、概念の具象化による行為の実現が一体であることも意味する。

また、別の見方をすれば、受動知能は、従来の枠組みにおいて制御対象と考えられていたロボットの身体や環境の力学的特性により実現されていると言える。この実世界の力学的特性を利用するという考え方は、ダイナミクスベース制御にヒントを得たものであるが、提案する枠組みでは、この実世界の性質を知覚量を抽出するために使用している点が重要である。これにより、従来のダイナミクスベース制御では扱うことが不可能であった知覚の問題を同時に扱うことが可能となり、複雑な実世界から必要な少数の抽象化された情報を知覚し、これを基に多自由度ロボットを制御することが可能となる。

また、この問題は、記号接地問題^{1),12)}の観点から考えると以下のように解釈することができる。提案する枠組みでは、能動知能は計算機内に実現されるため、能動知能内での知覚量は単なる数値として扱われる。したがって、この数値に抽象的な概念としての意味を接地させる必要がある。提案手法では、これは受動知能によって行なわれる。受動知能は、実世界を利用した情報処理系により実現されており、身体と実世界との相互作用により多数の情報が抽象化され、知覚量が抽出される。そして、これが能動知能に渡される際に能動知能内の数値に接地される。これは、知覚量は身体や環境に依存していることを示し、このことから、知覚量は、身体や状況に依存した主観的かつ、相対的な量であることがわかる。

一方、従来の枠組みでは、計算機内で処理される数値に意味を与えているのはセンサとアクチュエータであり、数値には物理量としての意味が与えられていた。物理量はロボットの身体や身体のおかれた状況には依存しない客観的な量であるので、従来の枠組みでは、数値には客観的な意味が接地されていたと言える。したがって、従来の枠組みでは、ロボットの状況に依存した抽象的な意味を抜き出すためには、モデルを用いて計算機内にロボットの状況を再現し、計算機内の情報処理によって抽象的な意味を生成しなければならない。このように、提案手法における、「身体と環境が記号に直接抽象的な意味を与える」という枠組みは、従来の「センサで計測した値が記号に物理的意味を与える」という枠組みと大きく異なる重要な点である。

以上の受動知能の働きにより、能動知能では、知覚量を制御量とする制御系を構成することが可能となる。またこれは、能動知能において実世界は、抽象的な概念を用いて少ない情報量で表現されることを意味する。

5. 蛇型ロボットへの適用

本章では、蛇型ロボットの制御を例に、「方向」を意味する知覚量を制御量とする制御系を構築し、提案した枠組みの有用性を示す。

Fig. 4 Task

5.1 タスク

Fig. 4 にタスクの概要を示す。水平な二次元平面内で運動する蛇型ロボットを考え、障害物が存在する環境において、光源へ向かって推進することを目標とする。ただし、障害物には接触してもよいとする。障害物の間隔は最も狭い所であっても、蛇型ロボットの幅の1.5倍より大きいとする。また、光源は十分に高い位置にあり、障害物により光は遮られないものとする。障害物として、木の棒、自由に回転するプラスチックの筒、スポンジを巻いた木の棒の3種類を用い、また、設置方法を固定と半固定の2種類とする。木の棒は硬く伸び縮みしないため、木の棒とロボットとの接触は、木の棒の方向への速度が0となる速度拘束となる。プラスチックの筒は、木の棒と同様に速度拘束となるものの、自由に回転する機構が付いているため、円周方向への摩擦が十分に小さい。スポンジで覆われた棒は、棒を中心にスポンジが収縮する範囲では、非線形ばね特性をもち、その範囲を超えようとする場合には、速度拘束となる。さらに、これらのうちいくつかは、半固定状態であるため、ある一定の力が加わるまでは上述の特性となるが、それを越えた瞬間に障害物の固定が外れ、拘束が外れることとなる。さらにこの場合、拘束が外れる閾値となる力の大きさは、事前に知ることができない。また、ロボットは、障害物の種類や配置に関する情報をもたないこととする。蛇型ロボットは多自由度をもち、同時に複数の障害物と接触しつつ、これらの間を目標の光源に向かって進行する。

以上から、本タスクは、環境に未知でかつ計測が困難な要因が含まれていること、ロボットと障害物との接触状態のモデル化が困難であること、ロボットと障害物との接触状態の計測または推定が困難であること、運動を記述するための標準座標系の次元が大きくなることなどの要因により、従来の制御系ではP1-P3が問題となり、実現が困難なタスクである。また、本タスクでは、ロボットは障害物と接触することで実世界と力学的な相互作用を行なうことから実世界の力学的特性を情報処理系として利用可能なタスクである。

5.2 受動知能の実現

本節では、「方向」の概念を抽出しその大きさを知覚量として表わすための受動知能を構成する。

Fig. 5 Passive intelligence using photo-resistors

5.2.1 方向の取得

多数の光素子を用い、光素子の物理特性である指向性を利用して、光源の方向を抽出する受動知能を構成する。

Fig. 5 に概要を示す。光素子として浜松ホトニクス製の可視光導電素子 P1225-01 (Fig. 5 a) を用いる。この素子は、光量に応じて抵抗値が変化する素子であり、光が強いほど低い抵抗値を示す。光素子は、4つを一組として Fig. 5 b) のように半円弧状に配置され、さらに、各リンクに一組ずつ、Fig. 5 c) のように配置される。これらの光素子の値を、(3) 式により各素子が受光した光の強さの重心に相当する値に変換し、これを方向の知覚量とする (N はリンク数を表わす。(3) 式の値域は $0 < x < 3$ であり、ロボットが光源の方向へ直進しているとき 1.5 を返す)。つまり、多数の光素子の出力を重心という形で抽象化してスカラーとし、これを方向の概念に接地していると言える。

(3) 式の計算は、アナログ電子回路により並列的に処理する事とする。これによりリンク数の増加による計算時間の増加に悩まされることなく、情報量の次元を落とすことができる。この構成では、光素子の情報を処理するために電子回路が用いられているが、この回路で計算される (3) 式には、条件分岐などの処理は含まれておらず、物理的な状態が一意に決まれば、出力も一意に決まるため、電子回路の特性も身体の一部と考え、受動知能であると考え。

ここで、光素子が指向性をもっている点が重要である。指向性をもった素子を円弧上に配置することで、各素子からの出力の重心をロボットから見た光源の方向として用いることが可能となる。つまり、素子の特性とその特性を活かす配置の仕方によって受動知能が実現されている。

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} (1/R_{i2}) + 2 \sum_{i=1}^{i=N} (1/R_{i3}) + 3 \sum_{i=1}^{i=N} (1/R_{i4})}{\sum_{j=1}^{j=4} \sum_{i=1}^{i=N} (1/R_{ij})} \quad (3)$$

5.2.2 方向の出力

方向の概念を実際の運動として具象化するための運動系を実現する。

Fig. 6 に蛇型ロボットのために受動知能の枠組みに基づき設計した運動系および、適応的な運動の実現方法を示す。ロボットの各関節は、受動関節により実現され、関節を挟むよ

Fig. 6 Passive intelligence for actuation of snake-like robot

Fig. 7 Adaptive behavior

うにリンク間が2本のゴムでつながれている。また、リンクを囲むように2本のワイヤーが張り巡らされ、ワイヤーの長さは、最後尾に取り付けられたモータにより制御される。ロボットの下部にはクローラが取り付けられている。

Fig. 6に示すように、クローラにより推進したロボットは、障害物に接触することで反力を受け、受動関節が運動する。これに伴いワイヤーが引かれ、ワイヤーの張力により他の受動関節が運動し、障害物を回避しつつ進行方向を一定に保とうとする振る舞いが受動的に実現される。このとき、回転した関節の間に張られたゴムの一方は、自然長よりも長くなり、エネルギーを保存するように機能する。その後、障害物を回避してワイヤーの張力が減少した場合には、このゴムは、蓄えたエネルギーを消費するアクチュエータとして機能し、受動関節を元の姿勢（ロボットが直線となる状態）になるように回転させる。このワイヤーによる力学的拘束、ゴムの力学的動特性により、「障害物の検出、回避運動の実現、回避運動により生じた進行方向のずれの補償、回避完了の確認、通常姿勢への復帰」の一連の行動を一切の制御を必要とせず、身体の機構的な特性だけを用いて実現することができる。

たとえば、左右のワイヤーの長さが等しく、かつ、障害物の配置が一様である場合には、Fig. 7に示すように、障害物との接触状態によって微視的には左右に移動するが、巨視的には直進する振る舞いが発現する (Fig. 7a)。また、後尾のモータを回転させ、左右のワイヤーの長さを変化させることで、巨視的な振る舞いが変化し、たとえば、左のワイヤーを短くすることで、障害物を回避しながら左に旋回する振る舞いが発現する (Fig. 7b)。つまり、ロボットの関節の微視的な運動は、身体の機構的な特性に基づき、障害物との相互作

用により創発し、ロボットの巨視的な振る舞いは、一つの制御量（ワイヤーの長さの差）を制御するだけで操作することができる。ここで、この左右のワイヤーの長さの差に「進行方向」を表わす知覚量を対応させることで、方向の概念の具象化が実現できる。

5.2.3 受動知能の一体性

第4.3章において、入力側の受動知能と出力側の受動知能は一体であることを述べた。本節では、蛇型ロボットにおける受動知能の一体性について述べる。最初に障害物の検出について考える。提案した蛇型ロボットでは、接触センサ、力センサは一切搭載されておらず、障害物の検出や障害物からの反力の計測を明示的には行っていない。しかし、障害物からの反力は、機構的に、ワイヤーの張力に変換され、最終的には受動関節を運動させるために使われている。また、この関節の運動によりロボットと障害物との接触状態が変化しこれが反力となって再びロボットへ返される。つまり、従来の手法において独立かつ順次的に行なわれていた、「計測」、「制御則の計算」、「関節の駆動」の一連の流れが、提案した枠組みでは、一体かつ同時に実世界において実現されており、分離することはできない。

つぎに、光源の方向の検出について考える。蛇型ロボットの姿勢は、ロボットのすべての関節の状態によって決まる。したがって、従来の物理学に基づく記述方法では、通常、すべての関節の絶対角度を用いてロボットと光源との位置関係を記述する必要がある。この場合、推進方向を求めるために必要な計算量は自由度の増加とともに指数的に増加してしまう。提案した蛇型ロボットでは、すべてのリンクに光素子を取り付け、光素子の指向性を利用することで、多数の光素子の情報を、光素子の出力値の重心に置き換え、この問題を解決している。ここで、各リンクの光素子の向き自体が、リンクの運動に伴って回転する点が重要である。これにより、ロボットの各関節の状態により光素子の値が変化するため、同一の回路においてさまざまな状態のロボットの推進方向が得られる。

さらに、この光素子の出力の重心の値には、障害物との接触状態も加味されている点も重要である。ロボットの各リンク間には復元力を発生させるためのゴムが取り付けられており、障害物に接触していない時は、ロボットは直線状の姿勢をとろうとする。逆に、ロボットの各リンクが平行でないときには、ロボットは障害物に接触していることを意味する。つまり、障害物との接触状態によりリンク間の相対角度が変化し、これに伴い光素子の向きが変化し、最終的に光素子の出力の重心の値が変化する。つまり、障害物との接触状態やロボットの姿勢を陽に考慮していないが、実世界の運動そのものを用いたため、これらが暗黙に考慮された値が方向として受動知能より出力される。

5.3 能動知能の実現

本論文では、能動知能の最も簡単な実現例の一つとしてフィードバック制御による実現例を示す。

Fig. 8 Snake-like robot

受動知能により、障害物との接触状態や、ロボットの姿勢などが抽象化され、ロボットの「方向の知覚量」が抽出されたため、能動知能はこのスカラーで表わされる知覚量を用いて自身の運動を記述することが可能となる。(4)式に制御則を示す。

$$\tau = -k(x - x_d) \quad (4)$$

ここで、 $k(k > 0)$ は比例ゲイン、 x は光源の方向に相当する光素子の出力の重心の値、 τ は左右のワイヤーの長さを制御するためのモータの出力トルク、 x_d は x の目標値であり、すべてスカラーである。 τ は、モータのトルクであるため、形式上は物理量であるが、モータが回転することで左右のワイヤーの長さに差が生じ、このロボットにとっては、ワイヤーの長さの差が方向の知覚量であるので、モータのトルクを変化させることは、ロボットの方向の知覚量を変化させることに相当する。

(4)式は、形式上は、従来のフィードバックによる制御則と同一であるが、本質的な違いとして、制御量が物理量ではなく、知覚量となっている点が重要である。知覚量は汎化された量であり、知覚量のある値に対して、複数の異なる物理的な状態が対応する。したがって、 x がある同一の値を取っているとしても、ロボットの状態は、環境の状態にあわせ異なる状態をとっている場合がある。この汎化作用は受動知能により行なわれ、能動知能はロボットの詳細な状態を区別する必要がなく、複雑な環境における多自由度ロボットの制御が、一つのスカラーをフィードバックするだけで可能となる。これにより、情報量の指数増加に悩まされることなく制御系を実現できる。言い換えれば、能動知能はロボットと環境からなるシステムのある平衡点（光素子の出力の重心）を状態として、このシステムの平衡点（進行方向）を拘束条件（ワイヤーの長さの差）を操作することで制御していると言える。

5.4 受動知能および能動知能による問題の解決

本節では、実現した受動知能および能動知能において、いかにして P1-P3 が解決されているかを述べる。

本論文で考えるタスクでは、ロボットと障害物が接触す

るため、従来の制御系では、この接触状況をどのように計測するか (P1)、また、ロボットと障害物との接触をどのようにモデル化するか (P2) が問題となる。しかし、本論文で実現した蛇型ロボットでは、障害物の検出と回避を機構的に実現しているためこれらの情報をコンピュータ内に取り込む必要はなく、障害物を検出するためのセンサや、障害物からの反力を計測するためのセンサは必要ない。

また、「センサ」を実世界の状態を物理量に変換してコンピュータに取り込む装置であると狭義に定義すれば、受動知能における光素子は、センサではないと考えられる。光素子はそれ自身が受動知能を構成する情報処理系の一部であり、光素子の指向性は情報処理機構の一部として機能している。光素子の状態にロボットの姿勢や障害物との接触状態などが加味され、これらの情報が受動知能によって抽象化され、方向の概念となってからコンピュータ（能動知能）に取り込まれる。つまり、本論文で実現した蛇型ロボットにおいて、コンピュータ（能動知能）に取り込まれるのは知覚量であり、また、知覚量を生成しているのは実世界の機構的、物理的な特性を利用した情報処理系であるので、計測は必要なく、P1 は発生しないことがわかる。

同様に、この蛇型ロボットでは、知覚量を生成するために実世界のモデルを使用せず、実世界そのものを用いているので、P2 が発生していないこともわかる。

さらに、この蛇型ロボットでは、機構的に方向の知覚量を抽出しているので、自由度の増加や、接触している障害物の数の増加に悩まされることなく、「方向」の知覚量が実時間に抽出可能であることがわかる。また、これにより、能動知能では、(4)式で示された簡単な制御則を計算するだけでよく、P3 が解決されていることがわかる。

5.5 実験

5.1節で示したタスクの実現を目標に、6 リンクの蛇型ロボットを用いて実際に実験を行なう。Fig. 8 に、実験で用いた蛇型ロボットを示す。ロボットの大きさは、長さ 85 cm、幅 11 cm、高さ 18 cm であり、重量は 2.1 kg である。実験フィールドの大きさは 3.6 m × 1.8 m とする。

本タスクでは、光源への移動が目標であるため、光源の方向を目標として、 $x_d = 1.5$ ((3)式において推進方向が光源の方向と一致するときの値) と設定し、(4)式により方向の制御を行なう。推進するためのクローラのモータには一定の電圧を印加し、特に制御は行なわないもとする。

Fig. 9 にロボットの先頭と光源との距離および光源の方向の変化を、Fig. 10 に実現された振る舞いの例を示す。これらから、障害物を回避しながら光源へ向かい推進していることがわかる。このほか、障害物の位置をランダムに変え、10 回の実験を行なったが、すべての実験において、ロボットの先頭が、光源を中心とする半径 25 cm の円内に到達することを確認した。

これらの結果から、ロボットは、障害物に接触することで、進行方向が変化するとともに、姿勢もさまざまな状態へと変

Fig. 9 Experiment result

Fig. 10 Behavior

化しているにもかかわらず、これらが修正され、ロボットが光源へ近づいていっていることがわかる。このことから、受動知能において抽出された値が、方向としての抽象化された意味をもつとともに、制御系の制御量となりうる事が確かめられる。したがって、方向の概念の抽出による知覚量に基づいた制御系が実現されていると言える。また、この実験において、コントローラ（能動知能および受動知能）の設定は同一であるにもかかわらず、ロボットの移動した軌跡、および、ロボットの各関節の軌跡は、実験ごとに大きくことなっていた。これは、ロボットの軌跡が、環境との相互作用により創発したものであり、コントローラの設定を変更することなく、環境の違いにうまく適応可能であることを示している。

Fig. 11 Idealization and Abstraction

6. 考 察

本章では、知覚量を用いた制御系と従来の制御系の違いを考察する。

6.1 理想化と抽象化

本節では、情報量を削減するために従来用いられていた「理想化」と提案手法による「抽象化」の違いについて述べる。

従来の制御系設計では、通常、制御対象の理想化により座標系の次元の低減化が行なわれる。たとえば、ロボットの自由度を必要最低限の自由度まで減少させ、ロボットの運動を記述する座標系の次元を下げることや、環境を簡単で、できる限り静的かつ既知なものとする事で実現される。

これは、Fig. 11 a) に示すように、実世界の取りうる多様な状態のうち、ある範囲を限定し、この限定された状態のみを考慮して制御系を設計することに相当する。この場合、実世界の状態は物理量として抜き出されてモデル化され、実世界の一つの状態と物理量のある値との対応は1対1である。

この理想化の枠組みでは、情報量を削減することは、制御系の適応可能な範囲を狭めることを意味する。そして、これが、従来の理想化の枠組みでは、未知で複雑な環境において活動する多自由度ロボットの制御系が実現不可能な原因である。

一方、提案手法における「抽象化」の枠組みでは、区別する必要のない状態を同一視することで、情報量を削減する。これは、Fig. 11 b) に示すように、一つの知覚量の値に対して、実世界の複数の状態が対応する関係になっており、汎化された少数の知覚量で複雑な実世界を表わすことで情報量を削減している。したがって、抽象化の枠組は、対象となる実世界を制限しないため、複雑な環境において機能する多自由度ロボットにも適用することが可能である。

たとえば、蛇型ロボットの方向のように、従来の枠組みであれば、関節の数と同じ次元の関節角度ベクトルとして表わされるものが、提案手法では、スカラーの知覚量として表わすことができ、抽象化により情報量が削減されていることがわかる。

6.2 従来の抽象化手法との比較

実世界を抽象的に表現することを試みた従来手法と提案手法との違いについて考える。

実世界を抽象的に記述することを試みた従来研究の代表例として、ニューラルネットワーク、および、ファジィ制御を挙げることができる。前者は、脳の情報処理系を模擬したものであり、多数のニューロンをつなぎネットワークを構成することで、特徴抽出などの抽象化処理が実現可能であることが知られている。後者は、人間のもつあいまいな概念を取り入れたものであり、自然言語のもつあいまいな表現を用いて制御系を記述することができる。また、多重多段ファジィ推論を用いることで、多数の情報を基にした推論を行なうことができる。

しかし、これらの情報の抽象化に関する研究では、必要な情報すべてがコンピュータ内に取り込まれることを前提に、コンピュータ内でどのように情報を処理するかが研究の主な対象となっている。したがって、第2章で述べたP1は解決されていない。また、仮に必要な情報のすべてを得られたとしても、抽象化を行なうために多くの処理を必要とするため、環境やロボットが複雑になるにつれ、抽象化の処理においてP3が問題となる。

これに対して、提案手法では、実世界そのものにより実現された情報処理系を用いることで、P1-P3に悩まされることなく、情報の抽象化を実現することができる。

6.3 行動規範型ロボットとの比較

サブサンプリングアーキテクチャ^{11),13)}をはじめとする行動規範型ロボットでは、反表像主義の立場を取り、実世界のモデルをもたず、その代わりに実世界そのものを用いることで、実世界の内部表現を構成する際に生じる問題を回避している。しかし、その一方で、この実世界のモデルを一切もたないことは、過去の経験によるモデルの構築やモデルを利用した予測に基づく行動の選択など、表像主義に基づく手法であれば容易に実現可能な機能が制限されることも意味する。また、われわれ人間は、実世界の内部表現をもちこれを用いて思考することができ、このわれわれ自身の感覚は反表像主義とは相反するものである。

一方、提案手法では、実世界の内部表現をもつことを否定するのではなく、実世界を知覚量という少数の抽象化された情報を用いて表現することで、実世界の内部表現を構成する際に必要とされる情報量の増加を抑えている。提案手法では、実世界の性質は、この抽象化を行なうために用いられ、これにより、抽象化するための処理を実時間で完了させている。つまり、提案手法では、内部表現を構成することを放棄したわけではなく、内部表現の構成方法を見直すことで従来の問題を解決している。

6.4 アフォーダンスとの関係

知覚に関する関連研究として、生態心理学におけるアフォーダンスを挙げることができる^{6),7)}。これは、ギブソンにより提唱された認知理論の枠組みであり、従来の、「感覚器に入った刺激を脳が演繹・推論し、その結果、動物にとって意味のある情報が知覚される」という考え方を否定し、「動物にとって意味のある情報（アフォーダンス）は環境の中にあり、直

接知覚される」とした枠組みである^{6),7),11)}。

移動ロボットのためのアフォーダンスの抽出を試みた研究として、田川らの遺伝的アルゴリズムによる方法¹⁴⁾、李らの強化学習による方法¹⁵⁾を挙げることができる。

しかし、これらの研究では、アフォーダンスとは、多数の状態・行動の中から、与えられた環境においてタスクを実現するために重要となる状態または行動を抜き出したものであり、汎化された情報ではない。したがって、ある環境で得られたアフォーダンスを異なる環境において利用することは困難である。この意味において、これらの研究で提案されている枠組みでは、人間のもつ汎化能力を説明することができない。

また、これらの研究では、環境は非常に簡単な離散的な世界としてモデル化されており、力学系をはじめとする実世界のもつ性質はアフォーダンスの抽出に用いられていない。さらに、進化もしくは学習に必要な計算時間の問題から実世界の複雑な対象に適用することは困難であると考えられる。

一方、提案手法における知覚量は、汎化された量であり、障害物の配置が変化したとしても同じ意味を保持することができる。また、障害物との接触状態に応じてヘビ型ロボットはさまざまな姿勢をとるが、この多数の姿勢を方向という一つの量に抽象化して知覚することができる。この意味において、提案手法における方向の知覚量とは、生態心理学の用語を借りれば、不変項と表現することができるのではないかと考えられる。

また、アフォーダンスとは、本来、行為の可能性を意味して作られた用語であるが、本論文における行為の可能性は以下のように考えることができる。

ヘビ型ロボットが障害物を回避しながら任意の方向へ移動することが可能なのは、障害物からの反力が存在するからである。これは、ヘビ型ロボットの機構を適切に設計することにより、「障害物が存在するという環境」から、「任意の方向へ移動するという行為の可能性」を抜き出すことが可能であると解釈することができる。

つまり、アフォーダンスの抽出が実世界の特性を使った情報処理系により実現されると考えると、受動知能はアフォーダンスを生成するための情報処理機構となり、受動知能から能動知能への情報の流れを能動知能の側から見た場合には、アフォーダンスが直接知覚されることになる。したがって、提案した枠組みは、アフォーダンスを利用した制御系を実現するための従来とは異なる新しい枠組みとなっていると考えられる。

6.5 Morphological Computation およびダイナミクスベース制御との関係

近年、実世界の力学的性質を積極的に利用した制御系が注目されてきている。これらの研究と比較して提案手法の重要な点は、提案手法における受動知能では、単にロボットの運動を力学的性質を利用して制御しているだけでなく、これと同時に、抽象化された知覚量を抽出している点である。これ

により、ロボットは主観的な意味をもった量を用いて実世界を抽象的に表現することが可能となり、知覚量を制御量とする制御系を構成することができる。

7. 最後 に

本論文では、未知で複雑な実環境において活動する多自由度ロボットの制御系について考え、従来の物理量に基づく制御系に変わる新しい制御系として、知覚量に基づく制御系の必要性を述べた。また、計測における問題、モデル構築における問題、実時間処理における問題の3つの問題の観点から、知覚量の抽出は、情報の世界で行なうのではなく、実世界で行なう必要があることを述べ、これを実現する枠組みとして受動知能と能動知能の二つの知能からなる知能の枠組みを提案した。

本論文の主張は、「実世界を情報処理系として利用することにより、未知環境から、実時間に抽象化された知覚量を抽出することが可能であること」および、「この知覚量を基に、実世界を抽象化された小さな世界として表現することで、制御則が簡単になり、複雑な環境における多自由度ロボットの制御が容易に行なえること」の二つである。

提案手法の有用性を示すため、クローラで推進する蛇型ロボットを例に実際に受動知能を機構的に構成し、実世界の性質を使って方向の知覚量を抽出可能であることを示した。また、能動知能において方向の知覚量を制御量とすることで、制御系が簡略化され、1次元の知覚量を単純にフィードバックするだけで、6リンクの蛇型ロボットが障害物を回避しつつ光源へ向かって移動する振る舞いが実現されることを確認した。

今後の課題は、受動知能および能動知能を具体化する際の設計指針の一般化、知覚量を制御量とする制御系の安定性をはじめとする諸特性の解析である。

謝辞 本研究の推進にあたり、「SICE 力学系・生物系の本質から制御を考える調査研究会」における調査研究が大変参考になりました。関係者の皆様に深く感謝いたします。

本研究の必要性は、レスキューロボットの開発のなかから明らかとなったものであり、NPO 国際レスキューシステム研究機構での研究活動が大変参考になりました。関係者の皆様に深く感謝いたします。

本研究の一部は、科学研究費補助金 若手研究 (b) 課題番号 17700153「受動知能と能動知能による知能の解釈と多自由度ロボットの自律制御への応用」のもとで行なわれました。

参 考 文 献

- 1) R. Pfeifer, C. Scheier 著, 石黒章夫, 小林宏, 細田耕 監訳: 知の創成, 共立出版 (2001)
- 2) 佐々木, 松野, 三嶋: アフォーダンス, 青土社 (1997)
- 3) 石黒, 川勝: 制御系と身体系の有機的調和を目指して—多脚歩行ロボットを用いた事例研究—, 計測と制御, **42**-9, 712/717 (2003)
- 4) 有本 卓: 新版ロボットの力学と制御, 朝倉書店 (2002)
- 5) J.J. Gibson 著, 古崎, 古崎, 辻, 村瀬 共訳: ギブソン 生

- 態学的視覚論 ヒトの知覚世界を探る, サイエンス社 (1985)
- 6) 佐々木, 三嶋 編訳: アフォーダンスの構想, 東京大学出版会 (2001)
- 7) 三嶋博之: エコロジカル・マインド, 日本放送出版協会 (2000)
- 8) 松野文俊: 生物に学ぶ機械と制御-ダイナミクスベーストインテリジェンス-, 計測と制御, **42**-9, 699/703 (2003)
- 9) 大須賀公一: モデルベースト制御からダイナミクスベースト制御へ-ロボットにおける「表モデル」と「裏モデル」-, システム/制御/情報, **43**-2, 94/100 (1999)
- 10) 浅野, 羅, 山北: 受動歩行を規範とした2足ロボットの歩容生成と制御, 日本ロボット学会誌, **22**-1, 130/139 (2004)
- 11) 土屋 俊: AI 事典第2版, 共立出版 (2003)
- 12) 辻 三郎: 知的ロボティクスの幾つかの問題, 日本ロボット学会誌, **9**-1, 79/84 (1991)
- 13) Brooks, R. A.: A robust layered control system for a mobile robot, IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-2, 14/23 (1986)
- 14) 田川, 川口, 井上, 羽田: 遺伝的アルゴリズムとアフォーダンスを用いた知能ロボットの創発, 日本ロボット学会誌, **17**-7, 1023/1030 (1999)
- 15) 李, 公文, 足立: 強化学習ロボットによるアフォーダンスの利用, 人工知能学会論文誌, **16**-1, 94/101 (2001)

[著 者 紹 介]

伊 藤 一 之 (正会員)

2002年東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻博士後期課程修了。岡山大学助手を経て、2005年法政大学システム制御工学科専任講師となり現在に至る。2004年よりNPO国際レスキューシステム研究機構 客員研究員兼任。2003年日本ロボット学会研究奨励賞受賞。

福 森 嘉 孝

2005年岡山大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了。同年セリオ東洋グループに入社現在に至る。